Τμήμα Μηχανικών Η/Υ και Πληροφορικής
Computer Engineering and Informatics Department (CEID)
www.ceid.upatras.gr

Εργαστήριο Προηγμένοι Μικροεπεξεργαστές

Εργαστηριακές Ασκήσεις

Πάτρα, 2024-25

1 Εισαγωγικά

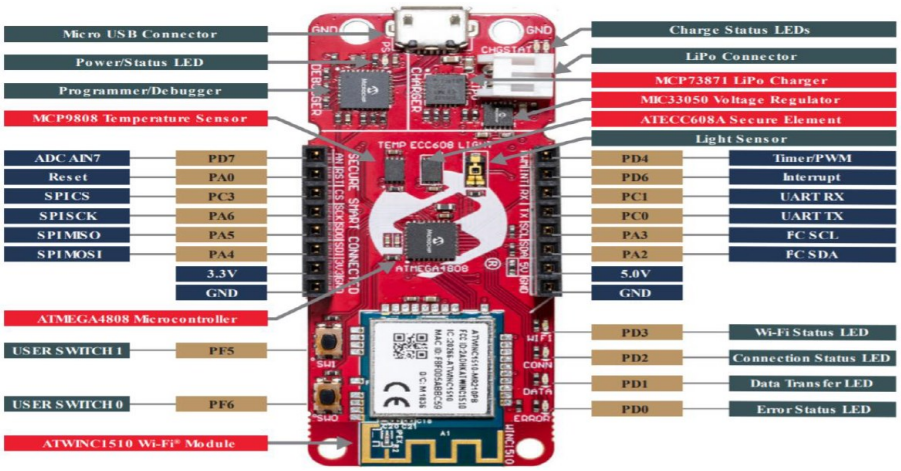
Η AVR είναι μια οικογένεια μικροεπεξεργαστών που αναπτύχθηκε αρχικά από την Atmel και μετέπειτα αγοράστηκε από την Microchip Technology. Βασίζεται σε μια τροποποιημένη Harvard αρχιτεκτονική, 8-bit RISC single-chip μικροεπεξεργαστή. Η AVR είναι μια από τις πρώτες οικογένειες μικροεπεξεργαστών που χρησιμοποίησαν on-chip flash memory, για αποθήκευση προγραμμάτων, σε αντίθεση με μια προγραμματιζόμενη ROM, EPROM ή EEPROM που χρησιμοποιούνταν από άλλους μικροελεγκτές. Οι μικροεπεξεργαστές της οικογένειας αυτής χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, ως πλήρη ενσωματωμένα συστήματα. Αξιοποιούνται ως εκπαιδευτικές ενσωματωμένες διατάξεις και έγιναν διάσημοι λόγω της ευρείας χρήσης τους σε πολλά open hardware development boards, της σειράς Arduino.

Το Microchip Studio (ή Atmel® Studio 7) είναι μια ολοκληρωμένη πλατφόρμα ανάπτυξης (Integrated Development Platform - IDP), για την δημιουργία εφαρμογών με AVR και SAM microcontrollers (MCU). Η πλατφόρμα προσφέρει εύχρηστο περιβάλλον για τη σύνταξη, την κατασκευή και τον εντοπισμό σφαλμάτων εφαρμογών που είναι γραμμένα σε C/C++ ή/και σε Assembly. Επίσης, παρέχεται η δυνατότητα εισαγωγής σχεδίων σε Arduino ως C/C++ projects και υποστηρίζονται 500+ AVR και SAM διατάξεις. Τέλος, το Microchip Studio περιλαμβάνει μια τεράστια βιβλιοθήκη πηγαίου κώδικα με 1600+ παραδείγματα εφαρμογών. Για περισσότερες πληροφορίες επισκεφτείτε την σελίδα της Microchip, στην οποία καταγράφονται αναλυτικά όλες οι δυνατότητες του Studio.

2 Το AVR-IoT Wx Development Board

Το AVR-IoT Wx Development Board είναι μια ευέλικτη και εύκολα επεκτάσιμη πλατφόρμα δημιουργίας και ανάπτυξης εφαρμογών. Βασίζεται στην αρχιτεκτονική μικροελεκτή AVR που χρησιμοποιεί τεχνολογία Wi-Fi. Συνοπτικά, μια αντίστοιχη εφαρμογή που αναπτύσσεται στο συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από τρία βασικά blocks:

1 ATmega4808 Microcontroller.
2 ATECC608A Secure Element.
3 ATWINC1510 Wi-Fi Controller Module.



Σχήμα 0.1 : AVR Development Board Overview

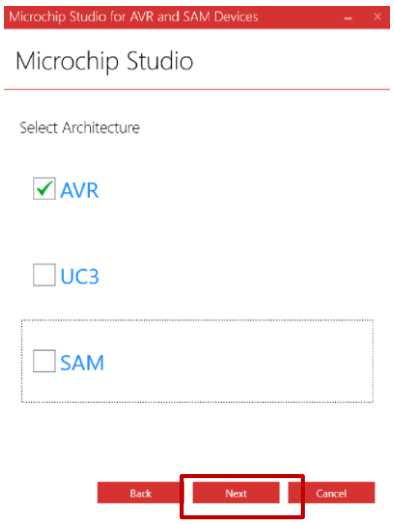
3 Εγκατάσταση Microchip Studio

Το Microchip Studio μπορείτε να το βρείτε διαθέσιμο στον παρακάτω σύνδεσμο:
https://www.microchip.com/mplab/microchip-studio

Η εγκατάσταση του γίνεται εύκολα, ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα:

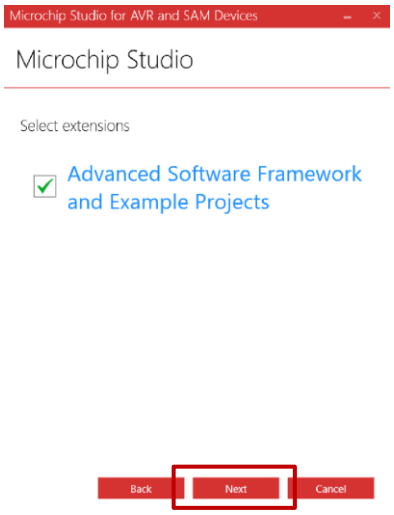
1 Πατήστε Download στην επιλογή Microchip Studio for AVR and SAM Devices 7.0.2594 Web Installer.
2 Αφού ολοκληρωθεί η παραπάνω διαδικασία, ανοίξτε το αρχείο και περιμένετε.
   - Στο παράθυρο που θα εμφανιστεί επιλέξτε το path στο οποίο θα αποθηκευτεί το Studio και επιλέξτε το κουτί “I agree to the Terms and Conditions”.
   - Στη συνέχεια επιλέξτε την επιλογή “Next”.
3 Στο επόμενο παράθυρο, έχετε την επιλογή να εγκαταστήσετε τρεις διαφορετικές οικογένειες που υποστηρίζονται από το Studio:
   - Το πρώτο είναι το AVR, το οποίο θα πρέπει να παραμείνει επιλεγμένο καθώς με αυτό θα ασχοληθούμε.
   - Το UC3 και το SAM αποτελούν άλλα είδη αρχιτεκτονικών και δεν είναι απαραίτητο να τα επιλέξετε για εγκατάσταση.

