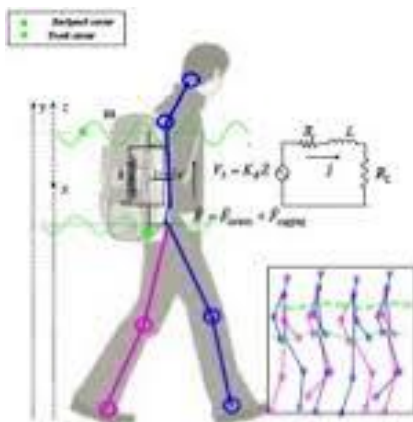


13.0 MEMS за добиване на енергия от вибрации



Проф. д-р Тодор Тодоров
tst@tu-sofia.bg
ТУ – София, 2015



Съдържание

- Въведение
- Принципи на кинетичното добиване на енергия
- Основни зависимости
- Механизми на преобразуване
- Адаптивност

1.0 Въведение

Терминология:

За устройства, които преобразуват някаква неоползотворена енергия от околната среда в англоезичната литература се използват термините:

- *energy harvester* – събирач на енергия. Само харвестер значи – жетвар, комбайн.
- *energy scavenger* - енергиен чистач.

У нас подобно на акселерометър вече се налага терминът **харвестер**, със значение: *устройство за преобразуване на неоползотворена енергия от различни източници на околната среда с малка мощност в електрическа. Мощността е от части на μW до няколко mW .*

Основни енергийни източници в зависимост от енергийните области [2]



Механизми на преобразуване между енергийните области

[2]



Въведение

За устройства, които добиват енергия от околната среда в англоезичната литература се използват термините “harvester” (събирач, жетвар) или “scavenger” (метач). Първият термин **харвестер** аналогично на много други (като акселерометър например) се налага постепенно и в нашата литература. Под харвестер се разбира устройство, което преобразува някаква енергия на околната среда в електричество. Мощността на тези устройства е от порядъка на μW до mW . MEMS харвестерите са предназначени да обслужват автономни безжични електронни системи. Например при безжичен сензор харвестерът служи за хранене на батерии или работи като самостоятелен източник. Батериите имат ограничен живот и се нуждаят от периодична замяна. Неудобства при ограничен достъп; при множество от възли в безжичните сензорни мрежи; в някои от случаите достъпът е невъзможен (например, ако сензорът е в космоса). В медицината замяната на батериите е съпроводена с оперативна намеса. Батериите са екологично вредни. Животът на харвестерите е както този на електронните устройства, което изключва замяна през целия експлоатационен срок.

Предназначение:

- за зареждане на акумулаторни батерии;
- за автономно хранване на безжични електронни системи с ниска енергийна консумация. При автономното хранване енергията се съхранява в супер кондензатори ($C \geq 1F$).

Предимства:

- Животът на харвестерите е със същата продължителност като тази на електронните устройства, което в случаите на автономно хранване изключва замяната им през целия експлоатационен срок.
- Зареждането на акумулатори удължава интервалите от време за тяхната замяна.

Неудобства при използване на батерии:

- имат ограничен живот, което налага честа замяна.
- при затруднен достъп например, ако сензорът е в космоса, дълбоко под водата, или в недостъпни местности, замяната е затруднена или невъзможна;
- при множество от възли в безжичните сензорни и актуаторни мрежи се налага да се сменят периодично голям брой батерии;
- в медицината замяната на батериите в имплантираните устройства е съпроводена с оперативна намеса.
- броят на съвременните преносими устройства непрекъснато нараства, а с това нараства и броят на батериите за тяхното хранване.
- батериите са екологично вредни.

През 72 часовата мисия 2013 г. в Афганистан един американски войник е трябвало да носи **70 батерии** за устройства като тези за нощно виждане, GPS, системи за разпознаване на образи и комуникационни връзки. Това добавя **9 kg** към военното снаряжение, което е $1/5$ от общото тегло. US Army Research Laboratory (ARL) установява, че този товар води до умора и въздейства на придвижването по време на изпълнението на военните операции. Другият извод е, че за Един пехотен батальон се изразходват **\$150 000** на година за батерии и това е **вторият по големина разход** след този за мунициите.



Енергийни източници на харвестерите:

- Кинетична енергия – вибрации, удари, шум
- Топлинна енергия – на тялото, нагревателни уреди, слънце;
- Светлинна енергия – слънце, осветителни тела;
- Електромагнитни вълни – радио вълни .

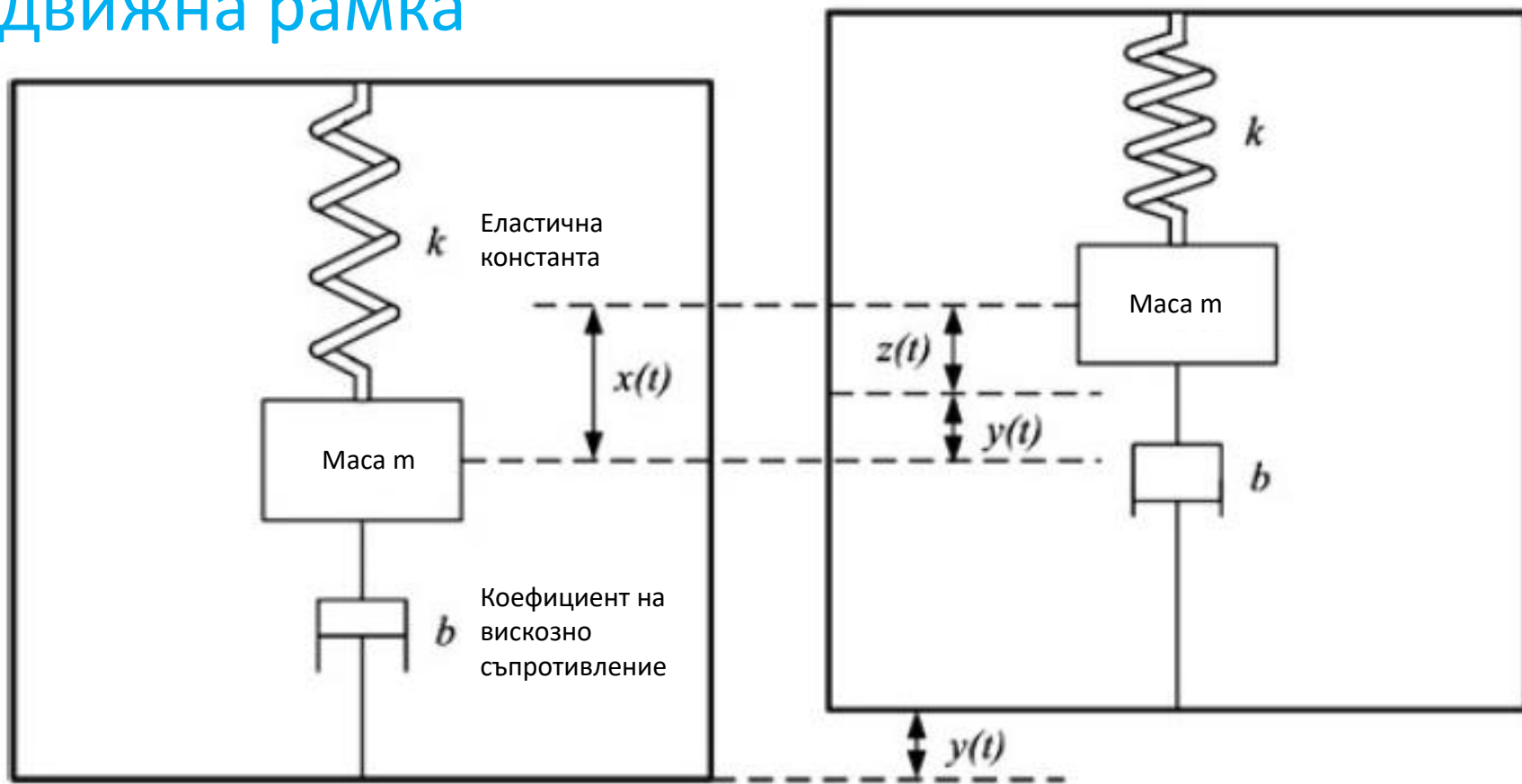
Кинетичните харвестери използват енергията на движение (най-често вибрации) и са базирани на пиезоелектрични, капацитивни и магнитостриктивни преобразователи.

Термохарвестерите използват промяната на температурата – пироелектричен ефект и термоелектричен ефект (Seebeck).

Светлинните харвестери са фотоволтаици.

Принципи на кинетичното добиване на енергия

Инерционна система маса-пружина-демпфер в подвижна рамка



$$m \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + b \cdot \frac{dz(t)}{dt} + k \cdot z(t) = -m \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$$

Решение на дифференциалното уравнение

$$m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = -m\ddot{y} \quad \text{при} \quad y = a \sin \omega t$$

$$\ddot{y} = \frac{d^2 y}{dt^2} = -a\omega^2 \sin \omega t$$

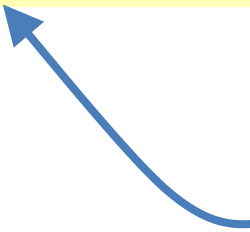
$$\eta = \frac{b}{2m} \quad \text{коефициент на демпфериране} \quad \omega_s = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{собствената честота на системата}$$

$$\ddot{z} + 2\eta\dot{z} + \omega_s^2 z = a\omega^2 \sin \omega t$$

$$z = \bar{z} + \eta_z$$

$$\ddot{\bar{z}} + 2\eta\dot{\bar{z}} + \omega_s^2 \bar{z} = 0$$

Линейно
нехомогенно ДУ от
втори ред




$$r^2 + 2\eta r + \omega_s^2 = 0$$

$$r_1 = \eta + \sqrt{\eta^2 - \omega_s^2}; \quad r_2 = \eta - \sqrt{\eta^2 - \omega_s^2}$$

При слабо демпфериране $\omega > \eta$

честота на
затихващите
трептения



$$\bar{z} = e^{-\eta t} (C_1 \sin \omega_1 t + C_2 \cos \omega_1 t) \quad \text{където} \quad \omega_1 = \sqrt{\omega_s^2 - \eta^2}$$

C_1, C_2 -зависещи от нач. усл. интеграционни константи

$$C_1 = A_z \sin(\omega_1 t + \beta) \quad C_2 = A_z \cos(\omega_1 t + \beta)$$

$$\bar{z} = A_z e^{-\eta t} \sin(\omega_1 t + \beta) \quad \text{където} \quad A_z = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$$
$$\beta = \arctan \frac{C_1}{C_2}$$

Частното решение на системата се търси във вида

$$\eta_z = B \sin(\omega t - \psi)$$

$$\dot{\eta}_z = B\omega \cos(\omega t - \psi) \quad \ddot{\eta}_z = -B\omega^2 \sin(\omega t - \psi)$$

След заместване в ЛДУ =>

$$\begin{aligned} & -B\omega^2 \sin(\omega t + \psi) + 2\eta B\omega \cos(\omega t + \psi) + \\ & + \omega_s^2 B \sin(\omega t + \psi) = a\omega^2 \sin \omega t \end{aligned}$$

Полага се $(\omega t + \psi) = \gamma$, от което =>

$$\begin{aligned} & -B\omega^2 \sin \gamma + 2\eta B\omega \cos \gamma + \omega_s^2 B \sin \gamma = \\ & = a\omega^2 \sin \gamma \cos \psi - a\omega^2 \cos \gamma \sin \psi \end{aligned}$$

След приравняване на членовете пред $\sin \gamma$ и $\cos \gamma$

$$\begin{cases} -B\omega^2 + \omega_s^2 B = a\omega^2 \cos \psi \\ 2\eta B\omega = -a\omega^2 \sin \psi \end{cases}$$

$$B = \frac{a\omega^2}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2}}$$

Амплитуда на
принудените
колебания

$$\psi = -\arctan \frac{2\eta\omega}{\omega_s^2 - \omega^2}$$

Фаза на
принудените
колебания

Решението на ЛДУ е

собствени трептения – бързо затихват

$$z = A_z e^{-\eta t} \sin(\omega_1 t + \beta) +$$

принудени трептения –
доминиращи

$$+ \frac{a\omega^2}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2}} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{2\eta}{\omega_s^2 - \omega^2}\right)$$

Резонанс при $\omega = \omega_r = \omega_s$

След преходния период остават колебанията

$$z = \frac{a\omega^2}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2}} \sin\left(\omega t + \arctan \frac{2\eta}{\omega_s^2 - \omega^2}\right)$$

това се приема за решение на ЛДУ

Демпфериращ фактор (ДФ)

$$\zeta_T = \frac{b}{2m\omega_r} = \frac{\eta}{\omega_r}$$

$$\zeta_T = \frac{b}{2m\omega_r} = \frac{b_m + b_e}{2m\omega_r} = \zeta_m + \zeta_e$$

механичен ДФ

електрически ДФ

Качествен фактор (Q – фактор)

$$Q_T = \frac{1}{2\zeta_T} = \frac{\omega_r}{2\eta} = \frac{\omega_r}{\frac{2b}{2m}} = \frac{\omega_r m}{b} = \frac{m \sqrt{\frac{k}{m}}}{b} = \frac{\sqrt{km}}{b}$$

$$\frac{1}{Q_T} = \frac{1}{Q_{OB}} + \frac{1}{Q_e}$$

$$Q_{OB} = \frac{1}{2\zeta_m} \quad \text{Q – фактор при отворена ел. верига}$$

$$Q_e = \frac{1}{2\zeta_e} \quad \text{Q – фактор на електрическото преобразуване}$$

$$\left(m\ddot{z} + b\dot{z} + kz = ma\omega^2 \sin \omega t \right) \times \dot{z} \Rightarrow$$

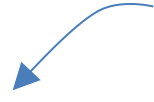
$$\dot{z} \frac{dm\dot{z}}{dt} + b\dot{z}^2 + kz \frac{dz}{dt} = \dot{z} ma\omega^2 \sin \omega t$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m\dot{z}^2}{2} \right) + b\dot{z}^2 + \frac{d}{dt} \frac{kz^2}{2} = -\dot{z}\Phi$$

$$\frac{d}{dt} E_k + b\dot{z}^2 - \frac{d}{dt} E_p = -\dot{z}\Phi$$

$$\frac{d}{dt} (E_k - E_p) = -b\dot{z}^2 - \dot{z}\Phi$$

Мощност на
инерционната
сила



$$P_V = b\dot{z}^2$$

Мощност на съпротивителната сила
(мощност на загубите)

$$z = \frac{a\omega^2}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2}} \sin\left(\omega t + \arctan\frac{2\eta}{\omega_s^2 - \omega^2}\right)$$

$$\dot{z} = \frac{a\omega^3}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2}} \cos\left(\omega t + \arctan\frac{2\eta}{\omega_s^2 - \omega^2}\right)$$

$$P_v = \frac{ba^2\omega^6}{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2} \cos^2\left(\omega t + \arctan\frac{2\eta}{\omega_s^2 - \omega^2}\right)$$

$$P_{v\max} = \frac{ba^2\omega^6}{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2}$$

$$P_{v\max} = \frac{ba^2 \frac{\omega^6}{\omega_s^4}}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_s^2}\right)^2 + 4 \frac{\eta^2 \omega^2}{\omega_s^4}} \quad \omega_0 = \frac{\omega}{\omega_s}$$

$$P_{v\max} = \frac{ba^2 \omega_0^4 \omega^2}{\left(1 - \omega_0^2\right)^2 + 4 \frac{\eta^2 \omega_0^2}{\omega_s^2}} = \frac{ba^2 \omega_0^4 \omega^2}{\left(1 - \omega_0^2\right)^2 + 4 \zeta_T^2 \omega_0^2}$$

При резонанс $\omega = \omega_s$ $\omega_0 = 1$ $1 - \omega_0^2 = 0$

$$P_{v\max} = \frac{ba^2 \omega_s^2}{4 \zeta_T^2}$$

Максимално преобразуване на мощността от механичната към електрическата част се получава, когато $\zeta_e = \zeta_m$, т.е. *демпферирането от електрическата част е равно на механичните загуби*. Максималната електрическа мощност, която може да се извлече от кинетичната енергия на харвестера се дава чрез

$$\begin{aligned}
 P_e &= \frac{P_{v \max}}{2} = \frac{ba^2 \omega_s^2}{8(\zeta_{OB} + \zeta_m)^2} = \\
 &= \frac{ba^2 \omega_s^2}{8 \cdot (2\zeta_m)^2} = \frac{ba^2 \omega_s^2}{32 \cdot \zeta_m^2} = \frac{2m\omega_s \times ba^2 \omega_s^2}{2m\omega_s \times 32 \cdot \zeta_m^2} = \\
 &= \frac{2(2\zeta_m)ma^2 \omega_s^3}{32 \cdot \zeta_m^2} = \frac{2(2\zeta_m)ma^2 \omega_s^3}{32 \cdot \zeta_m^2} = \frac{ma^2 \omega_s^3}{8\zeta_m} = \\
 &= \frac{ma^2 \omega_s^3}{4} Q_{OB}
 \end{aligned}$$

Максималната енергия на електрическата част е обратнопропорционална на демпфериращия фактор и пропорционална на Q – фактора. При проектиране на вибрационни микро-генератори е важно да се постигне максимум на изходната мощност. Затова е важно генераторът да се проектира с висок Q – фактор (т.е. нисък $D\Phi$) и да се накара генераторът да работи в резонанс. Максималната амплитуда на вибро-генератора е

$$B = \frac{a\omega^2}{\sqrt{(\omega_s^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega^2}}$$

Отношението на максималната амплитуда B на инерционната маса към амплитудата a на външните вибрации се нарича **коефициент на усилване q на системата**

$$q = \frac{B}{a} = \frac{\omega^2}{\sqrt{\left(\omega_s^2 - \omega^2\right)^2 + 4\eta^2 \omega^2}}$$

$$q = \frac{\omega_0^2}{\sqrt{\left(1 - \omega_0^2\right)^2 + 4\zeta_T^2 \omega_0^2}}$$

При резонанс $\omega_0 = 1$ се получава максималният коефициент на усилване

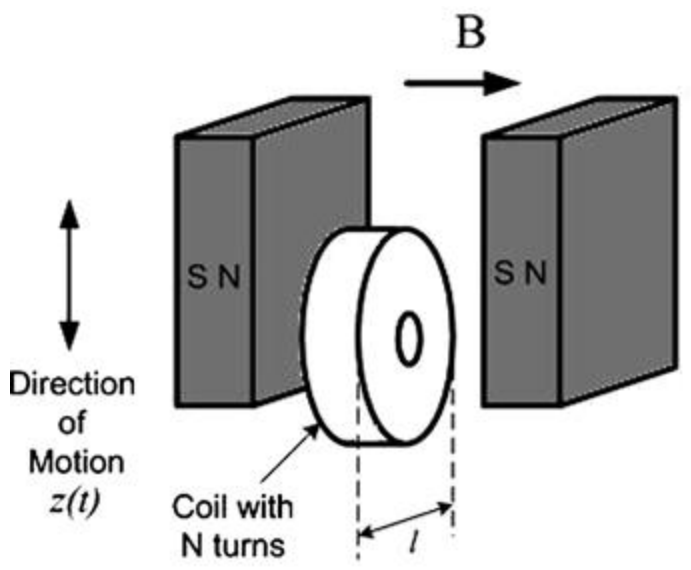
$$q_r = \frac{1}{2\zeta_T} = Q_T$$

Следователно, за да работи с максимална амплитуда на вибрациите микро-генераторът трябва да има максимално висок Q-фактор (равносилно на нисък ДФ) и да бъде в резонанс.

