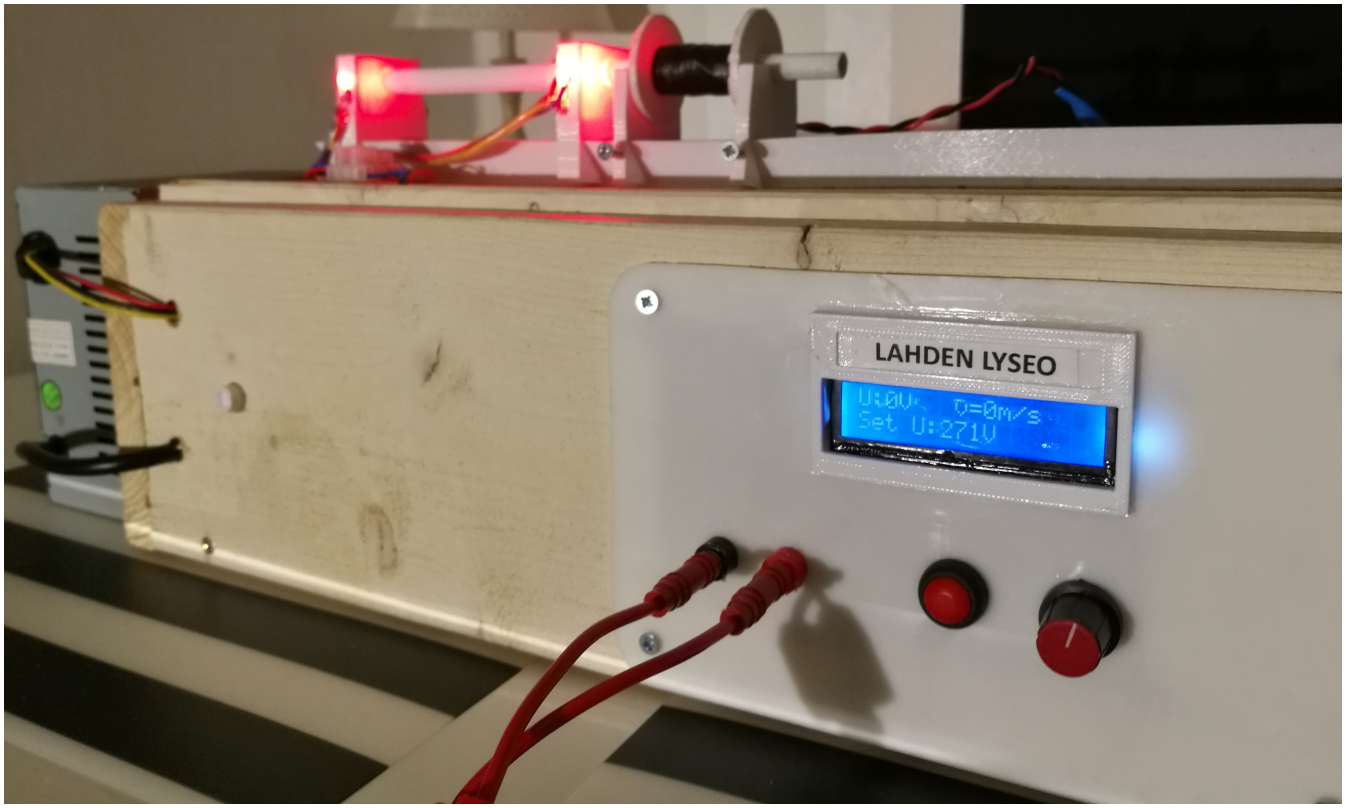
Testilaite käämitykkien hyötysuhteelle



Tekijä: Petteri Haverinen

Paikka: Oksakatu 5 (koti)

Tiivistelmä

Tämän suunnittelutyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa laitteisto, jolla voidaan tutkia sähkömagneettisten laukaisijoiden, eli käämitykkien (eng. Coilgun) hyötysuhdetta.

Laitteisto vertaa kondensaattoreihin ladattua sähköistä energiaa laukaistavan objektin kineettiseen energiaan.

Laitteisto rakennettiin jo valmiiksi varastossa olevilla osilla sekä purkukomponenteilla. Tästä johtuen on laitteistossa käytetty tavanomaisesta poikkeavia teknisiä ratkaisuja.

Työ toteutettiin seuraavissa vaiheissa:

1. Konsepti. Keksittiin idea laitteistosta ja mietittiin, onko se mahdollista toteuttaa.
2. Prototyypin rakentaminen. Laitteen piiri rakennettiin kolmeen kertaan; kerran koekytkentäalustalle ja kaksi eri versiota samalle reikälevylle.
3. Prototyypin jalostus. Prototyypin piirilevyn ja koodin siistiminen sekä aikaisempien ongelmien korjaaminen.
4. Prototyypin kotelointi ja mekaanisten osien tekeminen.
5. Toimivan viidennen prototyypin jännitteen- ja nopeudenmittaus saatiin toimimaan tarkkuudella ±0,5m/s (nopeussensori) ja ±0,5V (jännitemittari).

Raportin pituus on 22 sivua johtuen kuvien määrästä, mutta tekstiä ei ole kuin n. 3000 sanaa.

Video toimivasta laitteesta: https://www.youtube.com/watch?v=lB5vApbtVJM

II Sisällysluettelo

I TIIVISTELMÄ 2

III ALKUSANAT 4

IV TAUSTATIEDOT 4

V RESURSSIT 5

1 *Käytetyt materiaalit ja komponentit* 5
2 *Työssä käytetyt välineet* 5
3 *3D-tulostus* 5
4 *Käytetyt ohjelmat* 5
5 *Työn toteuttajat sekä työhön kulunut aika* 5

VI TOTEUTUS 6

1 *Konseptin suunnittelu ja ensimmäinen prototyyppi* 6
2 *Toinen prototyyppi* 7
3 *Kolmas prototyyppi* 9
4 *Neljäs prototyyppi* 10
5 *Viides prototyyppi* 13

VII TULOKSET 18

1 *Nopeussensorin tarkkuus* 18
2 *Jännitteenmittauksen tarkkuus* 18
3 *3D-tulostettujen osien laatu* 19
4 *Kotelo* 19
5 *Elektroniikka* 20
6 *Turvallisuus* 20

VIII ..... JOHTOPÄÄTÖKSET 20

1 *Mahdolliset parannukset nykyiseen versioon* 20
2 *Jatkokehitys* 21

IX LÄHTEET 21

X LIITTEET 22

III Alkusanat

Työn aihealue oli elektroniikka, sähkömagnetismi ja ohjelmointi. Idea projektiin tuli kiinnostuksesta tutkia sähkömagnetismia ja rakentaa mittauslaite tieteelliseen tutkimukseen. Projektin aloitin ennen kuin kuulin TuKoKe-kisasta, mutta dokumentointi ja raportti kirjoitettiin sitä varten. Haluaisin kiittää fysiikan opettajaani Tarja Vieristä, sillä ilman häntä ei projektia oltaisi viety näin pitkälle, tai raporttia siitä kirjoitettu. Hän opasti raportin kirjoittamisessa. Haluaisin myös kiittää pappaani Seppo Lemistä, sillä hän on toiminut aina suurena apuna. Hän lainasi projektia varten mm. Fluke 117 mittarin ja neuvoi häiriöiden metsästämisessä.

IV Taustatiedot

Käämitykit ovat vanhaa teknologiaa, joiden ensimmäinen prototyyppi patentoitiin vuonna 1904 norjalaisen tiedemiehen Kristian Timberlandin toimesta[1]. Käämitykkejä ollaan kehitetty siitä lähtien. Ensimmäinen täysiautomaattinen militaristisiin käyttötarkoituksiin suunniteltu käämitykki patentoitiin jo vuonna 1933. Kyseinen täysiautomaattinen käämitykki käyttää monta peräkkäistä käämiä (eli sähkömagneettia) joihin syötetään virtaa sekvenssissä ja syntynyt liikkuva magneettikenttä vetää ammusta eteenpäin[2]. Tätä käämitykkimallia kutsutaan nimellä monivaiheinen käämitykki (eng. Multistage coilgun)[3.] Tässä työssä valitsimme yksivaiheisen käämitykin sen yksinkertaisemman rakenteen vuoksi.

Käämitykkejä tutkitaan mahdollisena ratkaisuna kuorman laukaisemiseen maan kiertoradalle[4].

V Resurssit

1 Käytetyt materiaalit ja komponentit

Materiaalit olivat kahta poikkeusta lukuun ottamatta jo varastossa olevia, sekä purkukomponentteja. Poikkeukset olivat kaksi 2n5777 valotransistoria, sekä reikälevy, jotka ostettiin tätä työtä varten.

Ks. Dokumentti 5. osaluetteloa varten.

2 Työssä käytetyt välineet

Elektroniikan juottamiseen käytettiin ZD-931 juotosasemaa, 320°C lämpötilalla. Käytetty juotostina on fluksiytimistä tina-lyijylankaa. Juotostyön apuna käytettiin johtojen katkaisemiseen sivuleikkureita, smd-komponenteille tarkoitettuja pinsettejä komponenttien sekä johtojen paikallaanpitämiseen juotettaessa, sekä männällistä tinaimuria joidenkin juotosten siivoamiseen.

Ruuvien kiinnitykseen ja poraamiseen käytettiin BOSCH GSR18 akkuporakonetta, 30 osaista teräsarjaa, sekä 3mm-10mm metalliporanteriä. Metalliporanteriä käytettiin myös puulle.

Mittalaitteina käytettiin 150mm työntömittaa sekä 3m rullamittaa.

Yleismittarina vastusten, jännitteiden sekä virran mittaamiseen käytettiin SGS:än kalibroimaa Fluke 117 – yleismittaria.

Puukotelon seinien laudan sahaamiseen mittoihin käytettiin tavallista puulle tarkoitettua käsisahaa.

