

LATVIJAS UNIVERSITĀTE  
FIZIKAS UN MATEMĀTIKAS FAKULTĀTE  
FIZIKAS NODAĻA

**INOVATĪVA RF INDUKTORA BAROTĀJA  
DATORMODELĒŠANA, IZSTRĀDE UN EKSPERIMENTI**

BAKALaura DARBS

Autors: **Jānis Oskars Darčiks**

Studenta apliecības Nr.: jd15006

Darba vadītāji: LU-ASI pētnieks MSc. Phys. Jānis Blahins

LU-ASI vadošais pētnieks Dr. Phys. Arnolds Ūbelis

RĪGA 2018

## ANOTĀCIJA

Darbā tiek apskatītas dažādas iespējas ģenerēt augstas jaudas signālu ar atsevišķi regulējamu PWM (jaudas) koeficientu un frekvenci līdz 3 MHz. Tiek iztirzāti dažādi varianti praktiskā darba izpildei.

Mūsdienās prasības germānija kristālu tīrībai aizvien aug un to audzēšana bezkontakta iekārtās var dot vajadzīgo rezultātu. LU ASI Atomfizikas un atmosfēras fizikas un fotoķīmijas laboratorijas efektīvās sadarbības projektā ar “Baltic Scientific Instruments Ltd” (lieto augstākās tīrības germānija kristālus) tika noskaidrots ka germānija kausēšanai vakuuma magnētiskajā levitācijā nepieciešams 30 kW un 0,5 - 3 MHz impulsa platumā regulējams (10 - 100% no jaudas) ģenerators, kas diemžēl komerciāli nav pieejams par saprātīgu cenu.

Lai panāktu progresu ir jārisina divi aktuāli uzdevumi: pirmkārt jāizstrādā (t.i. modelējot, būvējot maketus un testējot tos veikt attiecīgus mērījumus) regulējama lieljaudas un augstfrekvences ģenerators konstrukcija induktora barošanai, un otrkārt jāaudzē germānija kristāli bez kontakta ar ampulas sienām, t.i. vakuumā magnētiskajā levitācijā, kas būtu pasaules līmeņa inovācija germānija kristālu audzēšanā.

Pēc daudzkārtējiem mēģinājumiem izrādījās, ka uzģenerēt 3 MHz PWM modulētus impulsus izmantojot pašas labākās mūsdienu elektronikas komponentes ir iespējams un ir izdevies izveidot attiecīgu elektronisku ierīci, kuru vēl nepieciešams uzlabot un tas tiks darīts maģistra studiju laikā.

**Atslēgvārdi:** PWM signāla ģenerators, pusvadītāju attīrīšana vakuuma magnētiskajā levitācijā, induktora barošanas avots, digitālās un analogās lieljaudas elektronikas komponentes.

## **ABSTRACT**

Work discusses the different implementation methods of high power generator circuitry for PWM and frequency adjustable power source for RF inductor operation. The frequency and D-factor (what is PWM factor) must be adjusted independently.

Nowadays, requirements for clean germanium crystals are growing and their production in non-contact equipment can provide the desired result. LU-ASI Atomic and atmospheric physics, and photochemistry laboratory in an effective co-operation project with “Baltic Scientific Instruments Ltd” (user of higher-purity germanium crystals) it was established that the melting of germanium in the vacuum magnetic levitation required 30 kW and 0,5 - 3 MHz PWM adjustable (10 - 100% of power) generator, what are not commercially available for satisfactory price.

To make progress, two topical challenges need to be addressed: firstly, the design of a regulated high power and high frequency generator for feeding the inductor should be developed (i.e., modeling, building mock-ups and testing of appropriate measurements), and secondly, germanium crystals must be grown without contact with the walls of the ampoule, i.e. in a vacuum in magnetic levitation, which would be world-class innovation in the production of germanium crystals.

