



**ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΡΑΚΗΣ**

**ΤΜΗΜΑ
ΗΜ & ΜΥ**

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΣΩΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

Τελική εργασία – 2ο μέρος – 19/12/2025

Στοιχεία Φοιτητών 9 ου Εξαμήνου

Βαϊντερλής Άγγελος, 58647

Κοκορότσικου Αγνή Ιωάννα, 58767

Ξανθόπουλος Ηλίας, 58545

[GitHub Page](#)

[Timer_A HAL – Documentation | embedded-systems-design-Timer_A](#)

Επιβλέπων Καθηγητής

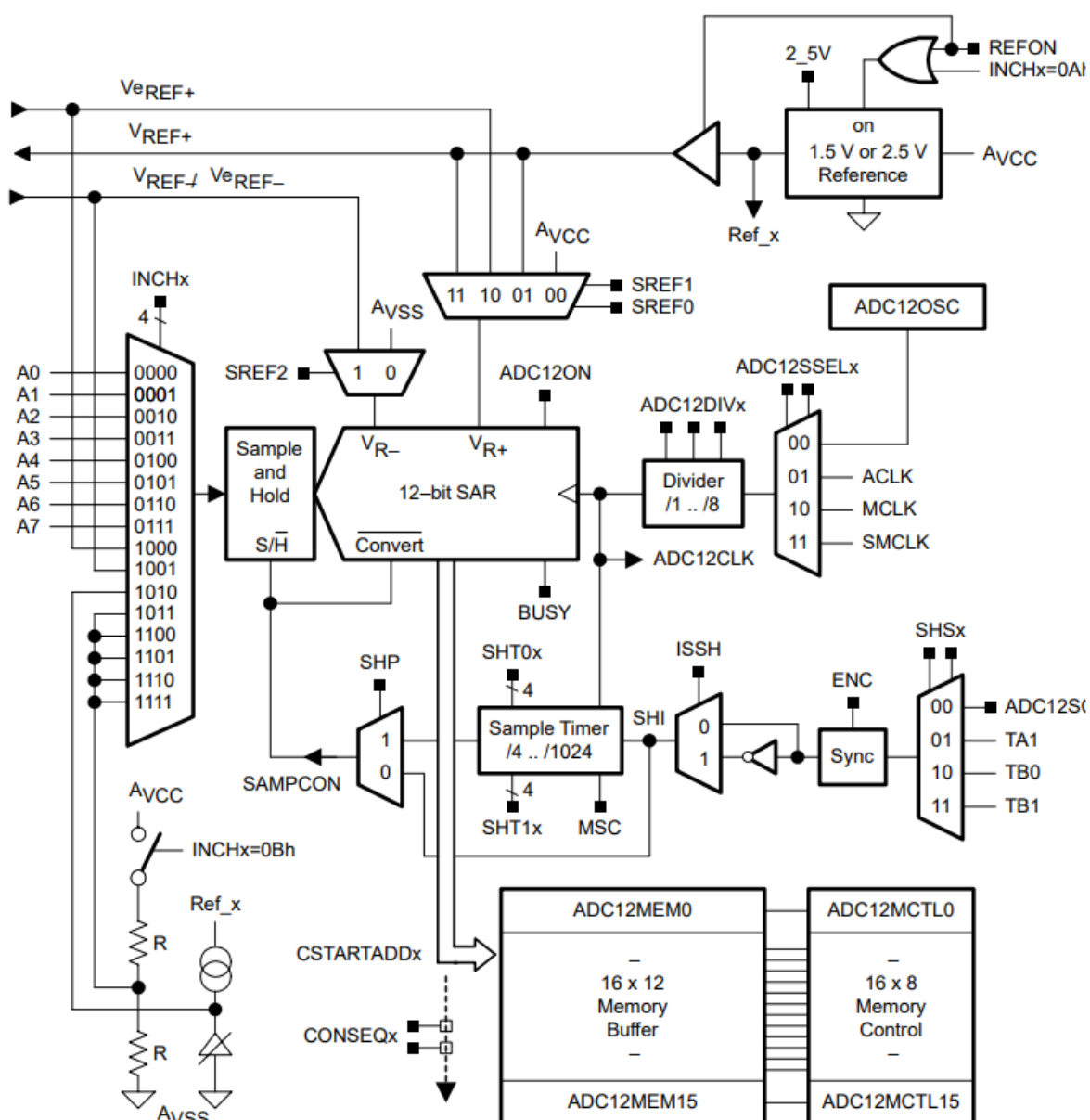
Δρ. Ιωάννης Βούρκας

Περιεχόμενα

1.	Εισαγωγή.....	3
2.	Θεωρητικό υπόβαθρο	4
2.1.	Λειτουργία και ρυθμίσεις του ADC12	4
2.2.	Λειτουργία και ρυθμίσεις του Timer A.....	4
3.	Interrupt Service Routines (ISR).....	5
3.1.	Port 1 ISR: Enable/Disable του συστήματος	5
3.2.	ADC12 ISR: Αποθήκευση του δείγματος	5
3.3.	Timer_A ISR: Έναρξη νέας μετατροπής ADC	6
4.	Υπολογισμός Συνέλιξης.....	7
5.	Βιβλιογραφία.....	9

I. Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο μικροελεγκτής MSP430 της οικογένειας x1xx, ο οποίος ενσωματώνει 12-bit αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα (ADC12) και χρονιστή Timer_A. Ο ADC12 χρησιμοποιείται για την περιοδική δειγματοληψία ενός αναλογικού σήματος στην είσοδο P6.1 (κανάλι A1), ενώ ο Timer_A αναλαμβάνει τον ρόλο μίας γεννήτριας ρολογιού δειγματοληψίας, καθορίζοντας κάθε πότε θα ξεκινάει μία νέα μετατροπή. Τα δείγματα που παράγονται τροφοδοτούν έναν διακριτό FIR φίλτρο (γραμμική συνέλιξη), το οποίο υλοποιείται στον πυρήνα του MSP430.



Εικόνα 1 – (MSP430x1xx User's Guide, p. 17.3)

2. Θεωρητικό υπόβαθρο

2.1. Λειτουργία και ρυθμίσεις του ADC12