Lisäksi työssä käytettiin juoksevaa pikaliimaa (syano-akrylaatti pohjaista), sekä kolmen minuutin 2-komponentti epoksiliimaa (syano-akrylaatti pohjaista).

3 3D-tulostus

Työssä käytettiin muoviosien valmistamiseen kiinalaista prusa i3-klooni 3D-tulostinta. Tulostuspään lämpötila oli 200°C ja tulostusalustan 60°C. Tulostusalusta oltiin peitetty maalarinteipillä. Tulostusnopeus oli 60mm/s ja tulostuspään liikkumisnopeus (travel speed) 120mm/s. Tulostuskorkeus kaikille osille oli 0.3mm. Tulostusmateriaalina käytettiin PLA-muovia sen tulostusominaisuuksien vuoksi.

4 Käytetyt ohjelmat

3D-tulostettujen osien suunnittelemiseen käytettiin Fusion 360- nimistä CAD-ohjelmaa. G-koodin generoimiseen käytettiin Cura-nimistä ohjelmaa (versio 2.5.0). Kytkentäkaavioiden tekemiseen käytettiin EasyEDA-nimistä elektroniikan suunnitteluohjelmaa. Kuvaajan piirtämiseen ja kalibroinnissa käytetyn mittausdatan taltioimisen käytettiin LoggerPro-ohjelmaa.

5 Työn toteuttajat sekä työhön kulunut aika

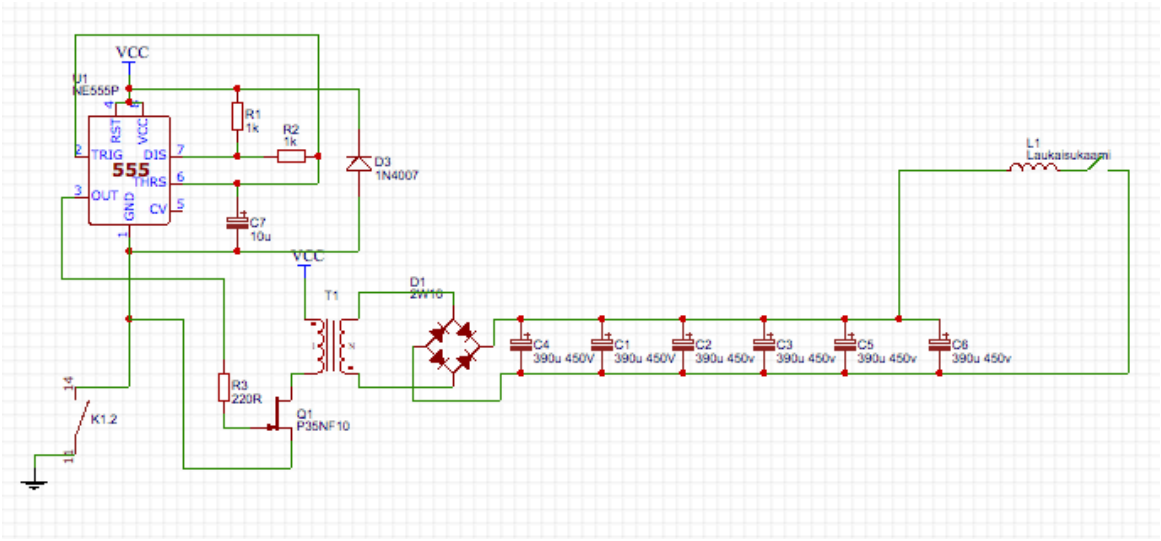
Työn suunnittelun, ideoinnin, ohjelmoinnin, kehityksen sekä raportin kirjoittamisen hoiti Petteri Haverinen. Työ toteutettiin neljän kuukauden sisällä, joista aktiivisia työtunteja oli n. 100. Työtilana toimi raportin kirjoittajan huone. Työ tehtiin omatoimisesti ilman opettajan ohjausta.

VI Toteutus

1 Konseptin suunnittelu ja ensimmäinen prototyyppi

Konsepti tuli halusta tutkia sähkömagneettisten kiihdyttimien, eli käämitykkien energiatehokkuutta. Tutkimuksen suorittamiseen tarvitaan laitteistoa, jolla voidaan mitata tunnetun massaisen ammuksen nopeus ja käämiin purettu energia. Tämän jälkeen aloitettiin suunnittelemaan ensimmäistä prototyyppiä.

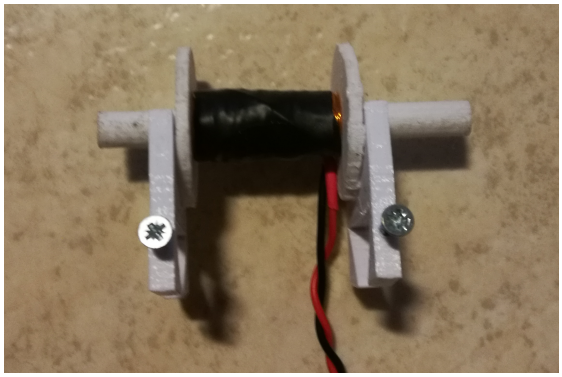
Ensimmäinen prototyyppi oli koekytkentäalustalle rakennettu piiri, joka sisälsi latauspiirin, vaihtosuuntaussillan, kondensaattoripankin sekä laukaisukäämin. Kytkintä laukaisuun ei ollut ja kondensaattoripankin lataus purettiin laukaisukäämiin koskemalla kondensaattoripankin negatiivinen puoli johdolla käämin toiselle puolelle (ks. Kuva 3).



Kuva 3. Kytkentäkaavio käämitykin ensimmäisestä prototyypistä

Piirin toimintaperiaate on seuraavanlainen: NE555-ajastinpiiri on kytketty astabiiliksi oskillaattoriksi. Se oskilloi 48Hz taajuudella. Sen ulostulo on kytketty P35NF MOSFET:tiin, joka syöttää toroidimuuntajaan pulssitettua virtaa. Kyseinen tekniikka muuntajan ajamiseen ei ole suositeltavaa ja se on yksi tulevaisuuden parannuskohde. P35NF MOSFET:in tilalla kokeiltiin pienitehoista IRF110 MOSFET:tia, mutta tämä kokeilu johti kyseisten transistorien tuhoutumiseen. 16v/400v toroidimuuntaja on kytketty käänteisenä piiriin, eli sen toisiokäämiin (16v käämiin) syötetään pulssitettu virta P35NF MOSFET:ista. Muuntajan ensiökäämiin (400v käämiin) indusoituu näin 300V jännite. Tämä 300v kanttiaaltoinen vaihtovirta rektifioidaan takaisin tasavirraksi 1n4007 diodeilla rakennetulla kokoaaltotasasuuntaussillalla. Tasasuunnattu jännite on 424.3V tasasuuntaussiltoihin pätevän kaavan $U_{out}=U_{In}*\sqrt{2}$ mukaisesti. Tällä tasavirralla ladataan kondensaattoripankki. Kun kondensaattorit saavuttaa halutun jännitteen, puretaan sen lataus laukaisukäämiin. Laukaisukäämi pysyi samana koko työn läpi. Sen optimointiin on tarkoitus käyttää laitteella tehtävää tutkimusta. Laukaisukäämi on 3D-tulostetun muovirakenteen päälle tehty. Käämin sisähalkaisija on 9mm ja pituus 36mm. Käämilankana käytetään 0.13mm^2 käämilankaa. Kerroksia käämissä on 4 (ks. Kuva 4). Piiri toimi halutulla tavalla, joten se rakennettiin reikälevylle, jättäen tilaa muutoksille sekä muille

ominaisuuksille (ks. video 1). Tämän jälkeen siirryttiin toiseen prototyyppiin. Tässä prototyypissä käytettiin virtalähteenä penkkivirtalähdettä 12v jännitteellä.



Kuva 4. Laukaisukäämi. Huom! Kuvassa näkyvät käämin tuet lisättiin vasta prototyypissä 5.

2 Toinen prototyyppi

Toiseen prototyyppiin lisättiin:

1. Integroitu jännitteenmittaus kondensaattoreille – poistaa tarpeen käyttää ulkoista jännitemittaria.
2. Automaattinen lataamisen lopetus - pysäyttää lataamisen, kun haluttu jännite ollaan saavutettu.
3. Mikrokontrolleri yllämainittujen ominaisuuksien saavuttamiseksi.

Mikrokontrolleriksi valittiin Arduino nano. Syitä tähän ratkaisuun olivat:

- Helppo ohjelmoida levylle rakennetun USB-adapterin ansiosta
- Perustuu ATMega328p mikrokontrollerin ympärille
- Pienikokoinen
- Kyseisiä mikrokontrollereita oli varastossa

Jännitteenmittauksen lisääminen ei ollut monimutkainen vaihe, sillä se tehtiin yksinkertaisesti jännitteenjakajalla. Jännitteenjakaja ei saa tässä applikaatiossa päästää suuria määriä virtaa lävitseen (kondensaattoripankki ei saa purkautua nopeasti jännitteenjakajan lävitse, mutta se toimii kuitenkin samalla purkuvastuksena, purkaen hitaasti varauksen jos varaus unohdetaan purkaa), joten tähän valittiin korkea-arvoiset vastukset. Näiden vastusten pitää pudottaa jännite 1/100 alkuperäisestä. Vastusten arvojen valintaan vaikutti myös saatavilla olevien vastusten arvot. Tässä käytettiin jännitteenjakajan kaavaa:

$$U_{out} = \frac{U_{source} \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Jossa U_{source} on kondensaattoreista mitattava jännite

U_{out} on mikrokontrollerin ADC-pinniin syötettävä jännite

R_2 on negatiivisen navan ja ADC-pinnin väliin tulevan vastuksen resistanssi (ks. Kytkentäkaavion 33k vastus)

