

KIV/OS - cvičení č. 2

Martin Úbl

13. srpna 2021

1 Obsah cvičení

- struktura projektu OS
- CMake
- miniUART a bootloader
- inicializace jádra a C++ v „bare“ projektu
- driver pro GPIO

2 Struktura projektu

Jelikož budeme vytvářet poměrně složitý projekt, je vhodné si včas rozmyslet adresářovou a logickou strukturu. Nemusíme však nic přehánět – nebudeme psát druhý Linux. Určitě je ale vhodné rozdělit složku se zdrojovými soubory a složku s hlavičkovými soubory, a to primárně z důvodu, že vybrané moduly mohou vyžadovat hlavičky jaderných modulů pro svou práci (např. pro definice nějakých konstant a struktur), ale už nemusí vidět implementaci. Všechny jaderné soubory umístíme do adresáře `kernel`. Pro snazší distribuci v něm oddělíme hlavičkové soubory do adresáře `include` a zdrojové soubory do složky `src`. Na stejnou úroveň vložíme skript pro linker `link.ld`.

Pro potřeby předmětu budeme vyvíjet monolitické jádro systému reálného času. Respektive – nejprve půjde o systém interaktivní (pro který implementujeme time-slicing plánovač) a ten poté přetvoříme v systém reálného času v druhé polovině semestru.

Pro teď nechme zdrojové soubory specifické pro jádro přímo ve složce `src`. Tam vytvoříme soubor `start.s` obsahující náš vstupní bod do jádra (viz minulé cvičení) a soubor `main.cpp` (obsahující pro teď zbytek implementace). Později dnes zde ještě přibudou další soubory.

Nyní vytvoříme adresář `drivers` v obou složkách (`src` i `include`). Sem budeme vkládat zdrojové a hlavičkové soubory ovladačů periferií.

Ve složce `include` by bylo dobré oddělit definice pro různé varianty desky, kdybychom se například rozhodli podporovat kromě RPi Zero i třeba jinou

edici RPi nebo klidně i úplně jinou desku. V zájmu obecnosti proto vytvoříme složku `board` a v ní podsložku pro každou podporovanou desku – pro nás je to teď jen `rpi0`. Návod pro sestavení by pak měl nastavovat *include* cesty tak, aby směřovaly vždy i do příslušného adresáře podle desky. Zde budeme tvořit jakousi HAL (Hardware Abstraction Layer), tedy vrstvu, která odstíní konkrétní způsob ovládání periférií od rozhraní. V našem případě vzhledem k poměrně unifikovanému rozhraní RPi to budou pouze bázové adresy a offsety pro různé periferie a další detaily. Vytvoříme proto podsložku `hal` a v ní soubor `peripherals.h`. Rovněž můžeme vytvořit soubor `intdef.h`, kde budeme definovat datové typy s pevnou (známou) délkou pro daný typ desky.

Do kořenového adresáře celého projektu ještě vložíme návody k sestavení (`Makefile` nebo za chvíli spíše `CMakeLists.txt`) a volitelně skript, kterým budeme řešení sestavovat (v mém případě `build.sh`)

Výsledná struktura by měla vypadat zhruba takto:

```

.
+-- kernel +-- include +-- board +-- rpi0 +-- hal +-- intdef.h
|           |           |                               +-- peripherals.h
|           |           +-- drivers
|           +-- src +-- drivers
|           |       +-- main.cpp
|           |       +-- start.s
|           +-- link.ld
+-- build.sh
+-- CMakeLists.txt

```

3 CMake

Pro sestavení projektu budeme potřebovat nějaký nástroj a „recept“ pro něj, a to ideálně takový, abychom nemuseli vše ručně doplňovat při každé změně ve struktuře. Pro tyto účely se hodí nástroj CMake. Pokud nechcete používat CMake, můžete použít a vhodně modifikovat `Makefile` z minulého cvičení, nebo si napsat vlastní recept ve Vámi oblíbeném nástroji – stačí, když zvládnete specifikovat kompilátor, kterým chcete zdrojové soubory překládat a dodat jim příslušné přepínače.

