



**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**  
**ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**«ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ**  
**ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ»**

**Της φοιτήτριας**  
**Τεμενούγκα Άννα**  
**Αρ. Μητρώου: 517134**

**Επιβλέπων**  
**Βάσιος Βασίλειος**  
**Βαθμίδα: Ακαδημαϊκός**  
**Υπότροφος**

**ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2023**

Τίτλος Δ.Ε. ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ

Κωδικός Δ.Ε. 23113

Όνομα φοιτήτριας: Τεμενούγκα Άννα

Ονοματεπώνυμο εισηγητή: Βάσιος Βασίλειος

Ημερομηνία ανάληψης Δ.Ε. 21/02/2023

Ημερομηνία περάτωσης Δ.Ε.

*Βεβαιώνω ότι είμαι ο συγγραφέας αυτής της εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, έχω καταγράψει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών, εικόνων και κειμένου, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επιπλέον, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά ως διπλωματική εργασία, στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του ΔΙ.ΠΑ.Ε. Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία της φοιτήτριας Τεμενούγκας Άννας που την εκπόνησε/αν. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης, ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο Διεθνές Πανεπιστήμιο της Ελλάδος άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσης της εργασίας διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο της εργασίας, δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού, ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, πώληση, εμπορική χρήση, διανομή, έκδοση, μεταφόρτωση (downloading), ανάρτηση (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής και Ηλεκτρονικών Συστημάτων του Διεθνούς Πανεπιστημίου της Ελλάδος, δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα, εκ μέρους του Τμήματος.*

## Περιεχόμενα

Περίληψη.....	4
Abstract .....	4
Κεφάλαιο 1 .....	5
1.1 Μικροελεγκτής .....	5
1.2 Arduino Uno .....	6
1.2.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα.....	7
1.2.2 Αρχιτεκτονική .....	7
Κεφάλαιο 2 .....	10
2.1 Γεννήτρια Συχνοτήτων.....	10
2.2 Χρησιμότητα για έναν ηλεκτρονικό μηχανικό.....	11
2.3 Ειδη σημάτων .....	13
2.4 Direct Digital Synthesis (DDS) .....	15
2.4.1 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου DDS περιλαμβάνουν: .....	15
2.4.2 Χρησιμότητα:.....	18
2.4.3 Αρχιτεκτονική της DDS .....	19
2.4.4 Αλλοίωση σε συστήματα DDS.....	23
2.4.5 DDS σύστημα ως ADC ρυθμιστές ρολογιού .....	24
2.4.6 Διαμόρφωση πλάτους σε σύστημα DDS.....	25
2.4.7 Σπυριώδεις εκτιμήσεις ελεύθερης δυναμικής περιοχής σε συστήματα DDS .....	26
Κεφάλαιο 3 .....	29
3.1 Η πρακτική εφαρμογή της DDS στο κύκλωμα.....	29
3.2 Ο Συσσωρευτής (Accumulator) και Το Βήμα Αύξησης στην Μέθοδο DDS.....	29
3.3 Πίνακας περιόδου (Lookur Table).....	31
3.4 Ο Ρολόι Αναφοράς στη Μέθοδο DDS για τη Δημιουργία Αναλογικών Κυματομορφών ..	32
3.5 Ο Ψηφιακός-Αναλογικός Μετατροπέας (PWM) αποτελεί ζωτικό στοιχείο στη μέθοδο DDS (Direct Digital Synthesis).....	34
3.6 Το κύκλωμα.....	36
Βιβλιογραφία.....	41
Παράρτημα.....	42

## Περίληψη

Στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας γίνεται η σχεδίαση και υλοποίηση μιας γεννήτριας συχνοτήτων που συνδέεται με το προγραμματιζόμενο κύκλωμα Arduino, η οποία παράγει σήματα όπως ημίτονο, συνημίτονο, τετραγωνικό παλμό και τριγωνικό σήμα. Επίσης δίνεται δυνατότητα ρύθμισης της συχνότητας του πλάτους και του τρόπου λειτουργίας από τον χρήστη.

Στο πλαίσιο της κατασκευής χρειάστηκε να μελετηθεί μια γεννήτρια συχνοτήτων. Η επίτευξη της πραγματοποιήθηκε με τον Μικροελεγκτή Arduino Uno και την μέθοδο DDS(Direct Digital Synthesis) για την δημιουργία ημιτόνου. Η έξοδος αποτυπώνεται με την τεχνική της Pulse Width Modulation (PWM) στον παλμογράφο, όμως ακολουθώντας αυτήν την τεχνική χρειάστηκε να προσθεθεί στο κύκλωμα ένα low pass φίλτρο Chebyshev. Η προσθήκη αυτή επέφερε την ομαλή αποτύπωση του ημιτόνου στον παλμο Chebyshev ογραφο

## Abstract

As part of this thesis, a function generator connected to the Arduino programmable circuit is designed and implemented, which produces signals such as sine, cosine, square pulse and triangular signal. It is also possible to adjust the frequency of the width and the mode of operation by the user.

As part of the construction, a frequency generator had to be studied. It was achieved with the Arduino Uno Microcontroller and the DDS (Direct Digital Synthesis) method to create a sine wave. The output is recorded with the Pulse Width Modulation (PWM) technique on the oscilloscope, but following this technique it was necessary to add a Chebyshev low pass filter to the circuit. This addition resulted in the smooth recording of the sine in the palm Chebyshev graph

# Κεφάλαιο 1

## 1.1 Μικροελεγκτής

Ένας μικροελεγκτής (Microcontroller) είναι ένας μικρού μεγέθους υπολογιστής που σχεδιάστηκε για να χρησιμοποιείται ως ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου σε διάφορες εφαρμογές. Βασικά, αποτελείται από έναν μικροεπεξεργαστή, μνήμη, ψηφιακές και αναλογικές εισόδους/εξόδους και άλλα περιφερειακά, όλα συνδεδεμένα σε ένα μοναδικό ενιαίο κύκλωμα (IC).

Η κύρια λειτουργία ενός μικροελεγκτή είναι να εκτελεί κώδικα που προγραμματίζεται σε αυτόν, προσφέροντας έτσι έναν έλεγχο και λειτουργία σε διάφορες συσκευές ή συστήματα. Με τη βοήθεια των ψηφιακών εισόδων/εξόδων, μπορεί να ανιχνεύσει και να ελέγξει την κατάσταση των ψηφιακών σημάτων, ενώ οι αναλογικές εισόδου/εξόδου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μέτρηση και τον έλεγχο αναλογικών σημάτων, όπως θερμοκρασίας, φωτεινότητας, κίνησης κ.λπ.

Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές, όπως οι ενσωματωμένοι χειριστήρες, οι οικιακές συσκευές, οι αυτοκινητικοί έλεγχοι, οι κινητές συσκευές, οι ηλεκτρονικοί αισθητήρες, οι ρομποτικές εφαρμογές, τα συστήματα ασφαλείας και πολλά άλλα. Η κομψότητα τους και η ικανότητα προγραμματισμού τους κάνει εξαιρετικά δημοφιλείς σε πολλούς τομείς της τεχνολογίας.

Παραδείγματα μικροελεγκτών περιλαμβάνουν:

Arduino Uno: Ο Arduino Uno είναι ένας από τους πιο δημοφιλείς μικροελεγκτές στην κοινότητα του Arduino. Βασίζεται στον μικροεπεξεργαστή ATmega328P της Microchip και παρέχει διάφορες ψηφιακές και αναλογικές εισόδους/εξόδους.

Raspberry Pi: Το Raspberry Pi είναι ένας μικροελεγκτής που βασίζεται σε έναν πυρήνα ARM και χρησιμοποιείται για πολλές εφαρμογές, όχι μόνο ως μικροελεγκτής αλλά και ως ένας μικρός υπολογιστής.

ESP8266 και ESP32: Οι μικροελεγκτές ESP8266 και ESP32 της Espressif Systems είναι δημοφιλείς για τις ασύρματες δυνατότητές τους, καθιστώντας τους ιδανικούς για τις εφαρμογές διασύνδεσης και IoT.

Οι μικροελεγκτές βρίσκονται στην καθημερινή μας ζωή και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές για τον έλεγχο και την αυτοματοποίηση διαφόρων συσκευών και συστημάτων. Ας δούμε μερικά παραδείγματα:

- Έξυπνα σπίτια (Smart Homes): Οι μικροελεγκτές χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο των φώτων, του θερμοστάτη, του συστήματος ασφαλείας και άλλων συσκευών σε έξυπνα σπίτια. Μπορείτε να προγραμματίσετε τον μικροελεγκτή σας για να ενεργοποιεί τον κλιματισμό λίγο πριν φτάσετε στο σπίτι ή για να ανοίγει αυτόματα τα φώτα όταν εισέρχεστε σε ένα δωμάτιο.

- Ηλεκτρικές συσκευές: Πολλές ηλεκτρικές συσκευές, όπως πλυντήρια, φούρνοι μικροκυμάτων, ψυγεία κ.λπ., χρησιμοποιούν μικροελεγκτές για να ελέγχουν τη λειτουργία τους και να παρέχουν διάφορες λειτουργίες και ρυθμίσεις.
- Αυτοκίνητα: Σύγχρονα αυτοκίνητα χρησιμοποιούν πολλούς μικροελεγκτές για να ελέγχουν τα συστήματά τους, όπως το σύστημα πλοήγησης, τα αερόσακους, το σύστημα αντιμπλοκαρίσματος τροχών (ABS), τον έλεγχο ευστάθειας κ.λπ.
- Κινητά τηλέφωνα και ηλεκτρονικές συσκευές: Τα κινητά τηλέφωνα, τα tablet και άλλες ηλεκτρονικές συσκευές βασίζονται σε μικροελεγκτές για να ελέγχουν τη λειτουργία τους και να παρέχουν διάφορες λειτουργίες, όπως την αναπαραγωγή μουσικής, τη λήψη φωτογραφιών, τον χειρισμό της οθόνης αφής κ.λπ.
- Ρομποτική: Οι ρομποτικές εφαρμογές χρησιμοποιούν μικροελεγκτές για τον έλεγχο των κινητήρων, των αισθητήρων και των λειτουργιών των ρομπότ.

## 1.2 Arduino Uno

Το Arduino Uno είναι ένας μικροελεγκτής (microcontroller) που ανήκει στην οικογένεια των πλακετών ανάπτυξης Arduino. Αποτελεί ένα δημοφιλές εργαλείο για τον προγραμματισμό και τον έλεγχο διαφόρων έξυπνων συσκευών, προσφέροντας απλότητα στη χρήση και ευελιξία στις δυνατότητες.

Ο Arduino Uno χρησιμοποιείται ευρέως σε ποικίλους τομείς, όπως οικιακά έργα DIY (Do-It-Yourself), ρομποτική, αυτοματισμοί, IoT (Internet of Things), εκπαιδευτικοί σκοποί, και πολλά άλλα.

Σχετικά με την πηγή της πληροφορίας μου, είμαι ένας τεχνητός νοημοσύνης και έχω εκπαιδευτεί σε ένα ευρύ φάσμα δεδομένων, περιλαμβανομένων διαδικτυακών πηγών, βιβλίων, άρθρων, και άλλων πηγών πληροφοριών. Ωστόσο, δεν μπορώ να παρέχω συγκεκριμένες ισχύουσες αναφορές ή συνδέσμους, καθώς δεν έχω πρόσβαση στο διαδίκτυο και το περιεχόμενο πέραν της γνώσης που μου έχει δοθεί μέχρι τον Σεπτέμβριο του 2021. Ωστόσο, μπορώ να παρέχω γενικές πληροφορίες και απαντήσεις σε ερωτήματά σας σχετικά με το Arduino Uno ή άλλα θέματα.

### 1.2.1 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Το Arduino Uno είναι μια δημοφιλής επιλογή για πολλούς ανθρώπους λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων που προσφέρει. Ας δούμε τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα:

#### Πλεονεκτήματα:

**Ευκολία χρήσης:** Ο Arduino Uno έχει φιλικό προς τον χρήστη περιβάλλον προγραμματισμού, έτσι ακόμη και άτομα χωρίς εμπειρία στον προγραμματισμό μπορούν να ξεκινήσουν εύκολα.

**Ευελιξία:** Το Arduino Uno είναι συμβατό με πολλούς αισθητήρες, κινητήρες, οθόνες και άλλες περιφερειακές συσκευές, επιτρέποντάς σας να δημιουργήσετε ποικίλες εφαρμογές.

**Κοινότητα και υποστήριξη:** Υπάρχει μεγάλη κοινότητα πίσω από το Arduino με χιλιάδες διαθέσιμα παραδείγματα κώδικα, βιβλιοθήκες και ένα εκτεταμένο φόρουμ όπου μπορείτε να βρείτε υποστήριξη.

**Χαμηλό κόστος:** Σε σύγκριση με άλλους μικροελεγκτές, το Arduino Uno είναι πολύ οικονομικό.

#### Μειονεκτήματα:

Περιορισμένη επεξεργαστική ισχύς: Το Arduino Uno διαθέτει έναν μικρό μικροελεγκτή με περιορισμένη επεξεργαστική ισχύ σε σύγκριση με πιο προηγμένους μικροελεγκτές.

Περιορισμένη μνήμη: Η περιορισμένη μνήμη μπορεί να περιορίσει τον αριθμό των προγραμμάτων και την πολυπλοκότητα των εφαρμογών.

Περιορισμένος αριθμός ακροδεκτών: Ο Arduino Uno διαθέτει έναν περιορισμένο αριθμό ακροδεκτών, που μπορεί να περιορίσει τις συνδέσεις περιφερειακών συσκευών.

### 1.2.2 Αρχιτεκτονική

Βασικά χαρακτηριστικά του μικροελεγκτή ATmega328P:

Ταχύτητα: Λειτουργεί σε συχνότητα μέχρι 16 MHz.

Μνήμη: Διαθέτει 32KB αυτομάτου προγράμματος (Flash) μνήμης, 2KB SRAM και 1KB EEPROM.

Ψηφιακοί ακροδέκτες: Έχει 14 ψηφιακούς ακροδέκτες (από τους οποίους 6 μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως PWM), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να συνδεθούν με διάφορα εξαρτήματα και περιφερειακά.

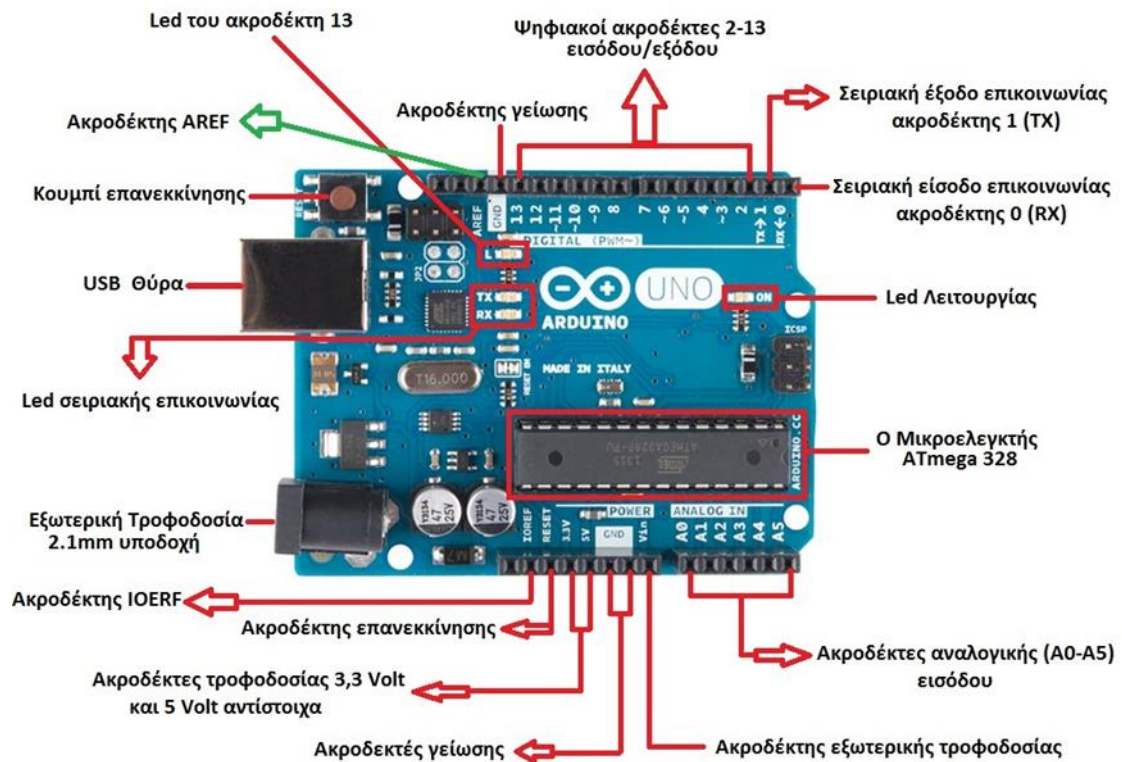
Αναλογικοί ακροδέκτες: Διαθέτει 6 αναλογικούς ακροδέκτες για την ανάγνωση αναλογικών σημάτων από αισθητήρες.