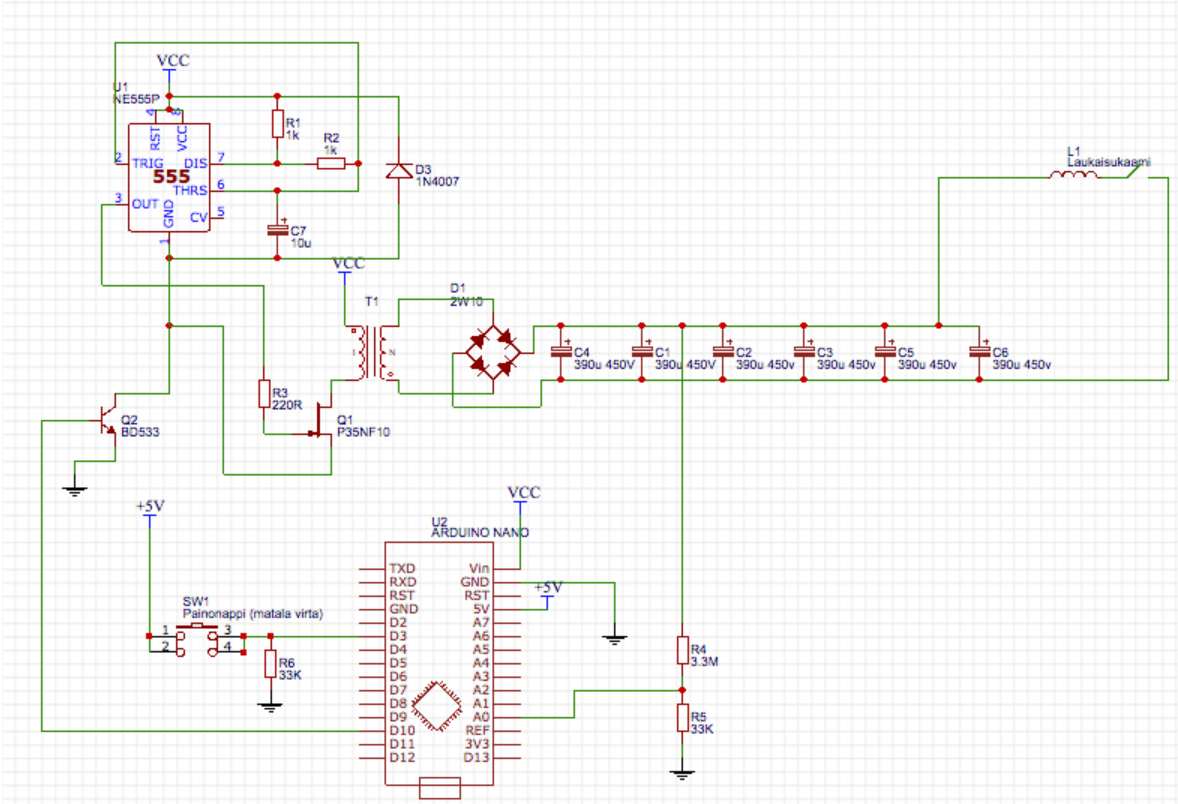
R_1 on kondensaattoripankin positiivisen navan ja mikrokontrollerin ADC-pinnin väliin tulevan vastuksen resistanssi (ks. Kytkentäkaavion 3.3M vastus)

Päädyimme käyttämään R_1 vastuksena 3.3MΩ vastusta ja R_2 vastuksena 33kΩ vastusta. Tämän jälkeen rakensimme testipiirin, mutta mikrokontrolleria ei kytketty vielä kiinni. Jännite mitattiin kondensaattoreiden latauksen aikana vastusten välistä ja sen todettiin olevan odotettu jännite. Tämän jälkeen mikrokontrolleri kytkettiin kiinni.

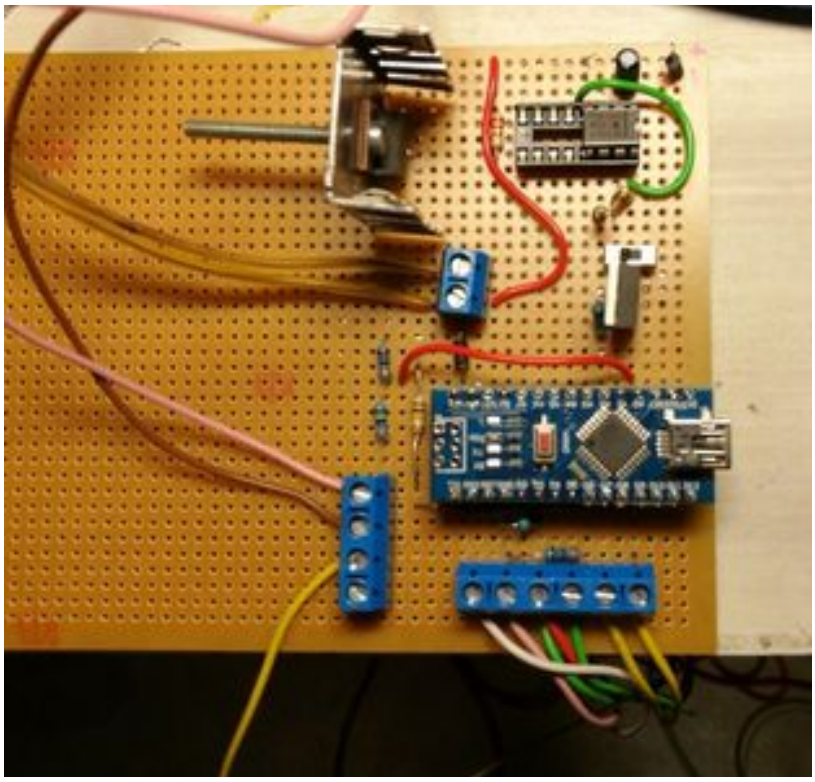
Mikrokontrollerin digitaaliseen pinniin 10 (D10) kytkettiin kiinni BD533 npn-transistori (bipolaarinen). Suojaavaa vastusta transistorin basen ja mikrokontrollerin välillä ei käytetty. Tällä ei esiintynyt negatiivisia vaikutuksia. Transistoria käytettiin kytkimenä, joka kytkee oskillaattorin negatiiviseen jännitteeseen.

Mikrokontrollerin suorittamalla ohjelmalla haluttu jännite voitiin asettaa tietokoneen kautta arduino IDE:n sarjaliitäntäikkunalla. Mikrokontrolleri lukee sen analogiseen pinniin A0 (ADC-pinni) syötettävä jännitettä analogRead() komennolla. Mikrokontrolleri antaa kuitenkin arvon 0-1023, joten map() komentoa käytettiin arvon sovittamiseen 0-450(V) väliin. Tämä arvo printattiin samaan ikkunaan, josta voitiin asettaa haluttu jännite. ADC-pinnin A0 arvoa verrataan komentoikkunasta saatuun arvoon. Kondensaattorien lataaminen aloitettiin sarjaikkunaan kirjoitetulla komennolla "ON" ja pysäytettiin komennolla "OFF". Komennon saatuaan, mikrokontrolleri antaa pinnille D10 HIGH arvon, eli antaa ulos +5v pinniin. Kun haluttu jännite saavutettiin kondensaattoreihin tai tietokoneelta tuli "OFF" komento, lopetettiin lataus.

Tässä prototyypissä käytettiin virtalähteenä penkkivirtalähdettä 12v jännitteellä.



Kuva 5. Toisen prototyypin kytkentäkaavio



Kuva 6. Toinen prototyyppi kasattuna reikälevylle. Mikrokontrollerin oikealla puolella näkyvät liittimet ovat tulevan version kytkimille ja potentiometrille

3 Kolmas prototyyppi

Kolmanteen prototyyppiin haluttiin lisätä

- keino näyttää kondensaattorien varaus ja asetettu lataus.
- keino asettaa jännite, johon kondensaattorit ladataan.

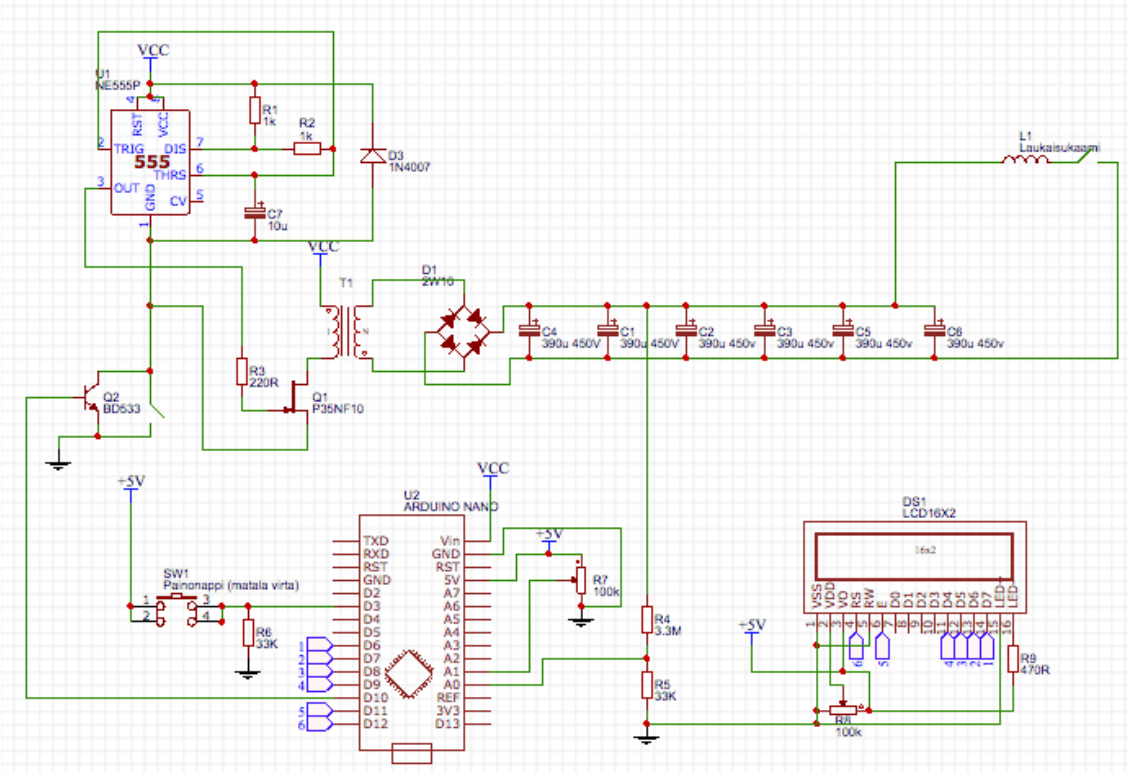
Tähän löytyi ratkaisuksi lisätä 16x2 LCD-näyttö (Hitachi HD44780 ajuri), joka löytyi varastosta purkukomponenttina. Näyttö ei toiminut kosteusvaurion takia (mikään kirjain ei toiminut, kontrastin säätö ei tehnyt mitään). Se korjattiin poistamalla metallikehys näytön ympäriltä ja nostamalla LCD pois kumisten liittimien päältä. Tämän jälkeen liittimet puhdistettiin etanolilla ja näyttö koottiin takaisin yhteen. Tämä korjasi ongelman.