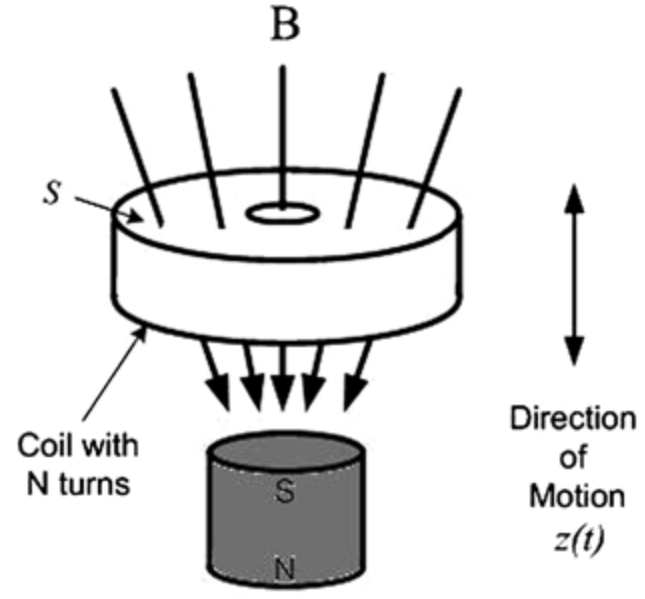
Механизми на преобразуване

Електромагнитни генератори

Електромагнитна индукция Michael Faraday 1831



$$\text{e.m.f.} = -N \cdot l \cdot B \cdot \frac{dz}{dt}$$

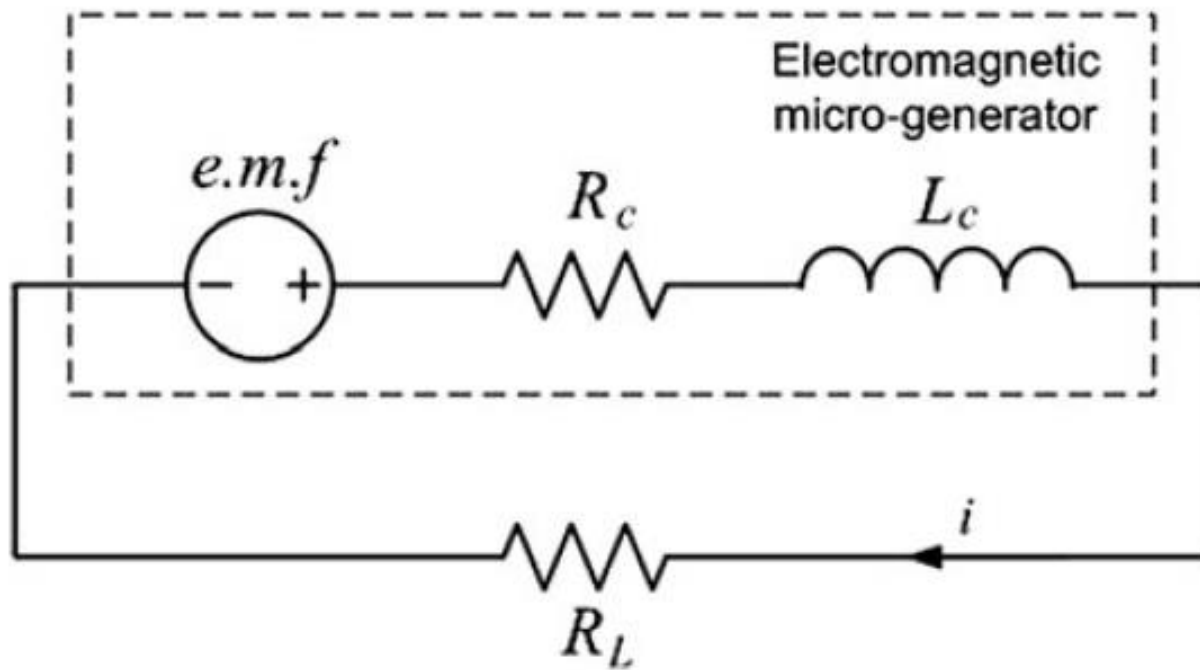


$$\text{e.m.f.} = -N \cdot S \cdot \frac{dB}{dz} \cdot \frac{dz}{dt}$$

l – ефективна дължина на бобината
 B – магнитна индукция
 N – брой намотки

S – ефективна площ на бобината

$$\text{e.m.f.} = \kappa \cdot \frac{dz}{dt}$$



$$\text{e.m.f.} + i \cdot (R_L + R_c) + L_c \frac{di}{dt} = 0$$

Електрически
коэффициент на
демпфериране

$$b_e = \frac{\kappa^2}{R_L + R_c + j\omega L_c}$$

При ниски честоти
индуктивността L_c
се пренебрегва

$$b_e = \frac{\kappa^2}{R_L + R_c}$$

Електрически ДФ

$$\zeta_e = \frac{\kappa^2}{2m\omega(R_L + R_c)}$$

R_L се избира, така че да се изравни механичното демпфериране b_m с електрическото

$$R_L = R_c + \frac{\kappa^2}{b_m}$$

Средната мощност на генератора се пресмята чрез

$$P_e = \frac{ma^2}{16\zeta_m\omega_r(1 - \frac{R_c}{R_L})}$$

Reference	f (Hz)	Excitation level (m s^{-2})	Mass (g)	Volume (mm^3)	P (μW)	Power density ($\mu\text{W mm}^{-3}$)	Structure material
Williams et al. [10]	4400	382	0.0023	5.4	0.3	0.0556	GaAs Polyimide ^b
Ching et al. [11]	110	95.5	N/A	1000	830	0.83	Copper ^c
Glynn-Jones et al. [12]	322	2.7	N/A	840	180	0.214	Steel ^c
Koukharenko et al. [13]	1615	3.92	N/A	100	0.104	0.00104	Silicon ^b
Saha et al. [14]	84	7.8	25	800 ^a	3500	4.375	Copper ^c
Beeby et al. [15]	52	0.589	0.66	150	46	0.307	BeCu ^c
Klahand et al. [16]	25	N/A	15.6 ^a	2000 ^a	3.97	0.00199	Styrene ^b
Torah et al. [17]	50	0.589	N/A	570	58	0.102	BeCu ^c
Wang et al. [18]	280	10	N/A	315	17.2	0.055	Nickel ^b

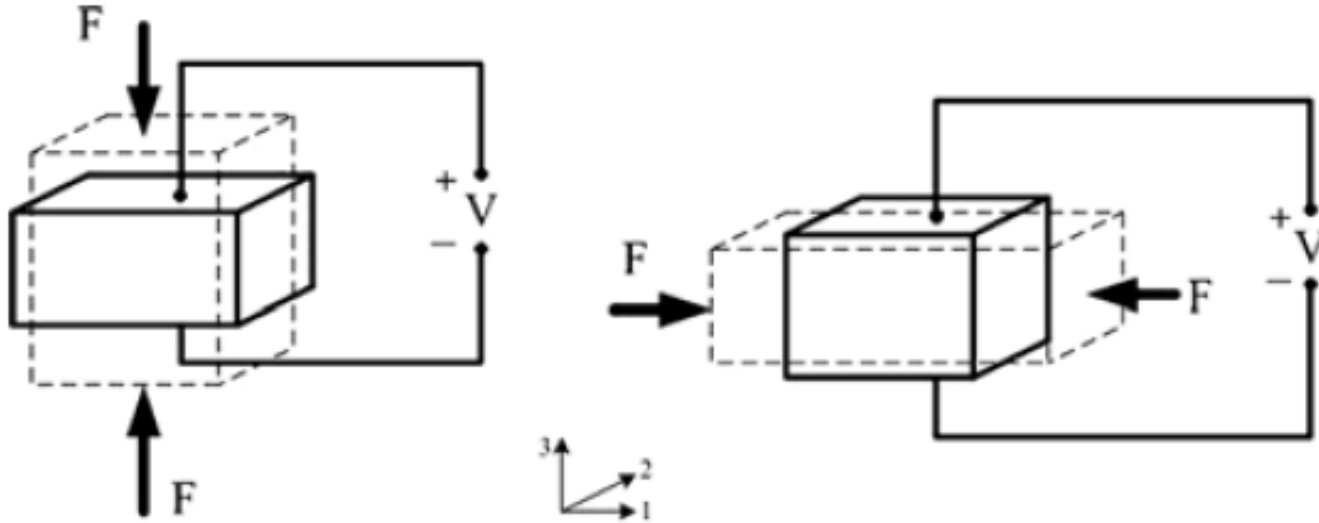
^a Estimated or extrapolated from data in reference

^b Micro-scale

^c Macro-scale

Пиезоелектрични генератори

Пиезоелектричен ефект Pierre и Jacques Curie през 1880 г.



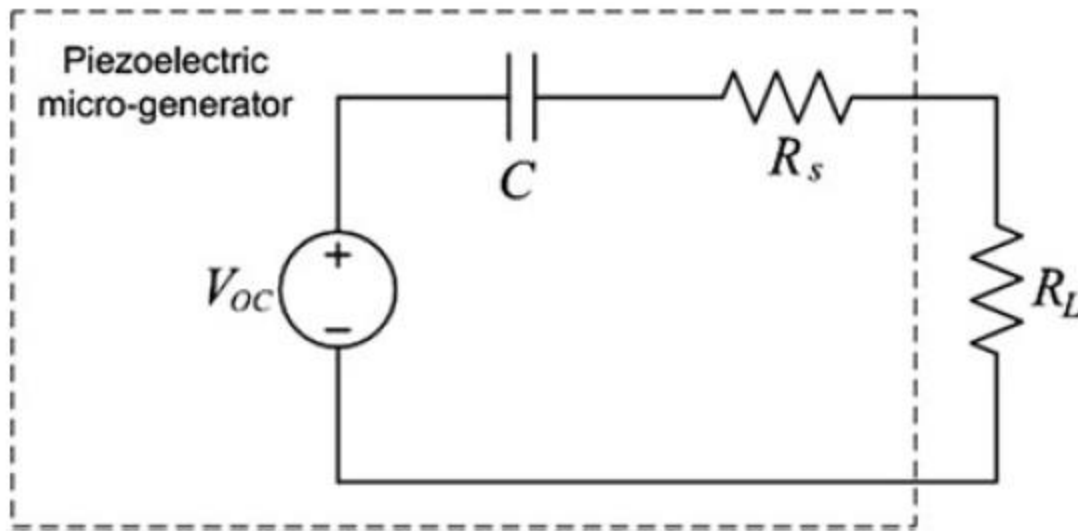
33 - режим

$$\delta = \frac{\sigma}{Y} + d \cdot E$$

31 - режим

$$D = \varepsilon \cdot E + d \cdot \sigma$$

δ е механичното относително удължение, σ е механичното напрежение, Y е модул на Young, d е относително удължение от пиезоелектричния ефект, E е електрическото поле, D е електрическото преместване (плътността на товарите) и ε е пиезоелектричната константа на пиезоелектричния материал.



t – дебелина на
пиезоелектричния
материал

$$V_{OC} = -\frac{d \cdot t}{\epsilon} \cdot \sigma$$

Пиезоелектричен
демпфериращ
коефициент

$$b_e = \frac{2m\omega_r^2\kappa^2}{2\sqrt{\omega_r^2 + \frac{1}{R_L C_L}}}$$

Отново R_L се използва
за оптимизиране на
максималната
мощност

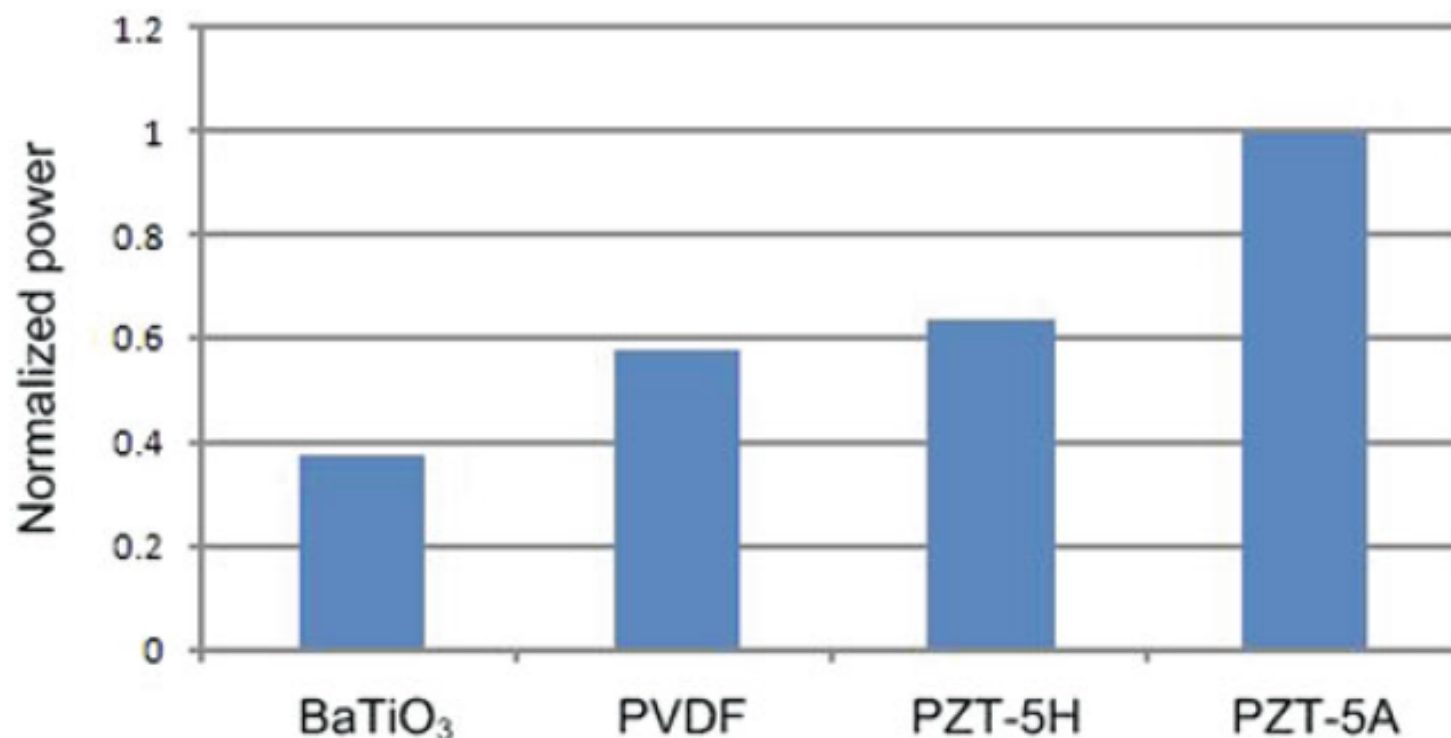
$$R_{opt} = \frac{1}{\omega_r C} \frac{2\zeta_m}{\sqrt{4\zeta_m^2 + \kappa^4}}$$

b^* е характерна
за генератора
константа, a -
ускорението

$$P_{max} = \frac{1}{\omega_r^2} \frac{R_L C^2 \left(\frac{2Ydtb^*}{\epsilon}\right)^2}{(4\zeta_m^2 + \kappa^4)(R_L C \omega_r)^2 + 4\zeta_m \kappa^2 (R_L C \omega_r) + 2\zeta_m^2} a^2$$

Сравнение на изходната мощност на пиезоелектрични генератори използващи различни пиезоелектрични материали

