



## Χωρητικοί αισθητήρες

1. Αισθητήρας Πίεσης
- 2. Αισθητήρας Επιτάχυνσης**

### Αισθητήρες Επιτάχυνσης

```
graph TD; A[Αισθητήρες Επιτάχυνσης] --> B[Accelerometers]; A --> C[Gyroscopes]; A --> D[Inclinometers];
```

Accelerometers

*Μέτρηση γραμμικής  
επιτάχυνσης*

Gyroscopes

*Μέτρηση γωνιακής  
επιτάχυνσης*

Inclinometers

*Μέτρηση κλίσης*

### Επιτάχυνση

$$\mathbf{a} = \frac{d}{dt} \mathbf{u}(t) = \frac{d^2}{dt^2} \mathbf{x}(t)$$

Ο ρυθμός μεταβολής της ταχύτητας



$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m}$$

Ο 2<sup>ος</sup> νόμος του Newton. Θεμελιώδης σχέση της κλασσικής μηχανικής



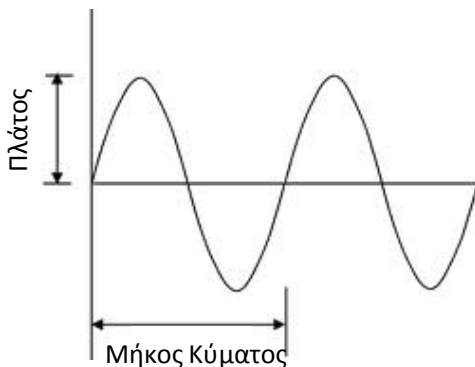
## Χαρακτηριστικά Μεγέθη Επιτάχυνσης

$\alpha(\text{m/s}^2)$	
$5 \times 10^{-4}$	Ελάχιστη επιτάχυνση σε επιστημονικό πείραμα
0.5	Υδραυλικός ανελκυστήρας
1.6	Επιτάχυνση ελεύθερης πτώσης στη Σελήνη
9.8	Επιτάχυνση ελεύθερης πτώσης στη Γη
24.8	Επιτάχυνση ελεύθερης πτώσης στο Δία
20-50	roller coaster
100–200	Κάθισμα εκτίναξης
270	Επιτάχυνση ελεύθερης πτώσης στον Ήλιο
600	Αερόσακος
$10^6$	Σφαίρα
$10^{12}$	Επιτάχυνση ελεύθερης πτώσης σε αστέρι νετρονίων

$\alpha(\text{g})$	
2.9	Φτάρνισμα
3.5	Βήξιμο
60	Θώρακας σε τρακάρισμα με 48km/h (Όριο με αερόσακο)
0.3-0.9	Εκκίνηση αυτοκινήτου
1.7	Εκκίνηση F1
0.8-1.3	Φρενάρισμα Αυτοκινήτου
2	Φρενάρισμα F1

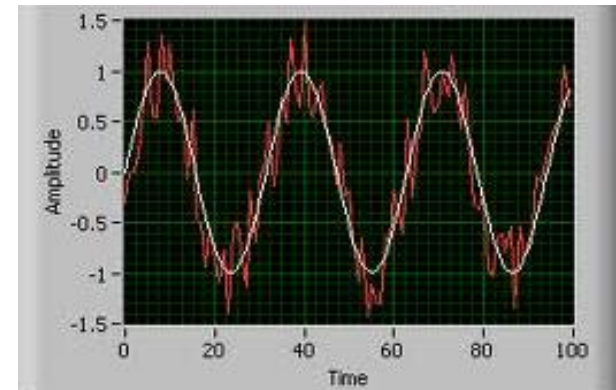
Για την επιτάχυνση:

- Δυναμικό χαρακτηριστικό συστήματος
- Άμεσα συσχετισμένη με την **ταχύτητα  $u(t)$**  και την **θέση  $x(t)$**  ενός κινητού σώματος
- Για μεγάλα αντικείμενα, τα μεγέθη  **$x(t)$ ,  $u(t)$ ,  $a(t)$**  μπορούν να υπολογιστούν από το *GPS*.
- Για μικρά αντικείμενα και μικρές κινήσεις, απαιτούνται ειδικές συσκευές.
- Η παραγωγή του σήματος ενός αισθητήρα θέσης ή ταχύτητας εισάγει επιπλέον θόρυβο.
- Οι αισθητήρες επιτάχυνσης τυπικά περιέχουν ένα κινητό μέρος το οποίο μετατοπίζεται ανάλογα με την επιτάχυνση

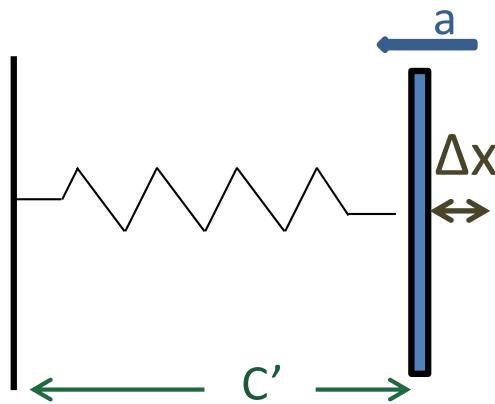
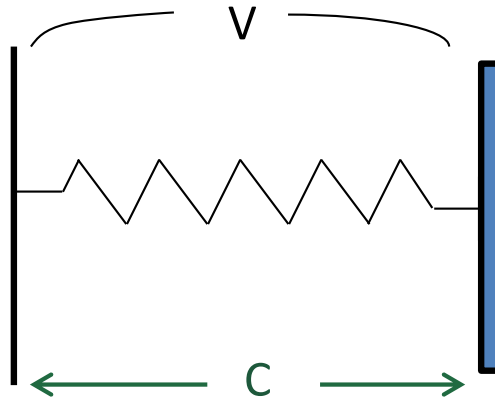


