ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Εργασία: Επιταχυνσιόμετρο

Κοστίνης Δημήτριος
1059482

Περιεχόμενα

Εισαγωγή

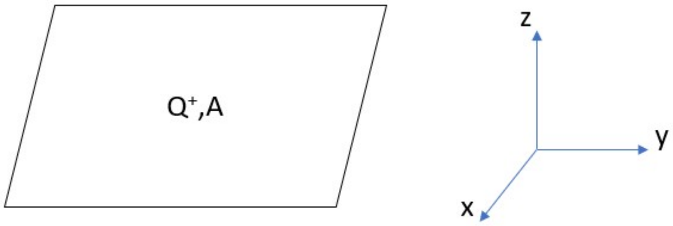
Στην σημερινή εποχή περιβαλλόμαστε από αισθητήρες οι οποίοι μετατρέπουν σήματα του εξωτερικού περιβάλλοντος (μηχανικά, μαγνητικά, …) σε ηλεκτρικά σήματα. Αυτοί βρίσκονται στα κινητά μας τηλέφωνα, στα αυτοκίνητα ακόμα και σε διαστημόπλοια, για να μετρήσουν ένα μέγεθος προς μελέτη ή να προστατεύσουν τον άνθρωπο από ένα ατύχημα. Σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε γενικά με την σχεδίαση ενός επιταχυνσιόμετρου το οποίο θα τοποθετηθεί σε ένα αμάξι και θα δίνει σήμα να ανοίγουν οι αερόσακοι, όταν το αμάξι συγκρουστεί με ορισμένη ταχύτητα.

Το επιταχυνσιόμετρο είναι ένας αισθητήρας ο οποίος μετράει την επιτάχυνση ενός σώματος και υπάρχουν διάφοροι μηχανικοί ή ηλεκτρικοί τρόποι για να την μετρήσουμε. Εμείς στην συγκεκριμένη άσκηση θα αναλύσουμε έναν αισθητήρα μεταβλητής χωρητικότητας (Differential capacitive sensing), δηλαδή θα έχουμε τρεις πλάκες με συγκεκριμένη τοποθέτηση ώστε να δημιουργούνται δύο πυκνωτές, όπου η μία από τις δύο θα μετακινείται και θα μεταβάλλει την χωρητικότητα των δύο άλλων πυκνωτών και θα λαμβάνουμε την τάση λόγω της κίνησης αυτής και θα την επεξεργαστούμε.

Πυκνωτής [1]

Αν πάρουμε μία επίπεδη πλάκα η οποία έχει θετικό φορτίο Q^+ και επιφάνεια A (Εικόνα 1), τότε από τον νόμο του Gauss το ηλεκτρικό πεδίο ισούται:

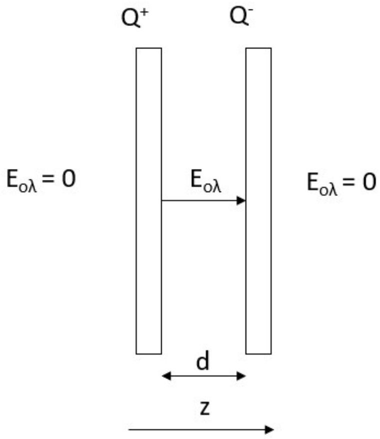
$$\vec{E} = \begin{cases} \dfrac{Q}{2\varepsilon_r\varepsilon_o A}\hat{z}, & z > 0 \\ -\dfrac{Q}{2\varepsilon_r\varepsilon_o A}\hat{z}, & z < 0 \end{cases} \quad (1)$$



Εικόνα 1: Επίπεδη πλάκα με φορτίο Q^+ και επιφάνεια A.

Αν τώρα έχουμε μία θετική και αρνητική πλάκα σε απόσταση d μεταξύ τους με την ίδια τιμή φορτίου και επιφάνεια A (Εικόνα 2), τότε το συνολικό ηλεκτρικό πεδίο είναι μηδέν στο εξωτερικό των πλακών και διπλάσιο στο εσωτερικό. Οπότε το ηλεκτρικό πεδίο του επίπεδου πυκνωτή θα είναι:

$$E_{o\lambda} = \frac{Q}{\varepsilon_r\varepsilon_o A} \quad (2)$$



Εικόνα 2: Επίπεδος πυκνωτής.

