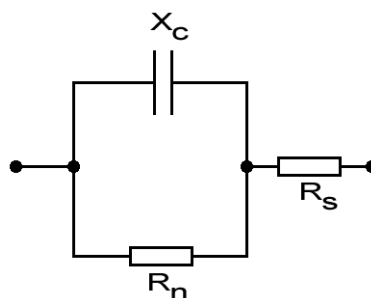


## Inimkeha elektrijuhtivuse uurimine.

Inimkeha takistus alalisele elektrivoolule on suuresti määratud naha takistusega. Kuiv nahk on üpris hea isolator, kuna nahapooride kitsuse tõttu on ionide kui keha peamiste arvestatavate laengukandjate liikumine läbi naha takistatud. Tänu nendele asjaoludele pakub nahk inimesele tõhusat kaitset alalispinge ja seeläbi tekkiva voolu kahjuliku mõju eest. Samas on nahk alati mingil määral kaetud elektrolüütidega (nt. higi), mis suuresti määravadki naha takistuse alalisvoolule. Hoopis väiksema takistusega on aga nahaalused koed, mis oma poolvedela konsistentsi ja kõrge soolasisalduse tõttu samuti toimivad elektrolüüdi lahuseana.

Nimetatud elemendid moodustavad teatud lähenduses elektrilise kondensaatori: üheks kateks (juhtiva aine kihiks) on naha pealispind, teiseks kateks nahaalused koed ja neid eraldavaks mittejuhtivaks kihiks on nahk ise. Nii saame moodustada inimkeha aseskeemi:

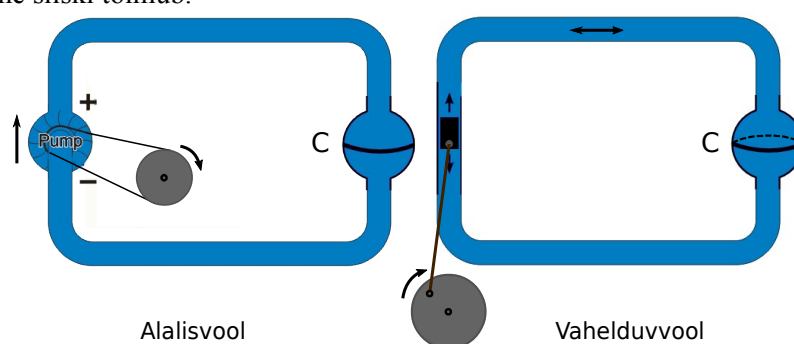


Joonis 1. Inimkeha aseskeem.

Siin on nahk kui kondensaator ühendatud rööbiti takistiga  $R_n$ , mis väljendab naha takistust alalisvoolule. Loomulikult on niisugused rööpühendused olemas mõlemal puutepinnal (nii voolu “sisenemisel” kehasse kui “väljumisel” sellest). Aseskeemis esinev rööpühendus aga esindab üheaegselt mõlemat. Naha takistust imiteeriv rööpühendus paikneb omakorda jadamisi siseelundite summaarse takistusega  $R_s$ .

Üheks kondensaatori huvitavaks omaduseks on, et kui tema takistus alalisele voolule on praktiliselt lõpmata suur (mittejuhtiv kiht on vahel), siis vahelduvvool on kondensaatorit võimeline siiski läbima. Kondensaator avaldab vahelduvvoolule küll teatavat takistust, mis on skeemil tähistatud  $X_C$ . Sellist takistust nimetatakse reaktiivtakistuseks, erinevalt „tavalise” takisti takistusest, mida nimetatakse aktiivtakistuseks. Erinevalt aktiivtakistusest ei toimu reaktiivtakistusel võimsuse eraldumist voolu läbimisel. Teiseks tuntud reaktiivtakistust omavaks elemendiks peale kondensaatori on induktiivpool.

Et mõista, kuidas vahelduvvool kondensaatorit läbib, on sobiv vaadelda tema hüdraulilist analoogi: elastse membraaniga kaheks pooleks eraldatud karpi, mille mõlemad pooled võivad mahutada teatava hulga vedelikku (vrd. laengut kondensaatori puhul). Kui pump (vooluallikas) pumpab vedelikku pidevalt ühes suunas (alalispinge), siis sisselülitamisel toimub hetkeks küll vedeliku liikumine, aga pärast membraani piisavat deformeerumist (kondensaatori laadumist), nii et tema pinge suudab pumba surve neutraliseerida, liikumine lakkab. Kui aga kolbpump pumpab vedelikku pidevalt edasi-tagasi (vahelduvpinge), siis membraankarbi olemasolu seda liikumist küll mõnevõrra takistab (kondensaatori reaktiivtakistus), aga pidev edasi-tagasi liikumine siiski toimub.



