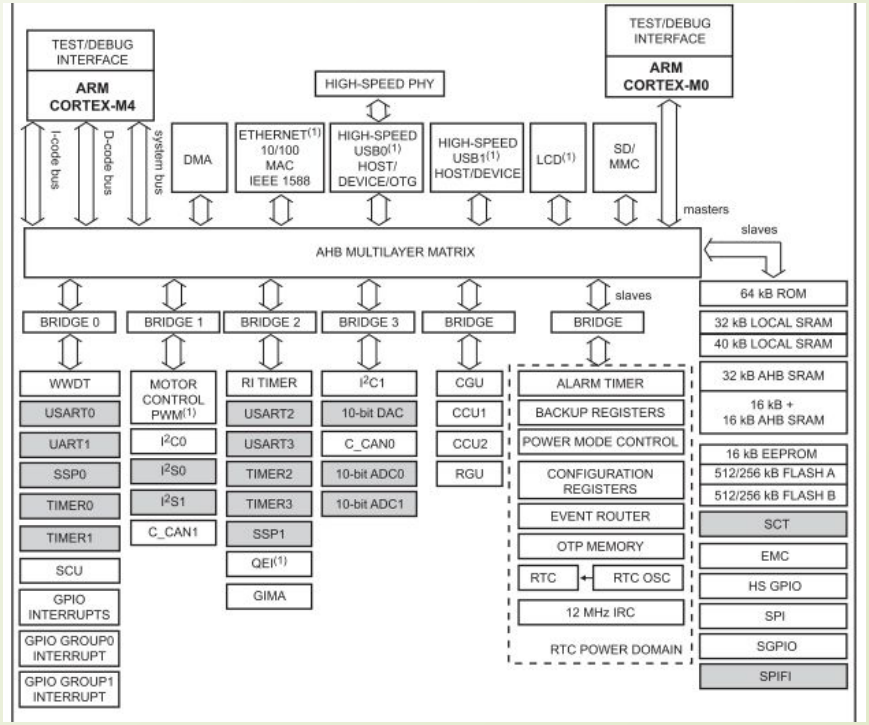
Встроенные Системы Управления

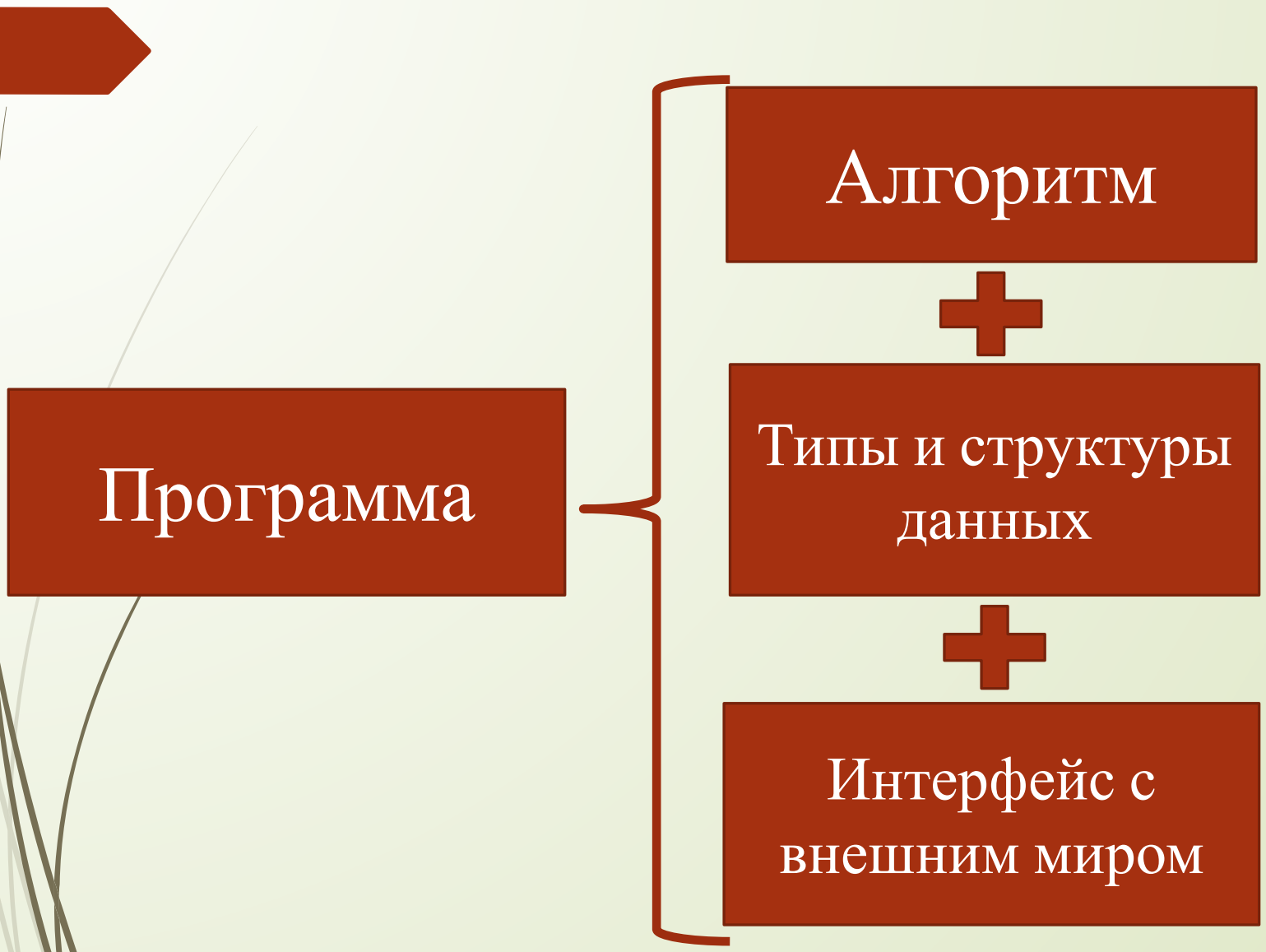
Микроконтроллер

- Микросхема, содержащая в себе функционально законченный компьютер – с ядром (процессором), памятью и периферийными устройствами.
- Программирование микроконтроллера – не только описание алгоритма, но и решение задачи управления входящими в состав микроконтроллера периферийными устройствами.



Для обработки информации и принятия решений, необходимо:

- Превратить входную информацию в данные, пригодные для хранения в памяти (то есть, превратить в **числа**);
- **Расположить** данные в памяти определенным образом;
- Выполнить определенные **действия над числами**, хранящимися в памяти;
- Куда-то выдать **результат**.


Программа
Алгоритм
+
Типы и структуры данных
+
Интерфейс с внешним миром

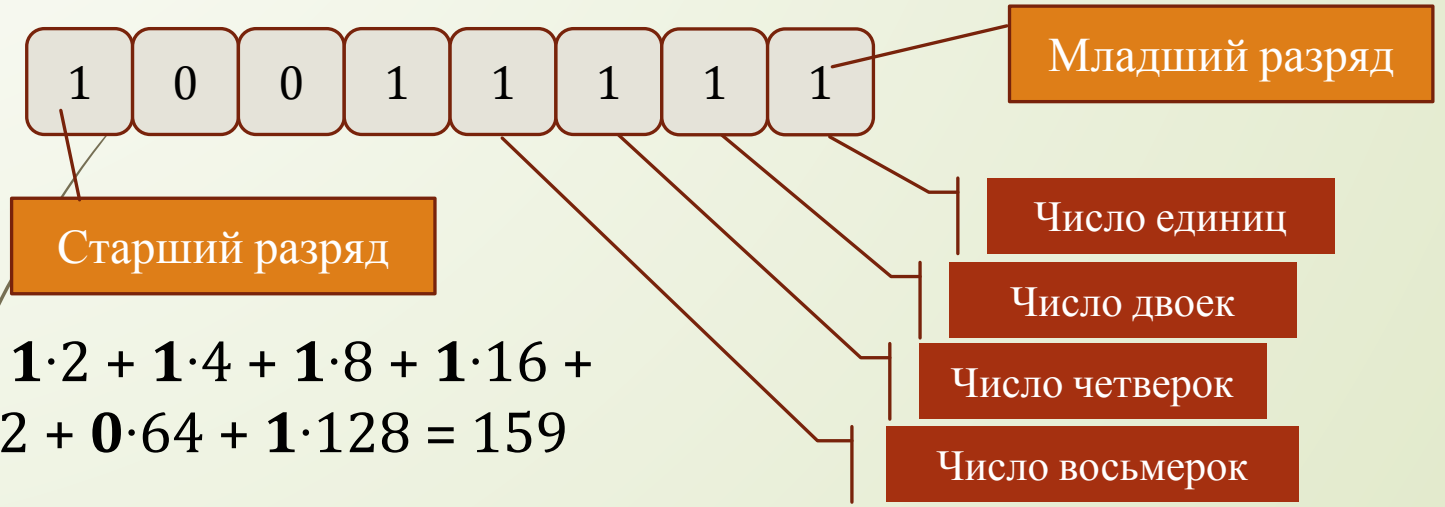
Элементы алгоритмов

- **Следование.** Последовательность действий, выполняющихся друг за другом.
- **Условие.** Точка принятия решения, после которой выполнение алгоритма пойдет по одному из нескольких возможных путей.
- **Цикл.** Ряд действий, выполняющихся неоднократно над разными или одними и теми же исходными данными.

Числа

9 + **5**·10 + **1**·100 = 159 – это **десятичная** запись числа

- **Двоичная** система использует всего **два значка** для записи чисел.
- Соответственно, **младший** разряд хранит число **единиц**, следующий за ним – число **двоек**, следующий – число **четверок** и т.д.
- Что хранит **старший** разряд – зависит от размера ячейки памяти



1 + **1**·2 + **1**·4 + **1**·8 + **1**·16 +
0·32 + **0**·64 + **1**·128 = 159

- Двоичная система используется для хранения чисел в памяти компьютера, для их обработки в процессоре и, как правило, для передачи по линиям связи.

Числа

Размер ячеек памяти как правило кратен **восьми** двоичным разрядам (восьми **битам**):

Размер ячейки	Объем	Диапазон значений	
		В двоичном виде	В десятичном виде*
8 бит	Байт	0000 0000 – 1111 1111	0 – 255
16 бит	Слово (Короткое слово)	0000 0000 0000 0000 – 1111 1111 1111 1111	0 – 65 535
32 бита	Длинное слово	0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 – 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111	0 – 4 294 967 295
64 бита	64-битное слово	0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 0000 – 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111 1111	0 – 18 446 744 073 709 551 615

Зачастую удобнее использовать **шестнадцатеричную** запись чисел

Взаимодействие вычислительной системы с внешним миром

Устройства ввода:
- Кнопки, клавиши, переключатели, энкодеры;
- Датчики;
- Источники потоковых данных (аудио, видео).

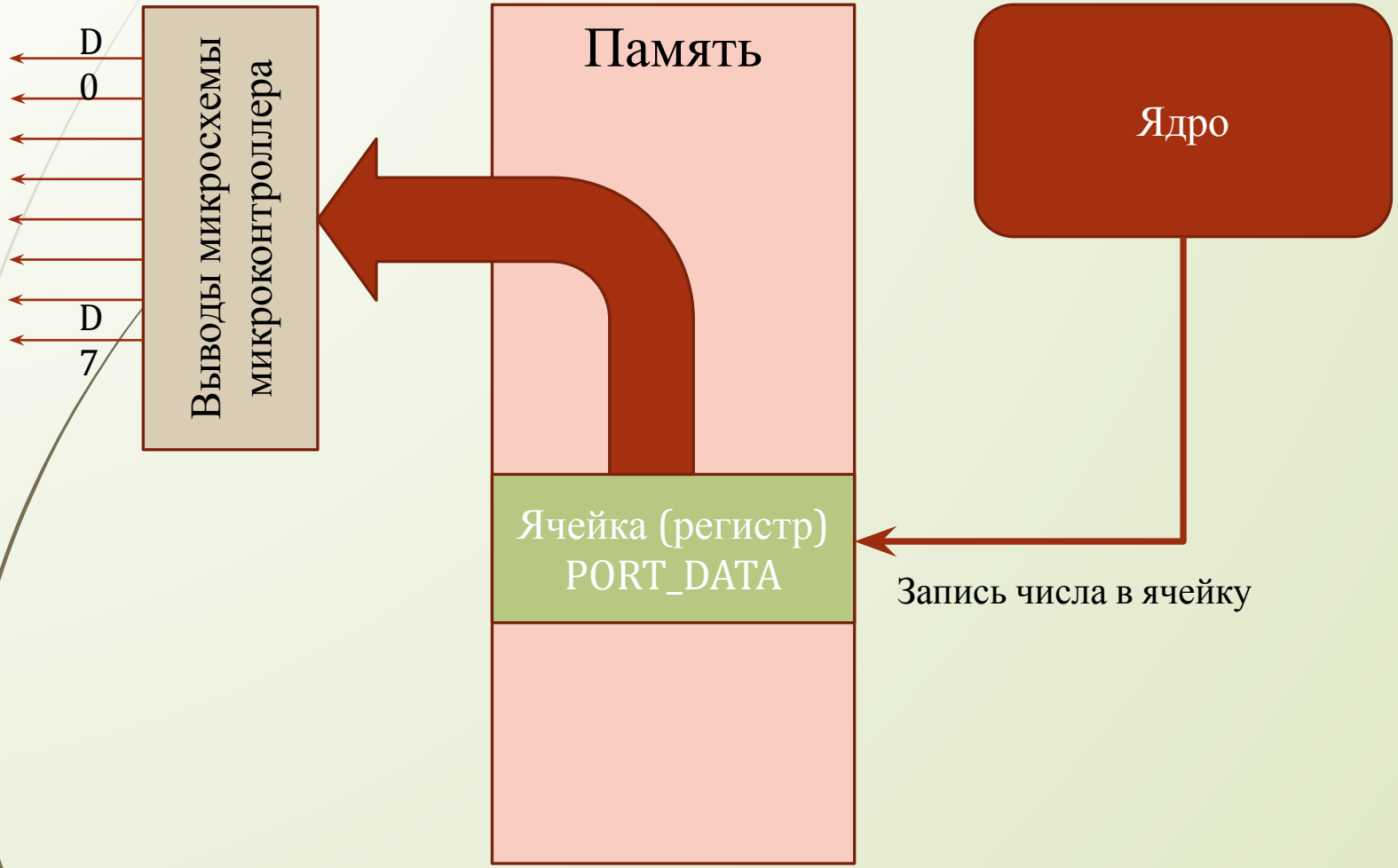
Устройства вывода:
- Индикаторы (дискретные, знакосинтезирующие);
- Графические дисплеи;
- Цифро-аналоговые преобразователи;
- Исполнительные устройства (реле, электродвигатели и т.п.);
- Устройства вывода потоковых данных (аудио, видео).

Устройства передачи данных:
- Внутренние интерфейсы (шины I2C, SPI, UART и т.п.);
- Межблочные интерфейсы (шины RS232, RS422/485, CAN, …);
- Внешние интерфейсы (Ethernet, USB, Bluetooth, WiFi, …).