Jännitteen asettamiseen käytettiin yksinkertaisesti potentiometriä kiinnitettynä mikrokontrollerin ADC-pinniin A1.

Kytkentäkaavio muuttui seuraavanlaisesti:

- Näyttö lisättiin arduinon pinneihin D12, D11, D9, D8, D7, D6.
- Kaksi potentiometriä lisättiin, kaksi 100kΩ potentiometriä joista R8 on kontrastinsäätöön ja R7 jännitteen asettamiseen.
- Yksi 470Ω vastus lisättiin näytön taustavalona toimivan ledin virranrajoittamiseen.

- Testaamisen helpottamisen vuoksi lisättiin virtakytkimenä toimivan transistorin ohittava kytkin. Näin kondensaattoreiden latausta voitiin käyttää ilman mikrokontrolleria.



Kuva 7. Kolmannen prototyypin kytkentäkaavio

Mikrokontrollerin suorittama ohjelma muuttui hieman tässä versiossa. Edellisen version lisäksi se näyttää asetetun jännitteen ja ladatun jännitteen myös näytön kautta. Ohjelma myös vertaa sarjaikkunan antamaan arvoon, tai pinniin A1 kytketyn potentiometrin arvoon kondensaattorien jännitettä. A1 pinnistä luetulle arvolle tehtiin kuten kondensaattoreita mittaavalle pinnille, eli sen 0-1023 arvo sovitettiin 0-450(V) välille.

Tässä prototyypissä huomattiin kolme ongelmaa: kaksi NE555-ajastinpiiriä paloi, sillä niiden käyttämä 12v on niiden toimintarajojen yläpäässä. Latauksen aloitettua ajastinpiirien lämpötila nousi, kunnes ne ylikuumenivat ja hajosivat. Toinen ongelma oli näytön ajoittainen "sekoilu". Näyttö printtasi täysin sattumanvaraisia symboleita ja nämä symbolit liukuivat näytön oikeasta laidasta vasempaan. Latauksen virtakytkimenä käytettävä transistori kuumeni. Tämä johtui siitä, ettei transistori saavuttanut saturaatiota liian pienen ohjausvirran ja jännitteen vuoksi. Piiri latasi kondensaattorit nopeammin mekaanista kytkintä käyttäen.

4 Neljäs prototyyppi

Neljännessä prototyypissä keskityttiin korjaamaan edellisen prototyypin ongelmat ja koteloimaan työ. Tämä edellytti:

- Virtalähteen vaihtamista penkkivirtalähteestä piiriin kiinteään virtalähteeseen.
- Latauspiirin käyttämän jännitteen vaihtamista 12v:sta 5v:iin.
- Kotelon suunnittelemista ja rakentamista.

Virtalähteeksi valittiin vanha 230w tietokoneen virtalähde. Kyseisessä virtalähteessä on 12v, 5v ja 3.3v ulostulot. Latauspiiriä sekä mikrokontrolleria syötetään 5v:lla ja muuntajaa 12v:lla. Tämä ratkaisi NE555-ajastinpiirien ylikuumenemisongelman.

BD533-transistori poistettiin ja sen tilalle vaihdettiin rele. Rele on 12v/250vac 16A. Releen ajamiseen käytettiin irfd110 N-kanavan MOSFET:tia. Rele sekä sitä ajava MOSFET:ti kiinnitettiin väliaikaisesti levyn ulkopuolelle johdoilla.

Kotelon rakennusmateriaaliksi valittiin 160mm leveä, 17mm paksu kuusilauta. Materiaali valittiin, sillä sitä oli saatavilla, se eristää tarpeeksi hyvin sähköä tässä käyttötarkoituksessa ja sen työstäminen on helppoa. Kotelo on suorakulmainen laatikko, jonka mitat ovat (x,y,z mm) 500x175x140mm (ks. Dokumentti 1). Kotelon taakse lisättiin kantohihna helpottamaan kantamista

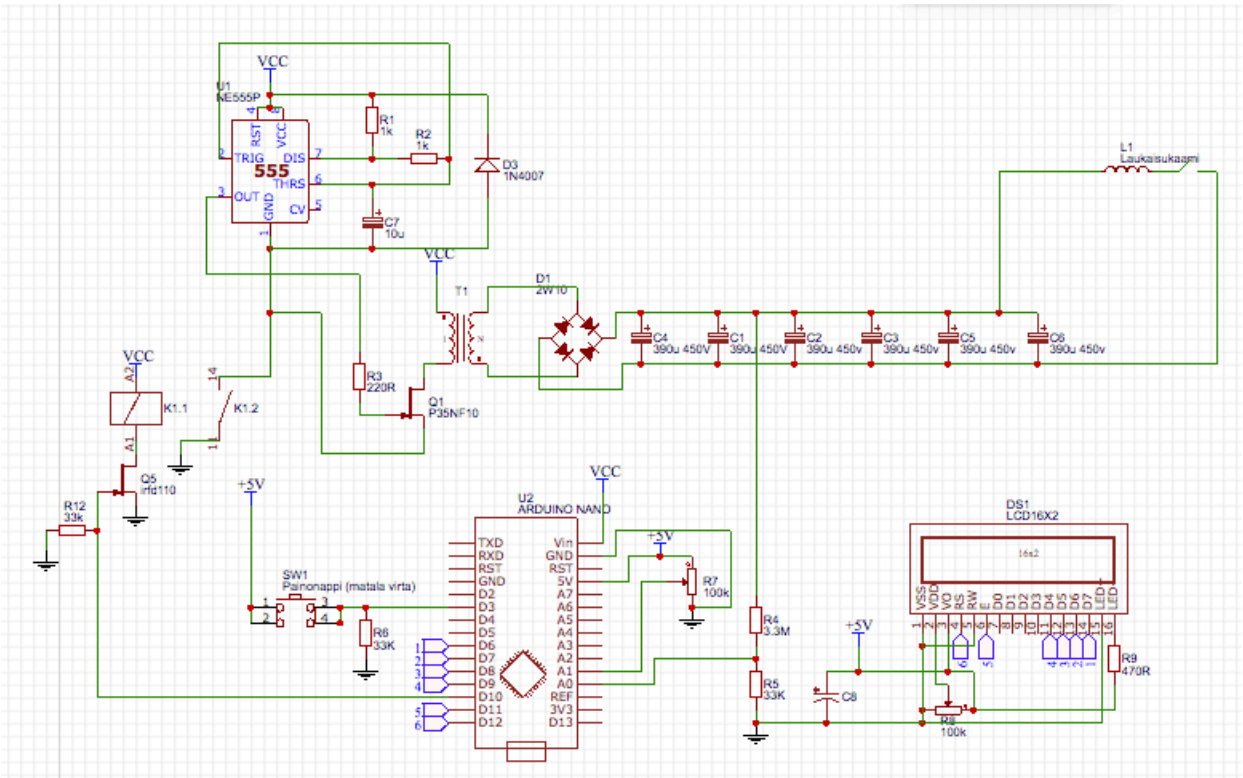
Virtalähde kiinnitettiin koteloon sen kiinnitysrei'istä sekä 3D-tulostetulla kulmapalalla.

Kotelon etupaneelissa olevan reiän päälle kiinnitettiin akryylilevy, johon tehtiin tarvittavat reiät potentiometrille, kytkimelle, laukaisukytkimen banaaniliittimille sekä näytölle. Akryylilevy kiinnitettiin 2.5x12mm yleisruuveilla. Paneelin reunat saumattiin tässä versiossa sähköteipillä.