After many experiments, it appeared that generating 3 MHz PWM signal using the best modern electronics components is possible and has succeeded in creating an appropriate electronics device that is yet to be improved and will be done during master’s studies.

**Keywords:** PWM signal oscillator, semiconductor rectification in vacuum magnetic levitation, inductor power supply, digital and analogue power electronics components.

# SATURA RĀDĪTĀJS

APZĪMĒJUMU SARAKSTS.....	6
IEVADS .....	7
1. LITERATŪRAS APSKATS .....	8
1.1. Pusvadītāju kristālu audzēšanas un attīrīšanas aktualitāte .....	8
1.2. Pusvadītāju attīrīšana ar peldošās zonas metodi .....	10
1.2.1. Silīcija kristāliem .....	10
1.2.2. Germānija kristāliem.....	11
1.3. Veicamā darba priekšvēsture un motivācija .....	11
2. MATERIĀLI UN METODEDES .....	13
2.1. Shēmu analizēšana un modelēšana.....	13
2.2. Praktiskā darba izpilde .....	13
2.3. Sākotnējās iespaidplates izveide .....	14
2.4. Pirmās shēmas izvēle .....	15
2.5. Optiskā atsaistīšana .....	18
2.6. Draiveru komplekts, gala kaskāde un spoles izvēle.....	19
3. REZULTĀTU ANALĪZE .....	22
3.1. Pirmās iespaidplates realizējums .....	22
3.2. Otrais variants .....	24
3.3. Trešais variants.....	25
3.4. Gala rezultāts .....	26
SECINĀJUMI.....	28
IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI.....	30
PIELIKUMI .....	33
1. pielikums. Sākotnējā impulsu ģeneratora elektriskā shēma .....	33
2. pielikums. Shēma pārejai no ESL uz KMOP .....	33

3.	pielikums. Trasējuma celiņi pirmajai elektriskajai shēmai .....	34
4.	pielikums. D trigeris frekvenču dalīšanai ar divi .....	35
5.	pielikums. Elektriskā shēma optiskajai atsistei .....	35
6.	pielikums. Trasējuma celiņi optiskās atsaistes iespiedplatei .....	36
7.	pielikums. Otrā impulsu ģenerators elektriskā shēma .....	37
8.	pielikums. Trešā impulsu ģenerators elektriskā shēma .....	37
9.	pielikums. Galējā impulsu ģenerators elektriskā shēma .....	38
10.	pielikums. Datormodeļa piemērs .....	39

## APZĪMĒJUMU SARAKSTS

LU-ASI - Latvija Universitātes Atomfizikas un spektroskopijas institūts (University of Latvia Institute of Atomic Physics and Spectroscopy);

LU-FMF - Latvijas Universitātes Fizikas un matemātikas fakultāte;

$\rho_{Ge}$  - germānija blīvums;

RF - radiofrekvence;

ZF - zemfrekvence;

AF - augstfrekvence;

KMOP - komplementāra metāla oksīda pusvadītājs;

ESL - emitera saites loģika;

TTL - tranzistoru tranzistoru loģika;

MOSFET - metāla oksīda pusvadītāju lauktranzistors (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor);

IGBT - lauktranzistori ar izolētu aizvaru (insulated-gate bipolar transistor);

DC - līdzstrāva (direct current);

AC - maiņstrāva (alternating current);

SMPS - impulsu barošanas avots (switched-mode power supply);

SMD - uz virsmas montējamā iekārta (surface-mount device);

DIP - divejādi montējama elektroniska komponente (dual in-line package);

PWM - impulsu platuma modulācija (pulse width modulation);

D-faktors - impulsa platuma attiecība pret pilnu periodu (citur literatūrā pret pusperiodu) ( $D = \frac{PW}{T}$ );

RGB - sarkanas, zaļas un zilas krāsas salikums;

LED - gaismu emitējoša diode (light emitting diode);

NaOH - nātrijs hidroksīds;

Fe<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub> - dzelzs (III) hlorīds;

I - strāva;

S - laukums;

f - frekvence.

