



# Minitrelli pöörlemissageduse regulaator

Rotational Frequency Controller of a Rotary Tool

**IEE 40 LT**

Üliõpilane: **Henri Kalmist**

Juhendaja: dotsent **Mihhail Pikkov**

Olen lõputöö kirjutanud iseseisvalt. Kõigile töös kasutatavatele teiste autorite töödele, põhimõtteliste seisukohtadele ning muudest allikatest pärinevatele andmetele on viidatud.

Autor: Henri Kalmist

Kuupäev: 08.06.2015

Allkiri: .....

## **Annotatsioon**

Bakalaureuse lõputöö „Minitrelli pöörlemissageduse regulaator“ kirjeldab impulsslaiusmodulatsiooniga pöörlemissageduse regulaatori koostamist integraallülituste ja transistoride baasil. Täpsemalt kirjeldatakse seadme disaini, ehitust ja sobivust elektrimootoriga käsitööriistal kasutamiseks.

Minitrelli pöörlemissageduse regulaator on koostatud taimeri mikroskeemide põhjal. Moduleeritud signaal saadetakse MOSFET draiverite diskreetsete elementide põhjal koostatud jõuosasse, mis põhineb H-sillal.

Töös on välja toodud skeemi valiku kriteeriumid, vaadeldud on skeemi struktuuri. Vajadusel on ka sobitatud olemasolevat skeemi valitud elektrimootori järgi. Tulemusi on kontrollitud simuleerimise teel. Pöörlemissageduse regulaatorile on loodud ka trükkplaat ja ühtlasi on koostatud ka majanduslik analüüs.

Antud töö on kirjutatud Eesti keeles.

## **Abstract**

This Bachelor's thesis „Rotational Frequency Controller of a Rotary Tool” will look in detail about a rotational frequency controller of a rotary tool, built using integral circuits and transistors. It features pulse width modulation (PWM) which is driving the integral circuits and transistors. This thesis concentrates on the tool's schematics design, construction and eligibility to work with an electrical motor.

The controller system is built upon timer microcircuits. The modulated signal is then sent to logical circuits which act as a switch and from there on to an H-Bridge which controls the rotational direction and powers the motor.

This thesis brings out the criteria upon which to choose the schematic, observes the schematics structure and is then fit to work with a chosen electrical motor. The results have been verified using computer simulations. The rotational frequency controller also has a printed circuit's design and an economical analysis.

This thesis is written in Estonian.

## Sisukord

Annotatsioon.....	3
Abstract.....	4
Sissejuhatus.....	7
1. Lühiülevaade pöörlemissageduse regulaatoritest .....	8
1.1. Lineaarne transistoride baasil pöörlemissageduse regulaator.....	8
1.2. Lineaarne operatsioonvõimendil põhinev regulaator .....	9
1.3. Taimeril põhinev regulaator .....	10
1.4. Ülesande täpsustamine tehnilise lahenduse valik .....	12
2. Seadme struktuurskeem.....	13
2.1. Seadme kontrollerskeem (CS).....	14
2.1.1. Generaator.....	14
2.1.2. Monovibraator ehk impulsivenitaja .....	15
2.1.3. Lülitus-ja juhtosa (S) .....	16
2.2. Jõuosa (PU) .....	16
2.3. Toiteosa (PS) .....	16
2.4. Mootor (L).....	16
3. Seadme elektriskeemi väljatöötamine .....	17
3.1. Taimeritel põhinev PWM regulaator.....	18
3.2. Lülitus-ja juhtosa .....	19
3.3. Jõuosa .....	20
3.4. Mootor.....	22
4. Seadme skeemi simuleerimine .....	23
4.1. Pulsilaiusmodulatsioon.....	23
4.2. Mootori-ja jõuosa simulatsioon .....	26
5. Trükkplaadi disain.....	28
6. Majanduslik ülevaade.....	35
6.1. Komponentide nimekiri .....	35
6.2. Majanduslik hinnang .....	36
Kokkuvõte .....	37
Kirjandus .....	38

## Jooniste loetelu

Joonis 1.1. Lineaarne transistoridel põhineva regulaatori skeem .....	8
Joonis 1.2. Lineaarse operatsioonvõimendil põhineva regulaatori skeem .....	9
Joonis 1.3. Taimeril põhinev regulaator .....	11
Joonis 2.1. Seadme struktuurskeem .....	13
Joonis 2.2. Alalisvoolu regulaatori väljundi muundamise meetodid: 1 – konstantse perioodiga, 2 – konstantse kestusega impulss, 3 – konstantse kestusega paus. ....	14
Joonis 2.3. Multivibraator .....	15
Joonis 2.4. Monovibraator .....	15
Joonis 3.1. Valitud tehniline lahendus .....	17
Joonis 3.2. Pöörelemissageduse regulaator taimeritel.....	18
Joonis 3.3. Loogikaelemendid    Joonis 3.4. NAND loogika .....	19
Joonis 3.5. Loogikaosa koos trigeritega .....	20
Joonis 3.6. Jõuosa .....	20
Joonis 4.1. Seadme kontrollskeemi simuleerimise osa .....	23
Joonis 4.2. PWM 5% .....	24
Joonis 4.3. PWM 25% .....	24
Joonis 4.4. PWM 50% .....	25
Joonis 4.5. PWM 75% .....	25
Joonis 4.6. Seadme lülitus-juht-ja jõuosa simuleerimise skeem .....	26
Joonis 4.7. Mootori simuleerimine PWM 50% töötsoikli korral .....	27
Joonis 5.1. Trükkplaadi disaini aluseks olev skeem .....	29
Joonis 5.2. Trükkplaadi joonise ülemine vasekiht .....	30
Joonis 5.3. Trükkplaadi joonise alumine vasekiht .....	31
Joonis 5.4. Trükkplaadi joonise vasekihi jootemask .....	32
Joonis 5.5. Trükkplaadi joonise siiditrükk .....	33
Joonis 5.6. Trükkplaadi joonise kõik kihid .....	34

## Sissejuhatus

Käesoleva bakalaureuse lõputöö eesmärgiks on teha eeltööd väikese, kerge käsitrelli ehk minitrelli loomiseks, millel oleks lihtsasti juhitav puuri/freesi pöörlemise kiirus ja reversiivsuvõimalus.

Enamik igapäevaselt kasutatavaid (soodsamaid) minitrelle on vaid sisse-väljalülitamise nupuga ja ei võimalda puuri/freesi pöörlemissagedust reguleerida. Tihtipeale on mõningate materjalide lõikamiseks/puurimiseks tarvis muuta sujuvalt ka pöörlemissagedust ja meie eesmärgiks ongi luua praktiline, kompaktne ja väheste kadudega minitrelli pöörlemissageduse regulaator, mida vastavalt soovidele on võimalik endale sobivasse korpusesse panna.

Selle lõputöö eesmärgiks on välja valitud skeemi analüütiliselt uurida, simuleerida uurimisobjektiks oleva seadme juhtskeemi tööd, töötada välja trükkplaat ja hinnata seadme loomise tasuvust. Efektiivsete alalisvoolumuundurite (DCC) loomine on toitelahenduste puhul väga oluline. Selliste muundurite abil on võimalik inseneridel luua kõrge kasuteguriga ja kõrge efektiivsusega alalisvoolutoitega elektrilisi seadmeid, kontrollida-reguleerida voolutarvet ning luua tööstuslikke seadmeid.

Töötavad elektromagnetilised protsessid erinevate alalisvoolumuundurite juures on alati teatud keerukusega. Nende konstruktsioonist ja kasutusest täielikult aru saamiseks on tarvis DCC tööpõhimõtte selgeks tegemine.

PLM (PWM) ehk impulssmodulatsioon sai valitud kiirusregulaatori loomiseks teiste võimaluste ees tänu skeemi lihtsusele ja mootori juhtimise sujuvuse võimaldamisena. Antud juhul ei oleks võimalik kasutada nõ „on-off“ lülitust ja mootori poolt arendatav moment peab olema lihtsasti kasutatav ja mugavalt juhitav. Sellist lahendust pakubki see sama valitud PWM skeem. Kuigi on olemas ka oluliselt keerulisemaid ja programmeeritavaid digitaalseid regulaatoreid, on valitud skeem siiski oluliselt lihtsam. Käsitletavas skeemis on nii digitaal-, kui ka analoogosa.

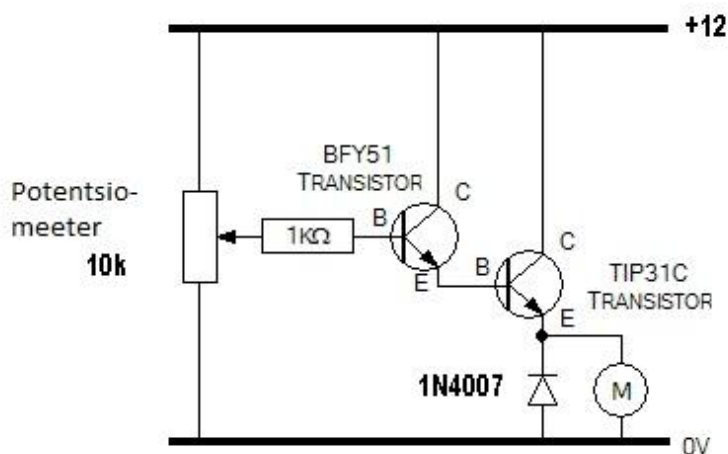
## 1. Lühiülevaade pöörlemisageduse regulaatoritest

Alalisvoolu elektrimootori pöörlemisageduse reguleerimiseks on mitmeid erinevaid võimalusi, nii lihtsamaid kui ka keerulisemaid. Alates lihtsast reostaadist, kuni tehniliselt keerukama ja programmeeritava mikrokontrollerini.

Enamasti on püstitatud ülesanne lahendatud erinevate kiirusregulaatorite koostamisega, mis juhivad elektrimootorit tüüriivat jõuosa. Antud lühiülevaates käsitleme mõningaid variante, alates lihtsast transistoridega lahendatud regulaatorist, operatsioonvõimendiga juhitud regulaatorist, kuni impulsslaiusmodulatsiooniga juhitud regulaatorini.

### 1.1. Lineaarne transistoride baasil pöörlemisageduse regulaator

Lineaarse, transistoride baasil pöörlemisageduse regulaatori skeem on teostatud joonisel 1.1. [1]



Joonis 1.1. Lineaarne transistoridel põhineva regulaatori skeem

Antud pöörlemisageduse regulaatori skeem on koostatud potentsiomeetrist, Darlington-lülitusega bipolaartransistoridest ja diodist.

Potentsiomeetriga juhitakse esimese transistori BFY51 baasivoolu, mis antud transistori avanedes ja tema kollektorivoolu suurenedes omakorda avab võimsustransistori TIP31C. Diod 1N4007 on vastuvooludiod, mis transistori sulgemisel lühistab elektrimootori mähistel indutseeritava vastupinge tõttu tekkiva voolu. Vastuvooludiod peab olema dimensioneeritud sedasi, et ta taluks samasugust voolutugevust, kui transistor oma normaalses töösüklis.

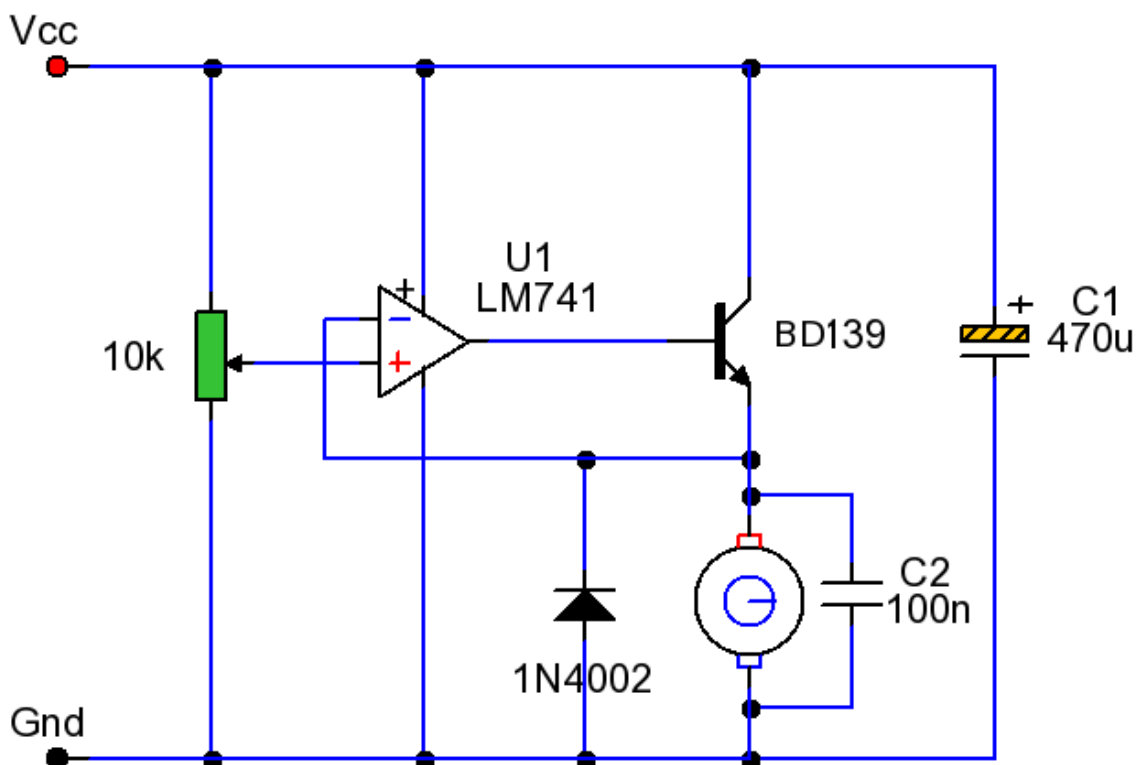
Sellise skeemi eeliseks on lihtsus, sest komponentide arv on hoitud minimaalsena, millega kaasneb ka tema väga madal hind.