   Αφού σιγουρευτείτε ότι επιλέξατε το AVR επιλέξτε “Next”.



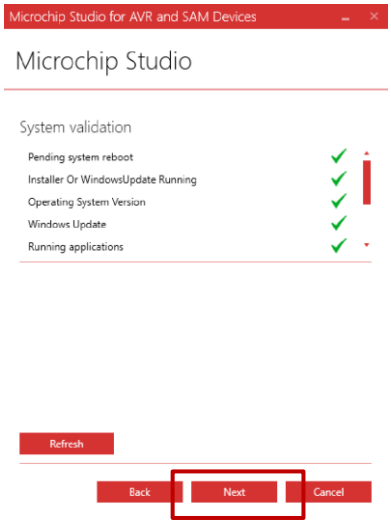
Σχήμα 0.2 : Παράθυρο Επιλογών AVR και SAM Devices

4 Advanced Software Framework (ASF):
Το ASF παρέχει ένα πλούσιο σύνολο λειτουργικών drivers και code modules που αναπτύχθηκαν από ειδικούς για τη μείωση του χρόνου σχεδιασμού. Το ASF είναι μια δωρεάν βιβλιοθήκη ανοιχτού κώδικα, που έχει σχεδιαστεί για να χρησιμοποιείται στις φάσεις αξιολόγησης, πρωτοτυπίας, σχεδιασμού και παραγωγής. Μπορείτε να το κρατήσετε επιλεγμένο και στον ελεύθερο χρόνο σας να δείτε τα παραδείγματα. Στη συνέχεια, μπορείτε να επιλέξετε “Next”.



Σχήμα 0.3 : Παράθυρο Επιλογής ASF

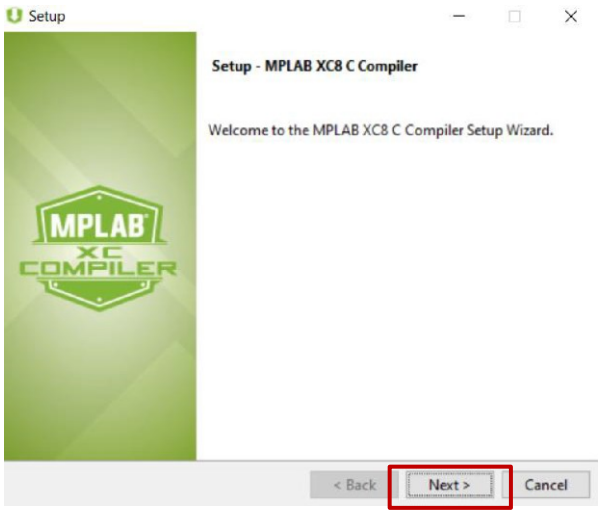
5 Εφόσον όλες οι επιλογές του Validation είναι επιλεγμένες, είστε έτοιμοι στη συνέχεια να επιλέξετε “Next”. Στο επόμενο παράθυρο μπορείτε να επιλέξετε το “Install” και να περιμένετε να εγκατασταθεί το Microchip Studio και τα υπόλοιπα εργαλεία που χρειάζονται.



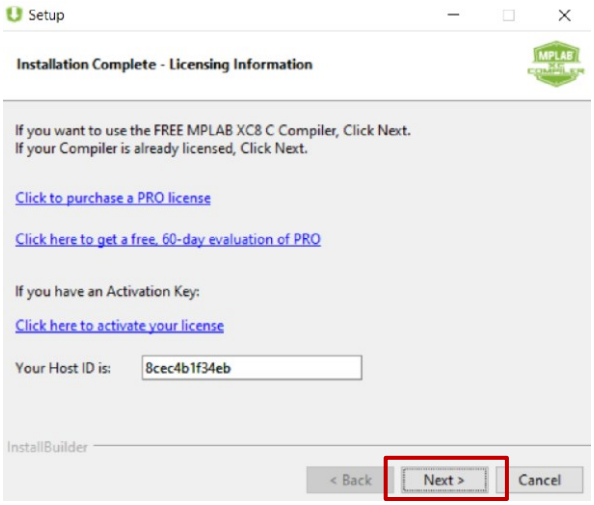
Σχήμα 0.4 : Παράθυρο Επιλογής System Validation

6 Κατά τη διάρκεια της εγκατάστασης, θα εμφανιστεί ένα επιπλέον παράθυρο επιλογών, για την εγκατάσταση του MPLAB XC8 C Compiler, με τον οποίο προσφέρεται η δυνατότητα βελτιστοποίησης του κώδικα.

- Επιλέξτε το “Next”, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.
- Έπειτα, επιλέξτε το «I accept the agreement» και στη συνέχεια επιλέξτε το “Next”.
- Στα επόμενα παράθυρα επιλέξτε με τη σειρά το “Free” και μετά επιλέξτε το “Next”.
- Μόλις τελειώσει η εγκατάσταση του, θα εμφανιστεί το αντίστοιχο παράθυρο στο οποίο μπορείτε να επιλέξτε το “Next”.
- Στο επόμενο και τελευταίο για τον compiler παράθυρο μπορείτε να επιλέξτε το “Finish”, με το οποίο ολοκληρώνεται η εγκατάστασή του.



Σχήμα 0.5 : Παράθυρο Compiler Setup Wizard



Σχήμα 0.6 : Παράθυρο Licensing Information

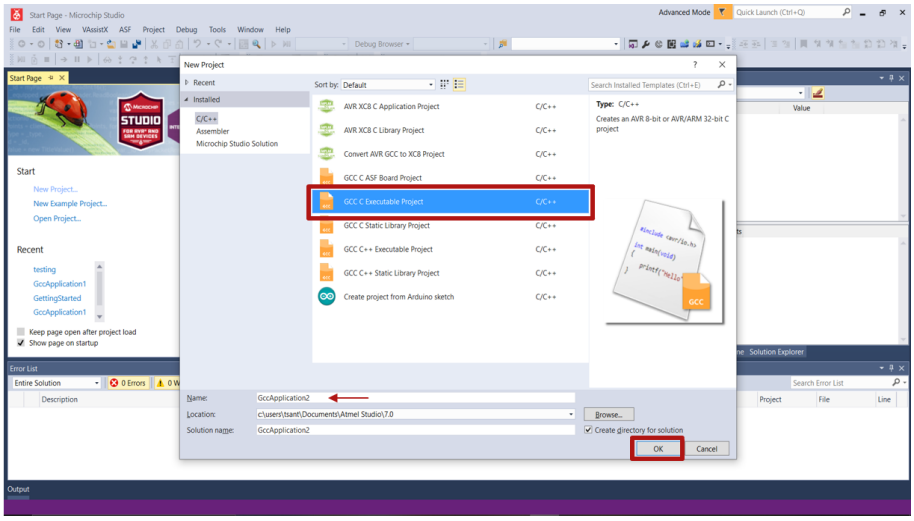
7 Ένα άλλο εργαλείο που θα εγκατασταθεί είναι και το Microsoft Visual, το οποίο γίνεται αυτόματα, χωρίς να απαιτείται κάποια περαιτέρω ενέργεια.