Pro potřeby demonstrace budu používat nástroj CMake. Pokud byste se rozhodli pro tentýž nástroj, lze ho stáhnout pro Windows na adrese <https://cmake.org/>, popř. ve většině balíčkovacích systémů pro Linux nebo macOS ho lze najít pod prostým názvem `cmake`. Na Debian-based (apt-based) distribucích ho můžeme nainstalovat příkazem

```
apt install cmake
```

Po instalaci stačí specifikovat soubor `CMakeLists.txt` a dodat toolchain soubor. Toolchain soubor pro náš překlad v ARM-specific gcc stáhneme např. zde: <http://home.zcu.cz/~ublm/files/os/toolchain-arm-none-eabi-rpi0.cmake>.

Obsah `CMakeLists.txt` souboru může vypadat např. takto:

```

CMAKE_MINIMUM_REQUIRED(VERSION 3.0)

PROJECT(kiv_os_rpios CXX C ASM)

SET(LINKER_SCRIPT
    "${CMAKE_CURRENT_SOURCE_DIR}/kernel/link.ld")
SET(CMAKE_EXE_LINKER_FLAGS
    "${CMAKE_EXE_LINKER_FLAGS} -T_${LINKER_SCRIPT}")

INCLUDE_DIRECTORIES(
    "${CMAKE_CURRENT_SOURCE_DIR}/kernel/include/")

INCLUDE_DIRECTORIES(
    "${CMAKE_CURRENT_SOURCE_DIR}/kernel/include/board/rpi0/")
ADD_DEFINITIONS(-DRPIO)

FILE(GLOB_RECURSE kernel_src "kernel/*.cpp" "kernel/*.c"
    "kernel/*.h" "kernel/*.hpp" "kernel/*.s")

ADD_EXECUTABLE(kernel ${kernel_src})

ADD_CUSTOM_COMMAND(
    TARGET kernel POST_BUILD
    COMMAND ${CMAKE_OBJCOPY} ./kernel${CMAKE_EXECUTABLE_SUFFIX}
        -O binary ./kernel.img
    COMMAND ${CMAKE_OBJDUMP} -l -S -D
        ./kernel${CMAKE_EXECUTABLE_SUFFIX} > ./kernel.asm
    COMMAND ${CMAKE_OBJCOPY} --srec-forceS3
        ./kernel${CMAKE_EXECUTABLE_SUFFIX} -O srec kernel.srec
    WORKING_DIRECTORY
        ${CMAKE_BINARY_DIR})

```

Většina příkazů je poměrně jasná – nastavíme vyžadovanou verzi nástroje CMake, jméno projektu a jazyky v něm obsažené, skript který se má předat linkeru (paměťová mapa) a přepínače a include cesty obecné pro celý projekt. Následují dva příkazy specifické pro překlad pro RPi Zero (resp. takto jsme si je navrhli) – include cesty do specifické `boards` složky a nastavení preprocesorového makra `RPIO`.

Poté nalezneme všechny soubory v podsložce `kernel` vyhovující filtru a přidáme target s názvem `kernel`, který je zahrnuje (kompiluje).

Následuje vlastní post-build sekvence příkazů, kterými transformujeme výstup do obrazu paměti k nahrání (`kernel.img`), pak provedeme zpětný překlad do assembly (`kernel.asm`), abychom mohli výsledný překlad zkoumat, a následuje řádka, kterou budeme potřebovat až později v tomto cvičení – transformace

binárního obrazu do Motorola S-record formátu (`kernel.srec`). Tato transformace přijde vhod v momentě, kdy budeme chtít nahrávat obraz jádra přes komunikační rozhraní.

