Tomasz **Francuz**

AVR

UKŁADY PERYFERYJNE

POZNAJ PRAKTYCZNE ZASTOSOWANIA URZĄDZEŃ PERYFERYJNYCH DLA **MIKROKONTROLERA AVR**!

- Dowiedz się, jak działają zewnętrzne pamięci półprzewodnikowe
- Naucz się korzystać z komparatorów oraz przetworników ADC i DAC
- Poznaj techniki wyświetlania obrazu i odtwarzania dźwięku

Helion

Redaktor prowadzący: Michał Mrowiec

Projekt okładki: Studio Gravite / Olsztyn
Obarek, Pokoński, Pazdrijowski, Zaprucki

Fotografia na okładce została wykorzystana za zgodą Shutterstock.com

Wydawnictwo HELION
ul. Kościuszki 1c, 44-100 GLIWICE
tel. 32 231 22 19, 32 230 98 63
e-mail: helion@helion.pl
WWW: http://helion.pl (księgarnia internetowa, katalog książek)

Drogi Czytelniku!
Jeżeli chcesz ocenić tę książkę, zajrzyj pod adres
http://helion.pl/user/opinie/avrukp
Możesz tam wpisać swoje uwagi, spostrzeżenia, recenzję.

Kody źródłowe wybranych przykładów dostępne są pod adresem:
ftp://ftp.helion.pl/przyklady/avrukp.zip

ISBN: 978-83-246-9225-5

Printed in Poland.

Spis treści

Rozdział 22.

Wyświetlacze LCD alfanumeryczne

Z tego rozdziału dowiesz się...

- jak podłączyć popularne wyświetlacze alfanumeryczne do XMEGA;
- jak stworzyć bibliotekę obsługującą kontroler HD44780;
- jak przesyłać polecenia dla LCD w formie transakcji i jak łączyć dostęp do kontrolera z aplikacji i funkcji obsługi przerwań.

Ze względu na malejące ceny, zwiększającą się dostępność oraz niski pobór energii coraz większym zainteresowaniem cieszą się wyświetlacze LCD. W tym rozdziale zostaną omówione wyświetlacze alfanumeryczne — ze uwagi na ich prostotę są ciągle najczęściej stosowanymi typami wyświetlaczy. W dalszej części książki zostaną omówione monochromatyczne wyświetlacze graficzne — dają one o wiele większe możliwości, ale ich sterowanie jest nieco bardziej skomplikowane. Ze względu na konieczność przesyłania sporej liczby danych wymagają także szybszego interfejsu łączącego z mikrokontrolerem. Stąd też zanim przejdziemy do ich praktycznego wykorzystania, będziemy musieli bliżej zapoznać się z kilkoma układami peryferyjnymi XMEGA.

Wyświetlacze LCD alfanumeryczne zawierają zazwyczaj scalone kontrolery, stąd też procesor nie steruje bezpośrednio matrycą LCD, ale komunikuje się z wyspecjalizowanym sterownikiem, który wykonuje jego polecenia. Dlatego też wykorzystanie tego typu wyświetlaczy wymaga znajomości typu użytego w nich sterownika. Wyświetlacze LCD mogą być łączone z mikrokontrolerem za pomocą różnych magistral — najczęściej są to magistrale SPI lub równoległe (w wersji 4-, 8- i 16-bitowej). Same wyświetlacze ze względu na budowę i możliwości możemy podzielić na dwie grupy:

- Wyświetlacze alfanumeryczne — umożliwiają one wyświetlanie cyfr, liter i innych symboli. Jednak w tym typie nie mamy możliwości sterowania poszczególnymi pikselami.
- Wyświetlacze graficzne — w tym typie możemy sterować stanem każdego piksela.

Aby wyświetlana na LCD zawartość była widoczna, niezbędne jest podświetlenie. Kupując wyświetlacz, musimy zwrócić uwagę, czy jest on wyposażony w jakieś podświetlenie (można dostać wyświetlacze LCD bez podświetlenia). Oczywiście lepiej jest wybrać wyświetlacz, który ma wbudowane podświetlenie. Samo podświetlenie może być wykonane w różny sposób. W starszych modelach spotyka się podświetlenie oparte na lampie CCFL (ang. *Cold Cathode Fluorescent Lamp*). Tego typu wyświetlacze są zwykle większe, cięższe, ale przede wszystkim wymagają specjalnej przetwornicy do sterowania lampą. Jej zadaniem jest generowanie wysokiego napięcia niezbędnego do zaświecenia się lampy, a następnie utrzymywanie go w granicach zapewniających jej prawidłowe działanie. Wyświetlacze tego typu są więc kłopotliwe w użytkowaniu, musimy wydać czasami sporo pieniędzy na odpowiednią przetwornicę, a w dodatku trwałość takiej lampy jest krótsza niż diod LED. Występują także problemy ze sterowaniem jasnością podświetlenia. W nowoczesnych wyświetlaczach LCD stosuje się praktycznie wyłącznie podświetlenie za pomocą diod LED. Nie wymagają one żadnych wyrafinowanych przetwornic do zasilania, zwykle zadowalają się napięciem w granicach 3 – 12 V, mają też znacznie większą trwałość. Jasnością takiego podświetlenia z łatwością można sterować, wykorzystując technikę PWM. Podświetlenie oparte na diodach LED może mieć różny kolor — biały, żółty, zielony, niebieski, czerwony. Kolor możemy sobie więc dobrać wg własnych preferencji. Najnowsze wyświetlacze alfanumeryczne są wykonywane w technologii OLED — w tej technologii świecą poszczególne piksele, więc taki wyświetlacz nie wymaga podświetlenia. Niejako przy okazji zyskujemy znacznie lepsze czasy przełączania pikseli — dla wyświetlaczy LCD, szczególnie w niższych temperaturach, czas przełączania wynosi kilkadziesiąt do kilkuset milisekund, co powoduje pojawienie się wyraźnych „duchów" i psuje estetykę. Wyświetlacze OLED nie mają tej wady. Jednak zazwyczaj są droższe.

Jeżeli możesz, staraj się wybierać wyświetlacze LCD z podświetleniem opartym na diodach LED lub wykonane w technologii OLED.

Kolejną istotną kwestią jest regulacja kontrastu. Zwykle graficzne kolorowe LCD z wbudowanymi sterownikami automatycznie regulują kontrast, dodatkowo sterownik ma zaimplementowane rejestry umożliwiające wyłącznie programową zmianę kontrastu. W przypadku prostszych sterowników, występujących najczęściej w wyświetlaczach monochromatycznych (zarówno alfanumerycznych, jak i graficznych), kontrast reguluje się, podając odpowiednie napięcie na jeden z pinów wyświetlacza. Jest to niezwykle istotne, gdyż bez właściwego napięcia regulującego kontrast na wyświetlaczu nic nie zobaczymy. Możemy w takiej sytuacji odnieść błędne wrażenie, że wyświetlacz nie działa. Z kolei jeśli kontrast będzie zbyt duży, wszystkie piksele będą włączone, co też może sugerować błędne działanie LCD.

Jedną z częstszych przyczyn tego, że po prawidłowym podłączeniu wyświetlacza LCD nic na nim nie widać albo wszystkie piksele są włączone, jest nieprawidłowe napięcie na pinie regulującym kontrast.

Obsługa wyświetlaczy alfanumerycznych

Wyświetlacze alfanumeryczne są zbudowane z matryc pikseli, zwykle o wielkości 5×8 pikseli, pogrupowanych razem. W tym typie wyświetlacza możemy sterować zawartością tak utworzonej matrycy znakowej, jednak nie ma możliwości sterowania poszczególnymi pikselami. Najczęściej spotykane wyświetlacze tego rodzaju mogą wyświetlać 1×8, 1×16, 2×16, 2×20, 4×16 znaków, gdzie pierwszy wymiar określa liczbę wyświetlanych wierszy, a drugi liczbę znaków w wierszu. Ponieważ nie sterujemy poszczególnymi pikselami, do kontrolera wysyłamy tylko kod znaku, który ma zostać wyświetlony na danej pozycji. Kontroler na podstawie kodu znaku generuje adres do specjalnego obszaru pamięci, tzw. tablicy znaków, w której znajduje się bajtowa reprezentacja poszczególnych pikseli tworzących znak. Dla matrycy 5×8 ma ona 40 bitów. Tablica ta jest umieszczona w pamięci ROM kontrolera LCD, nie możemy jej więc zmieniać. Zwykle jednak kontrolery udostępniają możliwość definicji kilku własnych znaków, dzięki czemu możemy zdefiniować np. znaki charakterystyczne dla języka polskiego. Takie podejście do generowania obrazu ma podstawową zaletę, jaką jest prostota i związane z tym niewielkie zapotrzebowanie na pamięć RAM. Do przechowania np. zawartości 8-znakowego wyświetlacza LCD wystarczy zaledwie 8 bajtów pamięci. Ma to szczególne znaczenie w prostych mikrokontrolerach, z niewielką ilością pamięci RAM. Najpopularniejszym kontrolerem stosowanym w wyświetlaczach alfanumerycznych jest *HD44780*; nawet jeśli w posiadanym wyświetlaczu jest inny kontroler, to mamy dużą szansę, że jest on z nim kompatybilny. Typowy rozkład sygnałów modułów opartych na tym kontrolerze pokazano w tabeli 22.1.

Tabela 22.1. *Typowy układ wyprowadzeń modułów alfanumerycznych LCD opartych na kontrolerze HD44780*

Pin	Nazwa	Funkcja
1	GND	Masa
2	Vcc	Zasilanie (typowo 5 V)
3	Vee	Regulacja kontrastu
4	RS	Zapis polecenia
5	RW	Strob odczyt/zapis
6	E	Wybór układu
7	D0	Bit danych 0
8	D1	Bit danych 1
9	D2	Bit danych 2
10	D3	Bit danych 3
11	D4	Bit danych 4
12	D5	Bit danych 5
13	D6	Bit danych 6
14	D7	Bit danych 7
15	A	Podświetlenie — anoda
16	K	Podświetlenie — katoda

Przed podłączeniem modułu zawsze upewnij się, czy podany rozkład odpowiada użytemu modułowi. W szczególności sprawdź rozmieszczenie linii zasilających. Ich niewłaściwe podłączenie grozi uszkodzeniem modułu!

Zwykle piny 15 i 16 sterujące podświetleniem są umieszczone osobno lub też przed pinem 1. Stąd też zawsze należy je dokładnie zidentyfikować przed podłączeniem modułu. Do pinów tych należy podłączyć napięcie wykorzystane do podświetlenia modułu. Przyłączone napięcie zależy od typu zastosowanego podświetlenia — CCFL, folii elektroluminescencyjnej lub diod LED. W dalszej części będziemy zajmować się modułem z podświetleniem LED. W nocie katalogowej każdego modułu znajdują się szczegółowe informacje dotyczące zasilania podświetlenia. Zwykle w tym celu wymagane jest napięcie 5 V, a natężenie prądu podświetlenia wynosi 20 – 50 mA.

