



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Mehhatroonikainstituut  
Mehhanosüsteemide komponentide õppetool

MHE40LT

*Jevgeni Fomitšenko*

## **Piesogeneraator jalatsites**

BSc Lõputöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2016

# AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus. Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis ..... juhendamisel

“.....” .....20.....a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....” .....20....a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....” .....20.... a.

..... allkiri

**TTÜ mehhatroonikainstituut**  
Mehhanosüsteemide komponentide õppetool  
**BAKALAUREUSETÖÖ ÜLESANNE**

2016. aasta kevadsemester

Üliõpilane: Jevgeni Fomitšenko, 134524MAHB

Õppekava: MAHB13

Juhendaja: dotsent Igor Penkov

Konsultandid:

**LÕPUTÖÖ TEEMA (eesti ja inglise keeles):**

**Piezo-generaator jalatsites. (EST)**

**Piezo generator in footwear. (ENG)**

**Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1	Üldist materjali kogunemine. Ülesanne püstitus.	22.03.2016
2.	Tehnoloogia loomise võimaluse uurimine.	15.04.2016
3.	Katsestendi komponentide valik ja projektarvutused.	21.04.2016
4.	Tehniliste kooste- ja detaili jooniste koostamine.	04.05.2016
5.	Täpsete väärtuste arvutamine. Info kuvamis- ja töötlemissüsteemi projekteerimine. Katsestendi maksumus ja majanduslik analüüs.	10.05.2016
6.	Lõputöö vormistamine	16.05.2016

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:**

**Esitav graafiline materjal:**

Kaitsmistaotlus esitada dekanaati hiljemalt 16.05.2016  
20.05.2016

**Lõputöö esitamise tähtaeg**

**Üliõpilane** Jevgeni Fomitšenko  
4.03.2016

/allkiri/ ..... kuupäev

Kontakttelefon 53977508

E-mail: GrandMasterStyle@gmail.com

**Juhendaja** Igor Penkov

/allkiri/ ..... kuupäev 4.03.2016

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöördel

# SISUKORD

SISUKORD .....	3
EESÕNA .....	5
SISSEJUHATUS .....	6
TEORIAST .....	7
1 PIESOELEMENDI KIRJELDUSED .....	8
1.1 Piesoelektrilised pingellikad .....	8
1.2 Piesoelement (piesokeraamiline generaator) .....	9
1.3 Piesoelekter .....	9
1.4 Piesoelektrilised materjalid .....	10
1.5 Rakendusnäiteid .....	10
1.6 Piesotajurid .....	10
1.7 Piesotäiturid .....	11
1.8 Piesoelektriline efekt .....	11
1.9 Piesokeraamika omadused .....	12
1.9.1 Suhtelised dielektrilised konstandid .....	12
1.9.2 Resonantssagedus .....	13
1.9.3 Elektromehaanilise sideme koefitsiendid .....	13
1.9.4 Painduv konstant .....	15
1.9.5 Piesoelektrilised konstandid .....	16
1.9.6 Poissoni koefitsent .....	16
1.9.7 Temperatuuri koefitsent .....	17
1.9.8 Vananemise kiirus .....	18
1.9.9 Mehaaniline tegur .....	18
1.9.10 Curie punkt .....	18
1.9.11 Tihedus .....	19
1.10 Piesokeraamika kasutusala .....	19
1.11 Piesoelementide tootmine .....	20
2 TEHNOLOOGIA OSADE KOMPONENDID .....	21
2.1 Piesoelemendi valik .....	21
2.2 Sildalaldi .....	23
2.3 Kondensaator .....	24
2.3.1 Kondensaator elektri ahelas .....	24
2.4 Power Bank ja tehnilised andmed .....	26
3 KÕNDIMISE PROGRAMM .....	28
4 MEHAANILISE SEADE .....	30
5 KATSED PIESOELEMENDIGA .....	34
5.1 Teoreetilised arvutused .....	34
5.2 Voolujõud .....	34
5.3 Kondensaatori mahtuvus .....	35
5.4 Laboratooriumi päevik .....	36
5.4.1 Esimene päev .....	37
5.4.2 Teine päev .....	40
5.4.3 Kolmas päev .....	42
5.4.4 Neljas päev .....	43
5.4.5 Viies päev .....	44
5.4.6 Kokkuvõte .....	44
5.5 LT-SPICE IV .....	45
6 TÖÖKÄIK JA TULEMUSED .....	47

	Laboris tehtud töö käigus saadud järgnevad tulemused.....	47
7	KOKKUVÕTE.....	48
	SUMMARY .....	49
8	KASUTATUD MATERJALID .....	50

## JOONISTE JA TABELITE LOETELU

	Sele 1. Keeratud kokku lehtpiesoelement jalatsite tagumis osas .....	7
	Sele 2. Piesoelemendi tingmärk .....	8
	Sele 3. Piesoelemendi skeem .....	9
	Sele 4. Takistusest sõltuv sagedus piesokeraamikas .....	13
	Sele 5. Radiaalne mood. (Kp) .....	14
	Sele 6. Pikkuse venitus survestamisel. (K31) .....	14
	Sele 7. Paksus survestamisel. (Kt) .....	14
	Sele 8. Pikkuse venitus survestamisel. (K33) .....	15
	Sele 9. Nihe paksuses. (K15) .....	15
	Sele 10. Soola piesokeraamilise elemendi loomiseks .....	20
	Sele 11. Spordijalanõud kõrge jalapõhjaga .....	21
	Sele 12. Suurte deformatsioonide mõeldud piesoelement .....	21
	Sele 13. Valitud piesoelement.....	22
	Sele 14. Vahelduvvool, ühefaasiline sildalaldi läbi jooksev vool ja kahefaasilise sildalaldi läbijooksev vool .....	22
	Sele 15. Vahelduvvool, kahefaasilise sildalaldi läbi jooksev vool, kondensaatori abil alaldav vool.....	23
	Sele 16. Kondensaatori ehituse põhikonstruktsioon – kaks voolu juhtivat voodrit, mille vahel asub dielektrik .....	24
	Sele 17. Kondensaatori sisse ja väljalaadimine toimub eksponentselt.....	25
	Sele 18. Sildalaldi koos kondensaatoriga .....	26
	Sele 19. Avatud Power Bank.....	27
	Sele 20. Mikroskeem mis asub Power Bankis .....	27
	Sele 21. Kahe sammu kõndimise diagramm .....	28
	Sele 22. Kõndimise diagram .....	29
	Sele 23. Graafik, mis näitab ühe sammu litsujõudu .....	29
	Sele 24. Mehaaniline seade .....	30
	Sele 25. Graafik, mis näitab laadimisaega sõltuvust jalapõhja kõrgusest.....	30
	Sele 26. Graafik, mis näitab laadimisaega sõltuvust jalapõhja kõrgusest.....	32
	Sele 27. Graafik, mis näitab laadimisaega sõltuvust jalapõhja kõrgusest.....	32
	Sele 28. Väljundpinge piesoelemendile vajutamistete jooksul .....	37
	Sele 29. Töötav piesoelement jalatsis .....	37
	Sele 30. Piesoelement kannapiirkonnas väljundpinge .....	38
	Sele 31. Piesoelement jalatsis.....	39
	Sele 32. Piesoelemendi koos diodisillaga väljundpinge.....	40
	Sele 33. Skeem koos diodisilla, kondensatori ja stabilitrooniga .....	41
	Sele 34. Väljundpinge pinoplastile vajutamise jooksul .....	43
	Sele 35. Seadme skeem koostatud LT-SPIVE IV programmis.....	45
	Sele 36. Voolujõudu näided .....	45
	Sele 37. Voolujõudu näided .....	46
	Sele 38. Voolujõudu näided. ....	46

## EESÕNA

Töö teema arenes välja ideest parandada elukvaliteeti, hõlbustada otsing laadimine kohta, leiutada uue laadimisseade, mis on alati sinuga ja ei jää unustanud kodus.

Töö teema läbib Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonikainstituudi masinaelementide labori, kus oli vaja mõõtma laadimine võimalust.

Töö teema pakkus mulle huvi, kuna töö ei ole seotud ainult teoreetiliste arvutustega, vaid sellel on konkreetne rakendus. Selle lõputöö projekti põhjal valmishitataud katsestendi saavad tulevikus kasutada jalasite leiutamiseks.

Antud bakalauruse lõputöö oli kirjutatud Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonika instituudi assistendi Igor Penkov juhendamisel. Lõputöö teema oli väljamõeldud minu poolt ja lubatud minu juhendaja poolt.

## SISSEJUHATUS

Selle lõputöö ülesande lahendamiseks loodi laboratoorne katsestend , mille abil on võimalik vaadelda väljamõeldud tehnolooga tööseisukorda.

Esiteks tuleb uurida, mis on piesoelement, tema parameetrid, tema liigid, valmistamise meetodid. Lisaks tuleb uurida ja mõista, kuidas toimub aku, või nn „Power Bank“, laadimine. Järgmisena mõõta piesoelemendi poolt tekitatud elektripinget, selgitada välja kuidas ja kui palju saab suurendada tekkinud pinget ning kas saadud tulemusest piisab aku laadimiseks ja kui kaua võtab aku laadimine aega.

Lisaks määrata ära sildaladite, transistorite ja kompressorite ning taolise tehnoloogia vajadus, joonistada skeem ja ehitada taolise tehnoloogia prototüüp.

Kontrollida aku laadimise efektiivsust täiustatud skeemil.

Teha analoogversioon laadimisseadmest mehhaanilise osaga piesoelemendi asemel. Mõõta ja võrrelda analoogversiooni tööd piesoelemendiga seadmega.

Viimaks teha järeldus ning jõuda arusaamani kas seadme kasutegur on piisav, et tehnoloogiat igapäevaselus rakendada. Kui suur on kulu, et seadet toota ja kas kasutegurit on võimalik teoorias suurendada kui see osutub liiga väikeseks ning kuidas lühendada laadimiseks kuluvat aega kui see võtab liiga kaua aega. Lisaks otsustada millist liiki jalanõule antud tehnoloogia kõige paremini sobiks.

## TEOORIAST

Juba korduvalt on käidud välja ideed väiksematest generaatoritest, mis põhinevad piesoelementidel. Kahtlemata toodavad nad minimaalse võimsuse koguse, kuid ka sellest piisab portatiivsete seadmete tööks, nagu näiteks pleierid ja mobiiltelefonid. Ei ole midagi lihtsamat kui panna selline generaator tööle, on vaja ainult alustada mistahes igapäevast tegevust, näiteks hommikul jooksma minna.



Sele 1. Keeratud kokku lehtpiesoelement jalatsite tagumis osas

Sellise süsteemi esitles Louisiana Tehnikaülikooli inseneride tiim dotsent Ville Kaajakari eestvedamisel.

Tehnoloogia idee seisneb selles, et keeratud kokku lehtpiesoelement asendatakse jooksujalatsi tagumisse osa, sinna kus teistel jalatsitel on tavaliselt talla laiend. Iga kasutaja samm põhjustab generaatori mehaanilise deformeerimise, mis omakorda toodab elektrit iga astunud sammuga., mille pinget saab õige ühendamise korral suunata akusse. Sellisel juhul koguneb kõndimisel kogutud energia akusse, mida saab jalanõu seest eemaldada ning kasutada nutitelefoni laadimiseks. Piesoelemendi asemel on võimalik kasutada ka mehhaanilist voolutootmist paigaldades taldadele hammasrattad ja sildaladid. Astudes tallaga maapinnal tekitavad hammasrattad pööreldes voolu. [6].



# 1 PIESOELEMENDI KIRJELDUSED

## 1.1 Piesoelektrilised pingelallikad

Mõnedel kristallilistel materjalidel omavad piesoelektrilist efekti. Sellised materjalid on: baariumtitanaat, turmaliin, kvarts. Efekti mõte on selles, et rõhu avaldamisel erinevatele materjalidele tekib väike potentsiaalide vahe ehk pinge.

Rõhu puudumisel negatiivsed ja positiivsed laengud on paigutatud kristallis kaootiliselt. Rõhu avaldamisel elektronid on hajutatud ainult ühel materjali poolel, mis loob negatiivsete ja positiivsete laengute piirkonnad. Pinget edastatakse spetsiaalsete elektrodide abil ning see tekib ainult rõhu avaldamisel. Seda nähtust nimetatakse piesoeffektiks. Piesoeffekt on tagasi pööratav (ehk muundab elektrienergia mehaaniliseks energiaks).

Otsene piesoelektriline efekt on kasutusel välgumihklites, kristallmikrofonides ja erinevates andurites.

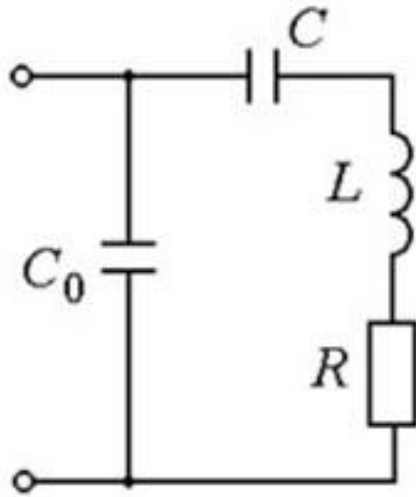
Piesoelektriline pöördeffekt – mehaaniline deformatsioon elektrivälja mõjul; seega kui kvartskristalli vastastahkude vahele rakendada elektripinge, muutub nende tahkude vahekaugus. Selline materjal, mis on paigutatud kahe elektroodi vahele, reageerib elektripingele muutes oma vormi. Esimest efekti kasutatakse mõõtmisteks, teist aga elektromehaaniliste muudusteadistena. [4].



Sele 2. Piesoelemendi tingmärk

## 1.2 Piesoelement (piesokeraamiline generaator)

Põhiline piesoelektriline allikas – piesoelement või pieso-keraamiline generaator.



