Politechnika Wrocławska

Wydział Elektroniki,
Fotoniki i Mikrosystemów

Laboratorium informatyki

Ćwiczenie nr 12. Maszyny stanów

Zagadnienia do opracowania:

- przykłady maszyn stanów
- diagram stanów i tabela przejść między stanami
- metody implementacji maszyn stanów

Spis treści

©2020-2022 Michał Stępniak

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest opanowanie umiejętności implementacji maszyn stanów w językach $C/C++$ do zastosowań praktycznych.

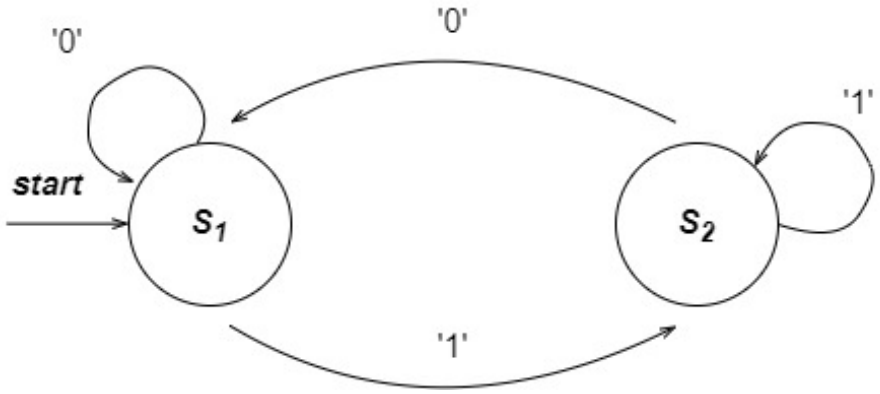
2. Wprowadzenie

2.1. Maszyna stanów

Maszyna stanów, zwana również ***automatem skończonym*** (*ang. finite-state mechine, FSM*), to model matematyczny abstrakcyjnego obiektu, który może przyjmować określone wartości (***stany***). Model określa możliwe dyskretne przejścia (*ang. transitions*) między ***stanami***. Obiekt może przebywać tylko w jednym ***stanie*** w danym momencie. Zmiana ***stanu*** odbywa się na podstawie sygnałów wejściowych docierających do obiektu. Spośród różnych implementacji automatów można wyróżnić ***automat Moore'a*** oraz ***automat Mealy'ego***. Struktura ***automatu Moore'a*** zakłada, że **wartość sygnału wyjściowego zależy wyłącznie od stanu wewnętrznego obiektu**. W przypadku ***automatu Mealy'ego*** **wartość sygnału wyjściowego dodatkowo zależy od aktualnej wartości sygnałów wejściowych**.

Przykładem prostej ***maszyny stanów*** może być układ mikrokontrolera z diodą elektroluminescencyjną (LED), która w ***stanie początkowym*** jest wygaszona. Mikrokontroler za pomocą interfejsu szeregowego odbiera ciąg bitów. Jeżeli ostatni odebrany bit jest równy **1** – wystawiany jest stan wysoki na wyprowadzeniu diody (dioda zaczyna świecić), jeżeli bit jest równy **0** – dioda jest wygaszana przez ustawienie stanu niskiego. Przedstawiony układ może zostać zamodelowany za pomocą dwóch ***stanów***: S_1 – dioda nie świeci, S_2 – dioda świeci. ***Maszynę stanów*** można wówczas zobrazować za pomocą ***diagramu stanów*** (rys. 2.1). Początkowo układ jest w stanie S_1. Jeżeli kolejno odbierane bity mają wartość **0**, to układ pozostaje w ***stanie*** S_1.

Jeżeli odebrano bit **1**, to następuje przejście do ***stanu*** S_2. Układ pozostaje w ***stanie*** S_2 tak długo, jak odbierane bity mają wartość **1**.



Rys. 2.1. Diagram stanów układu mikrokontrolera z diodą elektroluminescencyjną

Zależność między sygnałami wejściowymi a ***stanami*** układu można przedstawić również w postaci tabeli przejść (tabela 1).

Tabela 1. Tabela przejść maszyny stanów z rys. 2.1

Stan \ **Wejście**	**0**	**1**
$\mathbf{S_1}$	S_1	S_2
$\mathbf{S_2}$	S_1	S_2

2.2. Implementacja maszyny stanów z użyciem instrukcji warunkowej *switch–case*

Na listingu 1. przedstawiono przykład prostej implementacji maszyny stanów z rys 2.1. ***Stany*** S_1 i S_2 zostały zdefiniowane za pomocą typu wyliczeniowego ***State***:

```
typedef enum State {
    LED_OFF, // Stan S1
    LED_ON // Stan S2
} State_t;
```

Obsługa diody elektroluminescencyjnej odbywa się z wykorzystaniem funkcji ***turnOnLed()*** oraz ***turnOffLed()***. Kolejne bity przesyłane interfejsem szeregowym są odczytywane za pomocą funkcji ***getNextBit()***:

```
void turnOnLed();
void turnOffLed();
unsigned short getNextBit();
```