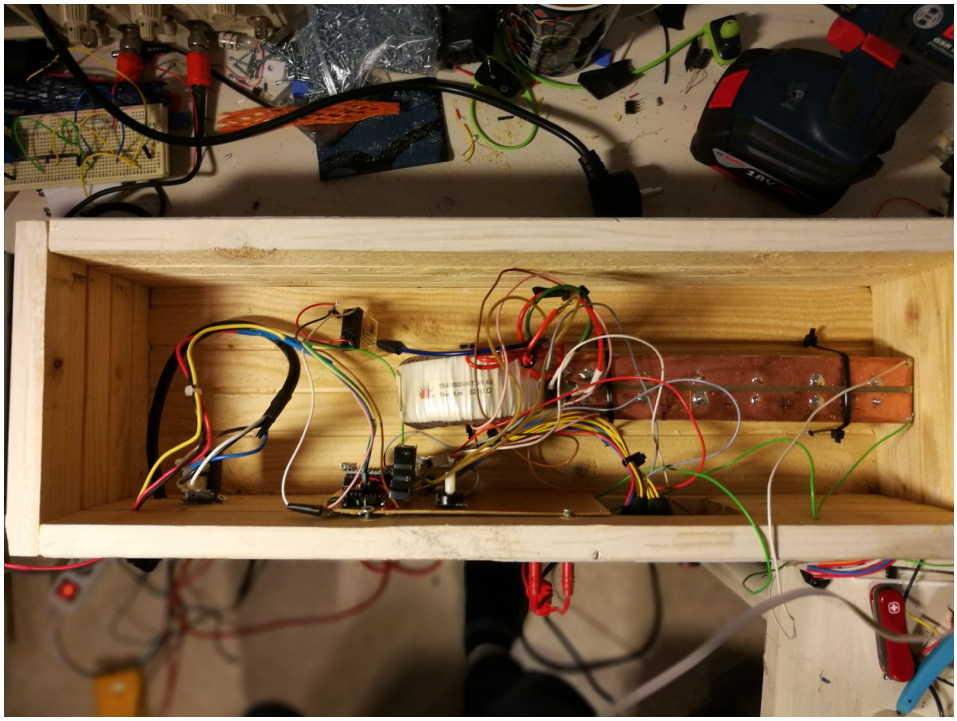
Katso video 2. nähdäksesi tämän prototyypin toiminnassa. Videossa tähän prototyyppiin viitataan v.0.9.

Kuva 8. virtalähteen kiinnitys

Kuva 9. Etupaneeli



Kuva 10. Neljännen prototyypin kytkentäkaavio. Rele korvaa transistorin ja kytkimen



Kuva 11. Viides prototyyppi kotelossa. Toroidimuuntaja ja kondensaattoripankki on kiinnitetty nippusiteillä kotelon pohjaan porattujen reikien kautta. Ratkaisu osoittautui erittäin toimivaksi.

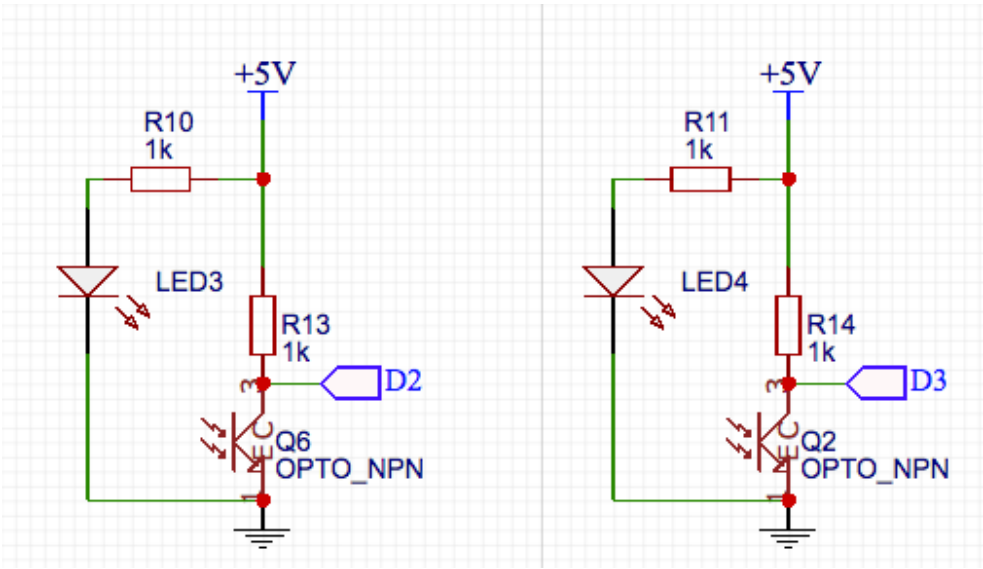
5 Viides prototyyppi

Viidenteen ja viimeiseen prototyyppiin lisättiin:

- Ammuksen nopeudenmittaus.
- Keino kiinnittää käämi ja nopeutta mittaava sensori.
- Toisen käämin tekeminen.
- Jännitteen suodatus.
- Kosmeettinen viimeistely.

Tämä prototyyppi aloitettiin suunnittelemalla nopeutta mittaava sensori. Sensorin suunnittelu aloitettiin valoportti ideasta. Ammus ylittäisi kaksi valoporttia ja niiden ylittämiseen kulunut aika mitattaisiin ja siitä laskettaisiin ammuksen nopeus. Valoportti kytkettäisiin mikrokontrollerin interrupt-pinneihin D2 ja D3. Valonsäteen katkeamisen havaitsevaksi sensoriksi valittiin 2n5777 fototransistori. Valonlähteenä käytettiin punaista 5mm lediä.

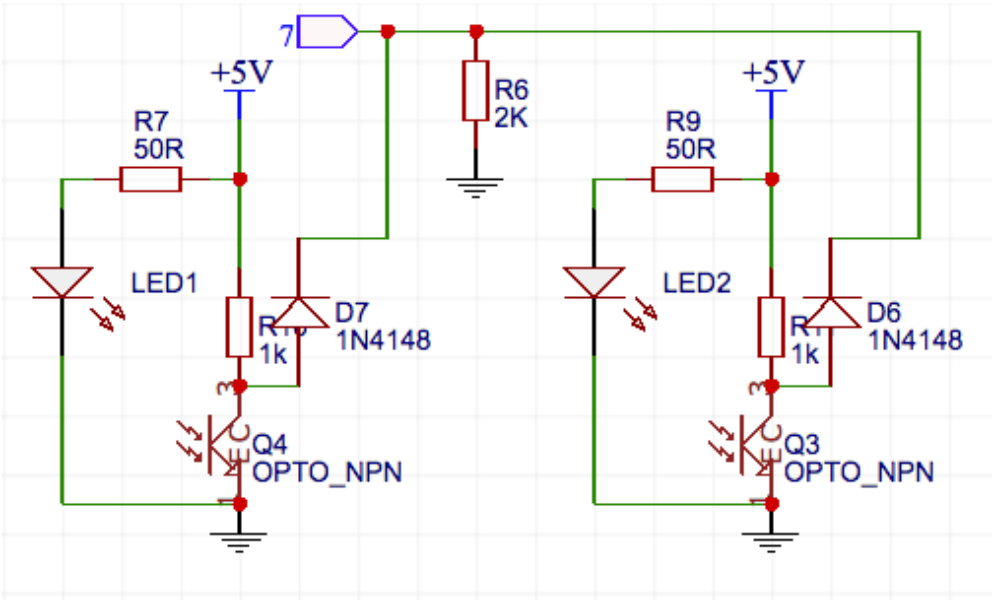
Koekytkentäalustalle kasattiin ensimmäinen prototyyppi nopeutta mittaavasta sensorista. Sen toimintaperiaate on seuraavanlainen: Piirissä on kaksi keskenään samanlaista vaihetta. Kun valo ledistä osuu npn-fototransistoriin, antaa se negatiivisen ulostulon. Kun valo katkeaa, ulostuloon tulee positiivinen jännite 1k vastuksen lävitse. Tämä pulssi rekisteröidään ja mikrokontrolleri ottaa systeemiajan (aika millisekunneissa mikrokontrollerin käynnistämisestä). Kun mikrokontrolleri saa seuraavan pulssin toisesta vaiheesta (positiivisen pulssin pinniin D3) ottaa se toisen systeemiajan ja vähentää ajat toisistaan saaden ajan pulssien väliltä.



Kuva 12. Ensimmäinen nopeussensorin konsepti.

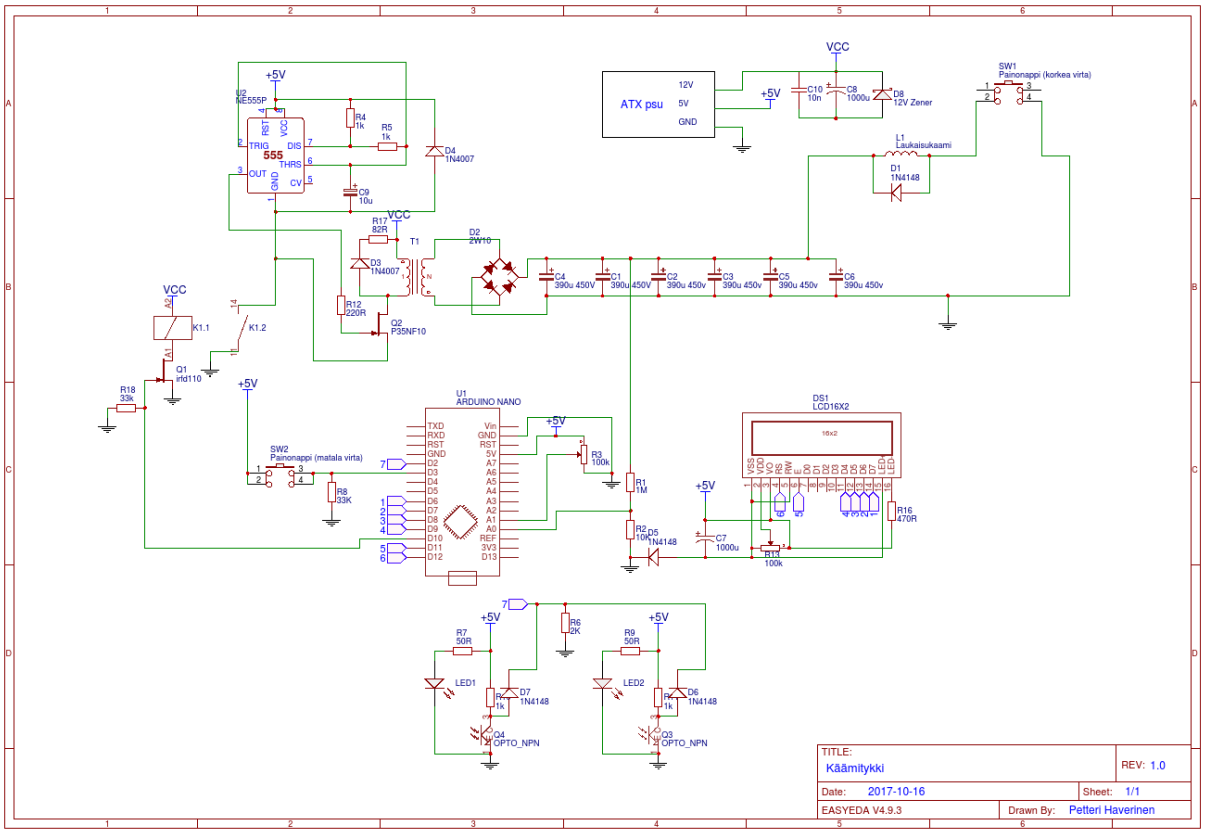
Tämä piiri toimi, mutta se vei jo käytössä olevan GPIO pinnin. Tämän vuoksi piiri piti supistaa käyttämää vain yhtä pinniä (D2). Tämä onnistui yksinkertaisesti lisäämällä diodi kumpaankin ulostuloon ja yhdistämällä ulostulot diodien jälkeen. Näin ulostulo kelluu joko 0v:ssa tai positiivisessa. Saadakseen mikrokontrollerin pinnin palaamaan takaisin LOW-tilaan, piti lisätä pulldown-vastus pinniin D2. Näin D2 on joko HIGH- tai LOW -