Sele 3. Piesoelemendi skeem

Piesoelement – elektromehaaniline muundur, mida lõigatakse piesoelektrilistest materjalidest plaatideks, vastavalt elektrilaengute polarisatsiooni sobivale suunale kristalli sümmeetriatelgede suhtes, mille abil muundub mehaaniline energia elektriks (piesoeffekt), või elekter mehhaaniliseks energiaks (piesoelektriline pöörd efekt)

Ehituselt kujutab piesoelement endast piesokeraamilist materjali, mille külge on paigaldatud elektroodid. Piesoelemendid võivad olla erineva kujuga – plaadid, rõngad, torud, sfäärid jm.

Alternatiivselt, piesoelementide poolt genereeritav elektrienergia võib koguda. Sellised generaatorid on suurepärased tahked akumulaatorpatareid elektriskeemide jaoks. [14].

## 1.3 Piesoelekter

Piesoelekter, ka piesoelektriline efekt ehk piesoeffekt (kreeka keeles *piezo* 'rõhun') on teatava materjali, näiteks kvartskristalli – piesokvartsi – omadus, mille puhul tema kokkusurumisel tekib kokkusurutavate tahkude vahel elektripinge tingituna dielektrilisest polarisatsioonist, s.o erinimeliste elektrilaengute suunatud nihkumisest. Deformatsiooni käigus välise mehhanismi surve all, ilmuvad pinnale elektrilaengud. [16].

## 1.4 Piesoelektrilised materjalid

Tuntuim piesoelektriliste omadustega materjal on looduslik kvartskristall, millest lõigatakse välja plaadid – piesoelemendid – vastavalt elektrilaengute polarisatsiooni sobivale suunale kristalli sümmeetriatelgede suhtes. Kvartskristallist paremate piesoelektriliste omadustega on liitiumniobaat- ja galliumortofosfaat-monokristallid, millest valmistatakse temperatuurstabiilseid ja kaovaeseid resonaatorelemente.

Enamik täiturelementidena kasutavaid piesoelektrilisi komponente valmistatakse polükristallilistest piesokeraamilistest materjalidest ehk piesokeraamikast: kõrgepingelised komponendid pliitsirkonaattitanaadist (PZT) ja madalpingelised pliimagneesiumniobaadist (PMN).

## 1.5 Rakendusnäiteid

Piesoelektrilisi komponente kasutatakse paljudes tehnikavaldkondades tajurite ja täituritena ning samuti muude elektromehaaniliste muundusseadistena teadus-, tööstus- ning meditsiiniaparatuuris. Piesokomponentide laialdane levik eriti viimastel aastakümnetel põhineb võimalusel valmistada neid elektromehaaniliste integraalkomponentide (MEMS) kujul.

## 1.6 Piesotajurid

Piesotajurid (piesoandurid) talitlevad piesoelektrilise efekti alusel; neid kasutatakse:

- mehaaniliste deformatsioonide mõõtmiseks peamiselt jõuanduris, rõhuanduris ja kiirendusanduris;
- mehaanilise võnkumise muundamiseks elektriliseks helisagedussignaali, näiteks kitarril helipeas;
- õhurõhu muutuse muundamiseks elektrisignaali, näiteks piesomikrofonis ehk kristallmikrofonis;

## 1.7 Piesotäiturid

Piesotäiturid talitlevad piesoelektrilise pöörddefekti alusel; neid kasutatakse:

- piesokeraamilisest materjalist düüsidena tindiprinteris tindi imemiseks ja pritsimiseks;
- piesokeraamikast valjuhääldina, s.o elektrisignaali muundamiseks harilikult kindla sagedusega – vahemikus 1...5 kHz – signaaltooniks summeris ehk sumistis;
- ultraheli allikana piesokristalli resonantsisagedusel;
- arvuti väljundseadmes kuvari tähemärkide esitamiseks pimedate kirja märkidena, mille punktid kerkivad nende pingestamisel esile loetavatele märkidele vastavas kombinatsioonis;
- ajamelementidena piesomootoreis.

## 1.8 Piesoelektriline efekt

Täpsemad piesoefekti uuringud näitasid, et see on seletatav elementaarse rakustruktuuri omadusel materjalis. Selle juures on elementaarosake kõige väikseim sümmeetriline ühik materjali, mille mitmekordsel kordamisel saab mikroskoopilise kristalli. Tõestati, et piesoefekti tekkimise aluseks on sümmeetrilise keskme puudumine elementaarosakeses.

## 1.9 Piesokeraamika omadused

Rakendatud jõu ja piesoelemendilt saadud tulemuse vaheline side sõltub: piesokeraamika piesolektrilistest omadustest, suurusest ja kujust, elektrilise ja mehaanilise energia suunast.

Piesoelementi iseloomustatakse järgmiste omaduste abil: [1].

- suhteline dielektriline läbitavus
- resonantssagedus
- elektromehaanilise sideme koefitsent
- painduv konstant
- piesolektriline konstant
- poissoni koefitsent
- temperatuuri koefitsent
- vananemiskiirus
- mehaaniline kasutegur
- Curie punkt
- h) tihedus

### 1.9.1 Suhtelised dielektrilised konstandid

Dielektrilise konstandi arvutamise valem on järgmine:

$$\frac{\epsilon_{ij}^T}{\epsilon_0} = \frac{tC}{\epsilon_0^2 S},$$

kus,  $\epsilon_{ij}^T$  - dielektriline läbitavus (üks kahest  $\epsilon_{11}^T$  või  $\epsilon_{33}^T$ ), F/M

t – elektroodide vaheline kaugus, M,

S – elektroodi pindala, M<sup>2</sup>,

C – mahutavus, F

Suhteline dielektriline läbitavus on dimensioonitu füüsikaline suurus, mis näitab, mitu korda

on elektrivälja tugevus homogeenses materjalis (antud hetkel  $\epsilon_{33}^T$  ja  $\epsilon_{11}^T$ ) väiksem

väljatugevusest vaakumis ( $\epsilon_0$ )

$$\frac{\epsilon_{33}^{T(S)}}{\epsilon_0} \text{ ja } \frac{\epsilon_{11}^{T(S)}}{\epsilon_0}, (1)$$

kus,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ , F/m

### 1.9.2 Resonantssagedus

Plaadi paksuse loomulik sagedus  $f_0$  arvutatakse järgneva valemi abil:

$$f_0 = \frac{c}{2t},$$

kus,  $c$  – heli kiirus materjalis, m/s

### 1.9.3 Elektromehaanilise sideme koefitsiendid

Elektromehaanilise sideme koefitsiendid  $k_p$ ,  $k_{33}$ ,  $k_{15}$ ,  $k_t$  ja  $k_{31}$  kirjeldavad piesoelemendi võimekust muundada energiat mehaanilisest elektriliseks ning vastupidi.

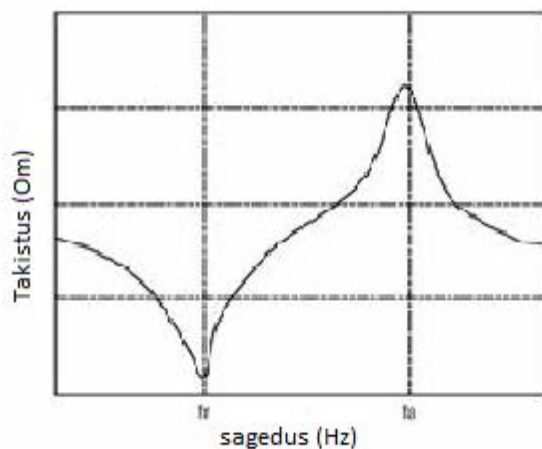
Selle koefitsendi saab välja arvutada läbi resonantssageduse ja antiresonantssageduse valemi.

kus  $f_r$  – resonantssagedus, Hz,

$f_a$  – antiresonantssagedus, Hz.

$$k_t = \sqrt{\frac{f_a - f_r}{0,405(2f_a - f_r)}}$$

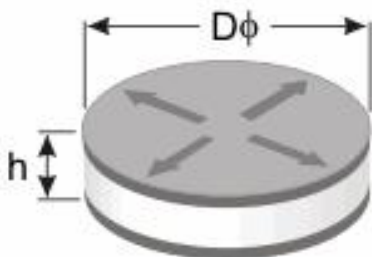
Olemuselt tekib resonantssagedus kui süsteem omab väga väikest takistust, antiresonants tekib aga siis, kui süsteem oma väga kõrget takistust. Graafikus 1 on kujutatud minimaalse takistusega resonantssagedus ( $f_r$ ) ja maksimaalse takistusega antiresonantssagedus ( $f_a$ ).



Sele 4. Takistusest sõltuv sagedus piesokeraamikas

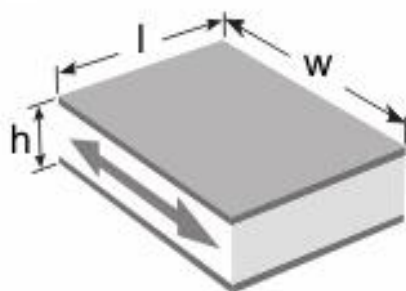
Võnketüübid erineva kujuga piesokeraamilistes elementides:

Õhuke ketas,  $D\phi > 3,16 h$



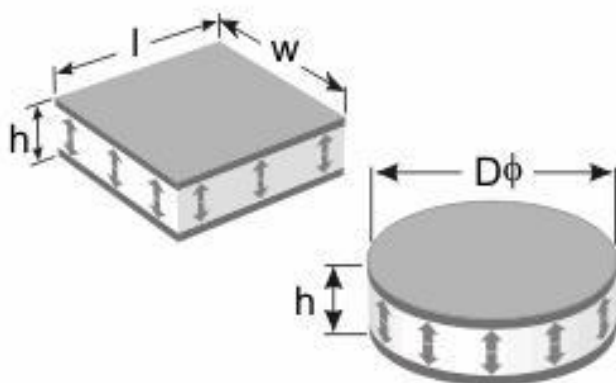
Sele 5. Radiaalne mood. (Kp)

Õhuke pruss,  $l > 4w, w > h$



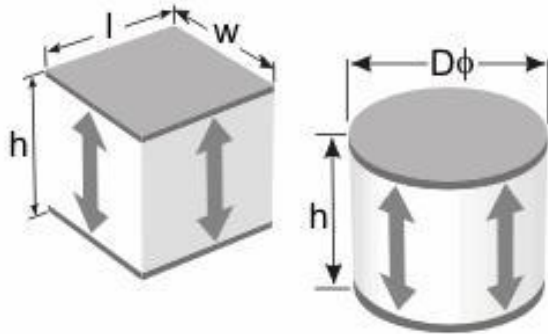
Sele 6. Pikkuse venituse survestamisel. (K31)

Õhuke ketas või plaat  
 $l, w, D\phi > 3.16 h$

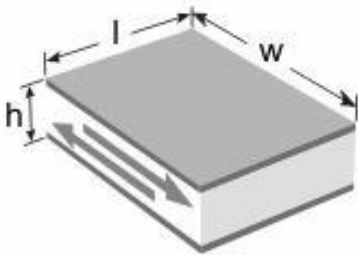


Sele 7. Paksuse survestamisel. (Kt)

silinder ja plokk,  $h > 3.16 l, w, D\phi$



Sele 8. Pikkuse venituse survestamisel. (K33)



Sele 9. Nihe paksuses. (K15)

#### 1.9.4 Painduv konstant

Elastseid piezoelektrilisi materjale iseloomustatakse elastse vastavusega ( $s_{ij}^{E,D}$ ) või elastse jäikusega ( $c_{ij}^{E,D}$ ). Elastne vastavust määrab deformatsiooni kogus, mis esineb rakenduskoormuse mehaanilise stressi mõjul.



### 1.9.5 Piesoelektrilised konstandid

Piesoelektriline moodul  $d$  – mehaanilise deformatsiooni suhe rakendatud elektrivälja suhtes (Kl/N)

$$d_{33} = \frac{\Delta x_s}{U_s},$$

kus,  $\Delta x_s$  – plaadi paksuse muutus, m,

$U_s$  – rakendatud pinge, V

Piesoelektrilise surve konstant  $g_{ij}$  – saadud pinge suhe rakendatud surve suhtes.

$$U_e = g_{33} dp_x,$$

kus,  $p_x$  – avaldatud surve, Pa,

$U_e$  – saadud pinge, V

### 1.9.6 Poissoni koefitsient

Poissoni tegur – iseloomustab materjali kalduvust deformeeruda põiksuunas.

$$\mu = -\frac{\Delta a \cdot l}{\Delta l \cdot a},$$

kus,  $\mu$  – Poissoni koefitsient,

$\Delta a$  – absoluutne paksuse juurdekasv, m,

$a$  – paksus peale deformatsiooni, m,

$\Delta l$  – absoluutne pikkuse juurdekasv, m,

$l$  – pikkus peale deformatsiooni, m

### 1.9.7 Temperatuuri koefitsent

Temperatuurikoefitsent näitab materjali erinevate omaduste muutumist (resonantsagedus, suurus, mahtuvus) temperatuuri muutumisel.

$$TK\Upsilon = \frac{1}{\Delta t} \frac{f(t_1) - f(t_2)}{f_{20}} \cdot 10^6,$$

kus,  $TK\Upsilon$  – Resonantsageduse temperatuuri koefitsent,  $1/^\circ\text{C}$ ,