Aktualny ***stan maszyny*** przechowywany jest w zmiennej ***currentState*** (początkowo zainicjalizowanej wartością *LED_OFF*). W pętli pobierane są kolejne bity (***nextBit***), przesłane za pomocą interfejsu szeregowego. Przejścia między ***stanem*** S_1 (*LED_OFF*) a ***stanem*** S_2 (*LED_ON*) odbywają się wewnątrz instrukcji warunkowej ***switch–case***. Mechanizm działania ***maszyny*** (układu mikrokontrolera) w określonym ***stanie*** został zawarty w obrębie pojedynczej etykiety ***case***. Warto zwrócić uwagę, że pętla z listingu 1. teoretycznie będzie wykonywać się w nieskończoność (*while(true)*). Jest to celowy zabieg w przypadku mikrokontrolerów nieposiadających systemu operacyjnego – program ma się wykonywać tak długo, aż użytkownik nie zatrzyma działania mikrokontrolera i nie umieści w pamięci *Flash* nowego

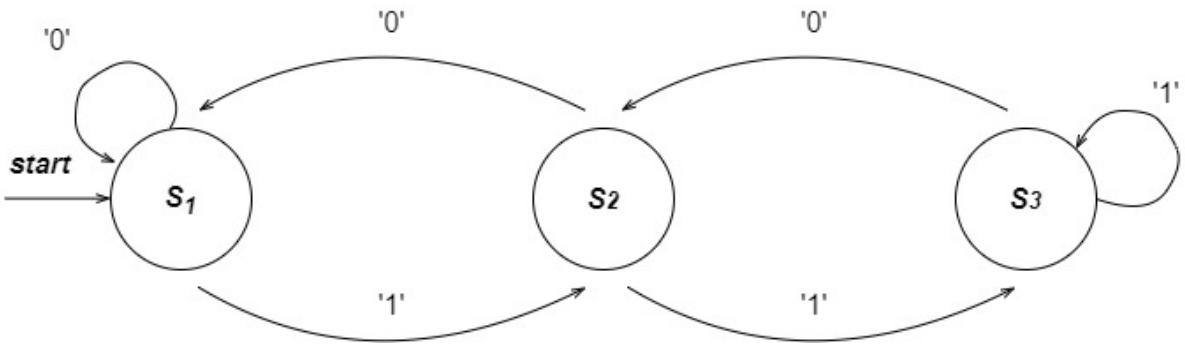
kodu wykonywalnego.

```
State_t currentState = LED_OFF;
while (true) {
    unsigned short nextBit = getNextBit();
    switch (currentState) {
        case LED_OFF:
            if (nextBit == 1) {
                turnOnLed();
                currentState = LED_ON;
            }
            break;
        case LED_ON:
            if (nextBit == 0) {
                turnOffLed();
                currentState = LED_OFF;
            }
            break;
    }
}
```

Listing 1. Prosta implementacja maszyny stanów z rys. 2.1

Rozwiązanie z listingu 1., mimo swojej prostoty, jest obarczone poważnymi wadami. Przede wszystkim, w przedstawionym rozwiązaniu, program dopuszcza (teoretycznie) dowolne przejścia między ***stanami*** obiektu. W przypadku ***maszyny*** z rys. 2.1. nie ma to żadnego znaczenia (dostępne są tylko dwa ***stany***). Sytuacja zaczyna się komplikować dla bardziej rozbudowanych układów. Na rys. 2.2. przedstawiono ***diagram stanów*** układu mikrokontrolera, do którego dołączono drugą diodę. Świecenie drugiej diody określono jako ***stan*** S_3. Mikrokontroler przechodzi w ***stan*** S_3 tylko, jeżeli wcześniej został wystawiony stan wysoki na wyprowadzeniu diody pierwszej (S_2) i ko-

lejny odebrany bit ma wartość **1**. Wygaszanie diod odbywa się w kolejności odwrotnej.



Rys. 2.2. Diagram stanów układu mikrokontrolera z dwiema diodami elektroluminescencyjnymi

Tabela przejść dla rozbudowanej ***maszyny stanów*** została przedstawiona w tabeli 2. Widać, że nie ma możliwości bezpośredniego przejścia ze stanu S_1 do S_3 i odwrotnie.

Tabela 2. Tabela przejść maszyny stanów z rys. 2.2

Stan \ **Wejście**	**0**	**1**
S_1	S_1	S_2
S_2	S_1	S_3
S_3	S_2	S_3

Implementacja ***maszyny stanów*** zostałaby w tym przypadku rozszerzona tak, jak przedstawiono na listingu 2. Mimo, że instrukcje warunkowe ***if–else*** wewnątrz etykiet ***case*** sterują odpowiednimi przejściami ***między stanami***, to sama instrukcja warunkowa ***switch–case*** w żaden sposób nie zabrania przejścia ze ***stanu*** S_1 (LED_OFF) do S_3 ($SECOND\_LED\_ON$). Ponadto zauważalnie rośnie rozmiar funkcji implementującej ***maszynę*** i zmniejsza się jej czytelność.

```
State_t currentState = LED_OFF;
while (true) {
    unsigned short nextBit = getNextBit();
    switch (currentState) {
        case LED_OFF:
            if (nextBit == 1) {
                turnOnLed();
                currentState = LED_ON;
            }
            break;
        case LED_ON:
            if (nextBit == 0) {
                turnOffLed();
                currentState = LED_OFF;
            } else {
                turnOnSecondLed();
                currentState = SECOND_LED_ON;
            }
            break;
        case SECOND_LED_ON:
            if (nextBit == 0) {
                turnOffSecondLed();
                currentState = LED_ON;
            }
            break;
    }
}
```