Wyświetlacze LCD alfanumeryczne są dostępne w handlu w wersjach dostosowanych do różnych napięć zasilających. Typowo jest to napięcie 5 V, co stwarza pewne problemy przy podłączeniu takiego LCD do procesorów rodziny XMEGA. Są one zasilane maksymalnym napięciem 3,6 V, nie ma więc możliwości, aby LCD i procesor działały w tych samych domenach napięciowych. W efekcie przy połączeniu obu układów musimy zastosować konwersję napięć. Ponieważ LCD alfanumeryczny z perspektywy procesora jest urządzeniem bardzo wolnym, całkowicie wystarczającym rozwiązaniem jest zastosowanie szeregowych rezystorów, które wraz z wbudowanymi w procesor diodami zabezpieczającymi będą stanowiły układ obniżający napięcie na magistrali komunikacyjnej z 5 V do bezpiecznego dla wejścia XMEGA napięcia. Z drugiej strony jedynka logiczna generowana przez procesor zasilany napięciem 3,3 V jest poprawnie rozpoznawana przez LCD pracujący z napięciem 5 V. Jeśli procesor byłby zasilany bardzo niskim napięciem (rzędu 1,8 – 2,8 V), wymagany byłby bardziej skomplikowany konwerter, co zostało szerzej omówione w rozdziale 7. książki *AVR. Praktyczne projekty*.

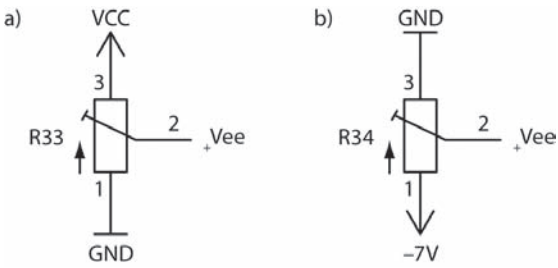
Wyświetlacze LCD wymagają podświetlenia, bez tego wyświetlana zawartość jest praktycznie nieczytelna. W starszych konstrukcjach wykorzystywano podświetlenie w oparciu o lampy fluorescencyjne lub folie elektroluminescencyjne, jednak obecnie dominującym typem jest podświetlenie za pomocą diod LED.

Ponieważ zasilamy diodę LED, wymagane jest dołączenie szeregowego rezystora. Czasami taki rezystor jest wbudowany w moduł LCD.

Podświetlenie tego typu zużywa sporą ilość energii. Innym rozwiązaniem jest kupno wyświetlacza wykonanego w technologii OLED (ang. *Organic Light-Emitting Diode*). Wyświetlacze tego typu cechują się zdecydowanie lepszym kontrastem, ale także większą szybkością przełączania, w związku z czym można za ich pomocą uzyskać o wiele lepsze efekty animacji, które są praktycznie nieosiągalne dla klasycznych wyświetlaczy LCD. Nie mają one także innej wady LCD — zależności szybkości przełączania segmentów od temperatury.

Wyświetlacze OLED nie mają wyprowadzonych pinów odpowiedzialnych za podświetlenie — po prostu go nie wymagają.

Kolejną istotną kwestią jest podłączenie właściwego napięcia regulującego kontrast wyświetlacza. Dla większości modułów LCD mieści się ono w przedziale GND – Vcc, a dla modułów o rozszerzonym zakresie temperatury w przedziale od –7 do 0 V — rysunek 22.1.



Rysunek 22.1. *Podłączenie napięcia regulującego kontrast: a) moduły klasyczne, b) moduły o rozszerzonym zakresie temperatur*

Napięcie ujemne można uzyskać z prostej pompy ładunkowej sterowanej przebiegiem PWM z procesora. Pobór prądu z tego wejścia jest znikomo mały. Alternatywnie można użyć układu *ICL7660*, który może generować napięcia ujemne.

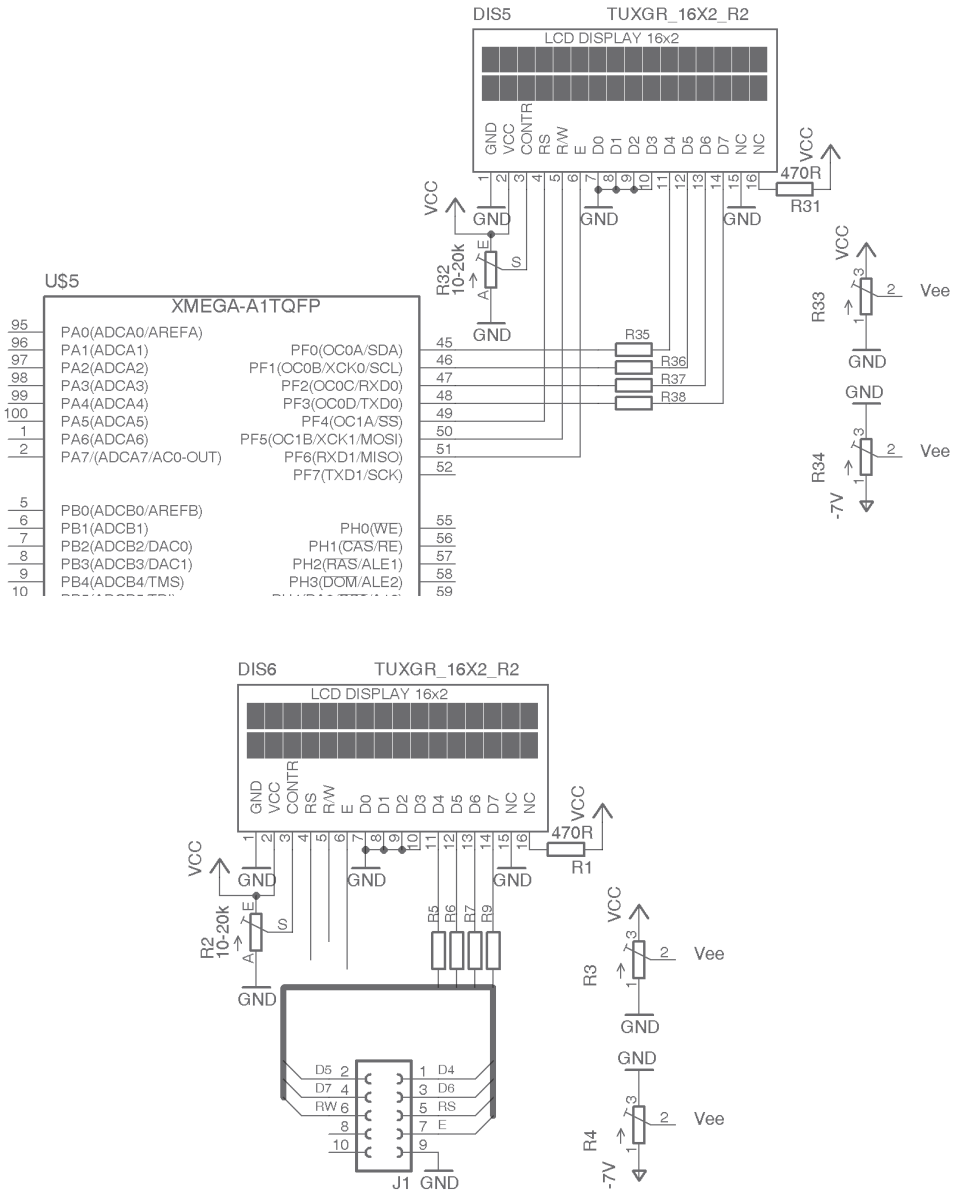
Kolejną decyzją, jaką musimy podjąć, jest sposób podłączenia modułu LCD z mikrokontrolerem. Mamy do wyboru dwie opcje — albo podłączamy wszystkie 8 linii danych (D0 – D7), albo tylko 4 najstarsze (D4 – D7). Podłączając tylko 4 linie danych, zmniejszamy liczbę niezbędnych połączeń modułu z mikrokontrolerem oraz liczbę wykorzystanych linii IO. Ze względu na znikomą ilość danych przesyłanych z/do modułu, wynikające z podłączenia tylko 4 linii danych spowolnienie transmisji jest bez znaczenia. **W trybie 4-bitowym najpierw transferowana jest starsza, a potem młodsza tetrada.** Niewykorzystane linie D0 – D3 można pozostawić niepodłączone; większość modułów wewnętrznie podciąga niepodłączone linie poprzez rezystor do Vcc.

Ponieważ linie D0 – D7 są dwukierunkowe, musimy pamiętać, aby podczas operacji odczytu z LCD odpowiednie piny mikrokontrolera były ustawione jako wejścia. W przeciwnym przypadku dojdzie do konfliktu.

Kolejnym sygnałem, co do którego musimy podjąć decyzję, jest sygnał RW określający typ operacji (odczyt/zapis). Ponieważ zwykle zapisujemy dane do LCD, właściwie nie zachodzi konieczność ich odczytywania; możemy ten sygnał na stałe połączyć z masą, oszczędzając w ten sposób jedną linię IO procesora. Takie rozwiązanie ma jednak poważną wadę — po jego zastosowaniu nie jest możliwe odczytywanie sygnału zajętości modułu (ang. *busy flag*). Powoduje to, że pomiędzy kolejnymi zapisami do modułu musimy stosować opóźnienia dobrane na najwolniejszą możliwą okoliczność. W efekcie cała transmisja jest wolniejsza, niż mogłaby być.

Jeśli korzystamy z tych modułów, nie musimy pisać własnych procedur ich obsługi. Instalując środowisko WinAVR (lub nowy toolchain firmy Atmel), w katalogu *doc\avr-libc\examples\sdtiodemo* znajdziemy gotowe funkcje obsługi HD44780. Funkcje te nie działają z mikrokontrolerami XMEGA, stąd też w załączonych przykładach zostały one zmodyfikowane tak, aby poprawnie współpracować również z tymi mikrokontrolerami.

Możemy też skorzystać z licznych przykładów dostępnych w internecie. **W dalszej części rozdziału zostaną wykorzystane funkcje z pakietu WinAVR napisane przez Joerga Wunscha.** Pokazane przykłady zakładają, że wyświetlacz jest połączony z mikrokontrolerem tak jak na rysunku 22.2.



Rysunek 22.2. *Połączenie LCD z mikrokontrolerem. Na górze podłączenie do mikrokontrolera XMEGA, na dole podłączenie do modułu Xplained. Na schematach pokazano także opcjonalne sposoby podłączenia pinu* `Vee` *odpowiedzialnego za regulację kontrastu LCD*

Zanim coś wyświetlimy na LCD, musimy poznać, w jaki sposób są generowane znaki. Sterownik LCD zawiera w sobie, niezależnie od typu użytej matrycy, 80 bajtów pamięci DDRAM (ang. *Display Data RAM*). Jeśli zastosowana matryca wyświetla mniejszą liczbę znaków, to część komórek pamięci jest nieużywana. Możemy je wykorzystać do innych celów — np. jako zwykłą pamięć RAM. Możemy też użyć jej do przesuwania napisów, które nie mieszczą się na wyświetlaczu. Aby można było umieścić znak na właściwej pozycji, niezbędne jest poznanie organizacji pamięci kontrolera. W zależności od użytej matrycy pamięć ta jest zorganizowana następująco:

- Dla matryc 16×1 — pamięć jest podzielona na dwa obszary, każdy zawierający po 8 znaków. Obszar pierwszy (od lewej) ma adresy `0x00` do `0x07`, a obszar drugi (prawy) adresy `0x40` do `0x47`. Stąd też gdy wyświetla się tekst przekraczający granicę obszarów, należy zadbać, aby poszczególne litery trafiły pod właściwe adresy.
- Dla matryc 20×1 — adresy `0x00` do `0x13`.
- Dla matryc 16×2 — adres pierwszej linii zaczyna się od `0x00` do `0x0f`, adres drugiej linii od `0x40` do `0x4f`.
- Dla matryc 20×2 — adresy pierwszej linii to `0x00` do `0x13`, a drugiej `0x40` do `0x53`.
- Dla matryc 40×2 — adresy pierwszej linii to `0x00` do `0x27`, drugiej linii `0x40` do `0x67`.
- Dla matryc 20×4 — adresy pierwszej linii to `0x00` do `0x13`, drugiej `0x40` do `0x53`, trzeciej `0x14` do `0x27`, a czwartej `0x54` do `0x67`.