Σειριακή επικοινωνία: Υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία μέσω του υποδοχέα USB-to-Serial που περιλαμβάνεται στο Arduino Uno, καθιστώντας την επικοινωνία με υπολογιστές και άλλες συσκευές εύκολη.

Ειδικοί ακροδέκτες: Διαθέτει ακροδέκτες για τη σύνδεση εξωτερικής τροφοδοσίας, την επαναφορά (reset), και άλλες λειτουργίες.

Η αρχιτεκτονική του Arduino Uno βασίζεται στο μικροελεγκτή Atmel ATmega328P, ο οποίος αποτελεί έναν 8-bit AVR μικροελεγκτή. Ο ATmega328P είναι ο υπεύθυνος για την εκτέλεση του προγράμματος που έχει γραφτεί από τον χρήστη στο Arduino Uno. Ο ATmega328 διαθέτει ενσωματωμένη μνήμη τριών τύπων: 2Kb μνήμης SRAM που είναι η ωφέλιμη μνήμη που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα προγράμματά για να αποθηκεύουν μεταβλητές, πίνακες κ.λπ. κατά το runtime. Όπως και σε έναν υπολογιστή, αυτή η μνήμη χάνει τα δεδομένα της όταν η παροχή ρεύματος στο Arduino σταματήσει ή αν γίνει reset. Περιέχει 1Kb μνήμης EEPROM η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εγγραφή/ανάγνωση δεδομένων (χωρίς datatype) ανά byte από τα προγράμματά κατά το runtime. Σε αντίθεση με την SRAM, η EEPROM δεν χάνει τα περιεχόμενά της με απώλεια τροφοδοσίας ή reset.

Επίσης περιέχει 32Kb μνήμης Flash, από τα οποία τα 2Kb χρησιμοποιούνται από το firmware του Arduino που έχει εγκαταστήσει ήδη ο κατασκευαστής του. Το firmware αυτό που στην ορολογία του Arduino ονομάζεται bootloader είναι αναγκαίο για την εγκατάσταση των προγραμμάτων στον μικροελεγκτή μέσω της θύρας USB, χωρίς δηλαδή να χρειάζεται εξωτερικός hardware programmer. Τα υπόλοιπα 30Kb της μνήμης Flash χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αυτών ακριβώς των προγραμμάτων, αφού πρώτα μεταγλωττιστούν στον υπολογιστή. Η μνήμη Flash, όπως και η EEPROM δεν χάνει τα περιεχόμενά της με απώλεια τροφοδοσίας ή reset. Επίσης, ενώ η μνήμη Flash υπό κανονικές συνθήκες δεν προορίζεται για χρήση runtime μέσα από τα προγράμματά, λόγω της μικρής συνολικής μνήμης που είναι διαθέσιμη σε αυτά (2Kb SRAM + 1Kb EEPROM), έχει σχεδιαστεί μια βιβλιοθήκη που επιτρέπει την χρήση όσου χώρου περισσεύει (30Kb μείον το μέγεθος του προγράμματός σε μεταγλωττισμένη μορφή).



Εικόνα 1.1 : Arduino Uno αρχιτεκτονική.

Το περιβάλλον προγραμματισμού για το Arduino Uno ονομάζεται Arduino IDE (Integrated Development Environment), πρόκειται για ένα πρόγραμμα λογισμικού που επιτρέπει στους χρήστες να γράφουν, φορτώνουν και εκτελούν τον κώδικά τους στο Arduino Uno.

Το Arduino IDE προσφέρει ένα φιλικό περιβάλλον για τον προγραμματισμό του Arduino με μια απλή και ευανάγνωστη γλώσσα προγραμματισμού, η οποία βασίζεται κυρίως σε C και C++. Το περιβάλλον προσφέρει πλούσιο σύνολο εργαλείων για τη δημιουργία, επεξεργασία και αναπτυξιακό στάδιο του κώδικα.

## Κεφάλαιο 2

### 2.1 Γεννήτρια Συχνοτήτων

Η γεννήτρια συχνοτήτων είναι μια συσκευή ή μια εφαρμογή που δημιουργεί ηλεκτρικά σήματα ή ηχητικά κύματα σε συγκεκριμένες συχνότητες. Χρησιμοποιείται σε διάφορους τομείς, όπως η ερευνητική εργασία, η ανάλυση κυμάτων, ο έλεγχος και η δοκιμή ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, η μουσική παραγωγή, η ραδιοφωνία, και πολλοί άλλοι. Οι γεννήτριες συχνοτήτων μπορούν να παράγουν συχνότητες σε εύρος από πολύ μικρές (π.χ., χιλιοστά ή χιλιοστούς του Hertz) έως πολύ μεγάλες (π.χ., χιλιάδες ή εκατομμύρια Hertz). Οι πιο σύγχρονες γεννήτριες συχνοτήτων χρησιμοποιούν ηλεκτρονικά κυκλώματα ή προγραμματιζόμενους μικροελεγκτές για να παράγουν τις επιθυμητές συχνότητες.

Η ικανότητα να δημιουργείς συγκεκριμένες συχνότητες με ακρίβεια είναι κρίσιμη για πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, στη μουσική παραγωγή, οι γεννήτριες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για να δημιουργούν διάφορους ήχους και νότες. Στην έρευνα και την τεχνολογία, οι γεννήτριες συχνοτήτων επιτρέπουν τη μέτρηση και τον έλεγχο της συμπεριφοράς διάφορων συστημάτων υπό διάφορες συχνότητες, ενώ στη ραδιοφωνία και τις τηλεπικοινωνίες, χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση και λήψη σήματος.

Συνοψίζοντας, η γεννήτρια συχνοτήτων είναι μια χρήσιμη συσκευή που παράγει ηλεκτρικά σήματα ή ηχητικά κύματα σε συγκεκριμένες συχνότητες και χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς της επιστήμης, της τεχνολογίας και της μουσικής.



Εικόνα 2.1 (α)



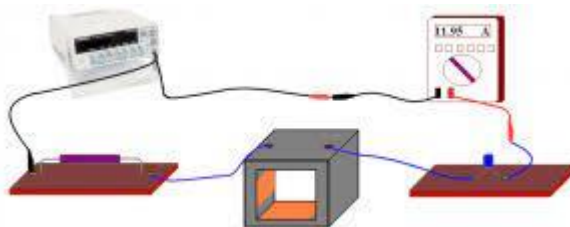
Εικόνα 2.1 (β)

Εικόνα 2.1 (α,β) : Γεννήτριες Συχνοτήτων.

## 2.2 Χρησιμότητα για έναν ηλεκτρονικό μηχανικό

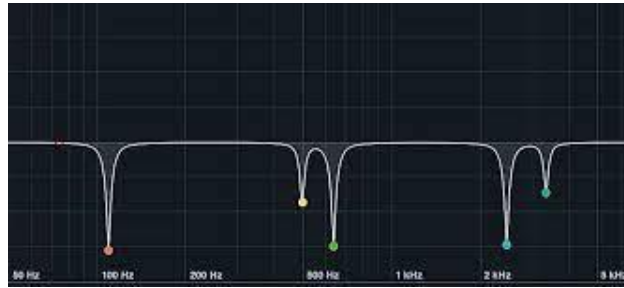
Για έναν ηλεκτρονικό μηχανικό, η γεννήτρια συχνοτήτων είναι ένα βασικό εργαλείο που του επιτρέπει να δημιουργεί και να επεξεργάζεται ηλεκτρικά σήματα σε διάφορες συχνότητες. Υπάρχουν πολλοί τομείς και εφαρμογές στους οποίους μια γεννήτρια συχνοτήτων είναι απαραίτητη για τους ηλεκτρονικούς μηχανικούς, μερικά από αυτά περιλαμβάνουν:

- Εργαστηριακές δοκιμές και μετρήσεις: Οι ηλεκτρονικοί μηχανικοί χρησιμοποιούν γεννήτριες συχνοτήτων για να δοκιμάσουν και να μετρήσουν τις αποκρίσεις διάφορων ηλεκτρονικών συστημάτων σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτό μπορεί να βοηθήσει στον έλεγχο της συμπεριφοράς κυκλωμάτων, φίλτρων, ανιχνευτών σήματος και άλλων συσκευών.
- Ερευνητικές και ανάπτυξης εφαρμογές: Στην έρευνα και την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών, οι γεννήτριες συχνοτήτων είναι απαραίτητες για τον πειραματισμό με διάφορες συχνότητες και τις επιπτώσεις τους σε ηλεκτρονικά συστήματα.
- Κυκλώματα ελέγχου και συντονισμού: Στις συσκευές ελέγχου και αυτοματισμού, οι γεννήτριες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία σημάτων που συγχρονίζουν και συντονίζουν τις δράσεις διάφορων μηχανών και διεργασιών.



Εικόνα 2.2: Κύκλωμα συντονισμού με γεννήτρι

- Ηλεκτρονική μουσική και ήχος: Στη μουσική παραγωγή και στην ηχοληψία, οι γεννήτριες συχνοτήτων είναι κρίσιμες για τη δημιουργία διαφόρων ήχων, κλίματος και μουσικών εφέ.



Εικόνα 2.3 : Οι μουσικές νότες που αποτυπώνονται σε συχνότητες

- Τηλεπικοινωνίες: Στις τηλεπικοινωνίες, οι γεννήτριες συχνοτήτων χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των σημάτων φέροντος που μεταφέρουν τα δεδομένα στα κινητά τηλέφωνα, τους ραδιοφωνικούς σταθμούς και άλλες τηλεπικοινωνιακές συσκευές.



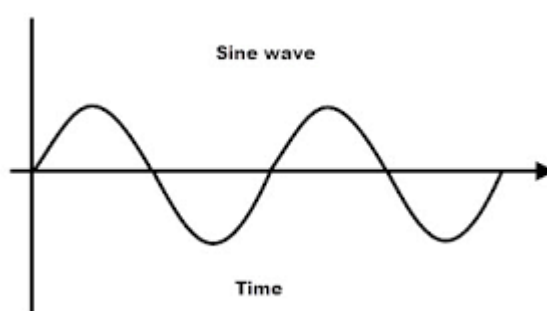
Εικόνα 2.4: Συχνότητες στις τηλεπικοινωνίες

Συνοψίζοντας, η γεννήτρια συχνοτήτων είναι κρίσιμη για τον ηλεκτρονικό μηχανικό γιατί του επιτρέπει να προσομοιώνει και να επεξεργάζεται σήματα σε διάφορες συχνότητες, να εκτελεί δοκιμές και μετρήσεις, να εξερευνά νέες τεχνολογίες και να επιτυγχάνει συγχρονισμό και συντονισμό σε διάφορα ηλεκτρονικά συστήματα. Χωρίς την γεννήτρια συχνοτήτων, η εργασία σε πολλούς από τους ανωτέρω τομείς θα ήταν πολύ δυσκολότερη ή αδύνατη.

## 2.3 Ειδη σημάτων

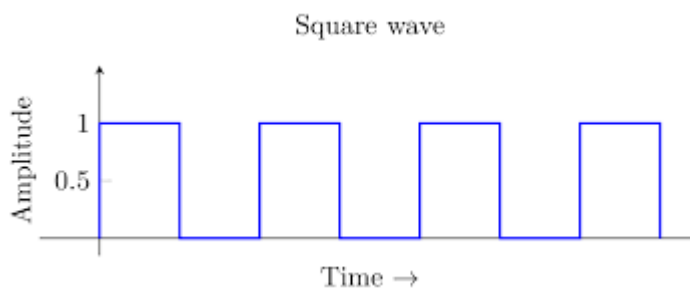
Μια γεννήτρια συχνοτήτων μπορεί να παράγει διάφορα είδη σημάτων σε διαφορετικές συχνότητες. Αυτό εξαρτάται από τον τύπο της γεννήτριας και τις δυνατότητες της. Ορισμένα από τα σήματα που μπορεί να παράγει μια γεννήτρια συχνοτήτων περιλαμβάνουν:

Σήματα ημιτόνου (sine wave): Τα σήματα ημιτόνου είναι ομαλά κύματα που ακολουθούν τη μορφή μιας ημιτονοειδούς καμπύλης. Αυτό το είδος σήματος είναι πολύ συχνό στην ηλεκτρονική και χρησιμοποιείται για δοκιμές κυκλωμάτων και μουσική παραγωγή.



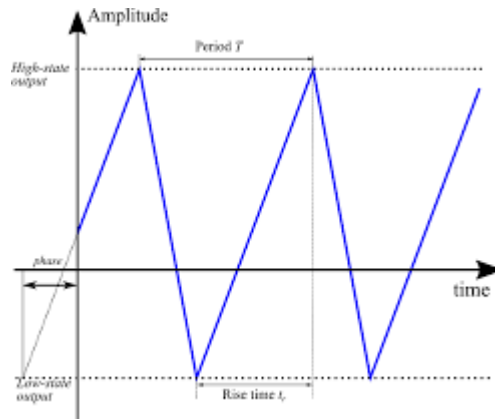
Εικόνα 2.5 : Ημίτονο

Τετραγωνικά σήματα (square wave): Τα τετραγωνικά σήματα είναι κύματα που αλλάζουν από την υψηλή τάση στη χαμηλή τάση σε συγκεκριμένες συχνότητες. Αυτό το είδος σήματος είναι συνηθισμένο στην ψηφιακή τεχνολογία και τις εφαρμογές του διαμορφωτή.



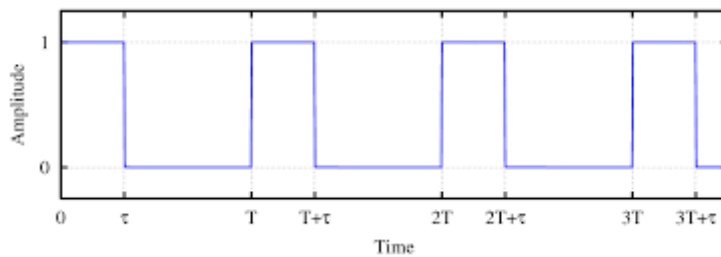
Εικόνα 2. 6: Τετραγωνικό σήμα

Τριγωνικά σήματα (triangle wave): Τα τριγωνικά σήματα είναι κύματα που αλλάζουν καταλλήλως την τάση από τη μέγιστη στην ελάχιστη τιμή με τριγωνικό σχήμα. Χρησιμοποιούνται σε μουσική παραγωγή και δοκιμές φίλτρων.



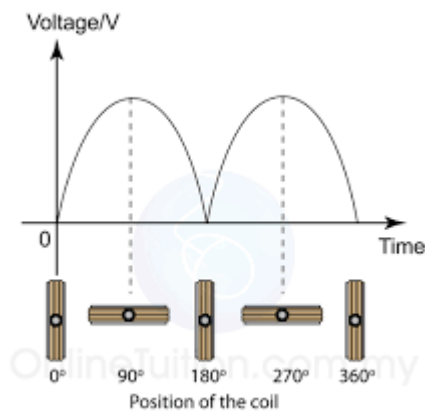
Εικόνα 2.7: Τριγωνικό σήμα.

Παλμικά σήματα (pulse wave): Τα παλμικά σήματα είναι συνδυασμοί τετραγωνικών και τριγωνικών κυμάτων και χρησιμοποιούνται συχνά σε μουσική παραγωγή.