$f(t_1)$  – resonantsagedus temperatuuril  $t_1$ , Hz,

$f(t_2)$  – resonantsagedus temperatuuril  $t_2$ , Hz,

$f_{20}$  – resonantsagedus temperatuuril  $20^\circ\text{C}$ , Hz,

$\Delta t$  – temperatuuri vahe  $\Delta t = t_2 - t_1$ ,  $^\circ\text{C}$

$$TKE = \frac{1}{\Delta t} \frac{C(t_1) - C(t_2)}{C_{20}} \cdot 10^6,$$

kus,  $TKE$  – mahtuvuse temperatuuri koefitsent,  $1/^\circ\text{C}$ ,

$C(t_1)$  – mahtuvus temperatuuril  $t_1$ , F,

$C(t_2)$  – mahtuvus temperatuuril  $t_2$ , F,

$C_{20}$  mahtuvus temperatuuril  $20^\circ\text{C}$ , F

$$TKJIP = \frac{1}{\Delta t} \frac{l(t_1) - l(t_2)}{l_{20}} \cdot 10^6,$$

kus,  $TKJIP$  – temperatuuri koefitsents lineaarsel laienemisel,  $1/^\circ\text{C}$ ,

$l(t_1)$  – pikkus temperatuuril  $t_1$ , m,

$l(t_2)$  – pikkus temperatuuril  $t_2$ , m,

$l_{20}$  – pikkus temperatuuril  $20^\circ\text{C}$ , m

### 1.9.8 Vananemise kiirus

Vananemise kiirus näitab resonantssageduse ja mahtuvuse muutust ajas. Vananemise kiirust arvutatakse järgmise valemi abil:

$$(AR) = \frac{1}{\log t_2 - \log t_1} \frac{X_{t_2} - X_{t_1}}{X_{t_1}},$$

kus,  $AR$  – resonantssageduse või mahtuvuse vananemise kiirus,

$t_1, t_2$  – polarisatsioonile järgnevate päevade arv,

$X_{t_1}, X_{t_2}$  – resonantssagedus või mahtuvus peale  $t_1$  ja  $t_2$  päeva peale polarisatsiooni

### 1.9.9 Mehaaniline tegur

Võnkesüsteemide resonantsiomaduste kvantitatiivne iseloomustus näitab mitu korda ületab sunnitud võngete resonantsi amplituud sunnitud võngete resonantsi amplituudi resonantsist madalamatel sagedustel sama rakendatud jõu korral.

$$Q_m = \frac{f_a^2}{2\pi f_r Z_r C (f_a^2 - f_r^2)},$$

kus,  $Q_m$  – mehaaniline tegur,

$f_r$  – resonantssagedus, Hz,

$f_a$  – antiresonantssagedus, Hz,

$Z_r$  – resonantstakistus, Oom,

$C$  – mahtuvus, F

### 1.9.10 Curie punkt

Curie punkt – on temperatuur, millest kõrgemal temperatuuril piesoelement kaotab oma omadused

## 1.9.11 Tihedus

$$\rho = \frac{m}{V},$$

kus,  $\rho$  – tihedus, kg/m<sup>3</sup>,

m – mass, kg,

V – ruumala, m<sup>3</sup>.

## 1.10 Piesokeraamika kasutusala

Piesokeraamilised elemendid on leidnud kasutusala väga paljudes valdkondades, näiteks meditsiinilistes instrumentides, tööstuslike protsesside juhtimises, pooljuhtide tootmise süsteemides, igapäevastes kodumasinates, side kontrollsüsteemides, mitmetes mõõteriistades ning teistes valdkondades. Neid kasutatakse pumpades, andurites (rõhk, jäätumine, nurkkiirused jm), optilistes instrumentides, laserprinterites, autofookusega kaamerate mootorites ja mujal. Antud materjalide kasutamine erinevates valdkondades kasvab pidevalt. Piesoelemendi kasutamine koondub enamasti nelja kategooriasse: andurid, generaatorid, jõuajamid ja muundurid.

**Generaatorites** suudavad piesoelektrilised materjalid genereerida pinget, mis on piisav, et tekitada säde elektroodide vahele. Generaatoreid kasutatakse näiteks kütte süütamiseks gaasipliitides või keevitusaparaatides.

**Andurites** teisendavad piesoelektrilised materjalid füüsikalisi parameetreid, näiteks kiirendus, rõhk ja vibratsioon elektrisignaalideks.

**Jõuajamites** teisendavad piesoelektrilised materjalid elektrisignaali täpselt kontrollitud füüsikaliseks nihkeks, täpselt paigaldatud mehaanilistes instrumentides, läätsedes ja peeglites.

**Muundurites** suudavad piesoelektrilised muundurid nii genereerida elektrienergiast ultraheli signaali kui ka konverteerida mehaanilised võnked elektrilisteks. Piesoelektrilised seadmed projekteeritakse kauguse, voolusuuna ja vedelikutaseme mõõtmiseks.

## 1.11 Piesoelementide tootmine



Sele 10. Soola piesokeraamilise elemendi loomiseks

Piesokeraamika tootmise protsess: lähteaine (soolad või oksiidid) peenestatakse ja segatakse, seejärel kuumtöötatakse temperatuuridel 900 – 1300 °C, mille käigus toimub keemiline süntees. Purulaadsest sünteesitud materjalist pressitakse (või surve all valamisel) vajaliku konfiguratsiooni ja mõõduga toorikud. Piesoelementide toorikud põletatakse rangelt kontrollitud temperatuuridel. Mehaaniline töötlemine peale põltust tagab elemendile täpse vormi ja mõõdud. Detailile kantakse hõbedast, nikkelist, platinast vm materjalist elektroodid. Keraamika elektroodide polariseerimiseks kasutatakse elektripinget.

## 2 TEHNOLOOGIA OSADE KOMPONENDID

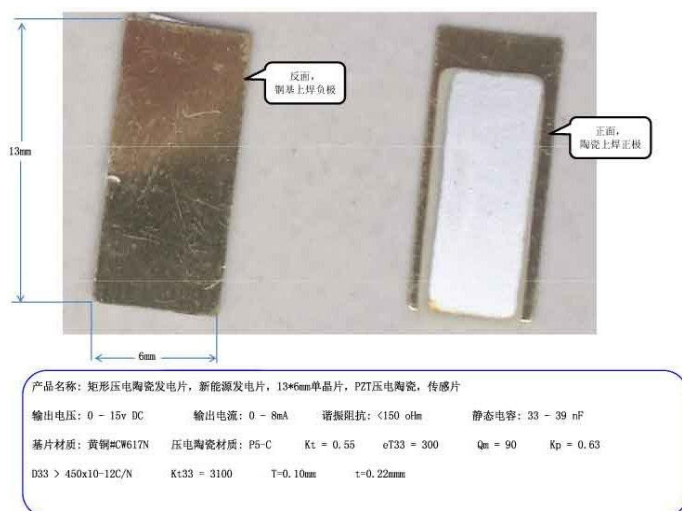
Meie tehnoloogia on piiratud talle ruumiga. Millest järeldeb, et kogu tehnoloogia peab omama enda suuruse piiranguid



Sele 11. Spordijalanõud kõrge jalapõhjaga

### 2.1 Piesoelemendi valik

Pildil näidatud piesoelement on kergesti paindub ning töötab nagu vedru. Painutades elementi ühele poole, element püüab taastada oma algupärase asendi. Lisaks on sellel suur pindala, mida saab paigutada tervele sisetallale ning sel moel saada väljundpinget ning laengut kogu mõjutatava pindala ulatuses ja erinevatel liikumise režiimidel nagu jooksmine, kõndimine, hüpped või kandadele toetumine.



Sele 12. Suurte deformatsioonide mõeldud piesoelement

Piesolement, mis oli ostetud minu poolt katsete läbiviimiseks on mõeldud heliseadmetes kasutamiseks, kuna see reageerib paremini vibratsioonidele ja helidele, mis on korduvalt täheldatud mõõtmiste käigus. Miks valitud piesoelement ei sobi valitud katseks? Antud element paindub surve avaldamisel ning hiljem paindub tagasi algasendisse. See ei paindu teisele poole, tekitades lisavoolu, mis omakorda vähendab oluliselt selle tõhusust valitud tehnoloogia jaoks.

Piesolementi valikul arvestatakse:

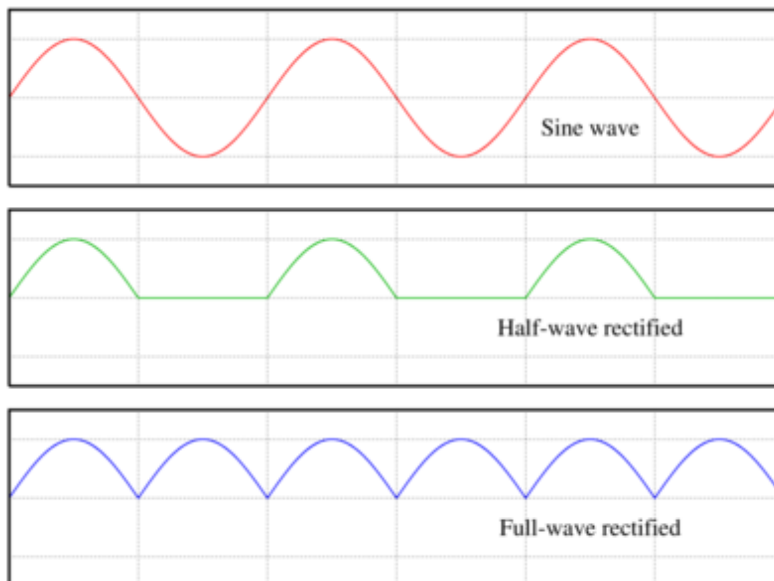
- 1) Sagedus. Mida väiksem sagedus, seda suurem on väljundpinge.
- 2) Suurus. Suured gabariidid painduvad efektiivsemalt.

Meie piesoelement, mis on soetatud elektroonika internetipoes Elfa Distrelec, on ringikujuline, diameetrilt 35 mm ning sageduselt 2.8 Hz.

Sellise elemendi hind on 1 euro.



Sele 13. Valitud piesoelement



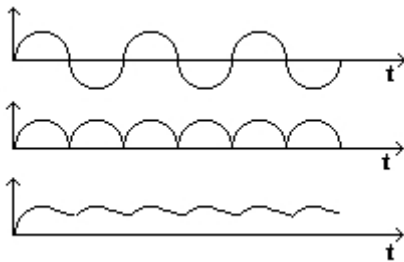
Sele 14. Vahelduvvool, ühefaasiline sildalaldi läbi jooksev vool ja kahefaasilise sildalaldi läbi jooksev vool

Piesoelement toodab sinusoidest vahelduvat voolu. Tekib see seetõttu et element toodab voolu painutades mõlemale poole. Painutades piesoelementi ainult ühes suunas, saame punase voolukõvera.

Ühepoolperioodilise dioodsilla ühendamisel lõigatakse ära sinusoidi osa, mis jääb allapoole 0 ning saadakse impulssvool – roheline kõver.

Kahepoolperioodilise dioodsilla ühendamisel pööratakse sinusoidi nullist allajääv osa üles. Sellega saadakse samasugune impulssvool mis on kaks korda tihedam – sinine kõver.

Viimasele graafikule kondensaatori ühendamine annab alalispinge lähedase pinge. Kuid pinge maksimumväärtus peale kondensaatori kasutamist on madalam, kuna kondensaator täitub eksponentsiaalselt. Lihtsamalt öeldes vool kasvab sujuvamalt võrreldes dioodsillaga. Selle efekti tõttu, kui dioodsilla pinge hakkab langema, samal ajal kondensaatori pinge ei ole saavutanud oma maksimumväärtust. Sama kehtib ka tingimustes kus dioodsilla pinge hakkab uuesti kasvama. Nii juhtub kogu ajatelje ulatuses. Kondensaatori pinge ei saavuta maksimumväärtuseid, see jääb kõikumateatud piirkonnas, mis määratletakse nagu alalispinge.



Sele 15. Vahelduvvool, kahefaasilise sildalaldi läbi jooksev vool, kondensaatori abil alaldav vool

Patareisid (akusid) on parem laadida alalisvooluga, mitte impulssvooluga kuna see vähendab laadimisaega ning ei vähenda seadme eluiga.

## 2.2 Sildalaldi

Sildalaldi ehk dioodsild on alaldi, mis koosneb diodide rühmast, mis on ühendatud sisend- ja väljundklemmide vahele. Plussväljundklemmi külge on ühendatud diodide plussotsad ja miinusväljundklemmi külge diodide miinusotsad. Iga sisendklemmi külge on ühendatud ühe diodi pluss- ja teise miinusots. [3].



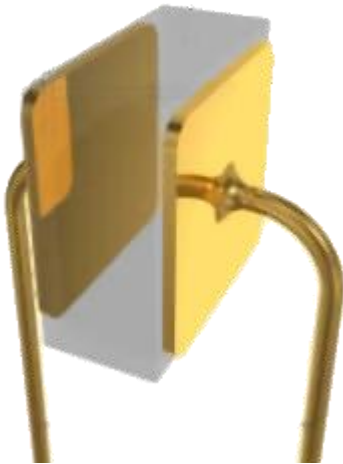
## 2.3 Kondensaator

Kondensaator on passiivne elektri- ja elektroonikakomponent, mille põhiomadus on mahtuvus, s.o võime salvestada (mahutada ja säilitada) elektrilaengut ning seega ühtlasi energit. [2].

Kondensaatori mahtuvus on seda suurem, mida suurem on kummagi plaadi pindala  $A$  ja mida väiksem on plaatide vahekaugus  $d$ :

$$C = \varepsilon \frac{A}{d},$$

kus,  $\varepsilon$  on dielektriku dielektriline läbitavus.