8 Όταν ολοκληρωθεί η εγκατάσταση, θα εμφανιστεί το παρακάτω παράθυρο, στο οποίο μπορείτε να επιλέξετε “Close” και να ανοίξει αυτόματα το Microchip Studio.

Σχήμα 0.7 : Παράθυρο Installation Complete

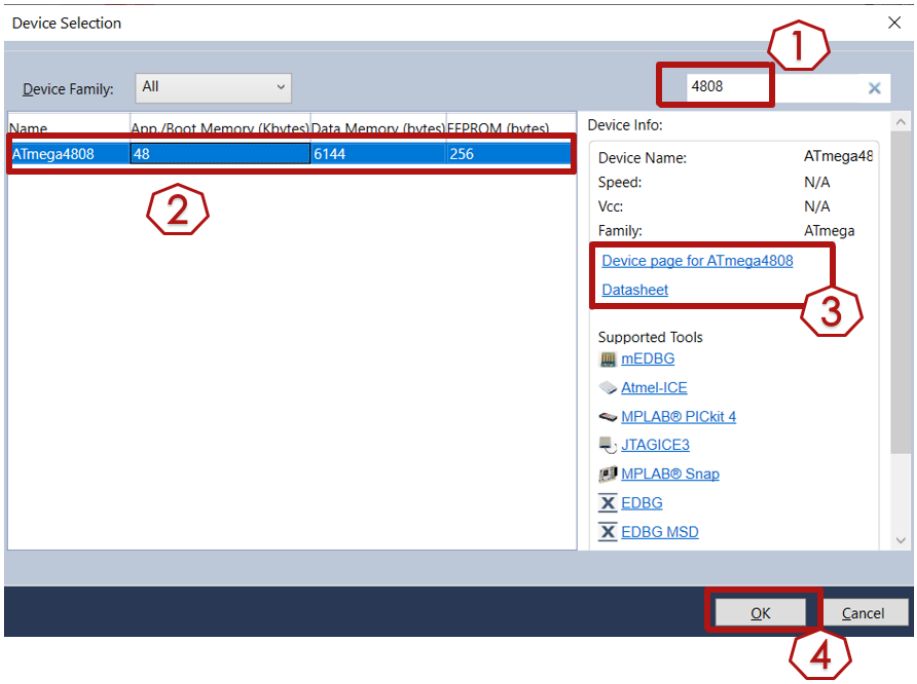
4 Δημιουργία Νέου Project

Στο εγκαταστημένο πλέον Microchip Studio, κατευθυνθείτε στην επιλογή “File → New → Project”. Τα παραδείγματα που θα υλοποιηθούν, θα είναι στη γλώσσα C και επομένως θα επιλέξουμε το “GCC C Executable Project”. Επιλέγουμε το όνομα της εφαρμογής μας και στη συνέχεια επιλέγουμε “OK”.



Σχήμα 0.8 : Παράθυρο Δημιουργίας “New Project”

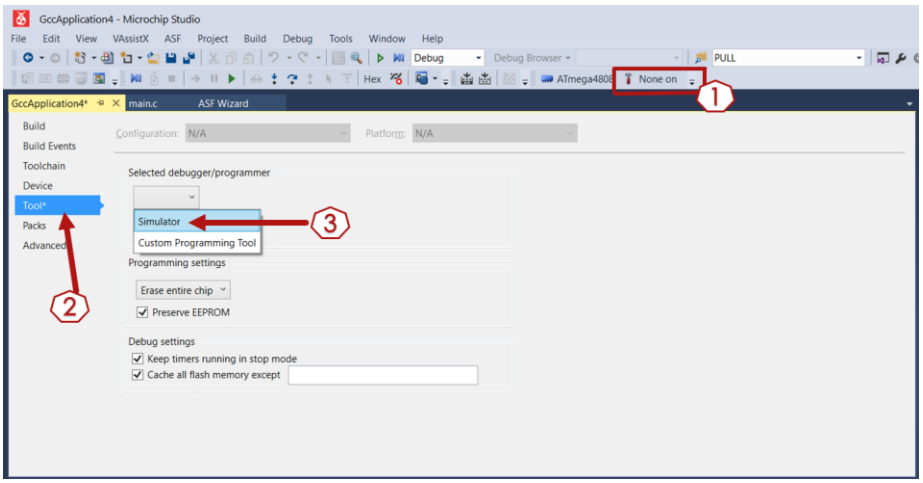
Επιλέγουμε τον μικροελεγκτή “ATmega4808”, ακολουθώντας τα βήματα, που φαίνονται στην εικόνα του παρακάτω σχήματος. Μπορούμε να δούμε κατευθείαν το Datasheet και το Device Page του συγκεκριμένου μικροελεγκτή, για περισσότερες πληροφορίες σχετικά με τις δυνατότητές του (Βήμα 3). Αφού επιλέξουμε την συσκευή μας, στη συνέχεια επιλέγουμε το “OK” (Βήμα 4) και στη συνέχεια μπορούμε να αρχίσουμε να προγραμματίζουμε.



Σχήμα 0.9 : Παράθυρο Επιλογής "Device"

5 Simulation και Debugging

Είναι σημαντικό όταν κάνουμε πρώτη φορά Debug να έχουμε επιλέξει το "Simulator" ως "Debugger", ακολουθώντας τα βήματα που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 0.10 : Παράθυρο Simulator – Debugger

6 Παράδειγμα 1: Λειτουργία ενός LED

Για να ενεργοποιηθεί/απενεργοποιηθεί ένα LED με κάποια συγκεκριμένη τιμή στην περίοδο, π.χ. T=10ms, θα πρέπει πρώτα να οριστεί το "Direction" του συγκεκριμένου Pin ως "Output". Αρχικά, το PORT που θα χρησιμοποιηθεί είναι το PORTD καθώς οι τέσσερες πρώτοι ακροδέκτες (PINs) του συνδέονται με LEDs, πάνω στην πλακέτα (όπως φαίνεται και στο Board Overview). Για να οριστεί ένα PIN ως "Output" πρέπει να τεθεί το αντίστοιχο ψηφίο (bit) του Register DIR (Data Direction) με '1'. Τώρα μπορεί να δοθεί η τιμή '0' ή '1' στον Register Out (Output Value) και να "ενεργοποιείται" ή να "απενεργοποιείται", το LED αντίστοιχα.

Σημείωση: Στη φάση του Simulation οι χρόνοι του "delay" όπως και των "timers", (που θα δούμε σε επόμενη άσκηση) δεν είναι αντιπροσωπευτικοί του χρόνου που αναμένουμε. Μόνο με την εκτέλεση του κώδικα πάνω στην πλακέτα μπορούμε να αντιληφθούμε τους πραγματικούς χρόνους. Για το λόγο αυτό, μπορούμε να επιλέγουμε σχετικά μικρούς χρόνους, για να αποφύγουμε μεγάλες καθυστερήσεις αναμονής κατά την προσομοίωση.