Jak widać, w niektórych typach wyświetlaczy po każdej linii zostaje od kilku do kilkunastu bajtów, których zawartość nie jest wyświetlana. Ma to pewną zaletę — możemy do pamięci modułu wpisywać teksty dłuższe, niż są wyświetlane na ekranie, co ułatwia przewijanie tekstu. Niestety ma to też pewną wadę — funkcje wyświetlające coś na ekranie muszą „wiedzieć", jaką organizację ma matryca. W przeciwnym przypadku nie ma możliwości prawidłowego wyliczenia adresu komórki, do której ma odbyć się zapis.

W dalszej części rozdziału zostanie wykorzystany moduł LCD o organizacji 16×2 (ale można też bez problemu wykorzystać dowolny inny).

Zanim będzie można coś wyświetlić na ekranie, moduł musi zostać zainicjalizowany. W trakcie inicjalizacji ustawiane są podstawowe parametry pracy sterownika LCD — organizacja matrycy (liczba linii), wielkość czcionki (5×8 lub 8×11 pikseli). Wielkość czcionki zależy od typu podłączonej matrycy LCD. Dla konkretnego modułu LCD tylko jedna z tych wartości będzie poprawna. Oprócz inicjalizacji modułu należy także poprawnie ustawić stan pinów `IO` wykorzystywanych do podłączenia modułu LCD.

Większość pracy związanej z inicjalizacją modułu LCD, odbieraniem i wysyłaniem do niego danych wykonuje biblioteka Joerga Wunscha. Dostarcza ona niskopoziomowe funkcje umożliwiające komunikację ze sterownikiem *hd44780* i innymi kompatybilnymi z nim sterownikami. Wystarczy, że do aplikacji, w której planujemy wykorzystać taki moduł, dołączymy plik *hd44780.c* oraz plik nagłówkowy *hd44780.h*.

Oba pliki „zakładają", że istnieje plik nagłówkowy *defines.h*, zawierający podstawowe definicje związane ze sposobem podłączenia modułu LCD z mikrokontrolerem. Na początku należy określić, które linie IO zostały wykorzystane do podłączenia modułu:

```
#define HD44780_RS A, 4
#define HD44780_RW A, 5
#define HD44780_E  A, 6
#define HD44780_D4 A, 0
```

W powyższym przykładzie do kolejnych linii portu A (A4 – A6) zostały podłączone sygnały RS, RW i E modułu, natomiast do linii A0 – A3 linie D4 – D7 modułu LCD. Ważne jest, aby linie danych łączyć z pinami IO w kolejności rosnącej. Biblioteka wykorzystuje do transmisji danych pomiędzy modułem a mikrokontrolerem tylko 4 linie danych — dzięki temu możemy zmniejszyć liczbę połączeń, a zwolnione linie IO wykorzystać do innych celów. W pliku występuje jeszcze jedna definicja:

```
#define USE_BUSY_BIT 1
```

Określa ona, że biblioteka będzie używać flagi Busy modułu LCD — umożliwia to uzyskanie optymalnej szybkości współdziałania z modułem. Zakończenie realizacji bieżącej operacji moduł sygnalizuje zmianą stanu tej flagi, co umożliwia niezwłoczne wysłanie kolejnej komendy. Jeśli nie używamy flagi Busy, program musi generować maksymalne zalecane w nocie katalogowej opóźnienia, w efekcie cała transmisja zwalnia. Po zdefiniowaniu używanych pinów w pliku *defines.h* możemy rozpocząć korzystanie z biblioteki.

W pliku *hd44780.h* są udostępnione prototypy funkcji odpowiedzialnych za współpracę z modułem LCD.

Funkcje biblioteczne

Podstawę modułu stanowią dwie funkcje umożliwiające odpowiednio wysłanie danych do modułu oraz ich odczytanie:

```
void hd44780_outbyte(uint8_t b, uint8_t rs);
uint8_t hd44780_inbyte(uint8_t rs);
```

Obie funkcje wysyłają/odczytują 8-bitową daną; w przypadku wykorzystania tylko 4-bitowej szyny danych wysyłanie i odczytywanie danych odbywa się w dwóch etapach. Dodatkowo zmienna rs określa tryb dostępu. W przypadku wysyłania danych do modułu rs = 0 powoduje, że dane zostaną wysłane do rejestru komend, a jeśli rs = 1, dane trafią do rejestru danych. Przy odczycie jest podobnie, z tym że dla rs = 0 jest odczytywana flaga Busy i rejestr AC (ang. *Address Counter*).

Kolejna funkcja odpowiada za oczekiwanie na gotowość modułu:

```
void hd44780_wait_ready(bool islong);
```

W przypadku gdy w pliku *defines.h* symbol USE_BUSY_FLAG ma wartość 1, parametr islong jest ignorowany, a optymalizator kompilatora usuwa go, gdyż nie jest on wykorzystywany przez funkcję. Kiedy wartość USE_BUSY_FLAG jest różna od 1, parametr

ten określa długość opóźnienia. Jeśli jest różna od 0, opóźnienie wynosi 1,52 ms, a jeżeli jest równa 0, opóźnienie wynosi 37 µs. Ponieważ lepiej jest używać flagi `Busy`, możemy ten parametr ignorować.

Powyższe trzy funkcje wystarczą do komunikacji z modułem, dla wygody zdefiniowano jednak kolejne. Funkcje `hd44780_outcmd(n)` i `hd44780_incmd()` umożliwiają odpowiednio wysłanie polecenia do rejestru komend kontrolera lub odczytanie bitu `Busy` i licznika `AC`. Dwie kolejne — `hd44780_outdata(n)` oraz `hd44780_indata()` — umożliwiają zapis i odczytanie rejestru danych.

Oprócz funkcji odpowiedzialnych za komunikację z modułem LCD zdefiniowano także funkcję przeprowadzającą podstawową inicjalizację modułu, `hd44780_init(void)`, oraz funkcję `hd44780_powerdown(void)`, ustawiającą wszystkie linie użyte do komunikacji w stan 0, co umożliwia bezpieczne odłączenie zasilania od modułu LCD. **W przypadku pozostawienia którejś z wyżej wymienionych linii w stanie 1 przy odłączonym zasilaniu modułu stanowi ona jego zasilanie. W efekcie mimo wyłączenia moduł może pobierać znaczny prąd.**

Szerszego omówienia wymaga funkcja `hd44780_outcmd(cmd)`, która umożliwia wysłanie polecenia do rejestru poleceń sterownika LCD. Dla wygody zdefiniowane zostały różne komendy ułatwiające współpracę z modułem LCD. Komendy te są przekazywane jako argument wywołania funkcji `hd44780_outcmd`, np.:

```
hd44780_outcmd(HD44780_CLR);
```

powoduje wysłanie do sterownika polecenia `HD44780_CLR`, czyszczącego zawartość pamięci DDRAM kontrolera.

Komendy

Funkcja `hd44780_outcmd` przyjmuje jako argument predefiniowane makrodefinicje, znacznie ułatwiające współpracę z kontrolerem modułu LCD. Poniżej zostaną one pokrótce omówione.

HD44780_SHIFT(shift, right)

Ta makrodefinicja powoduje przesunięcie pozycji wyświetlanego tekstu (`shift = 1`) o jedną pozycję w lewo (argument `right = 0`) lub w prawo (argument `right = 1`). W przypadku gdy `shift = 0`, przesuwany w lewo lub prawo jest tylko kursor. Wysyłając wielokrotnie to polecenie, uzyskujemy kolejne przesunięcia o jedną pozycję w lewo lub prawo. Polecenie to służy głównie do przesuwania tekstu. Jednak ze względu na dużą bezwładność tekstowych modułów LCD nie należy przesuwać liter częściej niż ok. raz na sekundę — częstsze przesuwanie daje bardzo nieprzyjemne efekty wizualne. Każdy bufor linii jest „zawijany”, to znaczy, że po ostatnim znaku z prawej jest wyświetlany pierwszy znak z lewej i odwrotnie. Należy pamiętać, że długość bufora jest stała dla danego modelu matrycy. Np. dla modułów 16×2 bufor jednej linii wynosi dokładnie 40 bajtów, z czego 16 jest jednorazowo wyświetlanych. Poniższy kod cyklicznie przewija wyświetlany tekst w lewo:

```
lcd_puttext_P(PSTR("Test bufora i przewijania tekstu.\nTen tekst przewija sie w lewo"));
while(1)
{
```

```
 hd44780_outcmd(HD44780_SHIFT(1,0));
 _delay_ms(700);
}
```

HD44780_FNSET(if8bit, twoline, font5x10)

Polecenie to wybiera typ interfejsu — 8-bitowy, jeśli wartość parametru `if8bit` jest równa 1, lub 4-bitowy, jeśli jest równa 0. Typ interfejsu musi odpowiadać sposobowi połączenia modułu z mikrokontrolerem. Parametr `twoline` określa, czy podłączona matryca LCD ma jedną linię znaków, czy dwie. Matryce, które mają 4 linie tekstu, są traktowane przez kontroler jako matryce dwuliniowe — parametr `twoline` powinien mieć wartość 1. Jeśli dla matrycy zawierającej dwie lub więcej linii ustawimy go na 0, to wyświetlana będzie tylko jedna linia (w przypadku matryc dwuliniowych górna), a w przypadku matryc 4-liniowych będą wyświetlane dwie linie, rozdzielone linią pustą.

Ostatni parametr określa typ używanego generatora znaków. Powinien on odpowiadać użytej w module matrycy, zwykle więc jego wartość wynosi 0.

HD44780_DISPCTL(disp, cursor, blink)

Ustawia różne parametry pracy matrycy. Jeśli parametr `disp` ma wartość 1, to matryca jest włączona (wyświetla zawartość DDRAM), a jeśli 0, to matryca jest wyłączona, lecz stan pamięci DDRAM nie ulega zmianie. Np. kod:

```
while(1)
{
 hd44780_outcmd(HD44780_DISPCTL(0,1,1));
 _delay_ms(700);
 hd44780_outcmd(HD44780_DISPCTL(1,1,1));
  _delay_ms(700);
}
```

powoduje naprzemienne włączanie i wyłączanie matrycy, w efekcie wyświetlany tekst mruga.

Parametr `cursor` określa, czy sprzętowo wyświetlany kursor ma być widoczny (wartość parametru 1), czy niewidoczny (wartość parametru 0). Jeśli kursor jest widoczny, to dodatkowo możemy określić, czy ma migać (wartość parametru `blink` równa 1), czy nie (`blink = 0`). Jeśli kursor jest widoczny i nie miga, jest wyświetlany w postaci poziomej kreski. Wyświetlanie kursora może być użyteczne w sytuacji, kiedy użytkownik wprowadza jakieś dane. W pozostałych sytuacjach kursor możemy wyłączyć.

HD44780_ENTMODE(inc, shift)

Określa sposób wprowadzania danych do pamięci. Jeśli parametr `inc` ma wartość 1, to po każdej operacji zapisu/odczytu adres pamięci jest automatycznie zwiększany o jeden, co przyśpiesza operację zapisu/odczytu kolejnych znaków. Jeśli wartość `inc` jest równa 0, to adres jest automatycznie zmniejszany o 1. Dodatkowo parametr `shift` określa, czy wyświetlany obraz ma być automatycznie przesuwany, tak aby wyświetlać ostatnio wprowadzony znak (`shift = 1`) lub go nie wyświetlać (`shift = 0`).