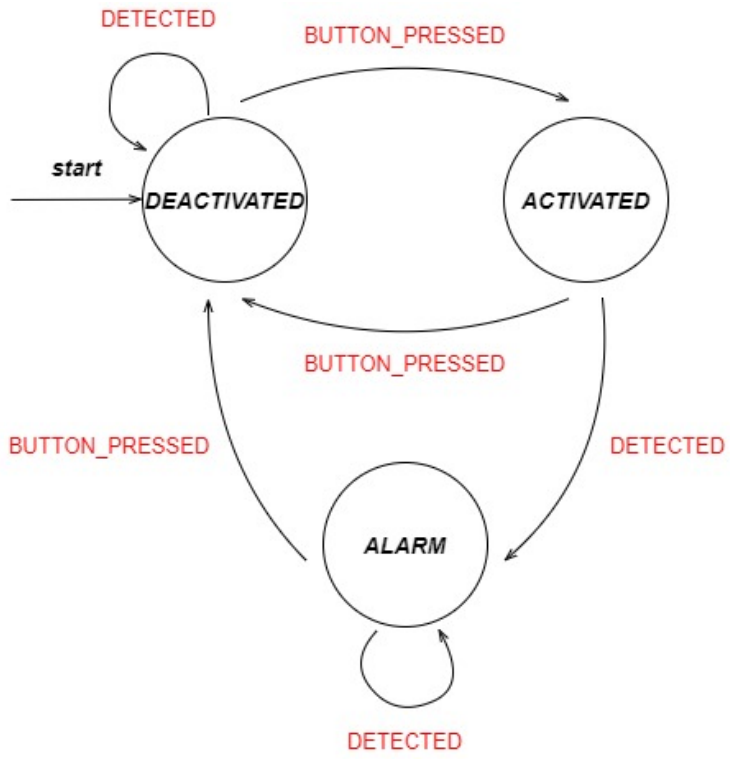
Listing 2. Implementacja maszyny stanów z rys. 2.2

Dalsze rozbudowywanie ***maszyny stanów*** skutkowałoby powstaniem zagmatwanego, trudnego w utrzymaniu kodu (*ang. spaghetti code*). Nietrud-

no wówczas o pomyłkę. Przez nieuwagę można przypisać do zmiennej ***currentState*** niewłaściwą wartość, skutkując niedozwolonym przejściem między ***stanami*** (jak np. $S_1 \longrightarrow S_3$). Dlatego implementacja ***maszyn stanów*** z użyciem instrukcji warunkowej ***switch–case*** nie jest wskazana w przypadku bardziej rozbudowanych systemów.

2.3. Implementacja maszyny stanów z użyciem wskaźników funkcyjnych

Na rys. 2.3. przedstawiono przykład ***maszyny stanów*** systemu alarmowego. Układ składa się z mikrokontrolera wyposażonego w brzęczyk (*ang. buzzer*), detektor ruchu oraz przycisk, służący do aktywacji bądź dezaktywacji alarmu. System obsługuje dwa ***zdarzenia*** (które mogą być zrealizowane np. za pomocą ***przerwań programowych*** (*ang. interrupts*)) – ***DETECTED***, pochodzące od detektora ruchu, oraz ***BUTTON_PRESSED***, wywoływane przy wciśnięciu przycisku. Na rys. 2.3. ***zdarzenia*** te zostały zaznaczone barwą czerwoną. System może znajdować się w jednym trzech **stanów**: ***DEACTIVATED*** – alarm rozbrojony, ***ACTIVATED*** – alarm aktywny, ***ALARM*** – alarm uruchomiony.



Rys. 2.3. Maszyna stanów systemu alarmowego

W tabeli 3. zestawiono możliwe przejścia między poszczególnymi ***stanami***. Mikrokontroler ignoruje ***zdarzenie*** od detektora ruchu tak długo, jak pozostaje w ***stanie DEACTIVATED***. Aktywacja alarmu odbywa się przez wciśnięcie przycisku (***zdarzenie BUTTON_PRESSED***). Ponowne wciśnięcie przycisku rozbraja alarm. Jeżeli alarm jest uruchomiony (***stan ALARM***), to włączony zostaje brzęczyk, aż do naciśnięcia przycisku (przejście w ***stan DEACTIVATED***).