Εικόνα 2.8: Παλμικό σήμα

Καθαρή τάση DC (direct current): Ορισμένες γεννήτριες μπορούν να παράγουν καθαρή τάση DC, που είναι μόνιμη και δεν αλλάζει με τον χρόνο.



Εικόνα 2.9:Καθαρή τάση

Αυτά είναι μόνο μερικά από τα διάφορα σήματα που μπορεί να παράγει μια γεννήτρια συχνοτήτων. Κάθε γεννήτρια έχει τις δικές της δυνατότητες και παραμέτρους, οπότε μπορεί να παράγει και άλλα είδη σημάτων, ανάλογα με τις προδιαγραφές της.

## 2.4 Direct Digital Synthesis (DDS)

Η μέθοδος DDS (Direct Digital Synthesis) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ακριβών αριθμών κυματομορφών μέσω ψηφιακής επεξεργασίας σήματος. Αντί να χρησιμοποιεί αναλογικά κυκλώματα ή εξαρτήματα, η μέθοδος DDS χρησιμοποιεί έναν αριθμητικό τρόπο για να παράγει ακριβείς αριθμούς που αντιπροσωπεύουν την κυματομορφή. Η μέθοδος DDS χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια και ευελιξία στη δημιουργία συχνοτήτων, όπως σε ραδιοεπικοινωνίες, μέτρηση, ραντάρ, ιατρικά όργανα, συστήματα δοκιμών κ.ά.

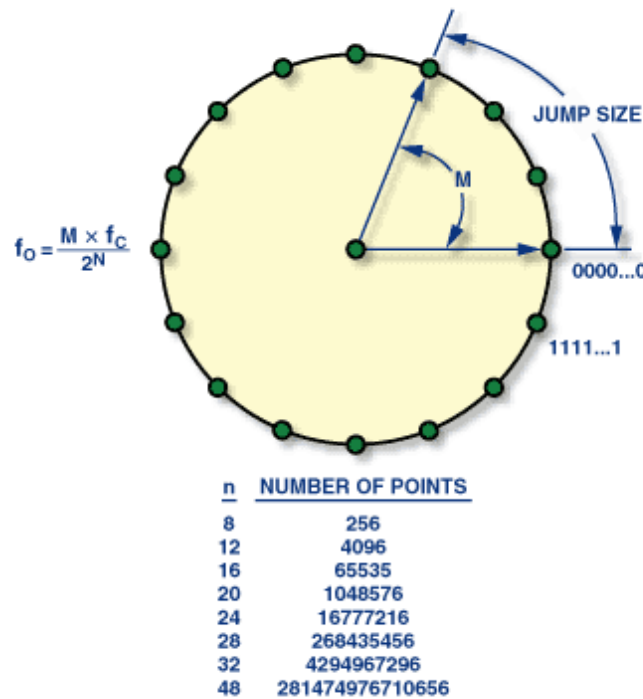
### 2.4.1 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου DDS περιλαμβάνουν:

**Διακύμανση Φάσης:** Με την αλλαγή της φάσης, μπορούμε να παράγουμε αλλαγές στη συχνότητα της κυματομορφής. Ο κβαντισμός της φάσης αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο οι δυνατές τιμές φάσης μετατρέπονται σε μια περιορισμένη σειρά τιμών. Η διακύμανση φάσης (Phase Accrual) είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της μεθόδου DDS (Direct Digital Synthesis) που χρησιμοποιείται για να διασφαλίσει ομαλές και απαλές μεταβάσεις στη συχνότητα και το σήμα που παράγεται. Ας αναλύσουμε περισσότερο τη διακύμανση φάσης:

- Ομαλές Μεταβάσεις: Η διακύμανση φάσης αφορά τον τρόπο με τον οποίο γίνονται οι μεταβάσεις από μία φάση σε μία άλλη κατά την αλλαγή της συχνότητας. Αν αλλάξουμε από μία συχνότητα σε μία άλλη αμέσως, μπορεί να προκληθούν απότομες αλλαγές στο σήμα, προκαλώντας ανεπιθύμητες συχνοτικές συνιστώσες (που εμφανίζονται ως θόρυβος ή "σκασίματα").
- Αποφυγή Απότομων Μεταβάσεων: Η διακύμανση φάσης χρησιμοποιείται για να αποφεύγει αυτές τις απότομες μεταβάσεις. Η μέθοδος DDS υπολογίζει τη διαφορά

φάσης ανάμεσα στα δύο σήματα και στη συνέχεια παράγει τα ενδιάμεσα δείγματα φάσης με τρόπο που επιτρέπει ομαλές μεταβάσεις από τη μία φάση στην άλλη.

- Απαλές Αλλαγές: Ο σκοπός της διακύμανσης φάσης είναι να δημιουργήσει ομαλές αλλαγές στη φάση κατά την αλλαγή της συχνότητας. Αυτό εξασφαλίζει ότι το παραγόμενο σήμα θα έχει λεία κυματομορφή και δεν θα προκαλούνται ανεπιθύμητες συχνοτικές συνιστώσες λόγω απότομων αλλαγών.
- Παραγωγή Ποικιλίας Κυματομορφών: Μέσω της διακύμανσης φάσης, είναι δυνατή η παραγωγή ποικίλων μορφών κυματομορφών, όπως σινουσοειδή, τρίγωνα, παλμικά κύματα κ.λπ. Η δυνατότητα να αλλάζει ομαλά από τη μία μορφή κυματομορφής στην άλλη κάνει τη μέθοδο DDS πολύ ευέλικτη σε διάφορες εφαρμογές. Για παράδειγμα, αν έχουμε έναν 8-bit DDS, αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να έχουμε  $2^8 = 256$  δυνατές τιμές φάσης.



Εικόνα 2.10: Τροχός Φάσης

Ο κβαντισμός επηρεάζει την ακρίβεια των παραγόμενων συχνοτήτων. Όσο πιο χαμηλός είναι ο κβαντισμός, τόσο περισσότερες διακυμάνσεις και αποκλίσεις μπορεί να προκύψουν στην παραγωγή των συχνοτήτων.

Συνολικά, η διακύμανση φάσης είναι κρίσιμη για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας του παραγόμενου σήματος από τη μέθοδο DDS και τη δημιουργία ομαλών, απαλών μεταβάσεων στη συχνότητα και τη μορφή του σήματος

**Πίνακας Αποκατάστασης** (Πίνακας Λουκάνικων): Η μέθοδος DDS χρησιμοποιεί έναν πίνακα αποκατάστασης (που ονομάζεται και πίνακας λουκάνικων) για να μετατρέψει τις τιμές της φάσης σε αντίστοιχες τιμές του εύρους . Αυτό επιτρέπει τη δημιουργία διαφορετικών κυματομορφών. Ο πίνακας αποκατάστασης (ή πίνακας περιγραφής) είναι ένας σημαντικός πίνακας που χρησιμοποιείται στη μέθοδο DDS (Direct Digital Synthesis) για τη δημιουργία διαφορετικών μορφών κυματομορφών. Ας αναλύσουμε τι είναι και πώς λειτουργεί:

Ο πίνακας αποκατάστασης είναι ένας πίνακας που περιέχει προκαθορισμένες τιμές που περιγράφουν μια μορφή κυματομορφής. Αυτές οι τιμές αντιστοιχούν στο αναλογικό εύρος της κυματομορφής σε διάφορα σημεία του κύκλου. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας της μεθόδου DDS, ο πίνακας αποκατάστασης χρησιμοποιείται για να παράγει τα αναλογικά δείγματα της κυματομορφής που θα εξαχθούν από τα ψηφιακά δείγματα της φάσης.

Ο τρόπος λειτουργίας του πίνακα αποκατάστασης είναι ο εξής:

- Προετοιμασία Πίνακα Αποκατάστασης: Αρχικά, ο πίνακας αποκατάστασης δημιουργείται για μια συγκεκριμένη μορφή κυματομορφής, όπως ημίτονο, τρίγωνο, παλμικό κύμα κ.λπ. Ο πίνακας αποτελείται από μια σειρά δειγμάτων που αντιστοιχούν στο εύρος της κυματομορφής για διάφορα σημεία του κύκλου.
- Διαμόρφωση της Φάσης: Κατά τη λειτουργία της μεθόδου DDS, η φάση του σήματος υπολογίζεται ψηφιακά. Αυτή η φάση ψηφιοποιείται και χρησιμοποιείται για να αναζητήσει το αντίστοιχο δείγμα από τον πίνακα αποκατάστασης.
- Παραγωγή Εύρους: Το αντίστοιχο δείγμα από τον πίνακα αποκατάστασης χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει το αναλογικό εύρος της κυματομορφής σε αυτήν τη συγκεκριμένη φάση.

**Ψηφιακό Έλεγχος**: Ο ψηφιακός έλεγχος στη μέθοδο DDS (Direct Digital Synthesis) αφορά τη χρήση ψηφιακών αλγορίθμων για τον έλεγχο και τη διαχείριση της διαδικασίας παραγωγής συχνοτήτων μέσω της μεθόδου DDS. Ο ψηφιακός έλεγχος επιτρέπει την προσαρμογή και τον έλεγχο των παραμέτρων της μεθόδου DDS μέσω ψηφιακών αλγορίθμων, εξασφαλίζοντας την ακρίβεια, την σταθερότητα και την ευελιξία της παραγωγής συχνοτήτων. Ας εξετάσουμε περισσότερες πληροφορίες για τον ψηφιακό έλεγχο στη μέθοδο DDS:

- Ψηφιακή Προγραμματιζόμενη Συχνότητα: Μία από τις κύριες εφαρμογές του ψηφιακού ελέγχου στη μέθοδο DDS είναι η δυνατότητα προγραμματισμού της

επιθυμητής συχνότητας της κυματομορφής που παράγεται. Οι ψηφιακοί αλγόριθμοι επιτρέπουν την ακριβή ρύθμιση της συχνότητας με υψηλή ακρίβεια.

- Περιορισμός Φάσης και Συχνότητας: Ο ψηφιακός έλεγχος επιτρέπει τον περιορισμό της φάσης και της συχνότητας της κυματομορφής, διασφαλίζοντας ότι το παραγόμενο σήμα παραμένει εντός των επιθυμητών ορίων.
- Ομαλές Μεταβάσεις και Συχνότητα Βαθυπερατών Φίλτρων: Οι αλγόριθμοι ψηφιακού ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίτευξη ομαλών μεταβάσεων μεταξύ διαφορετικών συχνοτήτων και για την υλοποίηση φίλτρων χαμηλής συχνότητας, βελτιώνοντας την ποιότητα του σήματος.
- Προγραμματιζόμενα Κύματα: Ο ψηφιακός έλεγχος επιτρέπει τη δημιουργία προγραμματιζόμενων κυματομορφών μέσω της ακριβούς ρύθμισης των φάσεων και το εύρος των συνιστωσών.
- Παρακολούθηση και Ελέγχου Συχνότητας: Οι ψηφιακοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της παραγόμενης συχνότητας, διασφαλίζοντας ότι αυτή παραμένει στις επιθυμητές τιμές.

#### 2.4.2 Χρησιμότητα:

Η μέθοδος DDS χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως η επικοινωνία, η ψηφιακή σύνθεση σήματος, η ηλεκτρονική μουσική, οι μετρήσεις και ο έλεγχος. Οι πλεονεκτήματα της μεθόδου DDS περιλαμβάνουν:

- Υψηλή ακρίβεια: Η μέθοδος DDS μπορεί να παράγει πολύ ακριβείς αριθμούς κυματομορφών με μικρή σφάλματα.
- Ευελιξία: Η μέθοδος DDS επιτρέπει την ευέλικτη παραγωγή σημάτων με διάφορες συχνότητες και κυματομορφές.
- Χαμηλός θόρυβος: Η μέθοδος DDS παράγει σήματα με χαμηλό θόρυβο, κάτι που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογές που απαιτούν υψηλή ποιότητα σήματος.

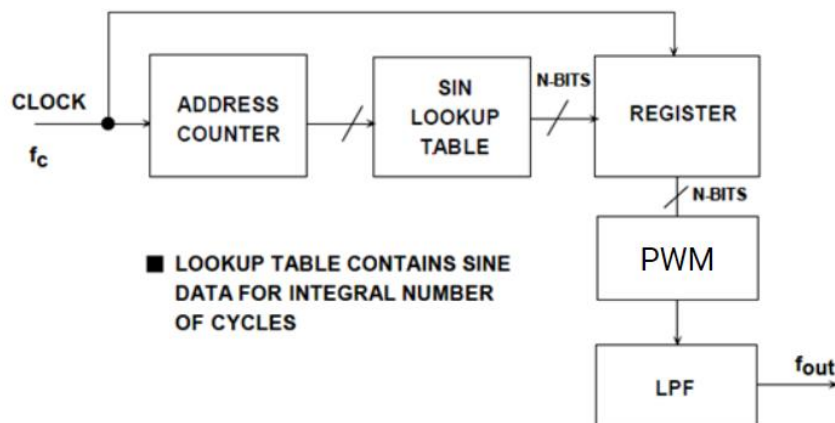
Παρόλο που η μέθοδος DDS έχει πολλά πλεονεκτήματα, υπάρχουν και ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη:

- Υψηλότερο κόστος: Η υλοποίηση μιας DDS πηγής μπορεί να είναι πιο ακριβή από μια αναλογική πηγή σήματος.
- Περιορισμένο εύρος συχνοτήτων: Ορισμένες υλοποιήσεις DDS μπορεί να έχουν περιορισμένο εύρος συχνοτήτων σε σχέση με άλλες μεθόδους παραγωγής σήματος.

### 2.4.3 Αρχιτεκτονική της DDS

Η βασική αρχιτεκτονική φαίνεται στην εικόνα 2.11 . Σε αυτό το απλοποιημένο μοντέλο, ένα σταθερό ρολόι οδηγεί μια προγραμματιζόμενη μνήμη μόνο για ανάγνωση (PROM) που αποθηκεύει έναν ή περισσότερους ακέραιο αριθμό κύκλων ενός ημιτονοειδούς κύματος (ή άλλη αυθαίρετη κυματομορφή, για αυτό το θέμα ). Καθώς ο μετρητής διευθύνσεων διασχίζει κάθε θέση μνήμης, το αντίστοιχο ψηφιακό πλάτος του σήματος σε κάθε θέση οδηγεί ένα DAC το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί το αναλογικό σήμα εξόδου. Η φασματική καθαρότητα του τελικού αναλογικού σήματος εξόδου προσδιορίζεται κυρίως από το DAC. Ο θόρυβος φάσης είναι βασικά αυτός του ρολογιού αναφοράς.

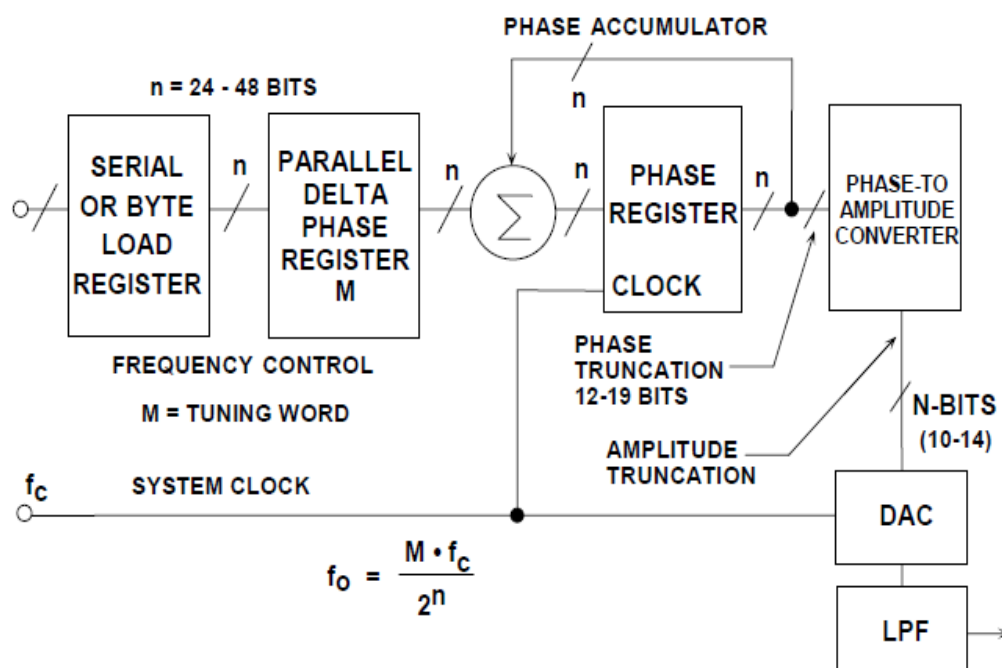
Επειδή ένα σύστημα DDS είναι ένα σύστημα δεδομένων δειγματοληψίας, όλα τα ζητήματα που εμπλέκονται στη δειγματοληψία πρέπει να ληφθούν υπόψη: θόρυβος κβάντισης, αλλοίωση, φιλτράρισμα, κ.λπ. μη φιλτραρισμένα, ενώ οι αρμονικές υψηλότερης τάξης της εξόδου των που βασίζονται σε PLL synthesizers μπορούν να φιλτραριστούν. Υπάρχουν και άλλες εκτιμήσεις που θα συζητηθούν σύντομα.