Poté je potřeba jen nějak spustit sestavovací proces spolu s toolchain souborem. Proto jsme definovali soubor `build.sh` v minulé kapitole. Jeho obsah může vypadat například takto:

```
#!/bin/bash

mkdir -p build >/dev/null 2>&1
cd build

cmake -G "Unix_Makefiles" \
  -DCMAKE_TOOLCHAIN_FILE="toolchain-arm-none-eabi-rpi0.cmake" \
  ..
make
```

Pokud jsme všechno správně nastavili a umístili, výsledkem bude mj. soubor `kernel.img` a `kernel.srec` v podsložce `build`.

4 UART bootloader

Jedním z nepříjemných aspektů vývoje pro RPi může být to, že je jádro nutné uložit na SD kartu – to vyžaduje opětovné přenášení karty do čtečky pro PC, nahrávání souboru a přenos zpět (často označováno anglickým termínem *SD card dance*). S tím je pochopitelně spojeno mechanické opotřebení SD karty, čtečky, slotu na desce RPi Zero a podobně.

Bylo by proto dobré minimálně pro prvotní fázi vývoje najít způsob, jak toto přendávání minimalizovat nebo úplně odstranit. V budoucnu, až by bylo jádro stabilní a mělo konektivitu do počítačové sítě lze uvažovat např. o modularizaci jádra a nahrazování komponent na SD kartě přes síť.

Pro teď ale zvolíme způsob, který je dosti oblíbený ve světě embedded zařízení – využijeme USB-TTL převodník pro PC spolu s jeho USB rozhraním, a na straně RPi využijeme UART rozhraní. Vytvoříme tak stále spojení vývojového PC s RPi přes sériový port, kterého můžeme dále využít. Na straně počítače je to snadné - můžeme klasicky zapisovat a číst sériový port. RPi ale vyžaduje obslužný program, který z tohoto portu něco přijme, zapíše to do paměti a následně je schopen provést skok na dané místo v paměti, které je vstupním bodem do nahraného programu. Tento program nazveme *bootloader*, fakticky se jedná o jakousi druhou část bootovacího procesu na straně systému.

Rovněž je vhodné vybrat nějaký formát pro přenos jádra. Již výše jsme zmínili formát Motorola S-record, který je textovým formátem a obsahuje základní značky pro začátek přenosu, uložení datového balíčku na danou adresu a příkaz pro skok na vstupní bod. Je tedy pro tyto účely vhodným kandidátem.

Potřebujeme tedy bootloader:

- s minimalistickým UART ovladačem
- s dekodérem S-record formátu
- transparentní – je schopen být zavedený v paměťovém prostoru a zároveň nahrát do téhož paměťového prostoru jádro

Jakmile takový bootloader budeme mít, stačí z hostitelského počítače zapsat celý soubor `kernel.srec` na sériový port a tím by mělo být jádro nahráno a zavedeno.

UART driveru se budeme věnovat později při integraci do jádra systému. Dekodér S-record formátu je opět relativně snadnou záležitostí a proto se tím více zabývat nebudeme – na zdrojové kódy a obraz bootloADERU naleznete odkaz níže v této kapitole.

Zajímavou částí je však transparentnost bootloADERU vzhledem k jádru. Jak jsme již uvedli v minulém cvičení, „stage 1“ bootloADERU RPi očekává, že bude program nahrán tak, že na adrese `0x8000` bude jeho vstupní bod. My ale nechceme přizpůsobovat jádro pro běh s naším bootloADEREM nebo bez, a tedy jeho vstupní bod budeme určitě situovat na adresu `0x8000`. BootloADER se ale rovněž musí nějak spustit, a vzhledem k očekávanému startu na dané adrese musí i jeho kód být umístěn na adrese `0x8000`. Při nahrávání kódu jádra nesmí dojít k přepsání kódu, který jádro nahrává. Jinak hrozí, že se začne „najednou“ provádět úplně jiný kód, který ovšem předpokládá úplně jiný stav systému a nejspíše dojde k selhání (zaseknutí).