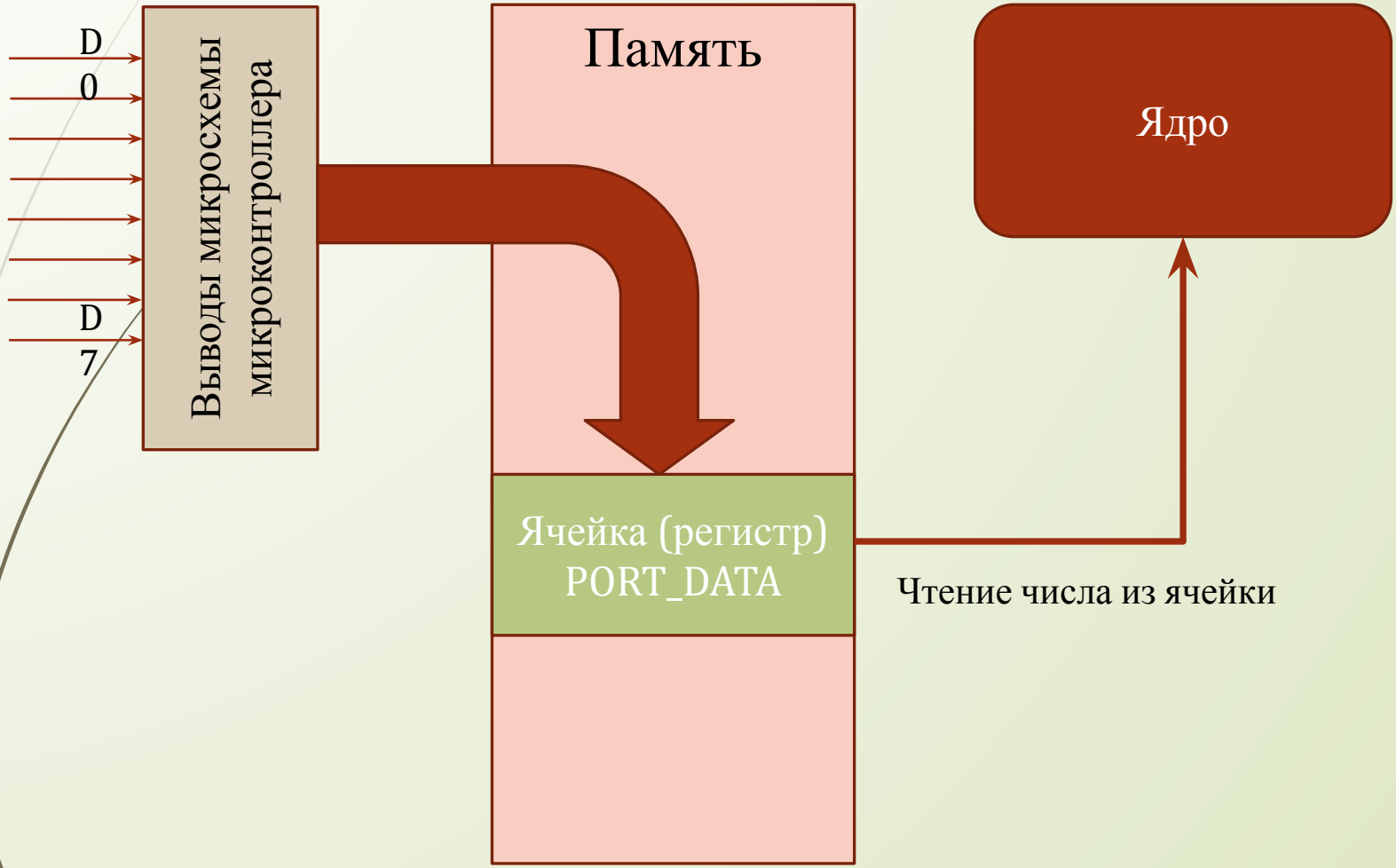
Взаимодействие вычислительной системы с внешним миром

- Все внешние устройства, как правило, представлены для ядра в виде выделенных областей памяти.
- Программа, **читая** содержимое выделенных областей, определяет состояние устройства и получает данные из внешнего мира.
- Программа, **изменяя** содержимое областей памяти, меняет поведение устройства и отправляет данные во внешний мир.

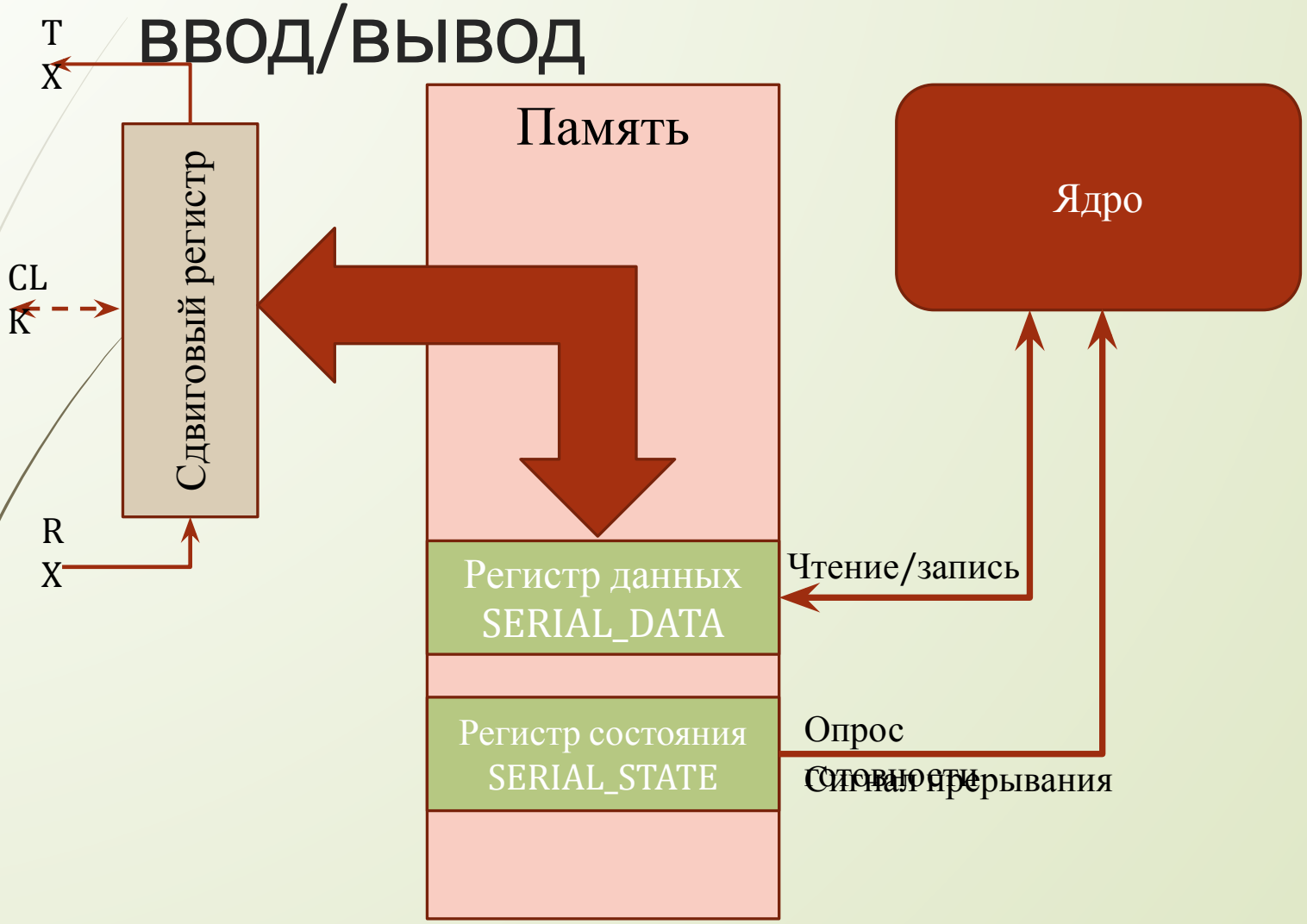
Параллельный вывод



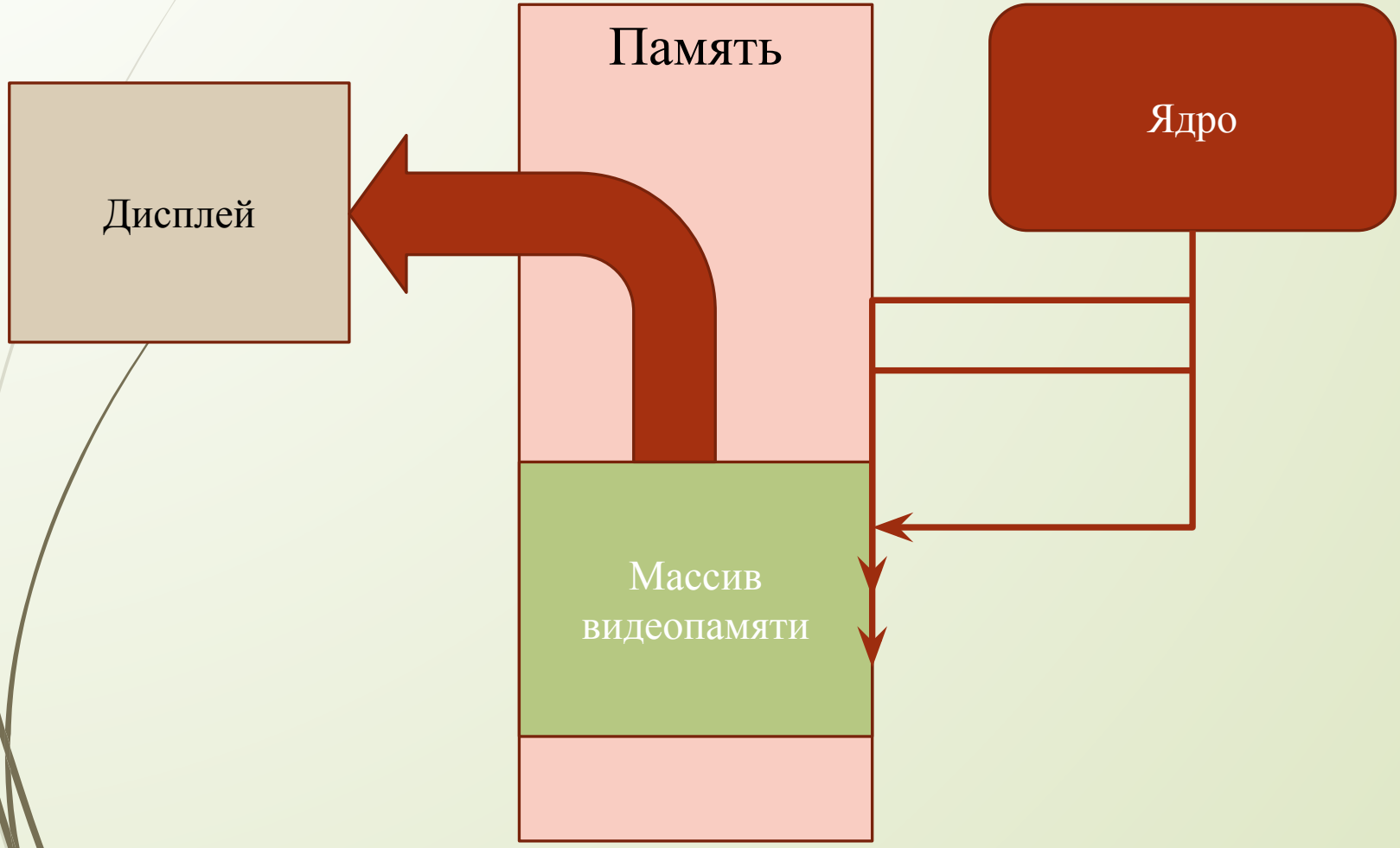
Параллельный ввод



Последовательный ввод/вывод



Потоковый вывод



Язык Си

- Программа на языке Си представляет собой набор текстовых файлов (в простейшем случае – один текстовый файл).
- Текст программы состоит из инструкций (*операторов*), разделенных знаком «;».
- Операторы можно условно поделить на три категории:
  - описание данных;
  - вычисление;
  - управление;

Переменные

Переменная – это область в памяти компьютера, которая имеет имя и хранит некоторое значение.

- Значение переменной может меняться во время выполнения программы.
- При записи в ячейку нового значения старое стирается.

Тип переменной – от него зависит размер области памяти и то, как именно в ней хранятся данные:

- **int** – целое число (В ОС Windows 32 - 4 байта)
- **float** – вещественное число, *floating point* (4 байта)
- **char** – символ, *character* (1 байт)
- … и много других разных типов…

Объявление переменных

- Объявление переменной – это описание переменной, которая в дальнейшем будет использоваться в программе. Переменная объявляется для того, чтобы компилятор знал, где и как хранить данные в памяти.
- Объявление переменной представляет из себя запись, состоящую из названия типа переменной и имени переменной.
- В языке Си переменную можно объявить в любом месте файла с программой (но до её первого использования).

Объявление переменной

- Синтаксис оператора объявления:

  имя_типа **имя_переменной;**

- Тип переменной определяет, какие данные в ней хранятся
- В конце оператора объявления переменной ставится символ «;»
- Имена переменных должны быть информативными, но не слишком длинными.
- Место в памяти для размещения переменной выделяется автоматически, в процессе компиляции программы, на этапе так называемой компоновки.

Типы переменных

Тип переменной (и вообще тип любых данных) – указание компилятору на то, сколько памяти выделить для хранения переменной и как с ней обращаться (как рассматривать ее содержимое).

Типы скалярных переменных

Название в языке С	Описание	Диапазон значений
unsigned char	Неотрицательное (беззнаковое) целое число, занимает **одну** ячейку памяти (8 бит)	0…255
signed char	Целое число со знаком, занимает 8 бит	-128…+127
unsigned short	Беззнаковое целое, 16 бит	0…65535
signed short	Целое со знаком, 16 бит	-32768…+32767
unsigned long	Беззнаковое целое, 32 бита	0…4 294 967 295
signed long	Целое со знаком, 32 бита	-2147483648…2147483647
unsigned long long	Беззнаковое целое, 64 бита	0…18446744073709551614
signed long long	Целое со знаком, 64 бита	-9223372036854775808… 9223372036854775807
float	Вещественное число одинарной точности, 32 бита	-3,4E+38 … +3,4E+38
double	Вещественное число двойной точности, 64 бита (или больше)	-1,7E+308 … +1,7E+308
int	Целое число, размер которого определяется платформой	???

- Слова «**unsigned**» / «**signed**» можно не указывать, однако в этом случае результирующий тип определяется компилятором

Функция получения размера переменной

- В языке Си есть специальная встроенная функция **sizeof()**, которая может посчитать размер переменной *в байтах*:

```
char x;
int x_size = sizeof(x);   // x_size = 1
long count;
int cs = sizeof(count);   // cs = 4
```

- В качестве аргумента функции sizeof можно использовать просто имя типа:

```
int s = sizeof(short);    // s = 2
```

Константы

Константами называют числа, символы и строки, встречающиеся в тексте программы в явном виде. Например, в выражении a = b * 3 + 5 числа 3 и 5 – константы (тогда как a и b – это имена переменных).

Запись чисел (числовых констант) в Си:

```
255   // десятичное число
0xFF  // шестнадцатеричное число
'x'   // значение, соответствующее ASCII коду символа
3.14  // натуральное число с фиксированной точкой
1.1E+3// натуральное число с плавающей точкой
```

Оператор присваивания

- Присваивание – это запись значения в переменную

имя_переменной = выражение;

- Оператор присваивания состоит из имени переменной, знака «=» и *выражения*, значение которого вычисляется в процессе выполнения оператора:

```
Result = 1;
Average = (a + b) / 2;
count = count + 1;
```

Переменные – регистры управления

- Все периферийные устройства микроконтроллера управляются при помощи набора регистров, находящихся в общем адресном пространстве.
- Для управления устройствами объявляют переменные, адреса размещения которых соответствует адресам регистров устройств.
- Имена таких переменных как правило, объявлены в заголовочном файле, поставляемом производителем микроконтроллера.