Samas on skeemi negatiivseteks aspektideks viletsad juhtimisomadused (ei suuda juhtida võimsaid mootoreid – konkreetsel juhul 40W, ei ole reverseeritav), lihtne ülekoormatavus ja lühistatavus (puuduvad kaitsemehhanismid). Selline skeem on võrdlemisi suurte võimsuskadudega ja vajab korralikku jahutust (transistorid kuumenevad). Selline regulaator pole eriti efektiivne, kuna suur osa kasutatavast energiast muundub soojuseks. Isegi, kui transistorid vahetada võimsamate vastu, siis eraldub veel enam soojust ja skeem muutub oma füüsilistelt mõõtmetelt aina suuremaks.

## 1.2. Lineaarne operatsioonvõimendil põhinev regulaator

Lineaarne operatsioonvõimendil põhinev regulaator.[2]



Joonis 1.2. Lineaarse operatsioonvõimendil põhineva regulaatori skeem

Antud pöörlemisageduse regulaator on koostatud kasutades potentsiomeetrit, operatsioonvõimendit LM741, bipolaartransistori BD139, vastuvooludiod 1N4002 ja elektrolüüt-kondensaatorit C1 pingepulsatsiooni vähendamiseks ning keraamilist kondensaatorit C2.

Regulaator töötab sedasi, et potentsiomeetri abil muudetakse operatsioonvõimendi mitteinverteeriva (positiivse) sisendi pinget. Operatsioonvõimendi väljundis olev signaal avab bipolaartransistori, millega tüüritakse elektrimootori pöörlemisagedust. Selle

transistori emitterilt võetud tagasiside operatsioonvõimendi invertteerivasse (negatiivsesse) sisendisse hoiab konstantsena operatsioonvõimendi väljundpinget ja seega ka mootori pöörlemissagedust kuni ei muudeta potentsiomeetri asendit operatsioonvõimendi sisendil. Tegemist on konstantse sisendpingega mitteinvertteeriva võimendiga.

Vastuvooludiod on vajalik selleks, et elektrimootori väljalülitamisel tekkiva indutseeritud pingeimpulsi summutamiseks ehk kaitsmaks ülejäänud skeemis olevaid elektroonikakomponente lühiajalise ja toitepingest oluliselt kõrgema vastupidise pingeimpulsi eest. Induktsioonpinge tekkimisel avaneb diod, mis omakorda lühistab mootoriahela.

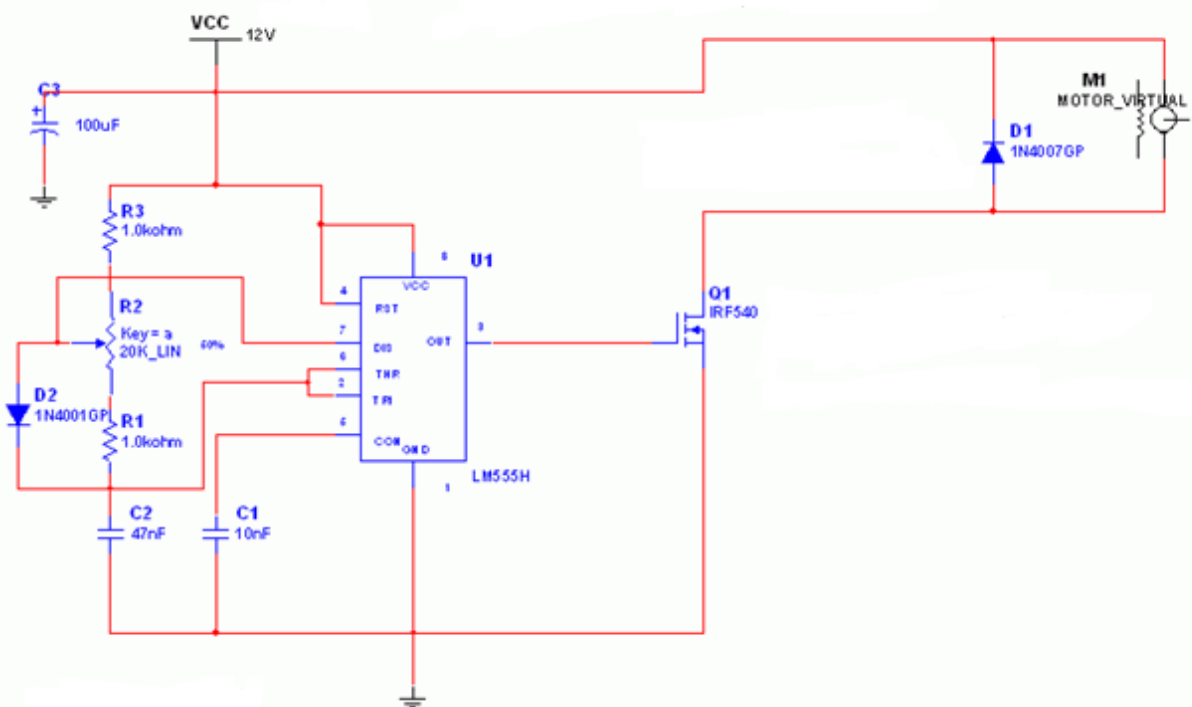
Elektrolüüt-kondensaator C1 on vajalik toitepinge silumiseks. Väiksemamahuline keraamiline kondensaator C2 lisatakse mootori klemmidele selleks, et näiteks harjadega DC mootori kasutamisel toimub harjade ja mootori kollektori vahel väikene sädelemine (sõltumata regulaatorist) ning mootoriga ühendatud toitekaabel muutub „antenniks,“ mis kiirgab sädelusest tekkivat müra (sädelahendus kui välg). Lihtsaim vahend sellisest häirest vabanemiseks ongi panna mootori klemmide vahele väike kondensaator, mis lühistab sädelemisest tuleneva mürasaaste. PWMi puhul on selline summutuskondensaator vajalik ka selleks, et transistoride avanedes tekib ka voolutõuge, millest omakorda tulenev signaal võib levida ülejäänud elektroonikaskeemi ja sama juhtub ka mootori peatamisel, kui transistor välja lülitatakse. Siis tekitab sarnast häiret mootori mähise induktiivsus. Igal juhul võib see häirida skeemi tööd.

Sellise mootori pöörlemissageduse skeemi reguleerimise eeliseks on vähene komponentide arv, mis on sealjuures ka võrdlemisi soodsad. Tegemist on ka väga lihtsalt koostatava regulaatoriga.

Samas on tema negatiivseteks omadusteks ebatäpne reguleerimisvahemik (kuigi täpsem, kui eelmises punktis mainitud regulaatoril) ja reguleerivõimekus (ei kannata suuri võimsuseid), skeemil puudub kaitse ehk keerulisemates töötingimustes võib osutuda ebausaldusväärseks. Lisaks on sellisel lahendusel oht üle kuumeneda ehk transistori läbib kogu vool ning transistor töötab seeläbi nõ rasketes oludes. See elektrimootori pöörlemissageduse regulaator pole ühtlasi ka reverseeritav.

### **1.3. Taimeril põhinev regulaator**

Tegemist on elektrimootori pöörlemissageduse reguleerimiseks loodud kaasaegsema lahendusega ehk taimeril põhineva regulaatoriga [3].



Joonis 1.3. Taimeril põhinev regulaator

Taimerile 555 on koostatud multivibraator, mille töösagedus on peaaegu konstantne (reaalses elus täitevtéguri muutumisega üheaegselt muutub veidi ka töösagedus – mida suurem sagedus, seda enam muutub). Kui potentsiomeeter on ülemises asendis ehk laadimistakistus on 1kOhm ja tühjenemistakistus on 21kOhm, siis taimeril väljundis on suhteliselt lühikesed impulsid (mis avavad transistori u 5% perioodist) ja mootor töötab aeglaselt.

Kui potentsiomeeter R2 on alumises positsioonis, siis on multivibraatori laadimistakistus 21kOhm ja tühjenemistakistus 1kOhm, siis taimeril väljundis on pikad impulsid ja transistor avaneb 95% perioodi ulatuses ehk mootori pöörlemissagedus on suur.

Kui potentsiomeeter on keskel, siis on laadimistakistus 11kOhm ja tühjenemistakistus 11kOhm, andes töösükliks 50%, mis avab transistori poole perioodi. Mootori pöörlemissagedus on keskmisel kiirusel.

Taimeril väljundpinge ja vool on piisav väljatransistori (Q1) juhtimiseks. Väljatransistori sisendmahtuvuse ümberlaadimiseks on samuti tarvis voolu, mis antud taimeril on piisav.. Ka selles skeemis on kasutusel vastuvooludiod (D1), mis vajalik elektrimootori väljalülitamisel tekkiva indutseeritud pingepulsi summutamiseks ehk kaitsmaks ülejäänud skeemis olevaid elektroonikakomponente lühiajalise ja toitepingest oluliselt kõrgema vastupidise pingepulsi eest

Sellise skeemi eelisteks on kahtlemata vähene komponentide arv, võrdlemisi soodne hind, töökindlus ka keerulisemates oludes kuna mikroskeem ise on üsna töökindel ja diskreetseid pooljuhtelemente on vähe. Transistor töötab lüliti režiimis ja seetõttu staatilised kaod on väikesed ning ülekuumenemise oht on minimaalne.

Negatiivsemate aspektidena saab välja tuua selle, et antud mootori juhtimise skeem pole reverseeritav.

#### **1.4. Ülesande täpsustamine tehnilise lahenduse valik**

Antud lõputöös valitud elektrimootori pöörlemissageduse regulaator on valitud Ungari raadiotehnika ajakirjast „Radiotechnika.“ Tegemist on tervikliku skeemiga, milles on mootori pöörlemissageduse reguleerimine, pöörlemissuuna muutmine, mootori töö peatamine ja toiteosa vastandpolaarsuskaitse.

Valitud skeemis on kasutatud kahte 555 taimerit, millest üks toimib multivibraatorina ja teine monovibraatorina. Juhtimisahelas kasutatakse loogikalülitust CD4011, milles 4 NAND elementi ühes korpuses ja triggerit CD4013, kus on kaks triggerit ühes korpuses. Mootorit tüüriiv jõuosa on koostatud H-sillana bipolaar-ja väljatransistoridel. Lisaks on skeemis toodud välja ka toiteosa.

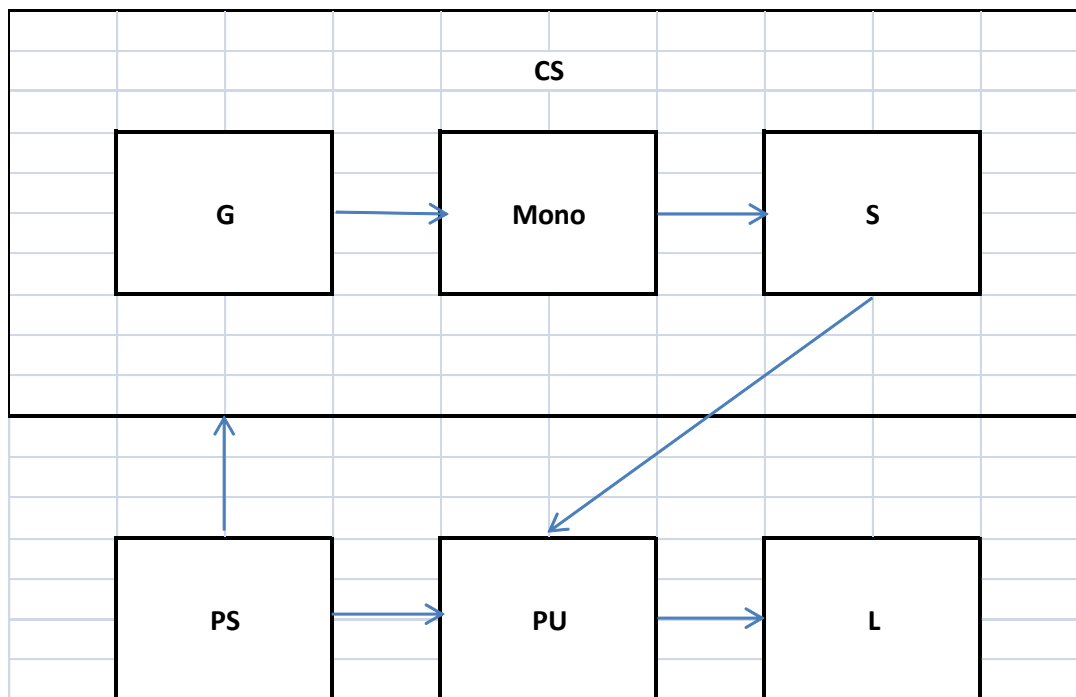
Lõputöösse valitud skeem peaks olema piisav juhtimaks valitud elektrimootorit, mille võimsuseks on 33W, tööpingeks kuni 15V ja maksimaalne voolutugevus 1,75A.

Selle regulaatorit eelisteks on stabiilselt ja järgiproovitud töötav taimeritel koostatud multi- ja monovibraatorite osa. Lihtne vastandpolaarsuskaitse. Loogikaelementidel koostatud kommutatsiooniosa võimaldab lihtsalt elektrimootori pöörlemissuunda reverseerida ja ka mootorit peatada. Loogikaelementide kasutamisel tagatakse H-silla lühistumise vältimine ehk juhtplokk ja jõuosa ei lühistu. Tegemist on ka võrdlemisi soodsate komponentidega regulaatoriga, mille alusel minitrelli koostamine ei tohiks üle võimete elektroonikahuvilistel käia. Täpsem juhtimine tagab ka parema efektiivsuse ja voolutarbe.