HD44780_CLR

Powoduje wyczyszczenie (wypełnienie znakami o kodzie 32) całej zawartości pamięci DDRAM. Jednocześnie kursor wraca do pozycji pierwszej (pierwsza linia, pierwszy znak).

> Niewyświetlane bajty pamięci DDRAM także są kasowane. Jeśli są one używane do przechowywania zmiennych programu, to przed operacją kasowania należy je skopiować w bezpieczne miejsce. W przeciwnym przypadku zostaną utracone.

Wskaźnik adresu do pamięci DDRAM jest ustawiany na 0, zerowane jest także przesunięcie.

HD44780_HOME

Powoduje powrót kursora do pozycji początkowej — pierwsza linia, pierwszy znak. Wskaźnik adresu do pamięci DDRAM w efekcie zawiera 0, zerowane jest również przesunięcie wyświetlania znaków, w efekcie są one wyświetlane od pozycji 0.

HD44780_DDADDR(addr)

Ustawia następny adres zapisu/odczytu w pamięci DDRAM na `addr`. Tylko 7 bitów argumentu `addr` jest branych pod uwagę, w związku z czym można zaadresować maksymalnie 128 bajtów pamięci (z czego sterownik ma tylko 80, pozostałe lokacje są nieużywane).

HD44780_CGADDR(addr)

Ustawia następną operację odczytu/zapisu w pamięci CGRAM na `addr`. Pod uwagę branych jest tylko 6 bitów zmiennej `addr`, w efekcie można zaadresować maksymalnie 64 bajty pamięci CGRAM.

Przedstawione powyżej funkcje zapewniają jedynie podstawową komunikację z modułem LCD. Potrzebujemy jednak ciągle funkcji odpowiedzialnej za jego inicjalizację — funkcja biblioteczna przeprowadza ten proces tylko w podstawowym zakresie, musimy jeszcze zadbać o właściwe ustawienie parametrów związane z posiadaną matrycą. Napiszmy więc własne rozwinięcie funkcji inicjalizacyjnej:

```
void lcd_init()
{
  hd44780_init();      // Podstawowa inicjalizacja modułu
  hd44780_outcmd(HD44780_CLR); // Wyczyść pamięć DDRAM
  hd44780_wait_ready(1000);
  hd44780_outcmd(HD44780_ENTMODE(1, 0)); // Tryb autoinkrementacji AC
  hd44780_wait_ready(1000);
  hd44780_outcmd(HD44780_DISPCTL(1, 0, 0)); // Włącz wyświetlacz, wyłącz kursor
  hd44780_wait_ready(1000);
}
```

Zauważ, że po wysłaniu każdego polecenia do modułu jest wywoływana funkcja `hd44780_wait_ready(1000)` odpowiedzialna za oczekiwanie, aż realizacja wysłanego polecenia dobiegnie końca. **Jest to niezbędne, gdyż do czasu ukończenia bieżącej**

operacji dalsze polecenia są ignorowane. Jako argument podany jest parametr 1000 — jest on bez znaczenia, nasza biblioteka korzysta z flagi `Busy` i po prostu go ignoruje. Po wykonaniu powyższej funkcji moduł LCD jest poprawnie zainicjalizowany, a jego pamięć jest wyczyszczona (zawiera bajty `0x20`) i w efekcie moduł nic nie wyświetla. Od tej chwili możemy wysyłać znaki do wyświetlenia.

> Po wykonaniu inicjalizacji ekran może pozostać czysty lub wyświetlać całkowicie wypełnione kwadraty (wszystkie piksele włączone). Jeśli po inicjalizacji wszystkie piksele są włączone, należy nieco zmniejszyć kontrast.

Aby sobie ułatwić to zadanie, zdefiniujmy funkcję wysyłającą do modułu jeden znak:

```
void lcd_putchar(char c)
{
  static bool second_nl_seen;
  static uint8_t line=0;

  if ((second_nl_seen) && (c != '\n')&&(line==0))
  {// Odebrano pierwszy znak
      hd44780_wait_ready(40);
      hd44780_outcmd(HD44780_CLR);
      hd44780_wait_ready(1600);
      second_nl_seen=false;
  }
  if (c == '\n')
  {
        if (line==0)
   {
          line++;
          hd44780_outcmd(HD44780_DDADDR(64)); // Adres pierwszego znaku drugiej linii
          hd44780_wait_ready(1000);
   }
   else
   {
        second_nl_seen=true;
        line=0;
   }
  }
  else
  {
     hd44780_outdata(c);
     hd44780_wait_ready(40);
  }
}
```

Funkcja ta, ze względu na skomplikowane adresowanie pamięci DDRAM, jest zależna od konkretnego modelu modułu LCD. Będzie prawidłowo współpracować z modułami 2×16, 2×20 i 2×40 znaków. W przypadku innych modułów pozycje niektórych znaków mogą być nieprawidłowe.

Możemy już wyświetlać na LCD pojedyncze znaki, czas na wyświetlanie tekstu. Ponieważ teksty jako stałe dla zaoszczędzenia cennej pamięci RAM przechowuje się zazwyczaj w pamięci FLASH, zdefiniujmy funkcję odczytującą podany łańcuch znakowy z pamięci FLASH, a następnie umieszczającą go na LCD:

```
void lcd_puttext_P(prog_char *txt)
{
 char ch;
 while((ch=pgm_read_byte(txt)))
 {
  lcd_putchar(ch);
  txt++;
 }
}
```

Powyższa funkcja wysyła kolejne znaki odczytane z pamięci FLASH na LCD za pomocą funkcji `LCD_putchar`. Po napotkaniu znaku końca łańcucha (0, `nul`) przerywa swoje działanie.

Pozostaje nam przetestować działanie przedstawionych funkcji:

```
int main()
{
 lcd_init();
 lcd_puttext_P(PSTR("Test LCD.\nDruga linia"));
 while(1) {}
}
```

Na ekranie modułu LCD powinien wyświetlić się napis:

```
Test LCD.
Druga linia
```

Jeśli na LCD nic nie widzimy, to w pierwszej kolejności powinniśmy sprawdzić kontrast, zmieniając napięcie na pinie `Vee` modułu LCD.

Warto zdefiniować jeszcze funkcję ustawiającą pozycję, od której będzie wyświetlany następny znak:

```
void lcd_goto(uint8_t x, uint8_t y)
{
 hd44780_outcmd(HD44780_DDADDR(0x40*y+x));
 hd44780_wait_ready(1000);
}
```

Funkcja ta przyjmuje dwa parametry: `x` i `y`, określające pozycję, na której zostanie wyświetlony następny znak wysłany z mikrokontrolera do modułu LCD. Dzięki temu z łatwością możemy uaktualniać zawartość LCD, bez konieczności ponownego przesyłania wszystkich danych. Funkcja ta jest zależna od typu zastosowanego modułu.

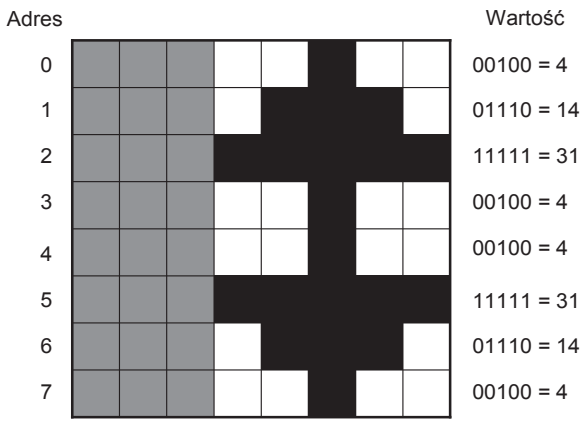
Ostatnią funkcją jest funkcja umożliwiająca czyszczenie zawartości pamięci modułu. Odpowiedzialne za to jest proste polecenie wysyłane do sterownika:

```
void lcd_cls()
{
 hd44780_outcmd(HD44780_CLR);
 hd44780_wait_ready(false);
}
```

Oprócz czyszczenia zawartości pamięci modułu powoduje ono ustawienie kursora w punkcie (0,0).

Definiowanie własnych znaków

Układ HD44780 jest wyposażony w 64 bajty pamięci CGRAM (ang. *Character Generator RAM*), która może przechowywać mapy bitowe 8 znaków o matrycy 5×8 pikseli lub 4 znaków o matrycy 5×10 pikseli. Przykład definicji znaku na matrycy 5×8 pokazano na rysunku 22.3.



Rysunek 22.3. *Przykład definicji własnego znaku w pamięci CGRAM. Znak rysujemy na matrycy 5×8 bitów, pola zaciemnione odpowiadają wartości 1, pola białe wartości 0. Wartość wyliczoną dla każdej linii pikseli wpisujemy do pamięci CGRAM sterownika. Najstarsze 3 bity każdego bajta (pola szare) są bez znaczenia — wyświetlacz pomija je przy wyświetlaniu obrazu*

Dostęp do tej pamięci jest możliwy dzięki wysłaniu polecenia ustawiającego adres zapisu/odczytu pamięci CGRAM. Po jego wysłaniu wszystkie operacje zapisu i odczytu dotyczą tej pamięci, a nie pamięci DDRAM. Aby wrócić do adresowania pamięci DDRAM, należy wybrać jej adres lub dokonać operacji wymagającej przesunięcia kursora.

Pamięć CGRAM jest pamięcią ulotną, po ponownym włączeniu zasilania definicje znaków muszą być ponownie przesłane przez procesor.

Bity o wartości 1 w definicji znaku odpowiadają włączonym pikselom, bity o wartości 0 pikselom wyłączonym. Najstarsze 3 bity każdego bajta w pamięci CGRAM są bez znaczenia — te pozycje nie są wyświetlane przez matrycę. Definiując znak, należy także pamiętać, że ostatnia linia wyświetlana przez matrycę (w zależności od wielkości matrycy znaku linia 8 lub 10) powinna zawierać same zera — w tej linii będzie wyświetlany kursor.

Najczęściej matryce LCD podłączone do sterownika HD44780 mają organizację 5×8, czyli jeden znak jest definiowany przez 8 kolejnych bajtów określających stan poszczególnych linii tworzących znak. Stwórzmy funkcję, której zadaniem będzie załadowanie definicji znaków z pamięci FLASH mikrokontrolera do pamięci CGRAM:

```
void lcd_defchar_P(uint8_t charno, prog_uint8_t *chardef)
{
 hd44780_outcmd(HD44780_CGADDR(charno*8));
 hd44780_wait_ready(40);
 for(uint8_t c=0;c<8;c++)
  {
   hd44780_outdata(pgm_read_byte(chardef));
```

```
    hd44780_wait_ready(40);
    chardef++;
   }
}
```

Funkcja `LCD_defchar_P` jako argumenty przyjmuje numer definiowanego znaku (0 – 7) oraz wskaźnik do obszaru pamięci FLASH zawierającego definicję znaku (obszar ten zajmuje 8 następujących po sobie bajtów). Jak widzimy, funkcja najpierw ustawia właściwy adres, pod którym znajdzie się początek definicji znaku w pamięci CGRAM — ponieważ jeden znak jest opisywany za pomocą 8 bajtów, kolejne adresy znaków to *kod_znaku*×*8*. Następnie dane opisujące znak są ładowane z pamięci mikrokontrolera i zapisywane w pamięci CGRAM sterownika. Poniższy program ilustruje wykorzystanie funkcji `LCD_defchar_P`:

```
prog_uint8_t char1[8][8]={{0,0,0,0,0,0,0,255}, {0,0,0,0,0,0,255,255},
↪{0,0,0,0,0,255,255,255}, {0,0,0,0,255,255,255,255}, {0,0,0,255,255,255,255,255},
↪{0,0,255,255,255,255,255,255}, {0,255,255,255,255,255,255,255},
↪{255,255,255,255,255,255,255,255}};

int main()
{
 for(uint8_t x=0;x<8;x++) lcd_defchar_P(x,&char1[x][0]); // Załaduj wzorce znaków
 lcd_init();
 for(uint8_t x=0;x<8;x++) lcd_putchar(x);      // Wyświetl znaki o kodach 0 – 7
 while(1) {}
}
```

W pierwszej linii funkcji `main` następuje załadowanie nowych definicji znaków do pamięci CGRAM, następnie inicjalizowany jest wyświetlacz, po czym w pierwszej linii są wyświetlane znaki o kodach 0 – 7, a więc znaki, których definicja została przesłana z mikrokontrolera.