Переменные – регистры управления

- Например, в микроконтроллере LPC2368 состояние порта ввода-вывода управляется регистрами FIOnPIN, где n – номер порта.
- В программе доступны переменные FIO0PIN, FIO1PIN и т.д.
- Например, установка лог. «1» на третьем выводе порта 1 соответствует установке третьего бита в переменной FIO1PIN:

```
FIO1PIN |= (1 << 3);
```

Table 245. Register overview: GPIO port (base address 0x400F 4000)
The highest pin number on each port depends on package size (see Table 240).

Name	Access	Address offset	Description	Reset value	Width	Reference
PIN4	R/W	0x2110	Port pin register port 4	ext[1]	word (32 bit)	Table 263
PIN5	R/W	0x2114	Port pin register port 5	ext[1]	word (32 bit)	Table 263
PIN6	R/W	0x2118	Port pin register port 6	ext[1]	word (32 bit)	Table 263
PIN7	R/W	0x211C	Port pin register port 7	ext[1]	word (32 bit)	Table 263
MPIN0	R/W	0x2180	Masked port register port 0	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
MPIN1	R/W	0x2184	Masked port register port 1	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
MPIN2	R/W	0x2188	Masked port register port 2	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
MPIN3	R/W	0x218C	Masked port register port 3	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
MPIN4	R/W	0x2190	Masked port register port 4	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
MPIN5	R/W	0x2194	Masked port register port 5	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
MPIN6	R/W	0x2198	Masked port register port 6	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
MPIN7	R/W	0x219C	Masked port register port 7	ext[1]	word (32 bit)	Table 264
SET0	R/W	0x2200	Write: Set register for port 0 Read: output bits for port 0	0	word (32 bit)	Table 265

Выражения в языке С

- Везде, где согласно правилу написания того или иного оператора требуется присутствие того или иного числового значения, записывается ***выражение*** языка С.
- Любое выражение состоит из ***операндов*** (переменных или констант), соединенных ***знаками операций***. Знак операции – это символ или группа символов, которые сообщают компилятору о необходимости выполнения определенных арифметических или логических действий над операндами.
- Операции в выражениях выполняются в строгой последовательности согласно их приоритету.
- Порядок выполнения операций может регулироваться с помощью круглых скобок.
- По количеству операндов различают ***унарные*** и ***бинарные*** операции. У унарных операций один операнд, а у бинарных их два.

Арифметические

Знак операции	Описание операции	Примеры использования
()	Вызов функции	a = get_data**()**;
[]	Обращение к элементу массива	b = table**[**i**]**;
.	Обращение к элементу структуры	c = settings**.**volume;
-	Изменение знака числа	x = **-**y;
++	Увеличение числа на единицу	i**++**;
--	Уменьшение числа на единицу	j**--**;
&	Взятие адреса переменной	address = **&**x;
(тип)	Преобразование типа	n = **(short)**b;
*	Умножение	a = b * c;
/	Деление	x = y / 25;
%	Остаток от деления	k = x **%** 10;
+	Сложение	n = m **+** n;
-	Вычитание	a = b **-** 10;
+=, -=, *=, /=, …	Составное присваивание (изменение значения переменной)	n **+=** 2; a **/=** 8;

Сложные типы данных

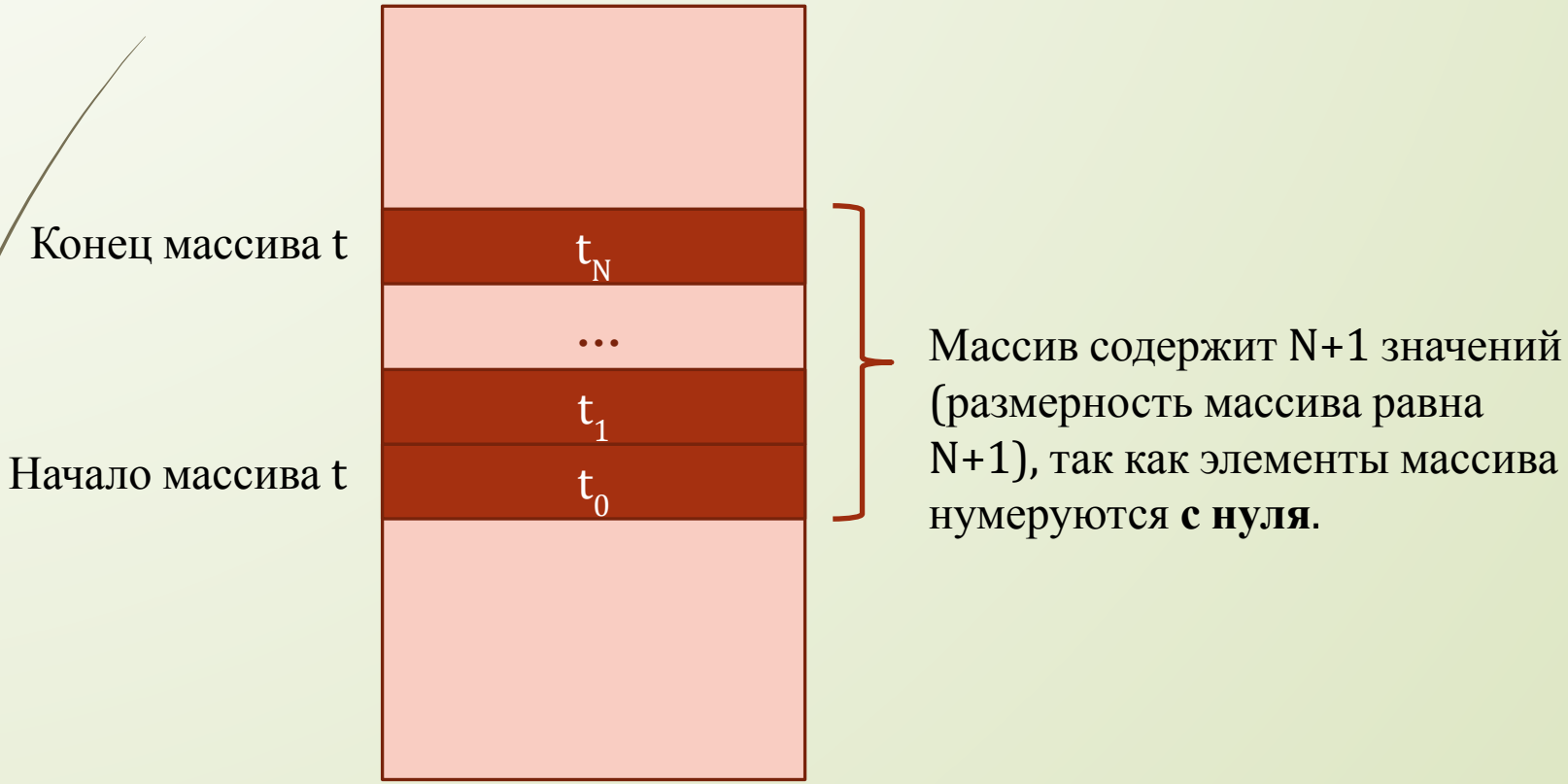
Сложные типы состоят из нескольких простых (скалярных) типов. Сложные типы в Си – это массивы, структуры и объединения.

Массивы

- Массив или вектор – переменная, хранящая ряд значений одного типа

$$t_0, t_1, t_2, \ldots, t_N$$

- Значения хранятся в памяти подряд, друг за другом
- Объем занимаемой памяти определяется **типом** значений и их общим количеством:



Массивы

Массив объявляется так же, как и простая (скалярная) переменная, однако после имени в квадратных скобках указывается количество элементов:

```
unsigned char data[10]; // объявление массива из 10 байтов

signed short t[120]; // объявление массива из 120 чисел типа короткое
                     // целое со знаком
```

- Можно сразу же при объявлении заполнить массив значениями. В этом случае после знака «=» ставятся фигурные скобки и перечисляются значения элементов массива друг за другом через запятую:

```
// массив, хранящий число дней в месяцах:
char DayInMonth[12] = {31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30,
31};
```

- В этом случае размерность можно вообще не указывать, так как она автоматически определяется по количеству перечисленных значений:

```
char DayInMonth[] = {31, 28, 31, 30, 31, 30, 31, 31, 30, 31, 30, 31};
```

Работа с элементами массивов

Для доступа к элементу массива в квадратных скобках после имени указывают номер или *индекс* элемента:

```
// в переменную innerT записываем значение t5
signed short innerT = t[5];
```

- Элементы массивов нумеруются с **нуля**
- В качестве индекса элемента можно указывать не только числовые константы, но и вообще любые выражения:

```
// подсчет суммы дней в году
short sum = 0;
char i;
for (i = 0; i < 12; i++)
    sum += DayInMonth[i];
```

Работа с элементами массивов

Для того чтобы посчитать количество элементов массива, можно воспользоваться функцией **sizeof**(), разделив размер массива в байтах на размер одного элемента:

```
signed short t[] = {10, 150, 2500, 64, -180};
int tsz = sizeof(t) / sizeof(short); // tsz = 5
```

Если массив состоит из байтов (тип char), то sizeof() просто возвращает размер такого массива, так как размер одного элемента в нем – 1 байт:

```
// подсчет суммы дней в году
short sum = 0;
char i;
for (i = 0; i < sizeof(DayInMonth); i++)
    sum += DayInMonth[i];
```

Строки символов

Строка символов в языке Си считается массивом из 8-разрядных чисел (значений типа char). [На самом деле это не всегда так!]

- В конце любой строки компилятор всегда добавляет невидимый символ с кодом 0 (‘\0’) – признак конца строки

```
char string[25];  // строка длинной до 24 символов
```

- Для заполнения строки конкретным значением после знака «=» просто пишется строковая константа – символы в двойных кавычках. Признак конца строки (символ с нулевым кодом) добавится автоматически:

```
char prompt[] = "Hello";  // массив займет 6 байтов в памяти
```

- В языке С есть набор системных функций для работы со строками (вычисление длины, поиск фрагментов, копирование и т.п.). Заголовки этих функций находятся в подключаемом файле **string.h**.

Строковые функции

Функция	Описание	Примеры использования
strlen(s)	Вычисление длины строки	`int len = strlen(mes);`
strcpy(s,d)	Копирование строки d в строку s	`strcpy(buf, mes);`
strncpy(s,d,n)	Копирование n символов строки d в строку s	`strcpy(buf, mes, 5);`
strcat(s,d)	Добавление строки d в конец строки s	`strcat(mes, “вкл”);`
strncat(s,d,n)	Добавление n символов строки d в конец строки s	`strcat(mes, buf, 8);`
strchr(s,c)	Поиск первого вхождения символа c в строку s	`char* pos = strchr(buf, ’:’);`
strstr(s1,s2)	Поиск первого вхождения строки s2 в строку s1	`char* pos = strstr(buf, “HTTP/”);`
strcmp(s1,s2)	Сравнение строк	`if (!strcmp(mes,”OK”)) {...}`
strncmp(s1,s2,n)	Сравнение первых n символов в строках	`if (!strncmp(ans,”Content-Length: ”,15)) {...}`

Строки символов

Так как в конце строки стоит признак конца строки (символ с кодом 0), то фактическая длина строки может быть *меньше* чем размер массива, предназначенного для её хранения.

```
char string[25];  // строка длинной до 24 символов
int res = 1000;
sprintf(string, “Result = %d”, res);
```

- То есть, можно выделить сразу много памяти для хранения разных строк! Однако, с другой стороны, всегда остается опасность переполнения массива, если действовать не аккуратно:

```
char message[] = “Hi! Hello from my SuPeR PuPeR Software!”;
char buffer[16];
strcpy(buffer, message);
```

- А надо так:

```
strncpy(buffer, message, sizeof(buffer)-1);
```

Структуры

- Язык Си позволяет объединять переменные разных типов в структуры:

```
struct Point
{
    signed short x;
    signed short y;
    unsigned long color;
};
```

- Ключевое слово **struct** говорит, что это составной тип (структура). Далее в фигурных скобках перечисляются элементы, входящие в новый составной тип.
- В данном случае описана структура с именем Point, хранящая информацию о точке на экране – ее координаты (x и y) и цвет (color).

Структуры

- Для объявления переменной типа структуры пишут ключевое слово struct, затем имя структуры, а затем имя переменной:

```
struct Point pixel;
```

- Для доступа к элементу структуры используется символ точки, который разделяет имя переменной и имя элемента структуры:

```
pixel.x = 10;
pixel.y = 25;
```

Расположение структур в памяти

- Элементы структуры хранятся последовательно, друг за другом, но с учетом выравнивания по границам битов/байта/слова/длинного слова.

```
struct Point
{
    signed short x;
    signed short y;
    unsigned long color;
}__attribute__ ((__packed__));
```

Байт 0	**x**
Байт 1	
Байт 2	**y**
Байт 3	
Байт 4	**color**
Байт 5	
Байт 6	
Байт 7	

По границам байтов или слов
`(__attribute__ ((__packed__)))`

Байт 0	**x**
Байт 1	
Байт 2	**-**
Байт 3	**-**
Байт 4	**y**
Байт 5	
Байт 6	**-**
Байт 7	**-**
Байт 8	**color**
Байт 9	
Байт 10	
Байт 11	

По границам двойных слов

Структуры с битовыми полями

- Для доступа к отдельным битам и просто для экономии памяти можно указать размеры элементов структуры с точностью до одного *бита*!
- Порядок следования битов – от младших к старшим.

```
struct /* Watchdog Timer Control Register */
{
  unsigned char WDTIN : 1;
  unsigned char WDTRS : 1;
  unsigned char WDTEN : 1;
  unsigned char  : 1;
  unsigned char WDTPR : 1;
  unsigned char WINBEN : 1;
  unsigned char  : 2;
} WDTCON_bit;
```

B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	B0
-	-	WINBEN	WDTPR	-	WDTEN	WDTRS	WDTIN

Объединения

- Объединения – это способ описать одну и ту же область памяти по разному.
- Объединение занимает в памяти столько байт, сколько занимает самой большой его элемент.

```
union LongNumber
{
    unsigned long Long32;
    unsigned char Byte[4];
};

union LongNumber num;
num.Long32 = 0x12345678;
printf("Bytes are: %x:%x:%x:%x", num.Byte[0],
            num.Byte[1], num.Byte[2], num.Byte[3]);
```

```
Bytes are: 78:56:34:12
```

Объединения

- Объединения удобно использовать для работы с пакетами данных.

```
struct Message_str
{
     unsigned char Header
     unsigned char Command;
     unsigned char Parameters[4];
     unsigned char Csum;
}__attribute__ ((__packed__));

union Packet
{
     unsigned char Buffer[sizeof(struct Message_str)];
     struct Message_str Message;
};

union Packet incoming;

ReceivePacket(&incoming.Buffer, sizeof(union Packet));
if (incoming.Message.Command == START)
{
     doStart();
}
...
```