tilaan. Ks. dokumentti 2. nähdäksesi ohjelman nopeussensorille. Huomioi: koodissa pulssi aloitetaan nousevasta arvosta (interrupt mittaa nousevaa jännitettä, RISING), kokeiden jälkeen huomattiin kuitenkin, että sensori on tarkempi, kun mitataan laskevaa arvoa (FALLING).



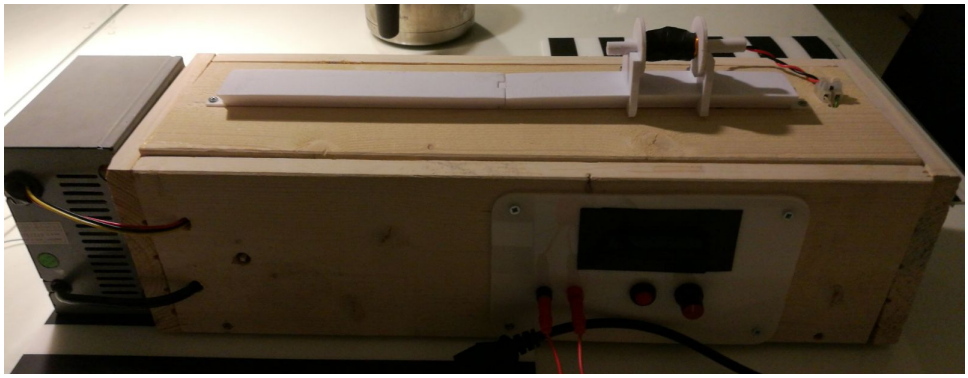
Kuva 13. Nopeussensorin viimeinen versio.

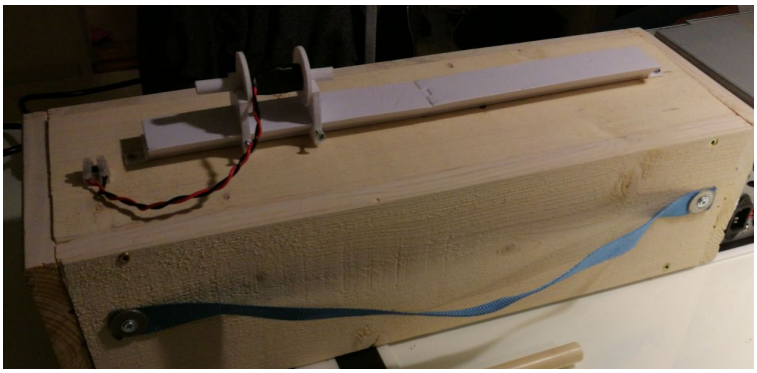
Nopeussensori liitettiin tämän jälkeen kytkentäkaavioon. Jännitemittarin tarkkuudessa huomattiin kuitenkin ongelmia (epäsäännöllinen jännite-ero) ja ratkaisuksi päädyttiin vaihtamaan jännitteenjakajan vastusten arvoja. Tämä ongelma johtui todennäköisesti käytetyn mikrokontrollerin ADC-pinnin näytekondensaattorista (IC:n sisäinen). Se ei pystynyt purkautumaan tarpeeksi ennen uutta arvoa, joten uusi arvo otettiin vanhan päälle. Toinen ongelma jännitteenmittauksessa huomattiin, kun laitteistoa käytettiin ilman tietokonetta. Mittausarvot vaihtuivat huomattavasti, kun tietokone ei ollut kytkettynä USB:n kautta. Tämä johtui siitä, että arduino nanoa (mikrokontrollerimoduuli) syötettiin viidellä voltilla sen Vin-pinniin. Kyseinen pinni syöttää virtaa arduinon ATMega328p mikrokontrollerille vanhanaikaisen LM1117-regulaattorin kautta. Kyseisellä regulaattorilla on suhteellisen suuret jännitehäviöt. Tästä seurasi jännitteen tippuminen 5:stä voltista n.3.6V:iin. Arduinon ADC-pinnien antamat lukemat perustuvat pinnin jännitteen vertaamiseen mikrokontrollerin jännitteeseen, eli viiteen volttiin. Jos syöttöjännite on alle 5V, muuttuvat ADC-pinnin arvot korkeammiksi sillä arvo johon verrataan on pienempi. Näiden muutosten jälkeen kytkentäkaavio oli valmis.



Kuva 14. Käämitykin valmis kytkentäkaavio

Käämin sekä nopeussensorin kiinnittämiseksi tarvittiin modulaarinen ratkaisu. Sensori ja käämi pitää pystyä poistamaan. Ratkaisuksi tähän käytettiin 3D-tulostettua V-kiskoa, joka kiinnittyy käämitykin kanteen. Käämiin sekä nopeussensoriin tulisi kiskon profiiliin sopiva reikä ja ne pystyisivät näin liikkumaan pitkin kiskoa. (ks. Dokumentti 3. CAD-kuvia varten).



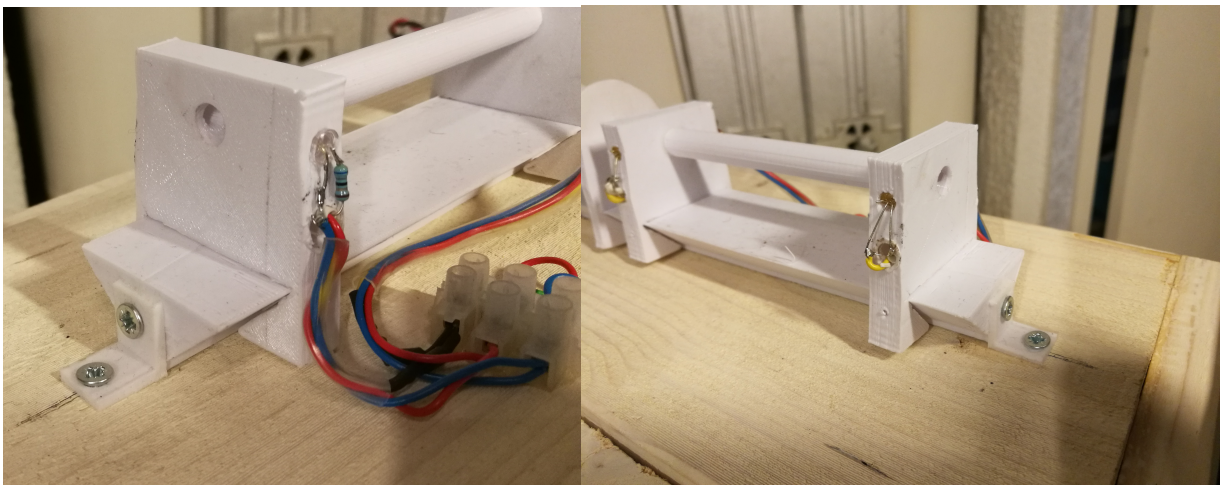


Kuva 15&16. Käämitykin raide edestä ja takaa. Kuvassa 15. näkyy myös kantohihna

Raide ja käämin pidike 3D-tulostetiin PLA-muovista 20% infillillä. Raide oli tarkoitus kiinnittää ruuveilla alhaalta päin. Tämä kiinnitysmenetelmä hylättiin, kun raiteen sisällä olevat ruuvien vastakappaleet pettivät, eikä ruuvit enää pitäneet. Raide kiinnitettiin tästä syystä päistään 3D-tulostetuilla kulmapaloilla. Kulmapalat kiinnitettiin raiteeseen liimalla ja ruuveilla.

