
2^η Εργασία στο μάθημα των Ηλεκτρικών Μετρητικών Διατάξεων

*Με θέμα την σχεδίαση επιταχυνσιόμετρου για
κατασκευή συστήματος αερόσακου*

Ονοματεπώνυμο: Σταματίου Μάριος Χρήστος

A.M. : 1066488

Έτος: 3^ο

Επιβλέπον Καθηγητής : Αλέξιος Μπίρμπας

Περιεχόμενο

- 1.) Εισαγωγή
- 2.) Φυσική Αξελερόμετρων & Γνωστικό Υπόβαθρο
- 3.) Σχεδίαση Διάταξης & Λογική Σχεδίασης
- 4.) Βιβλιογραφία

1.) Εισαγωγή

Τα επιταχυνσιόμετρα -ή αλλιώς και αξελερόμετρα – είναι συσκευές οι οποίες η χρήση τους πλέον είναι ευρέως διαδεδομένη . Τα επιταχυνσιόμετρα μετρούν την επιτάχυνση ενός κινούμενου σώματος . Έτσι - αφού μπορούμε να μετρήσουμε την κλίση ,τους κραδασμούς , τις δονήσεις καθώς και την αδρανειακή επιτάχυνση - τα αξελερόμετρα καθίστανται απαραίτητες συσκευές για συστήματα πλοήγησης , βιοϊατρικής , παρακολούθησης κραδασμών κ.ά . Με την ανάπτυξη του κλάδου των μικρο-ηλεκτρο-μηχανικών συστημάτων (Micro-Electro-Mechanical Systems a.k.a MEMS) , τα MEMS αξελερόμετρα πιά είναι ευρέως διαθέσιμα στο κοινό και έχουν ενσωματωθεί ακόμα και σε συσκευές όπως τα κινητά μας , και σε πολλά ρομπότ. Όπως προαναφέρθηκε , το φάσμα εφαρμογών τους είναι απύθμενο , βέβαια μπορεί να περιγραφεί μερικώς από το παρακάτω γράφημα.

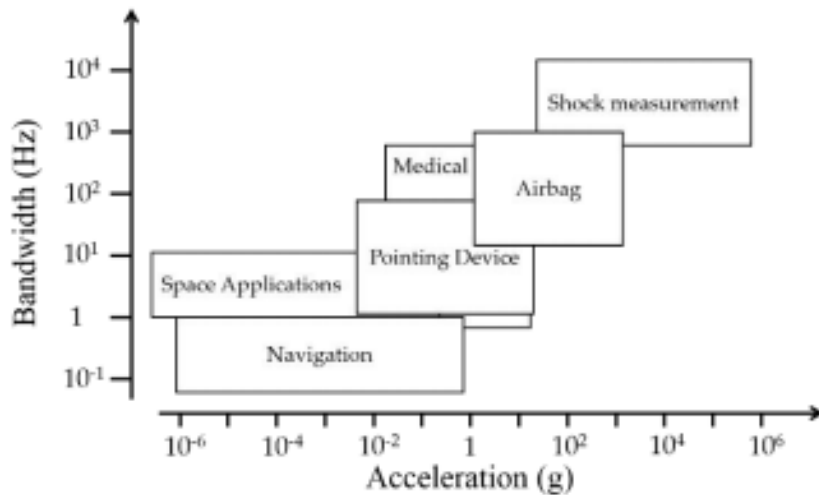


Figure 1 : Περιοχή εφαρμογών επιταχυνσιόμετρων και το εύρος ζώνης επίδοσης .

Το μικρό κόστος , μέγεθος , η μικρή κατανάλωση , η μικρή επαναληψιμότητα και η υψηλή ευαισθησία αποτελούν κύριοι παράγοντες στην τεράστια ευελιξία σχεδιασμού αυτών. Με διάφορες τεχνικές ενσωμάτωσης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων (*Integrated Circuits - IC*) και με επιπρόσθετες κυκλωματικές διατάξεις η ακρίβεια των επιταχυνσιόμετρων βελτιώνεται δραματικά .