## IEVADS

Mūsdienās aug pieprasījums pēc augstākas kvalitātes pusvadītāju materiāliem, tai skaitā arī pēc germānija, kurš ir pieprasīts sensoru ražošanā un Latvijas uzņēmums “Baltic Scientific Instruments Ltd” ir viens no vadošajiem pasaulē šajā jomā. Iepirkt vēl neapstrādātu pusvadītāju materiālus ir salīdzinoši lēti, to cena kāpj dažādu attīrīšanas procesu gaitā. Katrs iepircējs vēlas arvien labākas kvalitātes t.i. pēc iespējas tīrākus pusvadītāju materiālus.

Šinī gadījumā mērķa pusvadītājs ir germānijs, kas savu atšķirīgo fizikālo parametru (virsmas spraigums, viskozitāte, blīvums) dēļ attiecībā pret labi atstrādāto - kausēšanas un attīrīšanas ziņā ērto - silīciju, uzvedas citādi. Attiecīgi audzēt germānija kristālu pēc peldošās zonas metodes ar adatas acs paņēmienu ar šobrīd pieejamajām tehnoloģijām rūpnieciski nav iespējams, ir izdevies iegūt niecīgus diametrus un ar sliktu formu. Tāpēc LU-FMF modelētāji pēc LU-ASI Atomfizikas un atmosfēras fizikas un fotoķīmijas projekta grupas ierosinājuma izstrādāja datormodeli, kas demonstrēja iespēju magnētisko levitāciju [1] vakuumā iegūt ar divām atsevišķi darbināmām indukcijas spolēm, kur viena pusvadītāju notur gaisā, bet otra silda. Tādā veidā, izvairoties no kontakta ar mēģenes sienām, var cerēt iegūt neparasti tīru kristālu.

Tad arī tika izvirzīti darba uzdevumi, kur autora daļa bija izstrādāt sistēmu augstfrekvences induktora iebarošanai, kamēr ar zemfrekvences induktoru nodarbojas cita komanda.

• **Pētāmā problēma** - vai ar mūsdienu lielām jaudām domātām komponentēm ir iespējams izveidot augstfrekvenču regulējamu induktora barotāju diamagnētiskās levitācijas eksperimentiem? Jo prognozētās prasības impulsu frontes noturīgumam sanāk ar kārtu gigahercs.

Tālāk tika izvirzīts arī darba mērķis, uzdevumi un hipotēze.

• **Mērķis** - izstrādāt shemotehniku un izmēģināt optimālos risinājumus un elementu bāzi minētā ģenerators izgatavošanai.

• **Uzdevumi** - izstrādāt un eksperimentāli pārbaudīt:

- ierosmes ģenerators darbību dažādām topoloģijām. Ģenerators pieskaņojams starp 0,5 - 3 MHz ar regulējamu impulsa platumu starp 5 - 49%;
- aizvara draiveri atbilstoši ātrdarbībai (<10 ns) un jaudai (30 kW);
- gala kaskādi uz esošas zemākām frekvencēm domātas šasijas bāzes.

• **Hipotēze** - pat mazas laboratorijas apstākļos uz pietiekami mūsdienīgu komponentu bāzes ir iespējams izveidot diamagnētiskās levitācijas eksperimentiem kvalificētu instrumentu ar pietiekami lielu jaudu un frekvenci.

# 1. LITERATŪRAS APSKATS

Šinī nodaļā tiek apskatīta nepieciešamība pēc jaunās, inovatīvās iekārtas, kā arī pēc labākas germānija kausēšanas un attīrīšanas tehnoloģijas. Tiek iztirzātas arī būtiskās silīcija un germānija zonu kausēšanas atšķirības, kuras rāda kādēļ mūsdienās germāniju pagaidām neaudzē ar bezkontakta metodēm.