Řešení je poměrně snadné - kód bootloADERU můžeme umístit vlastně kam chceme. Na adrese `0x8000` pak stačí, když bude obsažena právě jedna instrukce skoku na naši zvolenou adresu. Pak jen stačí vybrat pro kód bootloADERU takovou adresu, která nebude přepsána kódem jádra. Zvolíme proto například `0x200000`. V kódu pak lze vidět tento odskok jako vložení prázdného místa mezi vstupní bod a vlastní výkonný kód:

```
.global _start
_start:
    b skip

.space 0x200000-0x8004,0

skip:
    mov sp,#0x08000000
    bl loader_main
```

Problém by pochopitelně nastal, kdyby kód našeho jádra byl větší, než cca 2 MiB (`0x200000 - 0x8000`). Tento problém lze řešit posunutím adresy o kus dál. Naše jádro však stěží překročí tuhle velikost a tak můžeme pro teď být v klidu.

Bootloader (zdrojové soubory i obraz) si můžete stáhnout zde: http://home.zcu.cz/~ublm/files/os/bootloader_uart.zip

Pro Windows pak můžete využít nahrávací software (nutno zkompileovat; volně upravte dle potřeb), který se zároveň po nahrání přepne do režimu poslouchání (hodí se pro debugging): http://home.zcu.cz/~ublm/files/os/windows_uart_flasher.zip

5 Inicializace jádra a C++

V běžných programech jsme zvyklí, že za nás spousta práce odvede buď operační systém sám nebo tak učiní tzv. CRT0 (C-Runtime 0). Nyní se budeme orientovat na část druhou – v té musíme nastavit běhové prostředí tak, aby došlo ke správné inicializaci prostředí tak, že budeme moci pracovat se staticky inicializovanými entitami „jak jsme zvyklí“. Jádro navíc budeme psát v C++, a tak je třeba učinit ještě dodatečné kroky.

Budeme potřebovat:

1. zajistit, že vstupní bod jádra bude vždy na adrese 0x8000
2. vynulovat obsah sekce `bss`
3. zavolat konstruktory globálních instancí tříd při inicializaci
4. zavolat destruktory globálních instancí tříd při deinicializaci (k tomu teď sice nedojde, ale připravme si to)
5. definovat minimalistické C++ ABI
 - pro zabránění rekurzivní inicializace
 - pro pokus o volání čistě virtuální metody

Bod 1 lze vyřešit snadno – buď můžeme použít nějakou z direktiv překladače (hint, atribut), aby umístil symbol na danou adresu, a nebo (dle mého jistější cesta) pro daný symbol vytvořit samostatnou sekci (např. `text.start`) a tu v linker skriptu umístit na pevně dané místo. Kód `start.s` pak může vypadat třeba takto:

```
.global _start

;@ tato sekce se vlozi na adresu 0x8000
.section .text.start

_start:
    mov sp,#0x8000
    bl _kernel_main
hang:
    b hang
```

```
.section .text
;@ ...
```

V linker skriptu pak sekci umístíme před samotnou `text` sekci – jelikož je `text` první, a blok `ram` začíná na adrese `0x8000`, k umístění dojde dle očekávání:

```
.text :
{
  *(.text.start*)
  *(.text*)
} > ram
```

Do skriptu ještě přidáme zarážky a direktivy, které pomohou vyřešit bod 2 - start a konec `bss` sekce a její umístění za `text` sekci:

```
_bss_start = .;

.bss :
{
  *(.bss*)
} > ram

_bss_end = .;
```

Zarážky `_bss_start` a `_bss_end` jsou pak součástí procesu linkování – lze je tedy v C++ kódu definovat jako externí symboly a budou nám normálně zpřístupněny.

Stejně tak rovnou můžeme vložit speciální sekci pro konstruktory a destruktory globálních instancí tříd. Jejich volání generuje sám kompilátor do sekce `text` a adresy těchto generovaných volání vkládá ve formě seznamu do virtuálních sekcí `ctors` (`init_array`) a `dtors` (`fini_array`). Linkerem je vložíme do sekce `data` společně se zarážkami, abychom viděli, kde seznamy začínají a končí:

```
.data :
{
  __CTOR_LIST__ = .; *(.ctors) *(.init_array) __CTOR_END__ = .;
  __DTOR_LIST__ = .; *(.dtors) *(.fini_array) __DTOR_END__ = .;
  data = .;
  _data = .;
  __data = .;
  *(.data)
} > ram
```

Zarážky si opět budeme moci vyzvednout v kódu jako externí symboly.