Kuva 17. Kiinnitys kulmapaloilla

Sensorit rakennettiin sisään seuraavanlaisiin pidikkeisiin:

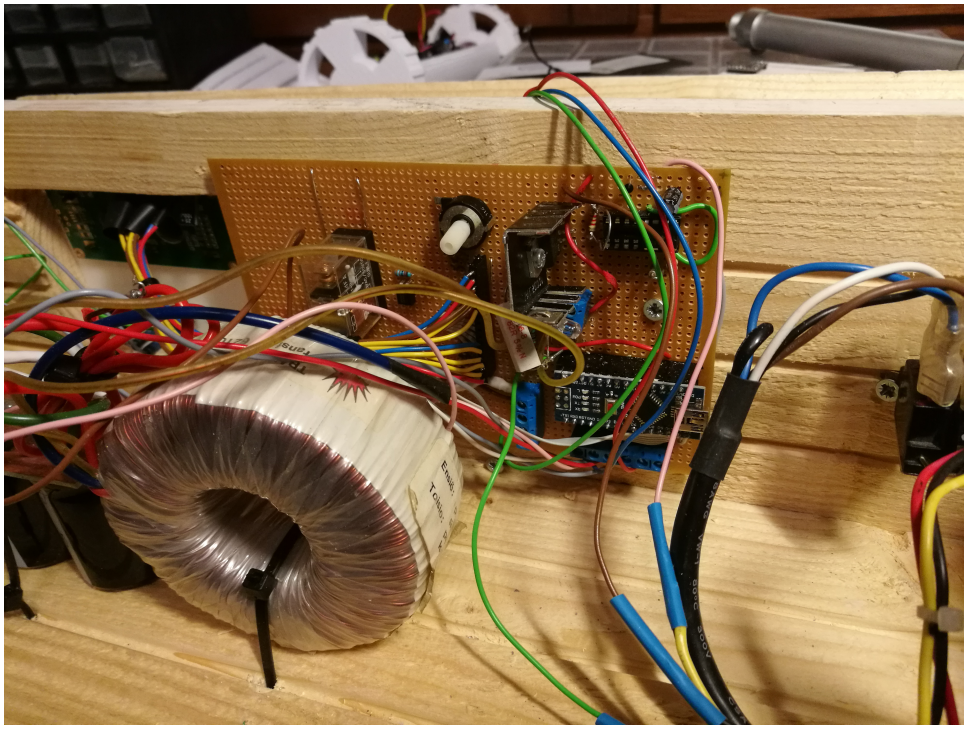


Kuvat 18&19. Nopeussensorien pidikkeet sekä niitä yhdistävä putki.

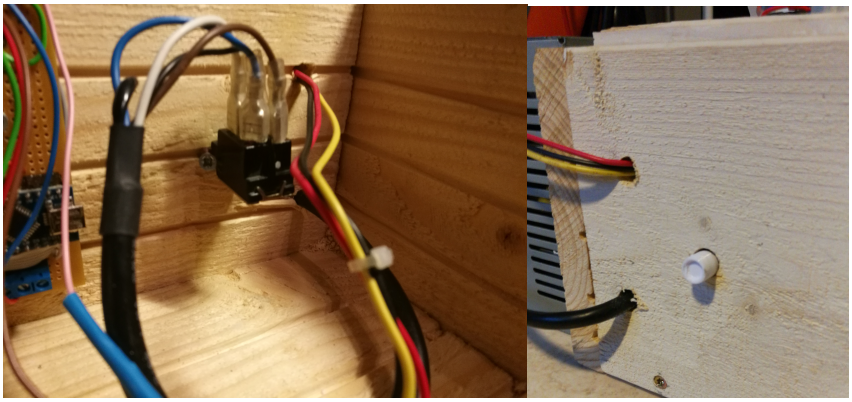
Sensorien etäisyys toisistaan on 110mm. Kuvassa 17 näkyvä liitin syöttää sensorille virtaa ja vie pulssit sensorilta mikrokontrollerille. Sensorit saa liu'utettua pois raiteelta.

Kosmeettinen viimeistely sisälsi 3D-tulostetun nupin asentamista virtapainikkeeksi, sensorin johtojen siistimistä (ks kuvat 18&19. Johdot ovat kutistesukan sisällä ja erkanevat toisistaan liittimen kohdalla) sekä näytön ympärille tulostetun kehyksen asentamista.

Kuva 20. Etupaneeli. Huomaa halkeama näytön yläpuolella. 5 Kehys estää sen leviämistä



Kuva 21. Prototyypin 5. levy ja toroidimuuntaja. Huomaa, että rele on rakennettu kiinni levyyn, eikä roiku kotelossa vapaana.



Kuvat 22&23. Virtakytkin sisältä ja ulkoa.

VII Tulokset

Työn viidennen prototyypin jälkeen katsottiin laitteen olevan valmis tarkoitettuun käyttöön. Työssä saatiin aikaan toimiva laitteisto, jolla pystytään toteuttamaan tutkimuksia, mihin laitteisto suunniteltiin. Laitteiston tarkkuus on ±0.5m/s (nopeussensori) ja ±4,6V (jännitemittari). Valmiin työn toiminnassa voit nähdä videolta 3. Ohjelmisto saatiin kehitettyä bugivapaaksi ja hyvin toimivaksi (Ks. dokumentti 7). Laitteen toiminnassa voit nähdä videolta 4.

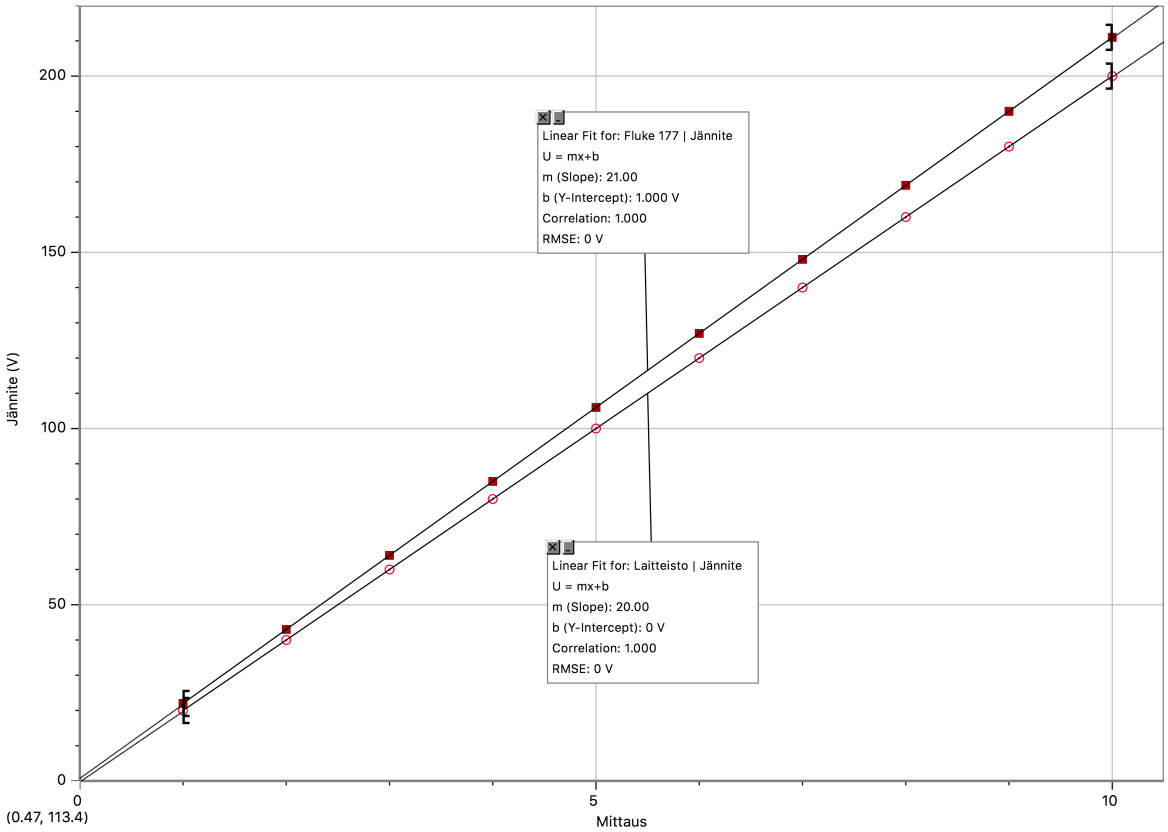
1 Nopeussensorin tarkkuus

Nopeussensorin tarkkuus todettiin riittäväksi hidastusvideoiden perusteella. Videolla 3. analysoitiin ammuksen nopeutta hidastuskuvalla. Hidastuskuvan nopeus oli 120fps ja mitattava matka 0,3m. Ammus ylitti 0,3m matkan 6. kuvan aikana, joka vastaa 0,05s. Näin saatiin nopeudeksi 6m/s. Sensori antoi myös lukemaksi 6m/s.

Mittarin tarkkuutta suuremmilla nopeuksilla ei kyetty tutkimaan tarkasti, sillä hidastuskuva muuttui liian epätarkaksi tarkan arvon saamiseksi. Jos hidastuskuvalla kuitenkin lasketaan ammuksen nopeutta, niin ammus ylitti 0,3m matkan 3:n ja 4:n kuvan aikana, eli pyöristämällä tämä 3,5:een kuvaan saatiin arvoksi ≈10,3m/s. Sensori näytti nopeudeksi 10m/s. Pyöristetyistä arvoista johtuen nopeussensori voidaan tarkkuudeksi sanoa ±0,5m/s.

2 Jännitteenmittauksen tarkkuus

Jännitteenmittaus tarkistettiin vertaamalla laitteiston antamaa jännitettä laadukkaan Fluke 177-yleismittarin jännitteisiin. Mittauksia suoritettiin 20V välein:



Mittauksien perusteella voitiin määrittää laitteiston mittavirheeksi +1V/20V. Mittausvirhe tutkimusten mukaan kasvaa tasaisesti. Syy on toistaiseksi tuntematon. Ks. dokumentti 6 nähdäksesi Logger-pro tiedoston. Tasaisesti kasvavan arvon takia pääteltiin, että virhe kasvaa jonkin kertoimen mukaan. Kerroin saatiin kuvaajien kulmakertoimien suhteesta. Kertoimen arvoksi saatiin 1.05. Kertoimen lisäämisen jälkeen mittavirhe pysyi tasaisena ±1V. Kerrointa hienosäätämällä arvoon 1.0567 saatiin mittavirhe pienennettyä ±0.5V:iin. Tätä toleranssia voisi vielä edelleen parantaa arvoa hienosäätämällä.