## 1.1. Pusvadītāju kristālu audzēšanas un attīrīšanas aktualitāte

Tas, ka pusvadītāju attīrīšana ir aktuāls temats pierādās arī tepat Rīgā. Uzņēmums “KEPP EU” attīstās polikristālisko silīcija stieņu iegūšanā kausējot tos ar elektronu staru sildītājiem [2]. Toties no otras puses, piemēram, “Baltic Scientific Instruments Ltd” ir firma, kura izmanto ultraaugstas tīrības pusvadītāju kristālus dažādu spektroskopisko iekārtu izgatavošanai un ražošanai. Šīs ierīces tiek ražotas dažādiem mērķiem: zinātniskiem pētījumiem, kosmosa izzināšanai, kodolenerģijas industrijā u.c. [3].

Kopumā Eiropas Savienībā aptuveni 70 ražotnes, kas izmanto vēl neapstrādātu pusvadītāju materiālus un pasaulē tādu uzņēmumu skaits pat varētu tiekties uz tūkstoti. Toties problēma ir tāda, ka lielāko daļu pašus pusvadītāju kristālus, kā materiālus saražo vien pārdesmit organizācijas un visu pieprasītāju vēlmes netiek apmierinātas. Kas rāda, ka pusvadītāju attīrīšana šodien ir gana aktuāls temats.

Materiālu attīrīšanai ir pieejami dažādi procesi. Viens tāds process ir uz kristalizācijas virsmas, kur atšķirīgu dreifa ātrumu dēļ piemaisījumi tiecas kristalizēties telpiski atdalīti no pamatmateriāla. Šāds piemērs ir vairākas reizes atkārtots Čohraļska process, ražošanai šis piegājiens ir lēns un dārgs. Tāpēc šo procesu visbiežāk lieto jau izkausētam un attīrītam pusvadītāja šķidrūmam, lai kausējumu izaudzētu par monokristālu. Cits plašāk lietots process pusvadītāju attīrīšanā ir zonu rektifikācija. Tajā ar indukcijas sildītāja spoli rada ievērojamu elektromagnētiskā lauka intensitāti attīrāmajā materiālā. Tā tiek ražotas Fuko virpuļstrāvas, kas materiālu noteiktā apgabalā (zonu) uzkaršē līdz kušanai. Kopā ar šo karsto zonu dreifē arī piemaisījumi, bet tīrais materiāls tiecas piestiprināties kristalizācijas fronteī, jo atomārie spēki šinī vietā piemaisījuma atomus “vēlas” izstumt ārā. Šādā veidā induktoru velk no attīrāmā stieņa augšas līdz apakšai pietiekami daudzas reizes, kamēr tas kļūst iespējami tīrs. Zonu rektifikāciju izmanto arī Berlīnes Leibnica Kristālu Audzēšanas Institutā, kas arī izgatavo pasaulē tīrākos pusvadītāju (un arī ne pusvadītāju) monokristālus [4].

Attīrītu silīcijukā izejvielu šīnī institūtā šobrīd ražo ar adatas acs paņēmienu. Šī metode darbojas tā, ka, piemēram, 150 mm resnu silīcija stieni pludina cauri indukcijas sildītāja spoļei, tikai atšķirība ir tāda, ka šoreiz spoļes diametrs ir par kārtu mazāks nekā pašam stienim, un virsmas spraiguma spēks neļauj masai šaurajā vietā notrūkt. Šādā gadījumā tiek samazināta patērētā jauda, kas ir svarīgi, lai procesu padarītu lētāku un pieejamāku. Tas arī ir radījis izcilos rezultātus Leibnica Kristālu Audzēšanas Institūtā, protams, pieskaitot atbilstošos vakuuma apstākļus, pēc iespējas labākus materiālus konstrukcijām un citus aspektus, kas uzlabo darba kvalitāti [4].