Ο ADC12 είναι μετατροπέας 12-bit τύπου successive approximation (SAR). Για κάθε μετατροπή, το σήμα δειγματοληπτείται πρώτα σε έναν πυκνωτή sample-and-hold και στη συνέχεια συγκρίνεται διαδοχικά με επιλεγμένα επίπεδα αναφοράς, ώστε να παραχθεί ένας 12-bit ψηφιακός κωδικός. (MSP430x1xx User's Guide, p. 17.2)

Στην εφαρμογή χρησιμοποιείται ως θετική και αρνητική αναφορά η τροφοδοσία του μικροελεγκτή, κάτι που υλοποιείται με τη ρύθμιση SREF_0 στο register ADC12MCTL1. Έτσι, για τροφοδοσία $V_{dd} \cong 3.3V$, η είσοδος κβαντίζεται στο διάστημα $[0, 3.3 V]$.

Η επιλογή καναλιού εισόδου γίνεται επίσης μέσω του ADC12MCTL1, όπου τίθεται INCH_1, δηλώνοντας ότι η μετατροπή αφορά το κανάλι A1 (P6.1). Παράλληλα, με τη ρύθμιση CSTARTADD_1 στο ADC12CTL1 ορίζεται ότι τα αποτελέσματα των μετατροπών θα αποθηκεύονται στο ADC12MEM1. (MSP430x1xx User's Guide, pp. 17.20-17.23)

Η παραμετροποίηση του ADC12 γίνεται στους καταχωρητές ADC12CTL0 και ADC12CTL1:

1. Register: ADC12CTL0:

- ADC12ON: ενεργοποίηση της μονάδας ADC.
- SHT0_4: επιλογή χρόνου δειγματοληψίας για τα κανάλια ADC12MEM0–7. Στη συγκεκριμένη ρύθμιση αντιστοιχούν 64 κύκλοι του ρολογιού ADC12CLK.

2. Register: ADC12CTL1:

- ADC12SSEL_2: επιλογή ρολογιού μετατροπής από το MCLK.
- ADC12DIV_3: διαίρεση του MCLK δια 4 πριν τροφοδοτηθεί ο ADC ($ADC12CLK = MCLK/4$).
- CONSEQ_0: λειτουργία single-channel, single-conversion, δηλαδή κάθε φορά εκτελείται μία μόνο μετατροπή σε ένα κανάλι.
- SHS_0: η μετατροπή ξεκινά με software, μέσω του bit ADC12SC.
- SHP: ενεργοποίηση του εσωτερικού sample timer, ώστε ο ADC να φροντίζει αυτόματα για τον χρόνο δειγματοληψίας.