Από την σχέση (2) βρίσκουμε την διαφορά δυναμικού των δύο πλακών:

$$V = \int_0^d E_{o\lambda} dz = \int_0^d \frac{Q}{\varepsilon_r\varepsilon_o A} dz \Rightarrow$$

$$V = \frac{Q}{\varepsilon_r\varepsilon_o}\frac{d}{A} (3)$$

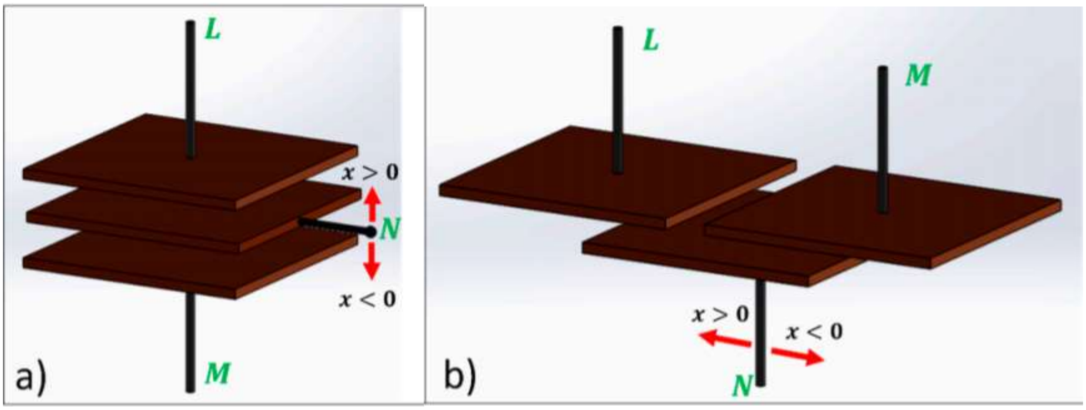
Και έτσι υπολογίζουμε την χωρητικότητα του επίπεδου πυκνωτή:

$$C = \frac{Q}{V} => C = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{A}{d} \ (4)$$

Στην άσκηση αυτή η χωρητικότητα των πυκνωτών θα πρέπει να είναι μεταξύ των τάξεων pF και fF. Αν το ε_r = 1 και ε_o = 8,854x10^{-12} F/m τότε το πηλίκο της επιφάνειας Α προς την απόσταση d θα πρέπει να είναι μεταξύ 1m – 10^{-3}m.

Αισθητήρας μεταβλητής χωρητικότητας (Differential capacitive sensing)

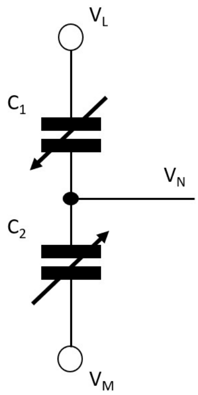
Όπως αναφέραμε ο αισθητήρας μεταβλητής χωρητικότητας αποτελείται από τρεις πλάκες μία από τις δύο μετακινείται με την βοήθεια ενός ελατηρίου σταθεράς k και μεταβάλλει την χωρητικότητα των δύο πυκνωτών. Αν δηλαδή η χωρητικότητα του ενός πυκνωτή μεγαλώσει, η χωρητικότητα του άλλου θα μικρύνει. Έχουμε δύο είδη αισθητήρων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3), που διακρίνονται από την τοποθέτηση των πλακών και από το μέγεθος που μεταβάλλεται κατά την μετακίνηση της πλάκας.



Εικόνα 3: Τύποι αισθητήρων μεταβλητής χωρητικότητας.[2]

Ο αισθητήρας αριστερά αποτελείται από τρεις πλάκες οι οποίες οι δύο είναι σταθερές και κινείται μόνο η ενδιάμεση. Με αυτόν τον τρόπο η επιφάνεια των πλακών παραμένει σταθερή και μεταβάλλεται η απόσταση των δύο πυκνωτών. Ο δεξιός αισθητήρα έχει δύο πλάκες στην σειρά και την κινούμενη από κάτω. Έτσι μεταβάλλεται η επιφάνεια των πλακών των πυκνωτών και παραμένει η απόσταση μεταξύ τους σταθερή.

Γενικά οι δύο αυτές διατάξεις μπορεί να εκφραστούν με το παρακάτω κύκλωμα.