Nyní přejdeme k samotné inicializaci. Vytvoříme proto nový soubor `startup.cpp`, kde ji implementujeme. Začneme sekcí `bss` a jejím vyplněním nulami. K tomu budeme potřebovat symboly `_bss_start` a `_bss_end`. Jde o číselné hodnoty adresy, které vymezují začátek a konec sekce `bss`. Teď již stačí pouze vynulovat vše mezi (např. v nějaké námi definované funkci `_c_startup`):

```
extern "C" int _bss_start;
extern "C" int _bss_end;

extern "C" int _c_startup(void)
{
    int* i;

    for (i = (int*)_bss_start; i < (int*)_bss_end; i++)
        *i = 0;

    return 0;
}
```

Následně je nutné nějak zavolat konstruktory globálních instancí tříd. Jak bylo zmíněno, C++ kompilátor generuje tato volání jako bezparametrické funkce bez návratové hodnoty, jejichž adresy vkládá do sekce k tomu určené. Každá instance globální třídy má tak vygenerovanou svou funkci, která volá konstruktor s danými parametry. V linker skriptu jsme si adresy nechali vložit mezi zářezky `__CTOR_LIST__` a `__CTOR_END__`. Zde se nachází seznam ukazatelů na tyto funkce. Nezbývá tedy než ho projít a všechny funkce zavolat.

```
extern "C" ctor_ptr __CTOR_LIST__[0];
extern "C" ctor_ptr __CTOR_END__[0];

extern "C" int _cpp_startup(void)
{
    ctor_ptr* fnptr;

    for (fnptr = __CTOR_LIST__; fnptr < __CTOR_END__; fnptr++)
        (*fnptr)();

    return 0;
}
```


Analogicky opakujme postup s destruktory:

```
extern "C" dtor_ptr __DTOR_LIST__[0];
extern "C" dtor_ptr __DTOR_END__[0];

extern "C" int _cpp_shutdown(void)
{
    dtor_ptr* fnptr;

    for (fnptr = __DTOR_LIST__; fnptr < __DTOR_END__; fnptr++)
        (*fnptr)();

    return 0;
}
```

Nakonec musíme definovat určité prvky C++ ABI tak, abychom mohli využívat všechny prvky jazyka samotného. Pro větší rozbor těchto funkcí se podívejte do příručky kompilátoru – ve zkratce jde o zabránění rekurzivní inicializace, odchyčení volání čistě virtuálních metod a registraci destruktorů objektů ve sdílených knihovnách. My si navíc těla jednotlivých funkcí zjednodušíme, protože reálně je v jádře využívat nebudeme - symboly jen musí být definované, aby byl kompilátor (linker) spokojený. Více o propojení s C++ můžete nalézt zde: <http://wiki.osdev.org/C++>.

Zde je obsah minimalistického C++ ABI pro kompilátor gcc (g++):

```
namespace __cxxabiv1
{
    __extension__ typedef int __guard __attribute__((mode(__DI__)))
    ;

    extern "C" int __cxa_guard_acquire (__guard *);
    extern "C" void __cxa_guard_release (__guard *);
    extern "C" void __cxa_guard_abort (__guard *);

    extern "C" int __cxa_guard_acquire (__guard *g)
    {
        return !*(char *)(g);
    }

    extern "C" void __cxa_guard_release (__guard *g)
    {
        *(char *)g = 1;
    }

    extern "C" void __cxa_guard_abort (__guard *)
    {
```

```

}
}

extern "C" void __dso_handle()
{
}

extern "C" void __cxa_atexit()
{
}

extern "C" void __cxa_pure_virtual()
{
}

extern "C" void __aeabi_unwind_cpp_pr1()
{
    while (true)
        ;
}

```

Pro uživatelské programy budeme definovat implementaci C++ ABI odlišnou. Nakonec je pochopitelně třeba upravit vstupní bod jádra tak, aby volal inicializaci ve správném místě a pořadí:

```

_start:
    mov sp,#0x8000
    bl _c_startup
    bl _cpp_startup
    bl _kernel_main
    bl _cpp_shutdown
hang:
    b hang

```

Pozn.: z funkce `_kernel_main` nečekáme, že bychom se kdy vrátili, takže volání `_cpp_shutdown` a cyklení v `hang` je vlastně nadbytečné.