Ο κώδικας της υλοποίησης του παραδείγματος παρουσιάζεται παρακάτω:

```
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#define del 10
int main(void){

	PORTD.DIR |= 0b00000010; //PIN1_bm //PIN is output
	PORTD.OUT |= 0b00000010; //PIN1_bm //LED is off

	while (1) {

				PORTD.OUTCLR= 0b00000010;//PIN1_bm //LED is on
				_delay_ms(del);          //wait for 10ms

				PORTD.OUT |= 0b00000010; //PIN1_bm //LED is off
				_delay_ms(del);          //wait for 10ms
	}
}
```

Σχήμα 0.11 : Κώδικας Παραδείγματος 1

Μπορείτε να χρησιμοποιήσετε τον κώδικα του παραδείγματος, για να εκτελέσετε τη διαδικασία του "Simulation" στο "Microchip Studio". Ανοίξτε το I/O παράθυρο (Debug ⇒ Windows ⇒ I/O) και ξεκινήστε το Debugging. Εκτελέστε βήμα-βήμα τις εντολές (η συνάρτηση delay δεν εκτελείται βηματικά) και παρατηρήστε τις τιμές που παίρνουν οι καταχωρητές (Registers) του PORTD.

Σημείωση: Για να δείτε τις τιμές των δηλωμένων σταθερών PIN1_bm και άλλων που θα δούμε στη συνέχεια, μπορείτε να ανατρέξετε στο header file iom4808.h, το οποίο βρίσκεται στον φάκελο που έχετε εγκαταστήσει το Microchip Studio :

π.χ. Path: "~\Atmel\Studio\7.0\packs\atmel\ATmega_DFP\1.7.374\include\avr\iom4808.h"

7 Παράδειγμα 2: Διακοπή (Interrupt)

Οι διακόπτες (switches) που μπορούν να χρησιμοποιηθούν βρίσκονται στο PORTF και είναι οι PIN5 και PIN6 (ανατρέξτε στο Board Overview). Για τη χρήση ενός διακόπτη (switch), το pullup enable bit που του αντιστοιχεί πρέπει να είναι ενεργοποιημένο (ανατρέξτε σελ. 158 στο ATmega4808 DataSheet). Επίσης, το σημείο του παλμού στο οποίο θα ενεργοποιηθεί η μονάδα διαχείρισης της διακοπής (interrupt) πρέπει να οριστεί. Εδώ η ενεργοποίησή της και στις δύο άκρες του παλμού επιλέγεται (ανατρέξτε σελ. 158 στο ATmega4808 DataSheet). Με την ενεργοποίηση των συγκεκριμένων ψηφίων (bits) του PIN5, το σύστημα μπορεί να δεχτεί διακοπές (interrupts) όταν πατηθεί ο διακόπτης (switch).

Όταν γίνει η διακοπή (interrupt), συγκεκριμένη συνάρτηση η οποία θα την διαχειριστεί, ενεργοποιείται. Αυτή η συνάρτηση είναι μια ρουτίνα διαχείρισης διακοπών (ISR routine) η οποία παίρνει ως όρισμα μια διεύθυνση (interrupt vector) η οποία αντιστοιχεί σε μία διακοπή. Για παράδειγμα, το interrupt vector για τη διακοπή του PORTF είναι το PORTF_PORT_vect. Στο αρχείο iom4808.h υπάρχουν όλα τα interrupt vectors που μπορούν να χρησιμοποιηθούν από το συγκεκριμένο board.

Ο κώδικας της υλοποίησης ενός παραδείγματος με διακοπή, παρουσιάζεται παρακάτω:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>


int x=0; //logic flag

int main() {

	PORTD.DIR |= 0b00000010; //PIN is output
	PORTD.OUT |= 0b00000010; //LED is off
	//pullup enable and Interrupt enabled with sense on both edges
	PORTF.PIN5CTRL |= PORT_PULLUPEN_bm | PORT_ISC_BOTHEDGES_gc;
	sei(); //enable interrupts
	while (x==0){

				PORTD.OUTCLR= 0b00000010; // LED is on

		}

	PORTD.OUT |= 0b00000010;//LED is off
	cli();                  //disable interrupts

}

ISR(PORTF_PORT_vect){
	int y = PORTF.INTFLAGS; //Procedure to
	PORTF.INTFLAGS=y;       //clear the interrupt flag
	x=1;                    //change logic flag to get out of loop
}
```

Σχήμα 0.12 : Κώδικας Παραδείγματος 2

Η λειτουργία του κώδικα του παραδείγματος 2, είναι η εξής:

Στο σύστημα υπάρχει ένα LED και ένας διακόπτης (switch). Σύμφωνα με την κανονική λειτουργία του προγράμματος, το LED ενεργοποιείται μέσα σε ένα βρόχο (while loop). Όταν πατηθεί ο διακόπτης ενεργοποιείται η διακοπή (interrupt) και αλλάζει η τιμή μιας τυχαίας μεταβλητής (int x) ώστε να σταματήσει η λειτουργία του LED και του προγράμματος.

Για να ενεργοποιηθεί η διακοπή (interrupt) το ψηφίο (bit) 5 του register INTFLAGS στο PORTF πρέπει να πατηθεί, εφόσον το πρόγραμμα είναι σε κάποιο breakpoint. Μόλις το ψηφίο (bit) αλλάξει από ‘0’ σε ‘1’ και το πρόγραμμα συνεχίσει με την επόμενη εντολή (STEP OVER), θα ενεργοποιηθεί η ρουτίνα διαχείρισης διακοπών (interrupt routine).

8 Παράδειγμα 3: Χρονιστής (Timer)

Για να λειτουργήσει ο χρονιστής TCA0 timer σε κανονική λειτουργία (normal mode) και να ενεργοποιηθεί διακοπή (interrupt), όταν φτάσει σε μία προβλεπόμενη τιμή θα πρέπει:

- Να δοθεί η τιμή '0' στον CTRLB register (Normal Mode).
- Να δοθεί η τιμή '0' στον CNT register (θέτουμε τον χρονιστή – timer στο μηδέν).
- Να δοθεί η προβλεπόμενη τιμή στον CMP0 register.
- Να ενεργοποιηθούν οι διακοπές (interrupts) μέσω του INTCTRL register.
- Να τεθεί η συχνότητα ρολογιού (clock frequency).
- Τέλος, να ενεργοποιηθεί ο timer μέσω του CTRLA register.

Σημείωση: Για περισσότερες λεπτομέρειες μπορείτε να ανατρέξτε στη σελ. 243, στο ATmega4808 DataSheet.

Ο TCA0 θα αρχίσει να μετράει και όταν θα φτάσει την τιμή που τέθηκε στον CMP0 θα ενεργοποιηθεί η ISR routine με όρισμα το vector TCA0_CMP0_vect. Αυτό είναι το interrupt vector που έχει οριστεί για τον συγκεκριμένο χρονιστή/μετρητή (timer/counter).

Ο TCA0 καταχωρητής μπορεί να λειτουργήσει ως χρονιστής/μετρητής είτε των 16-bit, επιλέγοντας την υποκατηγορία SINGLE, είτε των 8-bit, επιλέγοντας την υποκατηγορία SPLIT. Ο TCA0.SINGLE καταχωρητής αξιοποιεί ομάδες των δύο 8-bit καταχωρητών ως έναν ενιαίο καταχωρητή των 16-bit για να μετρήσει χρόνο. Σε αντίθεση, ο TCA0.SPLIT χωρίζεται σε δύο διαφορετικούς 8-bit χρονιστές/μετρητές, ο καθένας από τους οποίους αξιοποιεί ομάδες των 8-bit καταχωρητών, είτε τα High Bits είτε τα Low Bits. Επομένως, κάποιοι καταχωρητές του TCA0.SINGLE, όπως ο CMP0, χωρίζεται σε High και Low για τον TCA0.SPLIT, δηλαδή σε HCMP0 και LCMP0 (βλ. ATmega4808 DataSheet σελ 217-232).

Ο κώδικας της υλοποίησης του παραδείγματος, παρουσιάζεται παρακάτω:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>


#define value 20

int x=0; //logic flag

int main() {

	PORTD.DIR |= 0b00000010; //PIN is output
	PORTD.OUTCLR= 0b00000010;//LED is on


	//(σελ 219, 224, 205) 16-bit counter high and low
	TCA0.SINGLE.CNT = 0;	//clear counter
	TCA0.SINGLE.CTRLB = 0;	//Normal Mode (TCA_SINGLE_WGMODE_NORMAL_gc σελ 207)
	TCA0.SINGLE.CMP0 = value;//When CMP0 reaches this value -> interrupt
	//CLOCK_FREQUENCY/1024
	TCA0.SINGLE.CTRLA = 0x7<<1;		//TCA_SINGLE_CLKSEL_DIV1024_gc σελ 224
	TCA0.SINGLE.CTRLA |= 1;			//Enable
	TCA0.SINGLE.INTCTRL = TCA_SINGLE_CMP0_bm; //Interrupt Enable (=0x10)
	sei();					//begin accepting interrupt signals
	while (x==0) {
		;				//similar to a nop function
	}

	PORTD.OUT |= PIN1_bm;			//LED is off
	cli();

}

ISR(TCA0_CMP0_vect){

	TCA0.SINGLE.CTRLA = 0;			//Disable
	int intflags = TCA0.SINGLE.INTFLAGS;	//Procedure to
	TCA0.SINGLE.INTFLAGS=intflags;		//clear interrupt flag
	x=1;					//change flag to get out of the loop

}
```