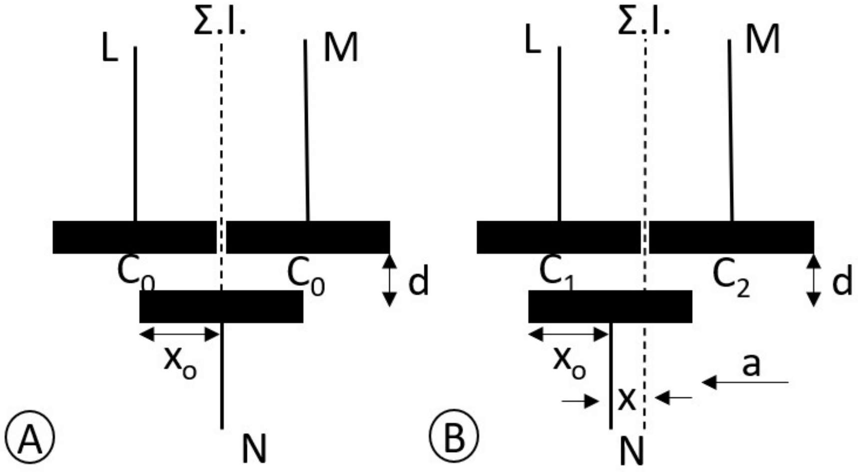


Εικόνα 4: Γενικό κύκλωμα αισθητήρα μεταβλητής χωρητικότητας.

Στην άσκηση αυτή θα χρησιμοποιήσουμε τον αισθητήρα μεταβλητής επιφάνειας και σταθερής απόστασης.

Ανάλυση αισθητήρα μεταβλητής επιφάνειας και σταθερής απόστασης

Με την διάταξη της Εικόνας 5 θα βρούμε πως μεταβάλλεται η χωρητικότητα των δύο πυκνωτών σε σχέση με την κίνηση της πλάκας N.



Εικόνα 5: Κύκλωμα αισθητήρα μεταβλητής επιφάνειας και σταθερής απόστασης. A) Η N πλάκα σε ηρεμία. B) Όταν μετακινείται κατά x.

Στην Εικόνα 5A οι πλάκες βρίσκονται σε ηρεμία και έτσι οι δύο πυκνωτές έχουν την ίδια χωρητικότητα:

$$C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{A}{d}$$

Θεωρούμε ότι η απόσταση των πλακών LM είναι περίπου μηδέν και η κάθε πλάκα έχει μήκος k. Οπότε η χωρητικότητα στο σημείο ισορροπίας είναι η εξής:

$$C_0 = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{k x_o}{d}$$

Όταν στην πλάκα N ασκηθεί μία δύναμη τότε οι επιφάνειες των πυκνωτών θα μεταβληθούν και θα ισούνται:

$$A_1 = k(x_o + x)$$

$$A_2 = k(x_o - x)$$

Άρα οι χωρητικότητες των πυκνωτών είναι διαφορετικές και ισούνται:

$$C_1 = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{k(x_o + x)}{d}$$

$$C_2 = \varepsilon_r \varepsilon_o \frac{k(x_o - x)}{d}$$

Τώρα εάν πάρουμε το πηλίκο των πυκνωτών C_1 και C_2 προς το C_0 έχουμε τους εξής τύπους:

$$\frac{C_1}{C_0} = \frac{x_o + x}{x_o} = 1 + \frac{x}{x_o}$$

$$\frac{C_2}{C_0} = \frac{x_o - x}{x_o} = 1 - \frac{x}{x_o}$$

Αν θέσουμε λ τον λόγο της μετακίνησης x προς το x_o τότε οι εξισώσεις γράφονται ως εξής:

$$\frac{C_1}{C_0} = 1 + \lambda$$

$$\frac{C_2}{C_0} = 1 - \lambda$$

Διαιρώντας τις δυο παραπάνω εξισώσεις, θα βρούμε την σχέση του λόγου λ με τις δύο χωρητικότητες.

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{1 + \lambda}{1 - \lambda} =>$$

$$\lambda = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}, -1 < \lambda < 1$$

Ο λόγος λ έχει διάστημα τιμών από -1 μέχρι το 1 και εξάγουμε τα εξής συμπεράσματα:

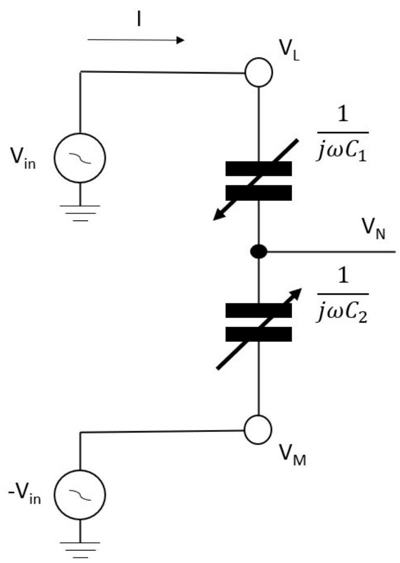
$$\lambda = 0: \textit{Η πλάκα Ν βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας.}$$

$$\lambda > 0: C_1 > C_2 \textit{ και η πλάκα Ν έχει μετακινηθεί αριστερά.}$$

$$\lambda < 0: C_1 < C_2 \textit{ και η πλάκα Ν έχει μετακινηθεί δεξιά.}$$

Ο ίδιος λόγος ισχύει και για τον άλλο τύπο αισθητήρα.