← Ιδανικό ημιτονοειδές σήμα

Πραγματικό σήμα με θόρυβο →



### Ανίχνευση επιτάχυνσης



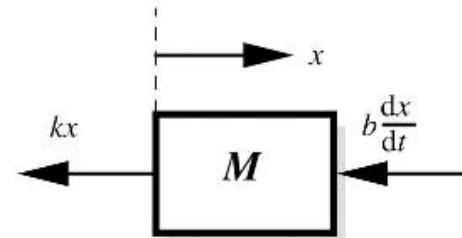
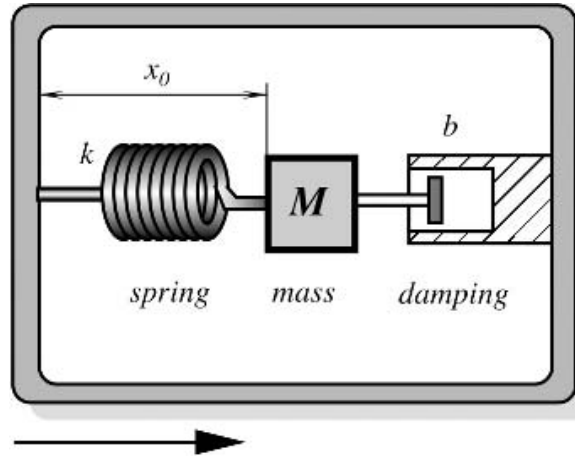
1. Επιτάχυνση  $a$

2. Μετατόπιση  $\Delta x$

3. Μεταβολή  
Χωρητικότητας  $\Delta C$

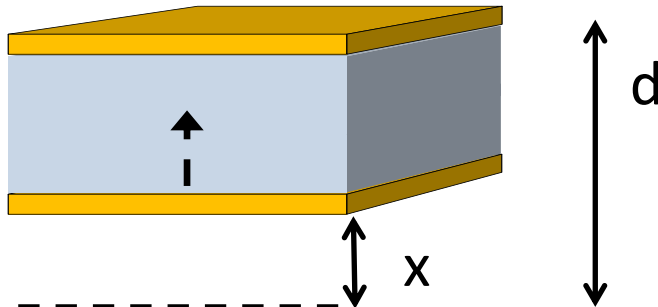
### Σύστημα Μάζα - Ελατήριο

Τα κύρια μέρη του μηχανικού συστήματος ανίχνευσης είναι η σεισμική μάζα (*proof mass*) και τα ελατήρια, με κάθε ένα από αυτά να συνδέεται με τη μάζα και με ένα ακίνητο σημείο (*anchor*)



$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + Kx = F_{ext} = -Ma_{ext}$$

M: Μάζα  
b: Σταθερά απόσβεσης  
K: Σταθερά ελατηρίου  
 $K = K_{mech} - K_{elec}$



Αρχική θέση

$$C(x) = \frac{\epsilon A}{d - x}$$

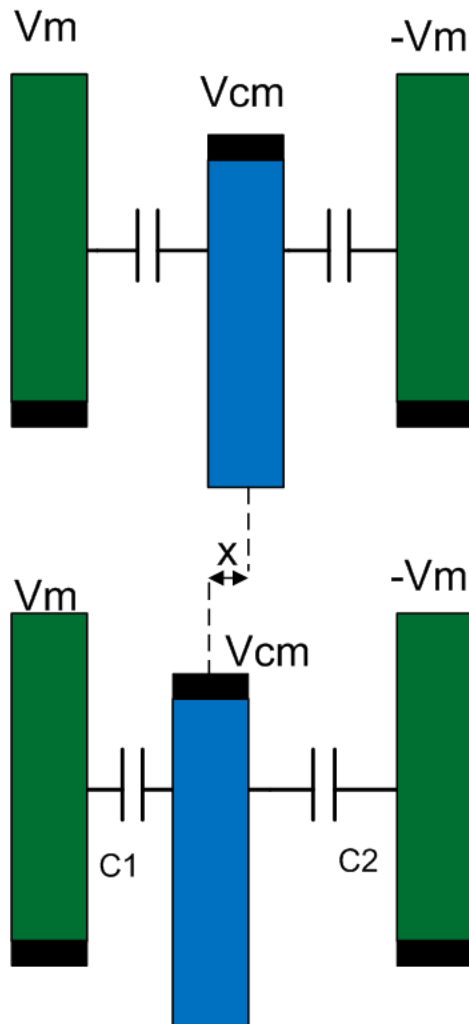
$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$$

### Παράδειγμα:

Έστω αισθητήρας επιτάχυνσης που βασίζεται σε ένα πυκνωτή με τετραγωνικούς οπλισμούς πλευράς  $20\mu\text{m}$  και αρχικής απόστασης μεταξύ τους  $2\mu\text{m}$ . Έστω τιμές επιτάχυνσης  $a_1$ ,  $a_2$  και  $a_3$  που προκαλούν αντίστοιχες μετατοπίσεις στον κινούμενο πυκνωτή  $x_{01}=0.5\mu\text{m}$ ,  $x_{02}=-0.5\mu\text{m}$  και  $x_{03}=0.25\mu\text{m}$ . Να υπολογιστούν τα  $\Delta C_1$ ,  $\Delta C_2$  και  $\Delta C_3$ .

( Για τον αέρα/κενό ισχύει  $\epsilon_r=1$ ,  $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$  )

### Διαφορική Μέτρηση 1/2



Έστω η διάταξη του διπλανού σχήματος. Για μετατόπιση  $x$  σε σχέση με την αρχική απόσταση των οπλισμών (έστω  $d$ ), έχουμε για τους δύο πυκνωτές:

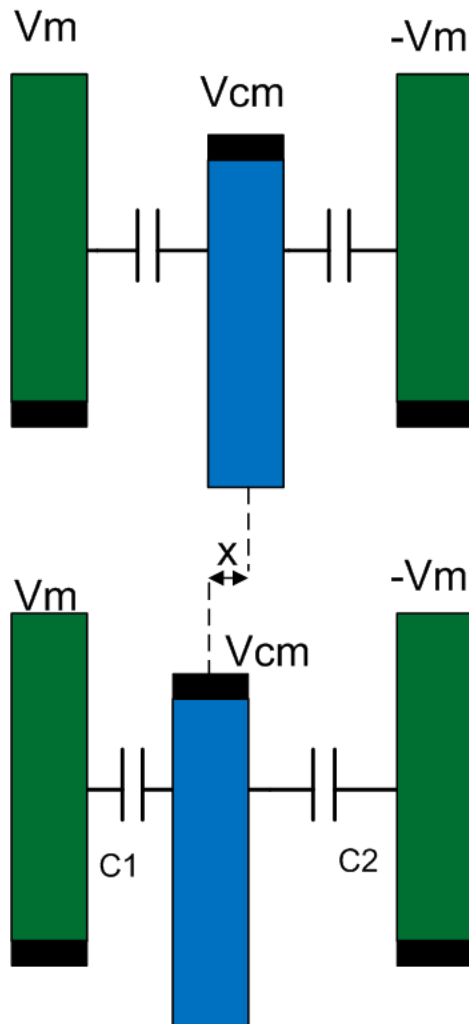
$$C_1 = \varepsilon A \left( \frac{1}{d - x} \right)$$

$$C_2 = \varepsilon A \left( \frac{1}{d + x} \right)$$

Αφαιρώντας τις δύο χωρητικότητες:

$$C_1 - C_2 = \Delta C = \varepsilon A \left( \frac{1}{d - x} - \frac{1}{d + x} \right)$$