Joonis 2. Alalis- ja vahelduvvoolu ning kondensaatori hüdraulilised analoogid

Asjaolu, mis ehk sellisest seletusest kohe silma ei paista, on see, et kondensaatori reaktiivtakistus on seda väiksem, mida suurem on vahelduvvoolu sagedus. Kui me eeldaksime, et vedelik on väga kerge ning liigub torus takistusega, siis suurem sagedus tähendab kiiremat liikumist (perioodi jooksul edasi-tagasi liikuv laeng / vedelikuhulk on sagedusest sõltumata sama) ja seega suuremat voolutugevuse amplituudväärtust, mis efektiivselt tähendab väiksemat takistust. Sama efektini viib ka suurema kondensaatori mahtuvuse kasutamine, sest siis liigub iga perioodi jooksul edasi-tagasi suurem laeng, mistõttu jällegi kasvab voolutugevuse amplituudväärtus. Täpsemalt võime kondensaatori reaktiivtakistuse avaldada:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}, \quad (1)$$

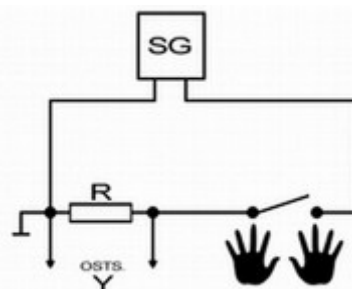
kus  $\omega$  on vahelduvvoolu ringsagedus ( $\omega = 2\pi f$ , kus  $f$  on vahelduvvoolu sagedus hertsides) ja  $C$  on kondensaatori mahtuvus. Mahtuvuse SI ühik on farad (F). Inimese keha mahtuvus on nanofaradite ( $10^{-9}$  F) suurusjärgus. Keha mahtuvusel on oluline roll paljude puuetundlike lülitite ja ekraanide toimimisel.

Uurimaks inimkeha takistuslikke omadusi, võib seega mõõta takistuse sõltuvust sagedusest. Madala sageduse äärmine piirjuht on alalisvool, millele vastab  $\omega = f = 0$  ja kondensaatori takistus on lõpmata suur. Sel juhul võib kondensaatori joonisel võrdsustada katkestusega ja me saame  $R_s$  ja  $R_n$  jadühenduse, mille takistus võrdub nende summaga. Kuna  $R_n$  on eeldatavasti palju suurem, näeme mõõtmisel põhiliselt selle väärtust. Teine äärmus on kõrgete sageduste piirjuht, kui  $X_c$  muutub teiste takistuste kõrval kaduvväikeseks ja lühistab  $R_n$ . Sel juhul on mõõdetav takistuse väärtus põhiliselt määratud siseelundite takistusega  $R_s$ .  $R_s$  loeme lihtsuse mõttes puhtalt aktiivtakistuseks.

Lihtsustusena on selles töös jäetud käsitlemata asjaolu, et reaktiivtakistusega kaasneb ka faasinihe pinge ja voolutugevuse vahel (s.o. nende ajalised maksimumid ei lange kokku), erinevalt aktiivtakistusest, mille korral pinge ja voolutugevus muutuvad alati samas taktis. Seetõttu pole näiteks korrektne liita joonisel 1 rööpühenduse eri harudest tulevaid voolutugevusi, kuna faasinihe tõttu saavutavad nad oma maksimumi erineval ajal. Eelpool mainitud piirjuhtudel (hästi madal ja hästi kõrge sagedus) on faasinihe efekt siiski minimaalne.

## Töö käik

Kõrge sageduse tõttu ei saa me käesolevas töös kasutada tavalisi elektrimõõteriistu. Pinge mõõtmiseks kasutame ostsillograafi. See on kiirete protsesside uurimiseks kasutatav seade, kus tavaliselt horisontaalsuunas liigub kiir ajalise „sahambagraafiku” järgi (perioodiliselt teatud ühtlase kiirusega vasakult paremale) ja samal ajal vertikaalselt vastavalt uuritava signaali tekitatud pingele sisendklemmidel, tekitades nii signaali ajalise graafiku. Selles töös aga on meil horisontaalne aeglahutus välja lülitatud, nii et mõõdetav ajas sinusoidaalne vahelduvpinge tekitab ekraanile vertikaalse joone, mille pikkus vastab pinge kahekordsele amplituudväärtusele. Pikkuse mõõtmiseks on ekraanil ka ühikud.