Εικόνα 2.11: Θεμελιώδης Άμεση Ψηφιακή Σύνθεση

Ένα θεμελιώδες πρόβλημα με αυτό το απλό σύστημα DDS είναι ότι η τελική συχνότητα εξόδου μπορεί να αλλάξει μόνο με την αλλαγή της συχνότητας του ρολογιού αναφοράς ή με τον επαναπρογραμματισμό του PROM,κάθετα καθιστώντας το μέλλον άκαμπτο. Ένα πρακτικό σύστημα DDS υλοποιεί αυτή τη βασική λειτουργία με πολύ πιο ευέλικτο και αποτελεσματικό

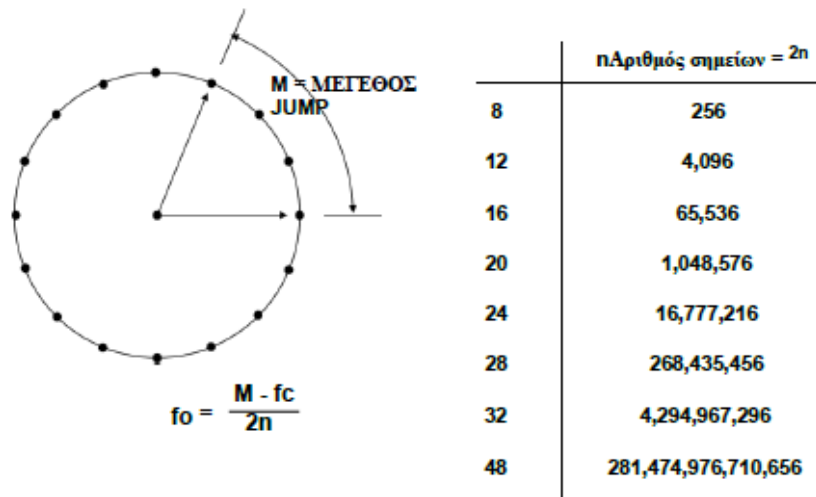
τρόπο χρησιμοποιώντας ψηφιακό υλικό που ονομάζεται Numerically Controlled Oscillator (NCO). Ένα μπλοκ διάγραμμα ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στην εικόνα 2.12.



Εικόνα 2.12: Ένα ευέλικτο σύστημα DDS

Η καρδιά του συστήματος είναι ο συσσωρευτής φάσεων το περιεχόμενο του οποίου ενημερώνεται μία φορά Σε κάθε κύκλο ρολογιού. κάθε φορά που ενημερώνεται ο συσσωρευτής φάσης ο ψηφιακός αριθμός μη που είναι αποθηκευμένος στον καταχωρητή φάσης Δ προστίθεται στον αριθμό του καταχωρητή συσσωρευτής φάσης. Η αποκομμένη έξοδος του συσσωρευτή φάσης χρησιμεύει ως διεύθυνση σε έναν πίνακα αναζήτησης ημιτόνου. κάθε διεύθυνση στον πίνακα αναζήτησης αντιστοιχεί σε ένα σημείο φάσεις στο ημιτονοειδές κύμα από 0° έως 360°. ο πίνακας αναζήτησης περιέχει τις αντίστοιχες ψηφιακές πληροφορίες πλάτους για έναν πλήρη κύκλο ενός ημιτονοειδούς κύματος. στην πραγματικότητα απαιτούνται μόνο δεδομένα για 90° επειδή τα δεδομένα τετραγωνισμού περιέχονται στα δύο MSB. Επομένως ο πίνακας αναζήτησης αντιστοιχίζει τις πληροφορίες φάσεις από το συσσωρευτή φάσης σε μία ψηφιακή λέξη πλάτους η οποία με τη σειρά της οδηγεί τον τακ αυτό παρουσιάζει τα γραφικά με τη χρήση του τροχού φάση στην εικόνα 2.13.

Εξετάστε την περίπτωση  $n = 32$  και  $M = 1$ . ο συσσωρευτής φάσεων περνάει από καθεμία από τις δύο ή στην 32 πιθανές εξόδους πριν υπερχειλίσει και ξαναμετρήσει. Η αντίστοιχη ημιτονοειδής συχνότητα εξόδου είναι ίση με τη συχνότητα του ρολογιού εισόδου διαιρεμένοι με το 2 εις την 32. Εάν η  $\mu = 2$  τότε ο καταχωρητής συσσωρευτεί φάσεις κυλάει δύο φορές πιο γρήγορα και η συχνότητα εξόδου διπλασιάζεται αυτό μπορεί να γενικευτεί ως εξής.

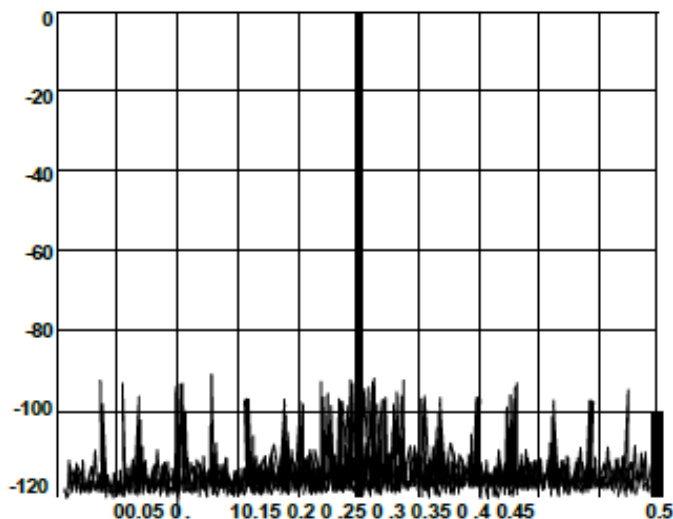


Εικόνα 2.13: Ψηφιακός τροχός φάσης

Για έναν συσσωρευτή φάσης n-bit (το n γενικά κυμαίνεται από 24 έως 32 στα περισσότερα συστήματα DDS), υπάρχουν  $2^n$  πιθανά σημεία φάσης. Η ψηφιακή λέξη στον καταχωρητή φάσης δέλτα, M, αντιπροσωπεύει την ποσότητα που αυξάνεται ο συσσωρευτής φάσης σε κάθε κύκλο ρολογιού. Εάν το fc είναι η συχνότητα ρολογιού, τότε η συχνότητα του ημιτονικού κύματος εξόδου είναι ίση με:

$$f_o = \frac{M \times fc}{2^n}$$

Αυτή η εξίσωση είναι γνωστή ως "εξίσωση συντονισμού" DDS. Σημειώστε ότι η ανάλυση συχνότητας του συστήματος είναι ίση με  $fc/2^n$ . Για  $n = 32$ , η ανάλυση είναι μεγαλύτερη από ένα μέρος στα τέσσερα δισεκατομμύρια! Σε ένα πρακτικό σύστημα DDS, όλα τα bit από τον συσσωρευτή φάσης δεν μεταβιβάζονται στον πίνακα αναζήτησης, αλλά περικόπτονται, αφήνοντας μόνο τα πρώτα 13 έως 15 MSB. Αυτό μειώνει το μέγεθος του πίνακα αναζήτησης και δεν επηρεάζει την ανάλυση συχνότητας. Η περικοπή φάσης προσθέτει μόνο μια μικρή αλλά αποδεκτή ποσότητα θορύβου φάσης στην τελική έξοδο. (εικόνα 2.14)



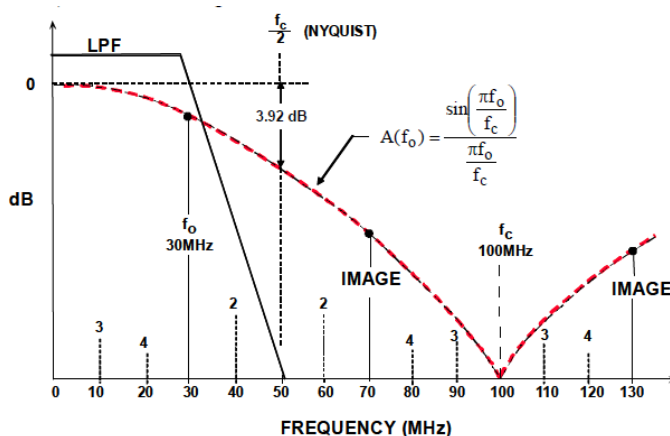
Εικόνα 2.14: Το υπολογισμένο φάσμα εξόδου δείχνει 90 dB SFDR για περικοπή φάσης 15-bit.

Η ανάλυση του DAC είναι συνήθως 2 έως 4 bit μικρότερη από το πλάτος του πίνακα αναζήτησης. Ακόμη και ένα τέλειο DAC N-bit θα προσθέσει θόρυβο κβάντισης στην έξοδο. Η Εικόνα 2.14 δείχνει το υπολογιζόμενο φάσμα εξόδου για συσσωρευτή φάσης 32 bit, περικοπή φάσης 15 bit. Η τιμή του M επιλέχθηκε έτσι ώστε η συχνότητα εξόδου να είναι ελαφρώς μετατοπισμένη από 0,25 φορές τη συχνότητα ρολογιού. Σημειώστε ότι τα σπυράκια που προκαλούνται από την περικοπή φάσης και την πεπερασμένη ανάλυση DAC είναι όλα τουλάχιστον 90 dB κάτω από την έξοδο πλήρους κλίμακας. Αυτή η απόδοση υπερβαίνει κατά πολύ εκείνη οποιουδήποτε εμπορικά διαθέσιμου DAC 12-bit και είναι επαρκής για τις περισσότερες εφαρμογές.

Το βασικό σύστημα DDS που περιγράφεται παραπάνω είναι εξαιρετικά ευέλικτο και έχει υψηλή ανάλυση. Η συχνότητα μπορεί να αλλάξει στιγμιαία χωρίς ασυνέχεια φάσης αλλάζοντας απλώς τα περιεχόμενα του καταχωρητή M. Ωστόσο, τα πρακτικά συστήματα DDS απαιτούν πρώτα την εκτέλεση μιας σειριακής ή μιας ακολουθίας φόρτωσης byte για να μεταφερθεί η νέα λέξη συχνότητας σε έναν εσωτερικό καταχωρητή buffer που προηγείται του καταχωρητή M παράλληλης εξόδου. Αυτό γίνεται για να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των καρφισών συσκευασίας. Αφού φορτωθεί η νέα λέξη στον καταχωρητή buffer, ο καταχωρητής φάσης δ παράλληλης εξόδου χρονίζεται, αλλάζοντας έτσι όλα τα bit ταυτόχρονα. Ο αριθμός των κύκλων ρολογιού που απαιτούνται για τη φόρτωση του καταχωρητή προσωρινής μνήμης δ-φάσης καθορίζει τον μέγιστο ρυθμό με τον οποίο μπορεί να αλλάξει η συχνότητα εξόδου.

## 2.4.4 Αλλοίωση σε συστήματα DDS

Υπάρχει ένας σημαντικός περιορισμός στο εύρος των συχνοτήτων εξόδου που μπορούν να δημιουργηθούν από το απλό σύστημα DDS. Τα κριτήρια Nyquist δηλώνουν ότι η συχνότητα ρολογιού (ρυθμός δειγματοληψίας) πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από τη συχνότητα εξόδου. Οι πρακτικοί περιορισμοί περιορίζουν την πραγματική υψηλότερη συχνότητα εξόδου περίπου στο 1/3 της συχνότητας ρολογιού. Η εικόνα 2.15 δείχνει την έξοδο ενός DAC σε ένα DDS σύστημα όπου η συχνότητα εξόδου είναι 30 MHz και η συχνότητα ρολογιού είναι 100 MHz. Ένα φίλτρο Αντιολίσθησης Πρέπει να ακολουθεί τον DAC Ανακατασκευής για να αφαιρέσει τη χαμηλότερη συχνότητα (100-30=70) MHz, όπως φαίνεται στην εικόνα .



Εικόνα 2.15: Αλλοίωση στο σύστημα DDS

Σημειώστε ότι η απόκριση πλάτους της εξόδου DAC πριν από το φιλτράρισμα ακολουθεί μία απόκριση με μηδενικά στη συχνότητα του ρολογιού και σε πολλαπλάσια αυτής. η ακριβής εξίσωση για το για το κανονισμένο πλάτος εξόδου είναι αυτό:

$$A(f_o) = \frac{\sin \frac{\pi f_o}{f_c}}{\frac{\pi f_o}{f_c}}$$

Όπου  $f_o$  είναι η συχνότητα εξόδου και  $f_c$  είναι η συχνότητα του ρολογιού.

Αυτή η μετατόπιση οφείλεται στο ότι η έξοδος DAC δεν είναι μια σειρά παλμών μηδενικού πλάτους (όπως σε μια τέλεια δειγματοληψία), αλλά μια σειρά ορθογώνιων παλμών των οποίων το πλάτος είναι ίσο με το αντίστροφο του ρυθμού ενημέρωσης. Το πλάτος της απόκρισης  $\sin(x)/x$  είναι μειωμένο κατά 3,92 dB. Στη συχνότητα Nyquist 1/2 του ρυθμού ενημέρωσης του DAC στην πράξη η συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου αντιολίσθησης μπορεί να σχεδιαστεί

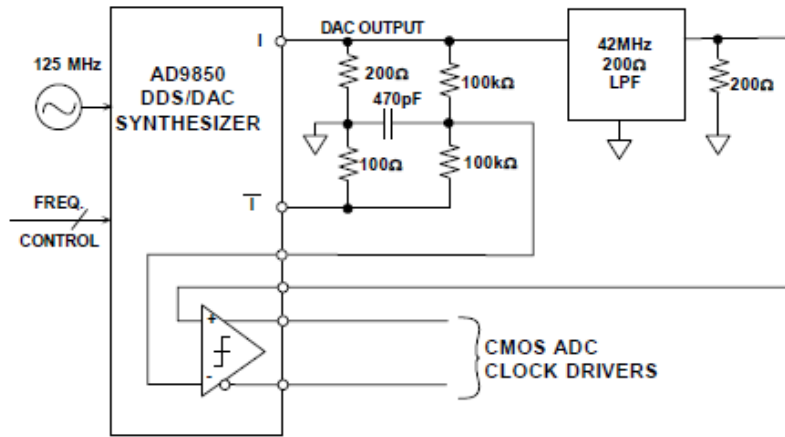
για να αντισταθμίσει την πτώση έτσι ώστε η συνολική απόκριση συχνότητας να είναι σχετικά επίπεδη μέχρι την μέγιστη συχνότητα εξόδου DAC γενικά το  $1/3$  του ρυθμού ενημέρωσης.

Μία άλλη σημαντική παρατήρηση είναι ότι σε αντίθεση με ένα σύστημα που βασίζεται σε PLL οι ανώτερες τάξεις αρμονικές της θεμελιώδους συχνότητας εξόδου σε ένα σύστημα DDS. Θα αναδιπλωθούν πίσω στη βασική ζώνη λόγω της αλλοίωσης αυτές οι αρμονικές δεν μπορούν να αφαιρεθούν από το φίλτρο αντιδιαστολής. Για παράδειγμα εάν η συχνότητα είναι 100MHz και η συχνότητα εξόδου 30MHz δεύτερη αρμονική της Το σήμα εξόδου 30 MHz εμφανίζεται στα 60 MHz (εκτός ζώνης), αλλά και στα  $100 - 60 = 40$  MHz (το ψευδώνυμο εξάρτημα. Ομοίως, η τρίτη αρμονική (90 MHz) εμφανίζεται εντός ζώνης στα  $100 - 90 = 10$  MHz, και η τέταρτη στα  $120 - 100$  MHz = 20 MHz. Οι αρμονικές ανώτερης τάξης εμπίπτουν στο εύρος ζώνης Nyquist (dc έως  $f_c/2$ ). Η θέση των πρώτων τεσσάρων αρμονικών φαίνεται στην εικόνα.