Sele 16. Kondensaatori ehituse põhikonstruktsioon – kaks voolu juhtivat voodrit, mille vahel asub dielektrik

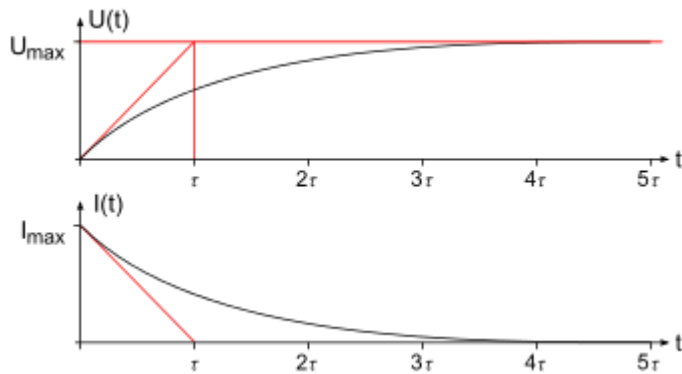
### 2.3.1 Kondensaator elektriahelas

Kondensaatori ühendamisel elektriahelasse tekib plaatide vahel elektriväli ja elektrodidele kogunevad elektrilaengud, mille tulemusena üks elektrod saab positiivse laengu  $+Q$  ja teine negatiivse laengu  $-Q$ . Sel puhul öeldakse, et kondensaator salvestab elektrodidele kogunenud laengu.

Salvestatav laeng  $Q$  on võrdeline kondensaatorile rakendatud pingega  $U$ :

$$Q = C U$$

kus, võrdeteguriks  $C$  on kondensaatori mahtuvus.



Sele 17. Kondensaatori sisse ja väljalaadimine toimub eksponentselt

Kondensaatori laadimis- ja tühjenduskõverad

$\tau = RC$  on ajakonstant ( $R$  – laadimisahela takistus)

Pingestamise hetkel hakkab pinge kondensaatoril tõusma nullist, kuni saavutab toitepingega määratud väärtuse. Pinge muutumise kiirus sõltub kondensaatori mahtuvusest: mida suurem see on, seda rohkem laenguid on vaja selleks, et ületada plaatidevahelise välja põhjustatud vastumõju pinge muutumisele (samalaadselt aeglustab pooli induktiivsus voolu muutumist). Täiendavat vastumõju avaldavad elektriväljas polariseerunud (ühesuunaliselt nihkunud) dielektriku positiivsed ja negatiivsed elektrilaengud; see vastumõju on võrdeline dielektriku dielektrilise läbitavusega.

Laadimisel pannakse niisiis pingeaallika laengud liikuma kondensaatori sisemise elektrilise jõu vastu. Selle jõu ületamiseks tehtav töö salvestub kondensaatoris elektrivälja energiana:

$$W = \frac{1}{2} C U^2.$$

Valemis on  $W$  energia džaulides (J),  $C$  mahtuvus faradites (F) ja  $U$  pinge voltides (V).

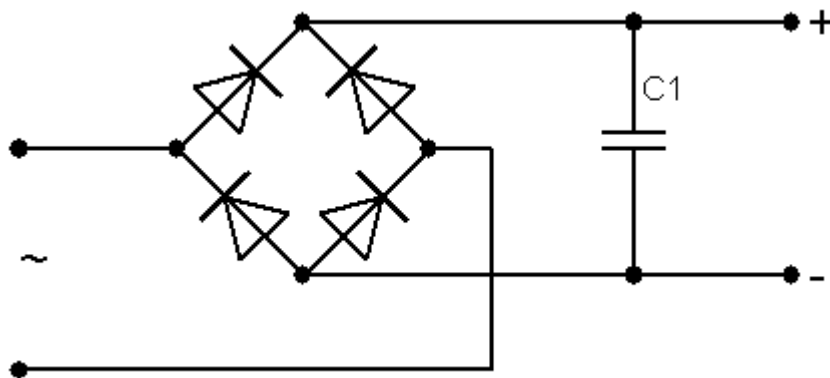
Alalisvooluahelas laadub kondensaatorit sisselülitamise järel kiiresti: esimese ajakonstandi jooksul kasvab pinge kondensaatoril väärtuseni  $0,632 U_{\max}$ , vastavalt väheneb laadimisvool, kuni muutub nulliks.

Vahelduvvooluahelas toimub kondensaatori perioodiline ümberlaadimine ja ahelat läbib pidevalt vool. Kondensaator avaldab vahelduvvoolule mahtuvuslikku reaktiivtakistust

$$X_C = -\frac{1}{\omega C} = -\frac{1}{2\pi f C},$$

kus,  $\omega = 2\pi f$  on nurksagedus (radiaani sekundis) ja  $f$  – sagedus (hertsides).

Kondensaatori plaatide vahele moodustunud elektriväli ja seega ka elektrilaeng jääb püsima ka pingeaallika lahutamise järel, kuid hakkab pikkamööda vähenema läbi dielektriku; ka parimat dielektrikut läbib teatav lekkevool. [9].



Sele 18. Sildalaldi koos kondensaatoriga

## 2.4 Power Bank ja tehnilised andmed.

Power Bank - Väline patarei, usaldusväärne vooluallikas, mis on hea valik reisijatele, ärimeestele ja aktiivsetele inimestele. Saate rohkem telefoniga rääkida, kuulata muusikat, mängida, pildistada. Power Bank - on kaasaskantav varuaku, mis laeb nutitelefonid, mobiiltelefone, iPhone, iPod, iPad, MP3-mängijaid, PDA, PSP, digikaameraid ja erinevaid kõrvaklappe siis kui traditsioonilised laadimismeetodid ei ole kättesaadavad. Asendamatu aktiivsele inimesele kes sageli kasutab kaasaegseid tehnoloogilisi seadmeid. Power Bank - kompaktne ja kerge, ja tänu kaasaegsetele akude kasutamisele säilitab kuni 80 % mahtuvusest pika aja jooksul. Power Bank laadimisel kasutada MicroUSB kaablit. Power Bank laadimine võib toimuda nii USB pordi või 220 V adapteriga. Ühilduvus: kõik mobiiltelefonid ja elektroonikaseadmeid mis võimaldavad Micro USB kasutamist. [15].

Tehnilised andmed:

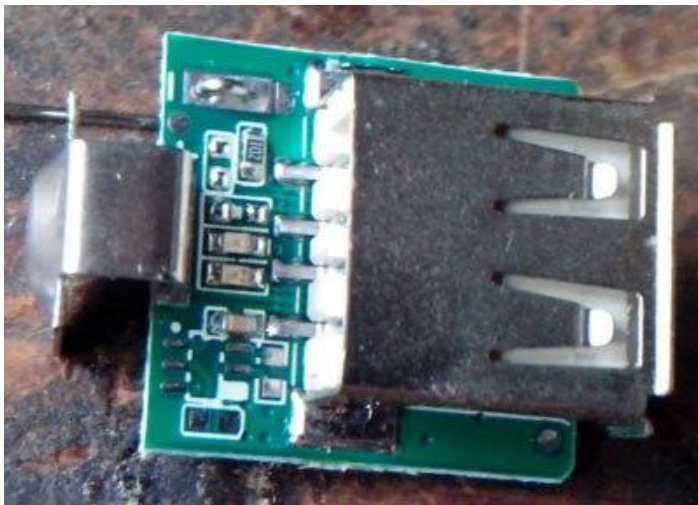
- Liitium-polümeer aku mahtuvusega: 2600 mAh
- Varustatud laadimisindikaatoriga
- Laaditakse elektriga
- Varustatud sisseehitatud temperatuuri, pinget ja vooluregulaatoriga
- Sisendpinge: DC 5 V 1000 mA
- Väljundpinge: 5.3 V 1000 mA MAX
- Laadimisaeg: 2 - 3 tundi või valgusdiodi värvi muutuseni
- Laadimistsüklite arv: rohkem kui 500 ilma mahtuvuse vähenemiseta
- Korpuse mõõdud: 91 mm 24 mm 24 mm, kaal 80 g
- Ühenduskaabli pikkus: 30 cm

- Kasutatav järgmiste mobiiltelefonidega: iPhone, SAMSUNG, HTC, LG, ALCATEL, FLY, NOKIA, SONY jne., Ipod, MP3/4 mängijad, digitaalkaamerad ja fotoaparaadid, mobiilsed seadmed
- Ühilduvus: kõik telefonid/nutitefonid ja seadmed (näiteks, iPhone, SAMSUNG, HTC, LG, ALCATEL, FLY, NOKIA, SONY jne., Ipod, MP3/4 mängijad, digitaalkaamerad ja fotoaparaadid, mobiilsed seadmed) toitepingega 4.5 - 5.5 V ja voolutarbega kuna 1 A.



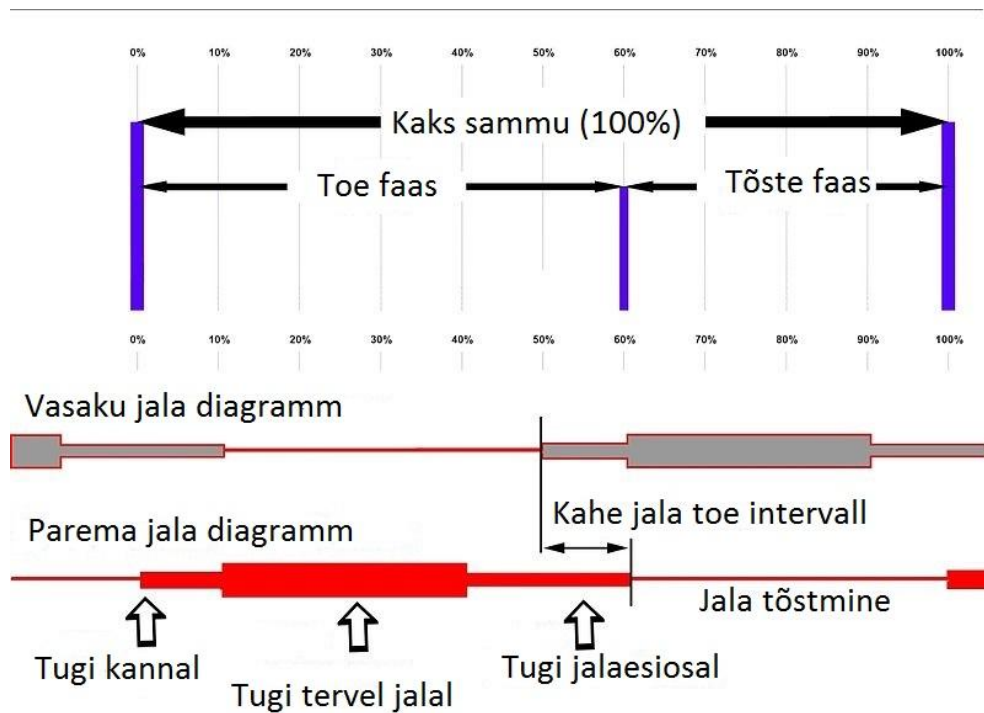
Sele 19. Avatud Power Bank

Sees on ainult üks väike plaat mikroskeemiga FM6316FE



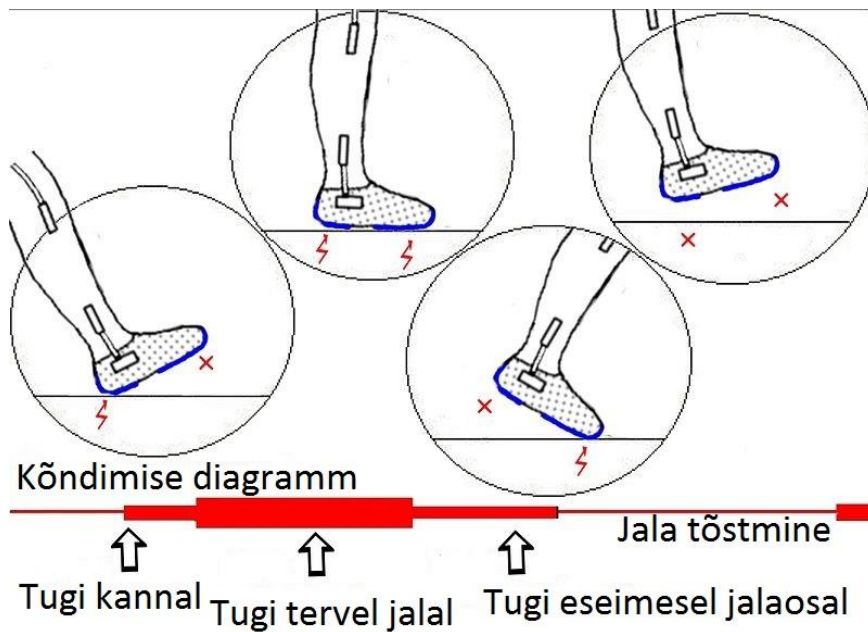
Sele 20. Mikroskeem mis asub Power Bankis

### 3 KÕNDIMISE PROGRAMM



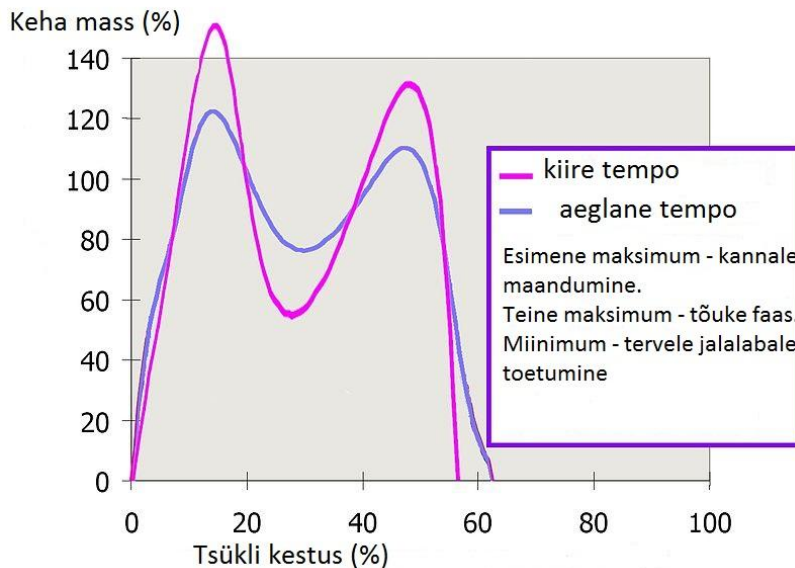
Sele 21. Kahe sammu kõndimise diagramm

Tavalise topeltkontakti diagrammi kuvatakse diagrammis vasakule ja paremale jalale eraldi. Punase värviga on kujutatud parema jala diagramm. Hetkel alustab ja lõpetab sammude tsüklit just parem jalg – kahekordne samm. Peenike joon kujutab kontakti puudumist aluspinnaga, peale mida näeme kontakti kannal, terve jala ja jala esimesele osale.