Tomēr germānija kristālu (kas, piemēram, jau minētajām kodolspektrometrijas iekārtām ir grūti aizstājams un aktuāls materiāls) attīrīšanas jomā tik labi neveicas, jo izkausētā stāvoklī germānijs ir mazāk viskozs attiecībā pret silīciju, tā virsmas spraiguma spēki to nesatur kopā tik labi. Tas nozīmē, ka adatas acs tehnoloģija nav iespējama, bet izveidojot liela izmēra jaudas induktoru pa visu stieņa diametru, attīrāmajam materiālam ir vajadzīgs satvars jeb ampula. Germānija gadījumā iespējams lietot grafitu vanniņu (jo grafitu germānijs neslapina, un tas pats karst induktorā), kas ievietota kvarca ampulā (jo tas pacieš lielus temperatūras gradientus un labi notur vakuumu). Papildus materiālu tīra cirkulējošs ar pallādija membrānu attīrīts ultra-tīrs ūdeņradis [4].

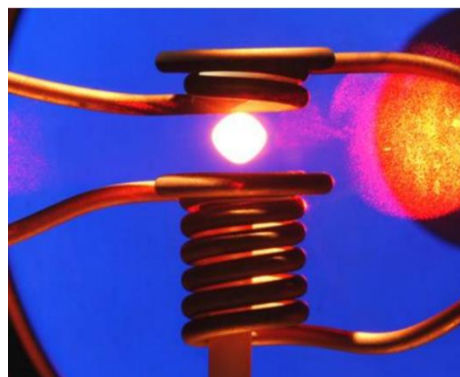
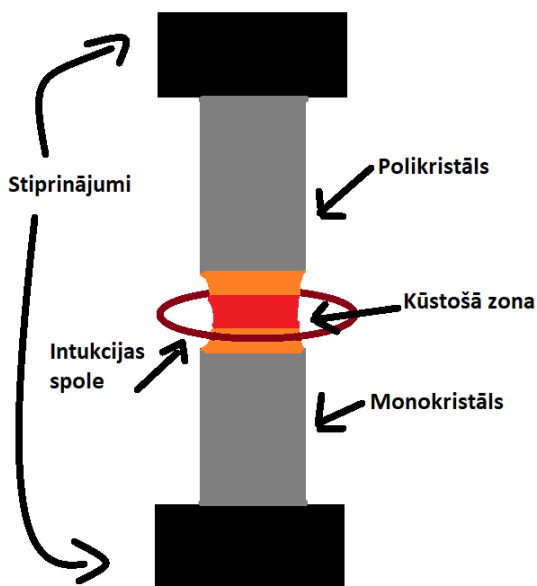
LU-ASI Atomfizikas un spektroskopijas institūta Atomfizikas, atmosfēras fizikas un fotoķīmijas projekta grupa organizēja virkni eksperimentu Latvijas Universitātes Cietvielu fizikas institūta telpās ar iekārtu kristālu audzēšanai Dr. Phys Āra Veispāla vadībā, izmantojot kvarca ampulu, kas no iekšpuses pārklāta ar augstas tīrības kvēpiem, ko ieguva ar radio frekvences induktīvi saistītās plazmas paņēmienu, sadedzinot uzliesmojošu īpaši tīru gāzi [5]. Diemžēl rezultāts nebija apmierinošs, Čohraļska procesā ar 30 kW 22 kHz induktoru rezultāts tika iegūts ne labāks kā kvalitatīvs vēl neattīrīts materiāls. Berlīnes institūtā silīcijs tiek vilkts vertikālā stāvoklī, kamēr germānijs ir horizontālā stāvoklī un ir konstatēts, ka pietiekami tīrs ampulas materiāls (cietvielas ogleklis) tiek ražots tikai konkrētā vietā Amerikas Savienotajās Valstīs, un vēlmes par tā tīrību ir augstākas kā reāli tas ir pieejams. Kā indikators teiktajam ir tas, ka mēnesi pēc LU-ASI un LU-FMF kopēja raksta publicēšanas Latvijas Universitātes vietējā izdevumā par iespējamu metodi vēl labākas tīrības iegūšanai, Berlīnes institūta speciālisti rakstu bija paši atraduši un to zināja. Tātad tēma ir interesanta un aktuāla.