## 2.4.5 DDS σύστημα ως ADC ρυθμιστές ρολογιού

Συστήματα DDS όπως το AD9850 παρέχουν μια εξαιρετική μέθοδο παραγωγής του ρολογιού δειγματοληψίας στο ADC, ειδικά όταν η συχνότητα δειγματοληψίας ADC πρέπει να είναι υπό έλεγχο λογισμικού και να είναι κλειδωμένη στο ρολόι του συστήματος (βλ. Εικόνα 6). Το πραγματικό ρεύμα εξόδου DAC IOUΤ, οδηγεί ένα φίλτρο χαμηλής διέλευσης 200 Ω, 42 MHz, το οποίο τερματίζει την πηγή και το φορτίο, καθιστώντας έτσι το ισοδύναμο φορτίο 100 Ω. Το φίλτρο αφαιρεί πλαστά στοιχεία συχνότητας άνω των 42 MHz. Η φιλτραρισμένη έξοδος οδηγεί μια είσοδο του εσωτερικού συγκριτή AD9850. Το συμπληρωματικό ρεύμα εξόδου DAC οδηγεί σε φορτίο 100 Ω. Η έξοδος του διαιρέτη αντίστασης 100 kΩ που τοποθετείται μεταξύ των δύο εξόδων αποσυνδέεται και παράγει την τάση αναφοράς για τον εσωτερικό συγκριτή.

Η έξοδος του συγκριτή έχει χρόνο ανόδου και πτώσης 2 ns και δημιουργεί ένα τετραγωνικό κύμα συμβατό με TTL/CMOS. Το jitter των άκρων εξόδου του συγκριτή είναι μικρότερο από 20 ps rms. Αληθινές και συμπληρωματικές έξοδοι είναι διαθέσιμες εάν απαιτείται.

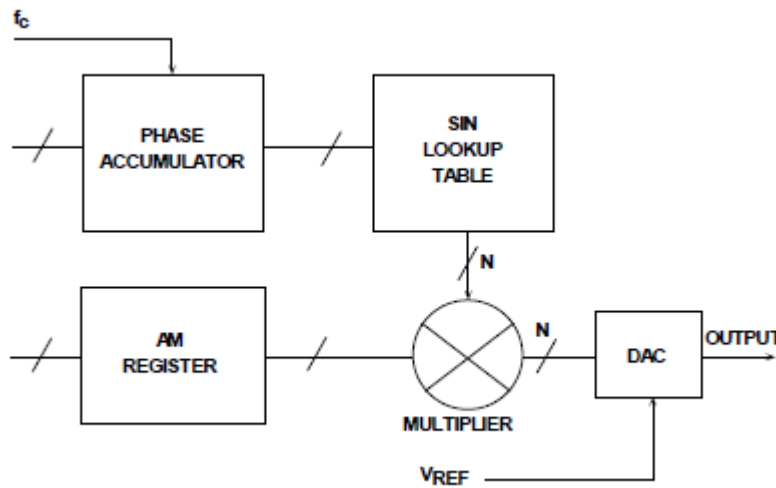


Εικόνα 2.16:Χρήση ενός συστήματος DDS ως clock drivers.

Στο κύκλωμα που φαίνεται (Εικόνα 2.16), η συνολική έξοδος rms jitter για ένα ρολόι ADC 40 MSPS είναι 50 ps rms, και η προκύπτουσα υποβάθμιση στο SNR πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε εφαρμογές μεγάλου δυναμικού εύρους.

#### 2.4.6 Διαμόρφωση πλάτους σε σύστημα DDS

Η διαμόρφωση πλάτους σε ένα σύστημα DDS μπορεί να επιτευχθεί τοποθετώντας έναν ψηφιακό πολλαπλασιαστή μεταξύ του πίνακα αναζήτησης και της εισόδου DAC όπως φαίνεται στην εικόνα 2.17. Μια άλλη μέθοδος διαμόρφωσης το πλάτος εξόδου DAC είναι να μεταβάλλει την τάση αναφοράς στο DAC. Στην περίπτωση του AD9850, το εύρος ζώνης του εσωτερικού ενισχυτή ελέγχου αναφοράς είναι περίπου 1 MHz. Αυτή η μέθοδος είναι χρήσιμη για σχετικά μικρές αλλαγές πλάτους εξόδου, εφόσον το σήμα εξόδου δεν υπερβαίνει την προδιαγραφή της συμμόρφωσης +1V.



Εικόνα 2.17: Διαμόρφωση πλάτους σε σύστημα DDS.

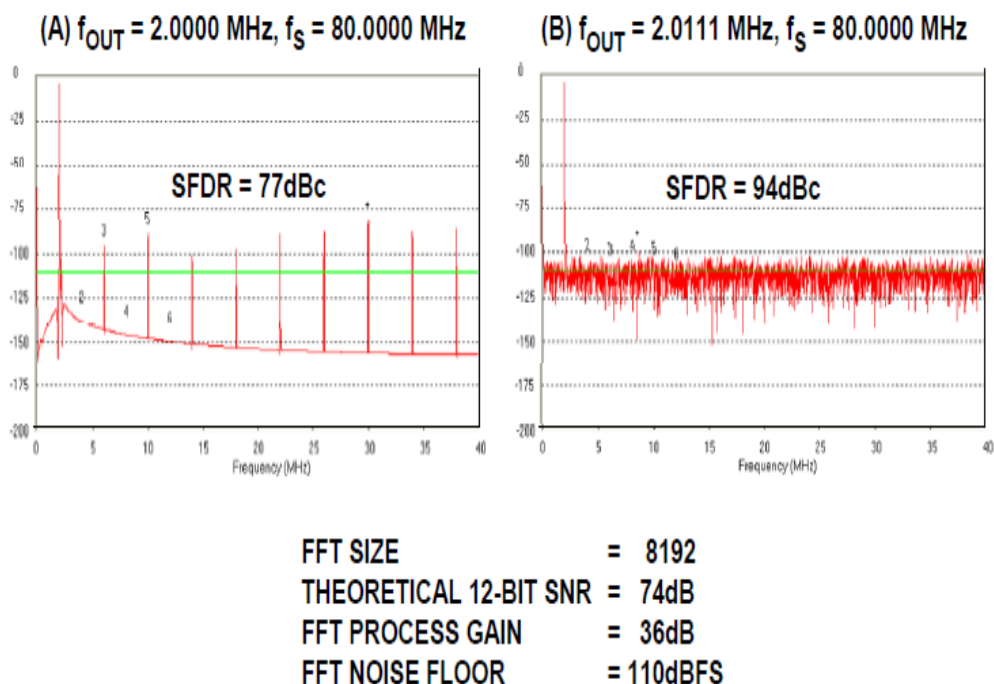
### 2.4.7 Σπυριώδεις εκτιμήσεις ελεύθερης δυναμικής περιοχής σε συστήματα DDS

Σε άλλες εφαρμογές DDS καθαρότητα της εξόδου DAC έχει πρωταρχική σημασία. Δυστυχώς η μέτρηση, η πρόβλεψη και η ανάλυση αυτής της απόδοσης περιπλέκεται από διάφορους αλληλεπιδρώντες παράγοντες.

Ακόμη και ένας ιδανικός DAC N-bit θα παράγει αρμονικές και ένα σύστημα DDS. Το πλάτος αυτών των αρμονικών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο της συχνότητας εξόδου προς τη συχνότητα του ρολογιού. αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φασματικό περιεχόμενο του θορύβου κβαντισμού του DAC μεταβάλλεται καθώς μεταβάλλεται αυτός ο λόγος παρόλο που οι θεωρητικοί rms τιμή του παραμένει η ίση  $q/\sqrt{12}$  (όπου q είναι το βάρος του LSB). Η υπόθεση ότι ο θόρυβος κβάντισης εμφανίζεται ως λευκός θόρυβος και κατανέμεται ομοιόμορφα στο εύρος ζώνης Nyquist απλά δεν ισχύει σε ένα σύστημα DDS (είναι πιο κατάλληλο να είναι μια αληθινή υπόθεση σε ένα σύστημα που βασίζεται σε ADC, επειδή το ADC προσθέτει ένα ορισμένο ποσό του θορύβου στο σήμα που τείνει να "μειώσει" ή να τυχαιοποιήσει το σφάλμα κβαντισμού. Ωστόσο, εξακολουθεί να υπάρχει μια ορισμένη ποσότητα συσχέτισης). Για παράδειγμα, εάν η συχνότητα εξόδου DAC έχει ρυθμιστεί σε ένα ακριβές υποπολλαπλάσιο της συχνότητας ρολογιού, τότε ο θόρυβος κβάντισης θα συγκεντρωθεί σε πολλαπλάσια της συχνότητας εξόδου, δηλαδή εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το σήμα. εάν ωστόσο η συχνότητα εξόδου είναι ελαφρώς μετατοπισμένη ο θόρυβος απαντήσεις θα γίνει πιο τυχαίος δίνοντας έτσι μία βελτίωση του πραγματικού SFDR.

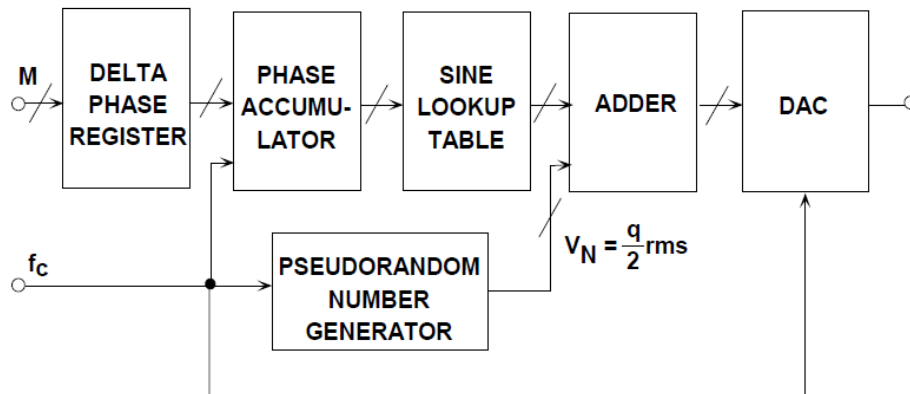
Αυτό φαίνεται στην εικόνα 2.18, όπου υπολογίζεται ένα σημείο FFT 4096 (4k) με βάση τα ψηφιακά δημιουργημένα δεδομένα από ένα ιδανικό DAC 12 bit. Στο αριστερό διάγραμμα (A),

η αναλογία μεταξύ της συχνότητας ρολογιού και της συχνότητας εξόδου επιλέχθηκε να είναι ακριβώς 40, δίνοντας ένα SFDR της περίπου 77 dBc. Στο δεξί διάγραμμα, ο λόγος ήταν ελαφρώς μετατοπισμένος και το ενεργό SFDR αυξάνεται τώρα στα 94 dBc. Σε αυτή την ιδανική περίπτωση, παρατηρήσαμε μια αλλαγή στο SFDR κατά 17 dB απλώς αλλάζοντας ελαφρά τον λόγο συχνότητας.



Εικόνα 2.18: Επίδραση του λόγου του ρολογιού προς τη συχνότητα εξόδου στο θεωρητικό SFDR του 12-bit DAC χρησιμοποιώντας FFT 4096 σημείων

Επομένως, το καλύτερο SFDR μπορεί να επιτευχθεί με την προσεκτική επιλογή του ρολογιού και των συχνοτήτων εξόδου. Ωστόσο, σε ορισμένες εφαρμογές, αυτό μπορεί να μην είναι δυνατό. Στα συστήματα που βασίζονται σε ADC, η προσθήκη μικρής ποσότητας τυχαίου θορύβου στην είσοδο τείνει να τυχαιοποιεί τα σφάλματα κβάντισης και να μειώνει αυτό το φαινόμενο. Το ίδιο πράγμα μπορεί να γίνει σε ένα σύστημα DDS όπως φαίνεται στην εικόνα 2.19. Η έξοδος της γεννήτριας ψευδοτυχαίων ψηφιακού θορύβου προστίθεται στη λέξη ημιτονοειδούς πλάτους DDS πριν φορτωθεί στο DAC. Το πλάτος του ψηφιακού θορύβου ρυθμίζεται σε περίπου  $\frac{1}{2}$  LSB. Αυτό επιτυγχάνει την διαδικασία της τυχαίας επιλογής εις βάρος μιας μικρής αύξησης του συνολικού θορύβου στην έξοδο. Στις περισσότερες εφαρμογές DDS, ωστόσο, υπάρχει αρκετή ευελιξία στην επιλογή των διαφόρων αναλογιών συχνότητας, έτσι ώστε να μην απαιτείται πρόσμειξη.



Εικόνα 2.19: Εισαγωγή ψηφιακού Dither σε ένα σύστημα DDS για την τυχαία ρύθμιση του θορύβου της κβάντισης και την αύξηση του SFDR

Το on-line εργαλείο σχεδίασης της αναλογικής συσκευής, ADIsimDDS, είναι ένα διαδραστικό εργαλείο που βοηθά τον χρήστη στην επιλογή και την αξιολόγηση των IC DDS. Επιτρέπει στον χρήστη να επιλέξει μια συσκευή, να εισαγάγει τις επιθυμητές συνθήκες λειτουργίας και να αξιολογήσει τη γενική απόδοσή της. Το εργαλείο χρησιμοποιεί μαθηματικές εξισώσεις για να προσεγγίσει τη συνολική απόδοση της επιλεγμένης συσκευής και δεν υπολογίζει όλα τα πιθανά σφάλματα. Επομένως, το εργαλείο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μόνο ως βοήθημα σχεδιασμού και δεν προορίζεται να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο για πραγματικές δοκιμές και αξιολόγηση υλικού.

## Κεφάλαιο 3

### 3.1 Η πρακτική εφαρμογή της DDS στο κύκλωμα

Η μέθοδος Direct Digital Synthesis (DDS) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ψηφιακών σημάτων συχνότητας μέσω ενός συσσωρευτή (accumulator) και ενός πίνακα περιόδου (lookup table). Παράγει ένα σήμα παλμοσειράς το οποίο μετά μετατρέπεται σε σήμα αναλογικής τάσης μέσω ενός αναλογικού μετατροπέα (DAC).

Οι βασικοί όροι και συστατικά ενός DDS κυκλώματος περιλαμβάνουν:

- Συσσωρευτής (Accumulator): Ο συσσωρευτής χρησιμοποιείται για την αποθήκευση της τρέχουσας φάσης του σήματος. Κάθε φορά που αυξάνεται η τιμή του συσσωρευτή, προχωράμε προς την επόμενη τιμή στον πίνακα περιόδου.
- Πίνακας Περιόδου (Lookup Table): Ο πίνακας περιόδου περιέχει τις τιμές της συνάρτησης (συνήθως μια ημιτονοειδής κυματομορφή) για μια πλήρη περίοδο. Καθώς ο συσσωρευτής αυξάνεται, προχωράμε σε διαδοχικές τιμές του πίνακα περιόδου.
- Ρολόι Αναφοράς (Reference Clock): Το ρολόι αναφοράς παρέχει τον χρονικό ρυθμό με τον οποίο ο συσσωρευτής αυξάνεται και καθορίζει τη συχνότητα του παραγόμενου σήματος.
- Ψηφιακό-Αναλογικός Μετατροπέας (DAC): Ο DAC μετατρέπει τις ψηφιακές τιμές του πίνακα περιόδου σε αναλογική τάση, παράγοντας έτσι το επιθυμητό αναλογικό σήμα.