Header	1 байт
Command	1 байт
Params	4 байта
Csum	1 байт

Операции доступа к данным

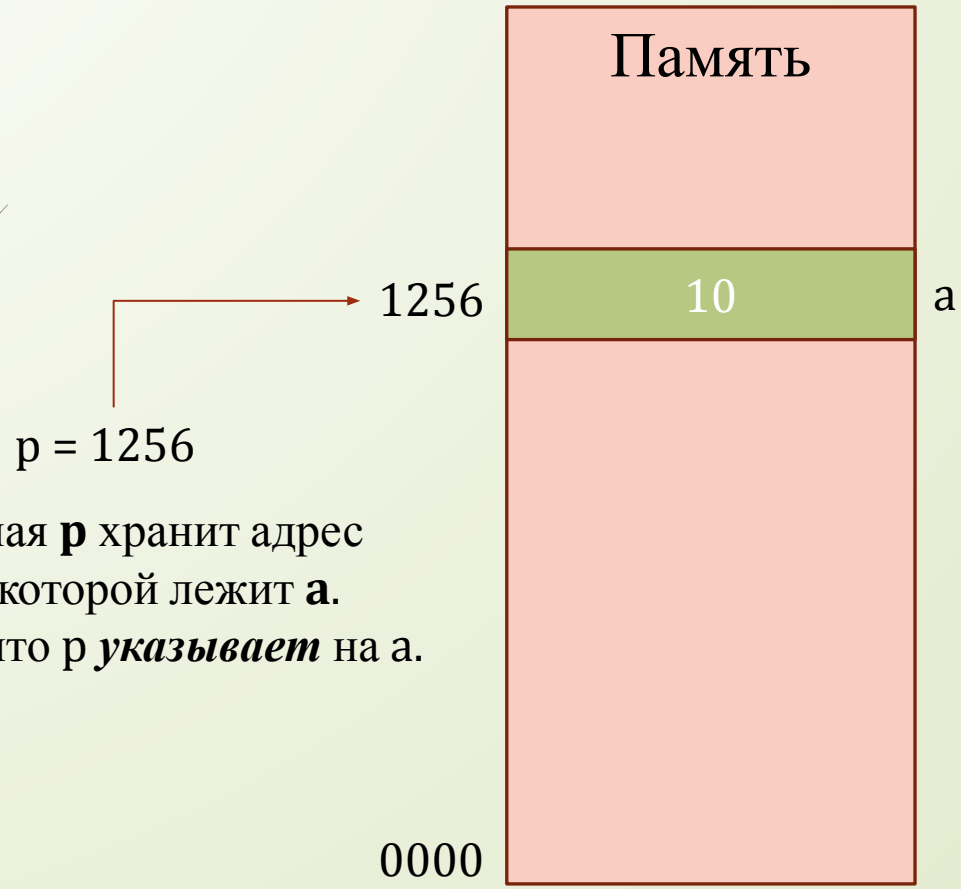
Знак операции	Описание операции	Примеры использования
()	Вызов функции	a = get_data();
[]	Обращение к элементу массива	b = table[i];
.	Обращение к элементу структуры	c = settings.volume;

Указатели

Указатели – это переменные, хранящие адреса других переменных (то есть адреса ячеек в памяти).

Указатели

- Указатель – это переменная, которая хранит *адрес* ячейки памяти.




```
char a = 10;

char* p = &a;
```

Переменная **p** хранит адрес ячейки, в которой лежит **a**. Говорят, что p ***указывает*** на a.

Операция «&» называется «взятие адреса».

Объявление переменных-указателей

- При объявлении обычно задают тип данных, на которые будет указывать переменная:

```
имя_типа* имя_переменной;
```

Например:

```
char* text_ptr;
unsigned short* current_temp;
```

- Тип нужен для контроля за правильностью вызова функций с аргументами-указателями и для выполнения арифметических операций над указателями.
- На самом деле переменные-указатели – суть обычные числа с разрядностью, равной разрядности *шины адреса* системы. Они хранят числа – адреса ячеек.

Операции с указателями

- Для доступа к содержимому ячейки, на которую указывает указатель, перед именем переменной-указателя пишут значок звездочки «*»:

```
signed short t[25];
...
signed short* t_data = &t[0];//t_data указывает на t0
signed short t0 = *t_data;
```

- К переменным-указателям можно прибавлять и вычитать константы. При этом указатель «сдвигается» на величину, кратную размеру типа:

```
// переходим к 5-му элементу массива t
t_data = t_data + 5;
signed short t5 = *t_data;
```

Операции с указателями

- Для доступа к полю структуры, на которую указывает указатель, между именем переменной-указателя именем поя структуры пишут стрелочку «->»:

```
struct Point
{
    signed short x;
    signed short y;
    unsigned long color;
};

double GetDistance(struct Point* p1, struct Point* p2)
{
    return sqrt((p1->x – p2->x) * (p1->x – p2->x) -
            (p1->y – p2->y) * (p1->y – p2->y));
}
```

Операции с указателями

- Указатели используют для работы с массивами и буферами.

```
// поиск максимального числа в массиве
long GetMax(long* data, int len)
{
    int i;
    // сначала максимальным считаем первое число
    long max = *data;
    for (i = 1; i < len; i++)
    {
        data++; // переходим к следующему числу
        if (*data > max) // если нашли новый максимум,...
            max = *data; // ... то запоминаем новое значение
    }
    return max;
}
```

Операции с указателями

- После имени переменной-указателя можно поставить квадратные скобки с индексом и работать с указателем как с обычным массивом.

```
// вычисление контрольной суммы массива
long CSum(long* data, int len)
{
    int i;
    long csum = 0;
    for (i = 0; i < len; i++)
        csum += data[i];
    return csum;
}
```

Указатель на физическую ячейку

- Можно объявить указатель, указывающий на ячейку с заданным адресом. Делается это при помощи операции приведения типов (ведь указатель – это просто число!)

```
#define GPIO_PORTB_DATA_R       (*((volatile unsigned long *)0x400053FC))
#define GPIO_PORTB_DIR_R        (*((volatile unsigned long *)0x40005400))
#define GPIO_PORTB_IS_R         (*((volatile unsigned long *)0x40005404))
```

адрес ячейки

указатель на ячейку

содержимое ячейки

- Вообще-то способов доступа к конкретному адресу – множество! Например, некоторые компиляторы позволяют объявлять переменные с явным указанием адреса:

```
__no_init volatile unsigned char TL0 @ 0x8A; /* Timer 0, Low Byte */
__no_init volatile unsigned char TL1 @ 0x8B; /* Timer 1, Low Byte */
```

Указатель на неопределённый тип

- В ряде случаев бывает нужна переменная, которая просто хранит адрес ячейки, без конкретного указания на то, что же в ней лежит. Такая переменная-указатель объявляется так:

```
void* mem_ptr;
```

- Арифметические операции с такой переменной сдвигают ее с шагом в один байт.
- Для доступа к данным, на которую указывает такая переменная, нужно применить преобразование типов:

```
short t = *((short*)mem_ptr);
```

Функции работы с памятью

- Библиотека string.h, помимо функций работы со строками, содержит средства для работы с кусками памяти. В такие функции передаются указатели типа void*.

Функция	Описание	Примеры использования
memcpy(p1,p2,n)	Копирование n байтов из области, на которую указывает p2, в область, на которую указывает p1. Области не должны перекрываться.	`memcpy((void*)buf1, (void*)in_msg, msg_len);`
memmove(p1,p2,n)	Копирование n байтов из области, на которую указывает p2, в область, на которую указывает p1. Области могут перекрываться (копирование происходит через промежуточный буфер).	`memmove((void*)buf1, (void*)buf2, 25);`
memset(p,b,n)	Заполнение байтом b области размером n, на начало которой указывает p.	`memset((void*)buf, 0, buf_len);`

Управление битами

При управлении внешними устройствами, входящими в состав микроконтроллеров, часто встает задача управления отдельными битами в переменных.

Битовые операции

Знак операции	Описание операции	Примеры использования
~	Поразрядная инверсия	a = ~b;
|	Поразрядная операция ИЛИ	x = a | 0x07;
&	Поразрядная операция И	m = a & 0xF0;
^	Поразрядная операция исключающее ИЛИ	n = a ^ b;
>>	Битовый сдвиг числа вправо	a = b >> 4;
<<	Битовый сдвиг числа влево	a = b << 2;
|=, &=, ^=, >>=, <<=	Составные присваивания (битовые операции с одной переменной)	n |= 0x01; a <<= 8;

Управление битами

Установка в «1»

Операция **ИЛИ** (|) с числом, в котором нужный бит равен **1**:

X | 0 = X

X | 1 = **1**

Было	a|=0x01;	Стало
1100		1101

Сброс в «0»

Операция **И** (&) с числом, в котором нужный бит равен **0**:

X & 0 = **0**

X & 1 = X

Было	a&=0x0E; a&=~0x01;	Стало
0111		0110

Инверсия

Операция **ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ** (^) с числом, в котором нужный бит равен **1**:

X ^ 0 = X

X ^ 1 = $\bar{x}$

Было	a^=0x81;	Стало
1100		0101

Проверка значения

Операция **И** (&) с числом, в котором нужный бит равен **1** (т.е. обнуление всех остальных битов):

X & 0 = 0

X & 1 = X

Было		Стало
1100	(a&0x01)	0000
	(a&0x04)	0100

Блоки операторов в Си

Это способ описания *действий*

Блок операторов

- Операторы могут быть сгруппированы в *блоки* или *составные операторы*:

```
{
    (последовательность операторов)
}
```

- Блок органичен при помощи двух разделителей:
  - левая фигурная скобка «{» обозначает начало блока;
  - правая фигурная скобка «}» обозначает конец блока.
- Внутри блока могут быть объявлены переменные. Такие переменные называются *локальными переменными* блока; они возникают в памяти в начале исполнения блока, при выходе из блока эта память освобождается.

Функции

Функция – основная единица программы в языке Си. В функциях описываются действия, которые должна выполнять программа.

- По сути функция – это поименованный блок операторов, то есть *действия*, имеющие имя.
- Каждая функция имеет имя. Правила образования имен – такие же, как и правила образования имен переменных.
- Перед использованием функцию необходимо объявить или *определить*. В определении функции указывают ее имя, список параметров, тип возвращаемого значения и, наконец, *тело функции* – составной оператор, описывающий действия, выполняемые функцией.
- В любой программе на Си должна быть функция с именем **main** (главная функция). С функции main, в каком бы месте текста она не находилась, начинается выполнение программы.

Функции

Функция определяется следующим образом:

```
тип_функции  имя_функции (список_параметров)
{
    тело_функции
}
```

- Имя типа, стоящее перед именем функции, задает тип возвращаемого функцией значения. Бывают функции, которые не возвращает никакого значения; в этом случае в качестве имени типа используется ключевое слово **void**.
- Список параметров – это список локальных переменных, автоматически получающих значения в момент вызова функции.
- Если функция не использует параметров, то в круглых скобках не пишут ничего или пишут слово void (на самом деле разница тут есть и весьма существенная).

Функции

Функция может получать параметры и возвращать значения:

```
double GetAverage(double a, double b)
{
    double result = (a + b) / 2;
    return result;
}
```

- Оператор **return** прерывает выполнение функции. Если функция возвращает число, после слова **return** необходимо указать выражение, значение которого передастся в качестве результата. return может использоваться в теле функции сколько угодно раз.

```
int GetMax(int a, int b)
{
    if (a > b)
        return a;
    return b;
}
```

Функции

- Если функция не возвращает ничего, вместо типа пишут «**void**»:

```
void BlinkLED (unsigned char period)
{
    LED_PORT |= 0x02;    // включить светодиод
    Pause(period);
    LED_PORT &= ~0x02;   // выключить светодиод
    Pause(period);
}
```

Объявление переменных и область видимости

- Язык Си позволяет объявлять переменные в любом месте файла с исходным текстом, в том числе внутри любой функции.
- Переменные, объявленные «снаружи» функций, доступны в любой функции, описанной ниже этого объявления. Иными словами, **область видимости** таких переменных – **весь файл** (***на самом деле всё ещё сложнее***!).
- Переменные, объявленные внутри функции, доступны только в ней. Такие переменные называются *локальными*. Они создаются всякий раз при вызове функции и уничтожаются при выходе из нее.

```
short x, y;
short GetAverage(short a, short b)
{
  long res=((long)a + (long)b) / 2;
  return (short)res;
}
int main(void)
{
  short z;
  x = 10; y = 12;
  z = GetAverage(x, y);
  printf("z=%d", z);
}
```

Параметры функции также являются ее локальными переменными. Их изменение никак не влияет на объекты, находящиеся за её пределами.

Препроцессор

Непосредственно перед компиляцией текст программы обрабатывается специальным текстовым процессором – т.н. **«препроцессором».**

Препроцессор

- Непосредственно перед компиляцией текст программы обрабатывается специальным текстовым процессором – «**препроцессором**».
- Любая строка, начинающееся с символа решетки (#), является командой для препроцессора.
- Команды препроцессора используются для замены фрагментов текста (макроподстановок), для условной компиляции текста и для включения в текст программы содержимого других файлов.

Препроцессор

- Типичный пример использования макросов (макроподстановок) – замена константы на символическое имя:

```
#define PI 3.14
```

- Если в тексте есть такая строка, то все встречающиеся слова «PI» препроцессор будет автоматически заменять на «3.14». Таким образом, программист может использовать имя PI вместо того, чтобы каждый раз писать значение 3.14.
- Правила хорошего тона рекомендуют вообще избегать любых числовых констант в тексте программы.

Препроцессор

Пример. В программе необходимо в разных местах мигать лампочкой 12 раз.

Тогда в начале текста программы можно записать:

```
#define N 12    // количество миганий
```

Далее в тексте программы можно использовать «N» вместо константы 12:

```
char A;
for(A = 0; A < N; A++)
{
  switch_lamp_on();
  delay(2);
  switch_lamp_off();
  delay(2);
}
```

Препроцессор

- Команды **#include** “имя_файла” или **#include** <имя_файла> позволяют включить в текст программы содержимое другого файла.
- Эта простая возможность позволяет разделить программу на две части – собственно текст и т. н. *заголовочные файлы*.

- В заголовочном файле описывают все необходимые макросы и заголовки функций, которые затем будут доступны из всех файлов, в которые включен данный заголовочный файл.

```
#include <stdio.h>
#include “Project_Def.h”
int main()
{
    // текст программы
}
```

- Традиционно заголовочные файлы имеют расширение **.h**.

Заголовочные файлы

Файл prj_def.h

```
#define N      12
```

Файл 1.c

```
#include “prj_def.h”
void flash_lamp()
{
      int i;
      for (i = 0; i < N; i++)
      {
            switch_lamp_on();
            delay(2);
            switch_lamp_off();
            delay(2);
      }
}
```

Файл 2.c

```
#include “prj_def.h”
void beeps()
{
      int i;
      for (i = 0; i < N; i++)
      {
            beep_on();
            delay(10);
            beep_off();
            delay(10);
      }
}
```

Заголовочные файлы

Заголовочные файлы используют также для *расширения* области видимости функций и глобальных переменных.

Файл motor.h

```
void motor_control(int mode);
int get_motor_mode(void);
```

В .h-файле объявлены *прототипы* функций

Файл main.c

```
#include “motor.h”
void door_mng(void)
{
  switch(door_status)
  {
  case OPEN:
     motor_control(M_MOVE_CCW);
     break;
  case CLOSE:
     motor_control(M_MOVE_CW);
     break;
  case IDLE:
     motor_control(M_STOP);
     break;
  }
}
```

Файл comm.c

```
#include “motor.h”
void parse_cmd(char cmd, char* param)
{
  switch(cmd)
  {
  ...
  case CMD_M_DIRECT_CTRL:
     motor_control((int)param[0]);
     break;
  ...
  }
}
```

Заголовочные файлы

Глобальная переменная system_state хранит текущее состояние системы. Чтобы она была доступна в других файлах, повторим объявление этой переменной с атрибутом **extern** в .h-файле.