2.2. Λειτουργία και ρυθμίσεις του Timer A

Ο Timer_A είναι ένας 16-bit μετρητής που μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορα modes. Στο συγκεκριμένο project χρησιμοποιείται σε up mode, με πηγή ρολογιού τον ACLK:

- TASSEL_1: επιλογή ρολογιού ACLK.
- MC_1: λειτουργία up mode, όπου ο μετρητής αυξάνει από 0 έως TACCR0 και στη συνέχεια επανεκκινεί.

Με κατάλληλη τιμή στο TACCR0 καθορίζεται η περίοδος δειγματοληψίας. Για παράδειγμα, με $ACLK \cong 32.768Hz$ και $TACCR0 = 500$, η συχνότητα των Timer_A interrupts είναι περίπου 65 Hz. Σε κάθε interrupt του Timer_A εκτελείται η αντίστοιχη ISR, στην οποία τίθεται το bit ADC12SC στο ADC12CTL0. (MSP430x1xx User's Guide, pp. 11.2-11.3)

3. Interrupt Service Routines (ISR)

Ο μικροελεγκτής MSP430 υποστηρίζει μηχανισμό διακοπών (interrupts), μέσω του οποίου περιφερειακά όπως οι timers, μονάδες ADC ή γραμμές εισόδου/εξόδου μπορούν να διακόψουν την «κανονική» ροή εκτέλεσης της CPU και να καλέσουν ειδικές ρουτίνες εξυπηρέτησης διακοπών (ISR). Για την συγκεκριμένη άσκηση χρησιμοποιήθηκαν 3 διαφορετικές ρουτίνες, οι οποίες αναλύονται παρακάτω. (MSP430x1xx User's Guide, pp. 17.18-17.19)

3.1. Port 1 ISR: Enable/Disable του συστήματος

Το Pin 0 του Port 1 χρησιμοποιείται ως είσοδος “Enable”, με ενεργοποίηση διακοπής από το Low σε High. Η αντίστοιχη ISR καλείται κάθε φορά που ανιχνεύεται ένα τέτοιο γεγονός (π.χ. πάτημα κουμπιού). Στο εσωτερικό της:

- Γίνεται toggle της μεταβλητής `system_enabled`.
- Ανάλογα με τη νέα κατάσταση, ενημερώνεται και η έξοδος LED στην P1.7 (ON όταν το σύστημα είναι Enabled, OFF όταν είναι Disabled), παρέχοντας οπτική ένδειξη στον χρήστη.
- Τέλος, το flag `P1IFG` καθαρίζεται, ώστε να μη δημιουργείται συνεχώς η ίδια διακοπή.

3.2. ADC12 ISR: Αποθήκευση του δείγματος

Η μονάδα ADC12 διαθέτει πολλαπλές πηγές διακοπών, οι οποίες ομαδοποιούνται σε έναν ενιαίο interrupt vector `ADC12_VECTOR`. Στην εργασία αυτή, χρησιμοποιείται μόνο η σημαία `ADC12IFG1`, η οποία τίθεται όταν ολοκληρωθεί η μετατροπή και γραφτεί αποτέλεσμα στο `ADC12MEM1`. Με την ενεργοποίηση του `ADC12IE` για το αντίστοιχο κανάλι, κάθε ολοκληρωμένη μετατροπή προκαλεί κλήση της ISR `ADC12_ISR`.

Μέσα στην ISR:

- Διαβάζεται το αποτέλεσμα από το `ADC12MEM1`.
- Αν το σύστημα είναι ενεργό (`system_enabled == true`), η τιμή μετατρέπεται σε `float` και αποθηκεύεται στη θέση `signal_buffer[write_index]` του κυκλικού buffer.
- Αυξάνονται οι μεταβλητές `write_index` και `num_samples`, με wrap-around όταν ο buffer γεμίσει, ώστε να διατηρείται πάντα το τελευταίο παράθυρο δειγμάτων σταθερού μήκους.
- Τίθεται η σημαία `adc_new_sample = true`, ώστε το main loop να γνωρίζει ότι υπάρχει νέο δείγμα προς επεξεργασία.
- Τέλος, καλείται η intrinsic `__low_power_mode_off_on_exit()`, η οποία φροντίζει ώστε, κατά την έξοδο από το interrupt, η CPU να «ξυπνήσει» από τη LPM0 και να συνεχίσει την εκτέλεση στο main (εκεί όπου θα πραγματοποιηθεί η συνέλιξη).