Material	PZT-5H	PZT-5A	BaTiO ₃	PVDF
d_{31} ($\times 10^{-12} \text{C N}^{-1}$)	-274	-171	78	23
Young's modulus (GPa)	50	50	67	2
Relative permittivity (ϵ/ϵ_0)	3400	1700	1700	12

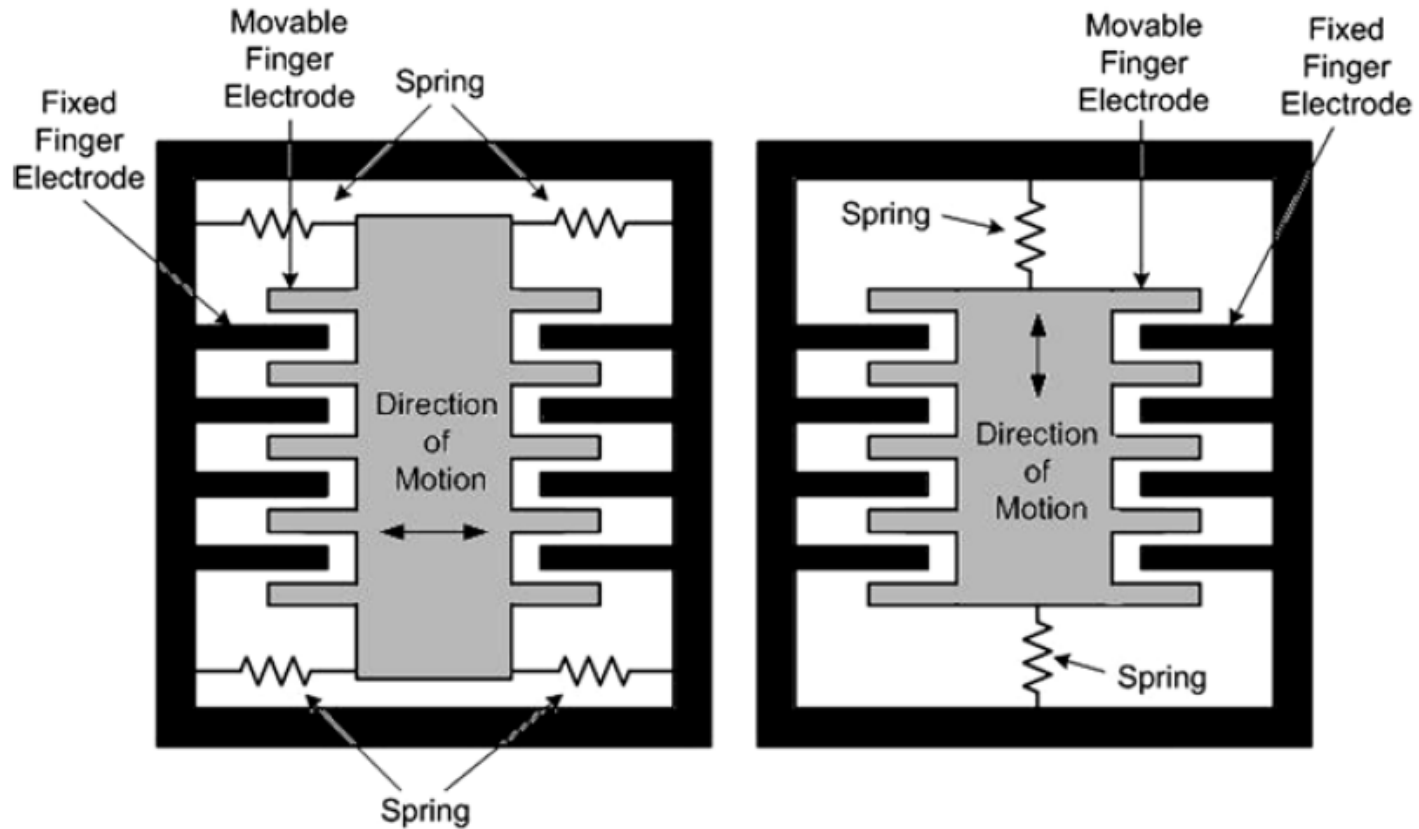


Reference	f (Hz)	Excitation level ($m s^{-2}$)	Mass (g)	Volume (mm^3)
White et al. [23]	80	2.3	0.8	125
Roundy et al. [1]	120	2.5	9.2	1000
Lu et al. [24]	7000	N/A	N/A	N/A
Jeon et al. [25]	13.9	106	N/A	0.027 ^b
Fang et al. [26]	608	9.8	0.0016 ^b	0.6 ^b
Marzencki et al. [27]	1500	3.92	0.0009 ^b	5
Jeong et al. [28]	120	0.98	N/A	N/A
Kok et al. [29]	230	9.8	N/A	N/A
Shen et al. [30]	462.5	19.6	N/A	N/A
Zhu et al. [31]	67	4	2.8	987

Reference	P (μW)	Power density ($\mu W mm^3$)	Structure	Piezoelectric material
White et al. [23]	2.1	0.0168	Unimorph	Screen-printed PZT
Roundy et al. [1]	375	0.375	Bimorph	PZT
Lu et al. [24]	1600 ^a	N/A	Bimorph	PZT-PIC255
Jeon et al. [25]	1	37.04	Unimorph	PZT
Fang et al. [26]	2.16	3.6	Unimorph	PZT
Marzencki et al. [27]	0.03	0.006	Unimorph	AlN
Jeong et al. [28]	500	22	Bimorph	PMNZT
Kok et al. [29]	0.27	N/A	Free-standing unimorph	PZT
Shen et al. [30]	2.15	3.3	Unimorph	PZT
Zhu et al. [31]	240	0.24	Bimorph	Screen-printed PZT

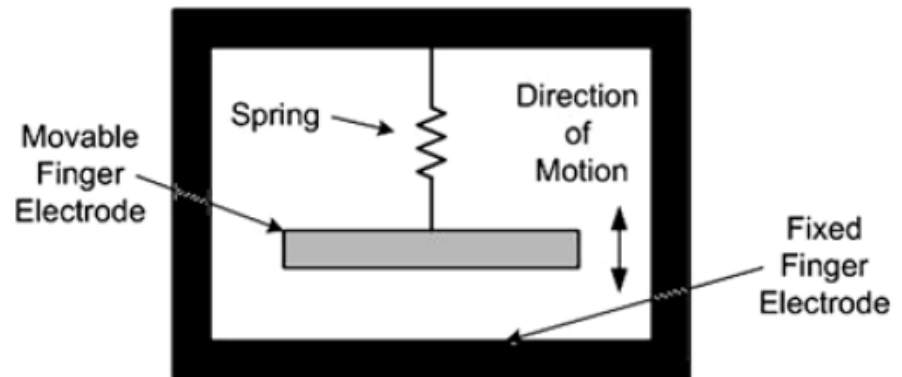
Електростатични генератори

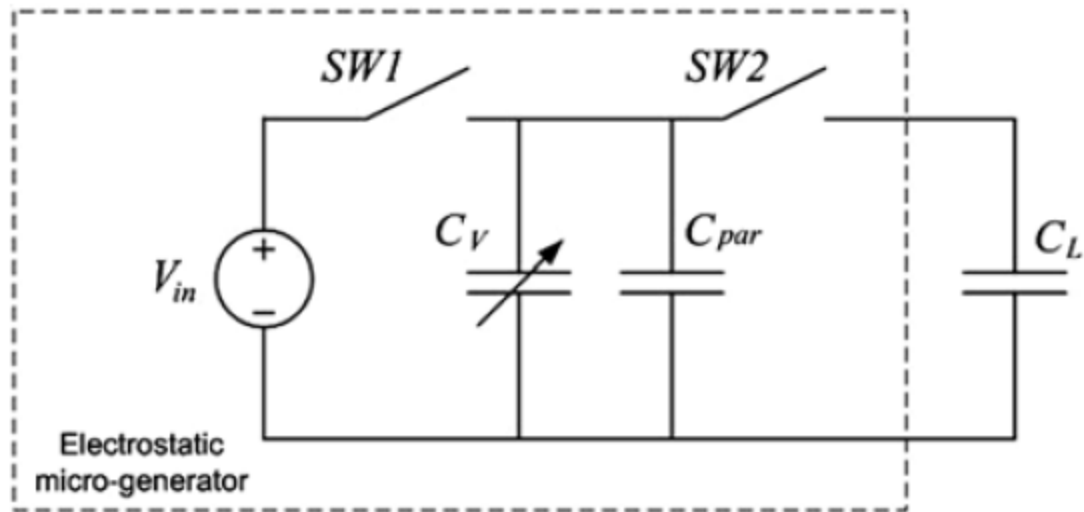
Използва се енергията на променлив кондензатор, задвижван механично



(a)

(b)





$$V_{\max} = \frac{C_{\max} + C_{\text{par}}}{C_{\min} + C_{\text{par}}} V_{\text{in}}$$

Загубената в демфера енергия и съответната работа се дава от произведението на силата и разстоянието

$$P = \frac{4YF\omega\omega_c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{1 - \omega_c^2} - \left(\frac{F}{mY\omega^2\omega_c}U\right)^2}$$

F е демпфиращата сила, Y е преместването на рамката $\omega_c = \omega/\omega_r$; $U = \frac{\sin(\pi/\omega_c)}{1 + \cos \pi/\omega_c}$

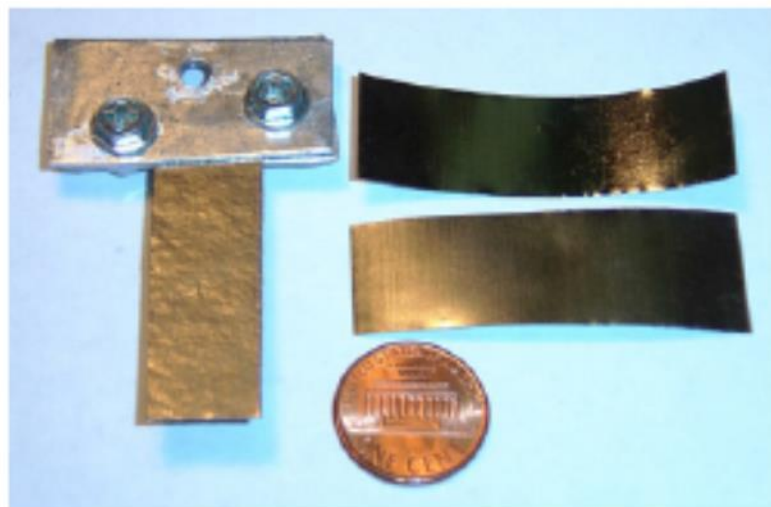
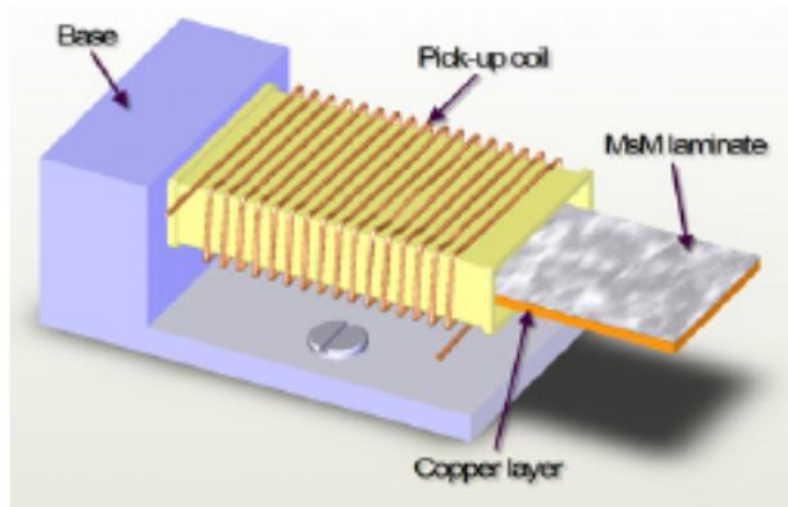
Оптимална демпферираща сила $F_{\text{opt}} = \frac{Y \omega^2 m}{\sqrt{2}} \frac{\omega_c}{|(1 - \omega_c^2)U|}$

Характеристики на електростатични генератори

Reference	f (Hz)	Excitation level (m s ²)	Mass (g)	Volume (mm ³)	P (μW)	Power density (μW mm ³)	Type
Meninger et al. [34]	2520	N/A	N/A	75	8	0.11	IPO
Tashiro et al. [35]	6	1	780	N/A	36	N/A	OP
Mitcheson et al. [36]	30	50	0.1	750	3.7	0.0049	N/A
Arakawa et al. [37]	10	3.9	N/A	800	6	0.0075	IPO
Despesse et al. [38]	50	8.8	104	1800	1052	0.584	IPGC
Kuehne et al. [39]	1000	1.96	N/A	N/A	4.28	0.079	IPO
Yen et al. [40]	1560	82.32	N/A	N/A	1.8	N/A	OP
Sterken et al. [41]	500	9.8	N/A	N/A	5	N/A	OP
Lo and Tai [42]	50	576.6	54	50,000	17.98	0.00036	OP
Hoffmann et al. [43]	1300–1500	127.4	642e-6	N/A	3.5	N/A	IPO
Naruse et al.	2	3.92	N/A	N/A	40	N/A	IPGC

Магнитоотрикативни и магнитоотрикативни-пиезоелектрични генератори

Terfenol-D/PZT/Terfenol-D композит. Устройството има 1.2 mW мощност, когато е възбудено от 5 ms^{-2} при 30 Hz.



Устройство с Metglas 2605SC ($\text{Fe}_8\text{B}_{13.5}\text{Si}_{3.5}\text{C}_2$) –магнитоотрикативен материал и магнитно преобразуване на вибрациите - $200 \mu\text{W}$ и $900 \mu\text{W cm}^{-3}$, при ниска честота 58 Hz. За вибрации с резонансна честота от 1.1 kHz и пиково ускорение 8.06 m s^{-2} , средна плътност на мощността е $576 \mu\text{W}$ и $606 \mu\text{W cm}^{-3}$ по-добро постижение от аналогични пиезоелектрични генератори.

Тип енерго преобразуване	Предимства	Недостатъци
Електромагнитно	<ul style="list-style-type: none"> • Няма отделен захранващ източник. • Няма механични ограничители • Не е необходим интелигентен материал • Висок изходен ток 	<ul style="list-style-type: none"> • Обемисти размери • Трудно се интегрират с микросистемите • Проблеми при изработване на бобините • Ниско изходно напрежение 0.1 V. • Влошаване на работата с намаляване на размерите
Пиезоелектрично	<ul style="list-style-type: none"> • Високо изходно напрежение от 2-10V. • Няма механични ограничители. • Не се нуждае от отделен енергиен източник. • Съвместим с микро-обработките. 	<ul style="list-style-type: none"> • Микро-производството не е съвместимо с CMOS процесите • Тънките пиезо-филми имат слаби куплиращи коефициенти. • Изтичане на зарядите • Висок изходен импеданс • Нисък изходен ток

Тип енерго преобразуване	Предимства	Недостатъци
Електростатично	<ul style="list-style-type: none"> •Лесно се интегрира с ИС и електрониката. •Високи изходни напрежения от 2-10 V. •Не е необходим специален материал. 	<ul style="list-style-type: none"> •Изисква хранващ източник. •Необходимост от механични ограничители. •Демпферира и редуцира движението. •Висок изходен импеданс •Ниски изходни токове
Магнито-стриктивно	<ul style="list-style-type: none"> •Най-висок коефициент на електромеханично преобразуване (куплиране). •Няма деполяризация. •Висока гъвкавост. •Процеси с високи честоти. 	<ul style="list-style-type: none"> •Нелинеен ефект. •Изисква бобина за сваляне на напрежението •Изисква постоянни магнити. •Трудно се интегрира с MEMS процесите

Адаптивност на кинетичните енергийни харвестери

Математическият анализ показва, че максимална мощност се генерира, когато резонансната честота на генератора съвпада с честотата на външните вибрации. Генераторите имат само една собствена честота. Резонанс с висок Q -фактор означава ограничаване на честотния диапазон, в който може да се събира енергия. Ако резонансната честота на генератора не съвпада с честотата на външните вибрации, мощността пада значително. По данни от публикации голяма част от генераторите работят с една фиксирана честота. За приложения като возила, човешко движение и вибрации породени от вятъра, където честотата от вибрациите се променя случайно, ефективността на генератор с една фиксирана честота забележимо намалява, ако генераторът не винаги е в резонанс. Този недостатък може да се превъзмогне, ако генераторите са способни да работят в широк честотен диапазон като резонансна честота се настройва да е равна на външната за дадения момент от време.

Два подхода за постигане на адаптивност:

• **Резонансен подход** – генератор с една резонансна честота, която се настройва винаги да съвпада с честота на външните вибрации.

Постига се чрез промяна на механичните или електрическите параметри на системата. Резонансните методи биват:

-с прекъснато действие – настройката се извършва периодично като енергия за настройването се губи еднократно до достигане на резонансната честота;

-непрекъснато действие – механизмът за настройване на честотата действа по време на резонанс.

• **Разширяване на честотния диапазон:**

-масив от структури с различни резонансни честоти;

- ограничител на амплитудите;

-свързани осцилатори;

- нелинейни (например магнитни) пружини;

- би-стабилни структури;

-голяма инерционна маса (голямо устройство) с много степени на демпфериране.

Стратегии за настройване на резонансната честота.