Τα MEMS αξελερόμετρα έχουν διάφορους μηχανισμούς λειτουργίας και έχουν κατηγοριοποιηθεί σε ομάδες με βάση την τεχνική μεταγωγής που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία τους. Μερικές από τις πιο συχνές τεχνικές είναι **θερμικές** , βασισμένες στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο (**piezoresistive & piezoelectric**) και χωρητικές (**capacitive**). Τα θετικά των **capacitive accelerometers** είναι πως έχουν μικρότερη εξάρτηση θερμοκρασία – σε αντίθεση με τα *piezoresistive* – έχουν καλύτερη απόκριση , μεγάλη ευαισθησία στις διαφορές δυναμικού , μικρό (παρασιτικό) θόρυβο και μικρή ολίσθηση ρεύματος. Επιπλέον , εκτός της απλότητας τους ,τα χωρητικά αξελερόμετρα λόγω της μικρής τους ενεργειακής κατανάλωσης είναι και περισσότερο ανθεκτικά .

Η λογική λειτουργίας με βάση το σχήμα στο figure 2 είναι ότι μετράμε την μεταβολή στον πυκνωτή με βάση την τάση εξόδου . Κάνοντας τον μηχανισμό του αισθητήρα διαφορικό μπορούμε να αυξήσουμε την ευαισθησία του.

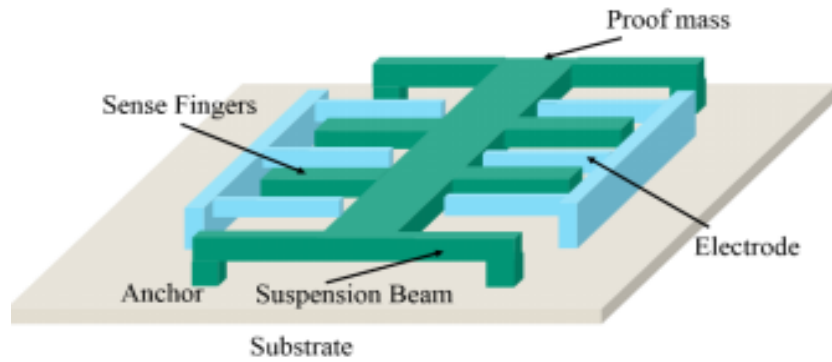


Figure 2. : Αρχιτεκτονική Χωρητικού Επιταχυνσιόμετρου

2.) Θεωρητικό υπόβαθρο για την κατασκευή ενός “Χωρητικού Αξελερόμετρου”

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται σε πρωταρχική μορφή , ένα διαφορικό-χωρητικό MEMS επιταχυνσιόμετρο , που ελέγχει μόνοέναν άξονα .