### Διαφορική Μέτρηση 2/2



Μετά από τις πράξεις προκύπτει:

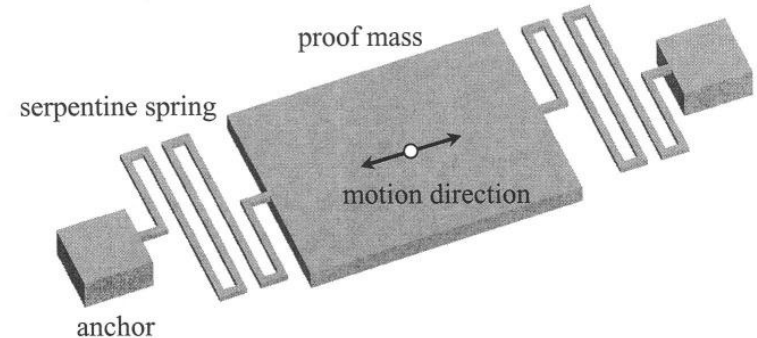
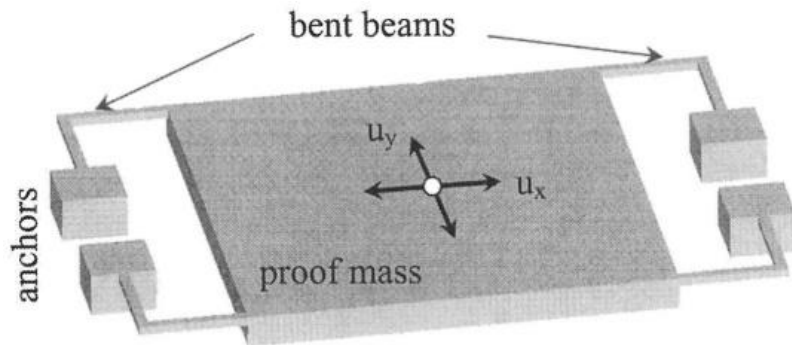
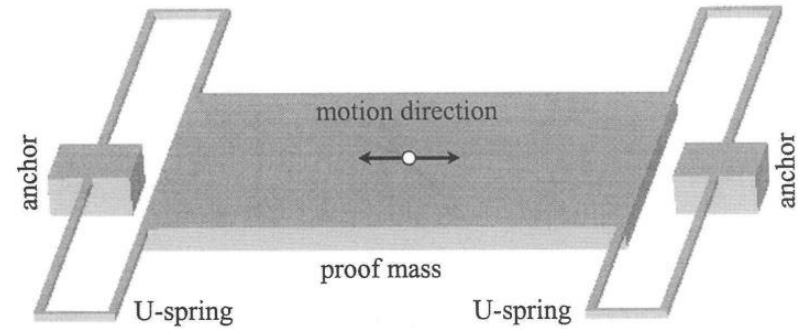
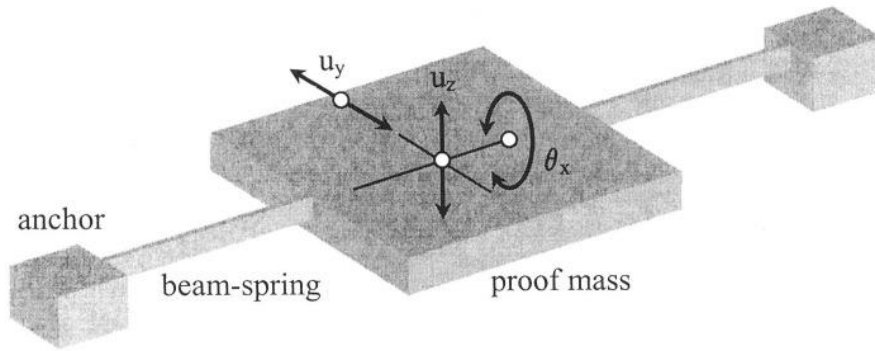
$$\Delta C = \varepsilon A \left( \frac{2x}{d^2 - x^2} \right)$$

Για πολύ μικρές μετατοπίσεις  
( $x \ll d$ )

$$\Delta C = 2\varepsilon A \frac{x}{d^2}$$

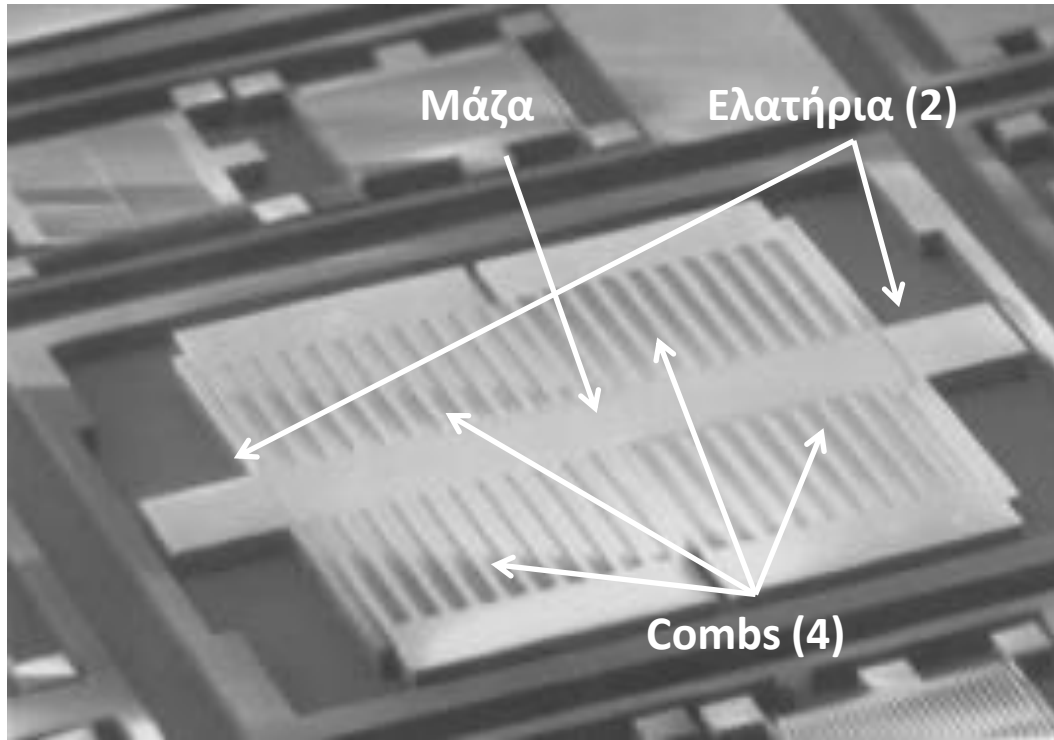
➤ Γραμμική σχέση χωρητικότητας -  
απομάκρυνσης