Sele 22. Kõndimise diagram

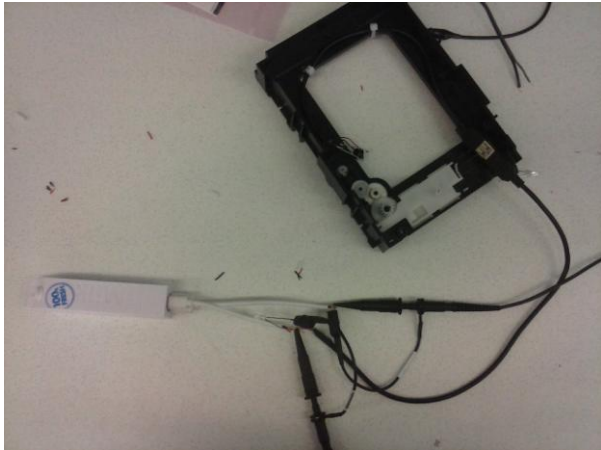
Sõltuvalt sellest, kuhu me paigutame jalanõus piesoelemendi – erinevad väljundvoolu näitajad. Eksperimentide käigus selgus, et jalanõu kannale juurde paigutatud element annab kõrgema tulemuse. Kõige kasulikum on paigaldada elemendid nii kannale, kui varvaste piirkonda, sellisel juhul saame väljundvoolu suurendada. [8].



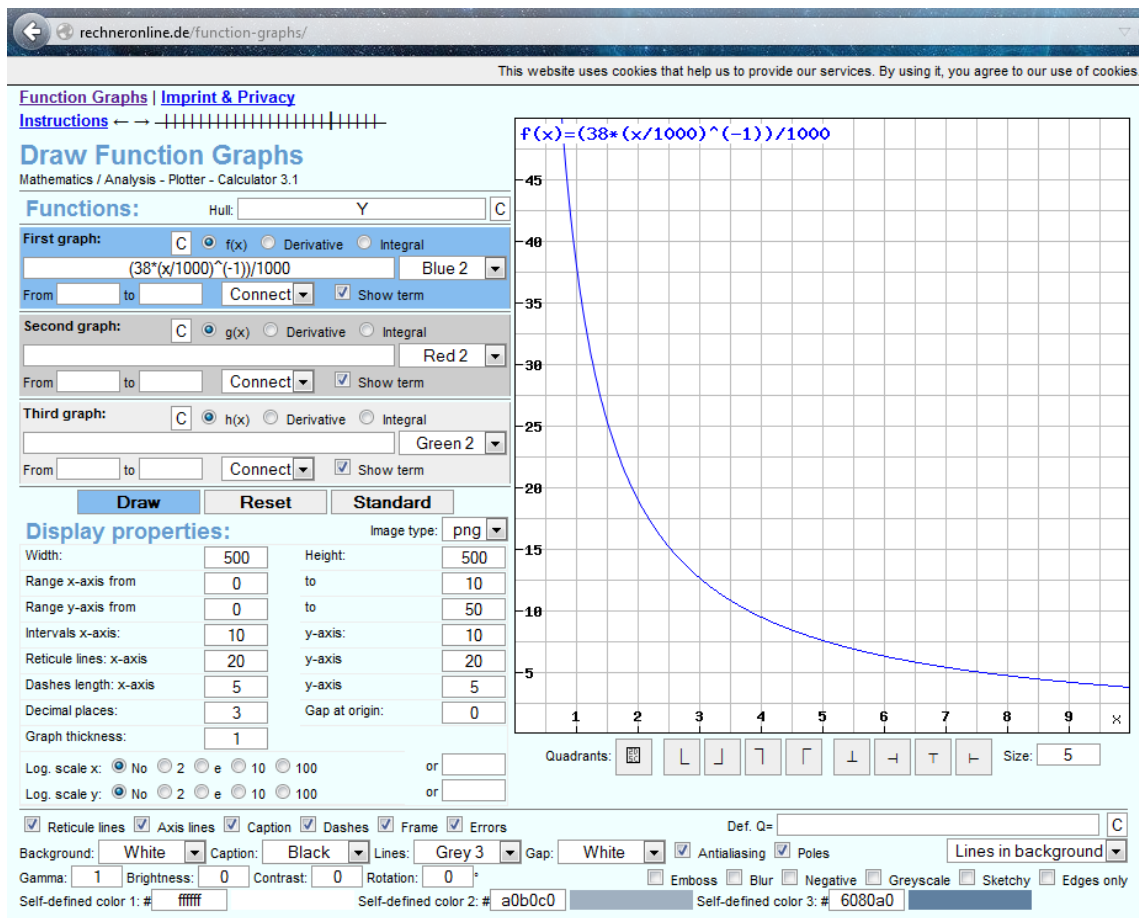
Sele 23. Graafik, mis näitab ühe sammu litsujõudu

## 4 MEHAANILISE SEADE

Antud juhul mehaaniline seade koosneb hammasratastest, magnetist, mähisest, dioodsillast ja hammastega plastikdetailist. Iga sammuga me vajutame plastikdetailile, mis omakorda käitab hammasrattaid. Hammasrattad pöörlevad koos mähisega ning selletõttu mähises tekib elektrivool. Elektrivool läbib dioodsilla ning sealt suunatakse see akusse.



Sele 24. Mehaaniline seade



Sele 25. Graafik, mis näitab laadimisaega sõltuvust jalapõhja kõrgusest

Antud graafikul horisontaalteljel on näidatud aeg tundides ning vertikaalteljel kõrgus millimeetrites. Graafikult on näha et mehaanilise seadme energia tootmine on tugevalt seotud kõrgusega. Seega tekib küsimus: millisel käimisrežiimil inimesed tekitavad kõige suurema koormuse? Enim koormatud käimisrežiim on trepil tõusmine. Just sellel režiimil inimene kulutab kõige rohkem energiat ning talla alla paigaldatud mehaaniline seade teeb maksimaalset tööd. Seega ülesandeks on tekitada trepist üleskäimise tunde (jah, käia on raskem, selletõttu ongi konstruktsioon mõeldud pigem spordijalatsite jaoks). Selliseid tulemusi on võimalik saada talla kõrguse suurendamisega päka all või teisisõnu talla tagumises osas. Selleks et koostada valemeid graafikute esitamiseks, ma leidsin koefitsiendi 38, mis sõltub paljudest parameetritest. Ma ei mäleta detaile kuid viisin läbi uue analüüsi: Ühe sammuga genereeritav energia kogus sõltub potentsiaalse energia vahest kokkusurutud ja mitte kokkusurutud elemendi puhul, ehk:

- 1)  $E(\text{samm}) = mgh \cdot KT$ , kus  $m$  – keskmise inimese mass (võtame  $m=80\text{kg}$ ),  $g = 9.8\text{m/s}^2$ ,  $h$  – elemendi kõrgus (ehk talla kõrgus – hiljem on meie muutuja),  $KT$  (kasutegur) võtame 0.3 - tavapraktika, seda me eriliselt ei usalda – vajadusel seda võib alati korrigeerida.

Seega:  $E(\text{samm}) = 240h$  (J), või  $E = 240hn$  (J), kus  $n$  – sammude arv ja  $E$  – jalutuskäigu summaarne energia.

- 2) Nüüd selgitame kui palju energiat me vajame:  $E = UIt$ , kus  $U$  - pinge, mille annab patarei, võtame  $U = 5$  V;  $It$  – voolu tugevus korrutatud ajaga, ehk patarei mahtuvus näidatakse mAh. Näiteks ma võtsin Samsung Galaxy patarei mahtuvuse, kus  $It = 2800$  mAh, mille ma teisendasin  $It = 2800 \cdot 0.001 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 10080 \text{ As}$  (Ampersekund).

Seega:  $E = 50400$  (J) – see on energia kogus, mida on vaja telefoni patarei laadimiseks.

- 3) Võtame energia punktide 1 ja 2:  $240hn = 50400$  või  $hn = 210$ . Ehk sammude kogus, mis on vajalik laadimiseks sõltub elemendi kõrgusest:  $n = 210/h$ . Sammudega on ebamugav tööd teha, seega lähme üle läbitud kilomeetritele või pigem kulutatud tundidele. Oletame et keskmine inimene läbib ühe sammuga 0.8 m liikudes keskmise kiirusega 4 km/h (me lähtume pika ajalise kestvusega jalutuskäigust), siis  $t(\text{samm}) = 0.8 / (4 \cdot 1000\text{m} / 3600\text{s}) = 0.72$  s. Ehk  $n$  sammude jaoks on vaja keskmisel  $t=0.72n$  sekundit. Asendame funktsiooni  $n$  ja saame:  $t = 0,72 \cdot 210/h$ , ehk  $t = 151.2/h$  – see näitab vajaliku jalutuskäigu kestvust ühe laadimise jaoks.

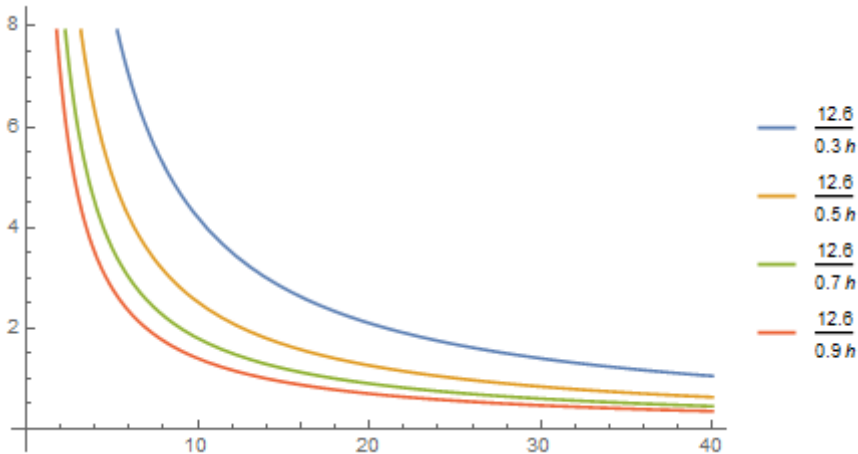


4) Selleks et näitlikustada, teisendame sekundid tagasi tundideks ja meetrid millimeetriteks:  $t \cdot 3600 = 151.2 / (h \cdot 0.001) \Rightarrow t = 42/h$ ,

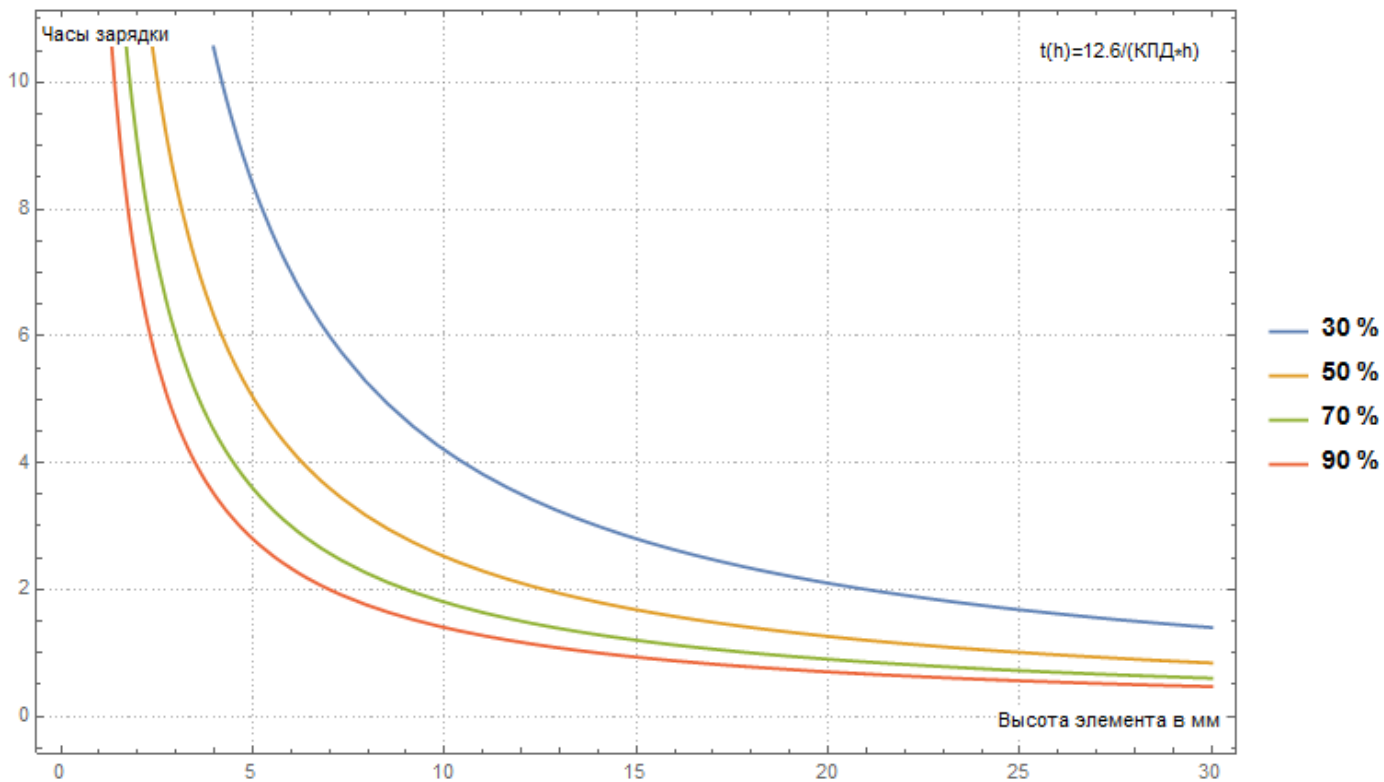
kus  $t$  on mõõdetav tundides

ja  $h$  - millimeetrites.