Samas on negatiivsemateks aspektideks, et tegemist ei ole kõige kaasaegsema lahendusega, sest tänapäeval eelistatakse tihtipeale kasutada hoopiski programmeeritavaid mikrokontrollereid. Samas võib selliste mikrokontrollerite hind olla kallim ja kasutamine vajab eelnevaid teadmisi programmeerimisest. Ühtlasi on skeemis hulk diskreetseid pooljuhtelemente (bipolaar-ja väljatransistorid), mis võivad vajada lisajahutust.

## 2. Seadme struktuurskeem

Valitud seadme skeemi lihtsustatud struktuurskeem näitab ära skeemi sisu üldiselt, kuid selline üldine kirjeldus iseloomustab kõige paremini just valitud skeemi põhimõttelisi osasid, mida selles töös vaadeldakse tervikuna.



Joonis 2.1. Seadme struktuurskeem

Regulaatori tüübi paremaks mõistmiseks on tarvis selgitada peamisi meetodeid alalisvoolu muundamiseks.

Alalisvoolu muundur (DC) oma baasolekus edastab Koormusele (L) pingepulsid, millel on pulsipikkus ( $t_i$ ) ja signaali pikk periood (T).

Juhul kui muuta Töötüklit:  $D = t_i / T$ , saab reguleerida keskmist koormuse pingeväärtust. Ühtlasi on võimalik reguleerida ka Töötüklit, muutes  $t_i$  või T parameetreid.

Põhimõtteliselt on kolm peamist meetodit sellise konversiooni tegemiseks:

Konstantne kestvusega periood.

$$T = K_1$$

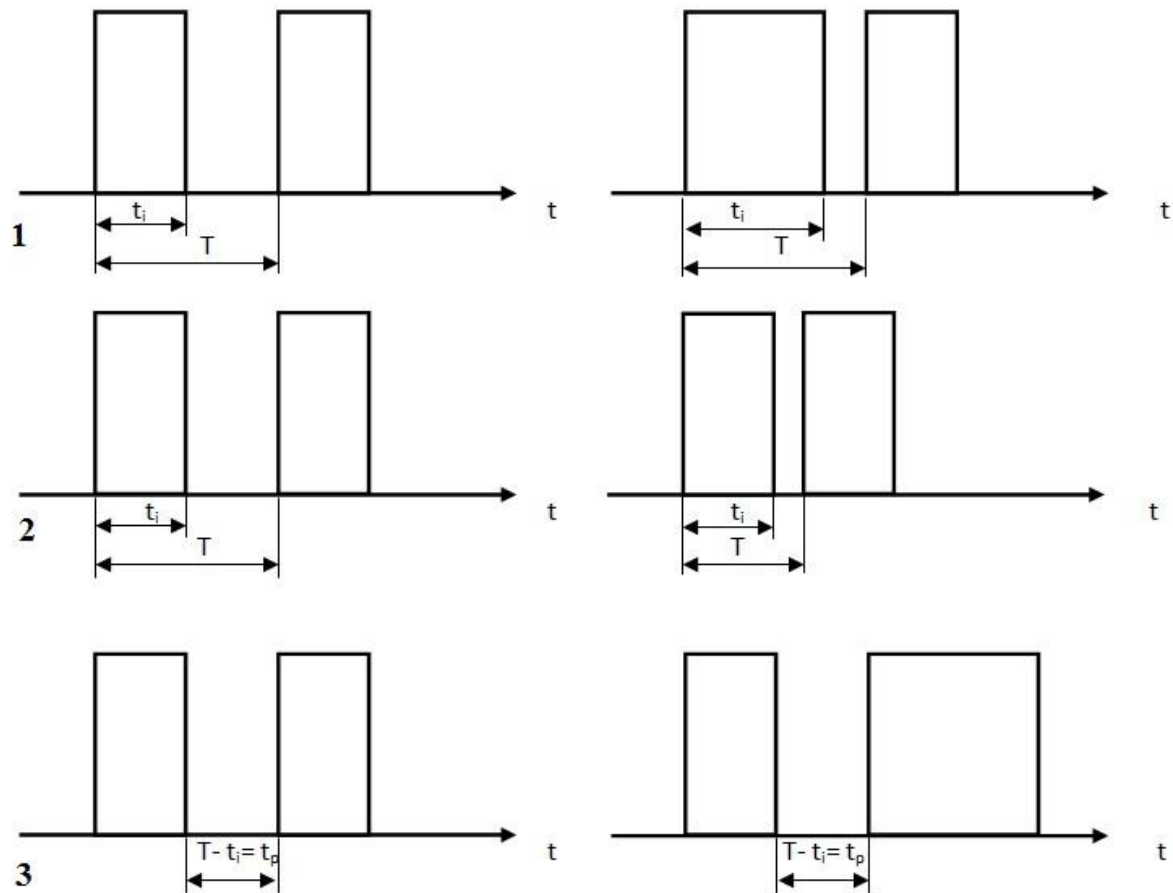
Konstantse kestvusega impulss.

$$D \times T = K_2 \text{ või } T = K_2 / D$$

Konstantse kestvusega paus.

$$(1-D) \times T = K_3 \text{ või } T = K_3 / (1-D)$$

\*\* $K_1, K_2, K_3$  – konstandid



Joonis 2.2. Alalisvoolu regulaatori väljundi muundamise meetodid: 1 – konstantse perioodiga, 2 – konstantse kestusega impulss, 3 – konstantse kestusega paus.

Meie valitud lahendus on konstantse perioodiga. Konstantse kestusega periood tähendab ka konstantset sagedust. Seega, kui tekib vajadus lisada skeemile filtreid, siis on seda teha võrdlemisi lihtne.

## 2.1. Seadme kontrollerskeem (CS)

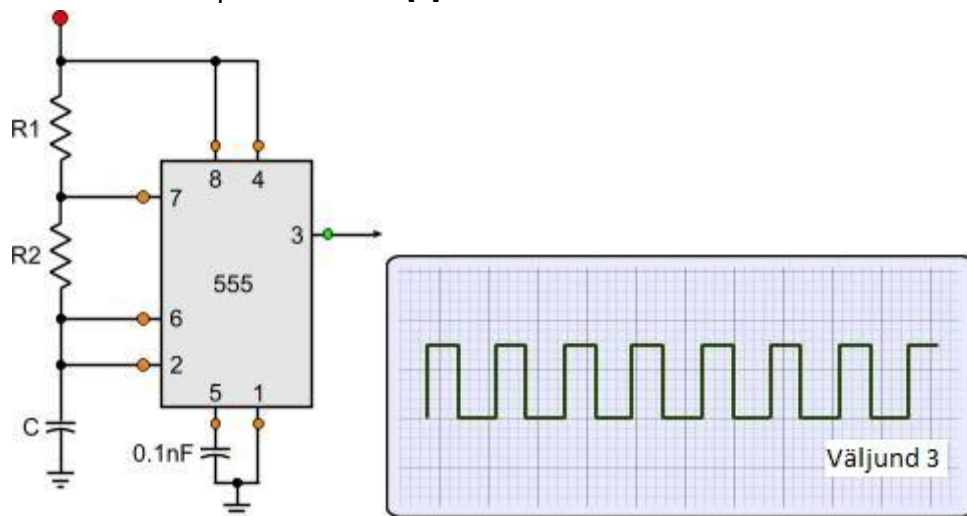
Seade koosneb 555 timer baasil koostatud generaatorist (G, multivibraator), 555 timer baasil koostatud impulsivenitajast ehk monovibraatorist (mono) ja mootori jõuosa juhtivast lülitusskeemist (S).

### 2.1.1. Generaator

Minitrelli kontrollerskeemi koostamisel on kasutatud multivibraatorit, mis toimib generaatorina. Selle aluseks on võetud timeri mikroskeem 555. Koostatud on see standardse mikroskeemi tootjapoolse soovitatud skeemilahenduse multivibraatorina, mis tähendab seda, et 555 on pandud genereerima väljundisse nelinurksignaali. Generaatori peamiseks

ülesandeks on skeemile taktimpulss, et impulsivenitajal oleks võimalik minitrelli pöörlemissagedust reguleerida.

Multivibraator 555 peale tehtuna [4]:



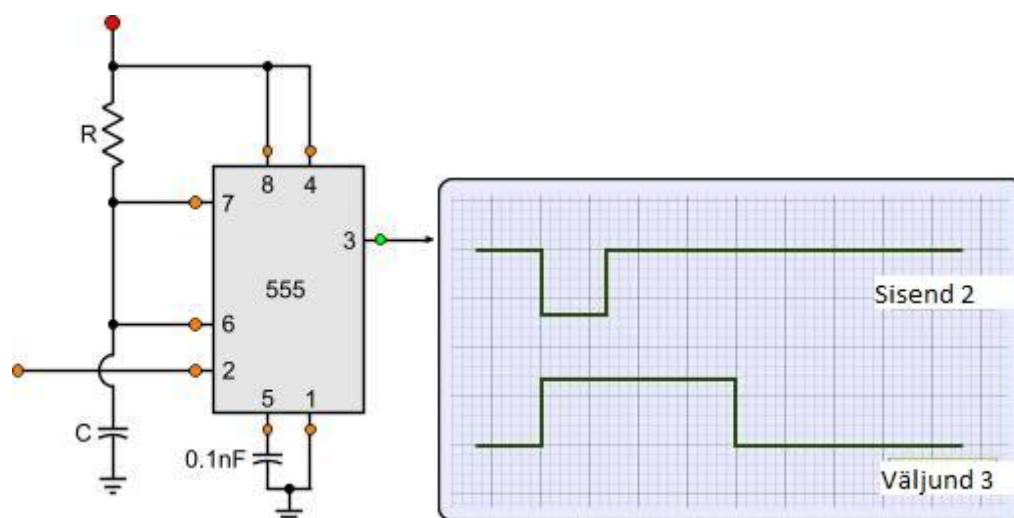
Joonis 2.3. Multivibraator

### 2.1.2. Monovibraator ehk impulsivenitaja

Impulsivenitaja, tuntud ka kui monostabiilne multivibraator, on koostatud samuti kasutades timeri mikroskeemi 555, tootjapoolse soovitatud lahendusena.

Impulsivenitaja töötab antud juhul sedasi, et tema sisendisse (nr2) antakse madala nivooga (negatiivne) impulss, siis tema väljundist (nr3) tekib kõrge (positiivne) impulss, mille pikkuse määrab skeemis olev RC ahel.

Impulsivenitaja ülesandeks on elektrimootori pöörlemissageduse reguleerimine.  
Monovibraator 555 peale tehtuna [4]:



Joonis 2.4. Monovibraator

### **2.1.3. Lülitus-ja juhtosa (S)**

Skeemi lülitus-ja juhtosa on koostatud loogikalülitusele ja trigeritele. See skeemiosa võimaldab kontrollida skeemi jõuosa (PU), selleks, et juhtida mootori pöörlemis-suunda ja välistada transistoride lühistumine üheaegse avanemise korral.

### **2.2. Jõuosa (PU)**

Skeemi jõuosa on koostatud transistorsillana bipolaarsetel transistoridel ja väljatransistoridel.

### **2.3. Toiteosa (PS)**

Vooluallikat kasutatakse primaarse ja sekundaarse alalisvoolu elektrilise energiaallika puhul. Primaarsed energiaallikad on galvaanilised elemendid, patareid (akumulaatorid), alalisvoolu elektromagnetilised generaatorid, päikese- ja kütuseelemendid jms. Toide võib olla teostatud ka toitemuundajaga 220V (või muu) elektrivarustusvõrgust.

Toiteosas on türistor  $T_i$ , mis koostöös stabilitron D5'ga hoiavad toitepinget stabiilsena ning toimivad ühtlasi ka ülepingekaitsena, mis on laialt levinud kui „crowbar“ skeem. Diod D3 ei võimalda kasutada vale polaarsusega toiteallikat.

Kui seda minitrelli kasutada tavalisest vooluvõrgust (või toimub aku laadimine ilma akut lahti ühendamata), siis võiks ideaalis lisada ka ühe 2A kaitse positiivsesse toitesisendisse enne vastupingediodi, kuid kuna tegemist on akutoitega, siis need üldiselt ei tekita ülepingeid.