### 3.2 Ο Συσσωρευτής (Accumulator) και Το Βήμα Αύξησης στην Μέθοδο DDS

Στο πλαίσιο της μεθόδου DDS (Direct Digital Synthesis), ο συσσωρευτής (accumulator) αποτελεί ένα βασικό στοιχείο που επιτρέπει τη δημιουργία αναλογικών κυματομορφών με ψηφιακά μέσα. Ο συσσωρευτής λειτουργεί ως ένας μετρητής, που αυξάνεται κατά ένα ποσό (βήμα) σε κάθε επανάληψη του κύκλου εκτέλεσης του προγράμματος. Το βήμα αυξημένο κατάλληλα συνδέεται με την επιθυμητή συχνότητα της κυματομορφής.

Κατά την εκτέλεση, ο συσσωρευτής αυξάνεται σε σταθερά χρονικά διαστήματα, δημιουργώντας έτσι την αίσθηση της αλλαγής φάσης της κυματομορφής. Η τρέχουσα τιμή του συσσωρευτή αντιπροσωπεύει τη φάση της κυματομορφής και χρησιμοποιείται για την επιλογή της αντίστοιχης τιμής παραμόρφωσης από έναν πίνακα περιόδου.

Είναι σημαντικό το βήμα (step) να υπολογίζεται κατάλληλα ώστε να εξασφαλίζει την επιθυμητή συχνότητα της κυματομορφής. Αν η επιθυμητή συχνότητα είναι  $f$ , το βήμα υπολογίζεται ως:

$$\text{Βήμα αύξησης} = \frac{f \times 2^N}{f_{ref}} = \frac{1000 \times 2^{32}}{16000000} = 214748$$

Όπου είναι η μέγιστη τιμή του συσσωρευτή (συνήθως μια 32-μπιτη μεταβλητή),  $2^{32}$  και  $f_{\text{διακύμανσης}}$  είναι η επιθυμητή συχνότητα διακύμανσης της κυματομορφής.

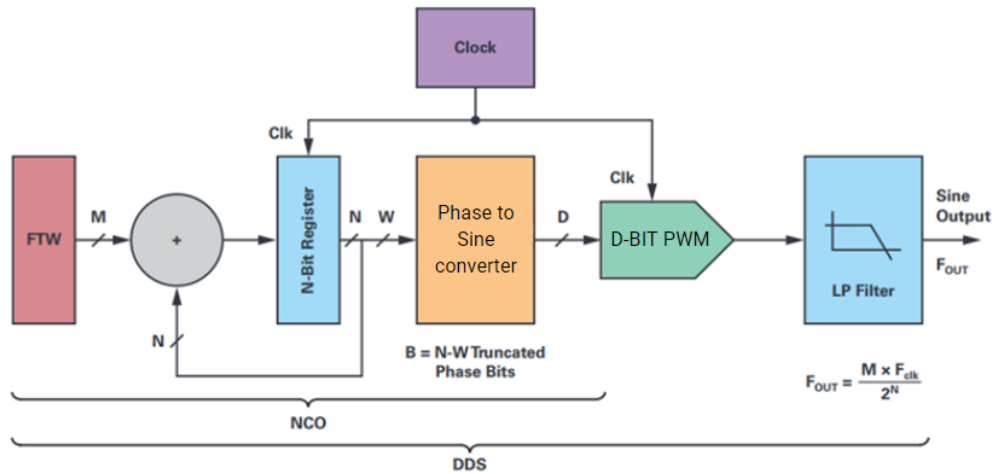
Στο πρόγραμμα, η αύξηση του συσσωρευτή πραγματοποιείται με την προσθήκη του βήματος σε κάθε κύκλο εκτέλεσης, και όταν η τιμή του συσσωρευτή υπερβεί το μέγιστο εύρος, πραγματοποιείται επαναφορά στην αρχική τιμή. Έτσι, ο συσσωρευτής διατηρείται σε συνεχή κυκλική λειτουργία, προσφέροντας την επιθυμητή φάση και συχνότητα στην παραγόμενη κυματομορφή.

Η συνεργασία του συσσωρευτή με τον πίνακα περιόδου και τον ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα επιτρέπει τη δημιουργία ευέλικτων και ακριβών αναλογικών κυματομορφών, καθιστώντας τη μέθοδο DDS ιδανική για πολλές εφαρμογές που απαιτούν ακρίβεια και ευελιξία στη δημιουργία κυματομορφών.

Αναλυτικότερα, η διαδικασία του συσσωρευτή και του βήματος αύξησης εντάσσονται στον προγραμματισμό του μικροελεγκτή και εφαρμόζονται σε συνεργασία με τον πίνακα περιόδου και τον ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα, για να παράγουν την επιθυμητή αναλογική κυματομορφή.

Στον προγραμματισμό, ο συσσωρευτής δηλώνεται ως μεταβλητή που αυξάνεται κατά το βήμα που σχετίζεται με την επιθυμητή συχνότητα. Για παράδειγμα, σε γλώσσα C/C++, μπορεί να φαίνεται ως εξής:

Στο κύκλωμα προσομοίωσης, ο συσσωρευτής προστίθεται στο κύκλωμα και συνδέεται με τον πίνακα περιόδου και τον ψηφιακό-αναλογικό μετατροπέα. Η αύξηση του συσσωρευτή αντιπροσωπεύει τη φάση της κυματομορφής και επηρεάζει την επιλογή των τιμών παραμόρφωσης από τον πίνακα περιόδου.



Εικόνα 3.1:Block διάγραμμα DDS

### 3.3 Πίνακας περιόδου (Lookup Table)

Πίνακας Περιόδου (Lookup Table) στην Μέθοδο DDS και η Χρήση του σε Κυκλώματα Προσομοίωσης

Ο "Πίνακας Περιόδου" (Lookup Table) αναφέρεται σε ένα σημαντικό εργαλείο που χρησιμοποιείται στη μέθοδο DDS (Direct Digital Synthesis) για τη δημιουργία κυματομορφών με βάση προκαθορισμένες τιμές. Η μέθοδο DDS είναι ένας τρόπος για τη δημιουργία αναλογικών κυματομορφών μέσω ψηφιακών μεθόδων. Στην μέθοδο αυτή, ο "Πίνακας Περιόδου" χρησιμοποιείται για να αποθηκεύσει προκαθορισμένες τιμές κυματομορφών, όπως η ημιτονοειδής, η τετραγωνική και άλλες, προκειμένου να επιταχυνθεί η διαδικασία δημιουργίας των αντίστοιχων αναλογικών σημάτων.

Ο πίνακας αυτός αποτελείται από μία λίστα προκαθορισμένων αριθμητικών τιμών που αναπαριστούν την παραμόρφωση της κυματομορφής σε διάφορα σημεία. Κατά την εκτέλεση του προγράμματος, αυτές οι τιμές αντιστοιχίζονται στις περιόδους της κυματομορφής, παρέχοντας έτσι έναν τρόπο για γρήγορη προσπέλαση των τιμών της κυματομορφής χωρίς την ανάγκη υπολογισμού σε κάθε εκτέλεση.

Στην προγραμματιστική πλευρά, ο πίνακας περιόδου δηλώνεται ως ένας πίνακας στη γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείτε. Για παράδειγμα, σε γλώσσα C/C++, μπορεί να φαίνεται ως εξής:

```
const int sinTable[] = {
    128, 140, 153, 165, 177, 188, 199, 209, 218, 226, 234, 240, 245, 250, 252, 254,
    // ... άλλες τιμές κυματομορφής
};
```

Στη συνέχεια, αυτές οι τιμές χρησιμοποιούνται για την παραμόρφωση της κυματομορφής που παράγεται από το DDS κύκλωμα. Κατά την εκτέλεση, μπορείτε να ανακτήσετε αυτές τις τιμές από τον πίνακα αντί να υπολογίζετε την παραμόρφωση κάθε φορά.

Σε ό,τι αφορά το κύκλωμα, ο πίνακας περιόδου χρησιμοποιείται για την παραμόρφωση της κυματομορφής προτού εφαρμοστεί στον Ψηφιακό-Αναλογικό Μετατροπέα (PWM). Ο τρόπος σύνδεσης του PWM στο κύκλωμα και η εφαρμογή του πίνακα περιόδου εξαρτώνται από τα εξαρτήματα και την πλατφόρμα που χρησιμοποιείτε.

Συνολικά, ο πίνακας περιόδου αποτελεί ένα καθοριστικό εργαλείο για τη δημιουργία κυματομορφών μέσω της μεθόδου DDS, παρέχοντας αποθηκευμένες τιμές που συνθέτουν τις επιθυμητές κυματομορφές με ταχύτητα και ακρίβεια.

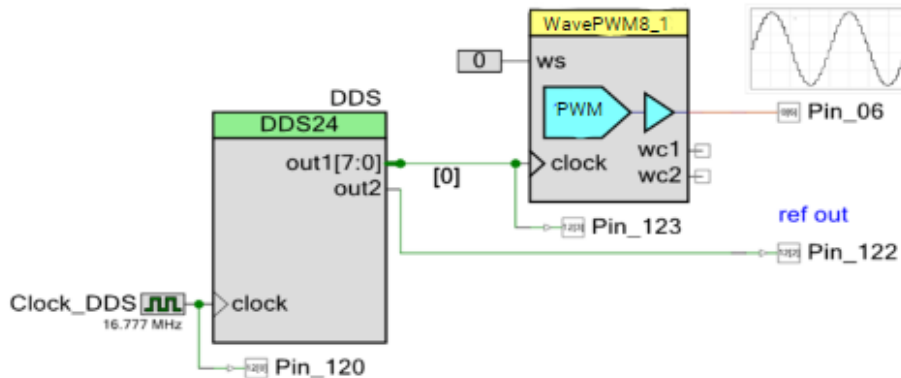
### 3.4 Ο Ρολόι Αναφοράς στη Μέθοδο DDS για τη Δημιουργία Αναλογικών Κυματομορφών

Η μέθοδος DDS (Direct Digital Synthesis) αντιπροσωπεύει μία ισχυρή τεχνική για τη δημιουργία ακριβών αναλογικών κυματομορφών μέσω ψηφιακών μέσων. Ένα βασικό συστατικό της μεθόδου DDS είναι ο ρολόι αναφοράς (reference clock), ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον χρονικό συγχρονισμό και την επίτευξη της επιθυμητής συχνότητας κυματομορφής.

Ο ρολόι αναφοράς λειτουργεί ως ένας σημαντικός διαιρέτης του χρόνου, παρέχοντας μια σταθερή ταχύτητα μετρήσεων στον μικροελεγκτή. Συνήθως, χρησιμοποιούνται κρυστάλλοι ή ένας εσωτερικός ταλαντωτής του μικροελεγκτή για τον ρολόι αναφοράς. Η επιλογή του ρολογιού αναφοράς επηρεάζει την ακρίβεια της παραγόμενης κυματομορφής, καθώς πρέπει να είναι συμβατή με την επιθυμητή συχνότητα.

## Arbitraty wave generator with tunable frequency and phase

encoder updates Frequency parameters using API calls



Εικόνα 3.2 : Ρολόι αναφοράς στην DDS.

Το ρολόι αναφοράς είναι κρίσιμο για τον υπολογισμό του βήματος αύξησης του συσσωρευτή (accumulator step), το οποίο καθορίζει τη συχνότητα της κυματομορφής. Μέσω μαθηματικών υπολογισμών, το βήμα αύξησης συνδέεται με την επιθυμητή συχνότητα διακύμανσης της κυματομορφής και τον μέγιστο αριθμό τιμών του συσσωρευτή.

Η διαδικασία συνδυασμού του ρολογιού αναφοράς, του συσσωρευτή και του πίνακα περιόδου στη μέθοδο DDS, παράγει μια ακριβή και ευέλικτη δυνατότητα δημιουργίας αναλογικών κυματομορφών. Ο συσσωρευτής αυξάνεται με το βήμα αύξησης και η τρέχουσα τιμή του συσσωρευτή χρησιμοποιείται για την επιλογή της αντίστοιχης τιμής παραμόρφωσης από τον πίνακα περιόδου.

Τέλος, ο ψηφιακός-αναλογικός μετατροπέας (PWM) με χρήση της τεχνικής PWM (Pulse Width Modulation) αναλαμβάνει τη μετατροπή των ψηφιακών τιμών παραμόρφωσης σε αναλογική κυματομορφή. Η ταχύτητα της PWM ρύθμισης ελέγχει το πλάτος των παλμών, επιτρέποντας τον έλεγχο της τάσης εξόδου του μετατροπέα. Ο ρολόι αναφοράς διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην ακρίβεια της δημιουργούμενης αναλογικής κυματομορφής, ενώ η συνεργασία με τον συσσωρευτή, τον πίνακα περιόδου και τον DAC εξασφαλίζει την επίτευξη της επιθυμητής αναλογικής κυματομορφής με ακρίβεια και ευελιξία.

Συνοψίζοντας, ο ρολόι αναφοράς είναι ο χρονικός "κινητήριος" παράγοντας πίσω από τη μέθοδο DDS για τη δημιουργία ακριβών αναλογικών κυματομορφών. Αυτός ο συνδυασμός τεχνικών επιτρέπει την ευέλικτη παραγωγή διάφορων κυματομορφών με ακρίβεια και ελεγχόμενη αναλογική αναπαράσταση, κάνοντας την μέθοδο DDS ιδανική για εφαρμογές προσομοίωσης και σχεδίασης κυκλωμάτων.

### 3.5 Ο Ψηφιακός-Αναλογικός Μετατροπέας (PWM) αποτελεί ζωτικό στοιχείο στη μέθοδο DDS (Direct Digital Synthesis)

Ο Ψηφιακός-Αναλογικός Μετατροπέας (PWM) αναλαμβάνει τον ρόλο της γέφυρας μεταξύ του ψηφιακού κόσμου των δυαδικών δεδομένων και του αναλογικού κόσμου των συνεχών σημάτων. Στο πλαίσιο της μεθόδου DDS, ο PWM είναι υπεύθυνος για την αποτύπωση των ψηφιακών δεδομένων που προκύπτουν από τη διαδικασία DDS σε αναλογικά σήματα που μπορούν να αναπαρασταθούν από φυσικές διακυμάνσεις, όπως τάσεις, ηλεκτρικά ρεύματα και άλλες φυσικές παράμετροι.

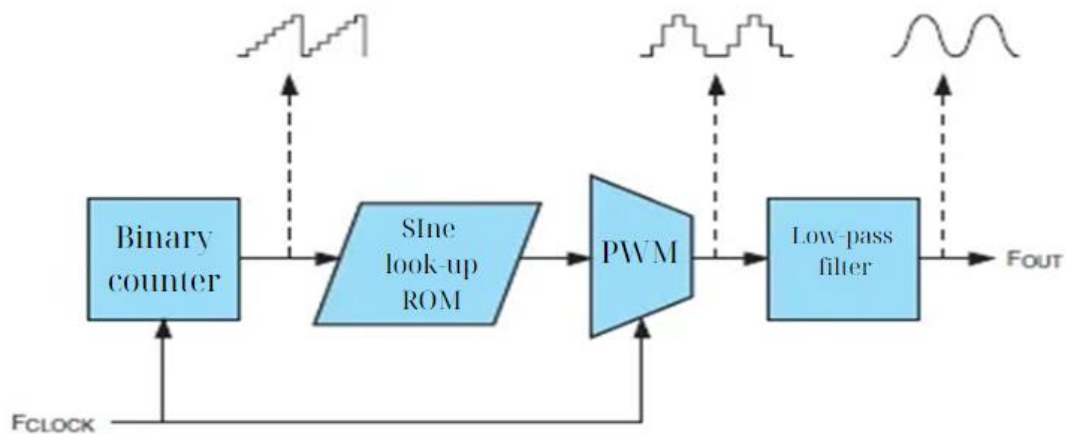
Η γέφυρα μεταξύ του ψηφιακού κόσμου των δυαδικών δεδομένων και του αναλογικού κόσμου των συνεχών σημάτων επιτυγχάνεται μέσω του Ψηφιακού-Αναλογικού Μετατροπέα (). Ο DAC αναλαμβάνει τη μετατροπή των ψηφιακών δεδομένων σε αναλογικά σήματα, τα οποία μπορούν να αναπαρασταθούν από φυσικές διακυμάνσεις, όπως τάσεις ή ηλεκτρικά ρεύματα. Αυτό είναι απαραίτητο για τη δημιουργία πραγματικών αναλογικών σημάτων από τα ψηφιακά δεδομένα που παράγονται από τη μέθοδο DDS.