Файл prj_def.h

```
extern char system_state;
```

Файл main.c

```
#include “prj_def.h”

char system_state;

void main(void)
{
  system_state = SS_START;
  system_init();
  ...

  if (sensor_ready())
     system_state = SS_IDLE;

  ...
}
```

Файл comm.c

```
#include “prj_def.h”
void parse_cmd(char cmd, char* param)
{
  switch(cmd)
  {
  ...
  case CMD_GET_SYSTEM_STATUS:
     answer[0] = system_state;
     break;
  ...
  }
}
```

Взаимодействие между модулями (файлами) ПО

- *Обмен данными* между разными файлами проекта происходит при помощи:
  - Глобальных переменных
  - Функций-геттеров и функций-сеттеров.

```
char system_state;

void main(void)
{
     ...
}
```

```
extern char system_state;

void parse_cmd(char cmd, char* param)
{
  switch(cmd)
  {
  ...
  case CMD_GET_SYSTEM_STATUS:
     answer[0] = system_state;
     break;
  ...
  }
}
```

Взаимодействие между модулями (файлами) ПО

```c
static char system_state;

void main(void)
{
    ...
}

char get_system_state(void)
{
  return system_state;
}

void set_system_state(char new_state)
{
  system_state = new_state;
}
```

```c
char get_system_state(void);
void set_system_state(char new_state);

void parse_cmd(char cmd, char* param)
{
  switch(cmd)
  {
  ...
  case CMD_GET_SYSTEM_STATUS:
     answer[0] = get_system_state();
     break;
  ...
  }
}
```

Перечисления (перечислимый тип)

Используется, если переменная может принимать строго определённый (перечислимый) набор значений.

Перечислени

- Язык Си позволяет ограничить набор возможных значений переменной и *назвать* каждое из них:

```
enum Motor_cmd
{
    M_STOP,
    M_MOVE_CW,
    M_MOVE_CCW
};
```

- В фигурных скобках перечисляются имена всех возможных значений
- Компилятор самостоятельно выбирает размер переменных перечисляемого типа и числовые значения для имён.
- Можно указать числовые значения «вручную»:

```
enum LED_State
{
    LED_OFF = 0,
    LED_ON = 0xFF
};
```

Перечисления

- Для объявления переменной перечисляемого типа пишут ключевое слово enum, затем имя типа и имя переменной:

```
enum LED_State led1_state, led2_state;
void motor_control(enum Motor_cmd mode);
```

- При использовании переменной перечисляемого типа её значения пишут так, как было указано при объявлении типа:

```
led1_state = LED_OFF;
if (led2_state == LED_ON) {...}
```

- Переменные перечисляемого типа можно преобразовывать в любой целочисленный тип и обратно:

```
answer[0] = (char)led1_state;
motor_control((enum Motor_cmd)command[2]);
```

Приёмы программирования встроенных систем

При написании ПО для микроконтроллеров используют ряд стандартных решений

Приемы программирования встроенных систем

- Нисходящее и восходящее программирование: правильное проектирование набора функций
- Повсеместное использование машин состояний
- Использование переменных-таймеров для организации периодических событий
- Ожидание событий через последовательный опрос битов готовности устройств и глобальных переменных-флагов
- Синхронизация потоков через переменные-флаги и двойную буферизацию

Проектирование набора функций

Функции управления в программе могут встречаться в трех разных местах:

- Функции главного цикла (или функции главного потока);
- Функции периодических действий;
- Функции обработки событий

```
void main(void)
{
  system_init();
  while (1)
  {
    func_mng();
    motor_mng();
    comm_mng();
    ...
  }
}
```

```
char old_keys;
void key_scan(void)
{
  char new_keys = GetKeys();
  if (new_keys ^ old_keys)
  {
    pressed_keys = new_keys &
        (new_keys ^ old_keys);
  }
  old_keys = new_keys;
}
```

```
void UART_rx_int(void)
{
  char rx_data = UART0_DR;
  onRxChar(rx_data);
}
```

Функции главного цикла

- **Функции главного цикла** вызываются из главного бесконечного цикла программы. Частота вызова – максимально возможная (десятки или сотни кГц)*.
- Функции главного цикла обычно содержит главную машину состояний, реализует задачи опроса датчиков, ожидания событий, управления передачей данных по интерфейсам.
- В системах с низким потреблением (с батарейным питанием) функции главного цикла **отсутствуют** – вместо них процессор обычно спит.

* Особый случай – функции инициализации, вызываемые *до* главного цикла

Функции периодических действий

- **Функции периодических действий** вызываются либо из прерывания от таймера либо из главного цикла при возникновении флажка переполнения таймера. Частота вызова – 1 кГц или 100 Гц.
- Обратите внимание! Эти функции могут вызываться либо в контексте прерывания либо в контексте главного потока!
- В системах с низким потреблением (с батарейным питанием) периодические функции – основа работы всего ПО, именно они содержат главную машину состояний.
- Функции периодических действий можно рассматривать как функции второго (третьего и т.д.) потока в системах с *вытесняющей многозадачностью*.

Функции обработки событий

- **Функция обработки событий** вызываются либо из прерывания от устройства либо из главного цикла при возникновении флажка события.
- Эти функции тоже могут вызываться либо в контексте прерывания либо в контексте главного потока!
- Принципиальная особенность таких функций – их апериодичность, асинхронность по отношению к главному потоку и потокам таймеров. Невозможно предсказать, когда они выполнятся снова. Кстати, вполне возможно, что вообще *никогда*.
- Синхронизация с функциями главного цикла может происходить при помощи двух механизмов:
  - Глобальные переменные - флаги
  - Callback-функции

Проектирование набора функций

- Кроме функций управления в программе должны присутствовать и иные функции – функции вычислений и функции нижнего уровня.
- При *восходящем* программировании – от средств к цели – сначала пишутся функции нижнего уровня, а затем уже – функции управления.
  - Для отладки пишут специальные тестовые функции управления – юнит-тесты или модульные тесты.
- При *нисходящем* программировании - от целей к средствам – сначала проектируются машины состояний и пишутся функции управления. Для функций нижнего уровня пишутся только прототипы.
  - Для отладки вместо настоящих функций нижнего уровня используют функции-имитаторы объектов управления.
  - Высший пилотаж – *кросплатформенная симуляция*, когда ПО встроенной системы отлаживают на «большом» компьютере.

Задачи программирования встроенных систем

Можно выделить четыре типа задач, которые приходится решать при написании программ для встроенных систем:

- Управление устройством (объектом)
- Взаимодействие с пользователем
- Регулирование
- Обмен данными:
  - С внешними устройствами на плате
  - С другими вычислительными системами

Машина состояний

- В основе программирования **систем управления** лежит прием, называемый *программирование машины состояний.*
- Машина состояний – это метод написания программ, в котором каждому состоянию системы сопоставлено некое число («код»), определяющее ее поведение в данный конкретный момент.
- Описав полный набор всех возможных состояний системы, а также правила перехода между этими состояниями, можно написать простую и наглядную программу управления.

Пример задачи с машиной состояний

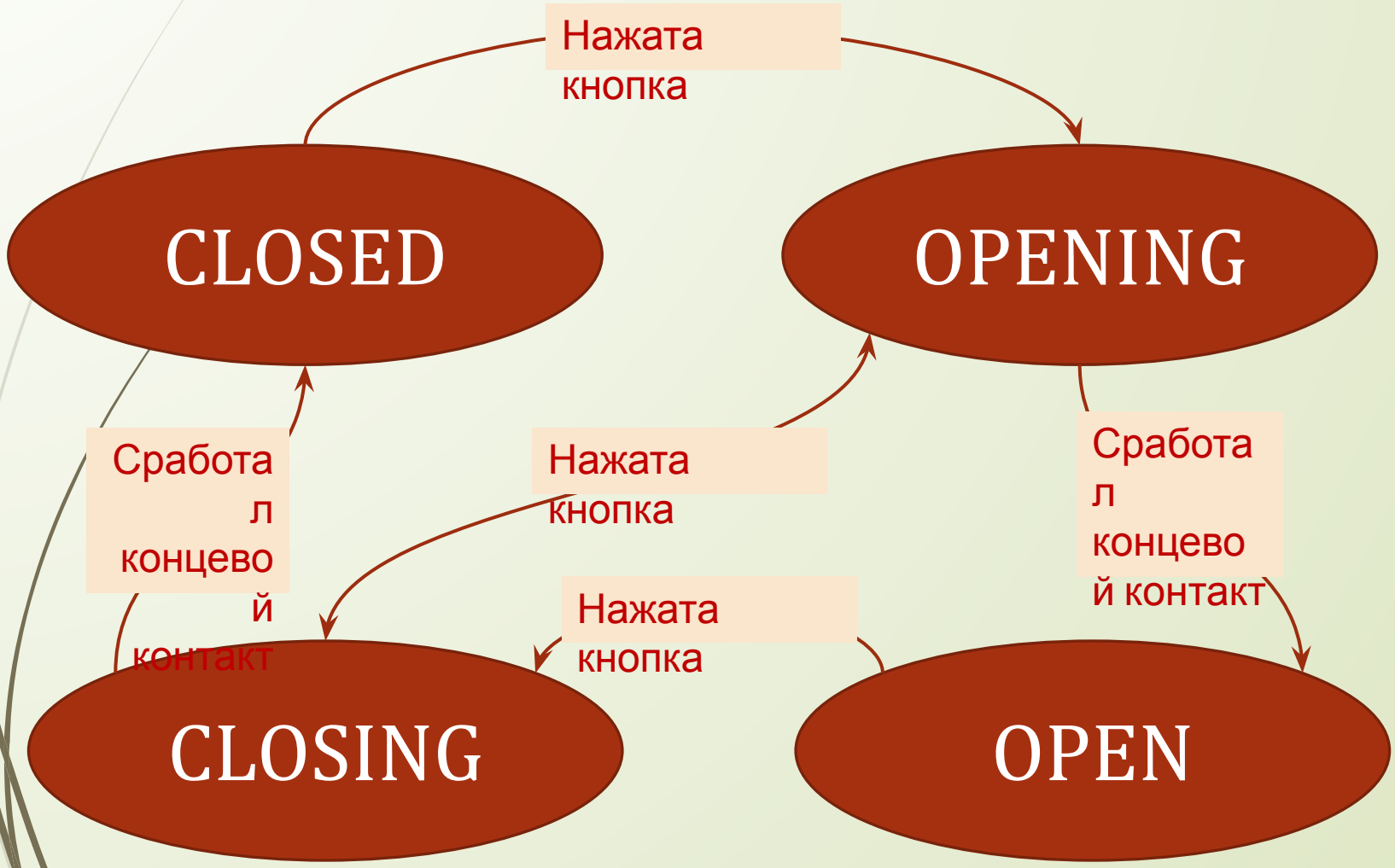
- Рассмотрим задачу управления автоматическими дверьми (например, воротами гаража и т.п.)
- Есть четыре состояния системы:
  - закрыта (обозначим его как CLOSED);
  - дверь открывается (OPENING);
  - дверь открыта (OPEN);
  - дверь закрывается (CLOSING).

Пример задачи с машиной состояний

- Управление осуществляется с помощью всего одной кнопки, которая открывает закрытую дверь, закрывает дверь открытую, а если дверь движется, то кнопка меняет направление движения (если дверь открывалась – она начнет закрываться и наоборот).
- Функция **GetKey**(void) возвращает 1, если была нажата кнопка.
- Фуикция **GetDoorSwitch**(void), связанная с концевыми контактами на двери, возвращает 1, если дверь при движении уперлась в ограничитель, то есть полностью открылась или полностью закрылась.
- Управление двигателем двери осуществляется при помощи функции **ControlDoorMotor**(char action), где параметр action может принимать три значения:
  - STOP (останавливает мотор);
  - RUN_CLOSE (запускает мотор в сторону закрытия);
  - RUN_OPEN (запускает мотор в сторону открытия).

Пример задачи с машиной состояний

Построим граф переходов для нашей задачи



Пример задачи с машиной состояний

```
while (1) // все происходит
{         // в бесконечном цикле
  switch (state)
  {
  case CLOSED:
    ControlDoorMotor(STOP);
    if (GetKey())
      state = OPENING;
    break;

  case OPENING:
    ControlDoorMotor(RUN_OPEN);
    if (GetKey())
      state = CLOSING;
    if (GetDoorSwitch())
      state = OPEN;
  break;

  case OPEN:
    ControlDoorMotor(STOP);
    if (GetKey())
      state = CLOSING;
    break;

  case CLOSING:
    ControlDoorMotor(RUN_CLOSE);
    if (GetKey())
      state = OPENING;
    if (GetDoorSwitch())
      state = CLOSED;
  break;
  }
}
```

Именование состояний

Для того, чтобы наш пример с программой управления воротами скомпилировался, необходимо описать все символические имена с помощью директивы #define:

```
// состояния системы
#define CLOSED   0
#define OPENING  1
#define OPEN   2
#define CLOSING  3
// команды мотора
#define STOP     0
#define RUN_OPEN   1
#define RUN_CLOSE  2
```

Именование состояний

Описать символические имена можно и с помощью перечислимого типа:

```
// состояния системы
enum Gate_State
{
   CLOSED, OPENING, OPEN, CLOSING
};

// команды мотора
enum Motor_Cmd
{
   STOP, RUN_OPEN, RUN_CLOSE
};
```

Сокращенное объявление сложных типов в Си

- Чтобы каждый раз не писать «struct» или «enum» при объявлении переменных сложных типов, можно использовать ключевое слово **typedef**.

```
typedef стандартный_тип имя_нового_типа
```

Например:

```
typedef struct {int x; int y;} point;
```

Объявление структуры

- typedef не создает «новый» тип, это просто способ символического обозначения существующего типа.
- Можно «переназывать» и скалярные типы:

```
typedef unsigned long uint32_t;
```

Сокращенное объявление сложных типов в Си

```
// состояния системы
typedef enum
{
  CLOSED, OPENING, OPEN, CLOSING
} Gate_State;

// команды мотора
typedef enum
{
  STOP, RUN_OPEN, RUN_CLOSE
} Motor_Cmd;

...
Gate_State system_state = CLOSED;

...
void ControlDoorMotor(Motor_Cmd command);
```

Переменные-флаги

- Вырожденным случаем машины состояний является система с двумя состояниями. Переменная, которая описывает такую систему, называется переменной-флагом.
- Как правило, подобные бинарные машины состояний получаются, когда в программе необходимо ожидать некоего события. В этом случае возможны два состояния: событие не произошло или событие произошло.
- Как правило, в одном модуле (источнике события) флаг устанавливают, а в другом модуле – сбрасывают по окончании реакции на событие.

Переменные-флаги

- Пример: модуль интерфейса термостата. Устанавливает флаг «новая температура», когда пользователь заканчивает выбор нового значения температуры.