Σχήμα 0.13 : Κώδικας Παραδείγματος 3

Η λειτουργία του κώδικα του παραδείγματος 3, είναι η εξής:

Ενεργοποιείται το LED και ο χρονιστής (timer). Όταν ο χρονιστής φτάσει την τιμή που έχει τεθεί αρχικά, τότε:

- Ενεργοποιείται η ρουτίνα διαχείρισης της διακοπής.
- Αλλάζει μια τυχαία μεταβλητή (x), για να μπορεί να ελεγχθεί μέσα στην συνάρτηση main αν εκτελέστηκε η ρουτίνα διαχείρισης της διακοπής, ώστε το πρόγραμμα να συνεχίσει με την επόμενη λειτουργία.
- Το πρόγραμμα ολοκληρώνεται απενεργοποιώντας το LED.

<u>Σημείωση:</u> Μπορείτε να χρησιμοποιείτε breakpoints για να δείτε εάν ένα interrupt ενεργοποιείται.

Η τιμή του καταχωρητή CMP0 (value) ορίζει το χρονικό διάστημα μέχρι να κάνει διακοπή (interrupt) ο χρονιστής (timer), (γενικά να τελειώσει και να αρχίσει από την αρχή). Ο τύπος για τον υπολογισμό είναι ο παρακάτω:

$$f_{timer} = \frac{f_{system}}{N_{prescaler}}$$

$$value = T * f_{timer}$$

Ο ATmega4808 λειτουργεί σε μέγιστο F=20 MHz και το $N_{prescaler}$ παίρνει την τιμή που έχουμε ορίσει εμείς για συχνότητα ρολογιού (clock frequency). Για παράδειγμα στον κώδικά μας δώσαμε τιμή value=20 άρα ο χρόνος του χρονιστή (timer) είναι:

$$f_{timer} = \frac{20MHz}{1024} = 19{,}531KHz$$

$$T = \frac{value}{f_{timer}} = 1{,}024ms$$

9 Παράδειγμα 4: Λειτουργία του Μετατροπέα Αναλογικού σε Ψηφιακό (Analog to Digital Converter – ADC)

Ο Μετατροπέας Αναλογικού σε Ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Converter – ADC) είναι ένα σύστημα το οποίο μετατρέπει αναλογικά σήματα που έρχονται ως είσοδοι στα κατάλληλα PINs, όπως ήχος, ρεύμα, φως, κτλ., σε ψηφιακά σήματα. Επομένως, οι τιμές των αναλογικών σημάτων μπορούν να διαβαστούν πλέον από τον μικροελεγκτή και να αξιοποιηθούν κατάλληλα. Ο ADC που εμπεριέχεται στην πλακέτα δέχεται μετρήσεις από το PIN7 του PORTD. Οι βασικοί τρόποι (modes) λειτουργίας του ADC είναι δύο. Το free-running mode στο οποίο ο ADC δέχεται συνεχώς τιμές και τις μετατρέπει σε ψηφιακά σήματα. Η δεύτερη και προκαθορισμένη (default) λειτουργία του (single-conversion mode) εκτελεί μόνο μία μετατροπή όποτε αυτή ζητηθεί από τον κώδικα και μετά σταματά.

Στο παράδειγμα, όταν ο ADC θα διαβάζει μετρήσεις που είναι μικρότερες από μία προκαθορισμένη τιμή (για παράδειγμα RES=10) θα ενεργοποιείται μια διακοπή (interrupt). Με την ενεργοποίηση της διακοπής (interrupt) θα ανάβει ένα LED για T=5ms και μετά θα επιστρέφουμε στην αρχική ροή του προγράμματος και θα περιμένουμε ξανά την επόμενη μέτρηση του ADC.

Για την ενεργοποίηση του ADC:

1. Πρώτα το resolution ορίζεται σε 10-bit ή 8-bit → Resolution Selection bit (RESSEL) στον Control A register (ADCn.CTRLA).
2. Έπειτα, το Free-Running Mode ενεργοποιείται→ ‘1’ στο Free-Running bit (FREERUN) στο ADCn.CTRLA. Στην περίπτωση που ζητείται να εκτελεστεί η προκαθορισμένη λειτουργία του ADC (single-conversion mode), δηλαδή να εκτελεστεί μία μόνο μετατροπή όποτε ζητηθεί, αυτό το ψηφίο (bit) δεν ενεργοποιείται και παραμένει ‘0’.
3. Ορίζεται το ψηφίο (bit) με το οποίο θα συνδεθεί ο ADC → MUXPOS bit field στο MUXPOS register (ADCn.MUXPOS).
4. Ο ADC ενεργοποιείται→ Γράφουμε ‘1’ στο ENABLE bit στο ADCn.CTRLA.
5. Δίνεται η επιλογή της ενεργοποίησης του Debug Mode (ADCn.DBGCTRL) ώστε ο ADC να μην σταματά ποτέ να τρέχει και να λαμβάνει τιμές.