Η διαδικασία του DAC βασίζεται στην ανάλυση των ψηφιακών δεδομένων σε δυαδικά bits και τη μετατροπή τους σε αντίστοιχες αναλογικές τιμές. Ο DAC παίρνει το ψηφιακό δεδομένο, το αναλύει σε δυαδικά bits και αντιστοιχεί κάθε bit με μια αναλογική τιμή. Οι αναλογικές τιμές αντιπροσωπεύουν την κατάσταση του ψηφιακού δεδομένου και το πώς πρέπει να αναπαρασταθεί σε αναλογικό σήμα. Καθώς τα bits αυξάνονται σε αξία, η αναλογική τιμή αυξάνεται αντίστοιχα.

Αυτό επιτρέπει τη μετατροπή των ψηφιακών δεδομένων που παράγονται από τη μέθοδο DDS σε αναλογικά σήματα που μπορούν να αποτυπώσουν διάφορα είδη κυματομορφών, όπως ημίτονα, τετραγωνικούς παλμούς, συνημίτονα και άλλα. Με αυτόν τον τρόπο, η γέφυρα μεταξύ του ψηφιακού και αναλογικού κόσμου επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του DAC, καθιστώντας δυνατή την παραγωγή πολύπλοκων αναλογικών σημάτων με τη χρήση της μεθόδου DDS.

Στο πλαίσιο της μεθόδου DDS, ο DAC είναι ιδιαίτερα σημαντικός για τη δημιουργία των αναλογικών σημάτων που περιγράφουν τις κυματομορφές. Η ποιότητα του DAC επηρεάζει την ακρίβεια των παραγόμενων κυματομορφών, καθώς και το εύρος των συχνοτήτων που μπορούν να παραχθούν με ακρίβεια.

Η χρήση της μεθόδου DDS σε συνδυασμό με τον DAC επιτρέπει τη δημιουργία πολύπλοκων και ακριβών σημάτων με ευελιξία, κάτι που είναι απαραίτητο σε πολλές εφαρμογές, όπως στην τηλεπικοινωνία, την ιατρική, την έρευνα και πολλές άλλες. Επίσης, η συνδυασμένη χρήση DDS και DAC μπορεί να επιτρέψει την παραγωγή πολλαπλών σημάτων με διαφορετικές συχνότητες και κυματομορφές, κάτι που είναι πολύτιμο σε εφαρμογές όπως τα συστήματα επικοινωνίας και τα ηχοσυστήματα.



Εικόνα 3.3: Block διάγραμμα της μετατροπής του σήματος.

Συνδυαστικά για την καλύτερη επίτευξη των σημάτων στο κύκλωμα μας χρησιμοποιούμε την τεχνική Το PWM (Pulse Width Modulation). Το PWM (Pulse Width Modulation) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται για την παραγωγή αναλογικών σημάτων μέσω ψηφιακών εξόδων. Στην ουσία, το σήμα PWM αποτελείται από μια σειρά από διακεκομμένες παλμοσειρές, όπου η διάρκεια των παλμών (πλάτος) αλλάζει, ενώ η συχνότητα των παλμών παραμένει σταθερή.

Ο ψηφιακός αναλογικός μετατροπέας (DAC) συνδέεται με την τεχνική PWM με τον εξής τρόπο: Η διάρκεια των παλμών PWM ρυθμίζεται με βάση τις επιθυμητές αναλογικές τιμές που θέλουμε να παράξουμε. Πρακτικά, όσο μεγαλύτερο είναι το πλάτος του παλμού, τόσο μεγαλύτερη θεωρητικά είναι η αναλογική τιμή που αντιπροσωπεύει.

Ο DAC λοιπόν δεν είναι απαραίτητος για την υλοποίηση της τεχνικής PWM, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μετατρέψει τα ψηφιακά σήματα PWM σε αναλογικά σήματα με περισσότερη ακρίβεια και ευκολία. Ανάλογα με το πλάτος των παλμών PWM, ο DAC μετατρέπει αυτά τα ψηφιακά δεδομένα σε αναλογικές τάσεις ή ηλεκτρικά ρεύματα, δημιουργώντας έτσι το επιθυμητό αναλογικό σήμα.

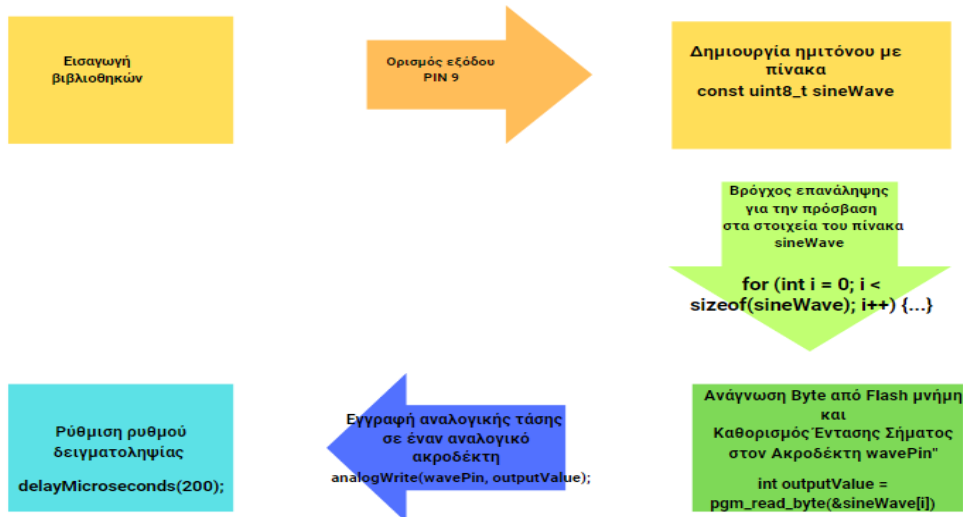
### 3.6 Το κύκλωμα

Για την κατασκευή του κυκλώματος Δεν χρειάζεται να προστεθεί κάποιο υλικό Για Το φάσμα φτάνει των συχνοτήτων από 0 έως 16 kHz με ανάλυση  $1/10^6$  Herz. Επιπλέον οι παραμορφώσεις μπορούν να διατηρηθούν σε λιγότερο από το 1% για συχνότητες έως 3 kHz. Για να εφαρμόσουμε στο κύκλωμα μας την τεχνική της DDS χρειαζόμαστε 4 εξαρτήματα ενός συσσωρευτή μία λέξη ρυθμίσεις που είναι στην περίπτωση μας μόνο δύο μεγάλες ακέραιες μεταβλητές έναν πίνακα ημιτόνου ως μία λίστα των αριθμητικών τιμών μιας ημιτονοειδής περιόδου αποθηκεύοντας σταθερές έναν ψηφιακό αναλογικό μετατροπέας που παρέχει από τη μονάδα PWM (analogWrite) και ένα ρολόι αναφοράς που προέρχονται από ένα εσωτερικό χρονόμετρο στο atmega. στον συσσωρευτή η λέξη συντονισμού προστίθεται από το σημαντικό Byte του συσσωρευτή λαμβανεται ως διεύθυνση του sinetable όπου η τιμή γίνεται fetch και μετατρέπεται σε αναλογική της μονάδας του PWM. Τέλος όλη η διαδικασία γίνεται στον κύκλο ρολογιού από μία μέθοδο διακοπής που δρα ως το ρολόι της αναφοράς δηλαδή όλη η εργασία καθορίζεται από τον κύκλο εργασίας.

Όταν μια γεννήτρια ημιτόνου λειτουργεί με την τεχνική PWM (Pulse Width Modulation), αποσκοπεί στη δημιουργία ενός σήματος που ανακλά την επιθυμητή συχνότητα, χρησιμοποιώντας μια σειρά από παλμούς. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι χρήσιμος σε πληθώρα εφαρμογών, από την αυτοκινητική βιομηχανία μέχρι την ηλεκτρονική μουσική και τις ψηφιακές επικοινωνίες.

Κατά τη λειτουργία της, η γεννήτρια ημιτόνου δημιουργεί σταθερές παλμικές κυματομορφές, γνωστές και ως παλμοί PWM. Κάθε παλμός αποτελείται από δύο κύρια καταστάσεις: υψηλή (ON) και χαμηλή (OFF). Ο λόγος της διάρκειας της κατάστασης ON σε σχέση με την συνολική διάρκεια του παλμού ορίζει τον κύκλο εργασίας του PWM.

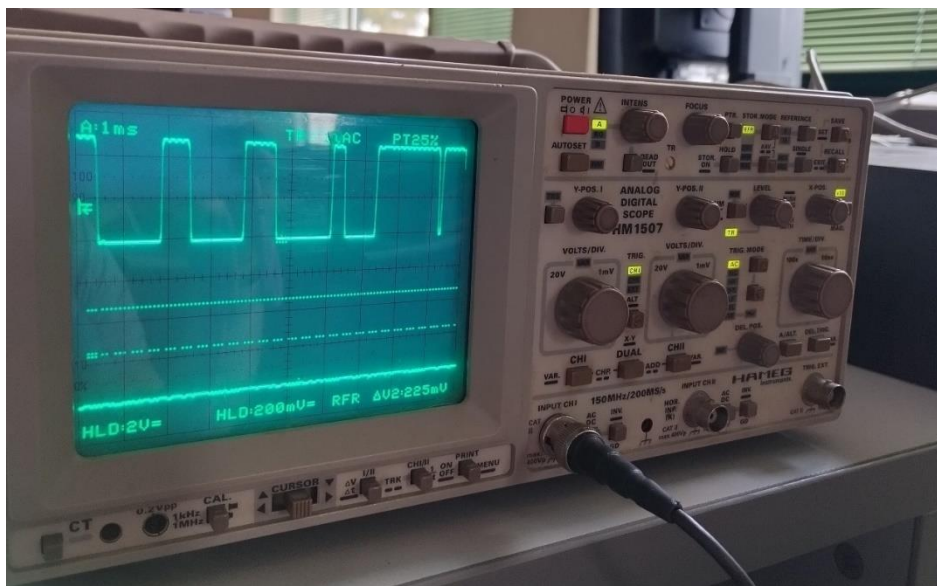
Ο σκοπός του χρησιμοποιούμενου PWM είναι να μεταφέρει την πληροφορία της επιθυμητής συχνότητας μέσω αυτών των παλμών. Αν θεωρήσουμε ότι ο παλμός είναι ένας κυκλικός διακόπτης που ανοίγει και κλείνει με συγκεκριμένο ρυθμό, ο ρυθμός αυτός και η διάρκεια της κατάστασης ON καθορίζουν τη συχνότητα του ημιτόνου που δημιουργείται. Ο πολύ μικρός κύκλος εργασίας αντιστοιχεί σε χαμηλή ένταση, ενώ ο μεγαλύτερος κύκλος εργασίας αντιστοιχεί σε υψηλή ένταση του ημιτόνου. Αυτή η τεχνική επιτρέπει την αποτελεσματική ρύθμιση της έντασης του ημιτόνου με τη χρήση μόνο ενός κυκλώματος PWM, και συνεπώς είναι πολύ χρήσιμη για εφαρμογές όπως ο έλεγχος ταχύτητας κινητήρων, η διαμόρφωση της έντασης φωτισμού σε LED, η παραγωγή ήχου σε ψηφιακές συσκευές, και άλλες πολλές εφαρμογές όπου απαιτείται ακριβής έλεγχος της έντασης.



Εικόνα3.7: Διαγραμμα ροής κωδικα του κυκλώματος

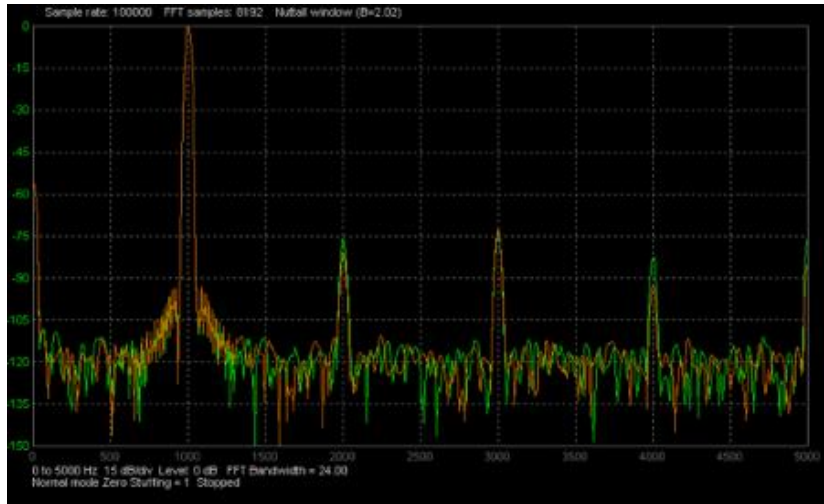
Στην εικόνα 3.7 Βλέπουμε το διάγραμμα ροής για τον προγραμματισμό του Arduino Uno.

Η επεξήγηση του κώδικα βρίσκεται στο παράρτημα στο τέλος της εργασίας.



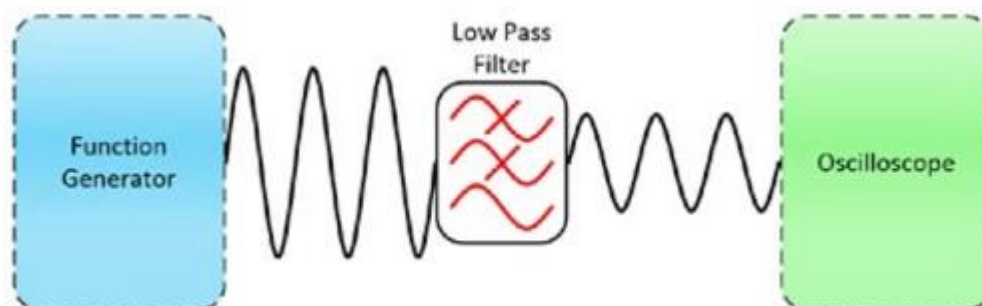
Εικόνα3.8: Το αποτέλεσμα χωρίς την προσθήκη φίλτρου.

Στην εικόνα 3.8 αποτυπώνονται οι αρμονικές του κυκλώματος όλες οι αρμονικές είναι κάτω των 50 db και είναι το Επιθυμητό αποτέλεσμα καθώς Το σήμα που παράγεται από έναν 8bit DAC είναι στα αυτά τα πλαίσια. (  $1/256 = 48 \text{ dB}$ ) Τέλος, Η μεγάλη κορυφή διαπιστώνουμε ότι είναι στα 1.000 Hertz

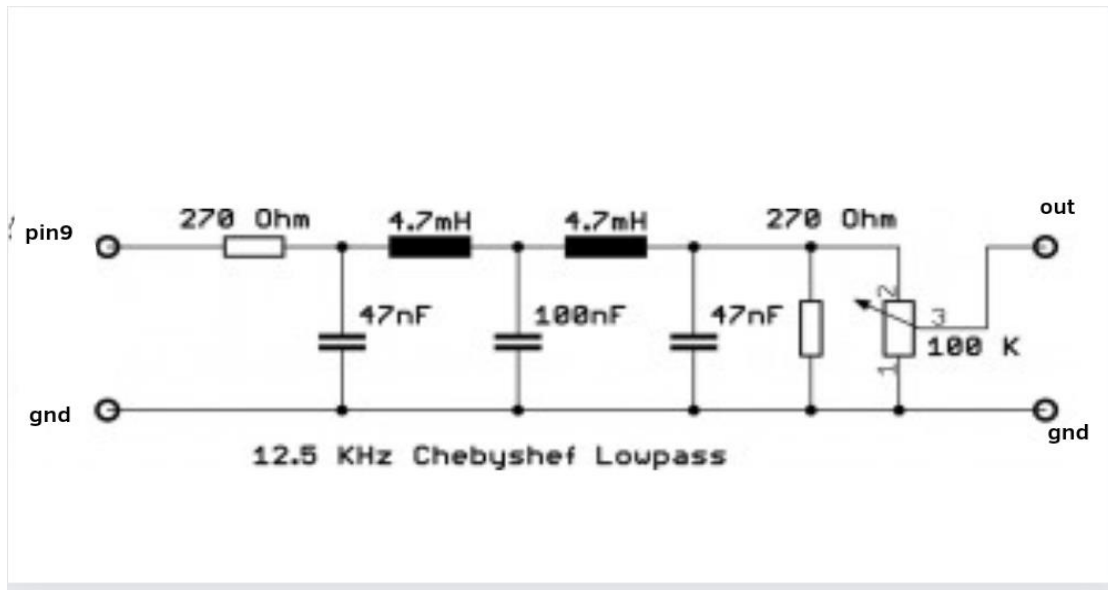


Εικόνα 3.9:Φάσμα αρμονικών

Όπως παρατηρούμε στις προηγούμενες εικόνες , το ημίτονο που αποτυπώνεται στον παλμογράφο δεν μοιάζει με το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αυτό συμβαίνει λόγω της τεχνικής PWM, που διαμορφώνει το σήμα ως παλμό λόγω του κύκλου εργασίας. Επομένως, για να αποτυπωθεί το ημίτονο στον παλμογράφο χρειάζεται να τοποθετηθεί στο κύκλωμα ένα low-pass φίλτρο.