## 1.2. Pusvadītāju attīrīšana ar peldošās zonas metodi

Silīcija vai germānija audzēšanai ar peldošās zonas metodi jāiedomājas divas dažādas darbības shēmas. Vienā gadījumā, audzējot silīcija monokristālu, aparāta augšgalā tiek turēts polikristāliskais pusvadītājs tas tiek lēnītēm vilkts cauri indukcijas spolei. Ja runājam par adatas acs metodi, tad indukcijas spoles apgabalā novērojams sašaurinājums, kur arī kristāls tiek pārkausēts. Tomēr germānija gadījumā attiecīgie posmi tiek veikti speciālā vanniņā un pats kausēšanas process notiek horizontāli. Kā arī germānija gadījumā parasti par adatas acs metodi netiek runāts.

### 1.2.1. Silīcija kristāliem

Kā jau tika minēts, silīciju ļoti bieži audzē ar zonu rektifikācijas paņēmienu un vēl to var uzlabot ar adatas acs metodi (sk. 1.1. a) attēlu). Brīdī indukcijas spoles tuvumā, kad pie kristāla malām esošais silīcijs ir izkusis tas notek zemāk un sacietē nepieciešamajā vietā veidojot monolītu. Tā kā ir zināmi šī izkausētā materiāla tecēšanas paradumi, ar precīzi ieregulētu indukcijas spoles vilkšanas ātrumu var paredzēt kurā tieši vietā viela kristalizēsies. Tādejādi var izaudzēt diametrā lielus monokristālus (vēsturiski pirmie industrijas standarti bija 50 mm, vēlāk 100 mm, bet tagad līdz pat 300 mm diametrā), kurus tālāk pārdot ražotājiem. Šī metode jau ir ļoti pazīstama un atstrādāta [6].



1.1 att. Kristālu kausēšana: a) peldošās zonas metode izmantojot adatas acs paņēmienu; b) bezkontakta levitācijas kausēšana ar indukcijas spoles palīdzību [7]

### 1.2.2. Germānija kristāliem

Šobrīd tūrākie germānija monokristāli tiek ražoti Berlīnē. Toties germāniju audzēt pēc adatas acs metodes pagaidām vēl nav tik vienkārši. Lielākais iegūtais ar induktora spoles palīdzību kausētais un audzētais germānija kristāls ir ar diametru 35 mm [8]. Šobrīd zonu kausēšana notiek horizontāli germānija gadījumā, ne tā kā silīcijam - vertikāli. Tas nozīmē, ka germānija gadījumā ir jāizmanto speciāla, piemēram, grafiņa vanniņa, kurā to kausēt [9]. Vanniņas izmantošana, nozīmē, ka kausētā masa saskarās ar citiem atomiem un molekulām, kas galā noved pie vairāk defektiem kristāla struktūrā nekā audzējot kristālu ar vertikālo peldošās zonas vai bezkontakta metodi (sk. 1.1 b) attēlu).

Pagaidām ar germāniju vēlamie rezultāti pēc adatas acs metodes vēl nav iegūti, jo izkausētas šīs vielas parametri manāmi atšķiras no silīcija parametriem. Germānija blīvums  $\rho_{Ge} = 5570 \frac{kg}{m^3}$  ir vairāk kā 2 reizes lielāks nekā izkausētam silīcijam. Kā arī ir novērojamas atšķirības virsmas spraiguma un viskozitātes ziņā [8]. Šo parametru atšķirības arī noskata to kādēļ silīcija un germānija zonu rektifikācijai nevar izmantot tos pašus aprātus.

Tāpēc šī darba gaitā ir vēlme izveidot ierīci, kas vakuuma magnētiskās levitācijas apstākļos izkausē germāniju. Šādas iekārtas izveidošana palīdzētu izprast kristāla audzēšanu gan peldošās zonas, gan bezkontakta vidē.