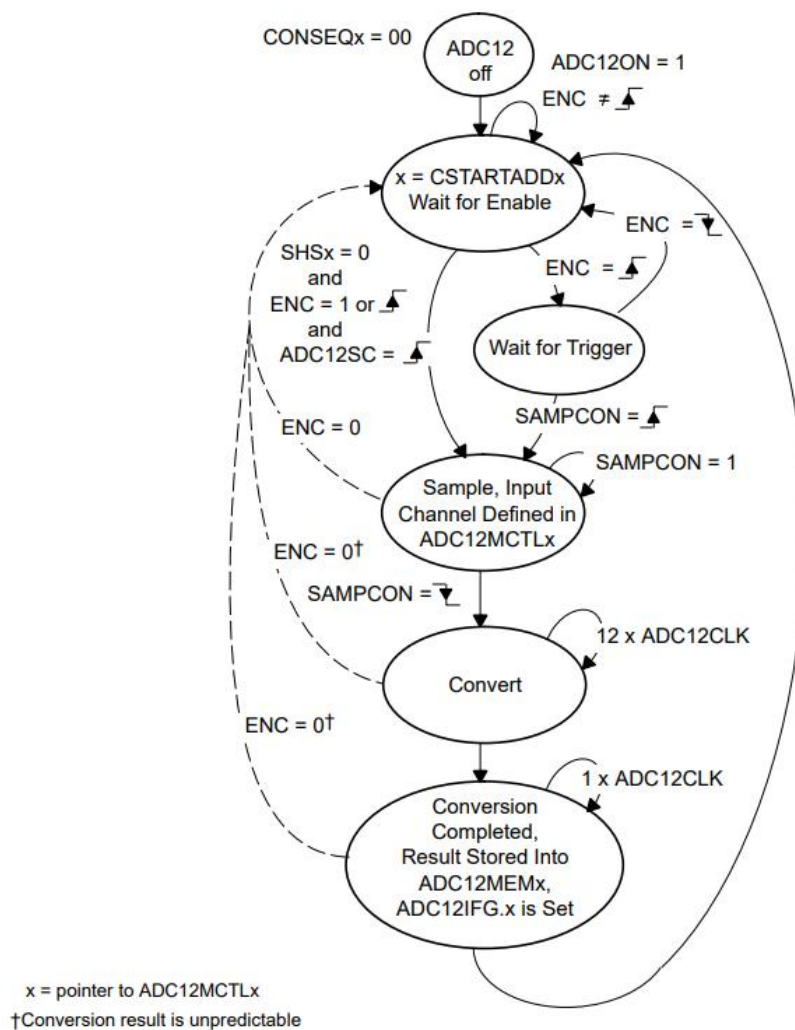
3.3. Timer_A ISR: Έναρξη νέας μετατροπής ADC

Ο Timer_A είναι ρυθμισμένος σε up mode με πηγή ρολογιού τον ACLK, ώστε να παράγει περιοδικά interrupts με περίοδο που ορίζεται από την τιμή του TACCR0. Η ISR του Timer εκτελείται κάθε φορά που συμπληρώνεται η περίοδος του Timer. Μέσα σε αυτή τη ρουτίνα, εφόσον η μεταβλητή κατάστασης system_enabled είναι true, τίθεται το bit ADC12SC στο ADC12CTL0. Με τον τρόπο αυτό ξεκινά μία νέα μετατροπή στον ADC12. (MSP430x1xx User's Guide, p. 17.10)

Άρα, η ISR του Timer_A λειτουργεί ως ένα ρολόι δειγματοληψίας του συστήματος: καθορίζει κάθε πότε θα ζητηθεί νέα μέτρηση από τον ADC, χωρίς η κύρια ροή του προγράμματος (main loop) να χρειάζεται να ασχολείται με χρονομέτρηση.

4. Υπολογισμός Συνέλιξης

Στο κύριο βρόχο υλοποιείται η ακολουθία “νέο δείγμα → επεξεργασία → αναμονή”. Αρχικά, απενεργοποιούνται τα interrupts, ώστε κατά τη διάρκεια της αριθμητικής επεξεργασίας να μην προκύψει νέα διακοπή από τον ADC και να μην αλλοιωθεί ο κυκλικός buffer. Στη συνέχεια ελέγχεται η συνθήκη `system_enabled && adc_new_sample`. Δηλαδή, το σύστημα πρέπει να είναι ενεργό και να έχει φτάσει νέο δείγμα. Αν η συνθήκη ισχύει, το flag `adc_new_sample` μηδενίζεται, ο κυκλικός buffer ξετυλίγεται σε γραμμικό πίνακα `signal_linear[]` με σωστή χρονολογική σειρά και καλείται η συνάρτηση `convolve()`, η οποία υπολογίζει τη γραμμική συνέλιξη `signal-kernel` και αποθηκεύει το αποτέλεσμα στον πίνακα `result[]`. Αφού ολοκληρωθεί η επεξεργασία, τα interrupts ενεργοποιούνται ξανά, ώστε να μπορούν να εξυπηρετηθούν οι επόμενες μετατροπές, και η CPU επιστρέφει σε χαμηλή κατανάλωση (LPM0), περιμένοντας την επόμενη διακοπή από τον ADC για να ξεκινήσει ο ίδιος κύκλος από την αρχή.