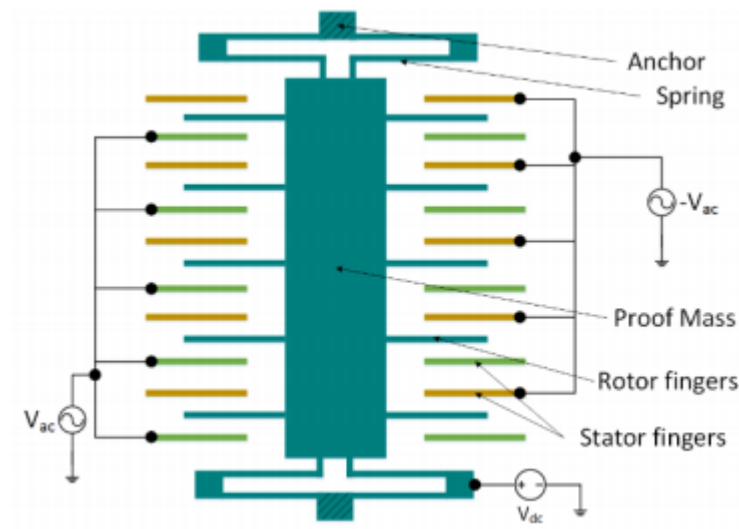


Fig 3: Τοπολογία

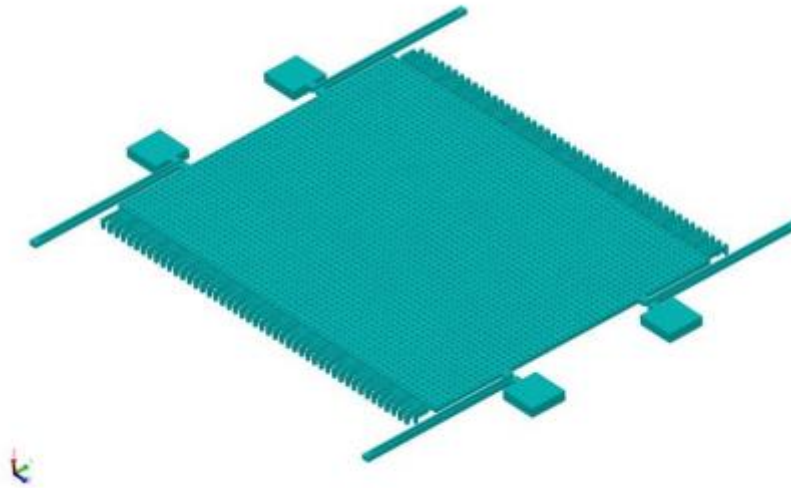


Fig 4: Πραγματικό Μοντέλο αξελερόμετρου

Για τον υπολογισμό των κατάλληλων μετρήσεων πρέπει να εξάγουμε το πρόβλημα που μας παρατίθεται και να το υλοποιήσουμε με «φυσικά» δεδομένα, όπως ακριβώς παρουσιάζεται στο σχ. 5 , παρακάτω .

Η ευαισθησία της συσκευής είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με τη μάζα της συσκευής , καθώς και με την μετατόπιση της , υπό την εφαρμογή μίας εξωτερικής δύναμης (επιτάχυνσης , δηλ. τρακάρισμα). Αυτή είναι αντιστρόφως ανάλογη με τη συχνότητα συντονισμού. Επομένως , για να πετύχουμε μεγαλύτερη ακρίβεια πρέπει η συχνότητα συντονισμού να είναι όσο το δυνατό μικρότερη γίνεται , ενώ , παράλληλα η σταθερά ελατηρίου (K) και η μάζα (m) θα πρέπει να προσαρμοστούν καταλλήλως , ώστε να μην έχουμε μεγάλη απόκλιση.

$$X_{MAX}=a_{MAX}/\omega_r^2 \quad (1)$$

Συνήθως, κατασκευαστικά , μιλώντας η μετατόπιση του σώματος μάζας m (αξελερόμετρου) δεν πρέπει να ξεπερνά το 1/3 της απόστασης των 2 ηλεκτροδίων για την αποφυγή προβλημάτων εξαιτίας της ηλεκτρομαγνητικής αναμετάδοσης.

Η λειτουργία επιταχυνσιόμετρων μπορεί να αναπαρασταθεί με μία διαφορική εξίσωση 2^η τάξης.

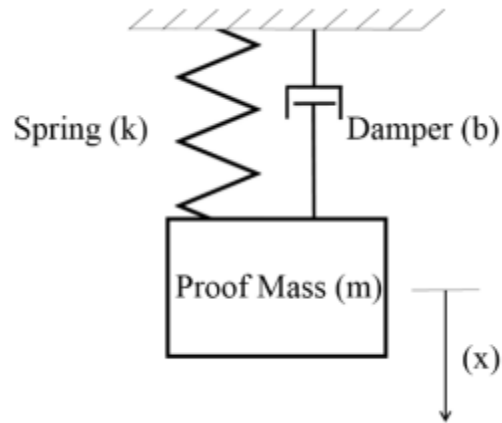


Figure 5: Δυναμικό Μοντέλο Αξελερόμετρου

Οι εξισώσεις των δυνάμεων εκφράζονται ως εξής :

- $F_{net} = F_{spring} + F_{damping} + F_{external} \quad (2)$
- $m * x(2) + b * x(1) + k * x = F_{external} \quad (3)$

Μεγεθύνοντας πάνω στη συσκευή μπορούμε να δούμε πως μία ρεαλιστική απεικόνισή της έχει ως εξής:



Έτσι , μπορούμε να αποφανθούμε και για την χωρητικότητα μεταξύ του στάτη και τα «δάχτυλα» του δρομέα . Η αλλαγή των χωρητικότητων συναρτější της κίνησης του δρομέα , παρουσιάζεται παρακάτω .