Zauważ, że pamięć CGRAM, podobnie jak DDRAM, możemy zapisywać i odczytywać przed inicjalizacją modułu LCD. Proces inicjalizacji jest potrzebny tylko do prawidłowego wyświetlania na ekranie LCD.

Ponieważ dane potrzebne do wyświetlenia znaku są na bieżąco pobierane z pamięci podczas odświeżania matrycy LCD, jakiekolwiek zmiany w definicji znaku, kiedy jest on widoczny na LCD, pociągają za sobą natychmiastowe zmiany w wyświetlanym obrazie. Można tę właściwość sterownika wykorzystać do stworzenia prostych animacji:

```
void lcd_box(uint8_t y)
{
 hd44780_outcmd(HD44780_CGADDR(0)); // Zaczynamy od znaku o kodzie 0
 hd44780_wait_ready(40);
 for(uint8_t c=0;c<y;c++) // Stwórz linie z włączonymi pikselami
  {
   hd44780_outdata(0xFF);
   hd44780_wait_ready(40);
  }
 for(uint8_t c=y;c<8;c++)    // Stwórz linie z wyłączonymi pikselami
  {
   hd44780_outdata(0x00);
   hd44780_wait_ready(40);
  }
```

```
}

int main()
{
 lcd_init();
 lcd_putchar(0);
 while(1)
 {
  for(uint8_t x=0;x<8;x++)
  {
   lcd_box(x);
   _delay_ms(100);
  }
  for(int8_t x=7;x>=0;x--)
  {
   lcd_box(x);
   _delay_ms(100);
  }
 }
}
```

Funkcja `main` wyświetla na LCD tylko jeden znak o kodzie 0, a następnie cyklicznie zmienia jego definicję w pamięci CGRAM. W efekcie postać znaku wyświetlana na ekranie ciągle się zmienia.

Transakcyjna obsługa LCD

Pokazana do tej pory obsługa LCD alfanumerycznego miała pewne wady. Jak wiemy, operacje odwołujące się do kontrolera LCD są niezwykle wolne, cykl odczytu/zapisu dowolnego rejestru kontrolera trwa co najmniej 1600 ns, co dla MCU taktowanego zegarem 32 MHz przekłada się na czas wykonania około 52 instrukcji asemblera. Co gorsza, większość komend realizowanych przez kontroler jest wykonywana w czasie około 37 µs, co przekłada się na tysiące zmarnowanych taktów MCU. Stąd też jakikolwiek zapis/odczyt LCD to z perspektywy programu straszne marnotrawstwo czasu.

> Problem ten dotyczy każdego urządzenia IO, które działa wolniej niż procesor. W takiej sytuacji warto napisać pewną warstwę pośrednią — sterownik — którego zadaniem będzie buforowanie żądań dostępu do urządzenia i rozstrzyganie konfliktów, dzięki czemu różne części programu będą „miały wrażenie", że mają wyłączny dostęp do urządzenia.

Pokazane wcześniej funkcje obsługi LCD mają jeszcze jedną wadę — nie są współbieżne, czyli nie można ich wykonywań jednocześnie w kilku miejscach programu, w tym w szczególności w programie głównym i w funkcjach obsługi przerwań. W wielu przypadkach ta wada jest bez znaczenia, jednak czasami jest uciążliwa — dla przykładu gdy na wyświetlany tekst chcielibyśmy nałożyć inne informacje, np. o dacie lub godzinie. Oczywiście wyświetlanie można zorganizować tak, aby nie było potrzeby pisania współbieżnego kodu, np. poprzez zastosowanie bufora pamięci VRAM kontrolera LCD. Rodzi to jednak kolejne problemy i jest mało eleganckie.

Zastanówmy się, w jaki sposób, najlepiej jednocześnie, rozwiązać problem wolnego dostępu do urządzenia i współbieżności kodu. Rozwiązaniem może być wprowadzenie tzw. transakcji. **Transakcją nazywamy zbiór operacji tworzących pewną całość. To, co wyróżnia tak wykonywany zestaw operacji, to atomowość, spójność, izolacja i trwałość.** Pod tymi terminami kryje się istota wykonywanej operacji. Atomowość transakcji zapewnia, że jest ona wykonywana w sposób niepodzielny, co gwarantuje nam prawidłową współpracę z danym urządzeniem `IO`, w tym przypadku kontrolerem LCD. Ważna dla nas jest także izolacja — dzięki temu inne operacje na LCD (inne transakcje) nie będą miały wpływu na wynik aktualnie wykonywanej transakcji — nie będą zakłócały jej wykonania, z drugiej strony nasza transakcja nie zakłóci wykonania innych. Trwałość z kolei zagwarantuje nam, że jeśli sterownik potwierdzi wykonanie transakcji, to znaczy, że efekt jej działania jest wyświetlony na LCD. Ta cecha nie jest nam aż tak potrzebna — jest ona, wydawałoby się, oczywista. Niemniej jest to pewna gwarancja, że cała operacja przebiegła poprawnie i w efekcie LCD znajduje się w określonym przez nas stanie. Tyle teorii, przejdźmy do praktyki.

Kody poniższego przykładu znajdują się w katalogu *Przyklady/LCD-alfa/LCD-transact*.

Aby zapewnić transakcyjny dostęp do LCD, musimy stworzyć pewne struktury danych, których zadaniem będzie przechowywanie informacji o operacjach składających się na transakcje i stanie ich wykonania. W tym celu posłużymy się wiadomościami z rozdziału 5. „Jak uporządkować chaos, czyli złożone typy danych i listy". Do przechowywania oczekujących transakcji posłużymy się buforem pierścieniowym, zanim jednak go zaimplementujemy, zastanówmy się, jak powinna wyglądać struktura przechowująca informacje o transakcji. Struktura ta powinna zawierać co najmniej:

- pole danych (`data`) z informacjami, które mają być przesłane do kontrolera LCD,
- pole określające liczbę danych do wysłania (`len`),
- pole określające realizowane polecenie dla LCD (`cmd`) — pole to posłuży programowi sterownika do właściwej interpretacji danych znajdujących się w polu `data`,
- kilka pól kontrolnych przechowujących informacje potrzebne do realizacji samej transakcji. Jedno z nich — `Ready` — będzie przyjmować wartość `true`, jeśli dana transakcja została zrealizowana, lub `false` w przeciwnym przypadku. Znaczenie drugiego pola — `SelfDel` — może wydawać się nieco enigmatyczne; pole to określa, czy pamięć przydzielona dla transakcji ma być zwolniona w sterowniku LCD (wartość `true`), czy też zostanie zwolniona w programie (wartość `false`).

Oto jak może wyglądać struktura definiująca transakcję:

```
typedef struct
{
   volatile bool    Ready : 1; // true, jeśli transakcja została zrealizowana
   bool  SelfDel : 1;          // true, jeśli pamięć przydzielona transakcji ma zostać zwolniona
   LCD_Cmd   cmd : 2;          // Polecenie do zrealizowania
   uint8_t   len : 6;          // Długość polecenia
```

```
    unsigned      : 0;          // Wyrównanie do granicy bajta
    uint8_t  data[];            // Dane transakcji
} LCD_trans;
```

Należy zwrócić uwagę na pole:

```
unsigned      : 0;
```

Nie definiuje ono żadnego pola struktury, ale jedynie informuje kompilator, że kolejne pole (w naszym przykładzie o nazwie `data`) ma być wyrównane do granicy bajta — dzięki temu dostęp do kolejnego pola będzie odbywał się szybciej. Z kolei samo pole `data` jest zadeklarowane jako tzw. **typ niekompletny**.

Typ niekompletny (ang. *incomplete type*) to typ, którego rozmiaru nie da się określić.

W pokazanym przykładzie rozmiaru pola `data` nie da się określić, gdyż został on zadeklarowany jako typ tablicowy, z tym że nie podano wielkości tablicy. Wielkości nie podano, gdyż na etapie deklaracji struktury nie wiemy, jakiej wielkości dane będą w niej przechowywane. Tego typu deklaracja ma bardzo poważne konsekwencje — skoro wielkości pola `data` nie da się określić, to jaki będzie wynik działania operatora `sizeof ↪(LCD_trans)`? Kompilator stara się jakoś wybrnąć z tej sytuacji, w związku z czym zwróci wielkość struktury, ale taką, jakby pole `data` w ogóle nie istniało — jego rozmiar będzie wynosił 0. W ramach ćwiczenia zastanów się, ile bajtów pamięci będzie zajmowała struktura `LCD_trans`.

Skoro dysponujemy już strukturą przechowującą poszczególne transakcje, pora na stworzenie obiektu przechowującego kolekcję transakcji. Dodanie kolejnej struktury będzie polegało na dodaniu jej do takiego obiektu, z drugiej strony program sterownika LCD będzie mógł z tej kolekcji pobierać kolejne transakcje do realizacji. Opis ten przypomina opis działania bufora pierścieniowego — z jednym wyjątkiem — po zapełnieniu całego bufora nie będziemy usuwać niezrealizowanych transakcji, lecz zablokujemy dodawanie kolejnych. W tym celu posłużymy się definicją następnej struktury:

```
typedef struct
{
   LCD_trans *elements[LCD_MAXTRANS]; // Wskaźniki do transakcji
   uint8_t Beg;                       // Pierwszy element bufora
   uint8_t Count;                     // Liczba elementów w buforze
} CircBuffer;
```

Struktura ta zawiera deklarację tablicy wskaźników na transakcje (pole `elements`). Ponieważ jest to tablica, musimy znać liczbę jej elementów — jest ona zadeklarowana w stałej `LCD_MAXTRANS`:

```
#define LCD_MAXTRANS 10             // Maksymalna liczba pamiętanych transakcji
```

Do realizacji bufora są potrzebne jeszcze dwa pola: `Beg`, wskazujące na pierwszą transakcję w buforze, oraz pole `Count` określające liczbę transakcji znajdujących się w buforze. Jeśli `Count == 0`, to znaczy, że w buforze nie ma żadnych oczekujących transakcji, a jeśli `Count == LCD_MAXTRANS`, to znaczy, że bufor jest pełny i nie można

dodawać do niego kolejnych transakcji. Właściwość tę wykorzystują dwie zdefiniowane w pliku *LCD_trans.c* funkcje:

```
static inline bool cbIsFull(CircBuffer *cb)
{
   return cb->Count == LCD_MAXTRANS;
}

static inline bool cbIsEmpty(CircBuffer *cb)
{
   return cb->Count == 0;
}
```

Jak pamiętamy, w przypadku funkcji modyfikatory `static inline` powodują, że dana funkcja nie będzie istnieć jako samodzielna, lecz w każdym miejscu, w którym jest wywoływana, jest wstawiany raczej jej kod, a nie wywołanie. Ma to znaczenie dla krótkich funkcji (a więc takich jak pokazane powyżej), dla których koszty wywołania są zazwyczaj większe niż koszty umieszczenia ciała funkcji w miejscu jej wywołania. Tego typu funkcje zachowują się w sposób zbliżony do makrodefinicji (z tym że respektują wszystkie reguły języka C, w szczególności kolejność operatorów czy kontrolę typów).