Ανάλυση κυκλώματος αισθητήρα μεταβλητής χωρητικότητας



Εικόνα 6: Γενικό κύκλωμα του αισθητήρα.

Στην Εικόνα 6 βλέπουμε το γενικό κύκλωμα του αισθητήρα μεταβλητής χωρητικότητας το οποίο θα είναι το βασικό κύκλωμα για την κατασκευή του επιταχυνσιόμετρου. Τα άκρα L και M τροφοδοτούνται με εναλλασσόμενες πηγές τάσεις, οι οποίες έχουν την ίδια ενεργό τιμή, την ίδια συχνότητα αλλά αντίθετες φάσεις.

Οι διαφορές δυναμικού που αναπτύσσονται στα άκρα LN και NM είναι οι εξής:

$$V_{LN} = V_{in} - V_N = \frac{1}{j\omega C_1} I$$

$$V_{NM} = V_N + V_{in} = \frac{1}{j\omega C_2} I$$

Άμα διαιρέσουμε τις δύο αυτές εξισώσεις έχουμε:

$$\frac{V_{in} - V_N}{V_N + V_{in}} = \frac{C_2}{C_1}$$

Με πράξεις καταλήγουμε σε μία σχέση που συνδέει την τάση της πλάκας N με τον λόγο λ και την τάση εισόδου:

$$V_N = \lambda V_{in}$$

Παρατηρούμε πώς η τάση της πλάκας που μετακινείται είναι ανάλογη της τάσης που εφαρμόζουμε στις άλλες δύο. Έτσι βγάζουμε τα εξής συμπεράσματα:

$$\lambda = 0 => V_N = 0, Κατάσταση\ ηρεμίας.$$

$$\lambda > 0 => V_N > 0, κινείται\ προς\ την\ αριστερή\ πλευρά.$$

$$\lambda < 0 => V_N < 0, κινείται\ προς\ την\ δεξιά\ πλευρά.$$

Στο κύκλωμα η τάση εισόδου θα είναι ίση με:

$$V_{in} = 0{,}2\sin(2\pi 400t)$$

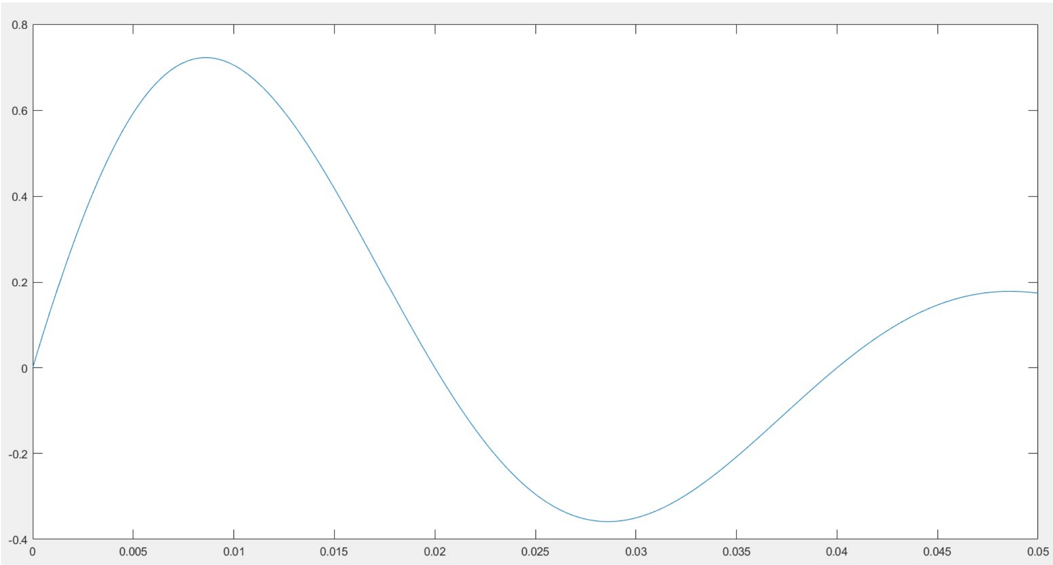
Οπότε η τάση στο άκρο N θα ισούται:

$$V_N = 0{,}2\lambda\sin(2\pi 400t)$$

Αν θεωρήσουμε ότι ο λόγος λ μεταβάλλεται σύμφωνα με τον παρακάτω τύπο:

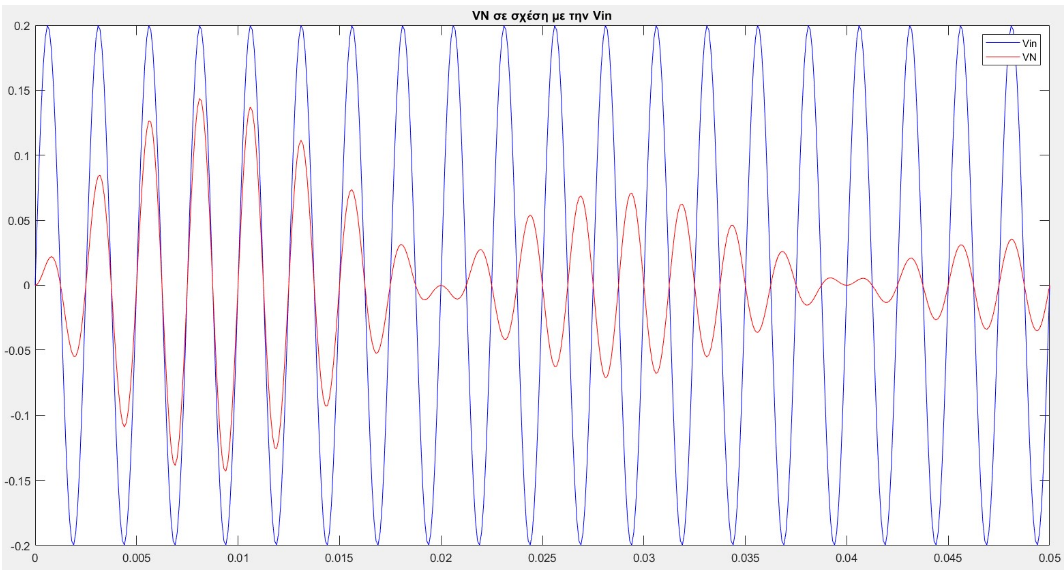
$$\lambda = e^{-35t}\sin(2\pi 25t)$$

δηλαδή εκτελεί φθίνουσα ταλάντωση με γραφική παράσταση:

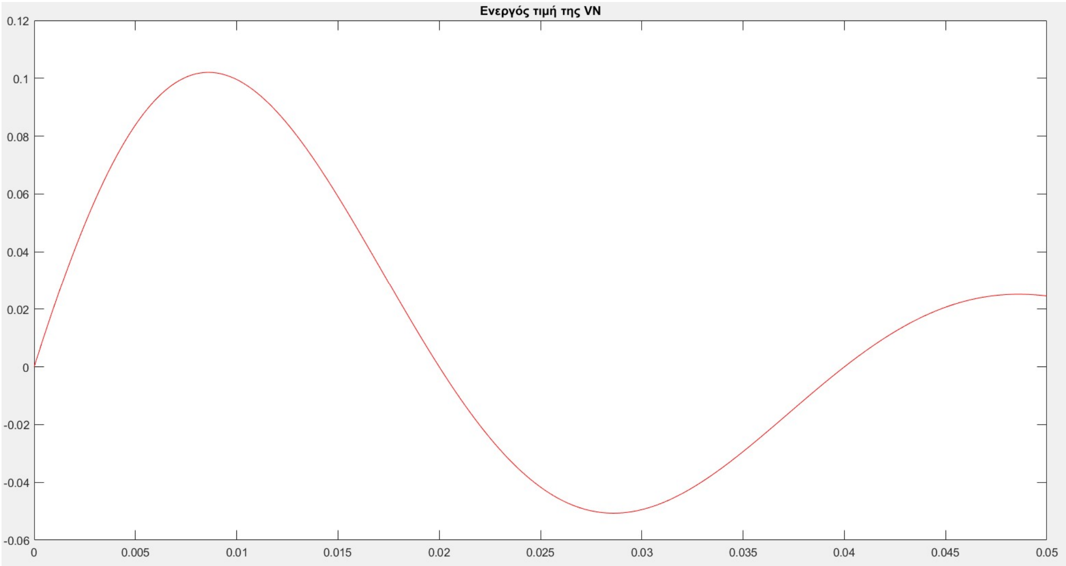


Εικόνα 7: Κυματομορφή λόγου λ.