3 3D-tulostettujen osien laatu

Laitteiston modulaarinen rakenne onnistui tavoitellulla tavalla. Käämejä on helppo vaihtaa ja ammuksen nopeussensori on poistettavissa huoltoa varten. Raiteessa ilmenee hieman 3D-tulostuksessa syntyneitä virheitä. Näistä virheistä pahin ilmenee raiteen saumakohdassa (kohdassa, jossa kaksi raiteen puolikasta yhdistyy), jossa toisen raiteen puolikkaan tulostuksessa syntynyt osan taipuminen aiheuttaa saumakohtaan epätasaisuuden.

4 Kotelo

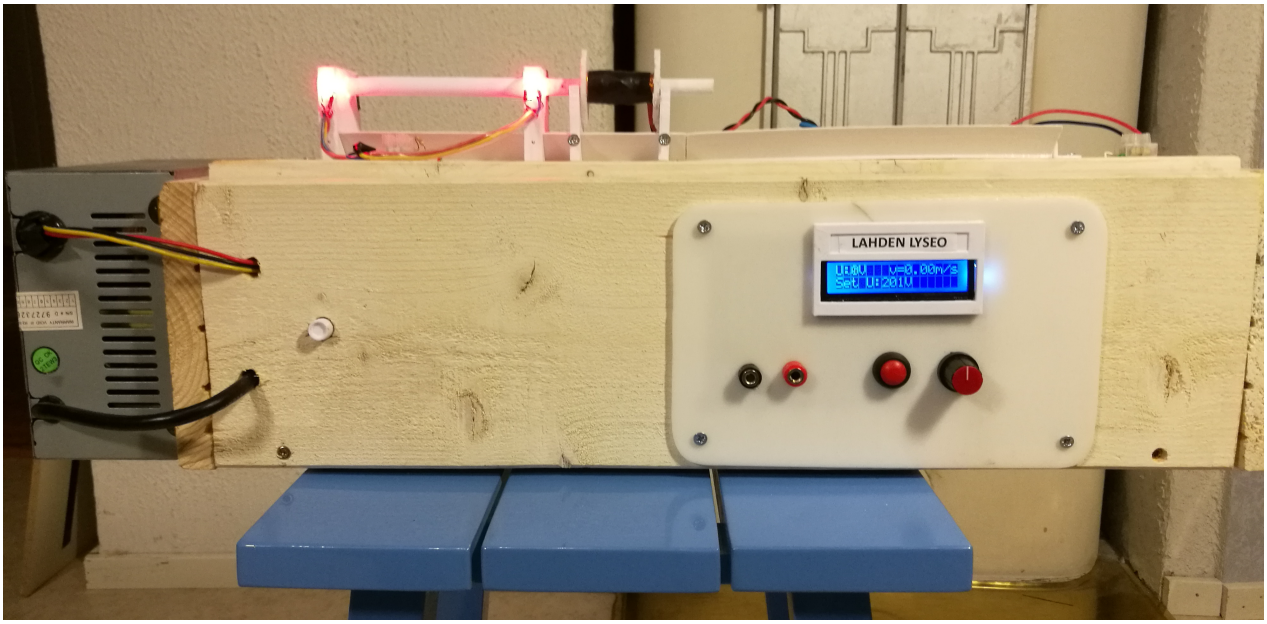
Puisen kotelon työlaatu ei ole parasta mahdollista. Kotelo on nopeasti kasattu protokotelo, joten sen estetiikkaan ei työssä kiinnitetty huomiota. Kotelon kansi tosin voisi laskeutua hieman alemmaksi, sillä se ei istu tasan kotelon laitojen kanssa.

5 Elektroniikka

Elektroniikka on pääasiassa juotettuna reikälevylle. Tästä johtuen korkeajännite on hieman liian lähellä matalajännite-elektroniikkaa. Elektroniikan komponenttien kiinnitys koteloon on toimiva, jokseenkin ei suositeltava ratkaisu (ks. Neljäs prototyyppi, kuva 11). Juotostyöt ovat vahvoja ja onnistuneesti tehtyjä.

6 Turvallisuus

Työ sisältää korkeajännitteen kondensaattoreissa (max. 424v DC). Tästä johtuen laukaisukytkimeen käytetyt banaaniliittimet ovat suunnitteluvirhe. Ne eivät ole soveltuvia korkeajännitteelle, sillä niiden kontakteja ei ole suojattu. Tästä syystä laitteen saa kytkeä päälle vasta, kun laukaisukytkin on kiinnitetty ja sen liittimet peittävät jännitteelliset kontaktit. Työssä ei käytetty verkkovirtaa kondensaattorien lataamiseen johtuen siitä, ettei työn tekijällä ole asiaa verkkovirtaan. Verkkovirran kanssa toimiminen on hyvin vaarallista ja laissa tarkkaan määrätty. Tästä syystä työ käyttää turvallista suojattua tietokoneen virtalähdettä matalajännitteen luomiseksi, josta nostetaan korkeajännite kondensaattoreiden lataamiseen invertterillä.



Kuva 21. Valmis laite

VIII Johtopäätökset

1 Mahdolliset parannukset nykyiseen versioon

Laitteistoon on mahdollista tehdä monta parannusta. Näitä ovat:

1. Kondensaattoreiden lataaminen verkkovirralla. Tämä on mahdollista tehdä turvallisesti oikeilla välineillä sekä ammattilaisen opastuksella

1.5 Vaihtoehtoisesti kondensaattoreiden lataaminen voitaisiin tehdä yhä invertterillä, mutta invertterin tulisi olla joko push-pull muunnin[5] tai muuntajan ajamiseen tarkoitettu mikropiiri.

2. Laukaisukytkimen banaaniliittimet pitäisi vaihtaa turvallisiin ja korkeajännitteelle sopiviin liittimiin.

3. Osa 3D-tulostetuista osista voisi tulostaa uudestaan esteettisistä ja toiminnallisista syistä.
4. Kotelo kannattaisi olla muovista tai palonesto pinnoitteella käsitellyllä puulla.
5. Laukaisukäämiin virtaa kuljettavat johdot olisi hyvä vaihtaa eristysluokaltaan parempaan ja paksumpaan johtoon.
6. Johtoina olisi hyvä käyttää RF-suojattua johtoa laukaisussa syntyvien EM-pulssien vaimentamiseen.

2 Jatkokehitys

Jatkokehityksessä laitteistoon voisi lisätä seuraavia asioita:

1. Kaksi tai useampi kondensaattoripankki monivaiheiseen käämitykkiin.
2. Mekaanisen laukaisukytkimen korvaaminen puolijohteella, kuten tyristorilla.
3. Sensori, joka laittaisi käämin pois päältä kun ammuksen keskipiste on ylittänyt käämin keskipisteen. Näin vältettäisiin se, että käämi ei vetäisi ammusta takaisin sen keskipisteen ylitettyä käämin keskipisteen.
4. Kondensaattorit voitaisiin ladata verkkovirralla, mutta tämä vaatisi asiaankuuluvan suojauksen ja ammattilaisen tekemisen.
5. Näytön lisäksi voisi käyttöliittymäksi lisätä mahdollisuuden käyttää laitetta langattomasti kännykälle tehdyn sovelluksen kautta. Mahdollinen keino yhdistää puhelin laitteeseen olisi mm. ESP8266-12e WIFI-moduuli.
6. Jännitteen kalibroimisen helpottamiseksi, voitaisiin lisätä potentiometri jännitteen kertoimen säätämiseksi (ks. tulokset).

IX Lähteet

US. Patent nr. 754637 – Electromagnetic gun (1904)[1]

https://www.google.com/patents/US754637?dq=US+754637+A&hl=en&sa=X&ei=raKxVPn1BNP8yQSk-4G4Aw&ved=0CB8Q6AEwAA

US patent nr. 1959737 – Machine Gun (1933)[2]

https://www.google.com/patents/US1959737

Wikipedia – Space gun[4]

https://en.wikipedia.org/wiki/Space_gun

Wikipedia – Coilgun[3]

https://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun

Push-Pull muunnin

https://en.wikipedia.org/wiki/Push%E2%80%93pull_converter

X Liitteet

Video 1.

https://www.youtube.com/watch?v=Hvv5jC8JnOM

Video 2.

https://www.youtube.com/watch?v=rqHsyHVvQRw

Video 3.

https://drive.google.com/file/d/1Z934MGA01ffkvCgVZZaKMyunCoQ4X3Wz/view?usp=sharing

Video 4.

https://www.youtube.com/watch?v=lB5vApbtVJM

Dokumentti 1. (Kotelon tekniset piirrokset)

https://drive.google.com/open?id=1Piosaz-NatXZnNLRz13vRzZcjya1iIqH

Dokumentti 2. (Nopeussensorien ohjelma)

https://drive.google.com/open?id=1INiyrHv_gp8inbrxIB-R0rKAnMMUkgNg

Dokumentti 3. (CAD tiedostot)

https://drive.google.com/open?id=132JBvcXkpCvms5QyOzSUg13uDLHvnig3

Dokumentti 4. (Kytkentäkaavio)

https://drive.google.com/open?id=1DJGRvoG8E3JaR2cLrZDmHOPYdjq22s2V

Dokumentti 5. (Osaluettelo)

https://edulahti-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/petteri_haverinen_edu_lahti_fi/EVlCe-n3gFpImAbdmMiVyxIB1lYb1bilS-mihP4mZTRlag?e=EBFUjJ

Dokumentti 6. (LoggerPro-kuvaaja jännitteistä)

https://drive.google.com/open?id=1U9SEEfLr-99QRzCUnK6d1c3Z2fTJXiAP

Dokumentti 7. (Käämitykin ohjelma)

https://drive.google.com/open?id=1DuBcMz0JAVxwSNBVh796aIrjhDrWRpkH

BD533 Datalehti

http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/07/1f/6f/2f/ca/26/44/25/CD00000915.pdf/files/CD00000915.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000915.pdf

IRFD110 Datalehti

https://www.vishay.com/docs/91127/sihfd110.pdf