### **2.4. Mootor (L)**

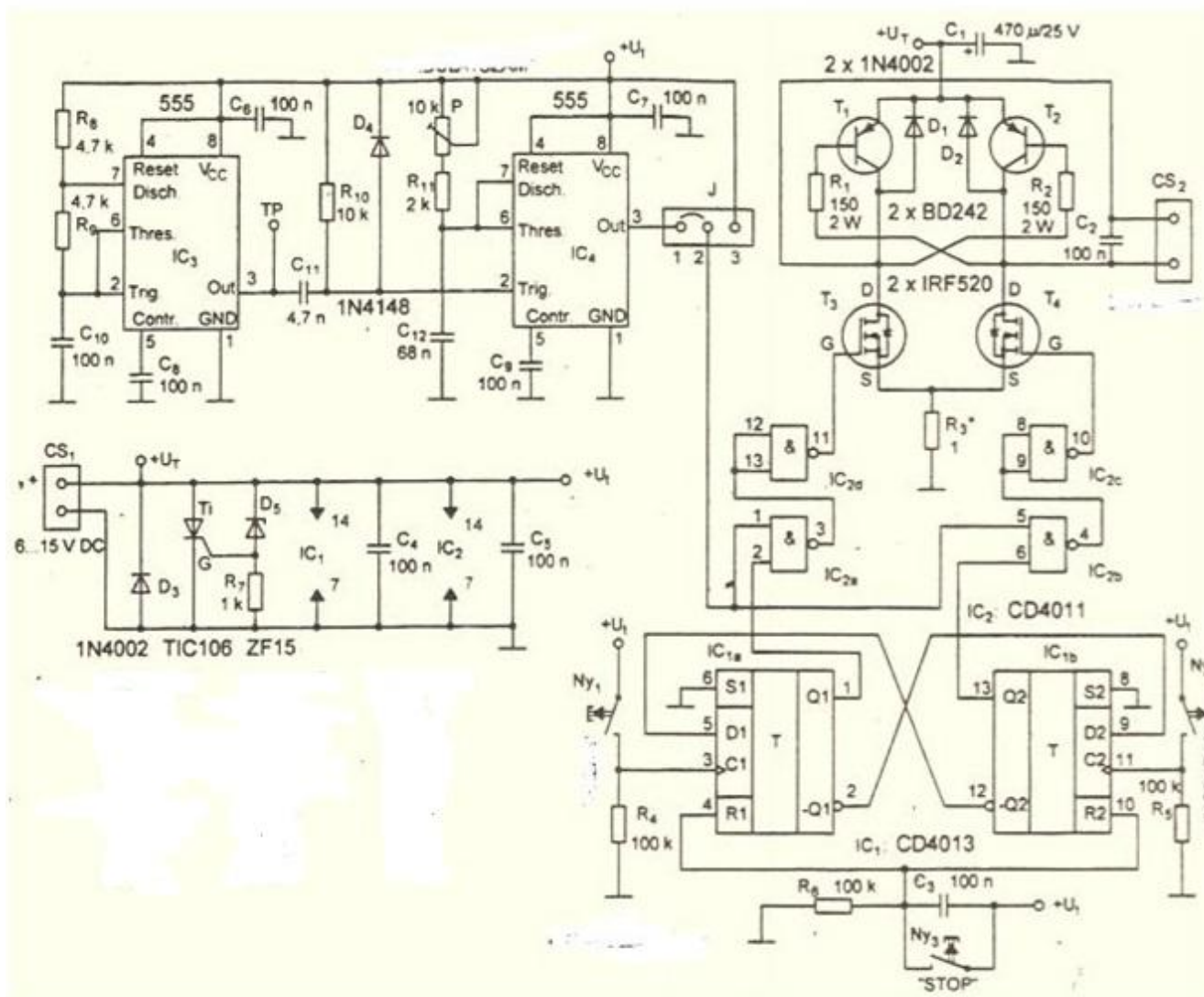
Mootoriks on valitud elektrimootor, mille nominaalpingeks on 15V ja väljundvõimsuseks 33W. Mootori maksimaalseks voolutarbeks on 1,75A.

Mootori valimisel olid oluliseks mootori suhteliselt väikesed mõõtmed (pikkus 57,2mm ja diameeter 35mm) ja kaal (310g).



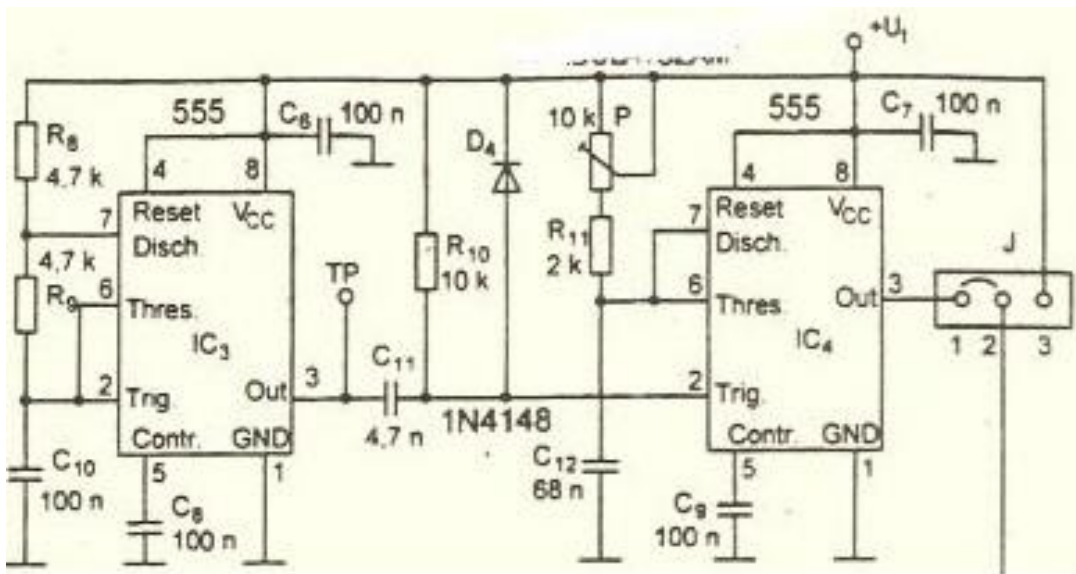
### 3. Seadme elektriskeemi väljatöötamine

Käesolevas töös on kasutatud internetist leitud ja laialdaselt levinud pulsilaiusega moduleerimise (*pulse width modulation*) skeemi [5]. Seda skeemilahendust kasutatakse peamiselt alalisvoolu elektrimootorite juhtimiseks pöörlemissageduse regulaatorina.



Joonis 3.1. Valitud tehniline lahendus

### 3.1. Taimeritel põhinev PWM regulaator



Joonis 3.2. Pöörlemissageduse regulaator taimeritel

Kontrollskeemi (CS) koostamiseks on kasutatud taimerit LM555, millele baasil on koostatud nelinurksignaali ostsillaator (mikroskeem IC3, LM555; joonis 3.2), mille poolt genereeritud nelinurksignaali edastatakse parempoolsesse taimerisse (mikroskeemi IC4, LM555; joonis 3.2), mis töötab muudetava pulsilaiusega monostabiilse multivibraatorina (impulsi venitajana). Impulsi venitaja väljundiks on muudetava laiusega nelinurksignaali impulss, mille laius pannakse paika kiiruse potentsiomeetriga P.

Ostsillaator käivitatakse skeemi pingestamisega kaasneva impulsiiga. Võnkesagedus määratakse valemiga [4]:

$$F = \frac{1}{0,67 \cdot (4700\Omega + 2 \cdot 4700\Omega) \cdot 68 \cdot 10^{-9}F} = 1058,54 \text{ Hz} \cong 1 \text{ kHz}$$

Järelikult on arvutuslikult PWM kontrollerist välja tulev signaal sagedusega ligikaudu 1 kHz.

Impulsi venitaja on koostatud nii, et kui IC4 sisendisse 2 antakse madal impulss jääb väljund 3 kõrgeks.

Monostabiilse multivibraatori tööperioodi arvutatakse järgneva valemiga [4]:

$$T = 1,1 \cdot RC \text{ (skeemis } 10k \text{ ja } 2k \text{ ja } 68 \text{ nF)}$$

$$T = 1,1 \cdot 12000\Omega \cdot 68 \cdot 10^{-9}F = 0,898ms$$

$$T = 1,1 \cdot 2000\Omega \cdot 68 \cdot 10^{-9}F = 0,150ms$$

Töotsükkel arvutatakse valemiga [4]:

$$D = \frac{T_{High}}{T_{Total}}$$

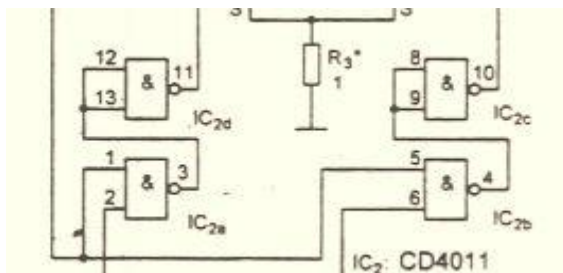
$$D_{Max} = \frac{898 \cdot 10^{-6} s}{\frac{1}{1059 Hz}} = 0,95 \rightarrow 95\%$$

$$D_{Min} = \frac{150 \cdot 10^{-6} s}{\frac{1}{1059 Hz}} = 0,158 \rightarrow 15,8\%$$

Sellest arvutusest on võimalik järeldada, et töösüklit on võimalik reguleerida vahemikus ~16% - 95%.

### 3.2. Lülitus-ja juhtosa

Pulsilaiusmodulatsiooni regulaatori väljundimpulss antakse mikroskeemil IC2, CD4011 koostatud loogikalülituse sisenditesse, mille eesmärgiks on koos mikroskeemil IC1, CD4013 koostatud triggeritega lülitada võimsuslülitit ja seeläbi muuta elektrimootori pöörlemissuunda. NAND loogikaelemendi ühel sisendil (IC2a sisendil 1, IC2b sisendil 5) madala nivoo olemasolul on tema väljundis püsivalt kõrge nivoo, mis invertteeritakse IC2d ja IC2c loogikaelementide abil. (Joonis 3.3; Joonis 3.4 [4])

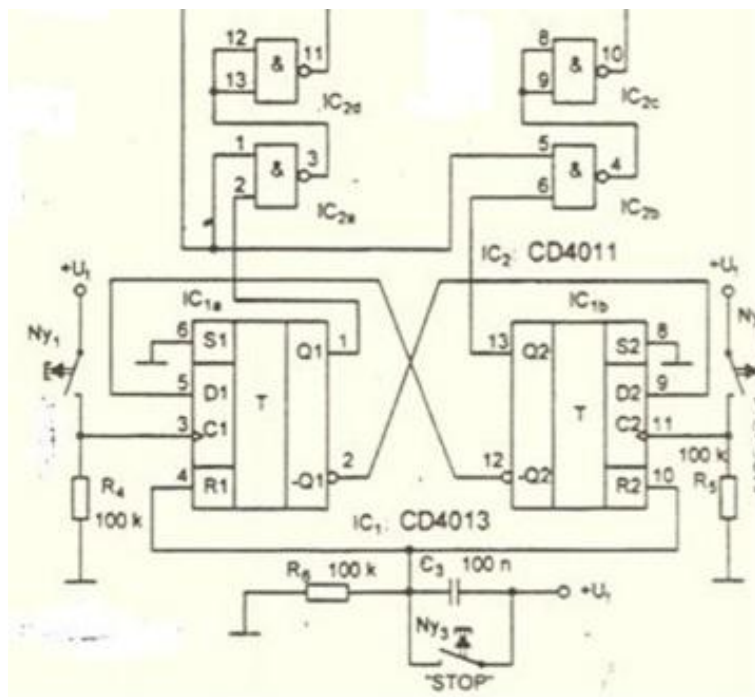


Joonis 3.3. Loogikaelemendid

NAND		
A	B	Output
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Joonis 3.4. NAND loogika

D-triger IC1, väljund Q1 läheb alati sisendi D1 olekusse ja vastavalt väljund Q2 läheb sisendi D2 olekusse. Üleminek toimub sellel hetkel kui C1 või vastavalt C2 sisendisse saabub taktimpulss, täpsemalt selle impulsi front (impulsi tõusuosa). Väljundi olek jääb ka taktimpulsi järel püsima, kuni saabub järgmine taktimpulss. Seega viivitab triger sisendisse saabuva signaali ühe sünkroniseerimistakti võrra, mida võib käsitleda ka kui 1 biti salvestamist.

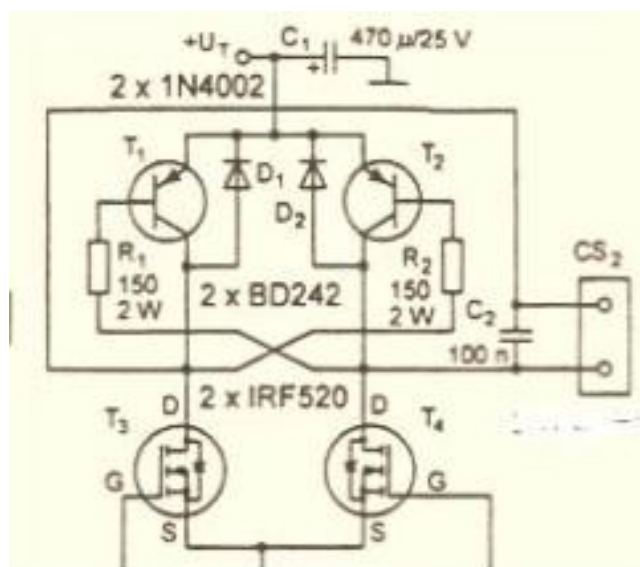


Joonis 3.5. Loogikaosa koos trigeritega

Käsitleva skeemi korral on taktimpulsside andmiseks nupud. Vastava nupuga taktimpulsi andmisel ilmub ühe trigeri vastavale väljundile kõrge tase ja vastavalt loogikaelemendi olekutabelile on väljundis 0, mis invertseeritakse olekuks 1.

Pöörlemisaju muutmiseks peab korra mootori peatama nupuga „stop.“

### 3.3. Jõuosa



Joonis 3.6. Jõuosa

Elektrimootori juhtimiseks on kasutatud võimsuslülitust H-Silla konfiguratsioonis, mis koosneb kahest n-kanaliga väljatransistorist T3 ja T4 IRF520 ja kahest pnp

bipolaartransistorist T1 ja T2 BD242. Võimsuslüüti ülesandeks konkreetses elektrimootori juhtahelas on elektrimootori kahepoolne juhtimine.