Takie funkcje jako argument pobierają adres bufora, na którym mają operować. W naszym przypadku bufor jest zdefiniowany następująco:

```
static CircBuffer LCD_TransBuffer;          // Bufor na transakcje
```

Należy zauważyć, że jest on zdefiniowany jako struktura globalna, z modyfikatorem `static`. Modyfikator ten ogranicza zasięg widoczności zmiennej `LCD_TransBuffer` do pliku, w którym zmienna ta została zdefiniowana (w tym przypadku modyfikator `static` jest niejako przeciwieństwem modyfikatora `extern`). Działanie to ma jedynie znaczenie kosmetyczne — uniemożliwia odwołanie się do bufora za pomocą funkcji, które nie zostały zdefiniowane w miejscu jego definicji. Oprócz funkcji umożliwiających określenie stanu bufora potrzebne są jeszcze funkcje umożliwiające dodanie i pobranie transakcji. Pierwszą funkcją będzie funkcja dodająca transakcję do bufora:

```
bool cbAdd(CircBuffer *cb, LCD_trans *elem)
{
   ATOMIC_BLOCK(ATOMIC_RESTORESTATE)
   {
      if(cbIsFull(cb)) return false;          // Czy jest miejsce w kolejce?
      uint8_t end = (cb->Beg + cb->Count) % LCD_MAXTRANS;
      cb->elements[end] = elem;               // Dodaj transakcję
      ++cb->Count;                            // Liczba elementów w buforze
   }
   return true;       // Wszystko OK
}
```

Funkcja ta dodaje transakcję (zmienna `elem`) do bufora kołowego. Zanim transakcja zostanie dodana, sprawdzane jest, czy w buforze jest miejsce — jeśli nie, funkcja zwróci `false`. Jeśli dodanie jest możliwe, wartość licznika określającego liczbę transakcji przechowywana w buforze (`Count`) zwiększa się o jeden. Warto zastanowić się też, dlaczego praktycznie całe ciało tej funkcji jest zamknięte w sekcji atomowej (`ATOMIC_BLOCK`). Jedną z cech naszego sterownika ma być możliwość współbieżnego dostępu

do LCD — to znaczy, że żądanie np. zapisu do LCD może wystąpić zarówno w głównej pętli programu, jak i asynchronicznie w przerwaniu. Stąd też wynika, że funkcja dodająca transakcję musi być napisana w sposób zapewniający jej poprawną pracę w sytuacji, gdy zostanie ona przerwana i ponownie wywołana przed zakończeniem działania jej poprzedniej instancji. Umieszczenie ciała tej funkcji w sekcji atomowej nam to zapewnia — dzięki temu bufor transakcji zawsze będzie spójny. Dla zaspokojenia ciekawości warto usunąć sekcję atomową i sprawdzić, jak wtedy będzie zachowywać się ta funkcja i jak wpłynie to na spójność przechowywanych danych.

Drugą niezbędną funkcją jest funkcja odczytująca bufor transakcji i zwracająca transakcję do zrealizowania (lub `NULL`, jeśli żadnej transakcji nie ma w buforze):

```
LCD_trans *cbRead(CircBuffer *cb)
{
   LCD_trans *elem;
   ATOMIC_BLOCK(ATOMIC_RESTORESTATE)
   {
      if(cbIsEmpty(cb)) return NULL;        // Bufor pusty, nie można zwrócić elementu
      elem = cb->elements[cb->Beg];
      cb->Beg = (cb->Beg + 1) % LCD_MAXTRANS;
      -- cb->Count;                        // Zmniejszamy liczbę elementów pozostałych
   }                                       // w buforze
   return elem;
}
```

Funkcja ta jest bardzo podobna do poprzedniej — najpierw sprawdza, czy bufor zawiera jakąś oczekującą transakcję (`cbIsEmpty(cb)`), jeśli tak, to zwraca adres opisującej ją struktury i zmniejsza liczbę transakcji oczekujących (pole `Count`). W ten sposób mamy zrealizowaną całą funkcjonalność związaną z obsługą bufora pierścieniowego. Pokazane funkcje są uniwersalne i z bardzo podobnych (lub wręcz tych samych) będziemy korzystać w kolejnych rozdziałach w kontekście np. obsługi transakcji związanych z interfejsami szeregowymi.

Pora przejść do samego sterownika LCD. Jego zadaniem będzie sprawdzenie, czy w buforze oczekują jakieś transakcje do realizacji, a jeśli tak, to ich wykonanie. Ponieważ dane do LCD mogą być wysyłane co określony, minimalny czas, znacznie dłuższy niż czas, jakiego na to zadanie potrzebuje mikrokontroler, do wysyłania kolejnych paczek danych posłużymy się timerem. Timer będzie generował przerwanie nadmiaru (`TCD0_OVF_vect`), które będzie wyznaczało tempo, w jakim kolejne porcje danych będą trafiały do LCD. Z noty katalogowej kontrolera wynika, że minimalny czas trwania wysokiego stanu sygnału *Enable* to 230 ns, a okres tego sygnału nie powinien być krótszy niż 500 ns. Ponieważ nasz dostęp do LCD odbywa się w sposób nieblokujący MCU, więc szybkość wysyłania danych do LCD jest bez znaczenia. Stąd też w pokazanym przykładzie przyjęto, że dane będą wysyłane co 4 µs, co określa stała:

```
#define LCD_ACCESSTIME 0.000004
```

Ponieważ komunikacja z LCD odbywa się w sposób nieblokujący, nie zależy nam też na czasie (i tak w stosunku do czasu odświeżania samego LCD jest on bardzo krótki), w efekcie nie ma potrzeby odczytywania flagi `busy` kontrolera. Dzięki temu w części przypadków możemy w ogóle zrezygnować z sygnału wyboru `R/W` i wymusić jego stały

poziom logiczny, umożliwiający zapis do LCD. Dzięki temu można zaoszczędzić dodatkowy pin IO[1].

Cała logika naszego sterownika jest zawarta w funkcji obsługi przerwania przepełnienia timera (TCD0_OVF_vect). Ponieważ LCD jest połączony z MCU w trybie 4-bitowym (dla zaoszczędzenia liczby wykorzystanych pinów IO), kolejne 8-bitowe dane muszą być podzielone na dwie tetrady i wysłane do LCD w kolejności starsza/młodsza tetrada. Informacja o aktualnie wysyłanych danych jest umieszczona w zmiennej trans o typie:

```
static struct
{
   uint8_t pos    : 6;          // Pozycja w polu danych aktualnej transakcji
   uint8_t nibble : 1;          // Która tetrada jest wysyłana?
} seq;
```

Dlaczego tak? Dzięki wykorzystaniu struktury i pól bitowych można zaoszczędzić jeden bajt pamięci SRAM. Ze względu na wielkość pamięci obsługiwanej przez kontroler LCD możemy być pewni, że transakcje zawierające więcej niż 63 bajty są raczej nierealne (nie miałyby większego sensu). Stąd też do przechowywania informacji o aktualnie wysyłanym bajcie danych wystarczy 6 bitów — tyle samo zostało wykorzystanych do określenia długości pola danych transakcji w strukturze LCD_trans. Zaoszczędzony bit można poświęcić na flagę nibble określającą, która tetrada (młodsza/starsza) jest wysyłana. Bez pól bitowych flaga ta zajęłaby dodatkowy bajt pamięci.

Przejdźmy do implementacji sterownika. Pierwszą rzeczą, jaką należy sprawdzić, jest to, czy w buforze czeka jakaś transakcja do zrealizowania. Odpowiedzialny za to jest fragment kodu obsługi przerwania nadmiaru timera:

```
if(trans == NULL)            // Nic do zrobienia, sprawdźmy, czy jakaś transakcja oczekuje
{
   trans=cbRead(&LCD_TransBuffer); // Czy jest jakaś oczekująca transakcja?
   seq.pos=0;
   seq.nibble=0;
   if(trans == NULL) TCD0_CTRLA=TC_CLKSEL_OFF_gc; // Nie ma żadnych transakcji — wyłącz timer
}
```

W przypadku gdy żadna transakcja nie oczekuje na realizację, timer jest wyłączany — dzięki temu nie będą zgłaszane kolejne przerwania przepełnienia i MCU nie będzie tracił czasu na ich obsługę. Co prawda wynikający z tego zysk czasowy jest marginalny, lecz ma to istotniejszą konsekwencję — w przypadku usypiania MCU zbędne przerwanie timera nie będzie niepotrzebnie wybudzało procesora. W takiej sytuacji ponowne włączenie timera nastąpi dopiero w funkcji dodającej transakcję do kolejki — a więc w sytuacji, gdy mamy pewność, że istnieje oczekująca transakcja.

Druga część funkcji obsługi przerwania jest związana z realizacją samej transakcji. W pokazanym przykładzie zaimplementowano tylko jeden typ transakcji — żądanie zapisu łańcucha tekstowego pod wskazany adres VRAM (na określonej pozycji LCD). Jeśli zajdzie taka potrzeba, programista może zaimplementować inne polecenia i dodać

[1] Warto zauważyć, że w „klasycznej" obsłudze LCD też nie musimy czytać stanu flagi busy, zamiast tego wystarczy wprowadzać pętle opóźniające. Jednak ponieważ taka obsługa blokuje MCU, nie jest ona zalecana. Wady tej nie ma dostęp transakcyjny, co jest jego dodatkową zaletą.

kod odpowiedzialny za ich obsługę. Zauważmy, że każda transakcja musi zawierać adres początku pamięci wideo, od którego będzie zapisywany tekst. Dzieje się tak dlatego, że transakcja wykonana wcześniej może ustawić wskaźnik zapisu na dowolnej komórce pamięci. W efekcie tekst z kolejnej transakcji byłby wyświetlany od komórki, na której zakończył się zapis poprzedniej transakcji. Takie działanie oczywiście jest niedopuszczalne, stąd też każdy zapis do pamięci wideo poprzedza ustawienie rejestru indeksowego. Problem ten można rozwiązać także w inny sposób — poprzez wprowadzenie tzw. uchwytów (ang. *handlers*), które zawierałyby stan kontrolera LCD. Niemniej to rozwiązanie dodatkowo komplikowałoby nasz sterownik. Struktura danych (zawartych w polu `data`) ma więc następujący format:

- bajt nr 0 zawiera wartość pozycji, od której należy dokonywać zapisu pamięci wideo — jest to wartość przesyłana do rejestru określającego adres zapisu,
- kolejne bajty zawierają łańcuch znakowy, który należy umieścić w pamięci CGRAM.

Ponieważ bajt nr 0 zawsze zawiera wartość wpisywaną do rejestrów sterujących kontrolera, podczas jego wysyłania jest ustawiana linia `RS` sygnalizująca zapis do rejestru. Podczas wysyłania kolejnych bajtów linia ta jest zerowana, w związku z czym zapis odbywa się do pamięci CGRAM.