Εικόνα 3.10: Μπλοκ διάγραμμα εφαρμογής χαρακτηρισμού φίλτρου με γεννήτρια συχνοτήτων ώστε να αποτυπωθεί στον παλμογράφο.



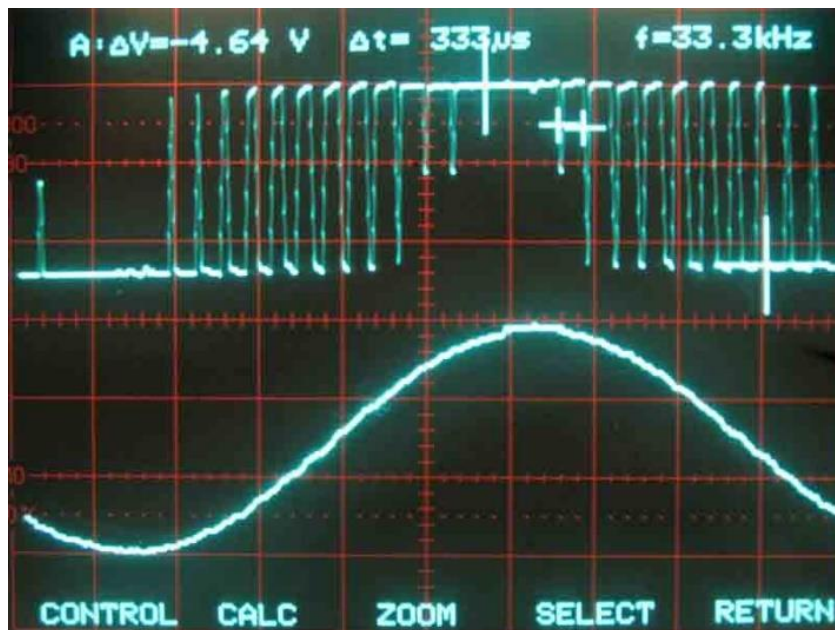
Εικόνα 3.11: Chebyshev 12.5 kHz Lowpass

Το παραπάνω φίλτρο Chebyshev 12.5 kHz Lowpass προορίζεται να περιορίσει τις υψηλές συχνότητες και να επιτρέψει τη μετάδοση συχνοτήτων κάτω από τα 12.5 kHz. Εδώ είναι μερικές πρόσθετες πληροφορίες και λόγοι για τους οποίους θα μπορούσαμε να το προτιμήσουμε:

- Περιορισμός Συχνοτήτων: Το φίλτρο Chebyshev είναι σχεδιασμένο για να αποκόπτει υψηλές συχνότητες πέραν των 12.5 kHz. Αυτό είναι χρήσιμο όταν έχουμε ένα σήμα που περιλαμβάνει υψηλές συχνότητες που δεν μας ενδιαφέρουν και μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα όπως παρεμβολές ή παραμόρφωση.
- Φιλτράρισμα παρεμβολών: Σε πολλές εφαρμογές, όπως η ασύρματη επικοινωνία, η ραδιοφωνία και η επεξεργασία σήματος, οι υψηλές συχνότητες μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές με άλλα σήματα. Το φίλτρο Chebyshev βοηθά στην καταπολέμηση αυτών των παρεμβολών, εξασφαλίζοντας ότι μόνο το επιθυμητό φάσμα των συχνοτήτων περνά.
- Εφαρμογές Ήχου: Στην αναπαραγωγή ήχου, ένα φίλτρο Chebyshev μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του ήχου, καταργώντας υψηλές συχνότητες που μπορεί να δημιουργήσουν σκληρό ήχο ή θόρυβο.
- Διαμόρφωση Σήματος: Σε ψηφιακές επικοινωνίες, το φίλτρο Chebyshev μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον περιορισμό του φάσματος των σημάτων που μεταδίδονται, εξασφαλίζοντας ότι τα σήματα παραμένουν εντός των συχνοτήτων που είναι δυνατόν

να ανιχνευθούν και να αποκρυφθούν από τα λογισμικά ή τις συσκευές που τα λαμβάνουν.

Επομένως, το φίλτρο Chebyshev 12.5 kHz Lowpass είναι ένα ισχυρό εργαλείο για τον περιορισμό συχνοτήτων και τη διατήρηση της ποιότητας σήματος σε πολλές εφαρμογές, καθιστώντας το αξιόπιστη επιλογή για τη βελτίωση της απόδοσης των κυκλωμάτων σας.



Εικόνα 3.12: Το κύκλωμα με την εφαρμογή του φίλτρου.

Στην πάνω μέρος της εικόνας, το σήμα PWM στο pin 9 και στο κάτω μέρος την έξοδο του φίλτρου. Η κυματομορφή του ημιτόνου δεν αποτυπώνεται καθαρά στην εικόνα καθώς ο ψηφιακός παλμογράφος δεν έχει μεγάλη ανάλυση.

## Βιβλιογραφία

- [1]Wikipedia Microcontroller <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller/>
- [2]Purkait, P. (2013). Electrical and electronics measurements and instrumentation. McGraw-Hill Education.
- [3]Gonzalez, G. (2006). Foundations of oscillator circuit design. Artech.
- [4]Williams, J. (Ed.). (1991). Analog circuit design: art, science and personalities. Newnes.
- [5]Ndjountche, T. (2018). Amplifiers, comparators, multipliers, filters, and oscillators. CRC Press.
- [6]Oscillator Circuits: Frontiers in Design, Analysis and Applications
- [7]Predko, M. (2008). Programming and customizing the PIC microcontroller (p. 1263). New York, NY: McGraw-Hill.
- [8]Morton, J. (2005). The PIC microcontroller: your personal introductory course. Elsevier.
- [9]Bayle, J. (2013). C programming for Arduino. Packt Publishing Ltd.
- [10]King, K. N. (2008). C programming: a modern approach. WW Norton & company.
- [11]Ibrahim, D. (2006). Microcontroller based applied digital control. John Wiley & Sons. Wikipedia PIC Microcontoller <http://en.wikipedia.org/wiki/PICmicrocontroller/>

## Παράρτημα

```
#include <Arduino.h>

#include <avr/pgmspace.h> // Απαιτείται για την αποθήκευση του πίνακα στην flash μνήμη

const int wavePin = 9; // Ο ακροδέκτης που θα στείλει το σήμα

// Πίνακας με τις τιμές της ημιτόνου

const uint8_t sineWave[] PROGMEM = {

  128, 140, 152, 164, 175, 186, 196, 206,

  214, 222, 230, 236, 241, 245, 249, 252,

  253, 253, 252, 249, 245, 241, 236, 230,

  222, 214, 206, 196, 186, 175, 164, 152,

  140, 128, 115, 103, 91, 80, 69, 59,

  51, 43, 35, 29, 24, 20, 16, 13,

  12, 12, 13, 16, 20, 24, 29, 35,

  43, 51, 59, 69, 80, 91, 103, 115

};

void setup() {

  pinMode(wavePin, OUTPUT);

  Serial.begin(9600);

}

void loop() {

  for (int i = 0; i < sizeof(sineWave); i++) {

    int outputValue = pgm_read_byte(&sineWave[i]); // Διαβάζει την τιμή από τον πίνακα

    analogWrite(wavePin, outputValue);

    delayMicroseconds(200); // Ρυθμός δειγματοληψίας (5 kHz)

  }

}
```

## Επεξήγηση κώδικα

- **#include <Arduino.h>**: Αυτή η εντολή περιλαμβάνει το απαραίτητο αρχείο κεφαλίδας για το Arduino.
- **#include <avr/pgmspace.h>**: Αυτή η εντολή περιλαμβάνει το αρχείο κεφαλίδας που επιτρέπει την ανάγνωση από την flash μνήμη.
- **const int wavePin = 9;**: Ορίζει τον ακροδέκτη 9 ως τον ακροδέκτη εξόδου για το σήμα του ημιτόνου.
- **const uint8\_t sineWave[] PROGMEM = {...};**: Αυτή η εντολή δημιουργεί έναν πίνακα sineWave που περιέχει τις τιμές της κυματομορφής του ημιτόνου. Ο πίνακας αυτός είναι αποθηκευμένος στη flash μνήμη χρησιμοποιώντας το PROGMEM. Ο πίνακας sineWave περιέχει τις τιμές που αντιστοιχούν στην κυματομορφή ενός ημιτόνου. Αυτές οι τιμές προκύπτουν από τη μαθηματική αναπαράσταση της συνάρτησης sine (ημιτόνου) στο πεδίο των ακεραίων. Οι συγκεκριμένες τιμές που χρησιμοποιούνται είναι μέρος της διακύμανσης της συνάρτησης sine και καθορίζουν την τάση στην κάθε στιγμή του ημιτόνου. Ο τρόπος υπολογισμού αυτών των τιμών είναι αρκετά προχωρημένος και βασίζεται στη μαθηματική σχέση της συνάρτησης sine. Για να προσεγγίσουμε την κυματομορφή του ημιτόνου, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε προκαθορισμένες τιμές από έναν πίνακα που καλύπτει έναν ολόκληρο κύκλο της συνάρτησης sine.

Οι τιμές που βρίσκονται στον πίνακα sineWave που παρέθεσα είναι οι τιμές της συνάρτησης sine για έναν πλήρη κύκλο (360 μοίρες) που έχουν μετατραπεί από το εύρος [-1,1] σε [0,255], ώστε να είναι συμβατές με την analogWrite που χρησιμοποιούμε για την έξοδο PWM στον ακροδέκτη. Αυτό επιτυγχάνεται με την προσθήκη 1 και τον πολλαπλασιασμό με 128.

$$y = \sin(\theta)$$

- $y$  είναι η τιμή της συνάρτησης sine.
- $\theta$  είναι η γωνία (σε ακτίνια).

Για να μετατρέψουμε τις τιμές της συνάρτησης sine (που έχουν εύρος -1 έως 1) σε αυτό το εύρος του 0-255, πρέπει να πολλαπλασιάσουμε και να μετατρέψουμε τις τιμές. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε το 128 είναι ότι αυτό είναι το μέσο της ακριβούς μετατροπής. Δηλαδή, αν η συνάρτηση sine έχει μια τιμή 0, τότε η μετατροπή της ( $0 * 128$ ) θα είναι 0, που αντιστοιχεί στο 0 στην analogWrite. Όταν η συνάρτηση sine έχει την μέγιστη τιμή 1, η μετατροπή της ( $1 * 128$ ) θα είναι 128, που αντιστοιχεί στο μισό του εύρους της analogWrite, δηλαδή τη μέση τιμή 127. Έτσι, όταν πολλαπλασιάζουμε με 128, το εύρος της συνάρτησης sine μετατρέπεται στο εύρος 0-255 που χρησιμοποιείται από την analogWrite.

- **void setup() {...}**: Η συνάρτηση setup χρησιμοποιείται για την αρχικοποίηση του περιβάλλοντος. Σε αυτό τον κώδικα, ορίζουμε τον ακροδέκτη wavePin ως έξοδο.
- **void loop() {...}**: Η συνάρτηση loop είναι όπου εκτελείται ο βρόχος του προγράμματος.
- **for (int i = 0; i < sizeof(sineWave); i++) {...}**: Ο βρόχος for χρησιμοποιείται για να προσπεράσει (ή "διατρέξει") όλα τα στοιχεία του πίνακα sineWave με στόχο τη χρήση τους στη συνέχεια του προγράμματος. Η μεταβλητή  $i$  λειτουργεί ως μετρητής που αυξάνεται κατά ένα με κάθε επανάληψη, επιτρέποντας την προσπέραση όλων των τιμών του πίνακα με συγκεκριμένη σειρά.

- **int outputValue = pgm\_read\_byte(&sineWave[i]);**: Στο πρόγραμμά μας, χρησιμοποιούμε την εντολή `int outputValue = pgm_read_byte(&sineWave[i])` για να διαβάσουμε ένα byte από την flash μνήμη και να αποθηκεύσουμε αυτήν την τιμή στη μεταβλητή `outputValue`. Αυτή η ενέργεια εκτελείται εντός ενός βρόγχου που επαναλαμβάνεται για κάθε τιμή του δείκτη `i`. Η `pgm_read_byte()` συνάρτηση χρησιμοποιείται για να διαβάσει δεδομένα από την flash μνήμη του μικροελεγκτή Arduino. Στην προκειμένη περίπτωση, διαβάζουμε το byte που βρίσκεται στη θέση `i` του πίνακα `sineWave`. Αυτή η τιμή `outputValue` χρησιμοποιείται στη συνέχεια για να καθορίσει την ένταση του σήματος που εξέρχεται από τον ακροδέκτη `wavePin` μέσω της `analogWrite()`. Με αυτόν τον τρόπο, μπορούμε να παράγουμε μια κυματομορφή sine μέσω αναλογικής εξόδου PWM.

- **analogWrite(wavePin, outputValue);**: Η εντολή `analogWrite()` στο πρόγραμμα Arduino χρησιμοποιείται για να εγγράψει μια αναλογική τάση σε έναν αναλογικό ακροδέκτη (PWM, Pulse Width Modulation). Ο αναλογικός ακροδέκτης επιτρέπει τον έλεγχο της τάσης εξόδου μεταξύ 0 και 5V, με το 0 να αντιπροσωπεύει την ελάχιστη τάση (πλήρως απενεργοποιημένο) και το 5V να αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τάση (πλήρως ενεργοποιημένο).

Η εντολή `analogWrite()` λαμβάνει δύο παραμέτρους:

1. Ο αναλογικός ακροδέκτης (`pin`): Αυτός είναι ο ακροδέκτης στον οποίο θέλετε να εγγράψετε την αναλογική τάση. Στο πρόγραμμά σας, χρησιμοποιείτε τη μεταβλητή `wavePin`, η οποία έχει οριστεί ως 9 και αντιπροσωπεύει τον αναλογικό ακροδέκτη 9.
  2. Η τιμή της αναλογικής τάσης (`value`): Αυτή είναι η τιμή της αναλογικής τάσης που θέλετε να εγγράψετε στον αναλογικό ακροδέκτη. Στο πρόγραμμά σας, χρησιμοποιείτε τη μεταβλητή `outputValue`, η οποία παίρνει τιμές από τον πίνακα `sineWave`. Όταν εκτελείται η `analogWrite(wavePin, outputValue)`, η τιμή που βρίσκεται στη μεταβλητή `outputValue` εγγράφεται στον αναλογικό ακροδέκτη που έχει οριστεί στη μεταβλητή `wavePin`. Αυτό επιτρέπει τον έλεγχο της φωτεινότητας ή της τάσης εξόδου, ανάλογα με την τιμή της `outputValue`. Οι τιμές που μπορεί να πάρει η `outputValue` αντιστοιχούν σε διαφορετικά επίπεδα φωτεινότητας ή τάσης, εξαρτώμενα από την εφαρμογή.
- **delayMicroseconds(200);**: Χρησιμοποιείται η `delayMicroseconds` για να περιμένει για ένα μικρό χρονικό διάστημα, ρυθμίζοντας τον ρυθμό δειγματοληψίας. Σε αυτήν την περίπτωση, ρυθμίσαμε τον ρυθμό στα 5 kHz.