Vajutades vasakpoolsele nupule, ehk andes triggerile IC1a sisendile C1 taktimpulsi, saame väljundisse Q1 kõrge nivoo, samas ka loogikaelemendi IC2a sisendile 2 kõrge nivoo. Samaaegselt on IC2a sisendil 1 samuti kõrge nivoo, on inverteri IC2d väljundil vastavalt olekutabelile ka kõrge nivoo. Väljatransistor T3 avab transistori T2 ja elektrimootor pöörleb vasakule.

Vajutades nüüd parempoolset nuppu, anname taktimpulsi IC1b sisendile C2, saame väljundile Q2 kõrge nivoo ja IC1a väljundile Q1 ilmub madal nivoo ning loogikale IC2d väljundile ilmub madal nivoo ning transistor T2 sulgub. Loogikaelemendi IC2b sisendil 5 on kõrge nivoo ja sisendile 6 anti samuti kõrge nivoo. IC2c väljundil 10 on kõrge nivoo. Väljatransistor T4 avab transistori T1 ja elektrimootor pöörleb paremale.

Transistoride valik tehakse vastavalt kasutatavale koormusele ehk elektrimootori parameetritele.

Mootori elektrilistest parameetritest lähtuvalt on valitud ka transistorid.

IRF520 puhul said olulisteks parameetriteks  $V_{DS} = 100V$  (neelu ja lätte vaheline pinge) ja  $I_D = 9,2A$  (neelu vool). Transistori võimsustaluvus on 60W. Mõlemad parameetrid ületavad elektrimootori vastavaid näituseid ning seega on kahekordne üledimensioneerimine ilmselt piisav [6].

BD242 puhul on variatsioone erinevaid, kuid siin töös saab valitud 242C, mis on sama kollektor-emitter pingetaluvusega 100V. Kollektori pidev vool võib olla 3A.

H-Silda on valitud ka väljatransistorid seetõttu, et väljatransistore on hea juhtida loogikaelementide pingega.

### **3.4. Mootor**

Mootoriks on valitud Portescap 35NT2R32 228E.1 [7], mis on harjadega alalisvoolu elektrimootor. Tegemist on kuluefektiivse variandiga kasutamiseks kohtades, kus tehakse tihti sisse-välja lülitamist ja on tarvis pikka harjade tööiga.

Mootoril kasutatakse korpusel mittemagnetilist konstruktsiooni ja magneti südamikuks on Al-NiCo ehk alumiinium-nikkli-ja koobalti sulam. See materjal on hea, kuna selle magnetismikadu on väike ja sedasi saadakse ajas muutumatuid püsिमagneteid (nende magnetväli ajas ei vähene).

Mootorite headeks omadusteks on ka see, et tema kommutaator (otsad, kus harjadega tekitatakse mähistes magnetväli) on grafiidist ja vasest. Harjad on pikaalised ja mootor on väikese soojuseeraldusega.

Mootori valikul on mitmeid erinevaid valikuid võllipikkusele, mootoris on kasutusel ka kuullaagrid (erinevalt puksidest pikaalised).

Seda mootorit kasutatakse peamiselt käsitööriistades, meditsiinitehnikas, autoistmete asendite reguleerimises ja konveierite mikromootoritena, mis tähendab omakorda, et tegemist on kvaliteetse toodanguga.

Antud lõputöös valitud variatsiooniks on 228E, mille olulisimateks elektrilisteks omadusteks on 15V nominaalpinge ja mootori maksimaalne voolutarve 1,75A. Sellest tulenevalt on mootori maksimaalseks võimsuseks 33W. Maksimaalseks pöörlemissageduseks on 9000 pööret minutis, mis on piisav käsitrelli puhul.

Kuna tegemist on minitrelliga, mis peab olema lihtsasti käsitletav ja kompaktses korpuses, siis said olulisteks tingimusteks ka mootori suhteliselt väikesed mõõtmed (pikkus 57,2mm ja diameeter 35mm) ning kaal (310g).

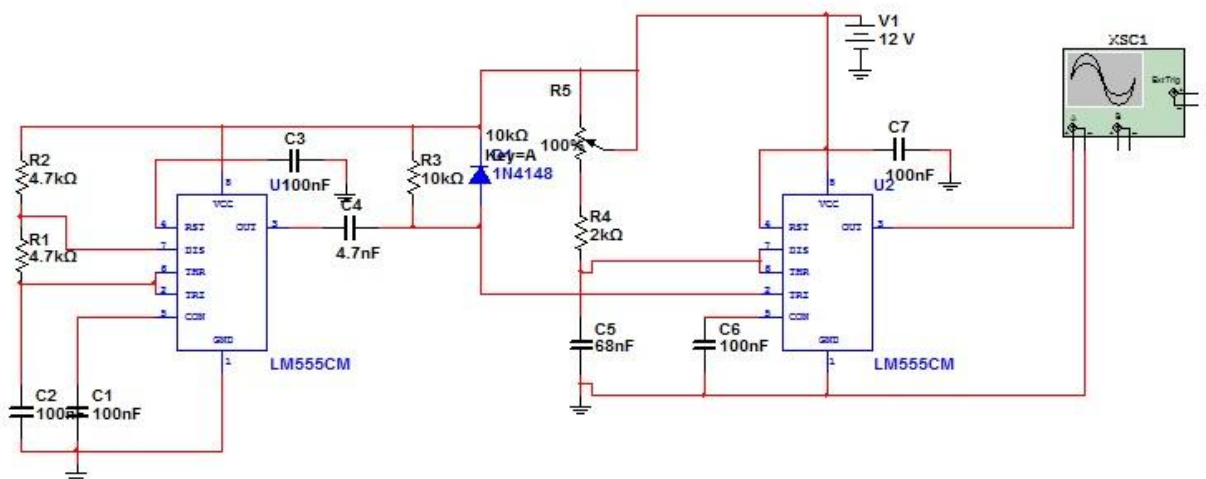
Tehaseandmetel töötab mootor temperatuuridel -55 C kuni +125 C, mis peaks enamikel juhtudel rahuldama töövajadused.

## 4. Seadme skeemi simuleerimine

Simuleerimiseks on kasutatud tarkvara **National Instruments Multisim**. Vaadeldud on erinevaid skeemi osasid ja saadi oodatud tulemusi, mis teiste sarnaste skeemide puhul on normaalselt esinevad tulemused. Selles peatükis tuuakse välja tähtsaim, mida simuleerimise teel kontrolliti.

### 4.1. Pulsilaiusmodulatsioon

Skeemi keskne „süda“ on 555 taimerite baasil koostatud pulsilaiusmodulatsiooni impulssgeneraator, mis töötab sagedusel 1,1kHz. Simulatsiooni tulemustest lähtuvalt on arvutuslikult saadud tulemus ( $f=1/T$ ) väga sarnane, mis vastab ka eelnevalt arvatule [vt pt 3.1]. Seda impulsside sagedust ja nende pikkust saab reguleerida potentsiomeetri kaudu ning selle ploki väljund edastatakse edasisse loogikaosasse, mis juhib H-silda.

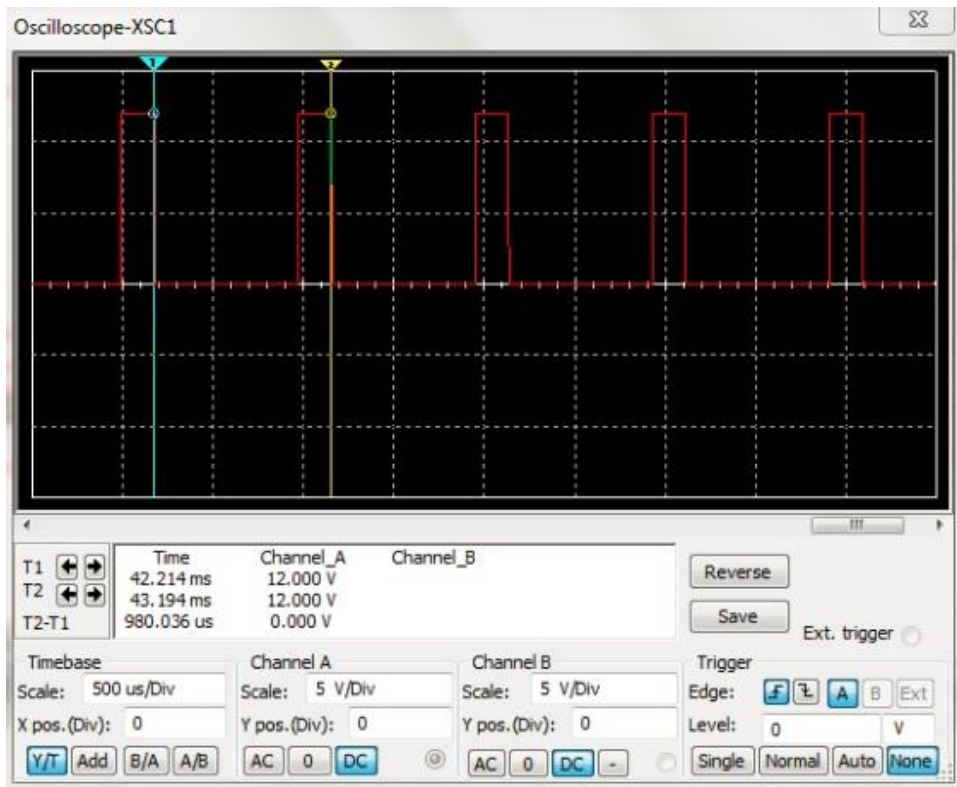


Joonis 4.1. Seadme kontrollskeemi simuleerimise osa

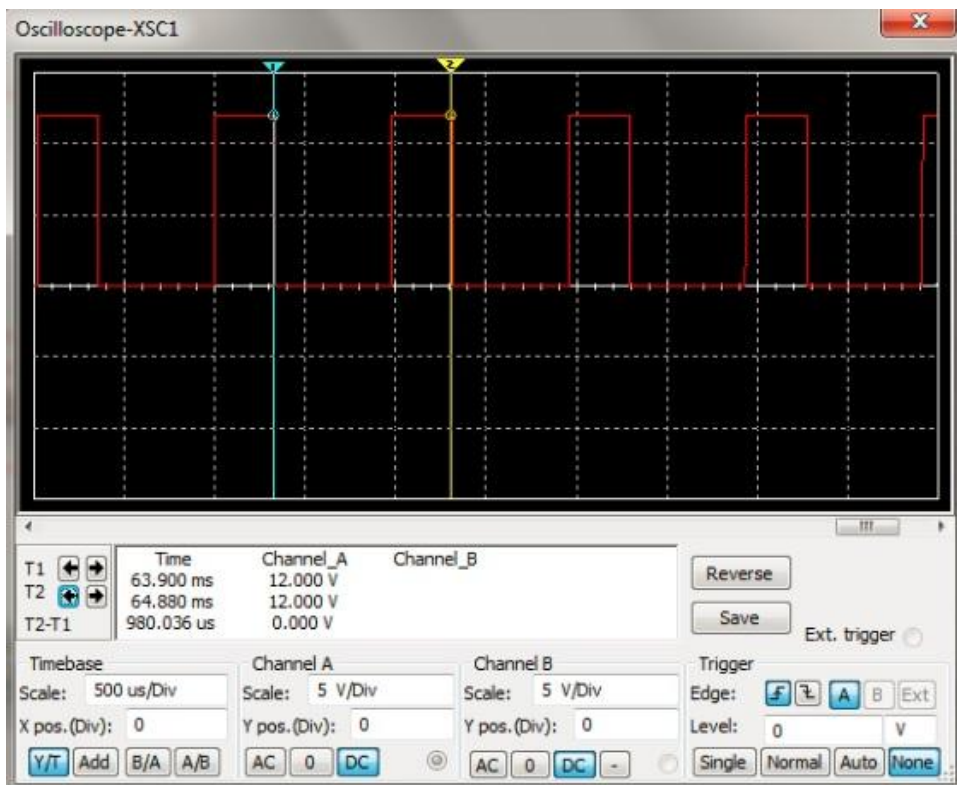
Skeemi simuleerimisel on tema töötamise ajal mõõdetud ostsilloskoobiga pulsilaiusmodulatsiooni impulssgeneraatori väljundsignaali. Seda on mõõdetud neljas erinevas etapis, vastavalt potentsiomeetri asendile ehk pulsilaiusmodulatsiooni impulssgeneraatori sisendväärtusele.

Simulatsioonitulemused vastavad ootustele ja simulatsioonide järgi on edukalt võimalik reguleerida pulsilaiusmodulatsiooni töötsüklist 5% kuni 95% ehk määrata mootori pöörlemissagedust sellistes vahemikes. Simulatsioonid annavad vaid üldise ettekujutuse ja aimduse skeemi tööst, mitte ei väljenda alati reaalse skeemi töötamist. Lõplike tulemuste saamiseks oleks tarvis ehitada valmis prototüüp ja teostada mõõtmised.