### Τύποι Ελατηρίων

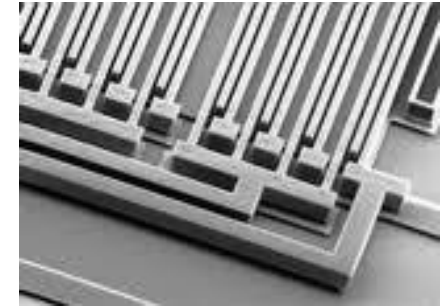


Κύρια ζητήματα:

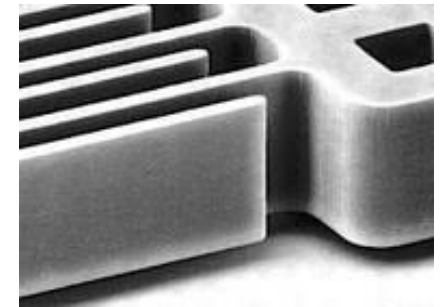
- Γραμμικότητα ( $F=Kx$  με  $K \neq K(x)$ )
- Περιορισμός μη επιθυμητών κινήσεων της μάζας



Coventor



UBC



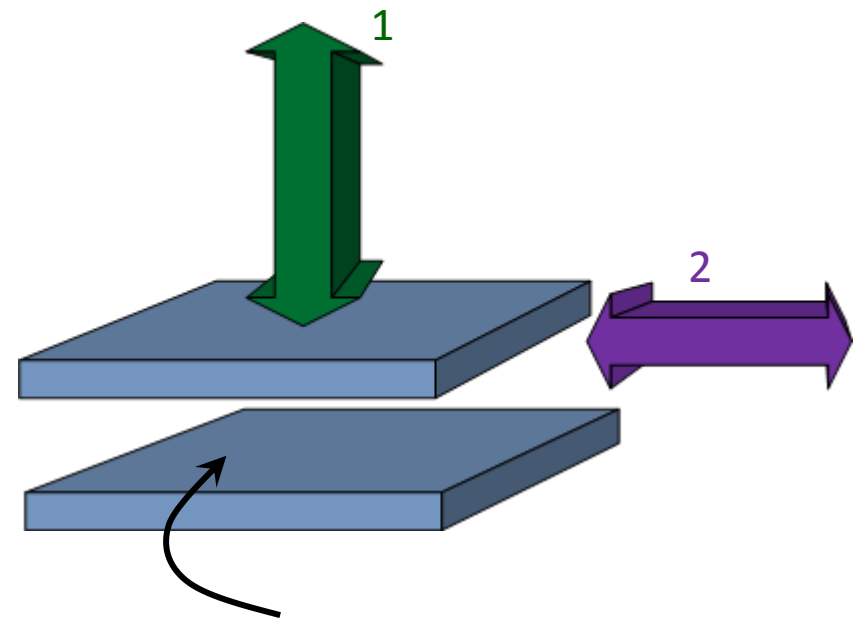
sensorsmag

### Damping

Κατά την κίνηση των μηχανικών μερών, αλληλεπιδρούν με το ρευστό που τα περιβάλλει, γεννώντας μια δύναμη που οδηγεί σε απόσβεση της κίνησης.

#### 1. Squeezed film damping

Κίνηση των πλακών κάθετα στην επιφάνειά τους  
Η κύρια αιτία απόσβεσης



#### 2. Slide film damping (Couette Flow)

Κίνηση των πλακών παράλληλα στην επιφάνειά τους  
Τυπικά μία τάξη μεγέθους μικρότερη

Ρευστό (συνήθως αέριο)

Η συνολική σταθερά ελατηρίου του συστήματος:

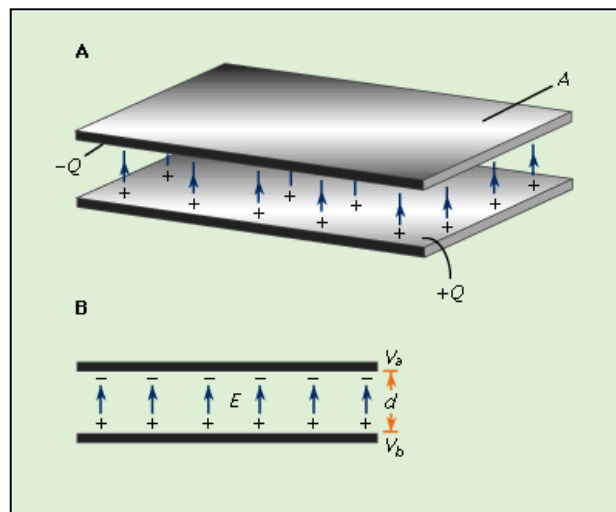
Η δύναμη επαναφοράς του ελατηρίου, δίνεται από το νόμο του Hooke:

$$F_{mech} = kx$$

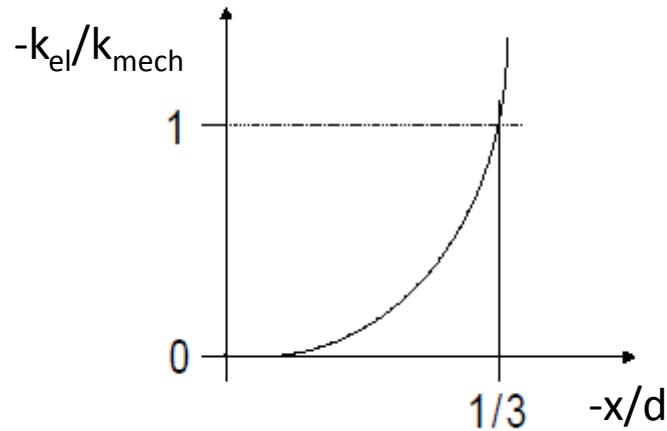
Η τάση μεταξύ των πλακών οδηγεί στην εμφάνιση μιας ελκτικής ηλεκτρικής δύναμης:

$$F_{elec} = -\frac{1}{2} \frac{C(x)}{x} V^2$$

Με την προσέγγιση των πλακών η δύναμη αυξάνεται.