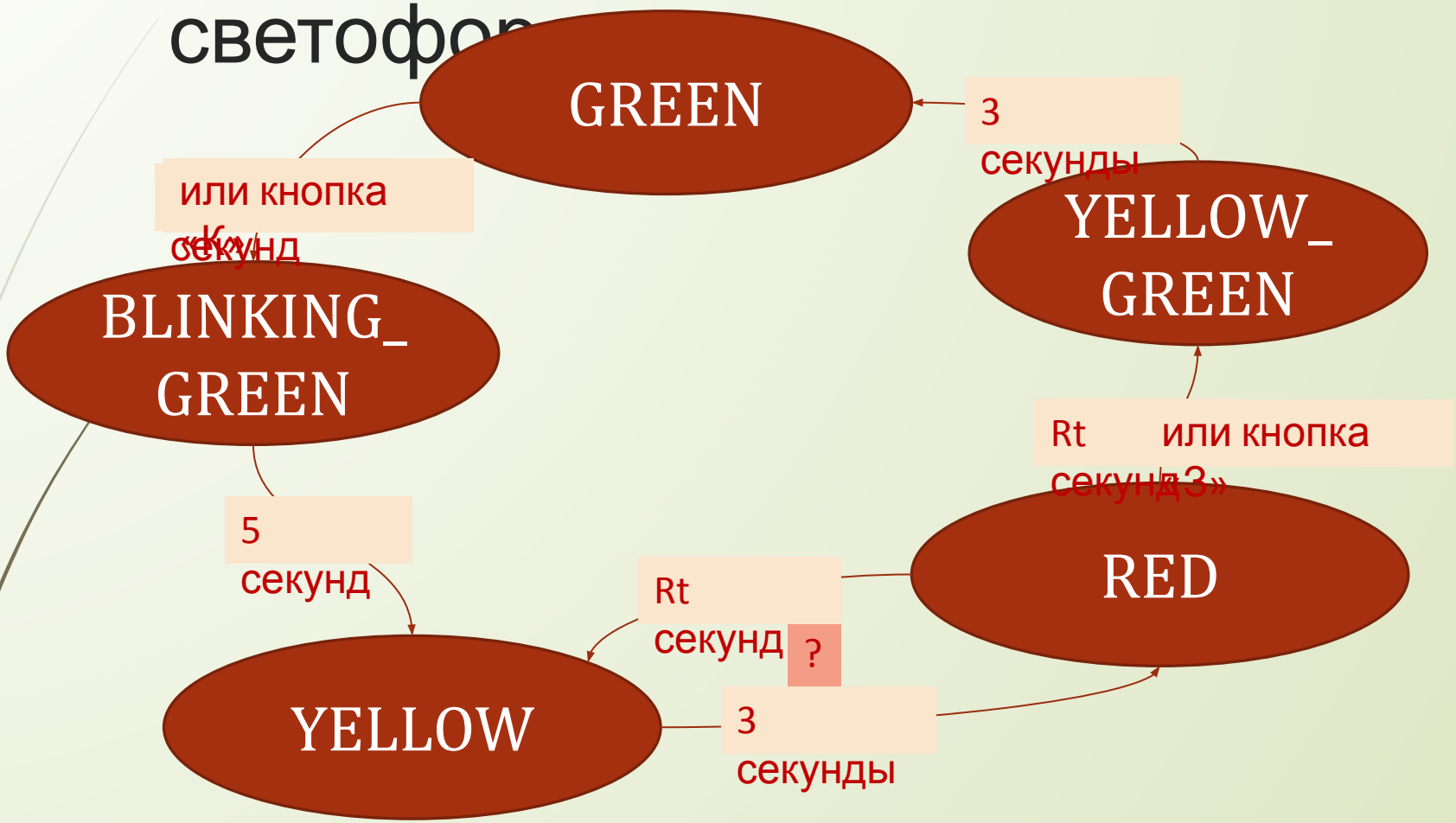
```
int new_temp_set = 0;
int ui_set_temp = 25;
void ui_mng(void)
{
  ...
  switch (get_key())
  {
    case KEY_UP:
      ui_set_temp++;
      break;
    case KEY_DOWN:
      ui_set_temp--;
      break;
    case KEY_SET:
      new_temp_set = 1;
      break;
  }
  ...
}
```

```
extern int new_temp_set;
extern int ui_set_temp;

int reg_set_temp;

void func_mng(void)
{
  ...
  if (new_temp_set)
  {
    new_temp_set = 0; // сброс флага
    reg_set_temp = ui_set_temp;
  }
  ...
}
```

Пример с интерфейсом пользователя: управляемый светофор

- В программе, как правило, присутствуют несколько машин состояний, так как устройство взаимодействует с несколькими объектами.
- Рассмотрим пример управляемого светофора, который может работать как автоматически, так и по командам с пульта управления.
- Параметры работы светофора (длины фаз) будут заданы не константами, а переменными, которые впоследствии можно будет менять (по команде с пульта или по интерфейсу связи).
- Светофор моделируется на лабораторном стенде, при помощи трехцветного светодиода.

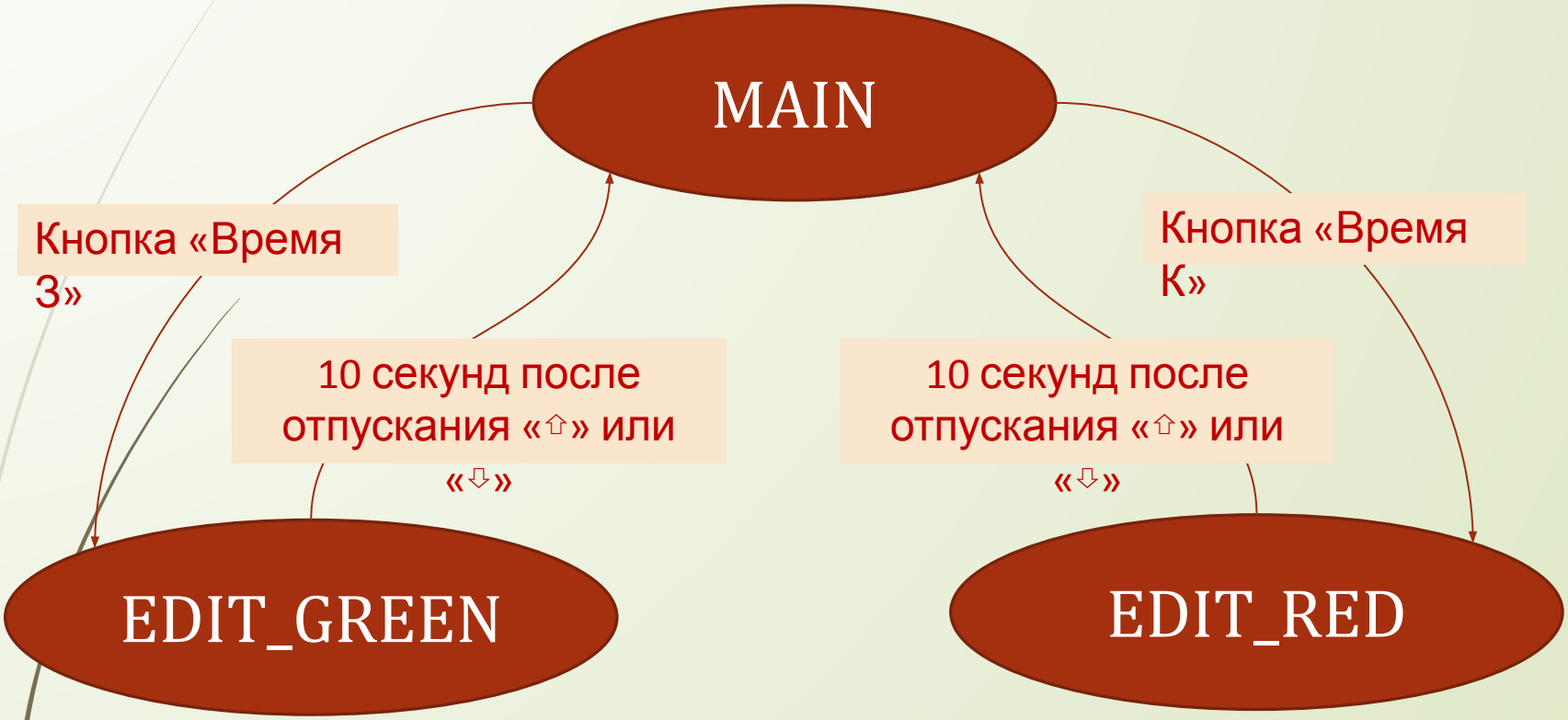
Машина состояний светофор



Машина состояний пульта

- Помимо основной машины состояний, в нашем устройстве будет еще одна машина, отвечающая за состояние интерфейса пользователя
- Интерфейс пользователя обеспечивает следующую функциональность:
  - Кнопки «К» и «З» для принудительного переключения фаз;
  - Отображение на индикаторах оставшегося времени текущей фазы или значения редактируемого времени фазы;
  - Кнопки «Время К» и «Время З», включающие режим редактирования времени фаз и кнопки «⇧», «⇩», изменяющие редактируемое значение времени.
  - Кнопки «Фикс. К» и «Фикс. З» для остановки смены фаз
- Таким образом, у интерфейса (пульта) есть три состояния: основное (MAIN), редактирование времени зеленой фазы (EDIT_GREEN) и редактирование времени красной фазы (EDIT_RED).

Машина состояний пульта



Использование переменных-таймеров

- Для нашего светофора нужно выдерживать (измерять) много разных временных интервалов.
- «Простой» подход – для каждого интервала своя отдельная переменная-счетчик, уменьшающаяся в функции-обработчике прерываний от таймера.

```
extern int Light_Time_Counter;
extern int UI_Time_Counter;
void Timer0AIntHandler(void)
{
  // сброс флага перезагрузки
  TIMER0_ICR_R = TIMER_ICR_TATOCINT;

  if (Light_Time_Counter > 0)
    Light_Time_Counter--;

  if (UI_Time_Counter > 0)
    UI_Time_Counter--;
}
```

```
int Light_Time_Counter = 0;
void func_mng(void)
{
  ...
  if (!Light_Time_Counter)
  {
    // переход к следующей фазе
    func_state = BLINKING_GREEN;
    Light_Time_Counter = 5000;
  }
  ...
}
```

```
int UI_Time_Counter = 0;
void ui_mng(void)
{
  ...
  if (!UI_Time_Counter)
  {
    // выход из редактирования
    ui_state = UI_MAIN;
  }
  ...
}
```

Использование переменных-таймеров

- У «простого» подхода два недостатка:
  - Плодятся глобальные переменные, причем модуль таймера должен «знать» о всех переменных-таймерах всех других модулей. Избавиться от глобальных переменных можно, заменив их на сеттеры или Callback-функции, но от многочисленных лишних связей «снизу вверх» это не избавит.
  - Набор действий в прерывании от таймера начинает зависеть от сложности системы.
- Выход: сделать **одну** глобальную переменную-счетчик или функцию, работающую с этим счетчиком.
- При этом модули, которые захотят считать время, включают в себя модуль таймера, а не наоборот: нет проблем с иерархией проекта.

Использование переменных-таймеров

```
unsigned int Clock_Counter = 0;
void Timer0AIntHandler(void)
{
  TIMER0_ICR_R = TIMER_ICR_TATOCINT;
  Clock_Counter++;
}

void Set_Timer(unsigned int* timer,
unsigned int period)
{
  *timer = Clock_Counter + period;
}

int Timer_Expired(unsigned int timer)
{
  if (Clock_Counter >= timer)
    return 1;
  return 0;
}
```

```
unsigned int Light_Timer;
void func_mng(void)
{
  ...
  if (Timer_Expired(Light_Timer))
  {
    // переход к следующей фазе
    func_state = BLINKING_GREEN;
    Set_Timer(&Light_Timer, 5000);
  }
  ...
}
```

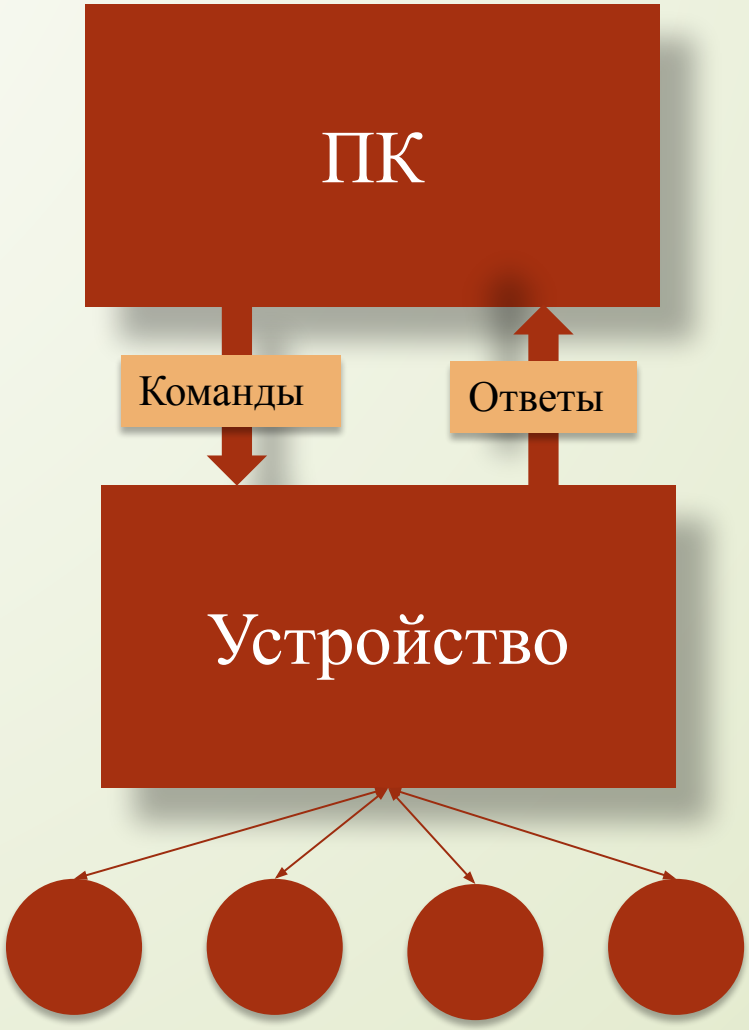
```
unsigned int UI_Timer;
void ui_mng(void)
{
  ...
  if (Timer_Expired(UI_Timer))
  {
    // выход из редактирования
    ui_state = UI_MAIN;
  }
  ...
}
```

Задачи взаимодействия устройств

Взаимодействие сводится к обмену данными между устройствами при помощи цифровых интерфейсов

- В результате коммуникации между устройствами (узлами) решаются две задачи:
  - Управление устройством
  - Получение состояния устройства (мониторинг)