Tabela 3. Tabela przejść maszyny stanów z rys. 2.3

Stan \ **Zdarzenie**	**DETECTED**	**BUTTON_PRESSED**
DEACTIVATED	DEACTIVATED	ACTIVATED
ACTIVATED	ALARM	DEACTIVATED
ALARM	ALARM	DEACTIVATED

Ponieważ implementacja wykorzystująca instrukcję warunkową ***switch–case*** nie jest odpowiednia dla ***maszyny stanów*** przedstawionej na rys. 2.3, rozwiązaniem może być implementacja wykorzystująca struktury i wskaźniki funkcyjne. Każdy ***stan*** jest zaimplementowany jako struktura przechowująca deskryptor (identyfikator) ***stanu*** oraz funkcję obsługi ***zdarzeń***. Deskryptory ***stanów*** i ***zdarzeń*** mogą zostać wówczas zaimplementowane z wykorzystaniem enumeratorów:

```
typedef enum StateDescriptor {
    DEACTIVATED,
    ACTIVATED,
    ALARM
} StateDescriptor_t;

typedef enum EventDescriptor {
    BUTTON_PRESSED,
    DETECTED
} EventDescriptor_t;
```

Każda funkcja obsługi ***zdarzenia*** (*handler*), w obrębie pojedynczego ***stanu***, jest mapowana na deskryptor ***zdarzenia***. Każda z funkcji zwraca deskryptor ***stanu***, w który nastąpi przejście po obsłudze danego ***zdarzenia***. Takie rozwiązanie pozwala uniknąć kosztownej dynamicznej alokacji pamięci dla całej struktury, przy każdorazowym wywoływaniu funkcji obsługi ***zdarzenia***. Strukturę odzwierciedlającą ***stan*** maszyny przedstawiono na listingu 3.

```
typedef StateDescriptor_t (*EventHandler)();

typedef struct State {
    StateDescriptor_t stateDescriptor;
    EventDescriptor_t eventDescriptor;
    EventHandler handler;
} State_t;
```

Listing 3. Struktura reprezentująca stan maszyny z rys. 2.3

Funkcje obsługi ***zdarzeń*** dla poszczególnych stanów przedstawiono na listingu 4. Funkcje ***void turnOnBuzzer()*** i ***void turnOffBuzzer()*** realizują obsługę brzęczyka.

```
// Obsluga zdarzenia DETECTED w stanie DEACTIVATED
StateDescriptor_t idleDeactivated() {
    return DEACTIVATED;
}
// Obsluga zdarzenia BUTTON_PRESSED w stanie
   DEACTIVATED
StateDescriptor_t activate() {
    return ACTIVATED;
}
// Obsluga zdarzenia BUTTON_PRESSED w stanie
   ACTIVATED / ALARM
StateDescriptor_t deactivate() {
  turnOffBuzzer();
  return DEACTIVATED;
}
// Obsluga zdarzenia DETECTED w stanie ACTIVATED
StateDescriptor_t raiseAlarm() {
  turnOnBuzzer();
```

```
17    return ALARM;
18  }
19  // Obsluga zdarzenia DETECTED w stanie ALARM
20  StateDescriptor_t idleAlarm() {
21      return ALARM;
22  }
```

Listing 4. Funkcje obsługi zdarzeń dla poszczególnych stanów

Na listingu 5. przedstawiono funkcję ***handleEvent()***, realizującą ***maszynę stanów*** z rys. 2.3. Funkcja ta wywoływana jest każdorazowo, kiedy wygenerowane zostanie nowe ***zdarzenie*** (np. w *podprogramie obsługi przerwania*). Tablica ***stateMachine*** przechowuje zainicjalizowane struktury ***stanów DEACTIVATED***, ***ACTIVATED*** oraz ***ALARM*** dla ***zdarzeń BUTTON_PRESSED*** i ***DETECTED***. ***Maszyna stanów*** została zdeklarowana z wykorzystaniem słowa kluczowego ***static***. Dzięki temu tworzona jest tylko raz w czasie działania aplikacji (optymalizacja czasu wykonania programu). Zmienna ***currentState*** przechowuje deskryptor aktualnego ***stanu maszyny***. W pętli *for* następuje wywołanie odpowiedniej funkcji obsługi ***zdarzenia*** (*handler*). W wyniku porównania aktualnego deskryptora ***stanu maszyny*** (***currentState***) oraz deskryptora ***zdarzenia*** (***event***) z wartościami przypisanymi do kolejnych elementów tablicy ***stateMachine*** następuje wybór właściwej instancji struktury ***State***. Rezultat zwrócony przez funkcję obsługi ***zdarzenia*** jest zapisywany w zmiennej ***currentState***. Po obsłużeniu ***zdarzenia*** wywoływana jest instrukcja ***break***. Dalsza iteracja nie ma sensu, ponieważ każda para deskryptorów ***stanu*** i ***zdarzenia*** w tablicy ***stateMachine*** jest unikalna.

```
void handleEvent(EventDescriptor_t event) {
    static const State_t stateMachine[] = {
        {DEACTIVATED, BUTTON_PRESSED, activate},
        {DEACTIVATED, DETECTED, idleDeactivated},
        {ACTIVATED, BUTTON_PRESSED, deactivate},
        {ACTIVATED, DETECTED, raiseAlarm},
        {ALARM, BUTTON_PRESSED, deactivate},
        {ALARM, DETECTED, idleAlarm}
    };

    static StateDescriptor_t currentState = DEACTIVATED;
    for (unsigned int i = 0; i < sizeof(stateMachine) / sizeof(State_t); ++i) {
        if (stateMachine[i].stateDescriptor == currentState && stateMachine[i].eventDescriptor == event) {
            currentState = stateMachine[i].handler();
            break;
        }
    }
}
```