Η συνολική σταθερά ελατηρίου του συστήματος:



$$k_{el} = -k_{mech} \frac{2x}{d+x}$$

- ❑ Κατά συνέπεια, η συνολική σταθερά  $K$  που «αισθάνεται» η σεισμική μάζα δεν είναι σταθερή, αλλά μειώνεται με την απόσταση  $x$  (*spring softening*)
- ❑ Από το σημείο  $x=x_0/3$ , οι ηλεκτρικές δυνάμεις γίνονται πιο δυνατές από τις μηχανικές (ελατήριο), οπότε οι δύο σπλισμοί του πυκνωτή «κολλάνε» μεταξύ τους (*Pull In effect*)

### Ευαισθησία

Ο λόγος της ηλεκτρικής εξόδου προς τη μηχανική είσοδο. Συνήθως σε V/g μετρημένη σε μια συχνότητα αναφοράς μιας ημιτονοειδούς διέγερσης.

### Θόρυβος

Οι τυχαίες διακυμάνσεις του σήματος, προερχόμενες κυρίως από την κίνηση Brown των μορίων του αέρα και η αλληλεπίδραση τους με τη μάζα

### Ανάλυση

Η ελάχιστη τιμή μεταβολής της επιτάχυνσης που μπορεί να ανιχνεύσει το σύστημα

### Απόκριση - bandwidth

Το εύρος συχνοτήτων στο οποίο μπορεί να λειτουργήσει ο αισθητήρας. Τυπικά της τάξης των λίγων kHz

### Έξοδος σε μηδενικό ερέθισμα

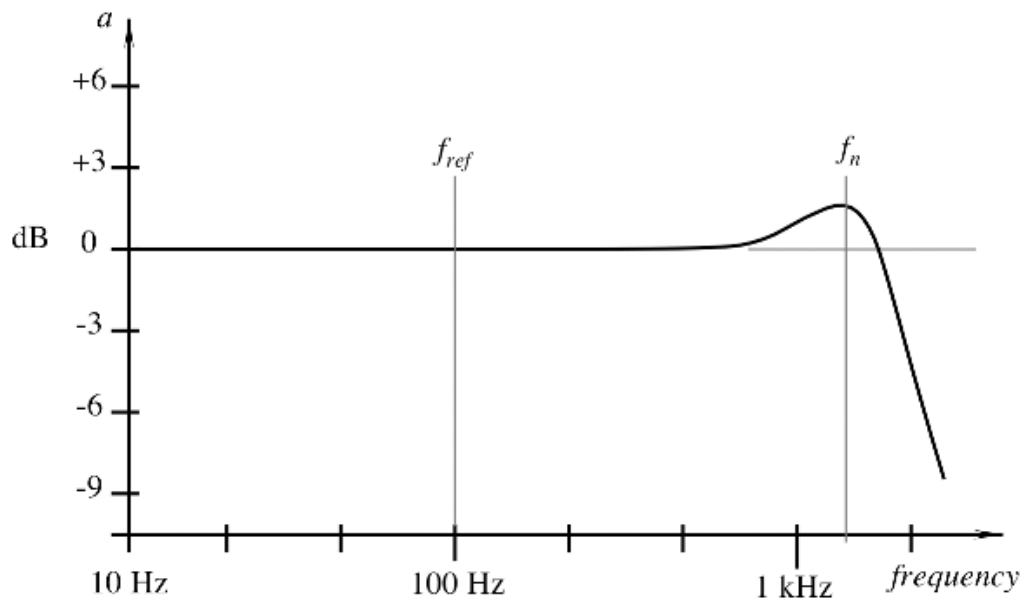
Η έξοδος του αισθητήρα όταν ο άξονας ευαισθησίας του είναι κάθετος στο διάνυσμα της βαρύτητας

### Γραμμικότητα

Η γραμμικότητα του αισθητήρα στο συνολικό μετρητικό εύρος της συσκευής

### Bandwidth

- ❑ Κοντά στη συχνότητα συντονισμού  $\omega_0$  ο αισθητήρας δεν είναι αξιόπιστος
- ❑ Τυπικά, ως bandwidth ορίζεται το εύρος συχνοτήτων από το 0 μέχρι το 1/10 της  $\omega_0$



$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Για  $\omega < \omega_n$  ισχύει:

$$x = \frac{1}{\omega_n^2} a$$

$\omega_n$ : συχνότητα συντονισμού

$m$ : σεισμική μάζα

$k$ : σταθερά ελατηρίου

### Θόρυβος

Η κύρια πηγή θορύβου σε ένα επιταχυνσιόμετρο είναι θόρυβος Brown (θερμομηχανικός θόρυβος).

Τα μόρια του αερίου τα οποία προσκρούουν στη σεισμική μάζα υπόκεινται στην κίνηση Brown. Το αποτέλεσμα είναι μια δύναμη πάνω στη σεισμική μάζα:

$$\overline{F_B^2}(f) = 4k_B T b \left( \frac{N}{\sqrt{\text{Hz}}} \right) \quad \text{Power Spectral Density}$$

Ο Brownian θόρυβος στην έξοδο του επιταχυνσιόμετρου είναι η αντίστοιχη επιτάχυνση:

$$\overline{a_B}(f) = \frac{\sqrt{4k_B T b}}{m} \left( \frac{m/s^2}{\sqrt{\text{Hz}}} \right)$$

m: σεισμική μάζα

$k_B$ : σταθερά Boltzman

T: απόλυτη θερμοκρασία

b: σταθερά απόσβεσης

### Μετρητικό πεδίο (measurement range)

- Η συνολική σταθερά  $K$  που «αισθάνεται» η σεισμική μάζα δεν είναι σταθερή.
- Μετά το σημείο όπου επέρχεται το pull-in ( $x=x_0/3$ ) η ισορροπία για δεδομένη τιμή επιτάχυνσης είναι ασταθής.
- Συνήθως το μετρητικό πεδίο στο επιταχυνσιόμετρο, ορίζεται ως την τιμή της επιτάχυνσης όπου λαμβάνει χώρα το pull-in.