Изисквания към методите за настройване

- Консумираната от механизма за настройване енергия трябва да бъде възможно най-ниска и да не надвишава енергията на генератора
- Механизмът трябва да покрие достатъчно широк работен честотен диапазон.
- Настройващият механизъм трябва да бъде с възможно най-висока честотна резолюция.
- Генераторът трябва да има възможно най-висок Q -фактор за да постигне максимум на изходната енергия и стратегията за настройване не трябва да води до повишаване на демпферирането т.е до намаляване на Q -фактора в целия честотен диапазон.

Механични методи за настройка

Разглеждат се само конзолни структури поради най-голямото им приложение, но методите може да се приложат и за други видове еластични структури.

Методите за настройка са :

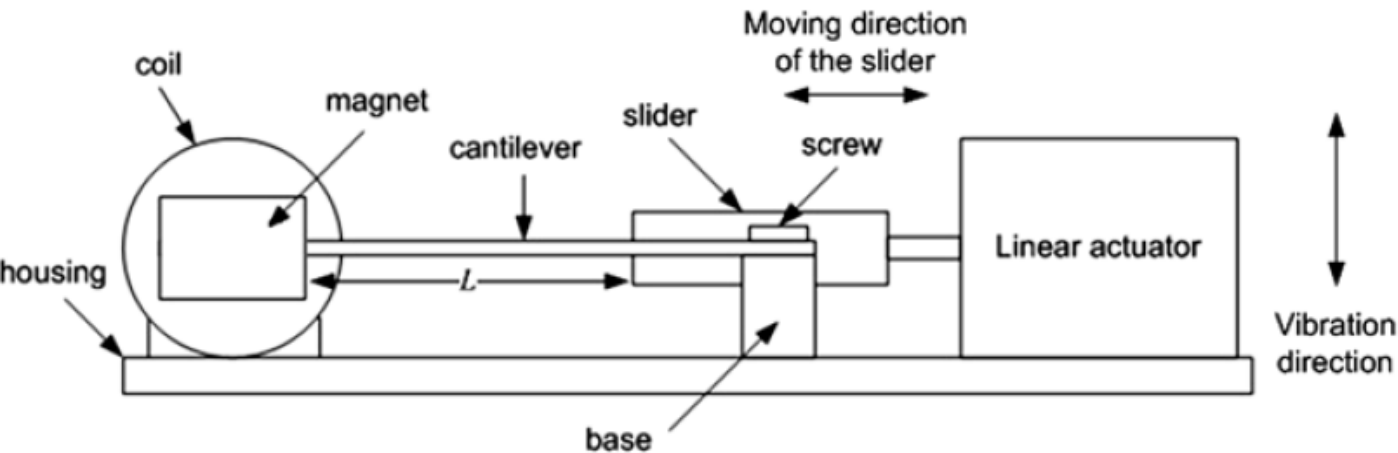
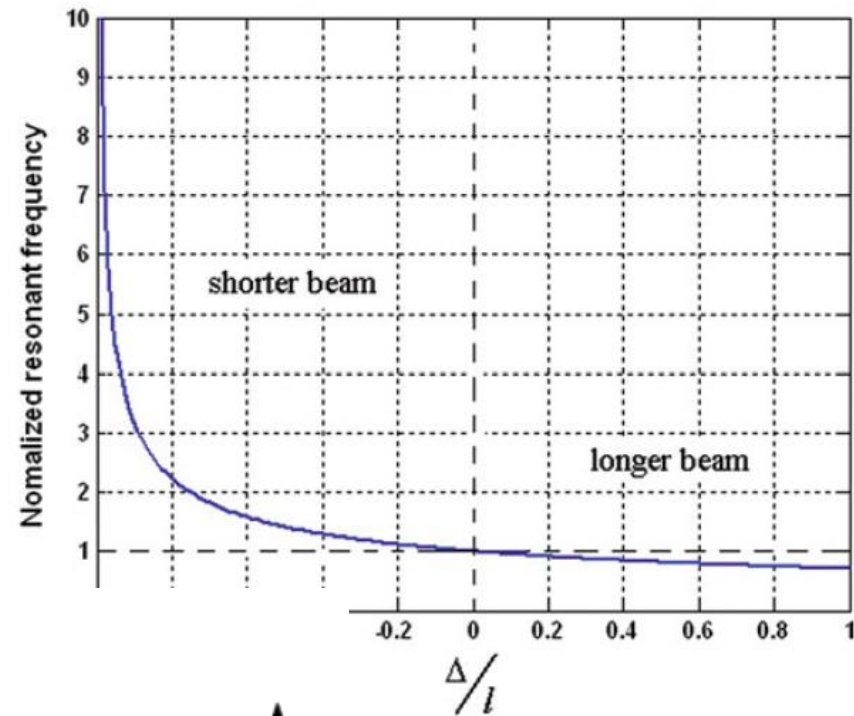
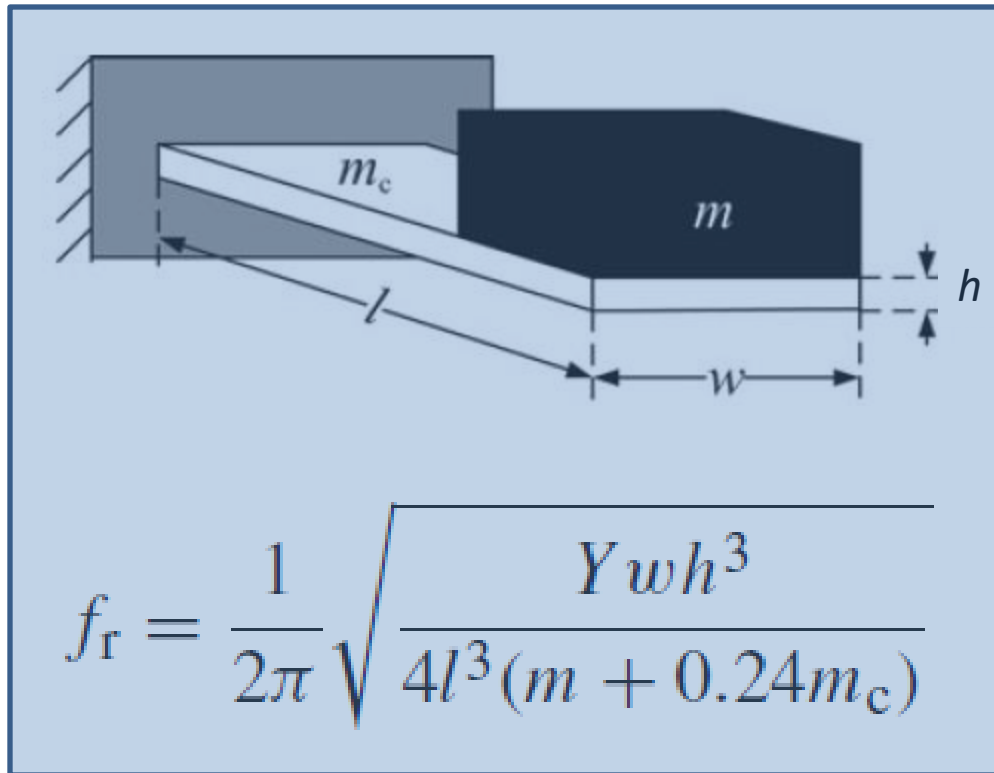
- Промяна на размерите
- Преместване на масовия център
- Променлив коефициент на еластичност
- Опъване или свиване на структурата

Резонансната честота на система пружина-маса се пресмята чрез:

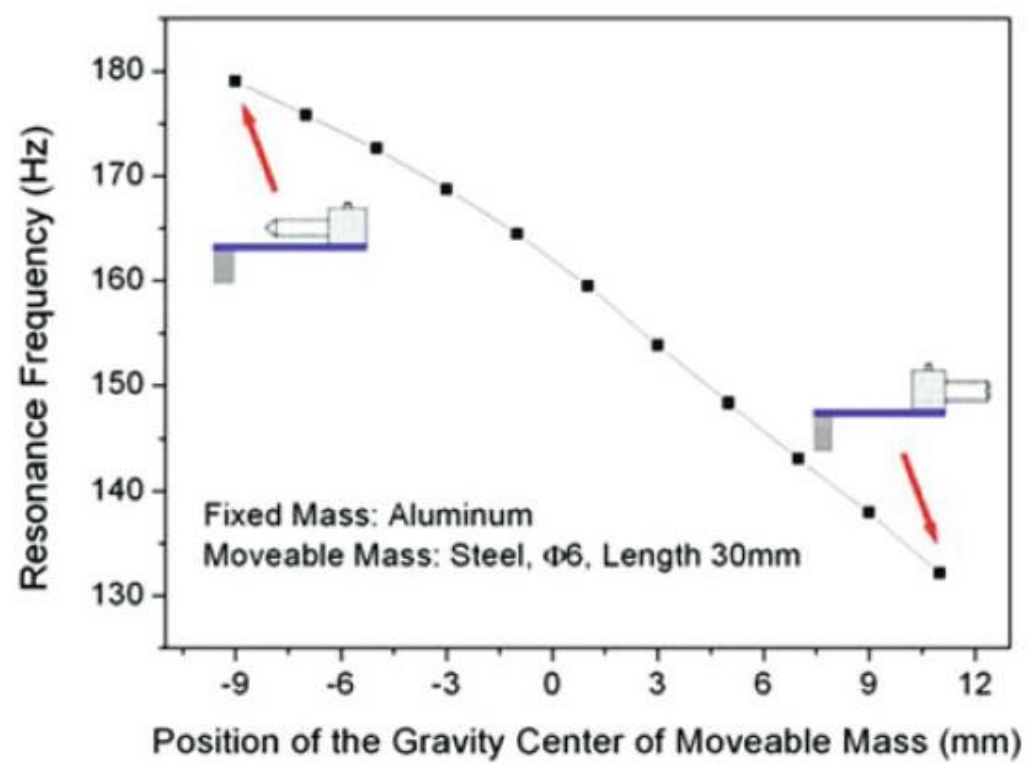
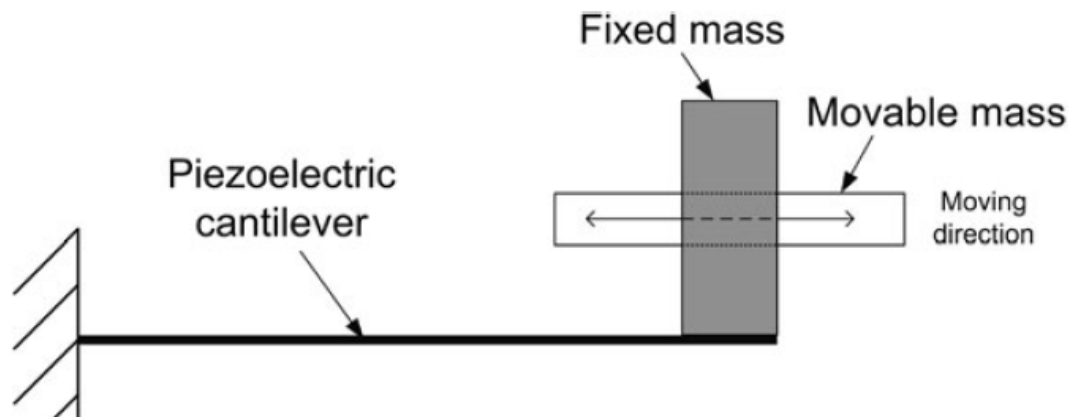
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Настройването може да се постигне чрез промяна на коефициента на еластичност k и масата m .

Конструктивно най-лесно се влияе на честотата чрез промяна на ефективната дължина l на конзолата.



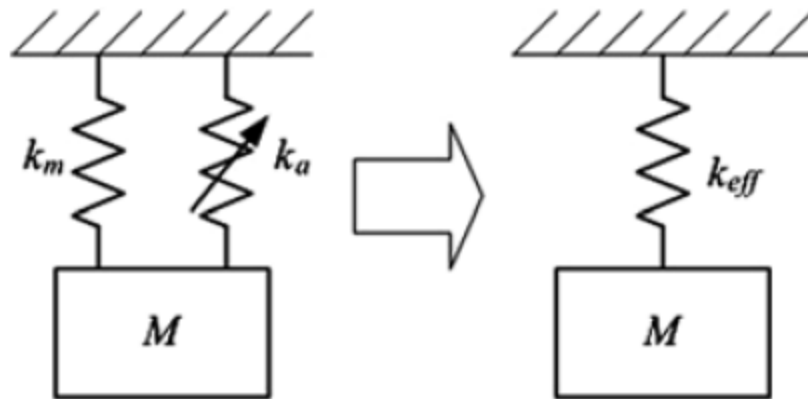
Настройване на резонансната честота чрез промяна на положението на масовия център



Настройване чрез променлива пружинна константа
Към еластичната константа на пружината се добавя отрицателна еластична константа k_a

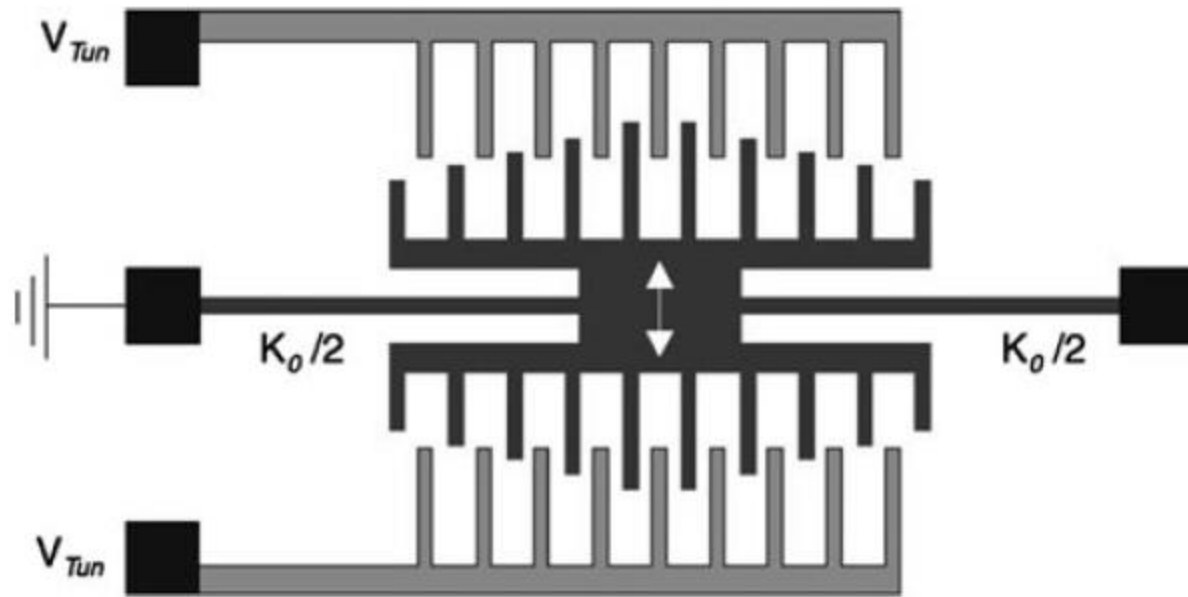
$$k_{\text{eff}} = k_m + k_a$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_m + k_a}{m}}$$

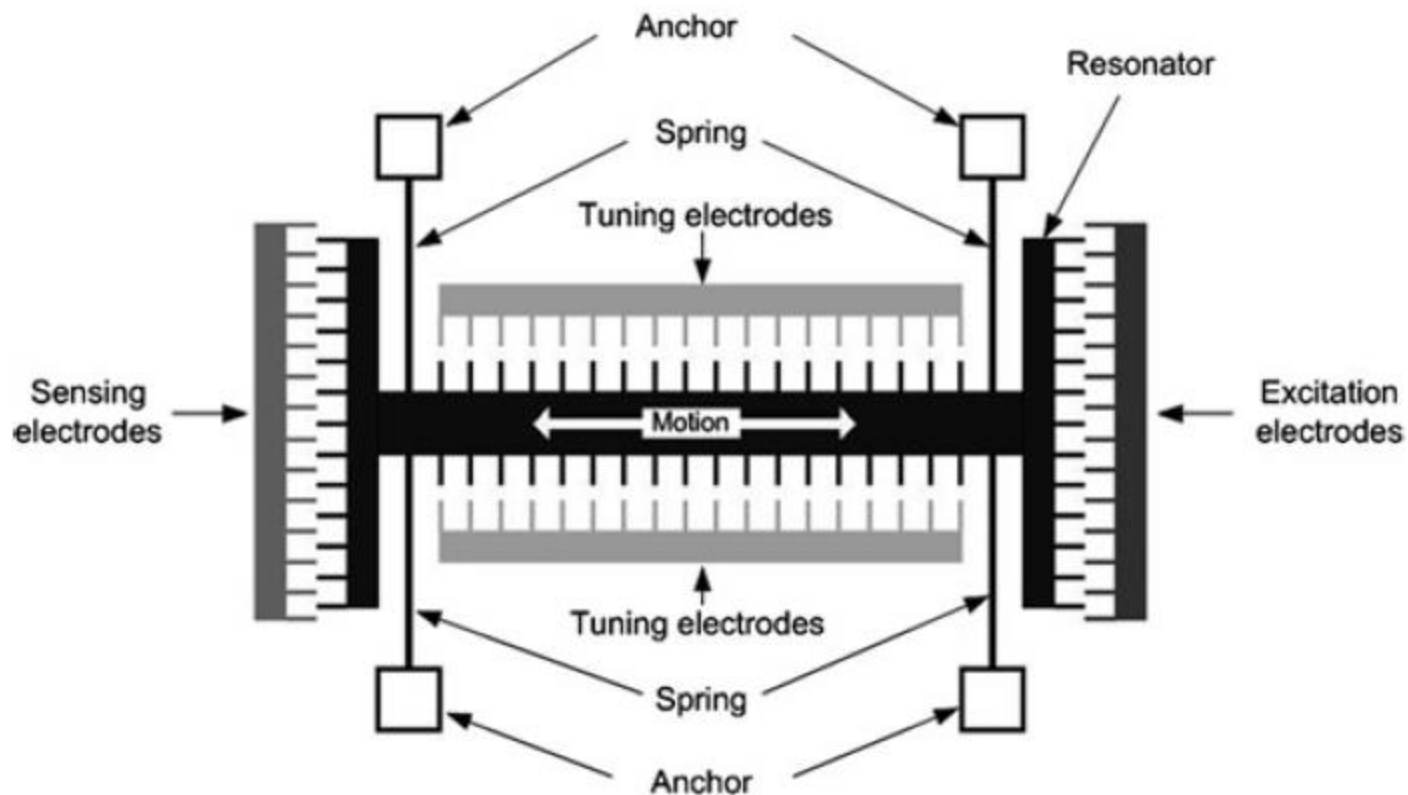


Отрицателната еластична константа може да бъде електростатична, пиезоелектрична, магнитна или термична.