Με τη λειτουργία του Window Comparator Mode ελέγχονται όλες οι τιμές που εισάγονται στον ADC με μια δοθείσα τιμή, δηλαδή ένα κατώφλι (threshold). Για να ενεργοποιηθεί αυτή η λειτουργία πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

1. Πρώτα εισάγεται το κατώφλι (threshold) στον καταχωρητή ADCn.WINLT και/ή ADCn.WINHT.
2. Ενεργοποιείται η λειτουργία δημιουργίας διακοπών (interrupts) → Window Comparator Interrupt Enable bit (WCOMP) στον Interrupt Control register (ADCn.INTCTRL).
3. Ορίζεται το επιθυμητό Mode (στην περίπτωσή μας θέλουμε διακοπές – interrupt όταν RESULT<THRESHOLD) → WINCM bit field στον ADCn.CTRLE.

Εφόσον προγραμματιστεί κατάλληλα ο ADC και οι λειτουργίες του, απομένει να γραφτεί το λογικό ‘1’ στο Start Conversion Bit (STCONV) στον Command Register (ADCn.COMMAND), το οποίο εκκινεί το conversion. Οι τιμές καταγράφονται στον καταχωρητή RES (Result). Αυτή η εντολή πρέπει να εκτελεστεί μόνο εφόσον προγραμματιστεί εξ’ ολοκλήρου ο ADC με τους παραπάνω τρόπους που εξηγήθηκαν. Στο Free-Running Mode αρκεί να ενεργοποιηθεί μία φορά αυτή η εντολή ώστε συνεχώς να γίνονται μετατροπές νέων τιμών από αναλογικό σε ψηφιακό. Στην προκαθορισμένη λειτουργία (single-conversion mode) κάθε φορά που απαιτείται μία μετατροπή νέων τιμών, πρέπει να εκτελείται η εντολή Start Conversion ώστε ο ADC να μετατρέψει το καινούριο σήμα εισόδου από αναλογικό σε ψηφιακό.

<u>Συμβουλή:</u> Ανατρέξτε στο ATmega4808 DataSheet και διαβάστε καλά τις σελίδες 394-421. Αναγράφονται αναλυτικά όλες οι πιθανές λειτουργίες που μπορείτε να χρησιμοποιήσετε για να κάνετε Analog to Digital Conversion και πως να τις προγραμματίσετε.

Ο κώδικας της υλοποίησης του παραδείγματος παρουσιάζεται παρακάτω:

```
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#include <avr/interrupt.h>

int main(){

	PORTD.DIR |= PIN1_bm;			//PIN is output


	//initialize the ADC for Free-Running mode
	ADC0.CTRLA |= ADC_RESSEL_10BIT_gc;	//10-bit resolution
	ADC0.CTRLA |= ADC_FREERUN_bm;		//Free-Running mode enabled
	ADC0.CTRLA |= ADC_ENABLE_bm;		//Enable ADC
	ADC0.MUXPOS |= ADC_MUXPOS_AIN7_gc;	//The bit
	ADC0.DBGCTRL |= ADC_DBGRUN_bm;		//Enable Debug Mode

	//Window Comparator Mode
	ADC0.WINLT |= 10;			//Set threshold
	ADC0.INTCTRL |= ADC_WCMP_bm;		//Enable Interrupts for WCM
	ADC0.CTRLE |= ADC_WINCM0_bm;		//Interrupt when RESULT < WINLT
	sei();
	ADC0.COMMAND |= ADC_STCONV_bm;		//Start Conversion
	while(1){

		;

	}

}

ISR(ADC0_WCOMP_vect){
	int intflags = ADC0.INTFLAGS;
	ADC0.INTFLAGS = intflags;
	PORTD.OUTCLR= PIN1_bm;			//LED is on
	_delay_ms(5);
	PORTD.OUT |= PIN1_bm;			//LED is off
}
```

Σχήμα 0.14 : Κώδικας Παραδείγματος 4

<u>Σημείωση:</u> Για την προσομοίωση της λειτουργίας του ADC πρέπει να γράφετε εσείς την τιμή εισόδου στον καταχωρητή RES (Result) χειροκίνητα.

10. Παράδειγμα 5: Λειτουργία του Παλμοευρικού Διαμορφωτή (Pulse-Width Modulator – PWM)

Ο Παλμοευρικός Διαμορφωτής (Pulse-Width Modulator – PWM) μπορεί να χρησιμοποιηθεί με πολλά περιφερειακά και εφαρμογές, όπως:

- Audio
- Ρύθμιση έντασης LED
- Analog signal generation
- Ρύθμιση servos, DC motors, κτλ.

Μέσω του μικροελεγκτή δημιουργείται μια κυματομορφή (waveform) η οποία συνδέεται με το PIN ενός περιφερειακού. Συγκεκριμένα, η έξοδος της κυματομορφής (waveform output) είναι διαθέσιμη στο PORT που επιλέγεται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως έξοδος (αρκεί να οριστεί το PORT ως έξοδος).

Στο παράδειγμα αυτό ενεργοποιείται ο PWM ώστε να δημιουργηθεί ένας παλμός που θα λειτουργεί σαν ρολόι. Με αυτό θα αναβοσβήνει ένα LED, το οποίο θα ενεργοποιείται όταν ο παλμός ανεβαίνει στην ψηλή στάθμη (rising edge) και θα απενεργοποιείται όταν πέφτει στη χαμηλή στάθμη (falling edge). Για την εκτέλεση της PWM λειτουργία, χρησιμοποιείται ο TCA χρονιστής ως ένας 16-bit PWM. Ωστόσο υπάρχει η δυνατότητα χρήσης του και ως δύο 8-bit timers/counters, οι οποίοι δημιουργούν δύο διαφορετικά PWMs *(δείτε σελ. 196 και σελ. 224 του ATmega4808 Datasheet)*.

Η χρήση ενός Single-Slope PWM generator θα γίνει με τη βοήθεια του χρονιστή TCA:

1 Αρχικά, πρέπει να οριστεί ο prescaler του χρονιστή (timer), όπως και στην περίπτωση του απλού timer →TCA0.SINGLE.CTRLA=TCA_SINGLE_CLKSEL_DIV1024_gc.

2 Έπειτα, πρέπει να δοθεί η μέγιστη τιμή TOP μέχρι την οποία θα μετρήσει ο χρονιστής (timer) → TCA0.SINGLE.PER = value.

3 Ορίζεται ο κύκλος λειτουργίας (duty cycle) του παλμού μέσω της χρήσης του καταχωρητή CMPx → TCA0.SINGLE.CMP0 = value.

4 Γίνεται η επιλογή του Waveform Generation Mode, στην περίπτωσή μας το Single-Slope → TCA0.SINGLE.CTRLB |= TCA_SINGLE_WGMODE_SINGLESLOPE_gc.