Kod obsługujący transakcję wygląda następująco:

```
if(trans)
{                                   // Jest transakcja do zrealizowania
   uint8_t dat=trans->data[seq.pos];
   if(seq.nibble == 0) dat>>=4;   // To trzeba zmienić, jeśli linie danych nie są połączone
                                   // z pinami 0 – 3 portu IO
   hd44780_outnibble_nowait(dat & 0x0F, seq.pos != 0); // Zapisujemy rejestr sterujący lub dane
   ++seq.nibble;
   if(seq.nibble == 0) ++seq.pos; // Co drugą tetradę zwiększamy pozycję bufora
   if(seq.pos >= trans->len)
   {
      trans->Ready=true;              // Koniec transakcji
      if(trans->SelfDel) free_re(trans); // Zwolnij pamięć transakcji, jeśli tak sobie życzył
                                         // programista
      trans=NULL;                     // Koniec transakcji
   }
   CLR(OUT, HD44780_E);
}
```

Ta część przerwania wysyła kolejne tetrady do kontrolera LCD. Warto zastanowić się nad działaniem sekwencji:

```
++seq.nibble;
```

Ponieważ pole `nibble` jest jednobitowe, operacja inkrementacji prowadzi do zmiany stanu tego pola na przeciwny (pole to ma wartość 0 lub 1). Kiedy zostaną wysłane wszystkie dane przeznaczone dla kontrolera, obsługa transakcji kończy się. Stan ten sygnalizuje nadanie wartości `true` polu `Ready` struktury `LCD_trans`. Dzięki temu program może sprawdzić, asynchronicznie w stosunku do przerwania, kiedy transakcja uległa zakończeniu. Opcjonalnie jest wykonywana jeszcze jedna funkcja — jeśli pole `SelfDel` ma wartość `true`, to pamięć zarezerwowana na transakcję jest automatycznie

zwalniana. W tym celu wykorzystuje się funkcję `free_re`, której prototyp jest zadeklarowany w pliku *Alloc_safe.h*. Funkcja ta wywołuje funkcję biblioteczną `free`, która zwalnia pamięć przydzieloną dynamicznie na stercie. Ponieważ funkcja ta nie jest funkcją *reentrant*, należy stworzyć odpowiednią „protezę", opakowując ją w blok atomowy, co zapewnia, że nie zostanie ona ponownie wywołana, zanim jej poprzednia instancja nie zakończy działania. Oczywiście lepszym rozwiązaniem byłoby napisanie własnych funkcji dynamicznej alokacji pamięci, które będą *reentrant*.

Bardzo ważne jest, aby pole `SelfDel` miało wartość `true` wyłącznie dla transakcji, dla których pamięć została przydzielona dynamicznie funkcją `malloc` (lub jej pochodnymi). W pozostałych przypadkach pole to musi mieć wartość `false` — niestosowanie się do tej reguły spowoduje błąd menedżera pamięci i najprawdopodobniej nieprzewidywalne działanie programu.

Drugą ważną zasadą jest, aby zmienna zawierająca dane transakcji nie była zmienną automatyczną — zmienne takie są automatycznie niszczone po opuszczeniu zawierającej je funkcji. W rezultacie obszar pamięci zawierający dane transakcji może zostać wykorzystany przez inne zmienne, co spowoduje uszkodzenie zawartych w nim danych.

Pamięć przydzielona transakcji musi być alokowana w sposób dynamiczny (funkcja `malloc_re`), ewentualnie może to być pamięć alokowana dla zmiennej globalnej lub statycznej — zmienne tego typu istnieją przez cały czas życia programu.

Warto też zauważyć, że instrukcje sterujące stanem linii *Enable* kontrolera LCD (`SET(OUT, HD44780_E)` i `CLR(OUT, HD44780_E)`) są rozdzielone wieloma innymi instrukcjami. Dzięki temu generowany impuls dodatni tego sygnału ma czas trwania > 230 ns wymagany w specyfikacji kontrolera. Nawet dla XMEGA taktowanej zegarem 32 MHz 230 ns przekłada się na około 7 instrukcji asemblera — czas, jaki z pewnością upłynie pomiędzy wykonaniem obu powyższych instrukcji sterujących.

Do wysyłania danych do kontrolera została wykorzystana nieco zmodyfikowana funkcja `hd44780_outnibble_nowait`, różniąca się od jej protoplasty `hd44780_outnibble` tylko tym, że nie czeka na sygnał braku zajętości mikrokontrolera (nie realizuje też opóźnień). Nie jest to potrzebne, gdyż kolejne tetrady są wysyłane w odstępach czasowych określanych przez timer.

Mamy więc zapewnioną obsługę transakcji i możliwość transakcyjnego wyświetlania danych na LCD, musimy jeszcze mieć funkcję, która tworzy odpowiednie transakcje — jest odpowiednikiem funkcji bezpośrednio wysyłającej dane znakowe do LCD. Odpowiednikiem tym jest pokazana poniżej funkcja:

```
bool LCD_PutText_B(uint8_t x, uint8_t y, char *txt, LCD_trans *buf, bool autodel)
{
   buf->cmd=LCD_Text;
   buf->Ready=false;
   buf->SelfDel=autodel;  // Czy zwolnić pamięć po zakończeniu transakcji?
   buf->data[0]=HD44780_DDADDR(x+y*0x40);    // Ustaw adres w DDRAM
   strcpy((char*)&buf->data[1], txt);  // Skopiuj dane tekstowe + NULL
```

```
    buf->len=strlen(txt) + 1;      // Długość tekstu + pozycji + NULL – 1
    bool ret=cbAdd(&LCD_TransBuffer, buf);
    if((ret==false) && (autodel)) free_re(buf);      // Brak miejsca w kolejce
            else TCD0_CTRLA=TC_CLKSEL_DIV1_gc;       // Preskaler 1 — odblokuj timer
    return ret;
}
```

Funkcja ta buduje transakcję odpowiedzialną za wyświetlenie napisu `txt` na wskazanej pozycji `x`, `y` LCD. Wszystkie dane o transakcji zostaną umieszczone w buforze w pamięci, której adres jest określany wskaźnikiem `buf`. Pamięć w buforze musi być wystarczająco duża, aby pomieścić całą transakcję. Dodatkowy parametr `autodel` określa, czy pamięć ta ma być automatycznie zwalniana po obsłużeniu transakcji (`true`), czy nie (`false`). Jeśli transakcję udało się umieścić w kolejce, funkcja zwraca `true`. Warto zauważyć, że w takim przypadku funkcja uruchamia też timer (w naszym przypadku jest to timer `TCD0`) odpowiedzialny za generowanie przerwania. Funkcja obsługi przerwania wysyła dane do LCD.

Pewną odmianą powyższej funkcji jest funkcja:

```
bool LCD_PutText(uint8_t x, uint8_t y, char *txt)
{
 LCD_trans *trans=malloc_re(sizeof(LCD_trans) + strlen(txt) + 2);
 bool ret=LCD_PutText_B(x, y, txt, trans, true);
 return ret;
}
```

Wykorzystuje ona funkcję `LCD_PutText_B`, z tym że najpierw alokuje dynamicznie pamięć potrzebną na przechowanie tworzonej transakcji.

Mamy komplet potrzebnych funkcji, a więc sprawdźmy, jak całość sprawdza się w praktyce. W pliku *LCD-transact.c* znajduje się kod pokazujący, jak działają nasze transakcje. Aby to było możliwe, należy zainicjalizować kontroler LCD:

```
LCD_init();
```

Wykorzystujemy tu znaną już funkcję inicjalizującą — nie ma potrzeby jej zmieniać, gdyż operacja inicjalizacji LCD jest jednorazowa i nie trzeba wykonywać jej w postaci transakcji. W drugim kroku musimy zainicjalizować wykorzystywany timer i system przerwań:

```
LCD_Timer_init(&TCD0);
PMIC_CTRL|=PMIC_LOLVLEN_bm;      // Odblokuj przerwania niskiego poziomu
sei();
```

Ponieważ dostęp do LCD z pewnością nie jest czynnością krytyczną czasowo, przerwaniom timera nadano najniższy priorytet. Dzięki temu można innym, bardziej krytycznym przerwaniom nadać wyższe priorytety i uzyskać w ten sposób zmniejszenie czasu latencji obsługi przerwań. Sama inicjalizacja timera jest niezwykle prosta:

```
void LCD_Timer_init(TC0_t *tc)
{
   tc->INTCTRLA=TC_OVFINTLVL_LO_gc;    // Odblokuj przerwania nadmiaru timera i nadaj im niski
                                       // priorytet
   tc->PER=F_CPU*LCD_ACCESSTIME;       // Przerwanie co 4 us (niezależnie od F_CPU)
}
```

Sprowadza się ona tylko do odblokowania możliwości zgłaszania przerwania nadmiaru oraz konfiguracji rejestru PER, tak aby przerwania były generowane co ok. 4 µs — niezależnie od częstotliwości taktowania CPU. Możemy więc przystąpić do wyświetlenia pierwszego napisu:

```
LCD_PutText(0,0, "Numer:");
```

Powyższa funkcja ma jedną wadę — alokuje dynamicznie pamięć po każdym wywołaniu (pamięć ta jest automatycznie zwalniana po obsłużeniu transakcji), niemniej cały proces jest czasochłonny. Możemy tego uniknąć, alokując pamięć „ręcznie" i wielokrotnie wykorzystując zaalokowany blok pamięci. Ilustruje to poniższy przykład:

```
LCD_trans *buf=malloc_re(sizeof(LCD_trans) + 7);
```

Zmienna buf wskazuje na obszar pamięci, który może pomieścić łańcuch 5-znakowy. Tyle wystarczy na potrzeby tego przykładu — na LCD będą wyświetlane kolejne liczby w zakresie 0 – 65 535; najdłuższa ma 5 znaków, stąd też nasz bufor ma taką, a nie inną długość:

```
while(1)
{
 utoa(cnt++, bufstr, 10);
 while(strlen(bufstr)<6) strcat(bufstr, " ");
 LCD_PutText_B(6,0, bufstr, buf, false);
 while(!LCD_IsTransCompleted(buf));
}
```

Do konwersji liczby na łańcuch użyto funkcji bibliotecznej utoa (nagłówek *stdlib.h*). Ponieważ długość łańcucha po konwersji jest zmienna (co spowodowałoby pozostawianie na LCD „duchów" po poprzednich konwersjach), w kolejnej linii brakujące znaki uzupełniono spacjami. Następnie tworzona jest transakcja w obszarze pamięci przydzielonym zmiennej buf. Ostatnia pętla while jest odpowiedzialna za oczekiwanie na zakończenie realizacji transakcji. Po jej zakończeniu pętla jest wykonywana od początku.

Uważny czytelnik z pewnością zauważy, że pamięć przydzielana funkcją malloc_re nie jest nigdzie zwalniana — w normalnej sytuacji spowodowałoby to wyciek pamięci. W naszym przykładzie jednak program nigdy się nie kończy, nie ma więc potrzeby zwalniania pamięci wskazywanej przez zmienną buf.