Listing 5. Funkcja realizująca maszynę stanów z rys. 2.3

Dużą zaletą przedstawionej implementacji ***maszyny stanów*** jest jej **skalowalność**. Aby rozszerzyć ***maszynę*** o nowy ***stan*** należy:

- rozszerzyć typ wyliczeniowy ***StateDescriptor*** o nowy enumerator;
- zdefiniować funkcje obsługi poszczególnych ***zdarzeń*** dla nowego ***stanu***;

- dodać zainicjalizowane struktury ***State*** do tablicy ***stateMachine*** dla wszystkich ***zdarzeń*** obsługiwanych w nowym ***stanie***.

Aby dodać nowe ***zdarzenie*** należy:

- rozszerzyć typ wyliczeniowy ***EventDescriptor*** o nowy enumerator;
- zdefiniować funkcje obsługi ***zdarzenia*** dla każdego z istniejących ***stanów***;
- dodać zainicjalizowane struktury ***State*** do tablicy ***stateMachine*** dla nowego ***zdarzenia*** obsługiwanego we wszystkich ***stanach***.

Przedstawioną strukturę ***maszyny stanów*** można uprościć, jeżeli odpowiednio zmodyfikuje się wskaźnik funkcyjny ***EventHandler*** tak, jak na listingu 6. Wówczas typ wyliczeniowy ***StateDescriptor*** staje się zbędny, a struktura ***State*** posiada dwa pola, będące wskaźnikami funkcyjnymi: ***handler*** oraz ***executor***. Wskaźnik ***handler*** przechowuje adres jednej z trzech funkcji odpowiedzialnych za obsługę konkretnego ***zdarzenia*** i w związku z tym, za przejście do nowego ***stanu***. Te funkcje to odpowiednio: ***deactivated()***, ***activated()*** albo ***alarm()***. Wskaźnik ***executor*** przechowuje adres funkcji, która ma zostać wykonana po przejściu do nowego ***stanu***. W przypadku ***stanu DEACTIVATED*** jest to funkcja ***turnOffBuzzer()***, a w przypadku ***stanu ALARM*** funkcja ***turnOnBuzzer()***. Dla ***stanu ACTIVATED*** wprowadzono funkcję ***idle()***, której wywołanie nie niesie ze sobą żadnych skutków ubocznych:

```
1 void idle(){}
```

W celu uniknięcia każdorazowej dynamicznej alokacji pamięci dla struktury ***State*** podczas wykonywania funkcji przypisanej do wskaźnika ***handler***, wprowadzono predefiniowane stałe globalne instancje ***stanów DEACTIVATED***, ***ACTIVATED*** oraz ***ALARM***. Specyfikator ***static*** zapewnia wiązanie wewnętrzne – do predefiniowanych instancji ***stanów*** można odwołać się tylko wewnątrz danej jednostki translacji (por. Rodzaje zmiennych,

Ćw. 3). Takie podejście umożliwia również znaczne uproszczenie funkcji ***handleEvent()***. Statyczna tablica struktur ***State*** została zastąpiona statycznym wskaźnikiem na strukturę ***State***. Wskaźnik ***state*** jest jednorazowo inicjalizowany adresem do statycznej stałej ***DEACTIVATED*** podczas pierwszego wywołania funkcji ***handleEvent()***. Wywołanie funkcji przypisanej do wskaźnika ***handler*** skutkuje przejściem do nowego ***stanu*** – adres zwrócony z funkcji zostaje zapisany pod zmienną ***state*** (aktualny ***stan maszyny***). W ostatnim kroku wywoływana jest funkcja przypisana do wskaźnika ***executor***. W ten sposób zrealizowana została obsługa brzęczyka (funkcje ***turnOnBuzzer()*** i ***turnOffBuzzer()***).

```
typedef enum EventDescriptor {
    BUTTON_PRESSED,
    DETECTED
} EventDescriptor_t;

// Deklaracje zapowiadajace
typedef struct State State_t;
const State_t * deactivated(EventDescriptor_t event)
   ;
const State_t * activated(EventDescriptor_t event);
const State_t * alarm(EventDescriptor_t event);

typedef const State_t * (*EventHandler)(
   EventDescriptor_t);
typedef void (*StateExecutor)();

struct State {
    EventHandler handler;
    StateExecutor executor;
};
```

```
19
20 // Predefiniowane stany
21 static const State_t DEACTIVATED = {deactivated,
     turnOffBuzzer};
22 static const State_t ACTIVATED = {activated, idle};
23 static const State_t ALARM = {alarm, turnOnBuzzer};
24
25 // Obsluga zdarzenia w stanie DEACTIVATED
26 const State_t * deactivated(EventDescriptor_t event)
       {
27     return event == BUTTON_PRESSED ? &ACTIVATED : &
     DEACTIVATED;
28 }
29 // Obsluga zdarzenia w stanie ACTIVATED
30 const State_t * activated(EventDescriptor_t event) {
31   return event == BUTTON_PRESSED ? &DEACTIVATED : &
     ALARM;
32 }
33 // Obsluga zdarzenia w stanie ALARM
34 const State_t * alarm(EventDescriptor_t event) {
35   return event == BUTTON_PRESSED ? &DEACTIVATED : &
     ALARM;
36 }
37
38 void handleEvent(EventDescriptor_t event) {
39     static const State_t * state = &DEACTIVATED;
40     state = state->handler(event);
41     state->executor();
42 }
```