Samuti lisame erinevad KT variandid, nimelt – 30 %, 50 %, 70 % ja 90 %. Selleks eraldame teise muutuja ja saame :  $t = 12.6 / (KT \cdot h)$ . Meie funktsiooni graafik on järgmine:



Sele 26. Graafik, mis näitab laadimisaega sõltuvust jalapõhja kõrgusest



Sele 27. Graafik, mis näitab laadimisaega sõltuvust jalapõhja kõrgusest

Sinine joon on meie algupärane graafik, kus on näha et KT 30 % juures patarei mahtuvusega 2800 mAh laadimiseks kulub 8 tundi pidevat käimist. Seejuures jalatsi talla tagumise osa paksus peab olema vähemalt 5 mm, mis juba tekitab tugeva trepist ülesse liikumise tunde, raskendades igat sammu. Suurendades kõrgust või KT (KT võib suurendada magnetiga mähise mõõtude kasvatamisega), me vähendame laadimise aega. Edaspidiselt on vaja otsida viise, kuidas parandada meie tulemusi.

## 5 KATSED PIESOELEMENDIGA

### 5.1 Teoreetilised arvutused

- 1) Meie aku mahtuvus  $c = 2600$  mAh. See tähendab, et power bank suudab toota ühe tunniga 2600 mAh. Arvutame mahtuvuse ringi süsteemi SI.  $2600 \cdot 3600 / 1000 \Rightarrow c = 9360$  ampri sekundis.
- 2) Seejärel tahame arvutada välja energia. Energia saame eelneva vastuse ja väluva pinge korrutise abil. Väluv pinge tehniliste andmete järgi ei ületa 5 Volti.  $E = 9360 \cdot 5 = 46800$  Džauli. 46800 J – vajalik kogus energiat, et power bank täis laadida.
- 3) Selleks, et nutitelefonu aku 1% võrra laadida on tarvis  $E = 468$  J. Jagades energia ajaga saame võimsuse.  $W = 468 \text{ J} / 3600 \text{ s (1 tund)} = 130 \text{ mW}$ . See tähendab, et meil on tarvis  $W = 130 \text{ mW}$  1% aku laadimiseks.
- 4) Voolujõud = võimsus/pinge  $I = W / U = 130 / 5 = 26 \text{ mA}$

Järeldus: Selleks, et laadida 1 % telefoni akut, on tarvis  $I = 26\text{mA}$  alalisvoolu ühe tunni vältel. Meie idee puhul on mõistlikum anda veidi võimsamat voolu, sest meie vool ei ole pidev, vaid on ligilähedane sellega.

### 5.2 Voolujõud.

Kõik me teame, et aku laeb end voolujõu abil. Võimsus - füüsikaline suurus, mis näitab, kui palju tööd teeb jõud ajaühiku jooksul, seega väljendab võimsus töö tegemise kiirust. Voolutugevust mõõdetakse amprites.

Tsingi, nikkeli akud (enamalt jaolt autoakud) suudavad laadida voolutugevusega, mis on võrdväärne 10 % nende täismahtuvusest. Meie olukorras on kasutuses liitioonaku, mille sisend- ja väljundvõimsus on piiratud 1 A. Piirangu kehtestab powerbanki sisse paigaldatud mikroskeem. Mikroskeemil asuv stabilitron piirab voolu igas olukorras 1 A tugevuseks, olenemata sisse antud tugevusest. Kui vool on 1 A suurem, ei juhtu mitte midagi, aku ei lõhke ega lähe põlema. Kui sissetulev vool on ilmatuma tugev, võib mikroskeem rikki minna ning seade lakkab töötamast. Meie olukorras on antud nähtus võimatu.

Meie powerbanki väljundvõimsus on 1 A. See tähendab, et selline aku on mõeldud nutitelefonide või muude sarnaste seadmete laadimiseks, mis tarbivad kuni 1 A. Kui vool on eelmainitud madalam, laeb aku end aeglasemini. Näitena, laadides 1 A powerbankiga tahvelarvutit, mille tavalaadimine toimub 2 A, tavalise 4-tunnise laadimistsükli asemel laeme seadet 12 tundi. Kui piesoelemendilt saadav voolutugevus on madalam kui üks amper, laeb aku end tavalisest palju aeglasemini.

Kõige tähtsam parameeter, mida peame laadimisel arvestama on võimsus. Voolutugevuse saame võimsusest jagatud pingega. Pinge on meil alati 5 V, power banki piiratud sisendpinge. Meie 40 V pingepulsid ei mängi rolli, stabilitron powerbanki mikroskeemis hoiab sisendpinge alati 5 V. Selleks, et mõõta võimsust peame teada saama takistuse.

### 5.3 Kondensaatori mahtuvus

Kondensaatori mahtuvus sõltub tema geomeetristest suurustest ning dielektrikust, kui täiturist kondensaatori seinte vahel. Sõltuvalt nende väärtuste suurustest on väga selgelt jälgitav lame kondensaator.

$$C = (\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S) / d;$$

kus,  $\epsilon$  - suhteline dielektriku dielektriline läbitavus ;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ ;

$d$  - seintevaheline kaugus;

$S$  - kondensaatori seinte pindala.

## 5.4 Laboratooriumi päevik

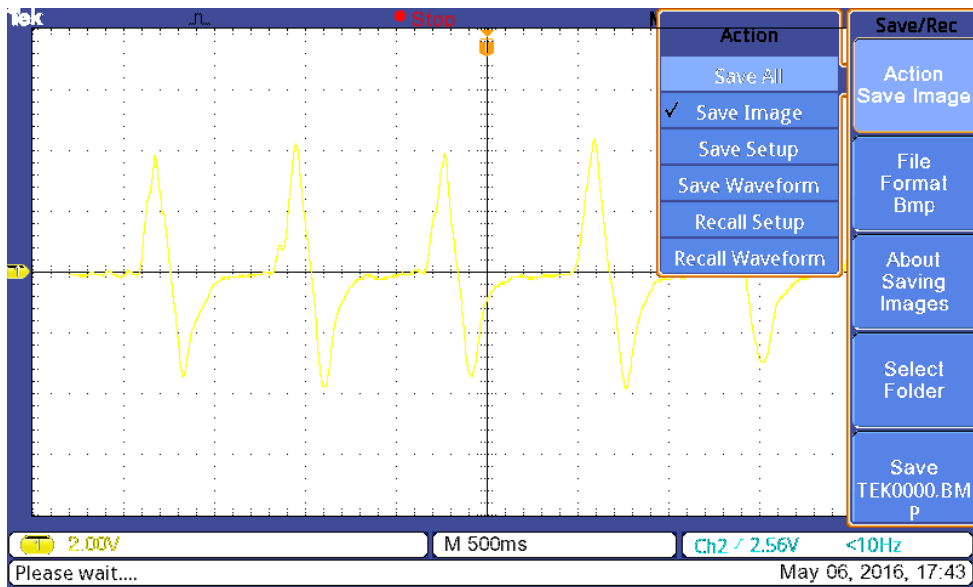
Laboratooriumis läbiviidud eksperimentide ülesanded:

- Kontrollida piesoelemendi väljundpinget erinevate väliste mõjutuste abil.
- Kontrollida piesoelemendi väljundpinget peale diodisilla kasutamist, erinevate väliste mõjutuste abil.
- Kontrollida, kas väljundpinge suureneb või väheneb rööbiti või paraleelselt ühendatud piesoelementide arvust tingituna. Kas see toimib üheaegselt mitmele elemendile vajutades või jääb väljundpinge muutumatuks?
- Mõõta väljundpinge võimsust takistuse abil.
- Selgitada välja voolujõu kogus, mida on tarvis aku laadimiseks,
- Kontrollida, kas power bank hakkab laadima, millise kiirusega ning temperatuuriga (sihiga välistada aku ülekuumenemine)
- Kontrollida, kas powerbank hakkab kuumenema.
- Kontrollida mehaanilise seadme väljundpinge suurust diodisillaga ning ilma. Kas aku hakkab laadima ning millise kiirusega.

## 5.4.1 Esimene päev

Isikliku mõõtmise tulemuseks power banki takistus 150 - 240 mOm.

Läbi viidud esimesed katsed piesoelemendiga. Vajutades näpuga elemendile andis ostsillograaf välja kuni 4 V vahelduvat impulssi.



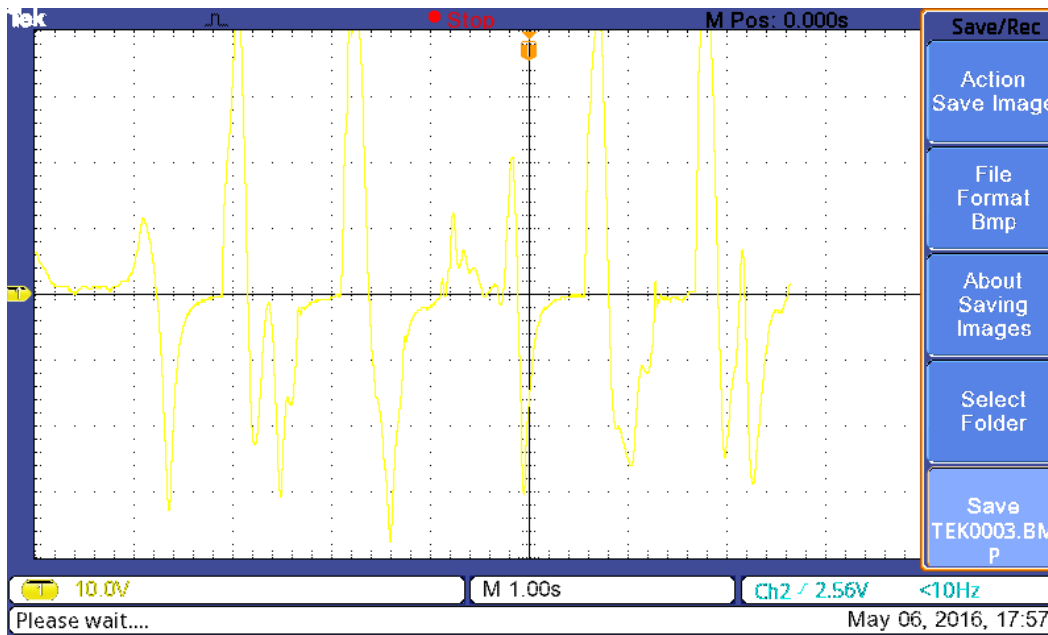
Sele 28. Väljundpinge piesoelemendile vajutamise jooksul

Mõne aja pärast paigaldasin pikkade juhtmete abil jalanõu külge piesoelemendi.



Sele 29. Töötav piesoelemnt jalatsis

Esimene katsetus oli kannapiirkonnaga (pilt mälu pulgal), kus impulsid küündisid kuni 40V.



Sele 30. Piesoelement kannapiirkonnas väljundpinge

Keskmise impulsisuuruse arvutamiseks võtsin aluseks ühe implusi, mille kestuseks oli ligikaudu 1.2 sekundit ja jagasin siinussignaali võrdseteks osadeks (0,05 sekundit) ning võtsin maksimaalse impulsi antud osas. Lõpuks arvutasin välja kõikide osade keskmise, milleks osutus ligikaudu 14 Volti.

Enne seda sai filmitud videod, kus proovisin näidata inimese tavalist kõndi, jooksu ja aeglast kõnnakut, kuna iga liikumismeetodi puhul näitajad erinevad sõltuvalt sammude ajast. Uuringud on suunatud inimese tavalise, keskmise kõndimise peale, mille kohta ka eelnevalt mõõtmised teostasid (vt, üles)

Selleks sai lisaks leitud materjalid dünaamika, mehaanilise kõndimise, toetuse reaktsioonijõus ja kõndimise ajalise struktuuri osas.

Sellisel juhul, saab 2600 mAh telefoniaku täielikult täis laadida. Kahjuks võtab laadimine teoorias aega 24 tundi. Need seadmed, millel on suur mahtuvus, saab laadida täis vaid osaliselt.

Isegi fakt, et sellest ei jagu täielikuks laadimiseks, siis isegi osaline laadimine võimaldab hoida sidet, kuulata muusikat või jõuda koduni. Igal juhul, kuni ei ole välja mõeldud suurema mahuga akusid või kiiremat laadimiskiirust omab tehnolooga potentsiaali ja mõtet. Väga

kasulikuks osutub see sportlaste või mitte kodus istuvate noorte seas, eriti juhul, kui nad armastavad istuda nutitelefones või kuulata sõrkimise ajal muusikat.

Omades kahte laadimisseadet, üks mõlemas jalanõus, toimub millegi laadimine kaks korda kiiremini. Või aidata laadida oma sõbra seadet, kellega koos parajasti aega veedetakse. Lisaks eemaldades laadimiseks üks aku jätkab teine kõndimisel laadimist. Sellisel juhul saab neid kordamööda vahetada või rikke korral jääb alati üks töösse.

Planeeritud seade saab olema eemaldatava akuga. Sellisel juhul saab teiste seadmete laadimiseks aku eemaldada. Rikke korral vajadusel vana aku uue vastu vahetada.