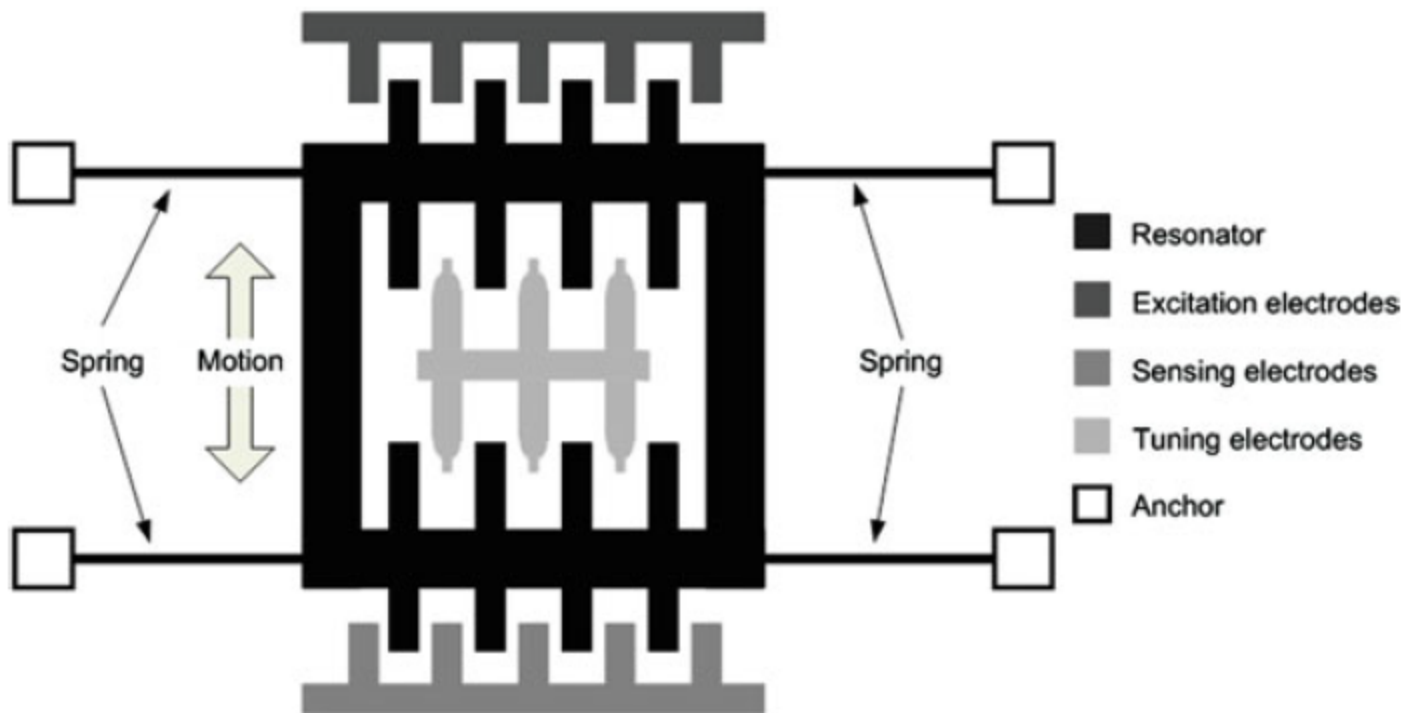
Електростатичен метод за добавяне на отрицателен коефициент на еластичност



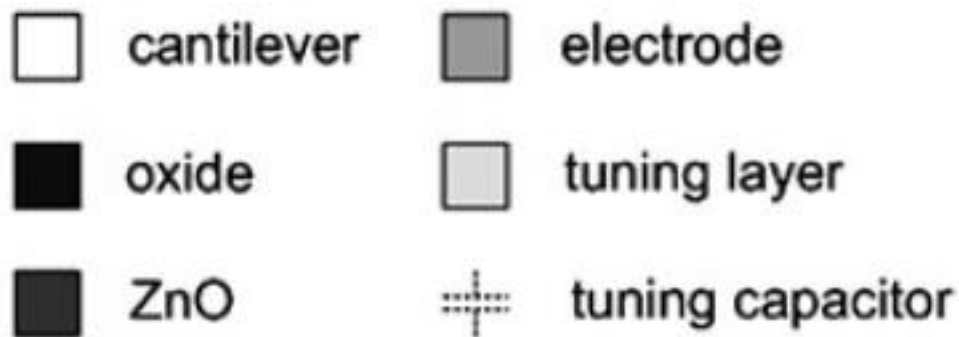
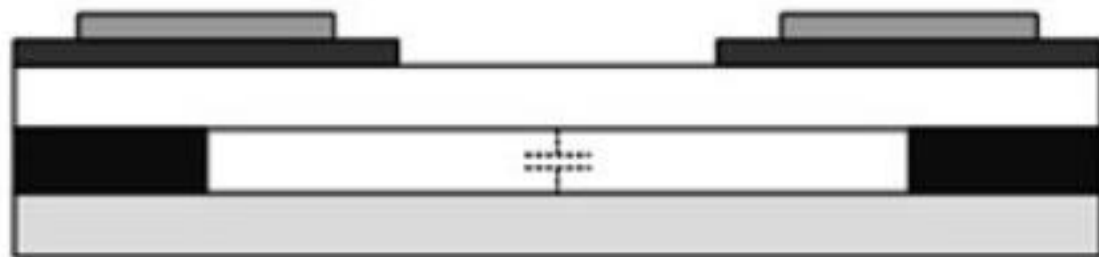
8 гребеновидни резонатора с различна резонансна честота. На схемата е показан само един резонатор. Резонансната честота се изменя от 1 до 10 kHz. Настройващото напрежение U_{Tun} варира от 0 до 35 V. Размери на чипа 7×10 mm.



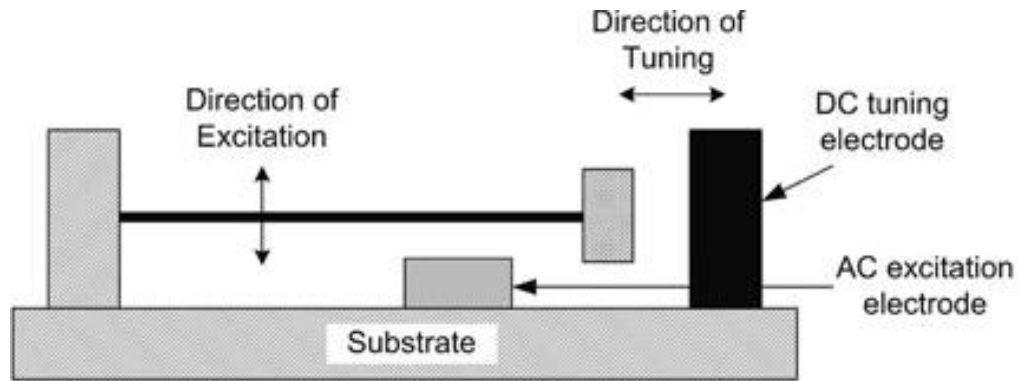
Настройване от 7.7% до 146% по отношение на номиналната резонансна честота от 25 kHz на резонатора единична комб структура. Напрежение 0 до 50 V. Размери на структурата 500 μm \times 500 μm .



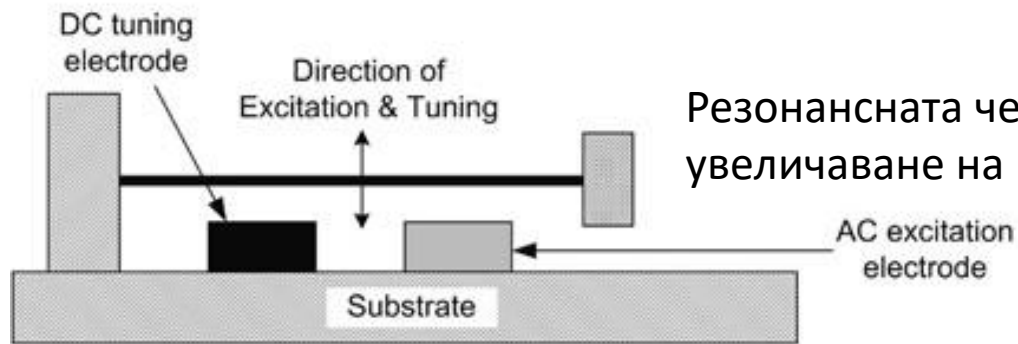
Зъбите на настройващия гребеновиден кондензатор са заоблени, за да се генерира постоянна електростатична еластична константа или линейна електростатична сила, която е независима от преместването на резонатора. Така електростатичната еластична константа зависи само от напрежението. Номинална резонансна честота 19 kHz.



Може да се променя номиналната резонансна честота от 719 kHz с ± 6 kHz, чрез прилагане на електростатична сила под конзолата. Размери 460x 840 μm .

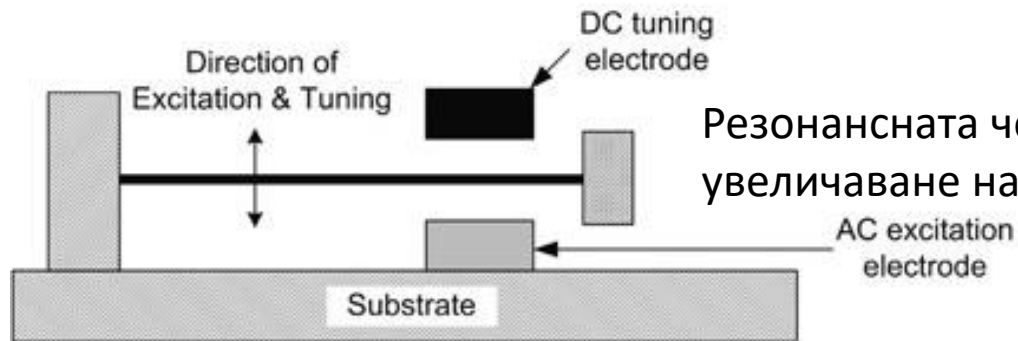


(a) Axial Tuning of a Resonator



Резонансната честота намалява с увеличаване на напрежението

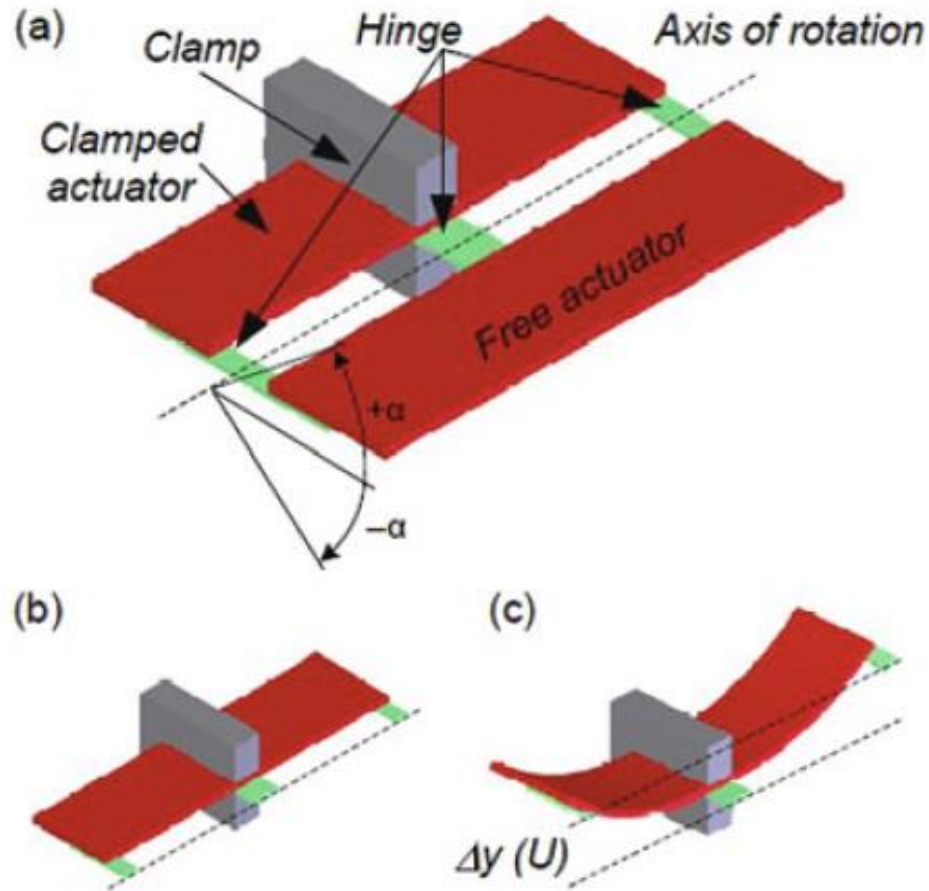
(b) Transverse Tuning of a Resonator (#1)



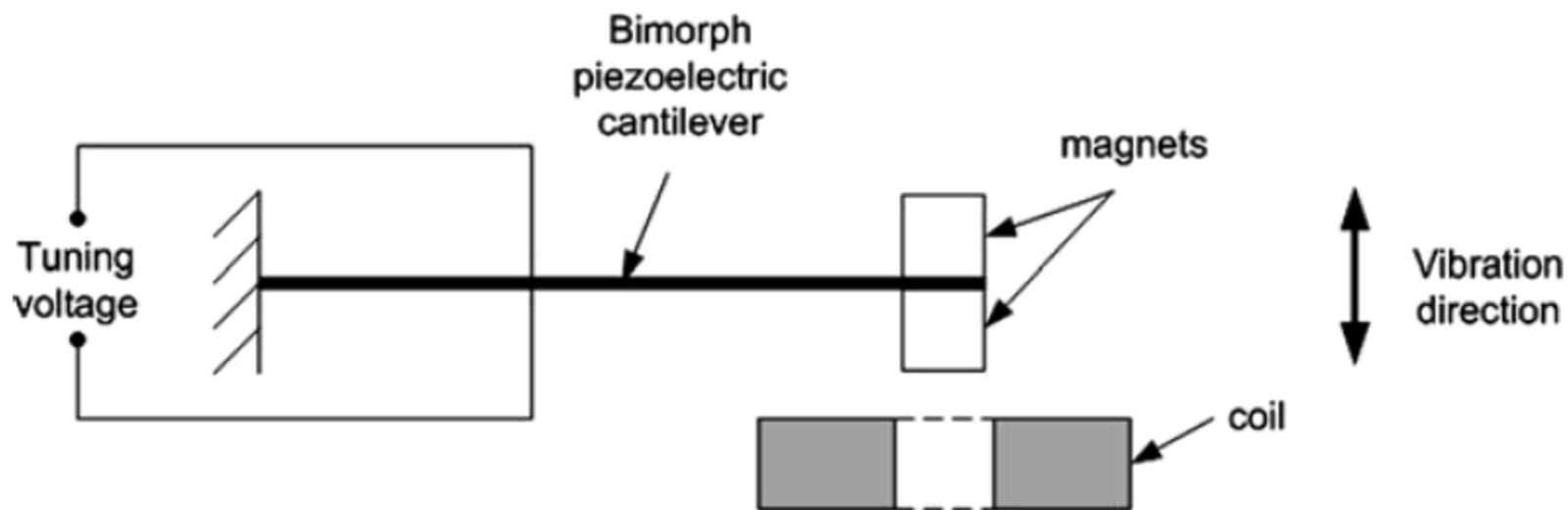
Резонансната честота се увеличава с увеличаване на напрежението

(c) Transverse Tuning of a Resonator (#2)

Пиезоелектрични методи

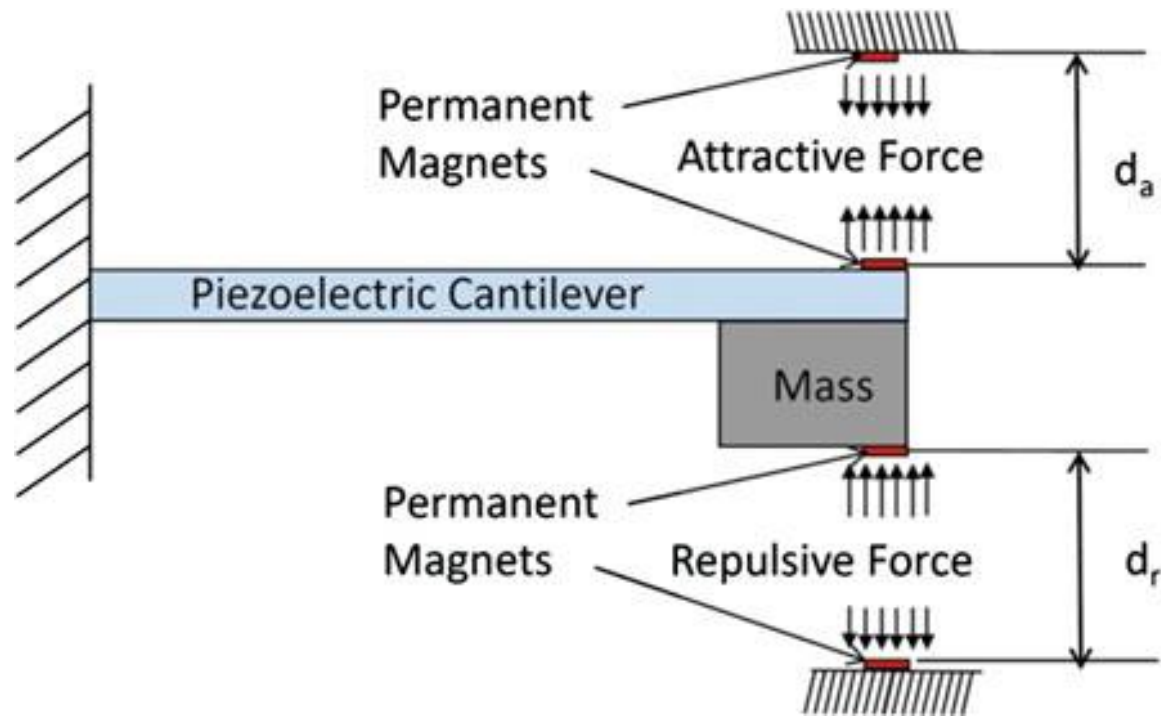


Резонансната честота се настройва механично чрез структура използваща пиезоелектрично задвижване, което генерира големи сили при малка консумация. Едното задвижване е фиксирано, а другото свободно.