Listing 6. Implementacja maszyny stanów z rys. 2.3

3. Program ćwiczenia

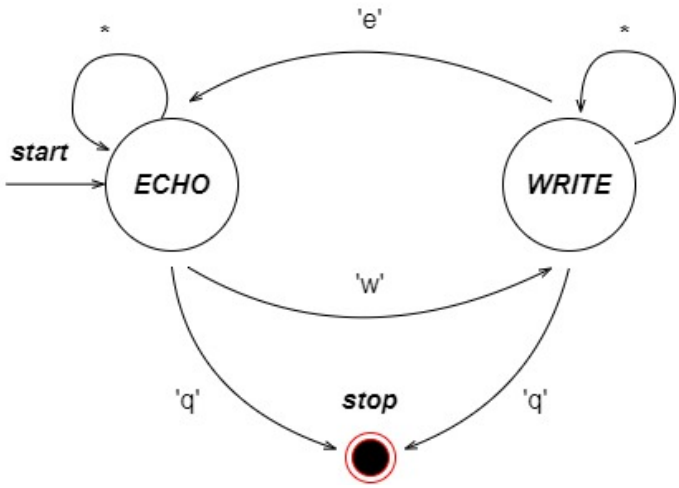
Zadanie 1. Celem zadania jest implementacja aplikacji przetwarzającej znaki pobierane z klawiatury. Program działa bazując na dwóch stanach:

- ***ECHO*** – realizuje funkcję echa (wysyła odebrane znaki na standardowe wyjście);
- ***WRITE*** – zapisuje odebrane znaki do pliku tekstowego *output.txt*.

Program zaczyna swoje działanie w stanie ***ECHO*** (rys. 3.1). Przejście ze stanu ***ECHO*** do stanu ***WRITE*** odbywa się po odebraniu znaku **'w'**, natomiast przejście odwrotne po odebraniu znaku **'e'**. Po odebraniu znaku **'q'** program kończy działanie. W ramach zadania rozpisz tabelę przejść dla maszyny stanów przedstawionej na rys. 3.1 (dowolny znak poza **'e'**, **'w'** i **'q'** oznaczono jako **'*'**), a następnie, wykorzystując dowolne podejście, zaimplementuj opisaną aplikację. W tym celu:

- w pliku ***state.c*** zdefiniuj funkcje ***echo()*** oraz ***write()***, obsługujące pobierane znaki odpowiednio w stanie ***ECHO*** oraz ***WRITE***. Funkcje powinny przyjmować obsługiwany znak jako argument wywołania;
- zdefiniuj funkcję ***void exec()*** realizującą działanie maszyny stanów. Deklaracja funkcji została umieszczona w pliku nagłówkowym ***statemachine.h***. Odczyt kolejnych znaków z klawiatury powinien odbywać się z wykorzystaniem funkcji ***char readChar()***, której deklarację zamieszczono w pliku nagłówkowym ***reader.h***.

Wywołanie maszyny stanów zostało zaimplementowane wewnątrz funkcji *main()* (plik ***main.c***).



Rys. 3.1. Maszyna stanów z zadania 1.

Zadanie 2. Program pobiera z klawiatury ciąg liczb całkowitych i przeprowadza na nich odpowiednie obliczenia. Jeżeli **aktualnie pobrana** liczba:

- **jest dodatnia** – to **następna** liczba będzie **sumowana** z poprzednio uzyskanym wynikiem;
- **jest ujemna** – to **następna** liczba będzie **mnożona** przez poprzednio uzyskany wynik;
- **jest równa 0** – to program kończy działanie.

Po każdym wykonanym działaniu aktualny wynik jest wyświetlany na ekranie komputera. Początkowa wartość wyniku wynosi **1**. W ramach zadania zaprojektuj maszynę stanów realizującą opisane działanie – narysuj diagram stanów oraz tabelę przejść między stanami.

Zadanie 3. Wykorzystując wskaźniki funkcyjne zaimplementuj maszynę stanów z **Zadania 2**.