6 GPIO driver

Driver, resp. česky *ovladač* je modul operačního systému, který co možná nejvíce obecně ovládá danou periférii a zprostředkovává rozhraní zbytku systému, skrze které ji lze řídit. Ovladač by měl odstínit silně specifické úkony (jako např. přístup na konkrétní paměť a zápis konkrétních hodnot) a zamaskovat je za vyšší

abstrakci – aby např. v případě GPIO existovalo rozhraní pro „zapni výstup 12“ a nemuseli jsme znát básovou adresu pro registry, díky kterým se vůbec může výstup zapnout, a tak podobně.

GPIO je zkratka pro *General Purpose Input Output*, tedy vstupy a výstupy (piny) pro obecné použití. Některé z těchto pinů mohou být vyhrazené pro speciální funkci, když ji programově vybereme. Například komunikace skrze I2C s hardwarovou podporou je schopno jen několik předvybraných kombinací pinů. V tomto případě hovoříme o tzv. alternativní funkci pinů.

RPi Zero má header dobře zdokumentovaný (viz např. <https://pinout.xyz/>). Na něj nasadíme rozšiřující desku KIV-DPP-01, takže konkrétní piny vlastně ani nevidíme, ale budeme vždy pracovat s něčím, co je na ně připojeno.

Pin může mít nastavený některý z uvedených režimů:

- vstupní (výchozí)
- výstupní
- alternativní funkce 0 - 5

V manuálu se dočteme, že tento režim se nastavuje zápisem do příslušného registru GPFSEL (0-5) na danou bitovou pozici. Vždy jde o zápis 3-bitové hodnoty na konkrétní místo odpovídající konkrétnímu pinu.

Pro ovládání pinu pak potřebujeme pro výstup registry GPSET a GPCLR (0 nebo 1) a pro čtení vstupu pak registr GPLEV 0 nebo 1.

Jelikož cílíme na obecnost alespoň v této rovině, bylo by dobré si v příslušném `hal` souboru `peripherals.h` definovat několik konstant, které jsou specifické pro RPi Zero.

Určitě si tam definujeme bázi všech memory-mapped IO, jelikož od té budeme vždy počítat umístění všech subsystémů:

```
constexpr unsigned long Peripheral_Base = 0x20000000UL;
```

Dále definujeme bázi pro GPIO řadič (viz dokumentace BCM2835):

```
constexpr unsigned long GPIO_Base = Peripheral_Base + 0x00200000UL;
```

A rovnou můžeme definovat sadu základních registrů pro GPIO (existuje jich samozřejmě víc, ale k tomu až jindy):

```
enum class GPIO_Reg
{
    // vyber funkce GPIO pinu
    GPFSEL0 = 0,
    GPFSEL1 = 1,
    GPFSEL2 = 2,
```

```

GPFSEL3 = 3,
GPFSEL4 = 4,
GPFSEL5 = 5,
// registry pro zapis "nastavovaciho priznaku"
GPSET0 = 7,
GPSET1 = 8,
// registry pro zapis "odnastavovaciho priznaku"
GPCLR0 = 10,
GPCLR1 = 11,
// registry pro cteni aktualniho stavu pinu
GPLEVO = 13,
GPLEV1 = 14,
};

```

Pak si definujeme nové soubory `gpio.h` a `gpio.cpp` v příslušných adresářích. **Nutno dodat, že konkrétní podoba rozhraní a implementace je ponechána na čtenáři** – zde pouze představíme princip fungování. Kódy ze cvičení budou k dispozici v ucelené podobě na předem domluvené adrese.