Εικόνα 2 – (MSP430x1xx User's Guide, p. 17.11)

Σημειώνεται ότι για να μην χαθούν interrupt requests, η περίοδος δειγματοληψίας πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τον χρόνο όπου τα interrupts είναι απενεργοποιημένα μέσα στη while, δηλαδή πρέπει $T_{sampling} > T_{disable}$. Για την μέτρηση του $T_{disable}$ χρησιμοποιήθηκε ο register CCTIMER1 σύμφωνα με τον οποίο, για SIGNAL_LEN = 16, χρειάστηκαν 26533 steps. Άρα για συχνότητα ρολογιού 800kHz έχουμε $T_{disabled} = 33.2ms$. Άρα πρέπει:

$$f_{sampling} < f_{disable} = \frac{1}{33.2ms} = 30.15Hz$$

Expression	Value	Location	Type
signal_b...	<array>	Memory:0x1100	float[16]
[0]	1.0	Memory:0x1100	float
[1]	2.0	Memory:0x1104	float
[2]	3.0	Memory:0x1108	float
[3]	4.0	Memory:0x110C	float
[4]	5.0	Memory:0x1110	float
[5]	6.0	Memory:0x1114	float
[6]	7.0	Memory:0x1118	float
[7]	8.0	Memory:0x111C	float
[8]	9.0	Memory:0x1120	float
[9]	16.0	Memory:0x1124	float
[10]	1.0	Memory:0x1128	float
[11]	2.0	Memory:0x112C	float
[12]	4.0	Memory:0x1130	float
[13]	3.0	Memory:0x1134	float
[14]	6.0	Memory:0x1138	float
[15]	7.0	Memory:0x113C	float
signal_i...	<array>	Memory:0x1142	float[16]
[0]	1.0	Memory:0x1142	float
[1]	2.0	Memory:0x1146	float
[2]	3.0	Memory:0x114A	float
[3]	4.0	Memory:0x114E	float
[4]	5.0	Memory:0x1152	float
[5]	6.0	Memory:0x1156	float
[6]	7.0	Memory:0x115A	float
[7]	8.0	Memory:0x115E	float
[8]	9.0	Memory:0x1162	float
[9]	16.0	Memory:0x1166	float
[10]	1.0	Memory:0x116A	float
[11]	2.0	Memory:0x116E	float
[12]	4.0	Memory:0x1172	float
[13]	3.0	Memory:0x1176	float
[14]	6.0	Memory:0x117A	float
[15]	7.0	Memory:0x117E	float

result	<array>	Memory:0x1182	float[20]
[0]	2.000000...	Memory:0x1182	float
[1]	6.000000...	Memory:0x1186	float
[2]	1.20000004	Memory:0x118A	float
[3]	2.0	Memory:0x118E	float
[4]	3.0	Memory:0x1192	float
[5]	4.0	Memory:0x1196	float
[6]	5.0	Memory:0x119A	float
[7]	6.0	Memory:0x119E	float
[8]	7.0	Memory:0x11A2	float
[9]	9.19999991	Memory:0x11A6	float
[10]	8.19999991	Memory:0x11AA	float
[11]	7.20000028	Memory:0x11AE	float
[12]	6.40000009	Memory:0x11B2	float
[13]	5.20000028	Memory:0x11B6	float
[14]	3.20000004	Memory:0x11BA	float
[15]	4.40000009	Memory:0x11BE	float
[16]	4.0	Memory:0x11C2	float
[17]	3.20000004	Memory:0x11C6	float
[18]	2.59999999	Memory:0x11CA	float
[19]	1.39999997	Memory:0x11CE	float
system...	1	Memory:0x11D2	bool
adc_new...	0	Memory:0x11D3	bool
write_ind...	0	Memory:0x1140	unsigned int
TACTL	274	Memory:0x1160	unsigned short

Εικόνα 3 – Στιγμιότυπο των αποτελεσμάτων εκτέλεσης της συνέλιξης

5. Βιβλιογραφία

[1] Instruments, T. (2003). *MSP430x1xx User's Guide*. Dallas, TX: Instruments, Texas.