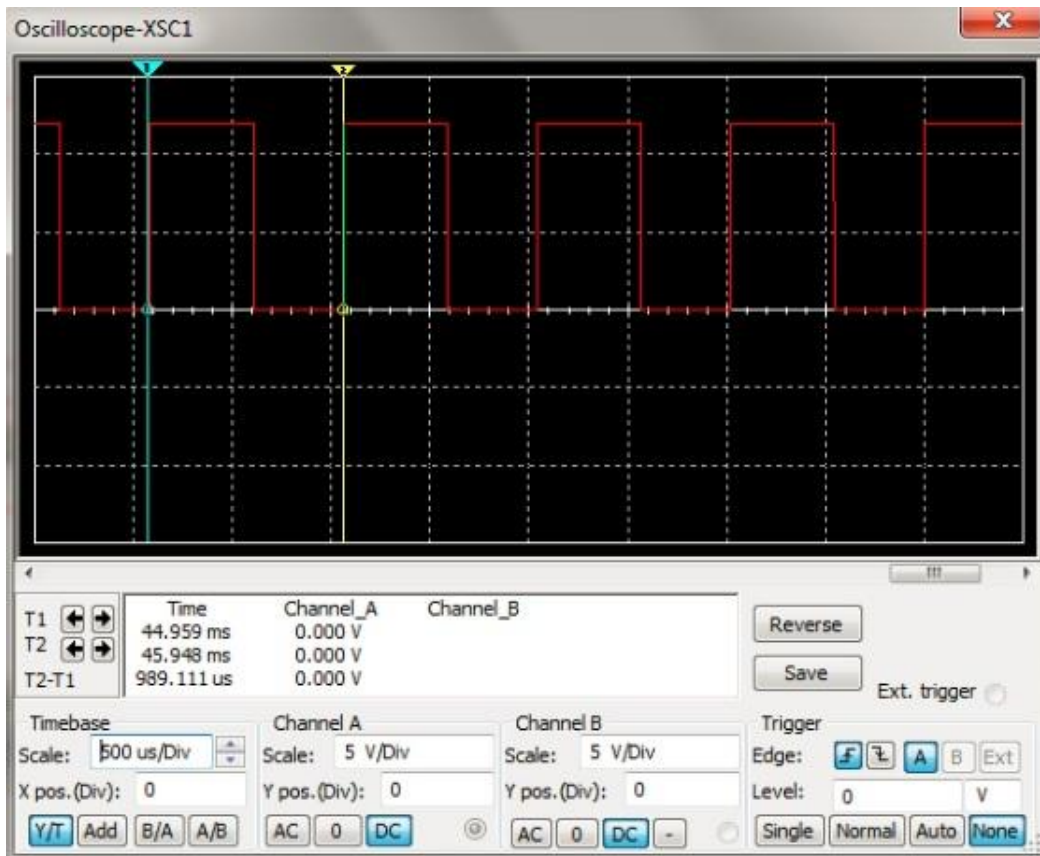


Joonis 4.2. PWM 5%

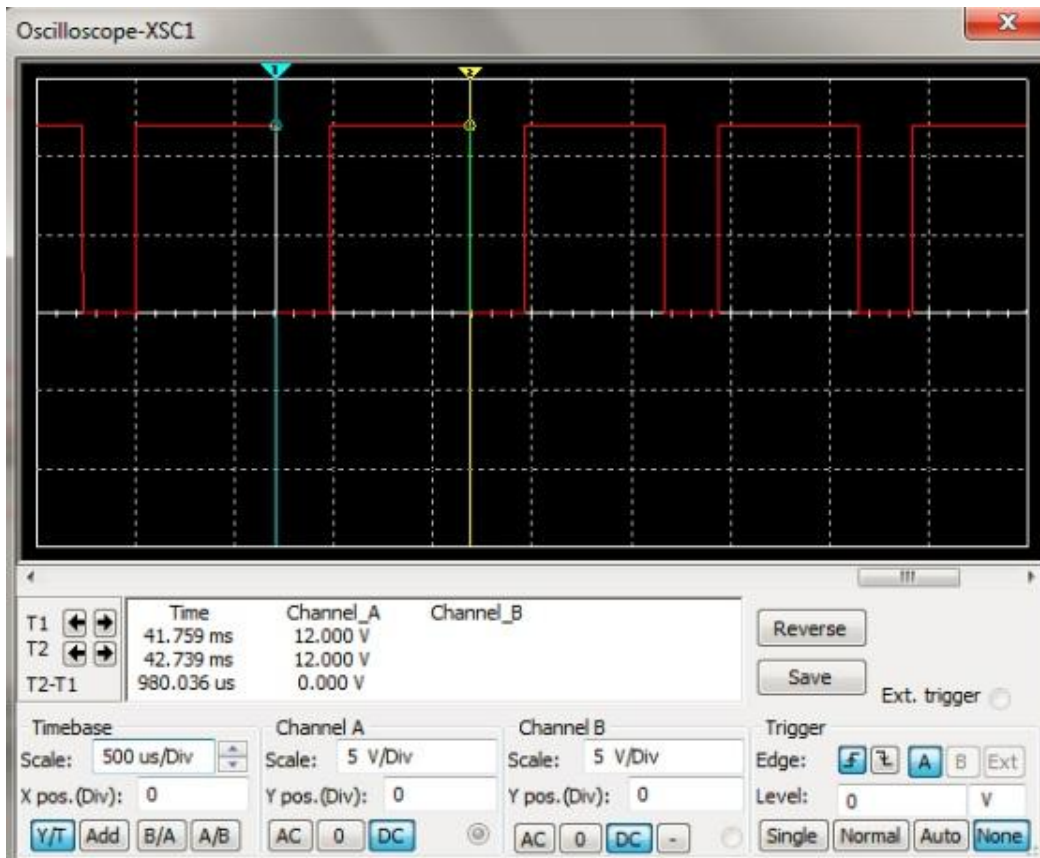


Joonis 4.3. PWM 25%





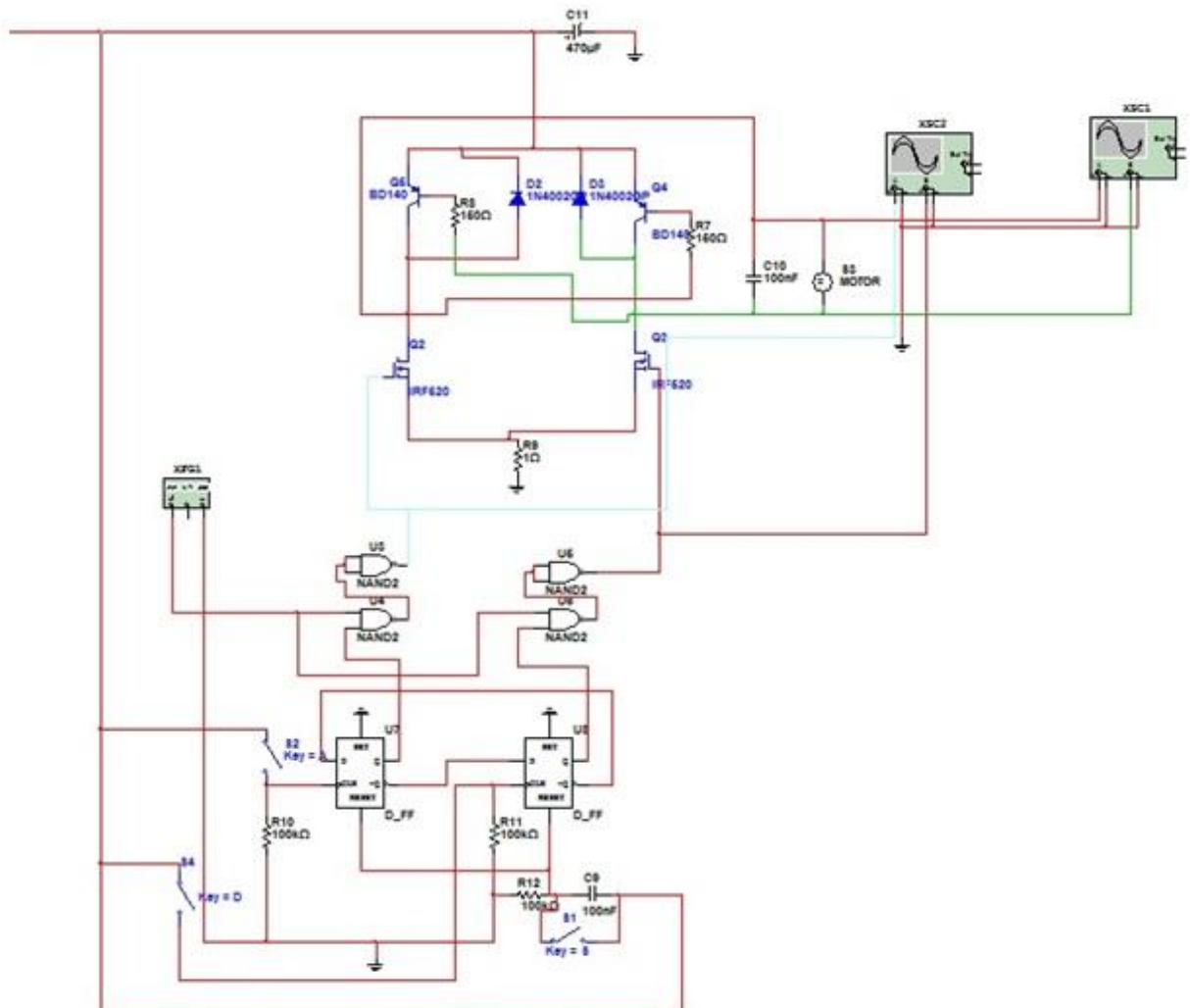
Joonis 4.4. PWM 50%



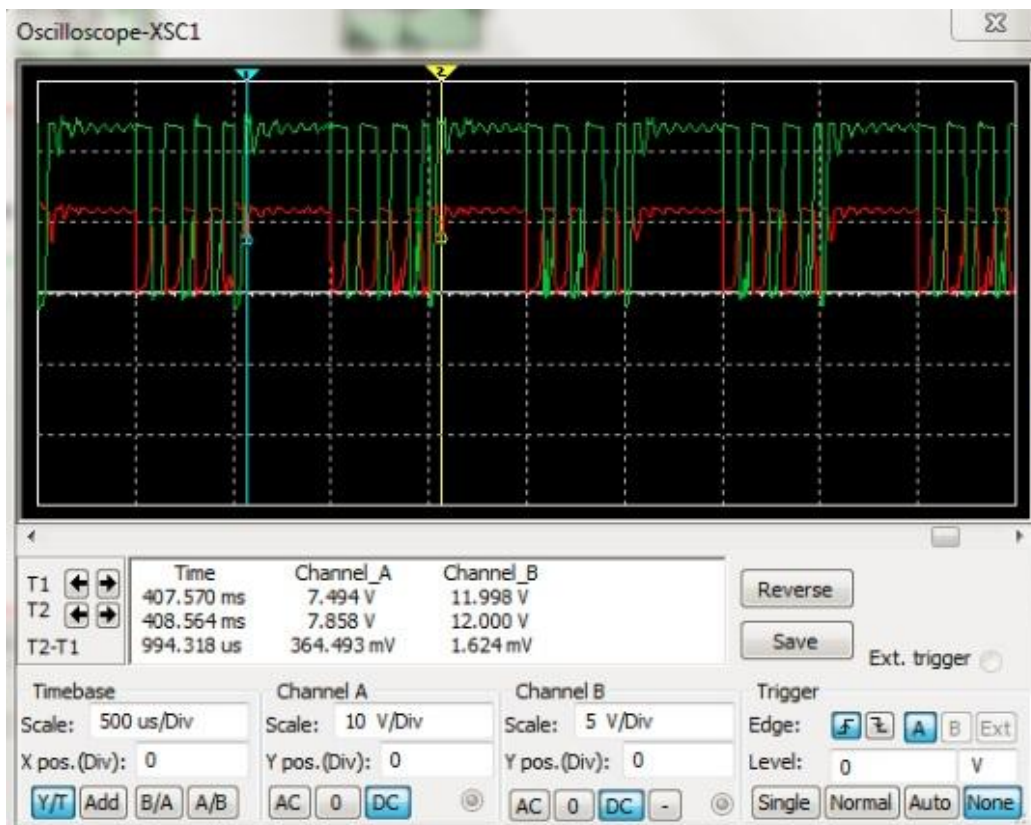
Joonis 4.5. PWM 75%

## 4.2. Mootori-ja jõuosa simulatsioon

Mootori puhul on simuleeritud H-silla ja loogikaosa tööd pulsilaiusmodulatsiooni impulssgeneraatori 50% töötsükli korral.



Joonis 4.6. Seadme lülitus-juht-ja jõuosa simuleerimise skeem



*Joonis 4.7. Mootori simuleerimine PWM 50% töötükli korral*

Mootorina on kasutusel niiõelda teoreetiline tüüpmodel, mis ei vasta reaalsele mootorile, kuna reaalsest mootorist mudel antud simuleerimistarkvara jaoks puudub. Kuna alalisvoolu elektrimootor pole alati täielikult lineaarne, siis on simuleerimisel võetud aluseks keskmine väärtus.

Simuleerimise tulemusel oli väga selgesti näha ka, kuidas mootorit on võimalik reverseerida, jälgides mootoril simulatsiooni käigus olevaid voolusid ja ostsilloskoobil nähtavaid pingeid ning nende polaarsuseid.