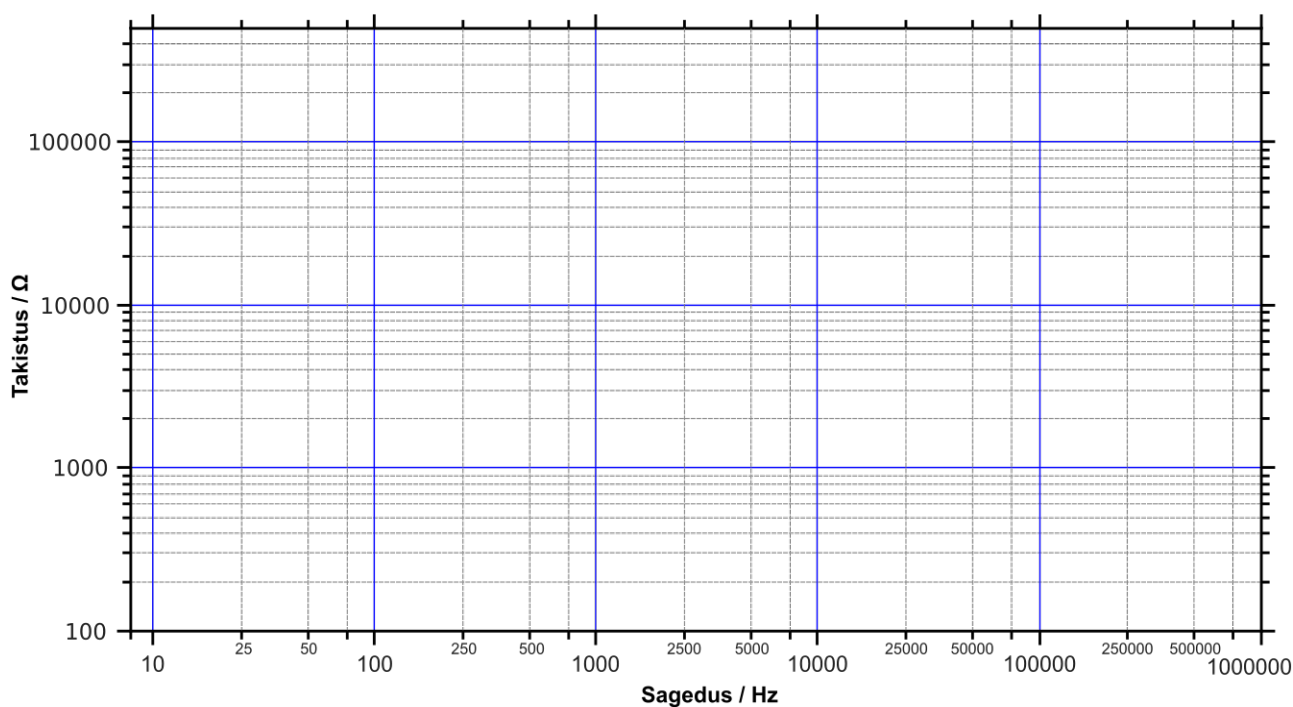


Joonis 3. Katse elektriskeem.

Joonisel 3 on katse elektriskeem. Kõigepealt tuleb fikseerida signaaligeneraatori (SG) väljundpinge (antud kontekstis peame silmas pinge amplituudväärtusi), mida näeme, kui lüliti on kinni. Kui nüüd lüliti avada ja tema klemmide vahele panna uuritava takistus (võtta klemmidest näppudega kinni), siis jaguneb SG väljundpinge uuritava takistuse ja R vahel. Kusjuures nende vahel võrdselt jaguneb ta siis, kui ka uuritava takistus ja R on võrdsed. Kuna ostsilloskoop mõõdab pinget ainult R peal, siis on sellisel juhul tekkiv vertikaaljoon esialgselt täpselt poole lühem. Niisiis oleks vaja takistussalvele keerata takistus, mille puhul see nii on, ja olemegi uuritava (keha) takistuse leidnud. Jääb ainult sama korrata erinevate SG sageduste korral.