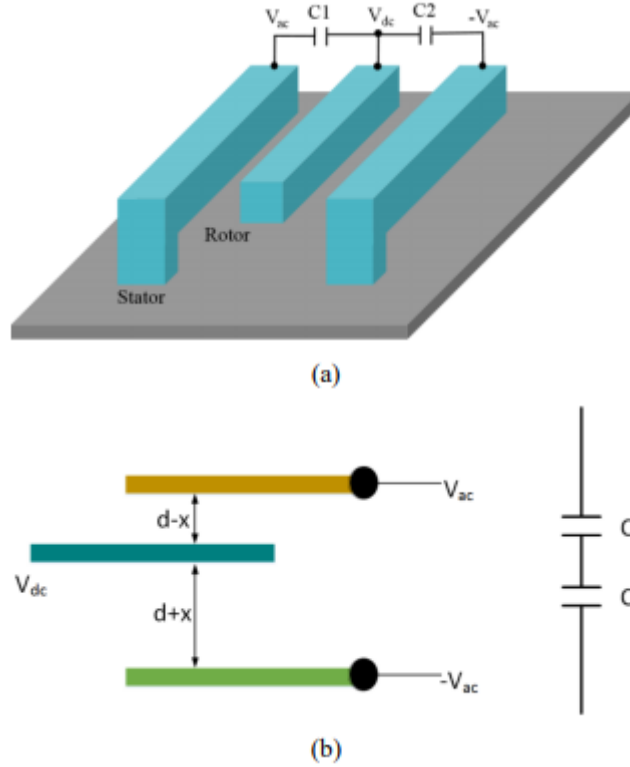


Fig. 5: (a) αρχική θέση , (b) με επιτάχυνση

Οι χωρητικότητες C1 και C2 αποτελούν συναρτήσεις του κενού του ενδιαμέσου ηλεκτροδίου τους. Αν η επιτάχυνση είναι μηδέν , τότε η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι ίση , οπότε τα C1 , C2 είναι ίσα. Υπο εξωτερική επιτάχυνση η μάζα μεταβάλλεται κατά x. Επομένως, οι χωρητικότητες είναι ίσες με :

$$\begin{aligned} \text{i.} \quad C1 &= \varepsilon * N * l * \frac{h}{d-x} \cong \frac{\varepsilon * N * l * h}{d} * \frac{1+x}{d} \\ \text{ii.} \quad C2 &= \frac{\varepsilon * N * l * h}{d} * \frac{1-x}{d} \end{aligned}$$

Έτσι, έχουμε :

$$\Delta C = C2 - C1 = 2 * C_o * \left(\frac{x}{d}\right), \text{ όπου } C_o = \frac{\varepsilon * N * l * h}{d}$$

Η ευαισθησία του επιταχυνσιόμετρου είναι ανάλογη με την μετατόπιση της μάζας του από το σημείο ισορροπίας.

$$\Delta C \sim = \frac{x_{max}}{d}.$$

Αντίστοιχα, η ενέργεια στην χωρητική δομή (capacitive structure) μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση :

$$E = \frac{1}{2} * C * V^2 = \frac{1}{2} * N * \varepsilon_2 * \frac{(V_{dc} + V_{ac})^2}{d-x} + \frac{1}{2} * N * \varepsilon_2 * \frac{(V_{dc} + V_{ac})^2}{d+x}$$

$$F = -dE/dx = 1/2 * N * \epsilon * l * h * (V_{dc} + V_{ac})^2 / (d - x)^2 + 1/2 * N * \epsilon * l * h * (V_{dc} + V_{ac})^2 / (d + x)^2$$