5 Τέλος, ενεργοποιείται ο TCA → TCA0.SINGLE.CTRLA |= TCA_SINGLE_ENABLE_bm.

Με την επιλογή του prescaler και την εκχώρηση τιμής στον καταχωρητή PER, η συχνότητα υπολογίζεται με τον παρακάτω τύπο.

$$f_{PWM\_SS} = \frac{f_{CLK\_PER}}{N(PER + 1)}$$

Ο καταχωρητής PER είναι 16-bit, επομένως το ελάχιστο resolution είναι TCA0.SINGLE.PER = 0x0002 και το μέγιστο είναι TCA0.SINGLE.PER = MAX-1. Η τιμή του CMPx καθορίζει το duty cycle. Για παράδειγμα, αν έχει την μισή τιμή του καταχωρητή PER τότε το duty cycle είναι 50%.

Σημείωση: Υπάρχουν και άλλες λειτουργίες του PWM. Για περισσότερες λεπτομέρειες ανατρέξτε στο ATmega4808 DataSheet σελ.191-199.

Όταν ανεβαίνει στην υψηλή στάθμη και όταν κατεβαίνει στην χαμηλή στάθμη, ενεργοποιούνται οι κατάλληλες διακοπές (interrupts). Η λειτουργία αυτή ορίζεται ως εξής:

- Ενεργοποιώντας το Overflow Interrupt: εκτελείται διακοπή όταν ο χρονιστής (timer) είναι ίσος με την BOTTOM τιμή (ανεβαίνουμε στην υψηλή στάθμη) → TCA0.SINGLE.INTCTRL |= TCA_SINGLE_OVF_bm.
- Ενεργοποιώντας και το CMPx Interrupt: εκτελείται διακοπή όταν ο χρονιστής (timer) είναι ίσος με την τιμή του καταχωρητή CMPx (πηγαίνουμε στην χαμηλή στάθμη) → TCA0.SINGLE.INTCTRL |= TCA_SINGLE_CMP0_bm.

Συμβουλή: Ανατρέξτε στο ATmega4808 DataSheet και διαβάστε καλά τις σελίδες σχετικά με τον TCA0. Αναγράφονται αναλυτικά όλες οι πιθανές λειτουργίες του PWM και υπάρχουν παραδείγματα για τον σχηματισμό παλμών.

Ο κώδικας της υλοποίησης του παραδείγματος παρουσιάζεται παρακάτω:

```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
int main(){
	PORTD.DIR |= PIN1_bm; //PIN is output
	//prescaler=1024
	TCA0.SINGLE.CTRLA=TCA_SINGLE_CLKSEL_DIV1024_gc;
	TCA0.SINGLE.PER = 254; //select the resolution
	TCA0.SINGLE.CMP0 = 127; //select the duty cycle
	//select Single_Slope_PWM
	TCA0.SINGLE.CTRLB |= TCA_SINGLE_WGMODE_SINGLESLOPE_gc;
	//enable interrupt Overflow
	TCA0.SINGLE.INTCTRL |= TCA_SINGLE_OVF_bm;
	//enable interrupt COMP0
	TCA0.SINGLE.INTCTRL |= TCA_SINGLE_CMP0_bm;
	TCA0.SINGLE.CTRLA |= TCA_SINGLE_ENABLE_bm; //Enable
	sei();
	while (1){
		;
	}
}

ISR(TCA0_OVF_vect){
	//clear the interrupt flag
	int intflags = TCA0.SINGLE.INTFLAGS;
	TCA0.SINGLE.INTFLAGS = intflags;
	PORTD.OUTCLR |= PIN1_bm; //LED is on
}

ISR(TCA0_CMP0_vect){
	//clear the interrupt flag
	int intflags = TCA0.SINGLE.INTFLAGS;
	TCA0.SINGLE.INTFLAGS = intflags;
	PORTD.OUT |= PIN1_bm; //LED is off
}
```

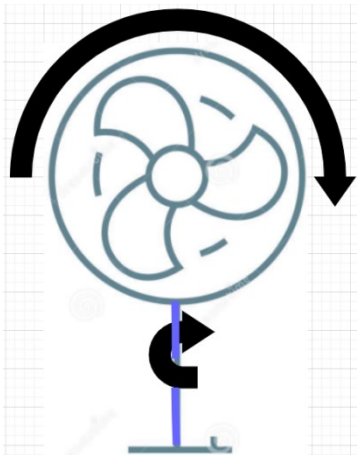
Σχήμα 0.15 : Κώδικας Παραδείγματος 5

Εργαστηριακή Άσκηση 04:

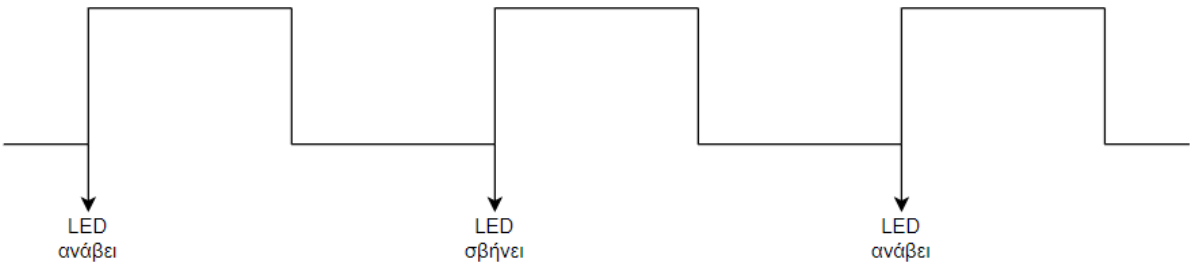
Λειτουργία Ανεμιστήρα

1 Περιγραφή

Σε αυτή την εργαστηριακή άσκηση, θα προσομοιωθεί η κίνηση ενός ανεμιστήρα. Ένας ανεμιστήρας αποτελείται από δύο περιστροφικές κινήσεις, μία κυκλική κίνηση των λεπίδων και μία κυκλική κίνηση της βάσης, ώστε ο ανεμιστήρας να μπορεί να περιστρέφεται και να καλύπτει περισσότερο χώρο, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 3.1. Οι δύο αυτές κυκλικές κινήσεις θα προσομοιωθούν με δύο διαφορετικούς ρυθμούς, που θα καθορίζονται από δύο διαφορετικούς Παλμοευρικούς Διαμορφωτές (Pulse-Width Modulators – PWMs), (μπορείτε να χρησιμοποιήσετε όποιον καταχωρητή σας διευκολύνει). Ο ρυθμός κάθε κίνησης θα εμφανίζεται σε ένα LED (LED0 και LED1), το οποίο θα ενεργοποιείται όταν ο παλμός θα βρίσκεται στην ανερχόμενη ακμή (rising edge) και θα απενεργοποιείται όταν ακολουθεί η ανερχόμενη ακμή (rising edge) του επόμενου παλμού, (όπως φαίνεται αναλυτικά και στο σχήμα 3.2). Το LED0 (PORTD PIN0) θα αντιστοιχεί στην κίνηση των λεπίδων και το LED1 (PORTD PIN1) στην κίνηση της βάσης.