- Keerake signaaligeneraatorile peale mõni uuritavatest sagedustest (vt. tabel). Veenduge, et takistussalve takistus erineb oluliselt nullist ( $\geq 50 \text{ k}\Omega$ ) ja täpp asub ostsilloskoobi ekraani keskel (nupud „Position”). Sulgege lüliti ja reguleerige signaaligeneraatori väljundpinget (nupp „Amplitude”) nii, et ekraanil tekkinud joon võtaks enda alla 8 ühikut ehk kogu vertikaalse skaala.
- Tegutsege paarikaupa. Katkestage lüliti ja võtke näppudega lüliti klemmidest kinni sellises asendis, mida saaksite mugavalt võimalikult muutumatult hoida mõnda aega, nii et hoidmise tugevus ja pinna suurus eriti ei muutuks ja lüliti saaks ka vahepeal sulgeda. Paariline reguleerib takistussalve nii, et joone pikkus ekraanil oleks 4 ühikut. Alustada tuleks suurematest takistuse järkedest, joone pikendamiseks tuleb takistust suurendada ja vastupidi. Fikseerige takistus tabelis. **Jälgige pidevalt, et korraka poleks kõik takistussalve nupud nulli keeratud!**
  - Kui selgub, et joont ei ole takistussalve abil võimalik 4 ühikuni keerata (keha takistus on üle  $100 \text{ k}\Omega$ ), siis keerake salvele peale maksimaalne takistus ( $100 \text{ k}\Omega$ ) ja fikseerige võimalikult täpselt joone pikkus  $L$  ekraaniühikutes. Takistuse saate arvutada valemist
 
$$R = (8 / L - 1) \cdot 100 \text{ k}\Omega.$$
- Korrake eelmist punkti kõigi tabelis olevate sagedustega. Aeg-ajalt (näiteks uue sageduspiirkonna valimisel) kontrollige üle ka signaaligeneraatori väljundpinge (punkt 1).
- Korrake mõõtmisi vahetatud rollidega, nii et kõik grupi liikmed saaksid oma takistused mõõdetud.

Sagedus Hz	Takistus $\Omega$	Sagedus Hz	Takistus $\Omega$
10		5000	
25		10k	
50		25k	
100		50k	
250		100k	
500		250k	
1000		500k	
2500			



Leiame siit kõigepealt madalaimale ja kõrgeimale mõõdetud sagedusele vastavad takistused:

$$R_m = \qquad R_k =$$

Siseelundite takistuse  $R_s$  hinnanguks sobib  $R_k$ , millest oleks korrektne lahutada signaaligeneraatori sisetakistus  $600 \Omega$  (märgitud seadmele; see tegelikult liitus pidevalt meie enda takistusele):

$$R_s = R_k - 600 \Omega =$$

Madalaimal mõõdetud sagedusel saadud takistuse  $R_m$  võime võtta  $R_s$  ja  $R_n$  summaks (+ generaatori takistus), seega lahutades sellest takistuse kõrgsagedusliku piirmäära, saame naha takistuse:

$$R_n = R_m - R_k =$$

### Keha mahtuvuse hindamine

Lisaks võime proovida hinnata ka keha mahtuvust. Selleks võiksime näiteks leida sageduse, mille korral  $X_C$  ja  $R_n$  on võrdsed. Kuna on teada, et kahe võrdse takistuse rööpühendamisel muutub takistus poole väiksemaks, on sel juhul joonise 1 rööpse osa takistus  $R_n/2$  ja kogu ahela takistus  $R_n/2 + R_s$ . Meil jääb üle veel leida graafikult sellisele takistusele (+ jällegi generaatori sisetakistus) vastav sagedus, tähistame ta näiteks  $f'$ , ja valemist (1):

$$C = \frac{1}{2\pi f' R_n} \qquad (2)$$

Leiame need:

$$\text{Otsitav takistus } R_n/2 + R_s + 600 \Omega =$$

$$\text{Vastav sagedus (tabelist või graafikult) } f' =$$

$$\text{Keha mahtuvus valemist (2): } C =$$

Siinjuures tuleb jällegi rõhutada, et sellise olukorra juures, kus  $X_C$  ja  $R_n$  on võrdsed, on maksimaalne ka kondensaatoril tekkiva voolutugevuse ja pinge vahelise faasinihke mõju, mistõttu selline mahtuvuse määramine pole väga täpne. Suurusjärguliselt peaksime saama siiski õige tulemuse.

**Lisaülesanne:** Vahelduvvoolu sagedus vooluvõrgus on 50 Hz. Hinnake oma mõõtetulemustest, kui palju (mitu korda või %) on teie kehataakistus väiksem võrgupinge suhtes, võrreldes alalispingega. Takistust alalispingel lähendage madalaimal mõõdetud sagedusel (nt. 10 Hz) saadud takistusega või võimalusel mõõtke testriga. Tabelist võetud takistuste kasutamisel lahutage neist ka signaaligeneraatori sisetakistus  $600 \Omega$ .