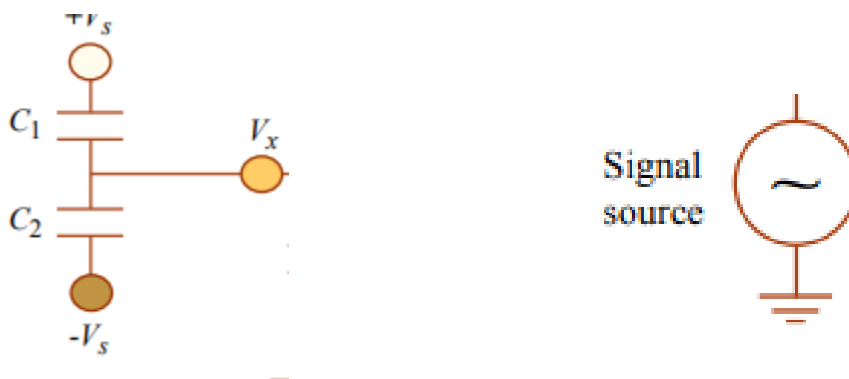
Όπου,

- i. N = αριθμός «δαχτύλων»
- ii. D = αρχικό κενό ηλεκτροδίων
- iii. X = μετατόπιση από τη θέση ισορροπίας
- iv. L = μήκος «δαχτύλου»
- v. H = πάχος «δαχτύλων»
- vi. V_{dc} = εφαρμοζόμενη τάση (DC)
- vii. V_{ac} = εφαρμοζόμενη τάση (AC)

3) Σχεδίαση Διάταξης Επιταχυνσιόμετρου

Παρακάτω, θα υλοποιήσουμε το κυκλωματικό ισοδύναμο ενός επιταχυνσιόμετρου για την κατασκευή συστήματος αερόσακου. Οι μετρήσεις για αυτή τη διαδικασία είναι απαραίτητες, καθώς το κέρδος, οι φθορές και η ακρίβεια είναι στοιχεία που πρέπει να απασχολούν έναν μηχανικό στην βιομηχανία.

Στο εν λόγω κύκλωμα έχουμε αντικαταστήσει το τρίπτυχο πηγής AC και των δύο πυκνωτών ($C1$ & $C2$, δηλ. των «διαφορικών πυκνωτών») με μία πηγή AC στην οποία θα αλλάζουμε ένδειξη κάθε φορά. Ακολουθούμε αυτή τη λογική λόγω της φύσης διεξαγωγής του «πειράματος» και την απουσία συγκεκριμένων *simulators* που προσομοιώνουν με ακρίβεια τα φυσικά χαρακτηριστικά του επιταχυνσιόμετρου.