τότε η τάση V_N σε σχέση με την V_{in} μεταβάλλεται με τον εξής τρόπο:



Εικόνα 8: Τάση εισόδου (Μπλε) με την τάση της πλάκας N (κόκκινο).

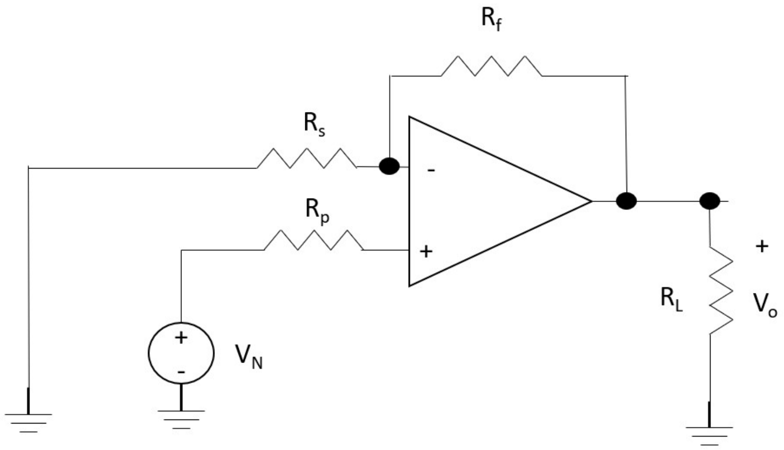


Εικόνα 9: Ενεργός τιμή της τάσης της πλάκας N.

Παρατηρούμε ότι η τάση V_N και η ενεργός τιμή έχει την ίδια μορφή κύμανση με την μεταβολή του λόγου λ. Άρα μετρώντας μόνο την τάση V_N μπορούμε να καθορίσουμε αν πρέπει να ανοίξει ο αερόσακος ή όχι.

Ενίσχυση κυκλώματος αισθητήρα [3]

Επειδή η V_N είναι σχετικά μικρή στην τάξη τον mV και συγκεκριμένα μικρότερη της τάσης εισόδου V_{in} τον 200mV, θα πρέπει να ενισχύσουμε το σήμα με έναν ενισχυτή. Στην συγκεκριμένη άσκηση θα χρησιμοποιήσουμε έναν τελεστικό ενισχυτή μη-αντιστρέφουσας συνδεσμολογίας. Οπότε το κύκλωμα είναι το εξής:



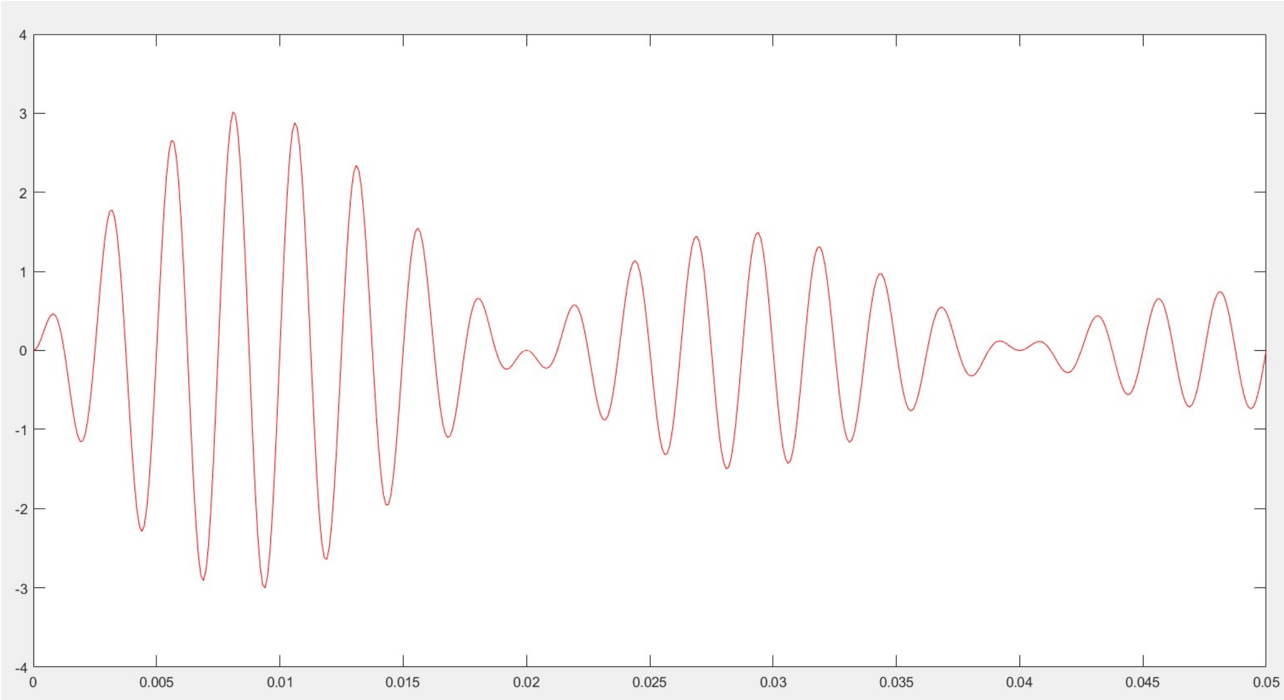
Εικόνα 10: Τελεστικός ενισχυτής μη-αντιστρέφουσας συνδεσμολογίας.