Σχήμα 4.1 : Δύο κινήσεις ανεμιστήρα.



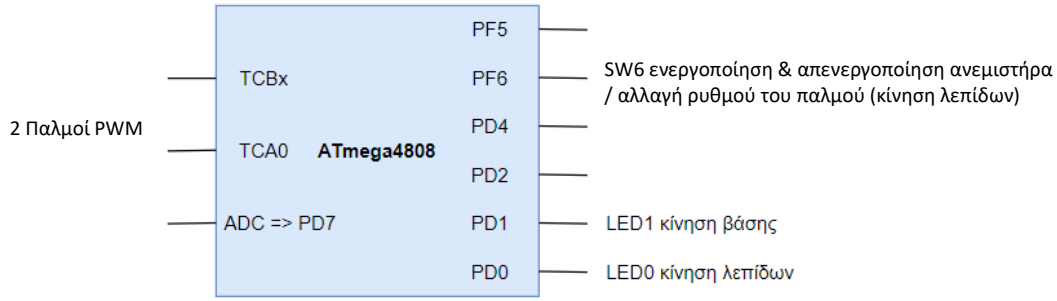
Σχήμα 4.2 : Αναπαράσταση λειτουργίας LED μέσω του PWM.

Ο ανεμιστήρας ενεργοποιείται και ξεκινάει την λειτουργία του όταν πατηθεί ένας διακόπτης (switch 6 του PORTF), οπότε και οι ακόλουθες ενέργειες εκτελούνται:

- Η κυκλική κίνηση της βάσης ενεργοποιείται, η οποία προσομοιώνεται με ένα παλμό περιόδου Tb = 2 ms και κύκλο λειτουργίας (duty cycle) Db = 40%. Ο παλμός αυτός οδηγεί το LED1 του PORTD μέσω των ανερχόμενων ακμών (rising edges).

- Η κυκλική κίνηση των λεπίδων ενεργοποιείται, η οποία προσομοιώνεται με έναν παλμό περιόδου Tl = 1 ms και κύκλο λειτουργίας (duty cycle) Dl = 60%. Ο παλμός αυτός οδηγεί το LED0 του PORTD μέσω των ανερχόμενων ακμών (rising edges).

Όταν ενεργοποιηθεί δεύτερη φορά ο ίδιος διακόπτης (switch 6 του PORTF) μετά την εκκίνηση της λειτουργίας του ανεμιστήρα, η περίοδος του παλμού της κυκλικής κίνησης των λεπίδων υποδιπλασιάζεται με κύκλο λειτουργίας (duty cycle) Dl = 50%. Ο παλμός της κυκλικής κίνησης της βάσης συνεχίζει τη λειτουργία του όπως περιγράφηκε παραπάνω. Αν ο διακόπτης πατηθεί τρίτη φορά, τότε ο ανεμιστήρας απενεργοποιείται και οι δύο παλμοί σταματούν τη λειτουργίας τους.



Σχήμα 4.3 : Απεικόνιση ATmega4808, Εργαστηριακής Άσκησης 04

<u>Παρατήρηση:</u> Καθώς υπάρχουν διαφορετικές ρουτίνες διακοπών (ISR) για τον καθένα παλμό, πρέπει να δοθεί προσοχή πότε οι παλμοί έρχονται σε ανερχόμενη ακμή (rising edge). Δύο ρουτίνες διακοπών δεν μπορούν να εκτελούνται ταυτόχρονα, επομένως για να μην χαθεί η συχνότητα των LEDS, οι δύο παλμοί είτε δεν πρέπει να έρχονται ταυτόχρονα σε ανερχόμενη ακμή (πχ. καθυστερημένη έναρξη μέτρησης), είτε θα χρησιμοποιηθεί μία ISR μέσα στην οποία θα ελέγχεται η ενεργοποίηση της δεύτερης ISR μέσω των αντίστοιχων flags των καταχωρητών INTFLAGS.

**** Σημείωση: Θα πρέπει να μελετήσετε με λεπτομέρεια τις σελίδες του Datasheet που αφορούν στην PWM λειτουργία. *****

2 Ερωτήματα Εργαστηριακής Άσκησης 4

1 Υλοποιείστε τη λειτουργία ενεργοποίησης του ανεμιστήρα μετά την ενεργοποίηση του διακόπτη (switch 6), δηλαδή οι δύο παλμοί PWM αρχικοποιούνται και οδηγούν τα δύο LEDs.

2 Προσθέστε τη δεύτερη λειτουργία του παλμού της κυκλικής κίνησης των λεπίδων μέσω της ενεργοποίησης του διακόπτη (switch 6) για δεύτερη φορά.

3 Επίσης, προσθέστε τη λειτουργία απενεργοποίησης του ανεμιστήρα **με δυνατότητα ενεργοποίησής του εκ νέου** σε επόμενο πάτημα του διακόπτη.

3 Αναφορά Εργαστηριακής Άσκησης 4

1 Αναπτύξτε **τον κώδικά σας** συμπεριλαμβάνοντας τα απαραίτητα σχόλια επεξήγησης του κώδικα και βεβαιωθείτε πως όλες οι λειτουργίες εκτελούνται, όπως προβλέπεται.

2 Παραδίδετε **διάγραμμα ροής** καθώς και **αναλυτική περιγραφή** της λειτουργίας του κώδικά σας. Εξηγήστε τον τρόπο με τον οποίο ο κώδικάς σας εκτελεί όλες τις διαδικασίες της εφαρμογής που αναλύθηκε παραπάνω, καθώς και τα πιθανά στοιχεία (interrupts, PWMs κτλ.), που επιλέξατε και χρησιμοποιήσατε.

*** Σημείωση: Παραδίδετε ένα συνολικό αρχείο με τον κώδικα, τα αναλυτικά σχόλια για τις εντολές που χρησιμοποιήσατε, το διάγραμμα και την περιγραφή ΑΝΑ ΟΜΑΔΑ (μόνο ο ένας εκ των δυο της ομάδας κάνει υποβολή).

*** ΑΝΑΓΡΑΦΕΤΕ **ΑΠΑΡΑΙΤΗΤΩΣ τα ονόματα και ΑΜ των μελών της ομάδας** εντός του αρχείου που παραδίδετε.

*** Το όνομα του αρχείου να είναι: AM1_AM2_EA4.docx

Βιβλιογραφία - Αναφορές

1 Microchip, Επίσημη ιστοσελίδα:
https://www.microchip.com/mplab/microchip-studio

2 AVR-IoT WxHardware User Guide:
https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/AVR-IoT-Wx-Hardware-User-Guide-DS50002805C.pdf

3 ATmega4808/4809 Data Sheet:
https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/ATmega4808-09-DataSheet-DS40002173B.pdf

4 Microchip, “Advanced Software Framework (ASF)”:
https://www.microchip.com/mplab/avr-support/advanced-software-framework

5 Microchip, “MPLAB® XC Compilers”:
https://www.microchip.com/en-us/development-tools-tools-and-software/mplab-xc-compilers