4. Dodatek

4.1. Mętne wskaźniki i idiom pImpl

Języki *C/C++* są językami typowanymi statycznie, co oznacza, że zgodność typów zmiennych jest weryfikowana na etapie kompilacji pliku wykonywalnego. Ponadto zmienne czy funkcje kompilowane są zgodnie z kolejnością występowania ich definicji w obrębie danej jednostki translacji, co w przypadku zależności krzyżowych między poszczególnymi typami zmiennych wymusza stosowanie deklaracji zapowiadających. Przykład przedstawiono na listingu 7.

```
1  \\ Deklaracja zapowiadajaca
2  typedef struct State State_t;
3
4  \\ Typ EventHandler korzysta z typu State_t
5  typedef const State_t * (*EventHandler)(
       EventDescriptor_t);
6
7  \\ Krzyzowa zaleznosc State_t - EventHandler
8  struct State {
9      EventHandler handler;
10     StateExecutor executor;
11 };
```

Listing 7. Krzyżowe zależności między typami zmiennych (z listingu 6.)

Próba utworzenia instancji (obiektu) struktury, dla której dostępna jest wyłącznie deklaracja zapowiadająca zakończy się błędem kompilacji z informacją o niekompletnym typie zmiennej. Kompilator nie ma informacji ile pamięci musiałby statycznie zaalokować na tworzoną zmienną. Dozwolone jest natomiast definiowanie wskaźników i referencji do niekompletnego typu

zmiennej (listing 8).

```
// Deklaracja zapowiadajaca
typedef struct State State_t;

// OK - referencja do niekompletnego typu
void func(State_t & state) {
    ...
}

// OK - wskaznik na niekompletny typ
State_t * statePtr;

// Blad kompilacji - niekompletny typ State_t
State_t someState;
```

Listing 8. Wskaźniki i referencje do niekompletnego typu zmiennej

W językach *C/C++* wskaźniki i referencje do niekompletnego typu zmiennej, których przykłady przedstawiono na listingu 8., zwykło się nazywać ***mętnymi wskaźnikami (referencjami)*** (*ang. opaque pointers (references)*). Są one stosowane w celu:

- optymalizacji czasu kompilacji;
- ukrycia szczegółów implementacyjnych przed użytkownikiem–klientem;
- rozdzielenia wartstwy abstrakcji od wartstwy implementacji (por. Strukturalny wzorzec projektowy ***Most*** (*and. Bridge*)).

Na listingu 9. przedstawiono zawartość pliku nagłówkowego *Student.h* zawierającego definicje struktury **Student_t** oraz trzech funkcji operujących na zmiennej strukturalnej. Struktura *Student.h* składa się z trzech pól: dwóch tablic znaków (**university** – nazwa uczelni, **department** – nazwa wydziału)

oraz wskaźnika do struktury typu **PersonalData_t** (**pImpl**). Plik nagłówkowy zawiera wyłącznie deklarację zapowiadającą struktury **PersonalData_t**, zatem wskaźnik **pImpl** jest ***mętnym wskaźnikiem***.

```
#pragma once

#include <stdint.h>

#define MAX_UNIVERSITY_NAME_LENGTH (64)
#define MAX_DEPARTMENT_NAME_LENGTH (64)

// Deklaracja zapowiadajaca struktury PersonalData_t
typedef struct PersonalData PersonalData_t;

typedef struct Student {
  char university[MAX_UNIVERSITY_NAME_LENGTH + 1];
  char department[MAX_DEPARTMENT_NAME_LENGTH + 1];

  // Wskaznik do implementacji
  PersonalData_t * pImpl;
} Student_t;

void initialize(Student_t *, const char * university
   , const char * department);
void release(Student_t *);

void introduce(const Student_t const *);
```

Listing 9. Idiom pImpl; plik nagłówkowy

Na listingu 10. zamieszczono zawartość pliku źródłowego *Student.c*. Znajdują się w nim definicje struktury **PersonalData_t** oraz funkcji **initialize()**,