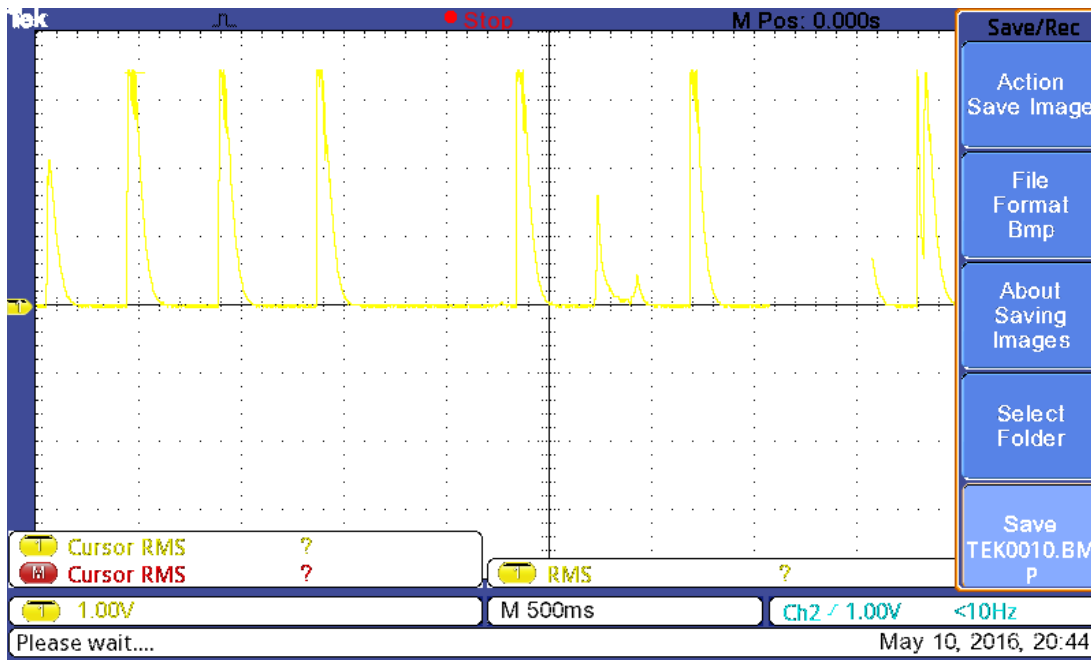
Sele 31. Piesoelement jalatsis



## 5.4.2 Teine päev

Piesoelemendi ostsillograafia otseühendamisel saame näpuvajutuse korral näitajaks 5 Volti.

Ühendamisel neljal jalal diodisillaga – väljundpinge 3 Volti, sest diodisilla iga jalg neelab 0,7 Volti.



Sele 32. Piesoelemendi koos diodisillaga väljundpinge

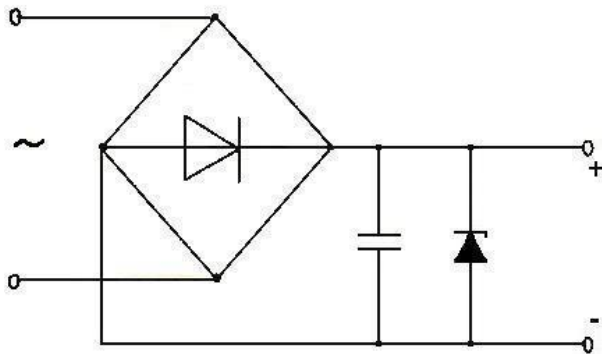
Kondensaatori ühendamisel õnnestub tema laadimine mõne voldi võrra 13 sekundi jooksul. Kokku tehti 13 sekundi jooksul 30 elemendivajutust käega. Tuues kondensaatori juurde põleb diod 1 sekundi vältel.

Oletus, et järjestikune elementide ühendamine ja üheaegne või järjestikune survestamine (kui elemendid asetsevad jalaõu erinevates osades) võimaldab välja anda suurema või tihedama pinget ning ühtlasti kiirendada laadimisprotsessi. Kahjuks ei anna järjestikune elementide ühendamine mitte mingit tulemust ning väljundpiget ei teki isegi ühele elemendile vajutades. Seda seletab olukord, et ideaalselt üheaegset elementidevajutust on väga raske saavutada. Üheaegse vajutuse korral mitmele elemendile on väljundpinge võimsus väiksem kui pinget ainult ühelt elemendilt. Paralleelse ühenduse korral annavad elemendid väljundpinget, vajutades nii ühte kui mõlemat elementi. Väljundpinge võimsus on väiksem kui 3 volti, mida näitab ka ühendusse lisatud kondensaator, mis laeb end märksa aeglasemini kui eelnevalt üksiku elemendiga ühenduses olles.

Järgmine samm oli proovida ühendada igale elemendile oma diodisild ning iga silla positiivsed ja negatiivsed omavahel ning proovida, kuidas see töötab. Tulemuseks oli selgus, et mõlemad laevad kondensaatorit, kuid üheaegsel vajutamisel oli laadimiskiirus veidi väiksem.

Kondensaatori ühendamise korral väljundpinge väheneb, sest osa pingest läheb vaikselt tühjeneva kondensaatori laadimiseks. Kondensaatori kasutamise otstarve seisnes selles, et siluda väljundpinge vastava aku laadimise tarbeks sobilikumaks ning kiiremaks.

Ilma kondensaatorit kasutamata omame ainult katkendlike pingepulsse. Üks sekund, - üks samm, üks impulss kuni 3V näpuga vajutades ning kuni 40 Volti astudes, kus elementi survestab kogu keha mass. Aku pinge on meil alati 5V. Stabilitron powerbanki mikroskeemis hoiab sisendpinge alati 5V, olenemata sisseantud voolutugevusest.



Sele 33. Skeem koos diodisilla, kondensatori ja stabilitrooniga

### 5.4.3 Kolmas päev

Sisenedes laobrisse, kontrollisin taaskord üle piesoelementide väljundpinge, mis osutus keskmiselt 4 V, harva tõustes kuni 5 V. Elementidele ühendasin külge diodisilla, millest tingituna oli väljundpinge võimsus 2 V, tugevama surve korral kuni 3 V. Järgmisena ühendasin diodisillaga 100 mikrofarad kondensaatori. Järgnevate vajutuste mõjul laadis kondensaator maksimaalselt 2 V intensiivsete vajutustega ligikaudu 10 sekundiga. Kondensaatori tühjenemine ilma lisaseadmeteta kestis ligikaudu poolteist minutit. Järgmisena asendasin kondensaatori keeramilise 10 mikrofarad kondensaatoriga. Sellise kondensaatori laadimisel oli maksimaalne näitaja 5 V.

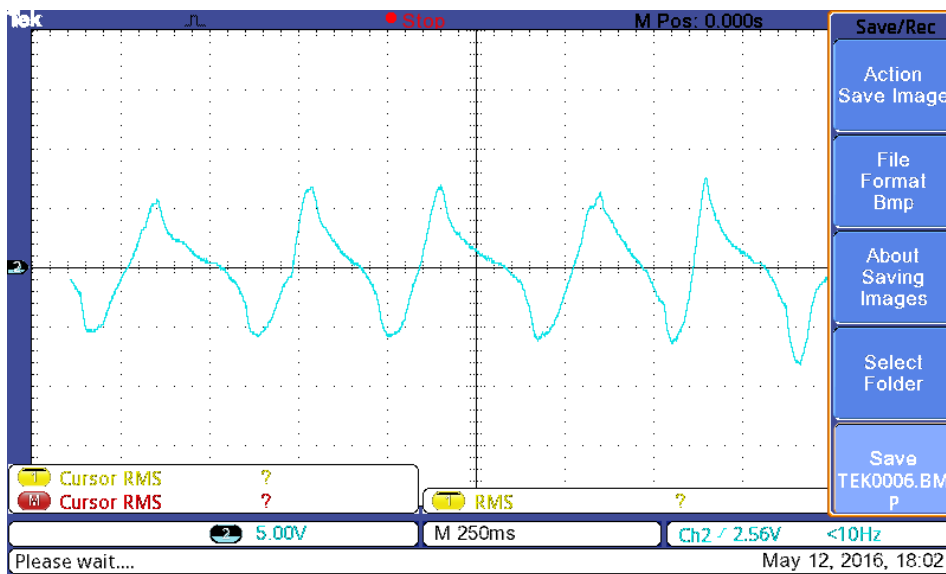
Juhul, kui piesoelement puutus kokku vibratsiooniga, suurenes väljundpinge kuni 15 V. Laadimiskiirus intensiivsete vajutuste korral kestis ligikaudu 5 sekundit. Kondensaator tühjenes ligikaudu minuti vältel. Sellest võib järeldada, et paremini sobib väiksema mahtuvusega kondensaator – 100 mikroFarad. Meie kondensaatori ülesanne on siluda voolu, lisaks on väga tähtis, et tühjenemine oleks aeglasem. Kõndimise käigus, kui inimese jalg on õhus, ei jõua kondensaator tühjeneda, järgmist astet tehes laeb kondensaator end taaskord täis. Kõik eelnev teeb voolu pidevaks ning ühtlaseks.

Viimasele seadistusele sai ühendatud power bank, mis täidab aku rolli. Järgnevate vajutuste korral ei näidanud ostsillograaf mitte midagi, näis nagu pinget ei oleks. Ühendades ostsillograaf kondensaatoriga avastasin, et element laeb vaid kondensaatorit, vool edasi akusse ei jõua. Vool eksisteerib igal juhul, kui on olemas pinge, mis tähendab seda, et voolutugevus oli väga väike, ligilähedane nullile. Voolutugevuse puudumisel akulaadimist ei toimu. Eemaldasin kondensaatori seadmest ning mõõtsin uuesti. Tugevate vajutuste korral, mis imiteerivad inimese astumist, sain väljundpingeks 40 V, kohati kuni 60 V, kuid minuti vältel taoliseid vajutusi tehes ei näidanud powerbank isegi 1 millivoldi suurust täitumist. Sellest järelduvalt ei laadinud power bank end üldse.

Mehaanilise seadme ühendamine läbi diodisilla ei andnud voolu rohkem, kui 4 V. Pinge ei sõltunud vajutamise intensiivsusest ega rakendatud jõust. Diod põles eredamalt, kui lihtsalt piesoelemendiga.

## 5.4.4 Neljas päev

Proovisin panna elementide peale erinevate mõõtudega penoplasti ning korraldasin uued väljundpinge mõõtmised ilma ning koos diodisillaga. Seekord vajutades mitte otse elemendile vaid penoplastile. Penoplast võimaldab avaldada survet konkreetsesse punkti, mis omakorda võimaldab elemendil paremini painduda ning pehmedab survet pikendades elemendi kasutusaega. Selliste eksperimentide käigus mõõtsin väljundpingeks kuni 15 V ühe elemendi korral ning ligikaudu 10 V kasutades diodisilda.



Sele 34. Väljundpinge pinoplastile vajutamise jooksul

Tuleb täheldada, et mõõtmised tehti survestamisel käega, mille raskuseks võib lugeda 15 – 20 kg. Käimise korral astume terve keha raskusega, mis omakorda tõstab väljundpinged kuni 4 korda.

Järgnevalt katsetasin kahepoolse piesoelemendi ideed. Elemendid on paigaldatud selgadega vastakuti, sest element toodab elektrivoolu vaid nõngusas olekus. Teineteisega vastamisi olles ei anna elemendid mitte midagi. Näidkud fikseerivad vaid vibratsiooni ja helilaineid, elemendid aga blokeerivad teineteist ning ei tooda voolu. Kui elementide vahele panna materjal, antud hetkel kasutasin sisetalda, ja teha läbi sama tegevus, hakkab kõik tööle ning impulssid kahekordistuvad.

Astudes jalaga elementidele paindub üks element, tõstel jalga pinnast üles paindub teine element. Sellisel juhul saame topelt voolu, mis mõlema elemendi puhul on ligilähedase võimsusega.

### 5.4.5 Viies päev

Seade diodisillaga ja kondensaatoriga mahtus jalanõu sisse ning tunni vältel toimus seadmega kõndimine keskmise tempoga. Sihiga kontrollida, kas aku hakkab laadima. Olime kinnitanud, et voolutugevus on väga väike, ei suutnud ma kõndimise käigus ostsillograafil näidikuid tuvastada. Tunniajase kõndimise vältel oli nutitelefoni aku mahtuvusega 2850 mAh ühendatud powerbankiga. Seade ei hakanud laadima, power banki aku oli täiesti tühi. See tähendab, et tunniajase kõndimise tulemusel ei laadinud me akut üldse. Negatiivne tulemus on samuti tulemus.

### 5.4.6 Kokkuvõte

Tehakse kokkuvõte. Kõikide peävade mõõtmiste tulemusel tuleb välja, et keskmine piesoelemendi väljundpinge on 4 - 5 Volti näpuvajutuse ning kuni 40 Volti siseruumis jalanõuga tavalise tempoga kõndimise puhul. Piesoelement, mis on ühenduses diodisillaga annab pinget 3 Volti näpuvajutuse ning kuni 40 Volti siseruumis jalanõuga tavalise tempoga kõndimise puhul. Kõik näitajad sõltuvad vajutuse tugevusest.

Rööbiti või paraleelselt elementide ühendamine ei parandanud tulemusi, kuigi teoorias just paraleelselt ühendamine ndamine ning üheaegne vajutus peaksid pinget suurendama. Efekti saavutasin lisades igale elemendile oma diodisilla.

Kahepoolne pieso-elementi tehnoloogia suurendab impulsi pinget poole võrra, mis võimaldab meil laadida akut kaks korda kiiremini. Kahjuks on voolutugevus liiga väike ning ei võimalda akut laadida. Kondensaatori kasutamiseks tuleb kasutada suure mahtuvusega (1 Farad) kondensaatorit. Võrdlus 10 microfaradi tangi ja 100 microfaradi vahel näitas, et 100 mikrofarad kondensaator sai tühjaks aeglasemini, mis võimaldab kondensaatoril salvestada kõndimise käigus peaaegu sama voolu koguse. Seda määrab alalisvool, mis võimaldaks akut laadida kiiremini.