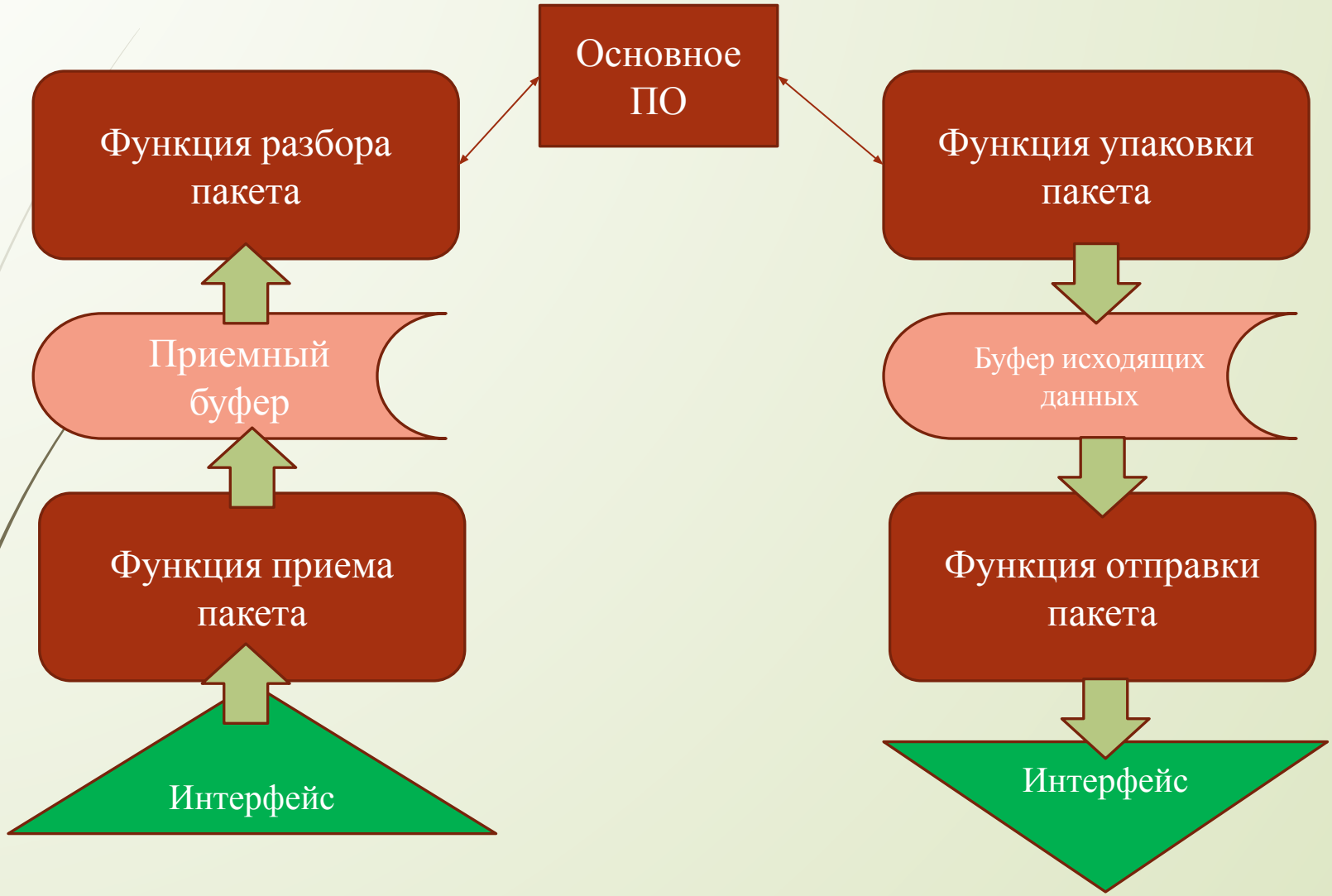
Взаимодействие устройств



Функции коммуникационного ПО

- Функции приема и передачи данных через интерфейсные устройства
- Функции разбора принятых пакетов данных (функции-парсеры)
- Функции упаковки исходящих пакетов данных

Функции коммуникационного ПО



Прием пакета

- Основная задача – **синхронизация** между медленными интерфейсами, редкими, асинхронными событиями приёма и быстрым ядром.
- Возможны два способа реагирования на асинхронные события – через ***опрос бита готовности*** приемника и через ***прерывания***.

Прием пакета

- **Опрос бита готовности**: в каждом устройстве (контроллеры SPI, UART, I2C,...) есть регистр *статуса*, в котором присутствуют бит (или биты), имеющие смысл «приёмник содержит входящий байт». Эти биты опрашиваются в *функции главного цикла*, которая и читает принятые устройством байты.
  - Достоинства: минимальный расход процессорного времени, простой код, прием и разбор пакета происходит в одном и том же потоке.
  - Недостатки: главный цикл должен гарантировано успевать прочитать входящий байт до того, как придет новый.

Прием пакета

- **Прерывание**: событие приёма байта вызывает прерывание ядра. Данные читаются из устройства в функции обработки прерывания.
  - Достоинства: быстрая реакция системы на пришедшие данные; меньше вероятность потери данных, больше свободы в написании функций главного цикла.
  - Недостатки: более сложный код, так как необходимо решать вопросы синхронизации потоков (прием и разбор пакетов происходит в разных потоках).

Прием пакета

```
#define PACKET_LEN 6
unsigned int rx_counter = PACKET_LEN;
unsigned char rx_buffer[PACKET_LEN];

void rx_mng(void)
{
  if (rx_counter < PACKET_LEN)
  {
    if (USART_SR & USART_SR_RXNE)
    {
      rx_buffer[rx_counter++] = USART_DR;
      // если пакет принят, то разбираем его
      if (rx_counter == PACKET_LEN)
        parse_packet(rx_buffer);
    }
  }
}

void start_rx(void)
{
  rx_counter = 0;
}
```

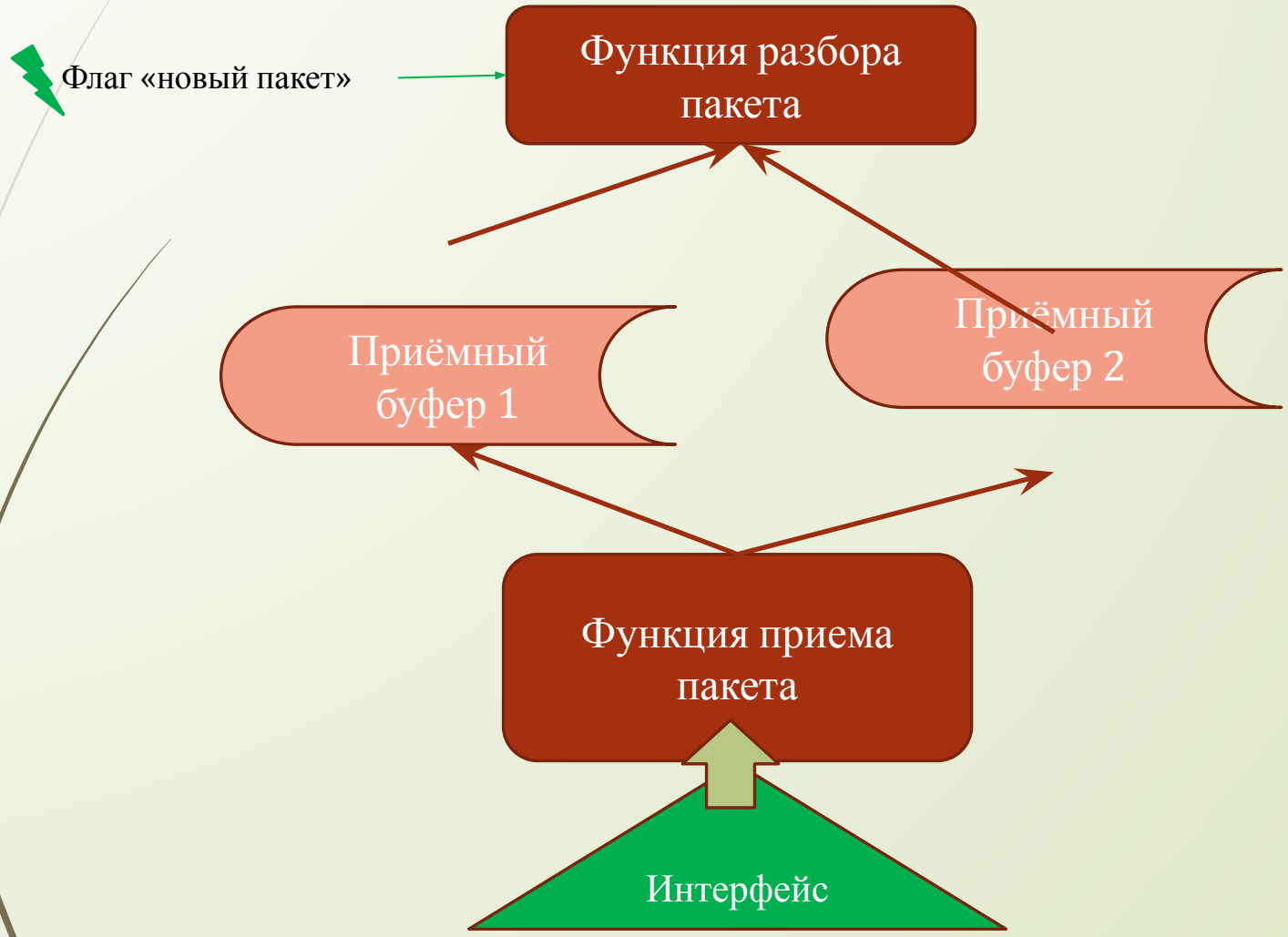
Опрос бита

```
#define PACKET_LEN 6
unsigned int rx_counter = PACKET_LEN;
unsigned char rx_buffer[PACKET_LEN];
int data_received_flag = 0;

void USARTIntHandler(void)
{
  unsigned char rx_data;
  if (USART_SR & USART_SR_RXNE)
  {
    // всегда читаем байт, чтобы
    // сбросить флаг прерывания
    rx_data = USART_DR;

    if (rx_counter < PACKET_LEN)
    {
      rx_buffer[rx_counter++] = rx_data;
      // если пакет принят, то ставим флаг
      if (rx_counter == PACKET_LEN)
        data_received_flag = 1;
    }
}
```

Прерывание

Двойная буферизация

- Позволяет начать прием нового пакета сразу же, не дожидаясь окончания разбора предыдущего пакета



Двойная буферизация

```
#define PACKET_LEN 6
unsigned int rx_counter = 0;
unsigned char rx_buffer1[PACKET_LEN];
unsigned char rx_buffer2[PACKET_LEN];
unsigned char* cur_rx_buffer = rx_buffer1;
unsigned char* parse_buffer = rx_buffer2;
int data_received_flag = 0;
void USARTIntHandler(void)
{
  unsigned char rx_data;
  if (USART_SR & USART_SR_RXNE)
  {
    rx_data = USART_DR;
    if (rx_counter < PACKET_LEN)
    {
      cur_rx_buffer[rx_counter++] = rx_data;
      if (rx_counter == PACKET_LEN)
      {
        parse_buffer = cur_rx_buffer;
        data_received_flag = 1;
        // переключаем буфер...
        if (cur_rx_buffer == rx_buffer1)
          cur_rx_buffer = rx_buffer2;
        else
          cur_rx_buffer = rx_buffer1;
        // ...и сразу готовы принимать дальше
        rx_counter = 0;
      }
    }
  }
}
```

```
extern unsigned char* parse_buffer;
extern int data_received_flag;

void rx_mng(void)
{
  if (data_received_flag)
  {
    parse_packet(parse_buffer);
    data_received_flag = 0;
  }
}
```

Отправка пакета

- Основная задача, которая здесь решается – синхронизация быстрого ядра и медленного интерфейса: данные отправляются в внешний мир гораздо медленнее, чем ядро способно их отдавать.
- Функции отправки аналогичны функциям приема: синхронизация возможна как при помощи опроса битов готовности (в этом случае проверяется бит «готовность передатчика»), так и при помощи прерываний.
- Недостатки, связанные с синхронизацией при помощи опроса бита готовности, здесь не столь существенны, так как при отправке данных невозможно «опоздать» (однако в некоторых случаях можно превысить максимально допустимое время между байтами – это уже зависит от протокола).

Отправка пакета

```
#define PACKET_LEN 6
unsigned int tx_counter = PACKET_LEN;
unsigned char tx_buffer[PACKET_LEN];

void tx_mng(void)
{
  if (tx_counter < PACKET_LEN)
  {
    if (USART_SR & USART_SR_TXE)
    {
      USART_DR = tx_buffer[rx_counter++];
    }
  }
}

void start_tx(void)
{
  tx_counter = 0;
}
```

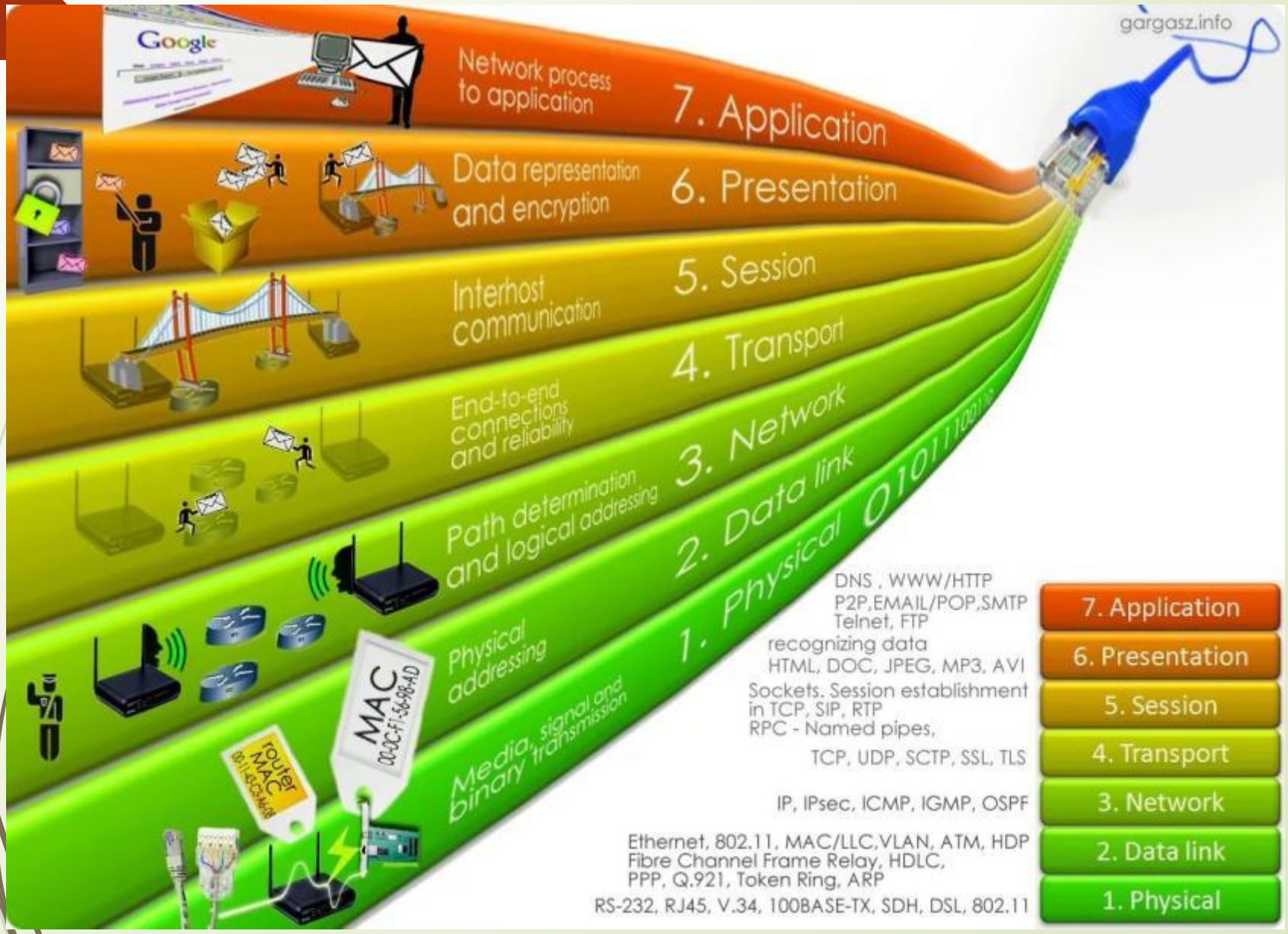
Опрос бита

```
void USARTIntHandler(void)
{
  if (USART_SR & USART_SR_TXE)
  {
    if (tx_counter < PACKET_LEN)
    {
      USART_DR = tx_buffer[tx_counter++];
    }
  }
  else
  {
    // если нечего передавать,
    // то запрещаем прерывания
    UART_CR1 &= ~TXEIE;
  }
}

void start_tx(void)
{
  tx_counter = 0;
  UART_CR1 |= TXEIE; // разрешаем
прерывание
}
```