### Ευαισθησία

Για τους παράγοντες που επηρεάζουν την ευαισθησία ενός πυκνωτή δύο οπλισμών επιφάνειας  $A$  σε απόσταση  $x$ :

$$S_x = \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=x_0} = \left. \frac{d}{dx} \left( \frac{\varepsilon A}{x} \right) \right|_{x=x_0} = -\frac{\varepsilon A}{x_0^2} = -\frac{C_0}{x_0}$$

$$S_a = \frac{dC}{da} = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{C_0}{x_0}$$

Όπου  $\omega_n$  συχνότητα συντονισμού

Η ευαισθησία στο τελικό σύστημα εκφράζεται συνήθως σε:

$$\frac{mV}{g} = \frac{\text{σήμα} \text{ _εξόδου_ συσκευής}}{\text{επιτάχυνση}}$$



Συγκεντρωτικά κάποια tradeoffs στην περίπτωση των χωρητικών επιταχυνσιομέτρων

Χαρακτηριστικό	Brownian	Εύρος μέτρησης	Ευαισθησία
Μέγεθος μάζας ( $M$ )	↓	↓	↑
Αρχική χωρητικότητα ( $C_0$ )	↑	↓	↑
Σταθερά απόσβεσης ( $D$ )	↑		
Σταθερά ελατηρίου ( $K$ )		↑	↓

### Επιταχυνσιόμετρο κλειστού βρόγχου

- Εξισορρόπηση της αδρανειακής δύναμης τοποθετώνταντας την σεισμική μάζα σε βρόγχο αρνητικής ανάδρασης (negative feedback loop).
- Ο βρόχος μετράει μετακινήσεις της μάζας και ασκεί δύναμη στην αντίθετη κατεύθυνση έτσι ώστε η μάζα να παραμένει στο κέντρο.
- Το μέγεθος της δύναμης που απαιτείται είναι η έξοδος του επιταχυνσιομέτρου
- Διατηρώντας ελάχιστες μετακινήσεις της μάζας, περιορίζονται πιθανές μη γραμμικότητες της σταθεράς του ελατηρίου και των χωρητικών διατάξεων



- ✓ Αύξηση γραμμικότητας
- ✓ Αύξηση συνολικού μετρητικού πεδίου



- ✓ Αύξηση συνολικής περιπλοκότητας και τελικού κόστους

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m=2 \cdot 10^{-8}$  kgr η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία (anchors) μέσω δύο ελατηρίων, το καθένα με σταθερά  $k=1.5$  N/m. Η μετακίνηση της μάζας οδηγεί στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ μίας κινητής και μιας ακίνητης πλάκας ενός πυκνωτή.

Να βρεθούν:

α) **Η συχνότητα συντονισμού του συστήματος**

β) **Το bandwidth του αισθητήρα**

γ) **Ο θόρυβος Brown** (Δίνεται η σταθερά απόσβεσης  $b=...$ )

δ) **Η ευαισθησία του συστήματος** (Δίνεται η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m, η ακτίνα των πλακών του πυκνωτή  $r=50$   $\mu$ m, η αρχική απόσταση των πλακών  $2$   $\mu$ m).

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m=2 \cdot 10^{-8}$  kgr η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία (anchors) μέσω δύο ελατηρίων, το καθένα με σταθερά  $k=1.5$  N/m. Η μετακίνηση της μάζας οδηγεί στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ μίας κινητής και μιας ακίνητης πλάκας ενός πυκνωτή.

Να βρεθούν:

α) Η συχνότητα συντονισμού του συστήματος

Η συχνότητα συντονισμού δίνεται από τον τύπο:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \qquad f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Με απλή αντικατάσταση παίρνουμε:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3}{2 \cdot 10^{-8}}} = 1950 \text{ Hz}$$

Μάζα ενδιάμεσα από δύο  
ελατήρια

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m=2 \cdot 10^{-8}$  kgr η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία (anchors) μέσω δύο ελατηρίων, το καθένα με σταθερά  $k=1.5$  N/m. Η μετακίνηση της μάζας οδηγεί στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ μίας κινητής και μιας ακίνητης πλάκας ενός πυκνωτή.

Να βρεθούν:

β) Το **bandwidth** του αισθητήρα

Το εύρος των συχνοτήτων μέσα στο οποίο μετράει ο αισθητήρας είναι τυπικά το 1/10 της συχνότητας συντονισμού.

Άρα πολύ απλά, το bandwidth στην προκείμενη περίπτωση είναι 195 Hz

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m=2 \cdot 10^{-8}$  kgr η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία (anchors) μέσω δύο ελατηρίων, το καθένα με σταθερά  $k=1.5$  N/m. Η μετακίνηση της μάζας οδηγεί στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ μίας κινητής και μιας ακίνητης πλάκας ενός πυκνωτή.

Να βρεθούν:

γ) **Ο θόρυβος Brown** (Δίνεται η σταθερά απόσβεσης  $b=3.5 \cdot 10^{-5}$  N·s/m, η θερμοκρασία του αισθητήρα  $T=23^\circ\text{C}$ , η τιμή της σταθεράς Boltzmann  $k_B=1.3806503 \times 10^{-23}$  m<sup>2</sup> kg s<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>)

Για τον θόρυβο Brown ισχύει

$$\overline{a_B}(f) = \frac{\sqrt{4k_B T b}}{m}$$

Οπότε

$$\overline{a_B}(f) = \frac{\sqrt{4k_B T b}}{m} = \frac{\sqrt{4 \cdot 1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 3.5 \cdot 10^{-5}}}{2 \cdot 10^{-8}}$$

$$\overline{a_B}(f) = \frac{\sqrt{4 \cdot 1.38 \cdot 300 \cdot 3.5} \cdot \sqrt{10^{-23} \cdot 10^{-5}}}{2 \cdot 10^{-8}} = 3.6 \cdot 10^{-5} \left( \frac{m/s^2}{\sqrt{\text{Hz}}} \right)$$

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m=2 \cdot 10^{-8}$  kgr η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία (anchors) μέσω δύο ελατηρίων, το καθένα με σταθερά  $k=1.5$  N/m. Η μετακίνηση της μάζας οδηγεί στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ μίας κινητής και μιας ακίνητης πλάκας ενός πυκνωτή.

Να βρεθούν:

δ) **Η ευαισθησία του συστήματος** ( $\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$  F/m, η ακτίνα των πλακών του πυκνωτή  $r=50\mu\text{m}$ , η αρχική απόσταση των πλακών  $2\mu\text{m}$ .)

Ας δούμε όλες τις «διαφορετικές ευαισθησίες» του αισθητήρα.