## 5. Trükkplaadi disain

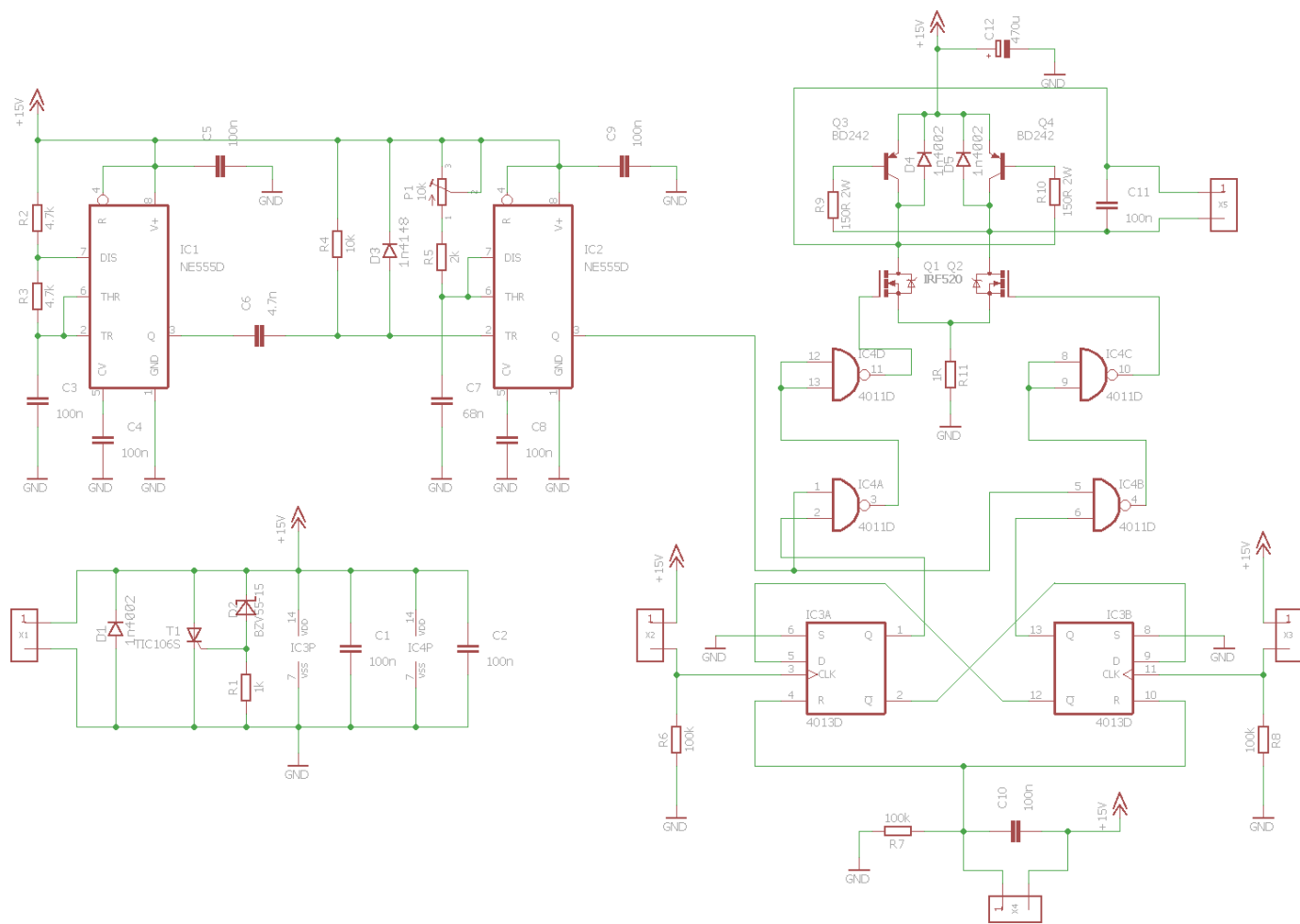
Skeemi trükkplaadi disaini loomiseks on kasutatud arvutiprogrammi **CadSoft Eagle**. Kuna minitrell peab olema kätte võttes ka mugav kasutada, võiks trükiplaat olla ristkülikukujuline ja võimalikult kompaktne. Trükkplaadi suuruseks valitud mõõdud on 30x80mm.

Arvestama peab ka sellega, et skeemi jõuosas on tegemist ka suuremate vooludega. Seega tuleb trükkplaadi radade loomisel arvestada sellega.

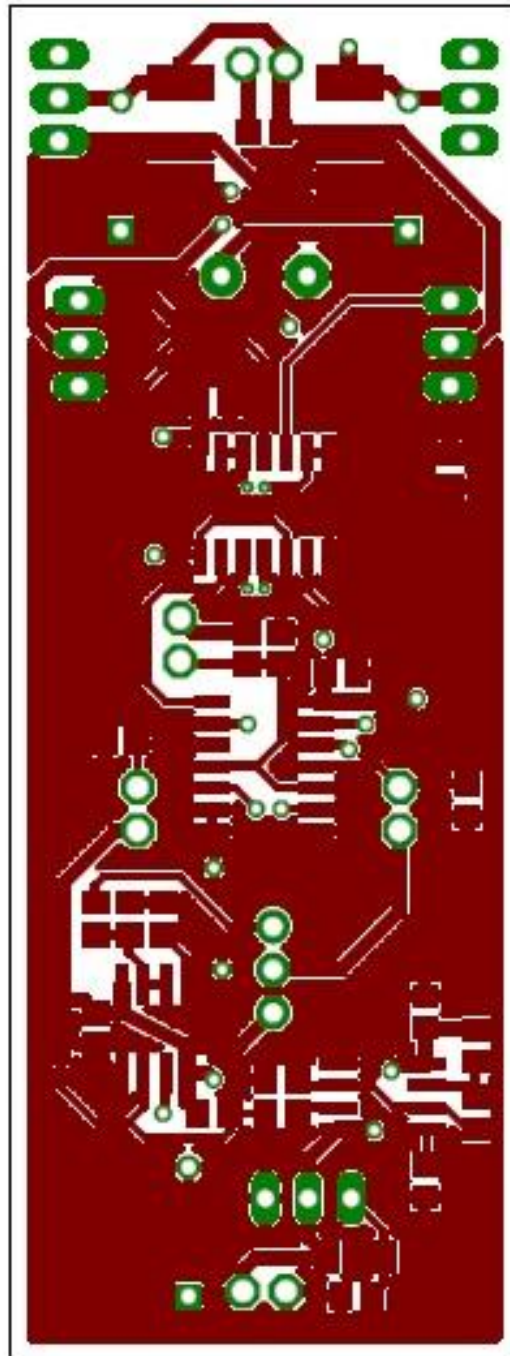
Kuna tänapäeval on väga soodne tellida masstootmisena trükkplaate. Seega sellest lähtuvalt võib olla kahepoolne, enamate kihtide kasutamiseks puudub otsene vajadus.

Kuna tegemist on prototüübiga siis seadme korpuse disain erilist tähtsust esialgu ei oma. Mootori, toiteallikad jms saab tootesse iga kasutaja ise disainida.

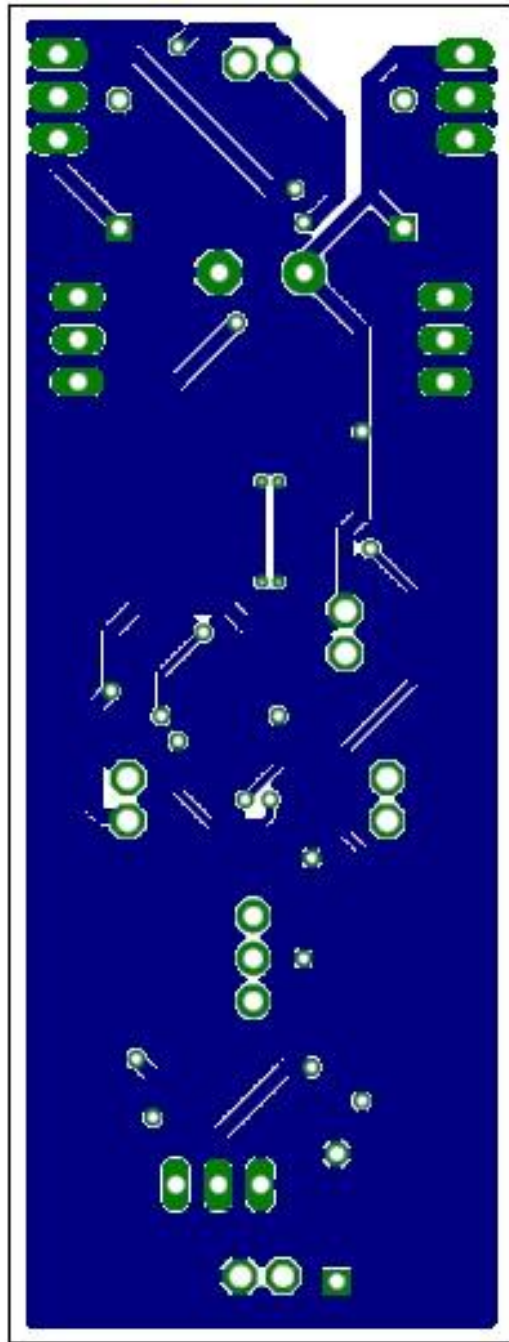
Kui seade läheb töösse, siis trükkplaat tehakse tööstuslikult valmis ja trükkplaadi lõppdisainis tuleb arvestada tootja enda reeglitega ning võimalustega (mis on minimaalne augu suurus, vahekihi kaugus plaadi servast, siiditrüki puhul – mis on kitsaim ja väikseim joon, mida masin suudab teha; mis on minimaalne aukude kaugus teistest aukudest, tavaliselt 0,3mm; minimaalne vasealade omavaheline kaugus, nt 0,2mm üksteisest vähemal tihti rajad olla ei saa). Seda tootjapoolset nimekirja tuleb järgida.



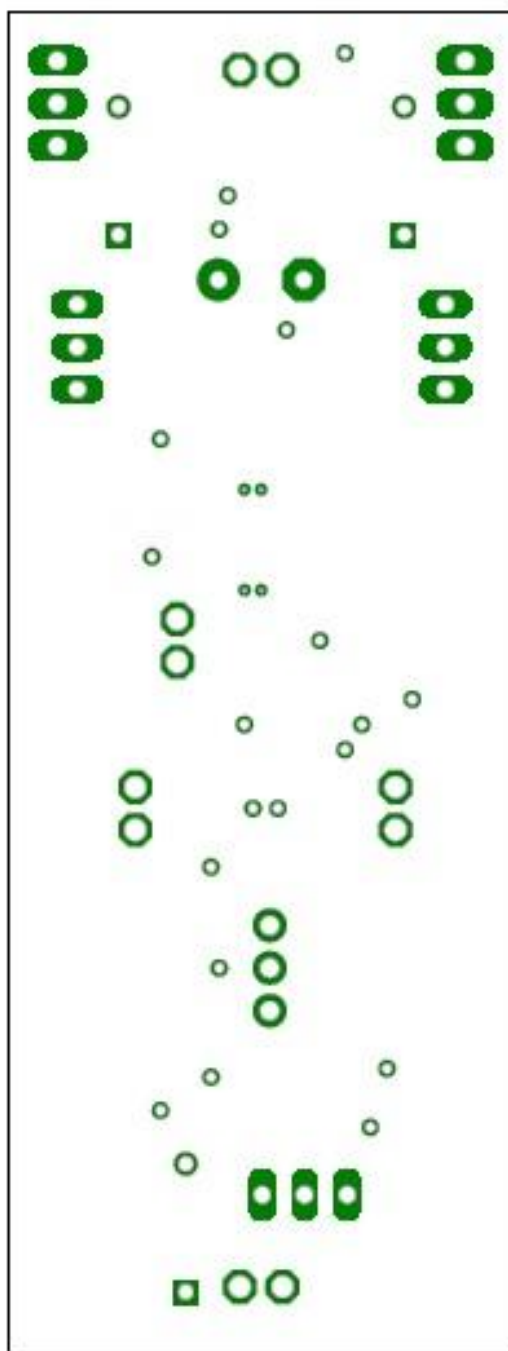
Joonis 5.1. Trükkplaadi disaini aluseks olev skeem