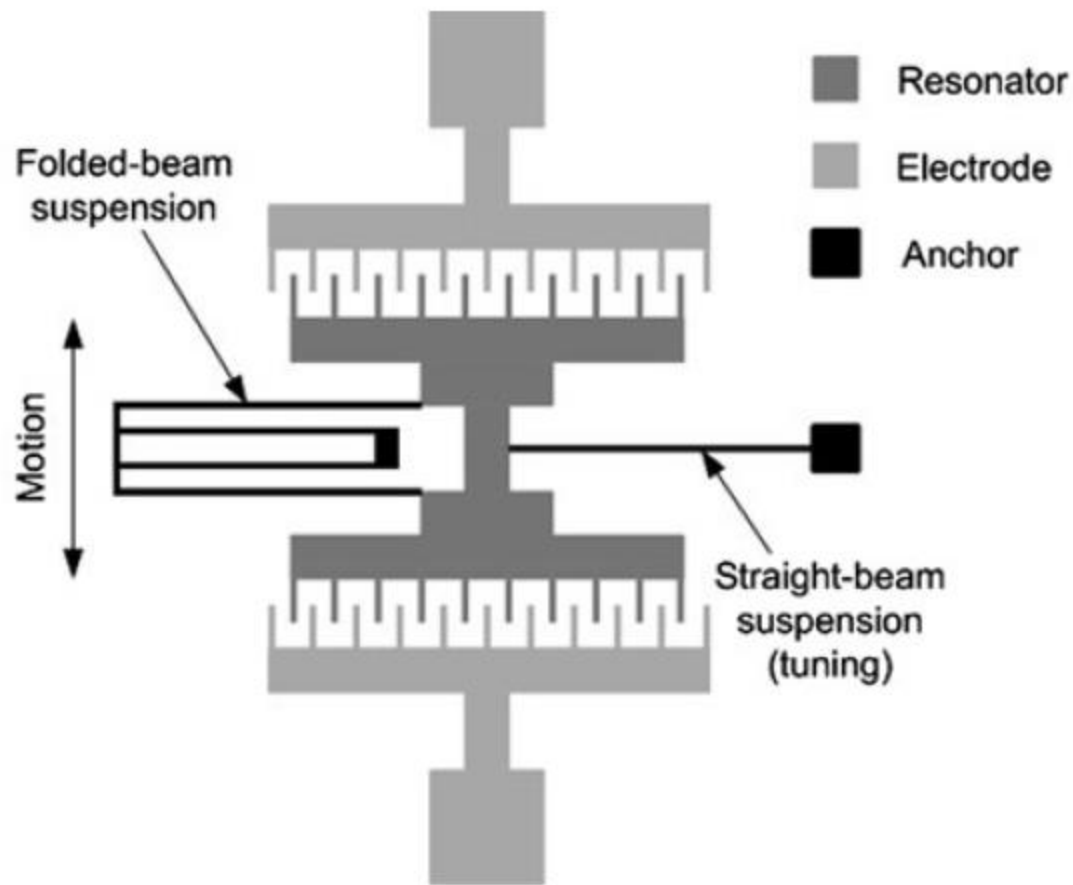
Резонансната честота се настройва чрез прилагане на статично електрическо поле на пиезоелектричната греда. Използва се електрострикцията на биморфния слой. Резонансна честота се изменя от 267 до 323 Hz при настройващо напрежение 100 до 260 V

Магнитни методи

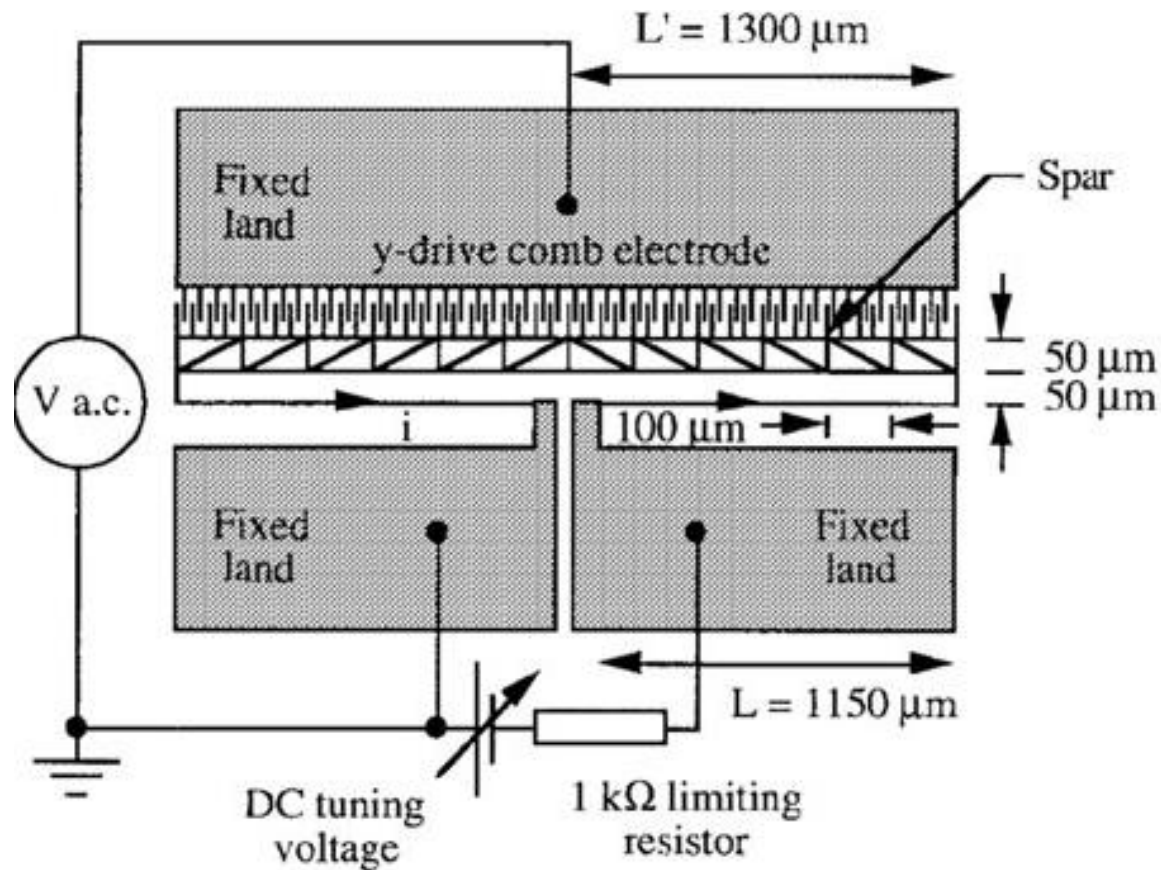


Настройване с прекъснато действие чрез промяна на положението на магнити. Генераторът е пиезоелектричен. Номинална честота 26 Hz. Максимално разстояние за настройване 3 cm. Добива се 240–280 μW мощност от 0.8 m/s^{-2} ускорение. Нежелан страничен ефект е променливото демпфериране при промяна на резонансната честота. Устройството е изработено от дискретни компоненти. Големи размери на пиезоелектричната греда 34 mm \times 20 mm \times 0.92 mm ефективната и маса е 45.8 g.

Термични методи

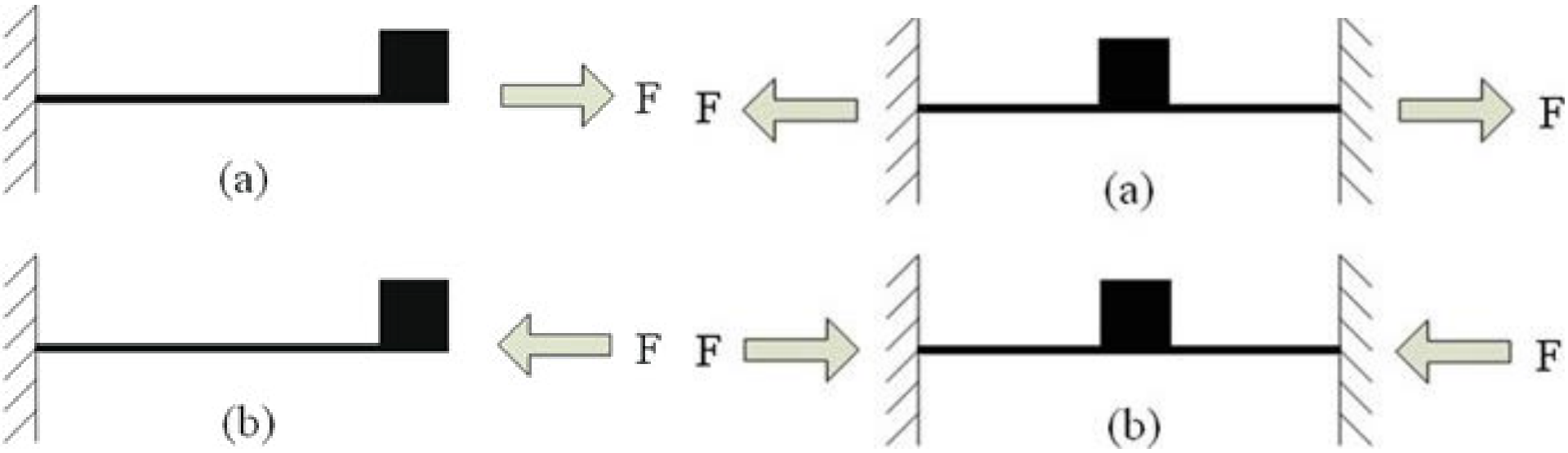


Прилага се термично напрежение върху права греда чрез използване на съпротивление за нагревател. Постига се максимум 6.5% честотна промяна по отношение на номиналната 31 kHz при максимална температура 255°C. Консумацията на настройването е 25 mW. Размери 500 × 700 μm.



Използва се ограничено термо-удължение на резонатор с просто ненагънато окачване. Диапазонът на настройване е от -25 до $+50\%$ с консумация от 1.5 до 10 mW . Чувствителността на настройките е $33\% \text{ mW}^{-1}$. Приблизителни размери $3000 \times 3000 \mu\text{m}$.

Настройване чрез допълнителни осови напрежения



$$\frac{f'_{r1}}{f_{r1}} = \sqrt{1 + \frac{F}{F_b}}$$

$$F_{b_can} = \frac{\pi^2 Y w h^3}{48 l^2}$$

$$F_{b_dcb} = \frac{\pi^2 Y w h^3}{3 l^2}$$

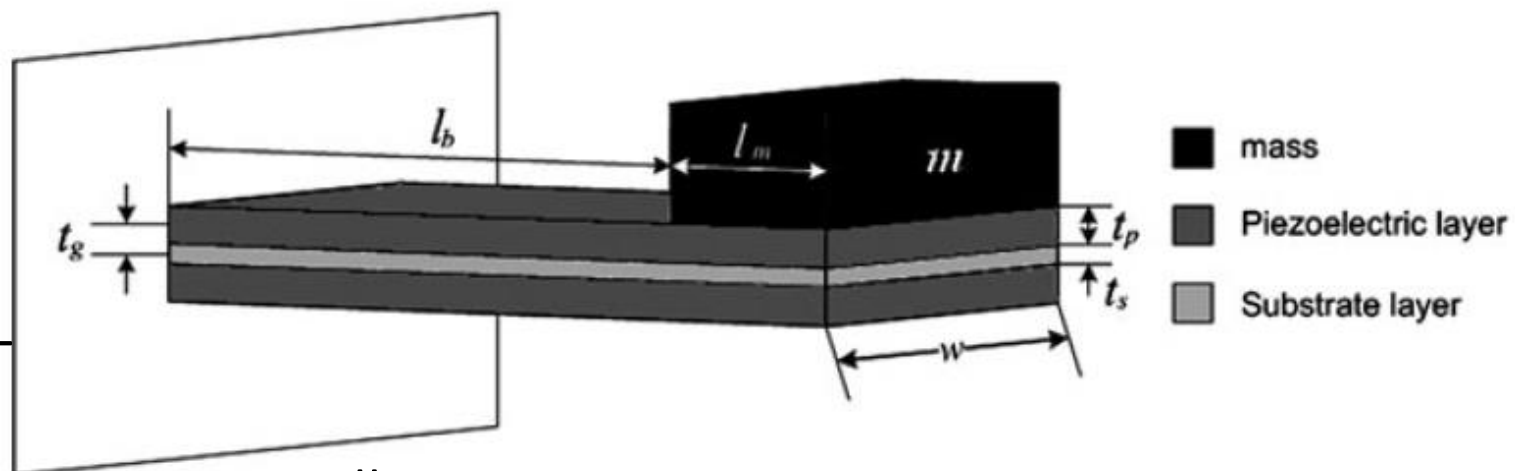
f_r е резонансната честота при първа форма без натоварване, F е натоварващата осова сила, F_b е критичната осова сила, при която настъпва изкълчване.

Електрически методи на настройване на резонансната честота

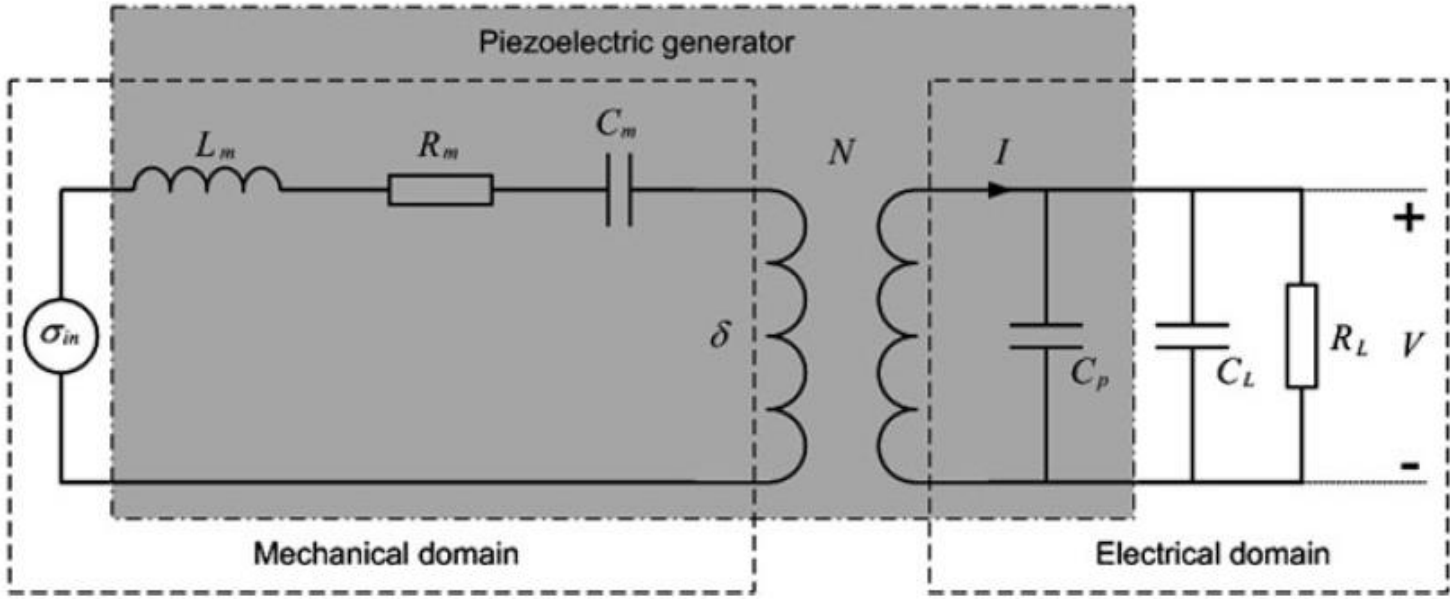
Основен принцип на електрическото настройване е промяна на електрическото демпфиране чрез регулиране на електрическия товар. Този подход се прилага предимно към пиезоелектрични генератори. Тъй като резистивните товари редуцират коефициента на полезно

действие на преобразуваната на мощност, а индуктивните товари трудно се променят, най-подходящи за електрическо

настройване се оказват капацитивните товари. На схемата на пиезоелектричния генератор са означени основните параметри.