Kahjuks, tunni ajaga sai aku täiesti tühjaks. Voolujõud oli liiga väike ja minu eksperiment ebaõnnestus.

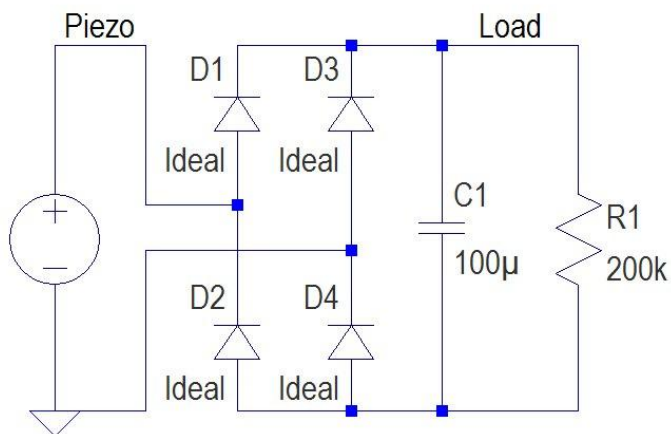
## 5.5 LT-SPICE IV

Ltspice IV on väga lihtne ja täpne töörist skeemide modelleerimiseks.

Lisainformatsiooni ja kasutusjuhendi võib leida siit:

<http://cds.linear.com/docs/en/software-and-simulation/LTspiceGettingStartedGuide.pdf>

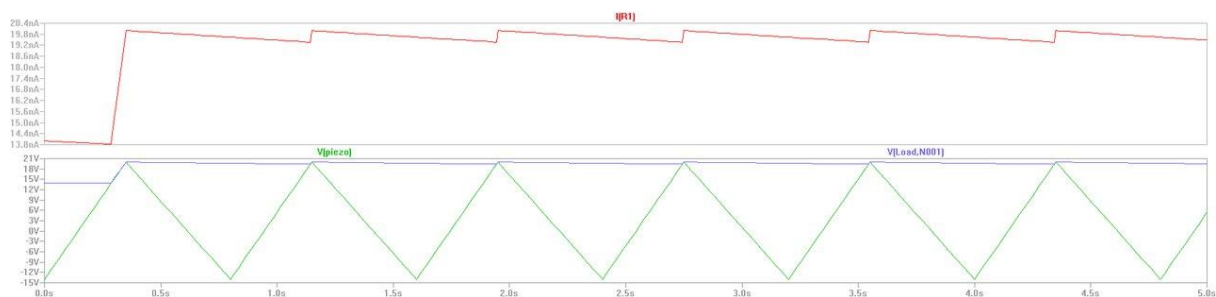
Minu poolt oli tehtud programm, et kontrollida teoreetilise väljundvoolu tugevust. Esiteks see programm võimaldab teil teha samad mõõtetulemused, mis oleksite teinud ostsillograafia. Teiseks võimaldab ta joonistada skeeme ja teeb kõike seda teoreetiliselt ilma konstruktsiooni olemasolu.



```
Piezogenerator .model Ideal D(Ron=0.2 Roff=250k Vfwd=0)
PULSE(-14 20 0 0.35 0.45 0 0.8) .tran 0 5 0 0.0001
Rser=10m
```

Sele 35. Seadme skeem koostatud LT-SPICE IV programmis

Konkreetsel skeemil on meil peiso element, diodi sild, kondensaator ja vastupanu.



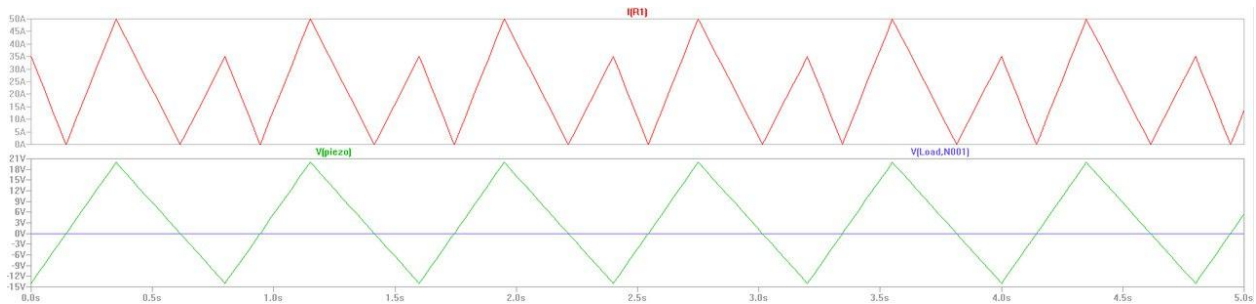
Sele 36. Voolujõudu näided

Kahjuks pole näha arve piltidel. Alumine graafika näitab väljundpinget kõndimisel.

Ühe sammu periood on 0.8 sekundit ning pinge kuni 20 V kuigi aku on suurem, 5 Volti ikkagi ei tule.

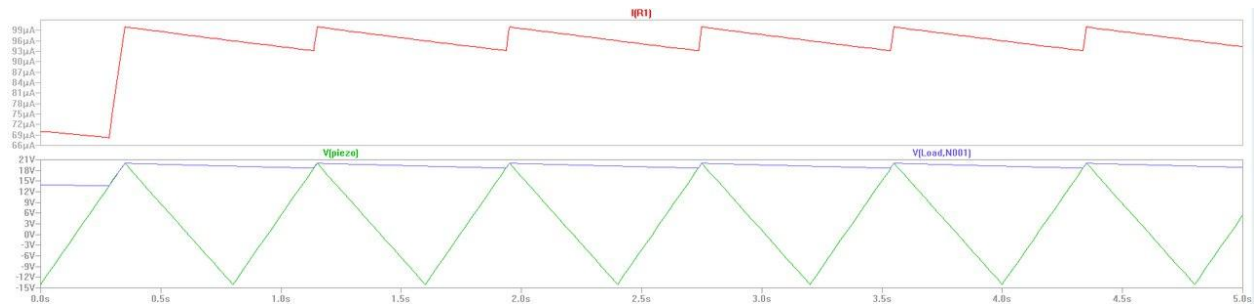
Õhu vastupanu läheneb lõpmatuseni – seda on näha ülemisel graafikul.

Sellise suure vastupanuga, voolu tugevuse element on 20 nano Amprit samal ajal kui meil oli arvutatud vajalikkus 26 milli Amprit pidevat voolu ühes tunnis.



Sele 37. Voolujõudu näided

Sellel pildil alumine graafik on täpselt samasugune. See näitab lühist. Voolu tugevus ülemisel graafikul on 50 Amprit. Selline jõud võib kahjustada laadijat.



Sele 38. Voolujõudu näided.

Sellel joonisel, takistaja on valitud nii, et voolu tugevus on kuni 100 milli Amprit. Alumine graafik jääb samaks. Sellise vooluga võib laadida meie power panga kuid ühe tunniga sellise vooluga me vaevalt saame laadida laadijat rohkem kui 1% - 1.5%

Võib järeldada, et ebaõnn praktikas sõltus halvasti uuritud ning halvasti valitud takisti tehnoloogia jaoks.

Teoreetiliselt see järeldab seda, et tehnoloogia on töötav. Edasipidi praktikaks peab valima õiged takistajad ja suurendada voolu tugevust, et saavutada paremaid tulemusi ning kiiremat laadivust.

## 6 TÖÖKÄIK JA TULEMUSED

Töökäik sisaldas:

- Uurida piesoelemnti ning sõltuvalt sellest valida sobivad seadme komponendid.
- Uurida seadme ning Power Banki kõik tehnilisi parameetreid
- Vastata teoreetiliselt efektiivsuse tõstmise küsimustele (võimalus suurendada voolutugevust, siluda voolu ning palju muud).
- Mehaaniline pool – teha täielik skeem. Saadud andmete mõõtmine.
- Realiseerimine – Seadme paigaldamine jalanõusse. Mõõtmine, tulemused.
- efektiivsuse tõstmise katsetamine.
- Saadud tulemuste kokkuvõte.
- Töö skeemide modelleerimise programmiga.

### Laboris tehtud töö käigus saadud järgnevad tulemused

- Vajutades käega piesoelemendile, keskmine voolutugevus 4 - 5 Volti.
- Kogu keha massiga vajutades (element asub jalanõus) kuni 40 Volti.
- Piesoelement, mis on ühenduses diodisillaga annab käega vajutades pinget kuni 3 Volti, keha massiga kuni 40 Volti. (Diodisilla iga jalg võtab ~ 0,7 V)
- Efektiivust saab tõsta mitme piesoelemendi kasutamisega, kui igal elemendil on enda diodisild ning surveamine toimub üheaegselt.
- Kahepoolse piesoelemendi tehnoloogia (kaks elementi, mis asetsevad sisetalla erineval pooltel, selgadega vastamisi) tõstab impulside arvu kahekorra, mis omakorda lubab laadida akut topeltkiirusel.
- Tarvilik on kondensaator väiksema mahtuvusega, sest tema tühjenemiskiirus on aeglasem.
- Akut laadida ei õnnestunud. Minupoolt kokku pandud seade osutus töökõlbmatuks.

Võib teha kokkuvõtte, et teoorias on tehnoloogia stabiilne ning omab potentsiaali. Praktiliselt osutus voolujõud liiga väikeseks, mistõttu ei õnnestunud akut laadida.



## 7 KOKKUVÕTE

Praktilise tööga saavutatud resultaate põhjal võin järeldada, et antud tehnoloogia ei ole sobilik. Võimalik, et kokku pandud skeem oli puudulik, valitud komponendid valed või midagi jäi uurimise käigus puudu. Probleemid seisnevad liiga väikeses voolutugevuses. Negatiivne tulemus on hea tulemus. Töö oli tehtud lõpuni ning arvestan selle lõpetatuks.

Töökäigus vajasin:

- Baasteadmised füüsikast ja elektroonikast.
- Mehaanika tavateadmised.
- Oskus lugeda ja joonistada skeeme.
- Teadmised ja oskused kasutada spetsiaalseid programme.
- Kasutasin projekteerimisoskusi.
- Oskus töötada skeeme projekteerivate programmidega.

Mulle meeldib minu töö, sest see pole mitte ainult teoreetiline vaid tugineb ka reaalsele katsetele. Mul õnnestus täita kõik etteseadud kriteeriumid. Lisaks projekteerisin teoreetiliselt töövõimelise seadme, mistõttu töö võib arvestada lõpetatuks. Kui võtta arvesse mõned probleemid, mis lõpuni lahendada, hakkab seade ka praktikas tööle. Kasutasin lihtsamat ning kättesaadavat lahendust, lisaks ka soodsamat, mistõttu seade saaks konkurentsivõimeline ning kõikidele soovitake taskukohane.

Tulevikus loodan antud projekti lõpuni viia.

Antud bakalauruse lõputöö oli kirjutatud Tallinna Tehnikaülikooli mehhatroonika instituudi assistendi Igor Penkov juhendamisel. Lõputöö teema oli väljamõeldud minu poolt ja lubatud minu juhendaja poolt.

## SUMMARY

I consider the results of indications of the practical part of my work unsuccessful, therefore this technology is not expedient. The incorrect scheme has perhaps been collected, improper elements are picked up or something is missed during studying. The problem has been connected with too small current. Negative result – good result. Work has been done up to the end and I consider it accomplished

During my work were essential to me:

- Basic knowledge of physics and knowledge of electronics
- Mechanics of household level.
- Ability to read and draw schemes.
- Knowledge of use of special computing programs.
- Have shown the design abilities.
- Ability to work with the program of modeling schemes

I like my work because it not only theoretical, and is based on real experiments. I managed to execute all put criteria. Also, I have designed a theoretically efficient device therefore work can be considered as successful. If to consider some problems and to polish them, then the device will be efficient also in practice. I used the simplest and available decision, and therefore the cheapest, therefore the device will be competitive in the market and can be available to anyone.

In the future I hope to realize this project.

This bachelor thesis was written at the Tallinn University of Technology, with the Institute of Mechatronics assistant Igor Penkov guidance. Thesis topic was invented by me and approved by my tutor.

## 8 KASUTATUD MATERJALID

1. [WWW] <http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/> (Veebruar 2016)
2. [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/Kondensaator> (Aprill 2016)
3. [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/Sildalaldi> (Aprill 2016)
4. [WWW] <http://www.sxemotehnika.ru/istochniki-napryazheniya.html> (Aprill 2016)
5. [WWW] <http://www.energyandcapital.com/articles/shoe-powered-phone/3502> (Mai 2016)
6. [WWW] <http://www.gizmonews.ru/2010/05/01/piezoelectric-shoe-generator/> (Veebruar 2016)
7. [WWW] <http://lifehacker.ru/2013/11/26/mozhno-li-ispolzovat-lyubuyu-zaryadku-dlya-lyubogo-gadzheta/> (Aprill 2016)
8. [WWW] [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%BE%D0%B4%D1%8C%D0%B1%D0%B0\\_%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A5%D0%BE%D0%B4%D1%8C%D0%B1%D0%B0_%D1%87%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D0%B0) (Aprill 2016)
9. [WWW] [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9\\_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D1%81%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80) (Aprill 2016)
10. [WWW] <http://abcibc.com/info-usb-connector.php> (Mai 2016)
11. [WWW] <http://www.instructables.com/id/PowerBanks-How-It-Works/> (Veebruar 2016)
12. [WWW] <http://www.dailydot.com/technology/phone-charger-shoe/> (Mai 2016)
13. [Video] Generating Electricity By Walking – Google Science Fair 2014
14. [WWW] <http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011/521/> (Mai 2016)
15. [WWW] <http://moiobzor.su/power-bank-2600-universalnoe-zaryadnoe-ustrojstvo/> (Mai 2016)
16. [WWW] <https://et.wikipedia.org/wiki/Piesoelekter> (Veebruar 2016)