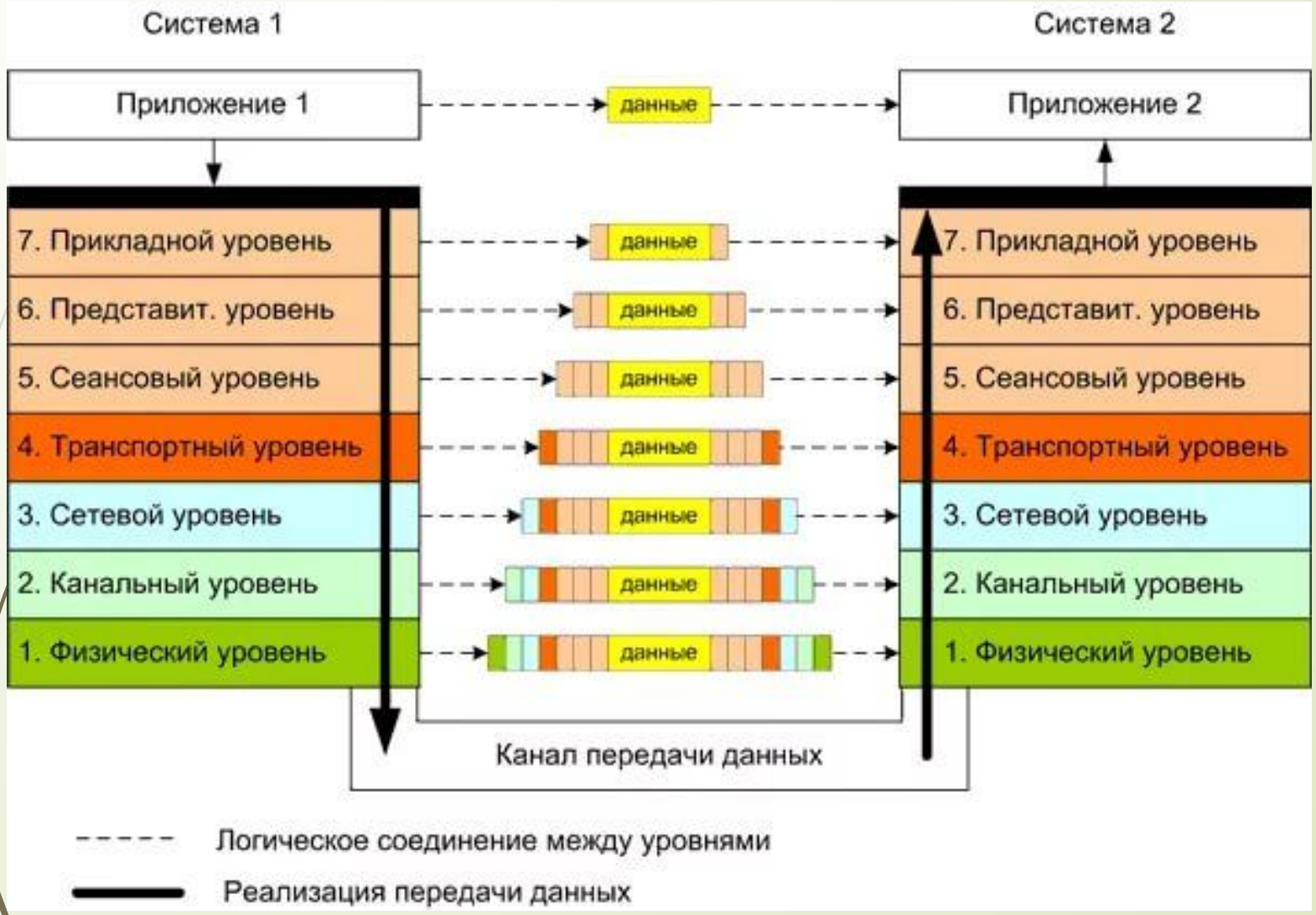
Прерывание

Взаимодействие систем

Взаимодействие систем



Взаимодействие систем



Упрощенный стек протоколов

- В простых системах часть уровней «сливаются» друг с другом.

Приложение	Прикладной уровень (функциональность системы)
Представление	
Сеанс	Сессионный уровень
Транспорт	Транспортный уровень
Сеть	
Канал	
Физика	Физический уровень

Упрощенный стек протоколов

- Пример:

Формат транспортного пакета

Заголовок	**Длина поля данных**	**Данные**	**Контрольная сумма (2 байта)**	
0x01A0 + номер устройства в шине	0: Ping/Ack 1..255: Обычный пакет	От 0 до 255 байт	$CRC_{16}L$	$CRC_{16}H$

Формат пакета прикладного уровня:

Байт 0		Байт 1	Байты 2..6
биты 7..4 Категория	биты 3..0 Режим	Команда	Данные (параметры команды)

Задачи, решаемые на разных уровнях стека

- Прикладной уровень:
  - Поддержка основной функциональности устройства (команды, ответы на них, информирование об ошибках)
  - Описание способов представления сложных объектов (длинные числа, строки и т.п.)
- Уровень сессии:
  - Обеспечение завершенности обмена (на каждый запрос должен быть получен ответ)
- Транспортный уровень:
  - Синхронизация источника и приемника
  - Обеспечение надежности доставки
  - В многоточечной сети: обеспечение адресации узлов

Задачи, решаемые на разных уровнях стека: прикладной уровень

Как правило, программно реализуется при помощи структур и объединений

```
typedef struct {
  unsigned char command;
  unsigned char params[6];
} app_data_t;

// Команды
#define CMD_MOTOR_CONTROL        1
#define CMD_MOTOR_CALIBR    2
#define CMD_MOTOR_PARAMETERS     3
```

```
void execute_cmd(unsigned char* app_pkt)
{
  app_data_t* msg = (app_data_t*)app_pkt;
  app_data_t answer;

  switch (msg->command)
  {
    case CMD_MOTOR_CONTROL:
      motor_ctrl(msg->params[0], msg->params[1]);
    break;

    case CMD_MOTOR_CALIBR:
      motor_calibr(msg->params[0]);
    break;
    ...

  }
}
```

Задачи, решаемые на разных уровнях стека: прикладной уровень

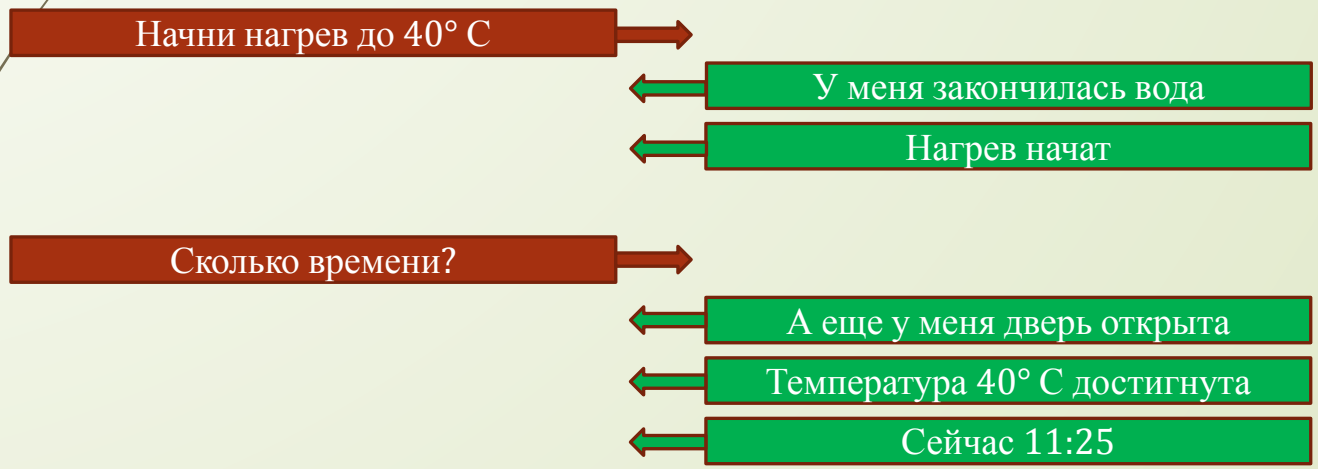
Как правило, программно реализуется при помощи структур и объединений

```
// Поля пакета
#define COMMAND_IDX   0
#define PARAM_IDX     1

// Команды
#define CMD_MOTOR_CONTROL        1
#define CMD_MOTOR_CALIBR    2
#define CMD_MOTOR_PARAMETERS     3
```

```
void execute_cmd(unsigned char* app_pkt)
{
  switch (app_pkt[COMMAND_IDX])
  {
    case CMD_MOTOR_CONTROL:
      motor_ctrl(app_pkt[PARAM_IDX],
app_pkt[PARAM_IDX+1]);
    break;

    case CMD_MOTOR_CALIBR:
      motor_calibr(app_pkt[PARAM_IDX]);
    break;
    ...

  }
}
```

Задачи, решаемые на разных уровнях стека: уровень сессии

- Уровень сессии как самостоятельная сущность реализуется только если протокол допускает вложенность сессий:
  - Устройство может в любой момент начать говорить само, не дожидаясь команды от мастера.
  - Устройство может начать говорить даже сразу после команды мастера, отложив ответ на команду на потом.



Для управлением такой сессией вводится понятие *идентификатора сессии*, который передается в каждом пакете.

Задачи, решаемые на разных уровнях стека: транспортный уровень

- Синхронизация источника и приемника:
  - В начало пакета добавляется уникальный заголовок
  - Спецификация временных интервалов между пакетами
  - В пакетах с переменной длиной в начало добавляется поле длины пакета
- Обеспечение надежности доставки:
  - В конец пакета добавляется контрольная сумма
- Адресация узлов в многоточечных сетях:
  - В начало пакета добавляется адрес устройства

Задачи, решаемые на разных уровнях стека: транспортный уровень

- В итоге транспортный пакет может выглядеть так:

Заголовок	Адрес назначения	Длина пакета	Данные			Контрольная сумма
0xAA	Dst	LEN		...		CSUM

Или так:

Заголовок		Адреса		Длина пакета		Данные			Контрольная сумма	
0xDE	0xBE	Dst	Src	LEN_L	LEN_H		...		$CRC16_L$	$CRC16_H$

Реализация протокола

Прием пакета

- Машина состояний

Разбор пакета

- Разбор буфера (+двойная буферизация)

Выполнение команд

- Создание маркированной очереди команд
- Прямое исполнение вида «запрос-ответ»

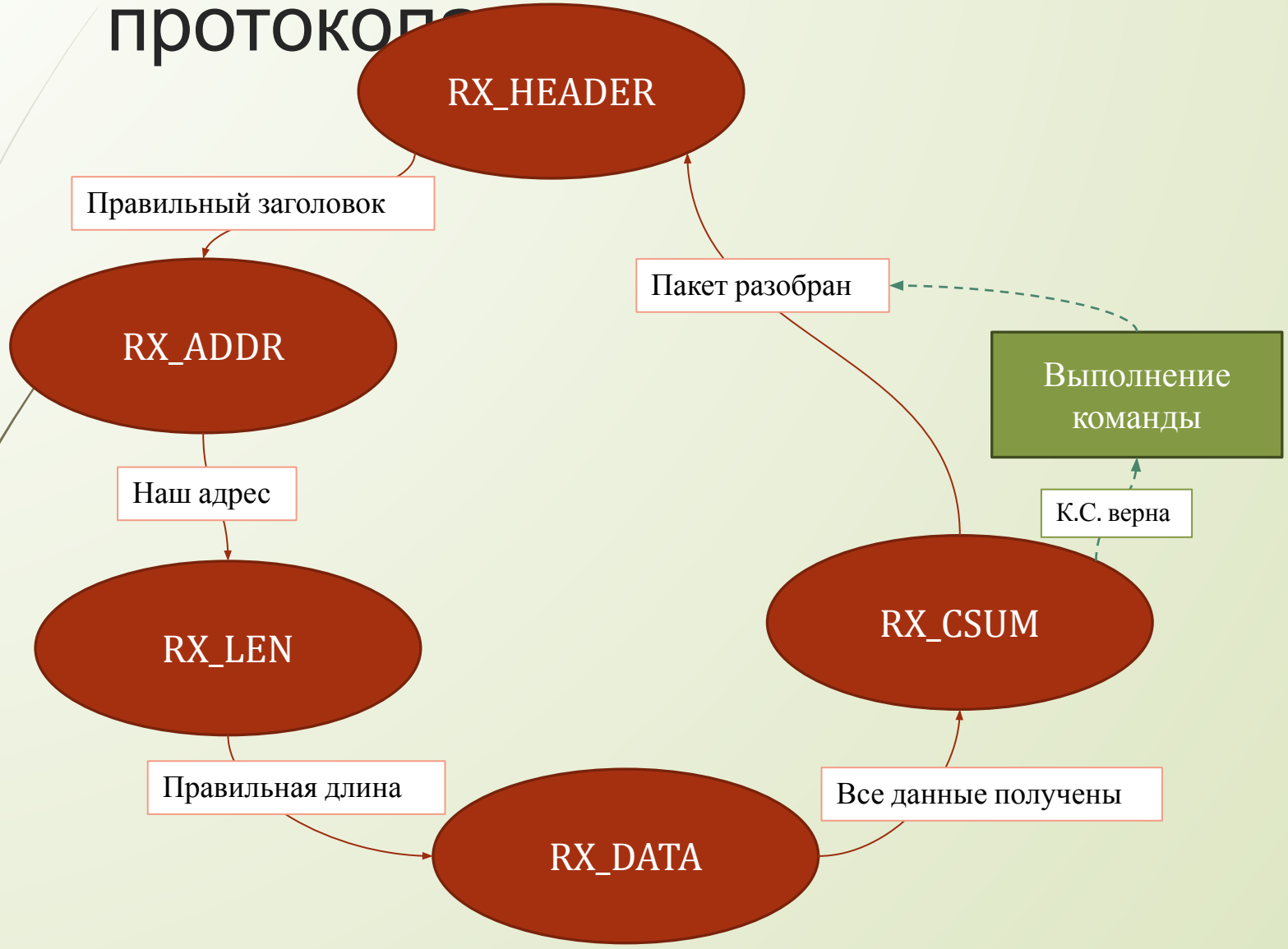
Подготовка ответа

- Заполнение буфера (+двойная буферизация)

Передача ответа

- Машина состояний или простой цикл

Реализация протокола



Реализация протокола

```
unsigned char packet_len;
unsigned int rx_counter;
unsigned char rx_buffer[MAX_PACKET_LEN];
int data_received_flag = 0;

enum
{
  RX_HEADER,
  RX_ADDR,
  RX_LEN,
  RX_DATA,
  RX_CSUM
} rx_state = RX_HEADER;
```