Určitě budeme potřebovat funkci pro nastavení režimu pinu. Definujme si proto výčtový typ v hlavičce:

```

enum class NGPIO_Function : uint8_t
{
    Input = 0, // 000 - vstupni pin
    Output = 1, // 001 - vystupni pin
    Alt_5 = 2, // 010 - alternativni funkce 5
    Alt_4 = 3, // 011 - alternativni funkce 4
    Alt_0 = 4, // 100 - alternativni funkce 0
    Alt_1 = 5, // 101 - alternativni funkce 1
    Alt_2 = 6, // 110 - alternativni funkce 2
    Alt_3 = 7, // 111 - alternativni funkce 3
};

```

A odpovídající funkci pro nastavení režimu – z dokumentace se dočteme, že pro každý pin jsou vyhrazeny 3 konkrétní bity v konkrétním registru:

```

void Set_GPIO_Function(int pin, NGPIO_Function func)
{
    GPIO_Reg reg;
    int bit;

    volatile unsigned long* GPIO =
        reinterpret_cast<unsigned long*>(GPIO_Base);

```

```

switch (pin / 10)
{
    case 0: reg = GPIO_Reg::GPFSEL0; break;
    case 1: reg = GPIO_Reg::GPFSEL1; break;
    case 2: reg = GPIO_Reg::GPFSEL2; break;
    case 3: reg = GPIO_Reg::GPFSEL3; break;
    case 4: reg = GPIO_Reg::GPFSEL4; break;
    case 5: reg = GPIO_Reg::GPFSEL5; break;
}

bit = (pin % 10) * 3;

const int reg_idx = static_cast<const int>(reg);

const unsigned long old =
    GPIO[reg_idx] & (~static_cast<unsigned int>(7 << bit));

GPIO[reg_idx] =
    old | (static_cast<unsigned int>(func) << bit);
}

```

Dále vytvoříme funkce pro nastavení výstupu na vysokou nebo nízkou úroveň (zapnuto nebo vypnuto):

```

void Set_Output(int pin, bool set)
{
    int reg, bit;

    volatile unsigned long* GPIO =
        reinterpret_cast<unsigned long*>(GPIO_Base);

    if (set)
        reg = static_cast<uint32_t>((pin < 32) ?
            GPIO_Reg::GPSET0 :
            GPIO_Reg::GPSET1);
    else
        reg = static_cast<uint32_t>((pin < 32) ?
            GPIO_Reg::GPCLR0 :
            GPIO_Reg::GPCLR1);

    bit_idx = pin % 32;

    GPIO[reg] = (1 << bit);
}

```

V poslední řadě chceme funkci pro zjištění, zda je vstup zapnutý nebo vypnutý:

```
bool Get_Output(int pin)
{
    int reg, bit;

    volatile unsigned long* GPIO =
        reinterpret_cast<unsigned long*>(GPIO_Base);

    reg = static_cast<uint32_t>((pin < 32) ?
        GPIO_Reg::GPLEV0 :
        GPIO_Reg::GPLEV1);
    bit_idx = pin % 32;

    return (GPIO[reg] >> bit) & 0x1;
}
```

7 Úkol za body

Z kódu výše lze vidět, že obsahuje spousty redundantních částí a kódu, který není úplně vzhledný. Přepište kód GPIO driveru tak, aby byl co nejobecnější, čitelný, a využíval objektového paradigmatu jazyka C++ (uzavřete kód do třídy). Taktéž využijte toho, že se volají konstruktory globálních objektů. Myslete rovněž na to, že obvykle může zařízení obsahovat více zařízení stejného typu – bylo by tedy dobré nějak ovladač a jeho inicializaci parametrizovat.

Rovněž lze vidět, že je v kódu spousty datových typů bez konkrétní délky – do souboru `intdef.h` definujte typy pro 8, 16 a 32 bitové číselné hodnoty se znaménkem i bez znaménka.