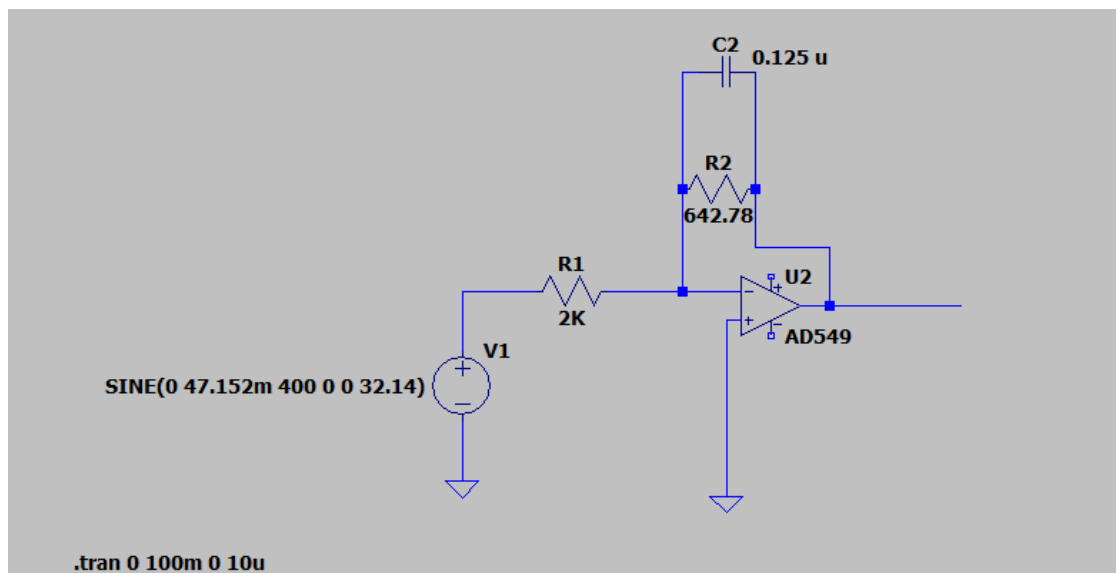


a) Differential Capacitor b) Ισοδύναμος Προσομοιωτής

Αξιοποιώντας τα δεδομένα που μας δίνονται έχουμε ότι :

- $Resolution \leq 110mg$
- $Frequency = 400Hz$
- $Max Shock > 2Kg \rightarrow F = 19.6133N = < a * m = a * 52g > \rightarrow a = 3771.78 \frac{m}{s^2}$
- $Sensitivity = \frac{V_{out}}{a_{max}} \Rightarrow V_{out} = Sensitivity * a_{max} = 5\% * 3771.78 \Rightarrow \mathbf{V_{out} = 188.589mV}$

Κατασκευάζουμε , την παρακάτω διάταξη και σκοπός μας είναι μέσω της επίλυσης εξισώσεων να βρούμε κατάλληλες τιμές για τι Αντιστάσεις ($R1$ & $R2$) και για τον πυκνωτή ώστε να έχουμε το παραπάνω επιθυμητό αποτέλεσμα στην έξοδο :



(Α) Ισοδύναμο κύκλωμα με πρόσθετο Αναλογικό Βαθυπερατό φίλτρο RC

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψιν μας το κέρδος :

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(-\frac{R2}{R1} \right) * \frac{1}{1 + j * \omega * R2 * C}, \text{ με } \omega = 2 * \pi * 400$$

$$= 800 * \pi \frac{rad}{s}$$

Ως επιλογή θα πάρουμε $A_v = 4$, οπότε:

$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{1}{A_v} = \frac{1}{4}$$

Μετατρέπουμε τον λόγο σε φασικό διάνυσμα και έχουμε :

$$\frac{R1}{R2} * \sqrt{1 - (800 * \pi * R2 * C)^2} = \frac{1}{4}, \text{υπο γωνία } \theta$$

$$= \arctan(800 * \pi * R2 * C)$$

Αρα έχουμε ότι :

$$\bullet \quad \frac{R1}{R2} * \sqrt{1 - (800 * \pi * R2 * C)^2} = \frac{1}{4}, (1)$$

Πρέπει η εγχώρια ποσότητα της ρίζας να είναι μεγαλύτερη του μηδενός .

Έτσι , καταλήγουμε στην ανισότητα :

$$\bullet \quad R2 * C < \frac{1}{800 * \pi}, (2)$$

Λύνοντας την (1), καταλήγουμε σε μία εξίσωση **4ου Βαθμού** – **ως προς το R2**. Αφού, θέλουμε $\theta \geq 0$ και καταλήγουμε πάλι σε μία δεύτερη ανισότητα :

$$\bullet \quad R1 * C \leq 0.0048, (3)$$

Επιλέγουμε , την τιμή $C=1/8 \mu F$ ή 125 nF για τον πυκνωτή και από την (2) εξάγουμε ότι :