Powyższy przykład pokazuje, jak uniknąć blokowania CPU na czas dostępu do wolno działającego urządzenia, jakim jest LCD alfanumeryczny. Jednak to nie wszystkie zalety wynikające z zastosowania transakcji. Drugą ważną zaletę naszego rozwiązania ilustruje przykład znajdujący się w katalogu *Przyklady/LCD-alfa/LCD-transact-int*. Poważnym ograniczeniem funkcji odpowiedzialnych za dostęp do LCD w sposób klasyczny była niemożność ich wywoływania z funkcji obsługi przerwań — funkcje obsługi LCD nie były *reentrant*[2]. Nasz system oparty na transakcjach nie ma tych wad. Aby to zilustrować, został stworzony prosty przykład — tak jak poprzednio w pętli głównej programu są wyświetlane stale kolejne liczby, ale jednocześnie wyko-

[2] Poza tym blokowały CPU na długi czas, a jak pamiętamy, funkcje obsługi przerwań powinny być wykonywane możliwie krótko.

rzystano drugi timer (TCD1), w którego funkcji obsługi przerwania przepełnienia jest wyświetlany licznik tych przerwań:

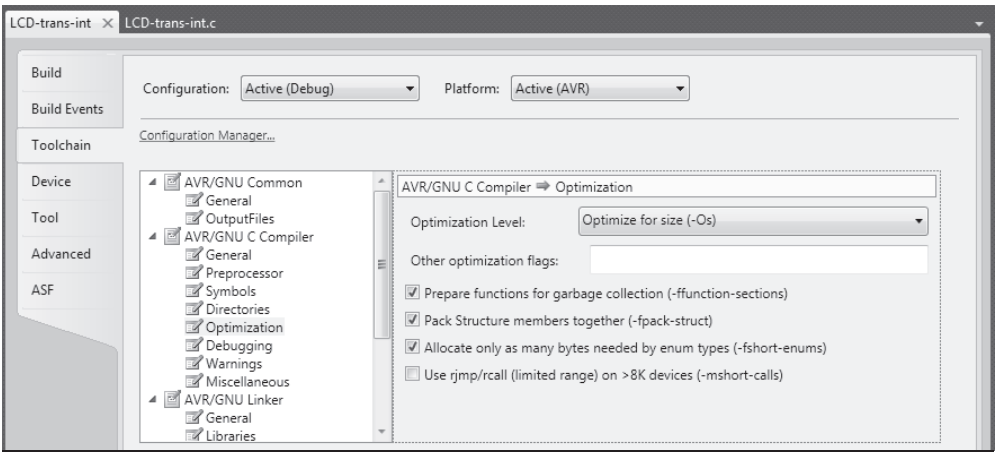
```
ISR(TCD1_OVF_vect)
{
   static char int_buf[sizeof(LCD_trans) + 7];
   static uint16_t cnt;
   char bufstr[6];

   utoa(cnt++, bufstr, 10);
   while(strlen(bufstr)<6) strcat(bufstr, " ");
   LCD_PutText_B(6,1, bufstr, (LCD_trans*)&int_buf, false);
}
```

Jak widzimy, w sposób asynchroniczny, z dwóch miejsc w programie możemy uzyskać dostęp do LCD, a każda funkcja „ma wrażenie", że ma LCD na wyłączność. Przy okazji warto przeanalizować sposób, w jaki jest rezerwowana pamięć na transakcję w przerwaniu. Oczywiście można by wykorzystać dynamiczną alokację pamięci, lecz jak wspomniano, taka alokacja jest czasochłonna. Stąd też w pokazanym przykładzie wykorzystano tablicę statyczną `int_buf` o rozmiarze umożliwiającym przechowanie kompletnej transakcji. Dzięki temu, że zmienna `int_buf` jest zmienną statyczną, nie jest ona niszczona po zakończeniu funkcji obsługi przerwania. Gdyby pominąć słowo kluczowe `static`, zmienna ta byłaby niszczona, a na LCD najprawdopodobniej zaczęłyby się pojawiać przypadkowe treści. Ponieważ pamięć naszego bufora nie była alokowana dynamicznie, nie może ona zostać zwolniona w naszym sterowniku LCD, stąd też ostatni parametr wywołania funkcji `LCD_PutText_B` musi mieć wartość `false`.

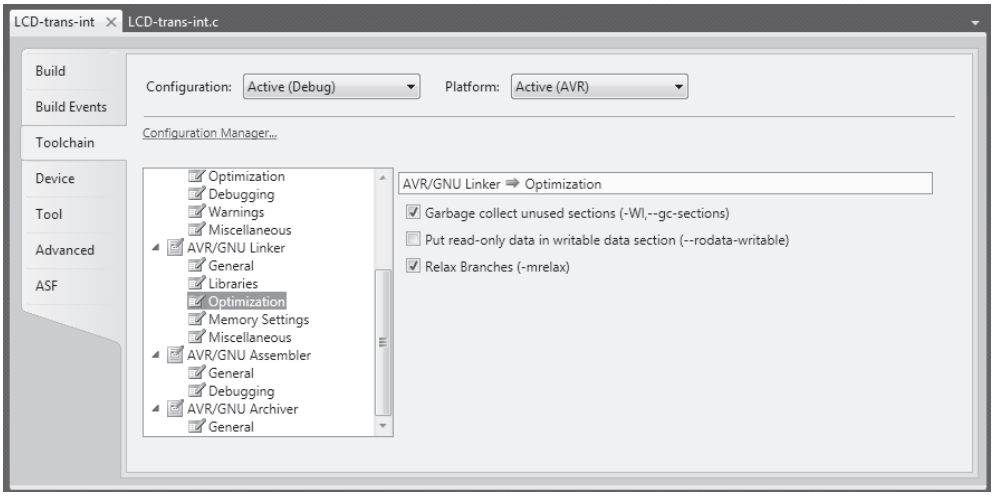
Optymalizacja

Przy okazji tego i poprzedniego przykładu warto zastanowić się jeszcze nad jedną kwestią — optymalizacji. W podanych przykładach wykorzystano wcześniej omówione funkcje dostępu do wyświetlacza LCD znajdujące się w plikach *hd44780.c* i *hd44780.h*. Większość z zawartych tam funkcji nie jest wykorzystywana, jednak kompilator mimo wszystko umieszcza ich kod w pliku wynikowym — dzieje się tak, ponieważ nie może on „stwierdzić", czy funkcje te nie są wykorzystywane w innych fragmentach programu. Pamiętajmy, że kompilator kompiluje poszczególne pliki źródłowe osobno i dana jego instancja nie „wie", co znajduje się w innych plikach (innych jednostkach kompilacji). Taką całościową wiedzę ma dopiero konsolidator (linker), który łączy stworzone przez kompilator pliki obiektowe (o rozszerzeniu *.o*) w plik wynikowy. Linker jednak „nie wie", która z funkcji programu została użyta, a która nie — informacje te ma wyłącznie kompilator. W ten sposób powstaje typowe błędne koło, w efekcie nasze nieużywane funkcje nie są usuwane (linker zostawia je „na wszelki wypadek") i zajmują niepotrzebnie pamięć. Czy można temu jakoś zaradzić? Oczywiście tak. W tym celu trzeba połączyć siły kompilatora i linkera, co zapewniają odpowiednie opcje kompilacji. We właściwościach projektu (*Project/Properties* lub *Alt+F7*) wybieramy zakładkę *Toolchain*, a następnie *AVR/GNU C Compiler* i *Optimization*. Znajdziemy tam pole wyboru o nazwie *Prepare functions for garbage collection* (rysunek 22.4).



Rysunek 22.4. *Aby dać linkerowi możliwość usuwania nieużywanych funkcji, należy skompilować program z wybraną opcją –ffunction-sections, która spowoduje, że każda funkcja programu znajdzie się we własnej sekcji*

Zaznaczenie tej funkcji spowoduje umieszczenie każdej funkcji w osobnej sekcji — samo w sobie nie wpłynie to na skrócenie kodu wynikowego, ale jest warunkiem niezbędnym dla podjęcia stosownych działań przez linker. Aby wyeliminować nieużywane funkcje, należy zaznaczyć jeszcze w gałęzi *AVR/GNU Linker/Optimization* pole *Garbage collect unused sections* (rysunek 22.5).



Rysunek 22.5. *Zaznaczenie opcji Garbage collect unused sections (-Wl,--gc-sections) spowoduje, że nieużywane funkcje zostaną usunięte z kodu wynikowego, w efekcie kod programu ulegnie skróceniu*

Po zaznaczeniu tych opcji program zostanie skrócony o kilkaset bajtów. Oczywiście jeśli wszystkie funkcje byłyby wykorzystane, nie uzyskalibyśmy żadnego skrócenia kodu. Niemniej w sytuacji, gdy używa się bibliotek, zazwyczaj przynajmniej część funkcji nie jest wykorzystywana, warto więc skorzystać z tej możliwości optymalizacji.

Jeśli mamy do czynienia z prekompilowaną biblioteką (*lib*), to musi ona być skompilowana z zaznaczoną opcją *Prepare functions for garbage collection* (*-ffunction-sections*). Alternatywą jest umieszczenie każdej funkcji biblioteki w osobnym pliku (tak jak w przypadku bibliotek AVR-libc).

Na ekranie wyboru opcji optymalizacji linkera mamy jeszcze jedną przydatną opcję — *Relax Branches* (*-mrelax*). Dla mikrokontrolerów, które mają ponad 8 kB pamięci FLASH, instrukcje skoków są generowane jako tzw. instrukcje długie — umożliwiają one skok do komórki pamięci FLASH o dowolnym adresie. Jednak ceną za to jest wydłużenie instrukcji — ich kod jest dłuższy, podobnie jak czas wykonania. Nie zawsze jednak takie długie instrukcje muszą być wykonywane — jeśli miejsce docelowe skoku leży blisko (w zasięgu instrukcji skoków względnych), to można w kodzie wynikowym zamienić instrukcje dłuższe na krótsze, co przynosi oszczędności w postaci skrócenia kodu wynikowego. Ponieważ dopiero linker „wie", jak poszczególne fragmenty kodu są rozmieszczone w pamięci, takiej podmiany można dokonać na etapie linkowania programu, co zapewnia powyższa opcja. Stąd też warto to pole wyboru zaznaczyć.

Skorowidz

D

E

F

G

H

I

J

K

L

Ł

M

N

O

P

R

S

Ś

T

U

V

W

X

Z

Ź

Mikrokontrolery bez urządzeń peryferyjnych stanowią niszę rozwijaną głównie przez pasjonatów elektroniki, dla których programowanie jest celem samym w sobie. Praktyczne zastosowanie takich gadżetów jest możliwe dopiero po dołączeniu pamięci masowej, wyświetlacza alfanumerycznego i graficznego, przetworników analogowo-cyfrowych i cyfrowo-analogowych oraz czujników. Dzięki tym układom mikrokontrolery AVR komunikują się ze światem, zbierają informacje, magazynują dane i mogą służyć nam w codziennym życiu jako stacje pogodowe, odtwarzacze cyfrowe czy sterowniki ogrzewania.

Jeśli masz już pewną wiedzę na temat mikrokontrolerów AVR i chciałbyś ją wzbogacić o wiadomości dotyczące ciekawych zastosowań urządzeń peryferyjnych, sięgnij po jedyną w swoim rodzaju książkę *AVR. Układy peryferyjne*. Jest ona adresowana do czytelników, którzy chcą poszerzyć swoje praktyczne umiejętności programowania mikrokontrolerów AVR, w tym mikrokontrolerów z rodziny XMEGA. Stanowi naturalną kontynuację doskonałego podręcznika *AVR. Praktyczne projekty*, kierowanego do mniej zaawansowanych programistów. Książka omawia także specyficzne dla mikrokontrolerów AVR elementy języka C.

- Łączenie kodu C i asemblera oraz debugowanie programu
- Obsługa interfejsów dostępu do pamięci zewnętrznej
- Tworzenie i używanie systemu plików
- Korzystanie z przetworników ADC i DAC oraz komparatorów
- Obsługa wyświetlaczy alfanumerycznych i graficznych
- Przetwarzanie dźwięku i danych wideo

Twórz praktyczne rozwiązania z mikrokontrolerami AVR i układami peryferyjnymi!

Patronat medialny:

mikrokontrolery.blogspot.com

Helion SA
ul. Kościuszki 1c, 44-100 Gliwice
tel.: 32 230 98 63
e-mail: helion@helion.pl
http://helion.pl

ISBN: 978-83-246-9225-5

Cena: 99,00 zł

Informatyka w najlepszym wydaniu