Στο κύκλωμα θεωρούμε την τάση V_c ως μία πηγή τάσης που συνδέεται σε σειρά με μία αντίσταση και με το θετικό πόλο του τελεστικού και V_o την έξοδό του κυκλώματος αλλά και την τάση που δημιουργείται στο φορτίο R_L, η οποία παριστάνει τα υπόλοιπα συστήματα που θα συνδέσουμε στο κύκλωμα. Σε ένα ιδανικό τελεστικό ενισχυτή, το κέρδος κλειστού βρόγχου είναι ανεξάρτητο από το φορτίο και εξαρτάται μόνο από τις αντιστάσεις R_s και R_f. Το κέρδος αυτό ισούται:

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_S}$$

Οι επιλογές των αντιστάσεων θα πρέπει να είναι τέτοιες έτσι ώστε να έχουμε κέρδος κοντά στα 20, για να είναι η τάση εξόδου στην τάξη τον V και θα επιλέξουμε τιμές αντιστάσεων ώστε ο τελεστικός να μην φτάσει στον κόρο. Για παράδειγμα για R_f = 20kΩ και R_s = 1kΩ το κέρδος του ενισχυτή είναι 21.

Όποτε η έξοδος του τελεστικού ενισχυτή σύμφωνα με το παραπάνω παράδειγμα θα είναι η εξής:



Εικόνα 11: Ενίσχυση τάσης πλάκας Ν.

Δύναμη που ασκείται στην πλάκα

Όταν ένα αμάξι κινείται με μία ταχύτητα, κινείται και το επιταχυνσιόμετρο με την ίδια ταχύτητα. Αν το αμάξι συγκρουστεί για παράδειγμα σε ένα τοίχο, η δύναμη που θα αναπτυχθεί κατά την σύγκρουση στο αμάξι θα είναι ανάλογη της δύναμης στην πλάκα N του μεταβλητού πυκνωτή λόγω αδράνειας και έτσι αυτή η πλάκα θα αρχίζει να εκτελεί φθίνουσα ταλάντωση όπως δείξαμε στην Εικόνα 7.

Η δύναμη που αναπτύσσεται στην πλάκα έχει την παρακάτω εξίσωση:

$$F = ma = kx$$

Όπου x η μετατόπιση της πλάκας N, m η μάζα του της πλάκας, a η επιτάχυνση και k η σταθερά του ελατηρίου που συγκρατεί την πλάκα. Επίσης το x ισούται:

$$x = {}^{a}/_{{\omega_o}^2} \ (5)$$

όπου ω_o η συχνότητα ταλάντωσης του ελατηρίου.

Με την παραπάνω ανάλυση μπορούμε να συσχετίσουμε την δύναμη με την τάση εξόδου του επιταχυνσιόμετρου. Ο λόγος λ ισούται:

$$\lambda = \frac{x}{x_o} => x = \lambda x_o \ (6)$$

Σύμφωνα από την (5), (6) έχουμε:

$$\lambda = \frac{a}{x_o {\omega_o}^2} => a = \lambda x_o {\omega_o}^2 \ (7)$$

Άρα με την (6) και (7) η εξίσωση της δύναμη σε σχέση με τον λόγο λ θα ισούται:

$$F = m\,\lambda x_o {\omega_o}^2 = k\lambda x_o$$

Επίσης το λ είναι ο λόγος των ενεργών τιμών της τάσης V_N προς την V_{in}. Οπότε η εξίσωση της δύναμης γράφεται:

$$F = m\,\frac{V_N}{V_{in}} x_o {\omega_o}^2 = k\frac{V_N}{V_{in}} x_o$$

Όποτε η τάση της πλάκας N γράφεται σε συνάρτηση με την δύναμη:

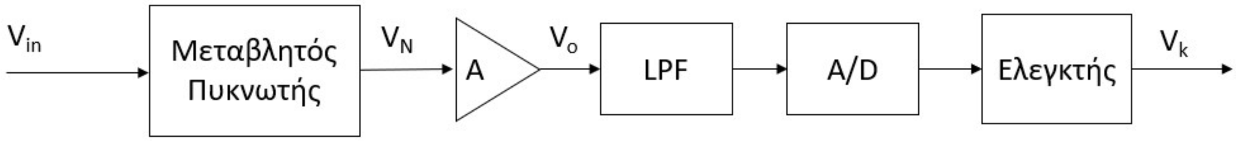
$$V_N = \frac{FV_{in}}{m x_o {\omega_o}^2} = \frac{FV_{in}}{k x_o}$$

Και σύμφωνα με το κέρδος:

$$V_o = 21\frac{FV_{in}}{m x_o {\omega_o}^2} = 21\frac{FV_{in}}{k x_o}$$

Με αυτό τον τρόπο αν γνωρίζουμε την δύναμη που φέρνει σε κίνδυνο τον οδηγό τότε ξέρουμε και την τάση που χρειάζεται για να ανοίξουν οι αερόσακοι. Αυτή την τάση να την ονομάσουμε τάση κινδύνου.

Γενική σχεδίαση επιταχυνσιόμετρου



Εικόνα 12: Γενικό κύκλωμα επιταχυνσιόμετρου.

Στον παραπάνω σχήμα βλέπουμε το γενικό κύκλωμα του αισθητήρα του επιταχυνσιόμετρου. Από αριστερά προς τα δεξιά έχουμε την είσοδο V_{in} που τροφοδοτεί τους διαφορικούς πυκνωτές και από εκεί παίρνουμε την τάση V_N της μεταβαλλόμενης πλάκας η οποία ενισχύεται στον τελεστικό ενισχυτή. Στην συνέχεια την τάση εξόδου του τελεστικού (V_o) την περνάμε μέσα από ένα φίλτρο, για να αφαιρέσουμε τον θόρυβο και μετά το ψηφιοποιούμε με συχνότητα δειγματοληψίας μεγαλύτερη από την διπλάσια μέγιστη συχνότητα που φτάνει η ταλάντωση της πλάκας. Αυτή την συχνότητα μπορούμε να την υπολογίσουμε μέσω πειραμάτων.

Η ψηφιοποίηση μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας 2-bit. Δηλαδή το σήμα μετά το φίλτρο, όταν δειγματολειπτούμε σημεία στα οποία η τάση κατά απόλυτη τιμή είναι μεγαλύτερη από την τάση κινδύνου τότε μπορούμε να τα εκφράσουμε ως ‘10’ για θετικές τιμές και ‘11’ για αρνητικές. Αν είναι μικρότερη τότε αναπαριστόνται ως ‘00’. Και έτσι γίνεται πιο εύκολος ο έλεγχος από το σύστημα του ελεγκτή ο οποίος αν δει τις τιμές ‘11’ και ‘10’ στέλνει μέσω της τάσης V_k, σήμα για να ανοίξουν οι αερόσακοι και ο άνθρωπος να σωθεί από κάποιο δυστύχημα.

Βιβλιογραφία

[1]: ΘΕΟΔΩΡΟΣ Δ. ΤΣΙΜΠΟΥΚΗΣ, Ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, 2016, ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΚΡΗΤΗΣ

[2]: Gianluca Barile, Giuseppe Ferri , Francesca Romana Parente, Vincenzo Stornelli, Alessandro Depari, Alessandra Flammini and Emiliano Sisinni , *Linear Integrated Interface for Automatic Differential Capacitive Sensing,* 29 August 2017, Figure 1

[3]: ΝΙΚΟΣ Ι. ΜΑΡΓΑΡΗΣ, ΑΝΑΛΥΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ, 2017, ΤΖΙΟΛΑΣ

Σημειώσεις

PowerPoint: Εικόνες 1, 2, 4, 5, 6, 10, 12

MATLAB: Εικόνες 7, 8, 9, 11