*Joonis 5.2. Trükkplaadi joonise ülemine vasekiht*

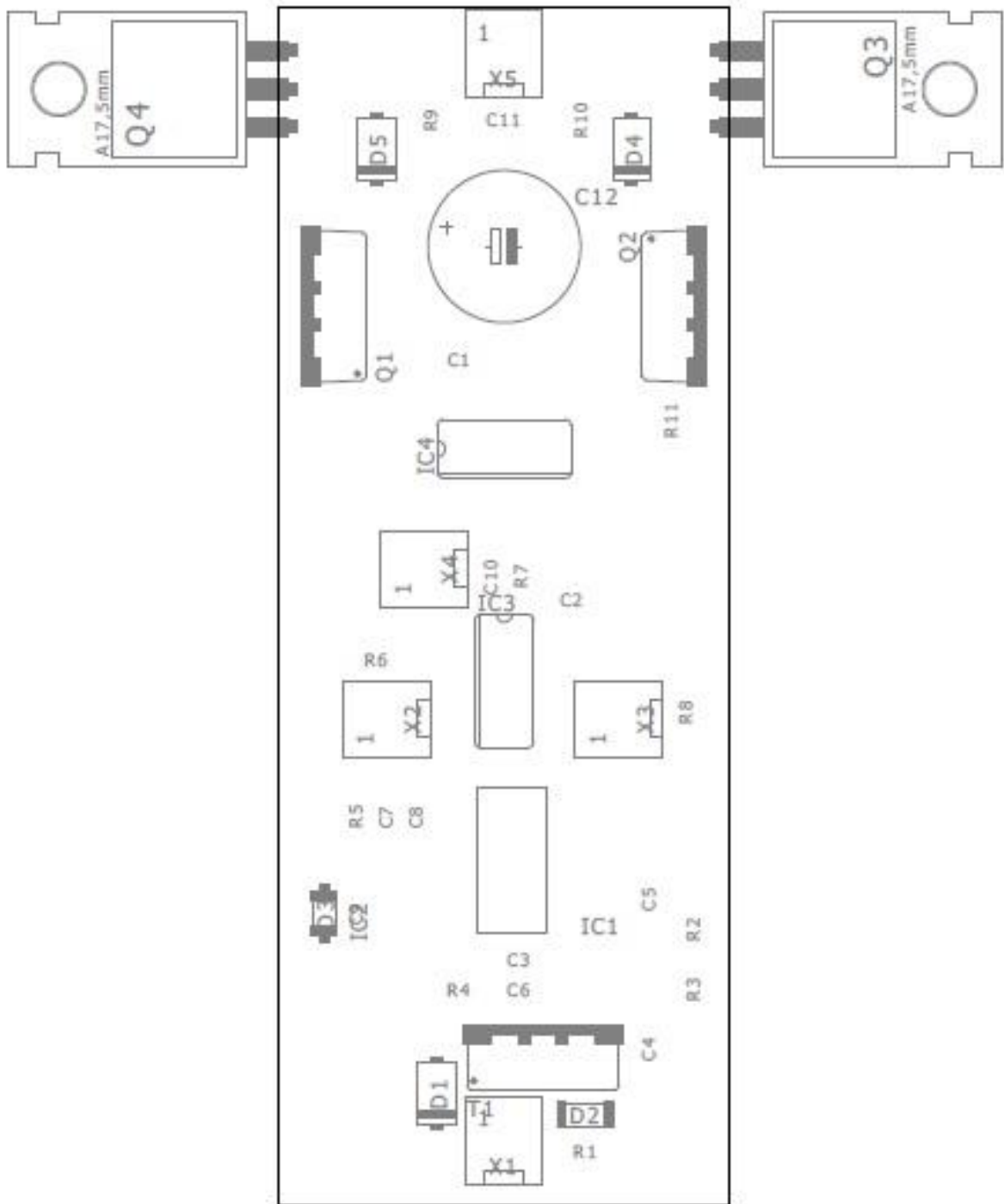


*Joonis 5.3. Trükkplaadi joonise alumine vasekiht*

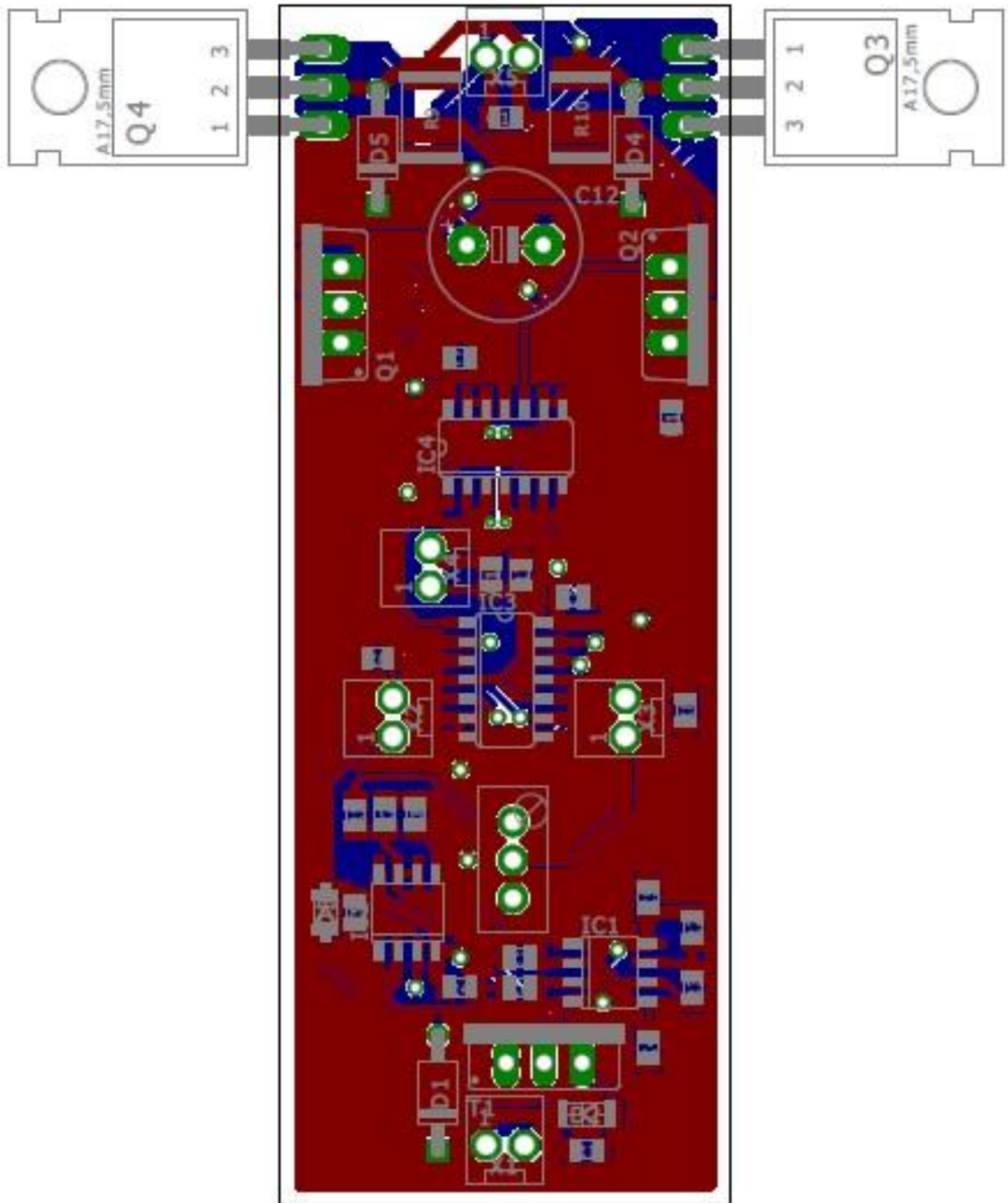


*Joonis 5.4. Trükkplaadi joonise vasekihi jootemask*





Joonis 5.5. Trükkplaadi joonise siiditrükk



Joonis 5.6. Trükkplaadi joonise kõik kihid

## 6. Majanduslik ülevaade

Majanduslikus ülevaates märgitud komponentide hinnad on võetud Farnelli kataloogist. [8]

### 6.1. Komponentide nimekiri

Tabel 6.1 Komponentide nimekiri

Viide skeemis	Väärtus	Nimetus	Korpus	Kogus	Hind	Kokku
C1-C5, C8-C11	100n	MULTICOMP, MC0805F104Z250CT	0805	9	0,0110 €	0,0990 €
C6	4.7n	MULTICOMP, MC0805B472K500CT	0805	1	0,0180 €	0,0180 €
C7	68n	MULTICOMP, MC0805B683K500CT	0805	1	0,0220 €	0,0220 €
C12	470u	RUBYCON, 25PK470MEFCCA8X11.5	8X11.5	1	0,2600 €	0,2600 €
D1, D4, D5	1n4002	DIODES INC., 1N4002-T	DO41	3	0,0290 €	0,0870 €
D2	BZV55-15	NXP, BZV55-C15	SOD80C	1	0,0410 €	0,0410 €
D3	1n4148	ON SEMICONDUCTOR, MMSD4148T1G	SOD-123	1	0,0590 €	0,0590 €
IC1-2	NE555D	TEXAS INSTRUMENTS, NE555DR	SOIC-8	2	0,1760 €	0,3520 €
IC3	4013D	TEXAS INSTRUMENTS, CD4013BE	SOIC-14	1	0,6500 €	0,6500 €
IC4	4011D	TEXAS INSTRUMENTS, CD4011UBM	SOIC-14	1	0,3500 €	0,3500 €
P1	10k	BI TECHNOLOGIES, P160KNP-0QC20B10K	16MM	1	1,9400 €	1,9400 €
Q1-2	IRF520	VISHAY SILICONIX, IRF510PBF	TO220AB	2	0,7700 €	1,5400 €
Q3-4	BD242	ON SEMICONDUCTOR, BD242CG	TO220	2	0,9100 €	1,8200 €
R1	1k	TE CONNECTIVITY, CRGH0805J1K0	0805	1	0,0170 €	0,0170 €
R2-3	4.7k	TE CONNECTIVITY, CRGH0805J4K7	0805	2	0,0170 €	0,0340 €
R4	10k	YAGEO, RC0805FR-0710KL	0805	1	0,0090 €	0,0090 €
R5	2k	BOURNS, CR0805-JW-202ELF	0805	1	0,0011 €	0,0011 €
R6-8	100k	TE CONNECTIVITY, CRGH0805J100K	0805	2	0,0016 €	0,0032 €
R9-10	150R 2W	MULTICOMP, MCHP122WF1500T4E	2512	2	0,1120 €	0,2240 €
R11	1R	YAGEO, RC0805FR-071RL	0805	1	0,0009 €	0,0009 €
T1	TIC106S	VISHAY, VS12TTS08PBF	TO220	1	4,4200 €	4,4200 €
SW1-3	MOM	TE CONNECTIVITY/ALCOSWITCH SPST	SMD	3	0,2400 €	0,7200 €
X1-5	2P	HARWIN, HEADER, SMT, VERTICAL, 2 WAY	2P	5	0,0580 €	0,2900 €
M1		MOTOR		1	30,0000 €	30,0000 €
		PCB, 5CM X 10CM		1	1,1900 €	1,1900 €
					Kokku	44,1472 €

## **6.2. Majanduslik hinnang**

Hinnad on tükihinnad minimaalse ostukoguse puhul. Välja on arvatatud ühe seadme põhikomponentide omahind. Reaalne kulu komponentide ostmiseks on suurem kuid seda pole siin välja toodud, vaid on keskendutud seadmele.

Kõikide komponentide hind on eelolevat tabelit vaadates 44,15€, millele lisandub veel minitrelli korpuse ja aku(de) ning transpordi hind. Seega võib eeldada, et prototüübi oma jõududega valmistamise hinnaks kujuneks hinnanguliselt 90€.

Konkureerivad kvaliteetsed seadmed, millel on samuti muudetav pöörlemissagedus ning reverseeritavus, maksavad 100€ ja rohkemgi, seega võiks antud bakalaureusetöös koostatud minitrell masstootmisel ka konkureerida olemasolevatega.

Kõige töömahukamaks osaks minitrelli koostamisel saaks ilmselt prototüüpimine ja korpuse ergonoomika arendus. See eeldab mitme prototüübi loomist, et määrata seadme lõppkuju, nuppude asetus ja töökindluse katsetamist. Ilmselt tuleks lasta jooniste alusel teha ka plastikust korpus, mis eeldab ka seadme raaljoonestatud (CAD-modelleeritud) jooniseid.

## Kokkuvõte

Antud bakalaureuse lõputöö aitas luua minitrelli elektroonikaosa, selle dimensioneerimise ja annab julguse ka seadme reaalseks koostamiseks. Tehtud on vajalikud arvutused ja simulatsioonid, veendumaks seadme töötamises.

Mõistmiseks, mida on sellise seadme koostamiseks tarvis teada, uuriti erinevaid viise analoogsete ülesannete lahendamiseks. Töötati läbi lihtsamad ja keerulisemad võimalused alalisvoolu elektrimootorite pöörlemissageduse reguleerimiseks ning otsustati kahe taimeriga pulsilaiusmodulatsiooni realiseeriva regulaatori kasuks.

Veendumaks valiku õigsuses, valiti konkreetne elektriskeem ja koostati sellele struktuurskeem. Sellise plokkideks jaotatud skeemi iga osa uuriti eraldi, keskendudes peamiselt regulaatori juhtmoodulile ja lülitus-ning jõuosale. Seadme toiteosale, konkreetsematele mootorivalikutele ja lõpptoote koostedisainile pöörati tähelepanu vaid põgusalt.

Veendumaks prototüübi töövõimes, tehti elektriskeemile arvutused ja kontrolliti ka simuleerimisega, et seade hakkab tööle. Simuleerimisel keskenduti regulaatori kontrollplokkist väljuvale signaalile ning mootori töötamisele keskmise pöörlemissagedusega.

Seadme reaalse valmishitamise lihtsustamiseks on koostatud ka kahepoolse trükkplaadi disain.

## Kirjandus

1. [http://images.elektroda.net/33\\_1259134096.gif](http://images.elektroda.net/33_1259134096.gif) (03.06.2015)
2. <http://www.zen22142.zen.co.uk/Circuits/Interface/motor.png> (03.06.2015)
3. [http://www.electronics-lab.com/projects/motor\\_light/005/](http://www.electronics-lab.com/projects/motor_light/005/) (03.06.2015)
4. [http://pcbheaven.com/wikipages/555\\_Theory/](http://pcbheaven.com/wikipages/555_Theory/) (03.06.2015)
5. <http://users.atw.hu/sbelectric/dokumentumok/pdf/rt2004.pdf> lk 427 (03.06.2015)
6. <http://www.vishay.com/docs/91017/91017.pdf> (03.06.2015)
7. <http://www.portescap.com/products/brush-dc-motor/35nt2r32-brush-dc-high-efficiency-electric-motor> (03.06.2015)
8. <http://ee.farnell.com/> (03.06.2015)
9. <http://www.allaboutcircuits.com/worksheets/dc-motor-control-circuits/> (03.06.2015)
10. <http://www.circuit-innovations.co.uk/555.html> (03.06.2015)
11. <http://www.allaboutcircuits.com/worksheets/timer-circuits/> (03.06.2015)
12. <http://www.mycircuits9.com/2013/04/pulse-width-modulation-pwm-555-timer-ic.html> (03.06.2015)
13. [http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width\\_modulation](http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation) (03.06.2015)
14. <http://www.irf.com/pressroom/articles/463bps0708.pdf> (03.06.2015)
15. <http://letsmakerobots.com/content/yet-another-fet-based-h-bridge> (03.06.2015)
16. <https://www.youtube.com/watch?v=iYafyPZ15g8> - H-silla seletus (03.06.2015)
17. <https://www.fairchildsemi.com/datasheets/BD/BD242B.pdf> (03.06.2015)
18. <http://www.vishay.com/docs/91017/91017.pdf> (03.06.2015)
19. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf> (03.06.2015)