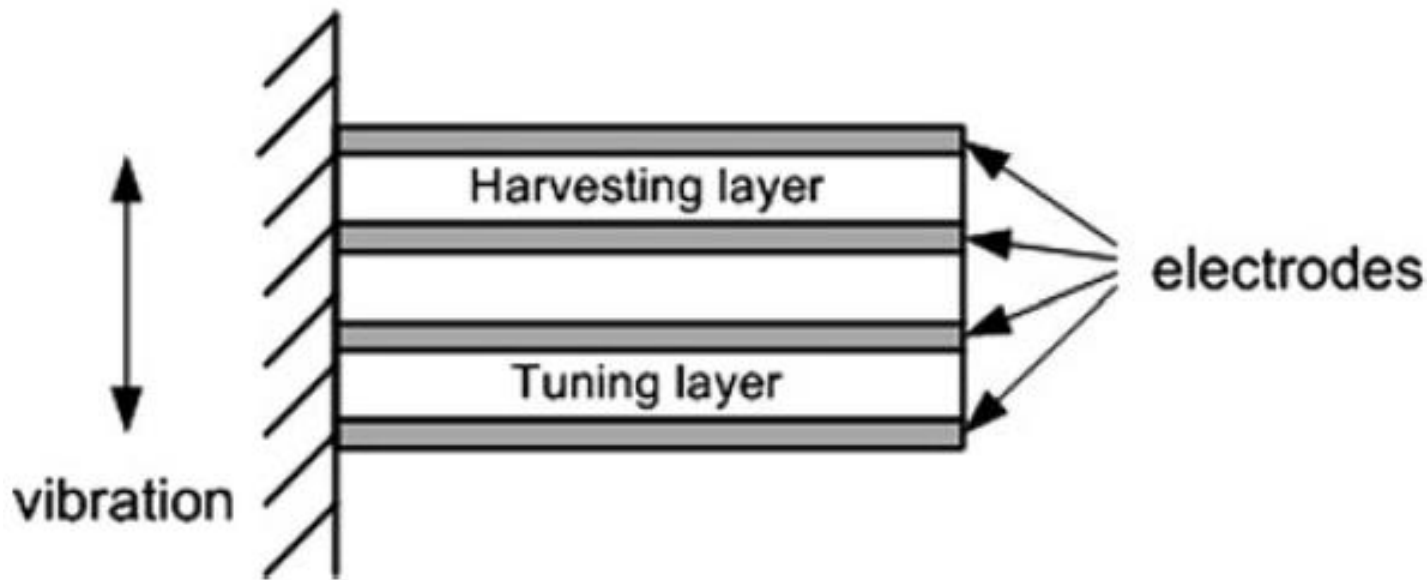
Еквивалентна електрическа схема на пиезоелектричния генератор



L_m – маса
 R_m – демпфериране
 C_m – пружинна константа
 C_p – капацитет на пиезоел. слой,
 C_L, R_L капацитивен и резистивен товар
 V -напрежението върху резистивен товар

Трансформаторът свързва механичната с електрическата част съгласно пиезоелектричния ефект. По-точно той свързва напрежението σ с електрическото поле E при нулева деформация или електрическото преместване D с деформацията δ при нулево електрическо поле. След анализ на системата се стига до изводите:

- Материалът на подложните слоеве и масата не влияят на настройването.
- При пиезоматериал с по-висок модул на Юнг, коефициент на удължение и по-малка диелектрична проникваемост се постига по-широк диапазон на настройване.
- За да се увеличи диапазонът на настройване, дебелината на пиезослоеве трябва да е по малка спрямо тази на подложните слоеве.
- За да е увеличи диапазонът на настройване капацитетът на пиезоелектричния слой трябва да се минимизира.

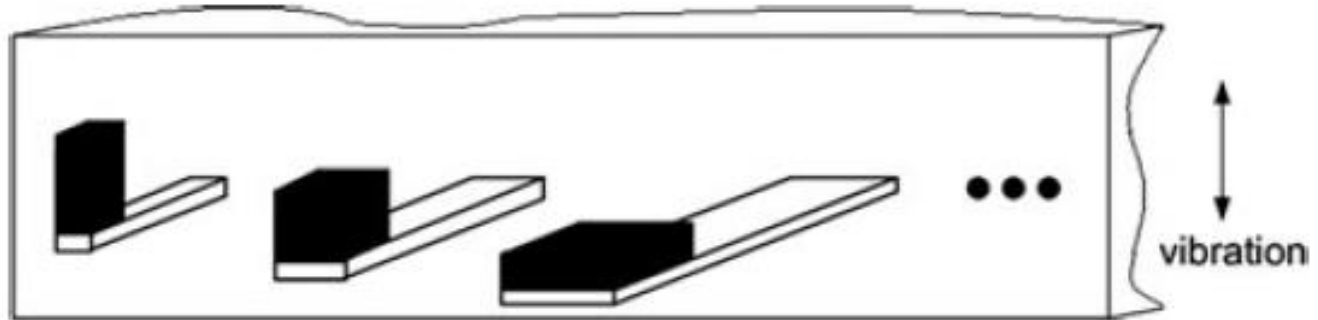


Горният пиезоелектричен слой – за събиране на енергия, а долният за настройване. Постигнато е настройване от 3 Hz между 91.5 и 94.5 Hz.

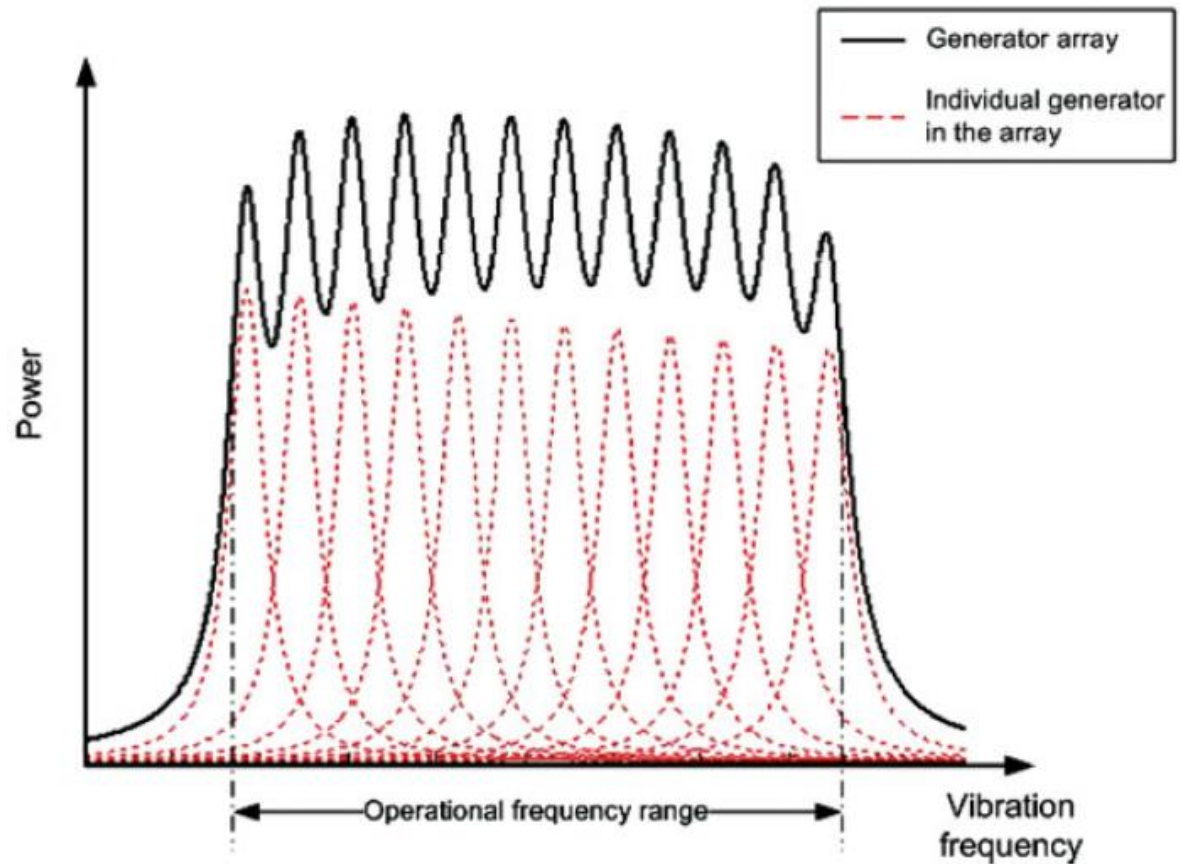
Експериментално е установено, че при случайни честоти от 80 до 115 Hz, средната изходна мощност се повишава с 27.4% при използване на метода на настройване.

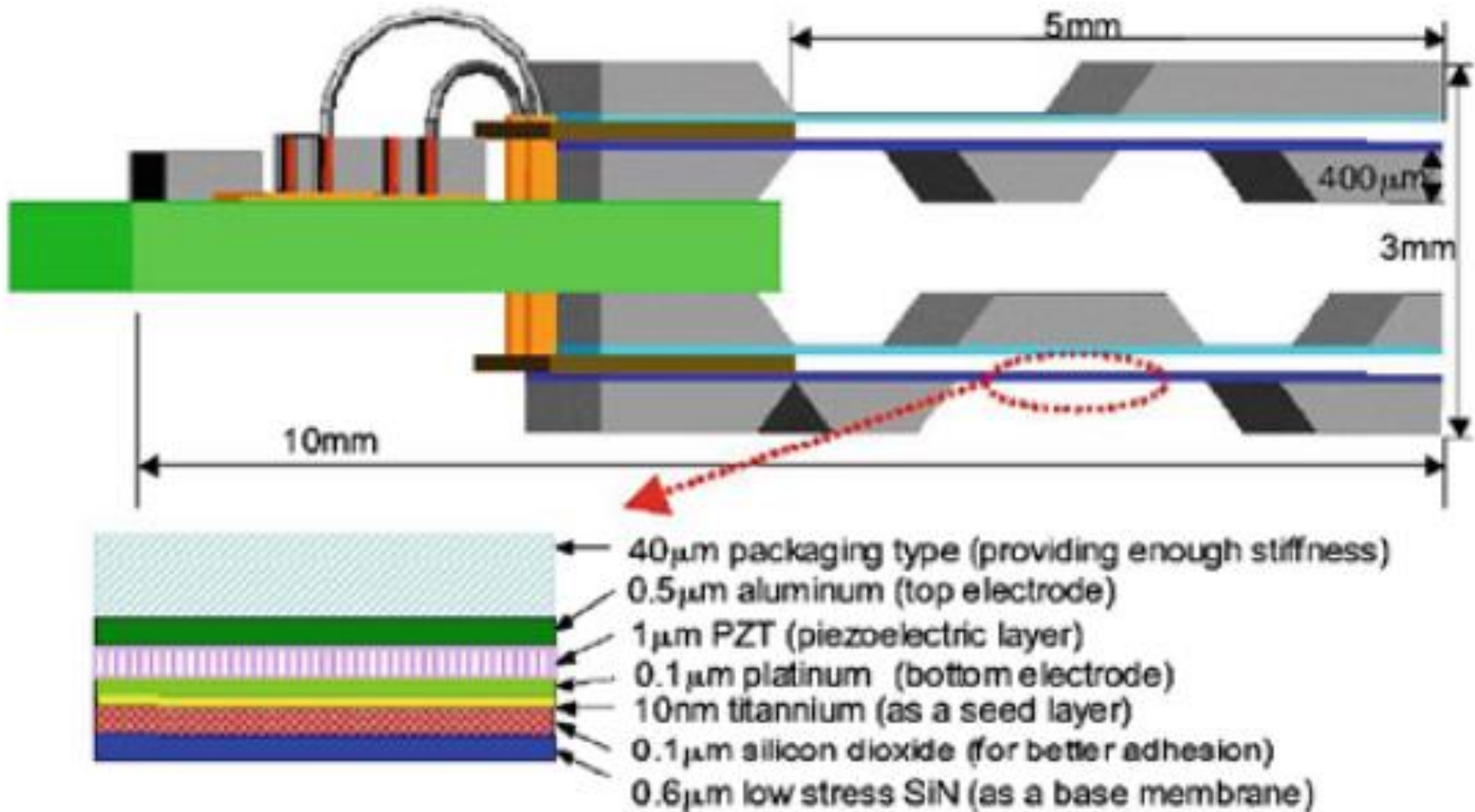
Стратегии за разширяване на честотния диапазон

Масиви от генератори



Широк диапазон
при постоянен Q –
фактор;
Относително
големи размери .

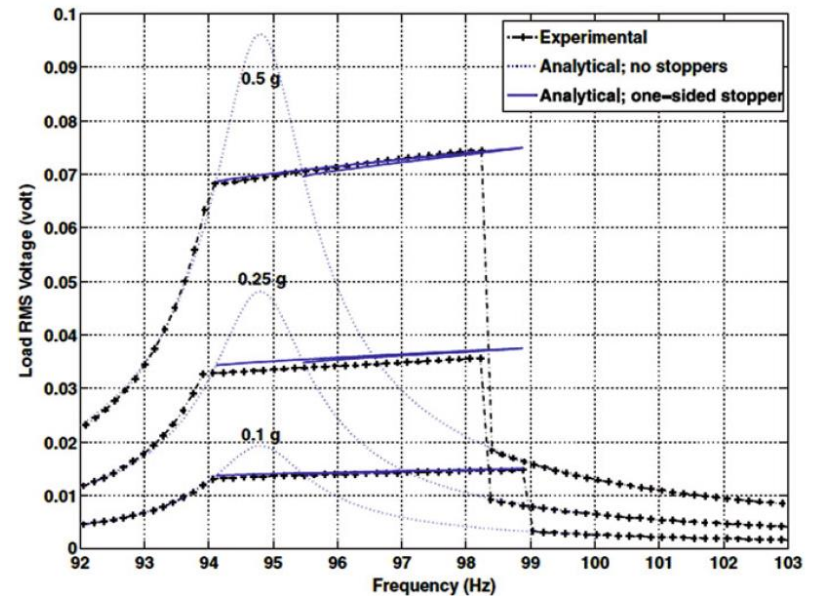
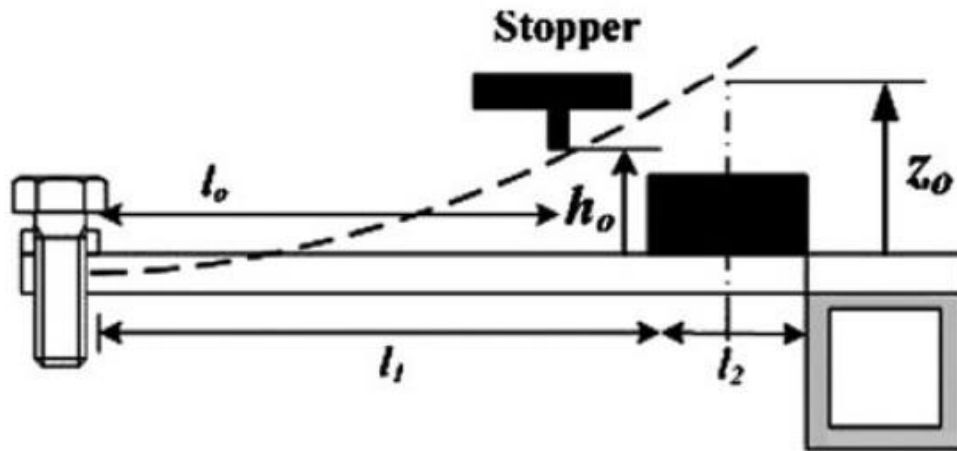




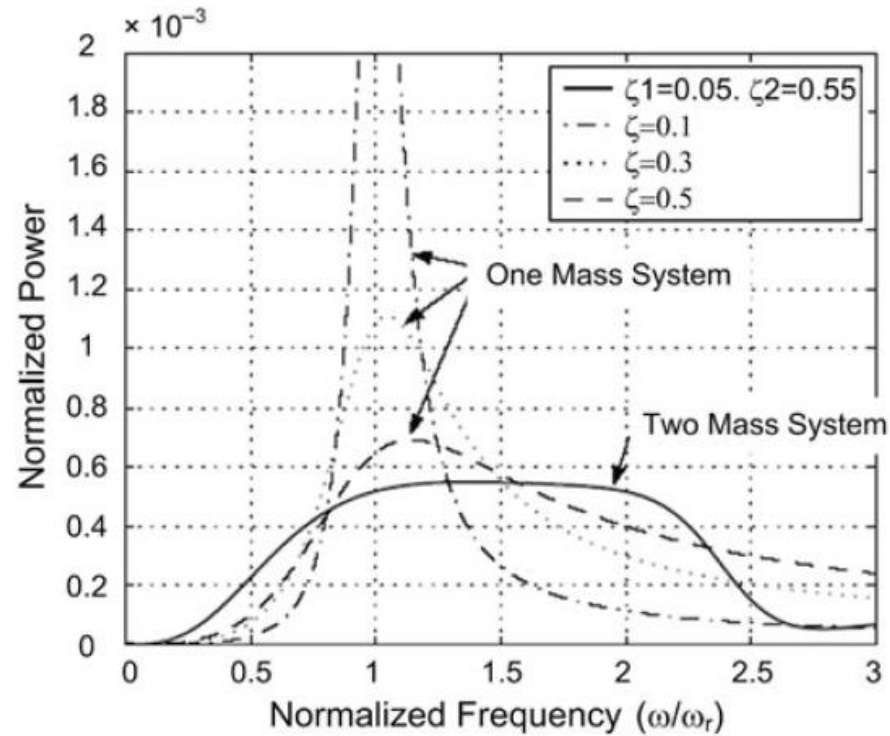
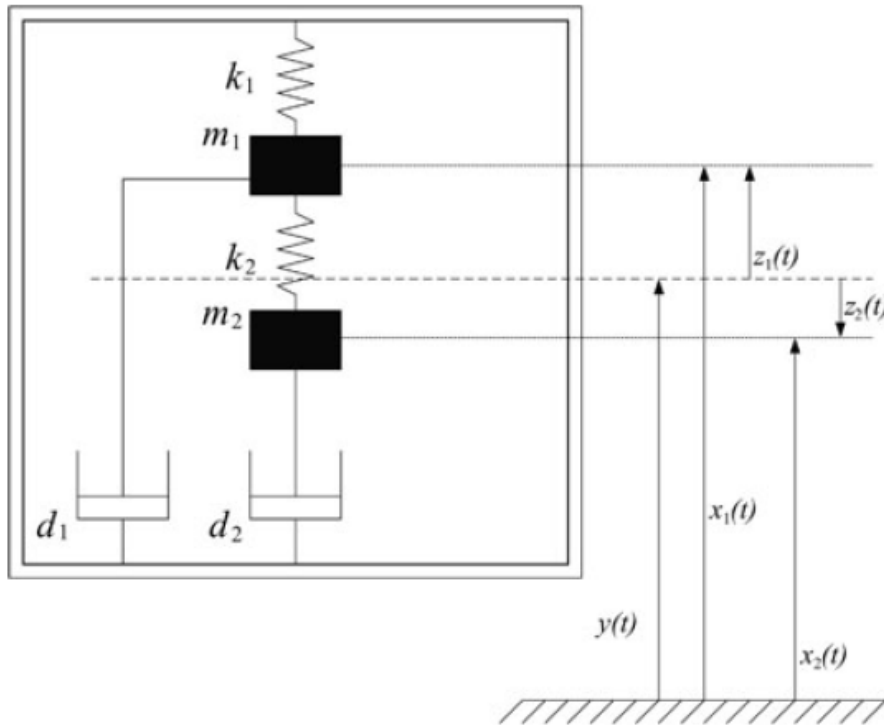
Четири пиезоелектрични конзоли с различна резонансна честота, свързани паралелно; 3×3×5mm; 300 to 800 Hz.