$$R2 < 3138 \Omega, \text{ και επιλέγουμε την τιμή } R2 = 2k\Omega$$

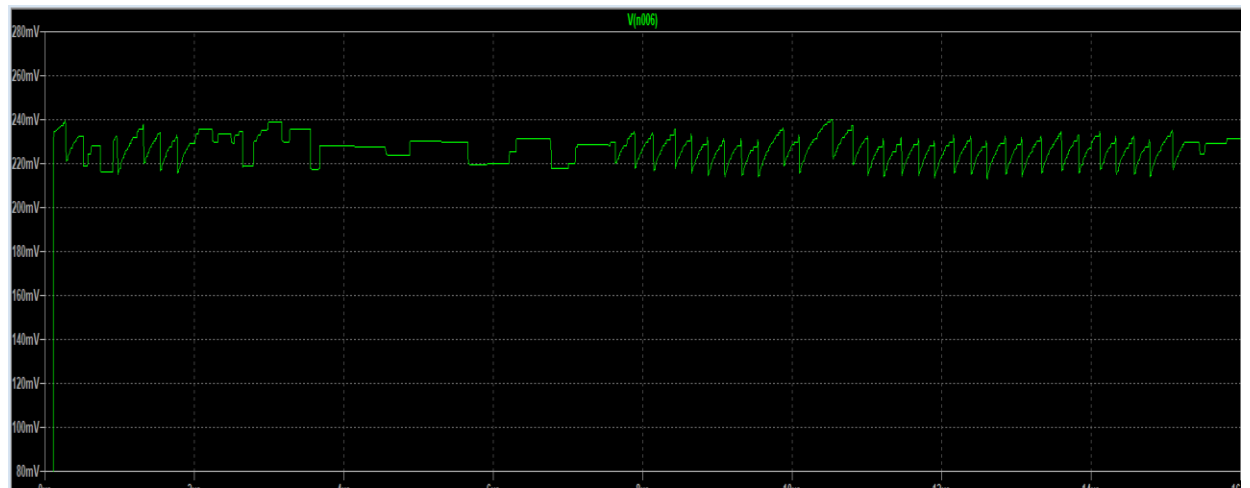
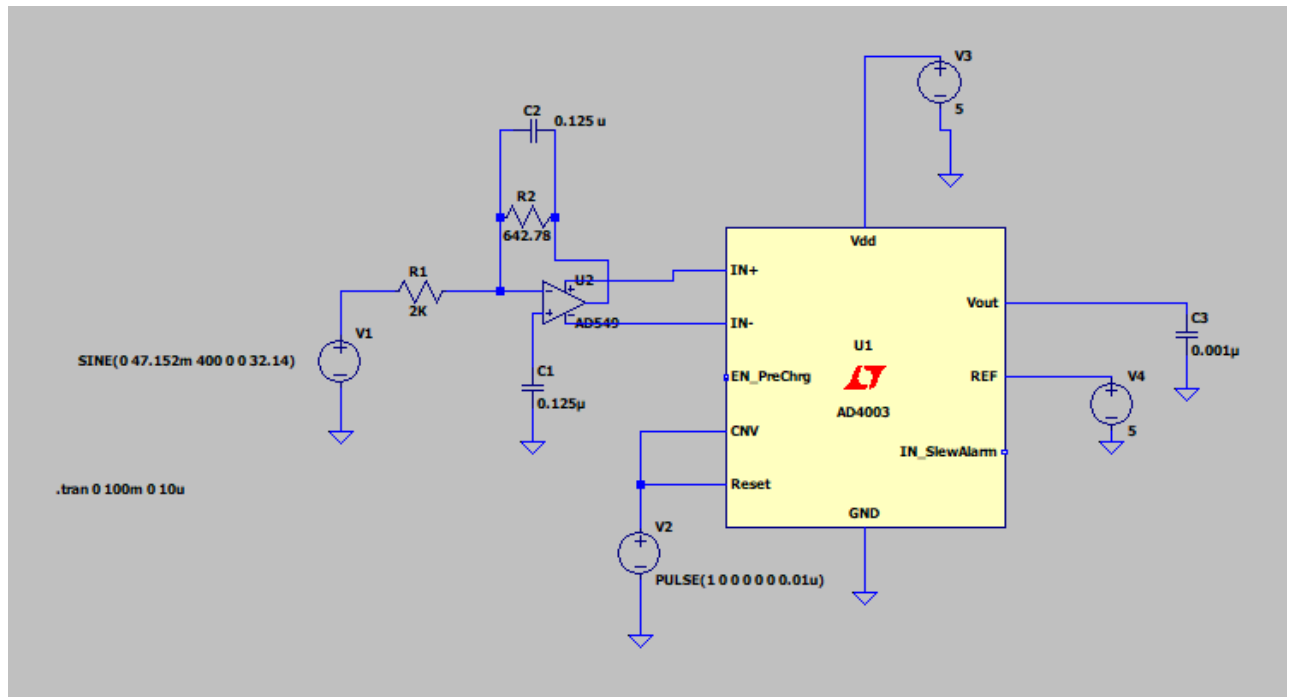
Έπειτα από την (1) με αντικατάσταση των $R1$ και C :