Αρχικά η μεταβολή της χωρητικότητας σε σχέση με την μετατόπιση δίνεται από:

$$S_x = \left. \frac{dC}{dx} \right|_{x=x_0} = -\frac{C_0}{x_0}$$

Δίνεται η αρχική απόσταση μεταξύ των πλακών, οπότε μένει ο υπολογισμός της αρχικής τιμής της χωρητικότητας (για  $x_0=0$ ):

$$C_0 = \frac{\epsilon A}{x_0} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{\pi r^2}{x_0} = 1 \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{3.14 \cdot (50 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 10^{-6}} = 3.47 \cdot 10^{-14} \text{ F}$$

Οπότε:

$$S_x = \frac{C_0}{x_0} = \frac{3.47 \cdot 10^{-14}}{2 \cdot 10^{-6}} = 1.74 \cdot 10^{-8} \frac{\text{F}}{\text{m}} = 17.4 \frac{\text{fF}}{\mu\text{m}}$$

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m=2 \cdot 10^{-8}$  kgr η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία (anchors) μέσω δύο ελατηρίων, το καθένα με σταθερά  $k=1.5$  N/m. Η μετακίνηση της μάζας οδηγεί στην μεταβολή της απόστασης μεταξύ μίας κινητής και μιας ακίνητης πλάκας ενός πυκνωτή.

Να βρεθούν:

δ) Η ευαισθησία του συστήματος

Για τη μεταβολή της χωρητικότητας σε σχέση με την επιτάχυνση

$$S_a = \frac{dC}{da} = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{C_o}{x_o} = \frac{1}{310^2} \cdot 1.74 \cdot 10^{-8} = 1.81 \cdot 10^{-15} \frac{F}{m/s^2} = 17.75 \frac{fF}{g}$$

Ας δούμε και την μετατόπιση του ελατηρίου σε σχέση με την επιτάχυνση

$$x = \frac{1}{\omega_n^2} a \Rightarrow x = (1.04 \cdot 10^{-5}) \cdot a$$



Για το επιταχυνσιόμετρο της προηγούμενης άσκησης, να βρεθούν όπως και πριν :

- α) Η συχνότητα συντονισμού του συστήματος
- β) Το bandwidth του αισθητήρα
- γ) Ο θόρυβος Brown
- δ) Η ευαισθησία του συστήματος

Για

i)  $m' = m/2$

ii)  $k' = k/2$

iii)  $r' = 2*r$

Για το επιταχυνσιόμετρο της προηγούμενης άσκησης, να βρεθούν όπως και πριν :

- α) Η συχνότητα συντονισμού του συστήματος
- β) Το bandwidth του αισθητήρα
- γ) Ο θόρυβος Brown
- δ) Η ευαισθησία του συστήματος

i)  $m' = m/2$

Για την συχνότητα συντονισμού (και αντίστοιχα για το bandwidth) έχουμε:

$$f'_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2k}{m}} = \sqrt{2} f_n = \dots$$

Για τον θόρυβο έχουμε:

$$\overline{a'_B} = \frac{\sqrt{4k_B T b}}{m/2} = 2 \overline{a_B}$$

Για το επιταχυνσιόμετρο της προηγούμενης άσκησης, να βρεθούν όπως και πριν :

- α) Η συχνότητα συντονισμού του συστήματος
- β) Το bandwidth του αισθητήρα
- γ) Ο θόρυβος Brown
- δ) Η ευαισθησία του συστήματος

i)  $m' = m/2$

Αντίστοιχα, για τις νέες τιμές στην ευαισθησία ισχύουν:

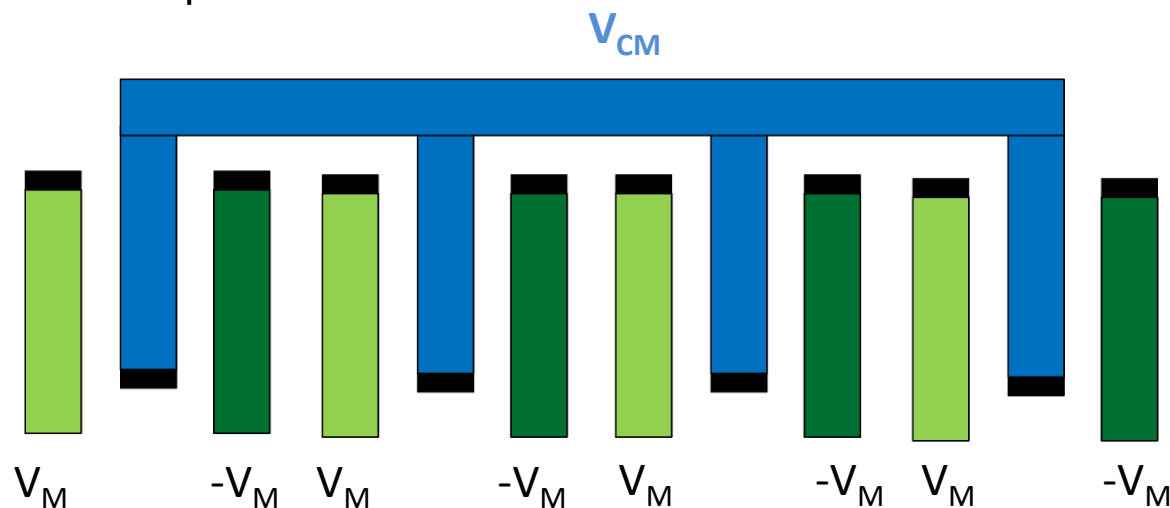
$$S_x' = -\frac{C_o}{x_o} = S_x$$

$$S_a' = \frac{1}{\omega_n^2} \frac{C_o}{x_o} = \frac{1}{2} S_a$$

$$x = 5.18 \cdot 10^{-6} a$$

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m_1$  η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία anchors μέσω δύο ελατηρίων σταθεράς  $k_1$ . Η μετακίνηση της μάζας ανιχνεύεται μέσω της μεταβολής της χωρητικότητας ενός πυκνωτή τύπου comb όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο πυκνωτής comb αποτελείται από 15 fingers στην κινούμενη μάζα (rotor) και 30 fingers στο ακίνητο μέρος (stator). Το μήκος του κάθε finger είναι  $150\mu\text{m}$ , το πάχος του  $15\mu\text{m}$  ενώ η αρχική απόσταση μεταξύ των fingers είναι  $2\mu\text{m}$ . Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς είναι  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ . Να βρεθούν:

- Η συνολική χωρητικότητα του συστήματος
- Η μεταβολή στην χωρητικότητα ως συνάρτηση της θέσης
- Η ευαισθησία του συστήματος ως προς τη θέση
- Η συχνότητα συντονισμού