Амплитуден ограничител

Честотният диапазон се разширява чрез използване на механичен ограничител (амплитуден ограничител). При този метод честотната лента може да се увеличи, само когато възбуждащата честота постепенно нараства. Методът не дава резултат при постепенно намаляващи честоти.



Свързани осцилатори

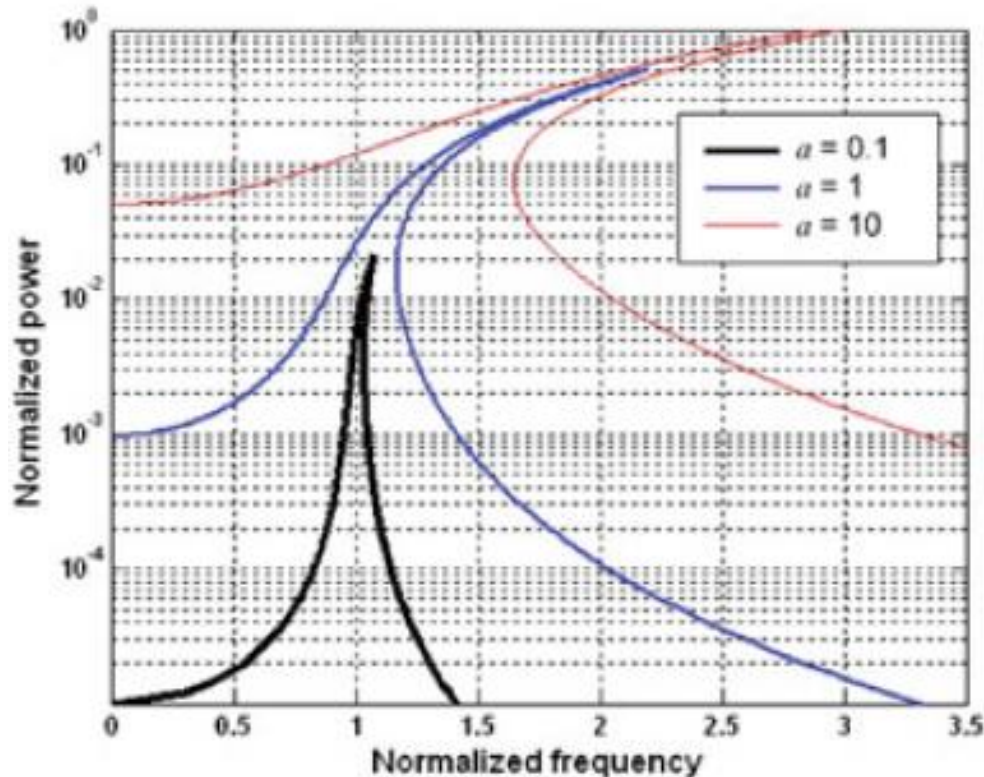


Максималната мощност на двустепенния генератор е по-ниска от тази на двата по отделно

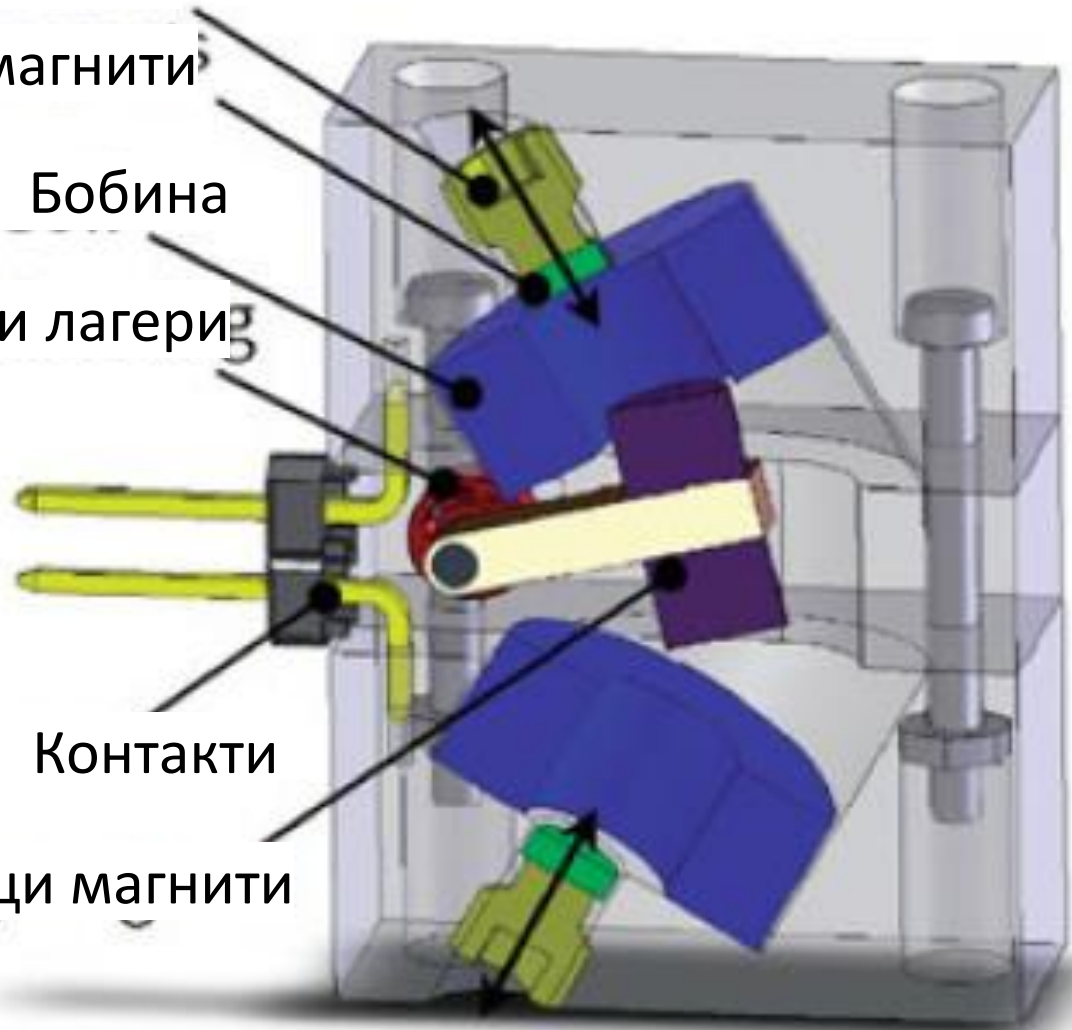
Нелинейни осцилатори

$$m \cdot \frac{d^2 z(t)}{dt^2} + b \cdot \frac{dz(t)}{dt} + k \cdot z(t) + k_n [z(t)]^3 = -m \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2}$$

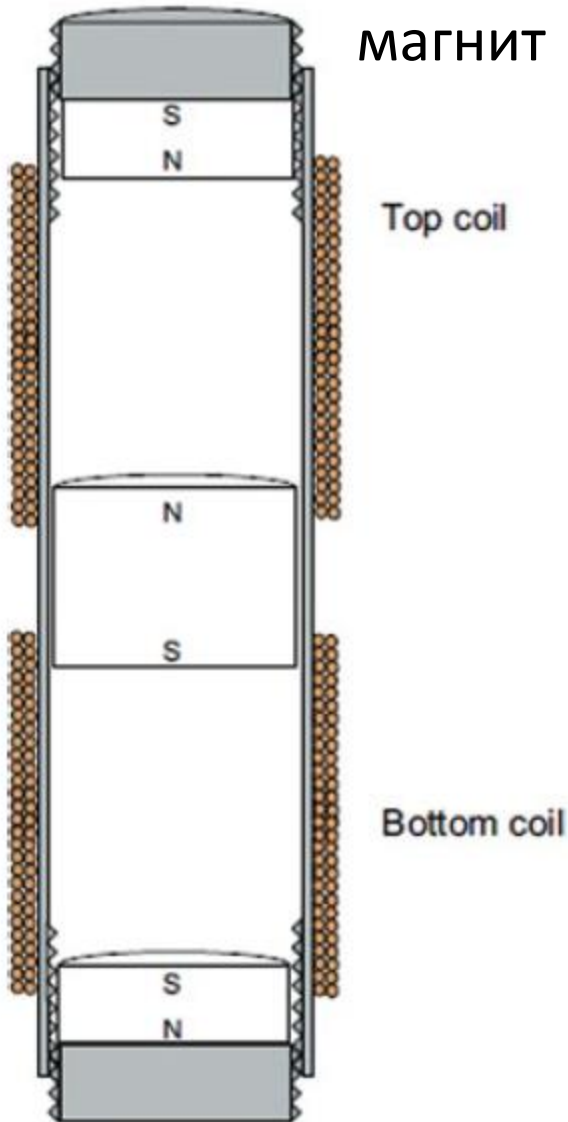
Пружинната сила е представена с два компонента. Получава се ефект на втвърдяване, което променя резонансната честота и води до разширяване на честотния диапазон. Реализират се с магнитни пружини.



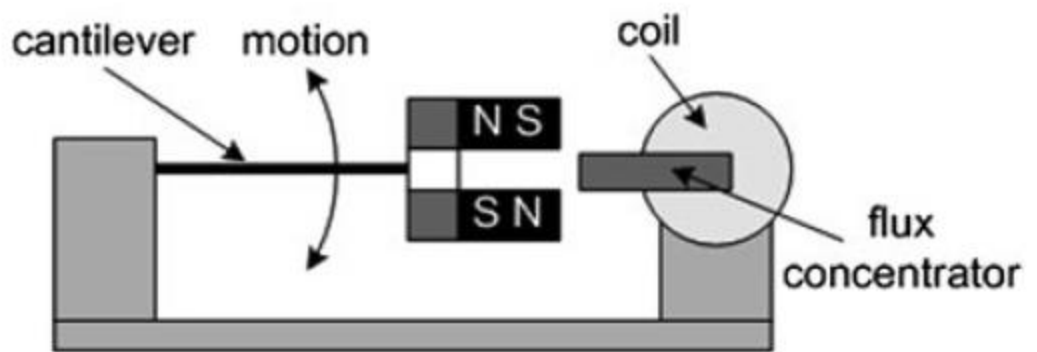
Регулиращ винт
Пружинни магнити
Бобина
Миниатюрни лагери
Контакти
Осцилиращи магнити



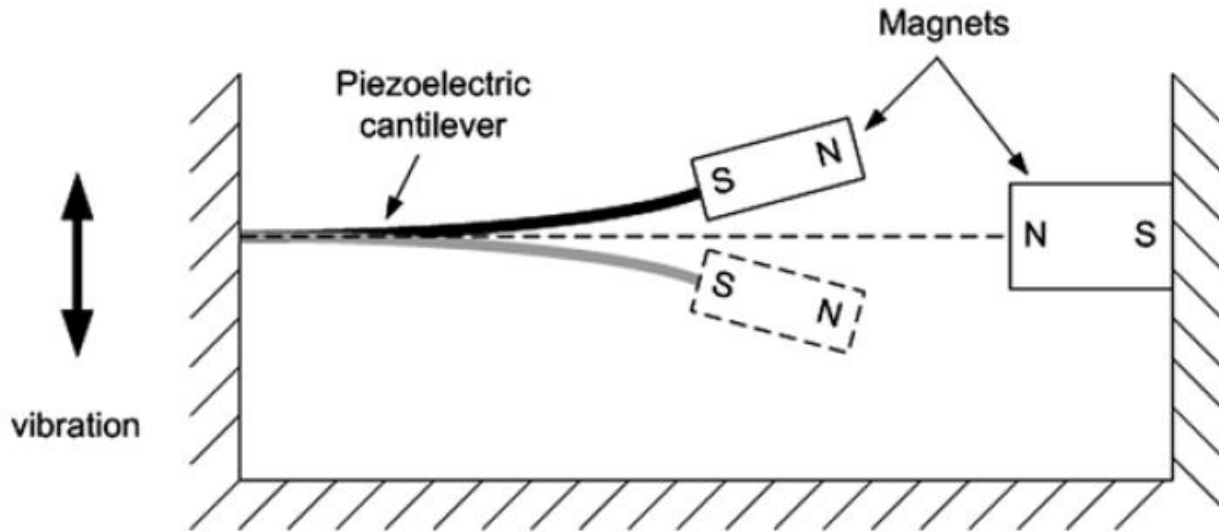
Генератор с левитиращ магнит



Генератор с концентратор на магнитния поток

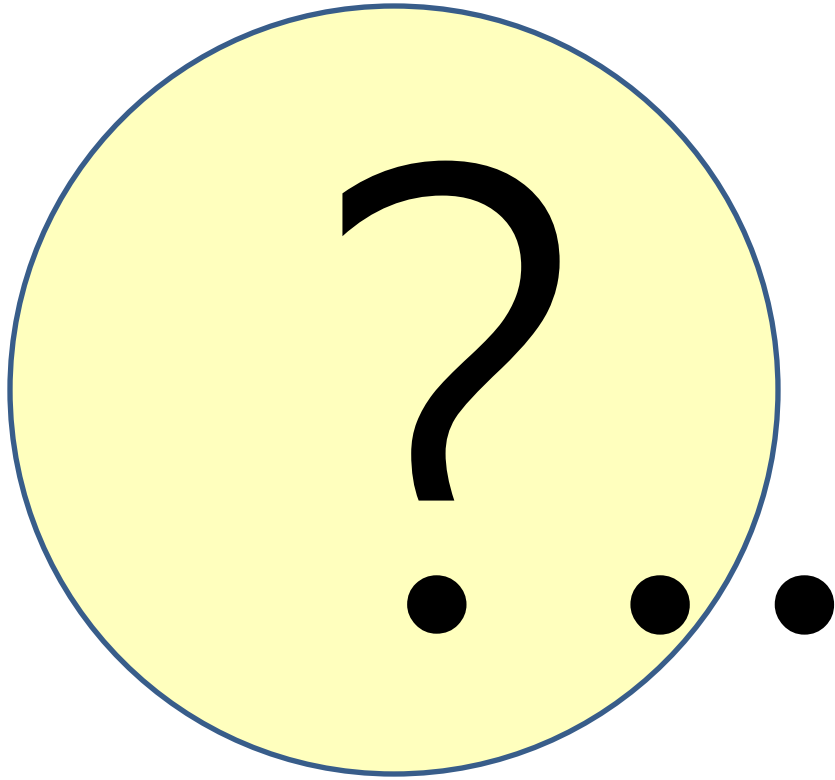


Би-стабилни генератори



При тези структури се използва отрицателна еластична константа, която има ефект на увеличаване на стръмността на кривата на преместване на резонатора във функция на времето, което води до по-висока скорост за дадено входно възбуждане.

1. Lei Wang, F G Yuan, Vibration energy harvesting by magnetostrictive material, Smart materials and structures, 17 (2008) 045009 (14pp).
2. Dierks E., Weaver J., Kristin W., Kendra C., Daniel J., Energy harvesting for engineering educators, American Society for Engineering Education, 2011.



**Благодаря
за вниманието!**

Thank