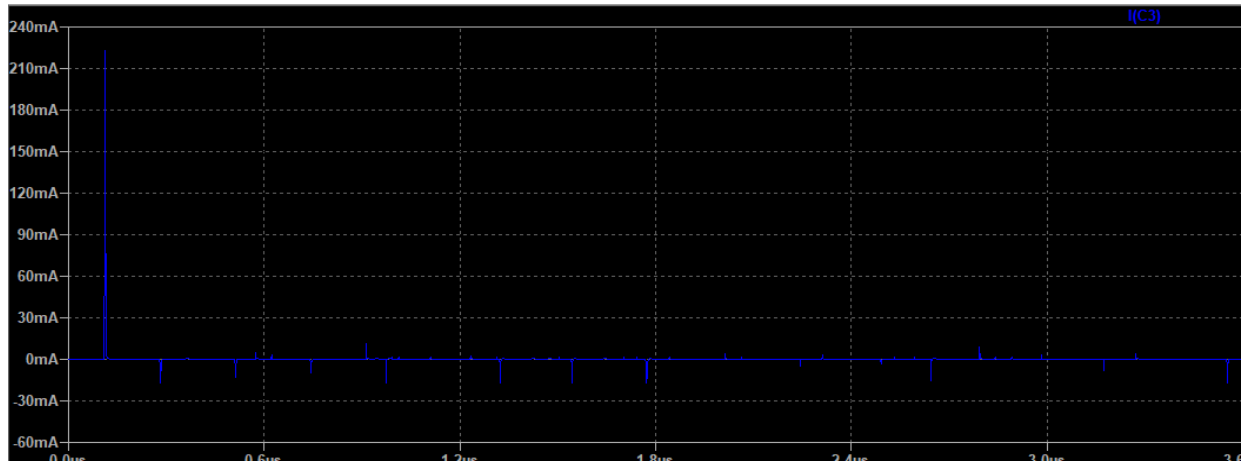
$$R1 = 642.78 \Omega$$

Έχουμε , δηλαδή :

1. $R1 = 642.78 \Omega$
2. $R2 = 2k\Omega$
3. $C = 0.125 \mu F$
4. $\theta = 0.561 \text{ rad}$ ή 47.152°

Στο παραπάνω κύκλωμα προσθέτουμε και ένα ADC (Analog-to-Digital Converter) για την ψηφιοποίηση του σήματος , καθώς παράλληλα προσθέτουμε και μερικά στοιχεία ακόμα για την βελτιστοποίηση του σήματος εξόδου και την αποφυγή παρασιτικών σημάτων , όπως του Brown Noise που είναι συχνό με το αισθητήρες γενικότερα.





(Δ) Ψηφιοποιημένο Σήμα Πυκνωτή

Βιβλιογραφία

- <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/jmbm-2021-0003/html>
- https://inst.eecs.berkeley.edu/~ee245/fa08/projects/InertialSensors_IEEE.Najafi.pdf
- <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/capacitive-accelerometer>
- <https://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-777j-design-and-fabrication-of-microelectromechanical-devices-spring-2007/lecture-notes/07lecture24.pdf>
- <https://core.ac.uk/download/pdf/11465112.pdf>
- <https://www.mccdaq.com/TechTips/TechTip-1.aspx>
- https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitive_sensing
- <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/5/5830.html>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6266379/>