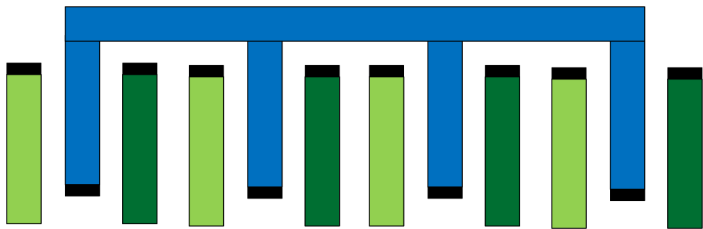


Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m_1$  η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία anchors μέσω δύο ελατηρίων σταθεράς  $k_1$ . Η μετακίνηση της μάζας ανιχνεύεται μέσω της μεταβολής της χωρητικότητας ενός πυκνωτή τύπου comb όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο πυκνωτής comb αποτελείται από 15 fingers στην κινούμενη μάζα (rotor) και 30 fingers στο ακίνητο μέρος (stator). Το μήκος του κάθε finger είναι  $150\mu\text{m}$ , το πάχος του  $15\mu\text{m}$  ενώ η αρχική απόσταση μεταξύ των fingers είναι  $2\mu\text{m}$ .

Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς είναι  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ . Να βρεθούν:

α) Η συνολική χωρητικότητα του συστήματος

Αρχικά το σχετικό σχήμα:



Αν και υπάρχουν παραπάνω από μία εκδοχές πυκνωτών comb, γενικά η συνολική χωρητικότητα αποτελείται από το άθροισμα των επί μέρους πυκνωτών (παράλληλοι)

Οπότε, αρχικά υπολογίζεται η τιμή της χωρητικότητας του επί μέρους πυκνωτή:

$$C_i = \frac{\epsilon A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{w \times l}{d} = \frac{15 \cdot 10^{-6} \cdot 150 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 10^{-6}} \cong 10 \text{ fF}$$

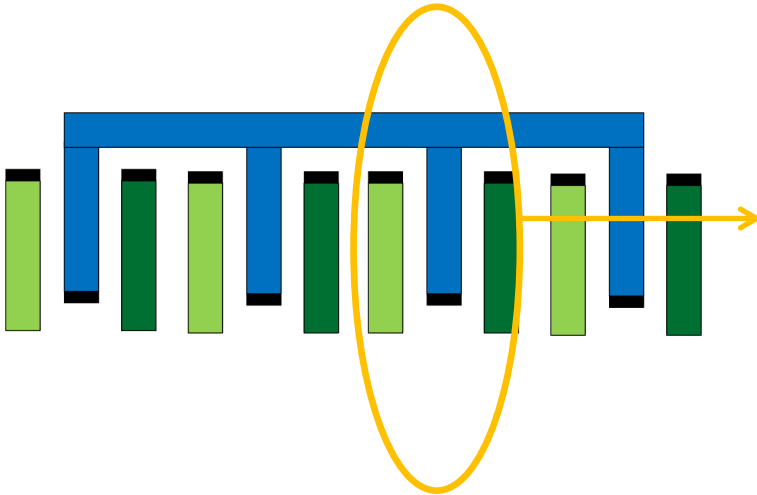
Η συνολική χωρητικότητα είναι  $N$  φορές την  $C_i$  με  $N$  ο αριθμός των **πυκνωτών** που σχηματίζονται.

$$C_{tot} = N \cdot C_i = 30 \cdot C_i = 300 \text{ fF}$$

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m_1$  η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία anchors μέσω δύο ελατηρίων σταθεράς  $k_1$ . Η μετακίνηση της μάζας ανιχνεύεται μέσω της μεταβολής της χωρητικότητας ενός πυκνωτή τύπου comb όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο πυκνωτής comb αποτελείται από 15 fingers στην κινούμενη μάζα (rotor) και 30 fingers στο ακίνητο μέρος (stator). Το μήκος του κάθε finger είναι  $150\mu\text{m}$ , το πάχος του  $15\mu\text{m}$  ενώ η αρχική απόσταση μεταξύ των fingers είναι  $2\mu\text{m}$ .

Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς είναι  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ . Να βρεθούν:

β) Η μεταβολή στην χωρητικότητα ως συνάρτηση της θέσης



Για τη συγκεκριμένη δομή του comb, ισχύει ο τύπος για τη μεταβολή στη χωρητικότητα σε 3 fingers:

$$\Delta C_i = 2\epsilon A \frac{x}{d^2}$$

Για τη συγκεκριμένη δομή του comb η μεταβολή στη χωρητικότητα θα είναι

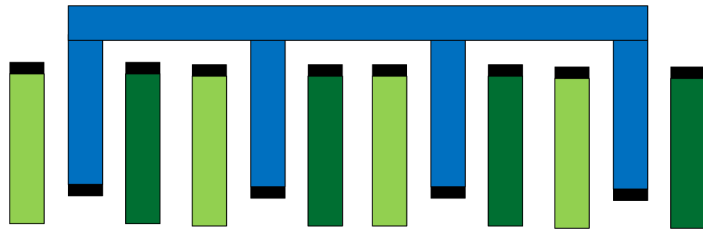
$$C_{tot} = N \cdot \Delta C_i = 15 \cdot \Delta C_i$$

Έστω χωρητικό επιταχυνσιόμετρο με σεισμική μάζα  $m_1$  η οποία συνδέεται σε ακίνητα σημεία anchors μέσω δύο ελατηρίων σταθεράς  $k_1$ . Η μετακίνηση της μάζας ανιχνεύεται μέσω της μεταβολής της χωρητικότητας ενός πυκνωτή τύπου comb όπως φαίνεται στο σχήμα. Ο πυκνωτής comb αποτελείται από 15 fingers στην κινούμενη μάζα (rotor) και 30 fingers στο ακίνητο μέρος (stator). Το μήκος του κάθε finger είναι  $150\mu\text{m}$ , το πάχος του  $15\mu\text{m}$  ενώ η αρχική απόσταση μεταξύ των fingers είναι  $2\mu\text{m}$ .

Η τιμή της διηλεκτρικής σταθεράς είναι  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ . Να βρεθούν:

γ) Η ευαισθησία του συστήματος ως προς τη θέση

Για την ευαισθησία του συστήματος:



$$S_x = \frac{dC_{tot}}{dx} = N 2\epsilon A \cdot \frac{1}{d^2}$$

Τελικά με την διάταξη του πυκνωτή comb, τόσο η αρχική τιμή της χωρητικότητας όσο και η ευαισθησία αυξάνονται κατά ένα παράγοντα  $N$