release() i **introduce()**. Funkcja **initialize()** ustawia wartości wszystkich pól zmiennej strukturalnej typu **Student_t**, w szczególności dynamicznie alokuje pamięć dla pola **pImpl** i przypisuje predefiniowane wartości do pól **name**, **surname** oraz **index** struktury **PersonalData_t**. Jest to możliwe, ponieważ plik źródłowy dostarcza definicję struktury **PersonalData_t** (jej rozmiar jest znany już na etapie kompilacji). Funkcja **release()** zwalnia dynamicznie zaalokowaną pamięć na atrybut **pImpl** zmiennej typu **Student_t**, natomiast funkcja **introduce()** wypisuje na standardowe wyjście wartości wszystkich pól przekazanej zmiennej strukturalnej.

```
1  #include <stdbool.h>
2  #include <stdio.h>
3  #include <stdlib.h>
4  #include <string.h>
5
6  #include "Student.h"
7
8  #define MAX_NAME_LENGTH (16)
9  #define MAX_SURNAME_LENGTH (32)
10
11 // Definicja struktury PersonalData_t
12 struct PersonalData {
13   char name[MAX_NAME_LENGTH + 1];
14   char surname[MAX_SURNAME_LENGTH + 1];
15   uint32_t index;
16 };
17
18 // Statyczna funkcja pomocnicza
19 static bool checkPointer(const Student_t const *
     student) {
20   bool result = (student != NULL);
```

```
21    if (!result) {
22      printf("Provided student does not exist\n");
23    }
24    return result;
25  }
26
27
28  void initialize(Student_t * student, const char *
      university, const char * department) {
29    if (checkPointer(student)) {
30      size_t universityNameLength = strlen(university)
      ;
31      if (universityNameLength >
      MAX_UNIVERSITY_NAME_LENGTH) {
32        printf("University name too long. Names up to
      %d characters are supported\n",
      MAX_UNIVERSITY_NAME_LENGTH);
33      } else {
34        strncpy(student->university, university,
      universityNameLength);
35      }
36
37      size_t departmentNameLength = strlen(department)
      ;
38      if (departmentNameLength >
      MAX_UNIVERSITY_NAME_LENGTH) {
39        printf("Department name too long. Names up to
      %d characters are supported\n",
      MAX_DEPARTMENT_NAME_LENGTH);
40      } else {
```

```
41        strncpy(student->department, department,
    departmentNameLength);
42      }
43
44      // Predefiniowane wartosci pol name, surname i
    index struktury PersonalData_t
45      static const char * name = "Adam";
46      static const char * surname = "Nowak";
47      static const uint32_t index = 123456;
48      // Dynamiczna alokacja pamieci na strukture
    PersonalData_t
49      student->pImpl = malloc(sizeof(*student->pImpl))
    ;
50      // Odwolanie do prywatnych atrybutow struktury
    Student_t
51      strncpy(student->pImpl->name, name, strlen(name)
    );
52      strncpy(student->pImpl->surname, surname, strlen
    (surname));
53      student->pImpl->index = index;
54    }
55  }
56
57  void release(Student_t * student) {
58    if (checkPointer(student)) {
59      // Zwolnienie dynamicznie zaalokowanej pamieci
60      free(student->pImpl);
61    }
62  }
63
64  void introduce(const Student_t const * student) {
```

```
65      if (checkPointer(student)) {
66        printf("This is %s %s (index: %d) from %s, %s
    .\n",
67        student->pImpl->name,
68        student->pImpl->surname,
69        student->pImpl->index,
70        student->university,
71        student->department);
72    }
73  }
```

Listing 10. Idiom pImpl; plik źródłowy

Przedstawione rozwiązanie umożliwia niezależną pracę nad interfejsem struktury **Student_t** (plik nagłówkowy *Student.h*) oraz jej implementacją (plik źródłowy *Student.c*). Interfejs może być rozszerzany o kolejne funkcje, niezależnie od zawartości struktury **PersonalData_t**. Co więcej, przeniesienie definicji struktury **PersonalData_t** z pliku nagłówkowego do pliku źródłowego umożliwia skrócenie czasu kompilacji pliku wykonywalnego aplikacji. Dyrektywa preprocesora **#include** wkleja zawartość importowanego pliku nagłówkowego do każdego z wywołujących ją plików źródłowych. Jeżeli plik nagłówkowy zostanie zmodyfikowany, to kompilator przeprowadzi ponowną kompilację każdej z jednostek translacji odwołujących się do tego pliku. W rozwiązaniu z listingów 9. i 10. zmiana definicji (implementacji) strukturyPersonalData_t wymusi ponowną kompilację wyłącznie jednego pliku – *Student.c*, ponieważ plik nagłówkowy zawiera wyłącznie deklarację zapowiadającą struktury. Utworzenie i zwolnienie instancji struktury **Student_t** może być przeprowadzone następująco:

```c
#include "Student.h"

int main() {
  Student_t student;
  initialize(&student, "Politechnika Wroclawska", "
   Wydzial Elektryczny");
  introduce(&student);
  release(&student);
  return 0;
}
```

Rozwiązanie, w którym deklaracja struktury zawiera ***mętny wskaźnik*** do swojej implementacji jest nazywana idiomem ***pImpl*** (*ang. pointer to implementation*) i jest stosowana szczególnie często w ***bibliotekach programistycznych*** (więcej na temat bibliotek programistycznych w Ćw. 13). Takie podejście może mieć na celu również ukrycie szczegółów implementacyjnych przed użytkownikiem (np. implementacja biblioteki kryptograficznej), który otrzymuje skompilowany plik biblioteki oraz pakiet plików nagłówkowych. W rozwiązaniu z listingów 9. i 10. struktura **PersonalData_t** zawiera dane wrażliwe studenta, a jej zawartość (implementacja) może być modyfikowana (przez programistę) w razie potrzeb w obrębie pliku źródłowego. Zmiana definicji struktury **PersonalData_t** wpłynie na wynik działania funkcji **introduce()**, natomiast w żaden sposób nie wpłynie na sposób jej obsługi (wywołania) przez użytkownika.

Stosowanie idiomu ***pImpl*** może prowadzić do zwiększenia narzutu pamięciowego związanego z dynamiczną alokacją i zwalnianiem pamięci (patrz: funkcje **initialize()** i **release()** z listingu 10.), a także do zmniejszenia czytelności kodu i wzrostu jego skomplikowania. Tak jak każdy wzorzec projektowy, tak i idiom ***pImpl*** powinien być stosowany świadomie, po rozpatrzeniu potencjalnych zysków i strat wynikających z jego implementacji.

Zadanie (dla chętnych) Zaimplementuj maszynę stanów z **Zadania 3.** z wykorzystaniem idiomu **pImpl**.