### 1.3. Veicamā darba priekšvēsture un motivācija

No tikko pavēstītā secinājuma izriet, ka tādā gadījumā attīrot germānija kristālus nav nepieciešama ne kvarca, ne ogles ampula materiāla formas saglabāšanai, kas arī parasti ir vislielākais pusvadītāju piesārņojumu avots. Magnētisko levitāciju nemagnētiskiem materiāliem pagājušā gadsimta septītās desmitgades sākumā izstrādāja Latvijā, Zinātņu Akadēmijas Fizikas institūta Salaspils magnetohidrodinamikas laboratorijās, kas darbojas līdz pat šim. Šo procesu izmantoja arī plastmasas detaļu orientēšanai uz tā laika "VEF" konveijeriem, vēlāk arī nemagnētisko šķidrumu sūkņu konstrukcijās, kas ir darbināmas arī kodolreaktoru aktīvās zonas tuvumā vai ar līdz nenormāli augstām temperatūrām uzkarstētiem metāliem kā "TOKAMAK" (toroidāla kamera ar magnētiskām spolēm) vai līdzīgos projektos [10].

Tomēr metodei, lai rastos magnēta radīts spēks vai spēka plecs, ir nepieciešama, kaut neliela, ceļamā materiāla elektrovadītspēja. Un gan silīcijam, gan germānijam izkausētā stāvoklī tāda piemīt, daudz izteiktāka nekā cietā. Tāpēc arī zonu rektifikācijas speciālisti saka, ka vēl

auksts materiāls elektromagnētisko lauku “neņem pretī”, bet kad tas ir uzsilis ir gluži otrādi. Reāli šī parādība tiek novērota, jo pusvadītājus karsējot to īpatnējā pretestība būtiski samazinās [11].

LU-FMF speciālisti pielietojot “ANSYS” un citus datormodelēšanas rīkus ir aprēķinājuši nepieciešamās lauka konfigurācijas un intensitātes, lai nodrošinātu pusvadītāju levitāciju vakuumā. Silīcija gadījumā tas jau ir eksperimentāli pārbaudīts, taču ar germāniju darbs tik labi nesokas. Jau minētās LU-ASI projekta grupas veica eksperimentu izmantojot divus RF ģeneratorus, kur ZF diapazonā tiek nodrošināts augšup un reizē sāniski uz centru vērstu lauks ar tīri mehānisku raksturu, bet otrs, AF ģenerators, materiālu karsē. Modelējot tika noskaidrots, ka ZF ģeneratoram jābūt robežās no 1 kHz līdz 10 kHz un AF ģeneratoram jābūt robežās no 0,5 līdz 3 MHz. Tā kā šādu nepieciešamo aparatūru iegādāties nav iespējams, tad 2017. gadā LU-ASI un “Baltic Scientific Instruments Ltd” solidāri finansēta projekta ietvaros izgatavoja iekārtas ar 1 kW lielu RF jaudu. Diemžēl mehāniskā iedarbība bija par vāju, lai paceltu 3 cm resnu stienīti, taču tas teju bija gatavs levitēt, ja būtu bijusi nedaudz lielāka pieejamā jauda. Termiskā iedarbība arī bija tik vāja, ka izkausēšana aizņēma teju stundu, kad mērķis bija dažas sekundes. Respektīvi, tika apstiprināts modelējuma korektums, taču vēlmes realizācijai ievērojami pietrūka indukcijas ģeneratoru jaudas.

Cerībā, ka šinī jomā Latvija varētu kļūt par līderi Pasaulē, autors LU-ASI izstrādāja AF ģeneratora daļu, kamēr ZF daļu veido projekta grupa. Vēlāk ģeneratoru komplekti tiks palaisti kopā, tos izmēģinot atbilstošā fizikālā eksperimentā.

## 2. MATERIĀLI UN METODEDES

Šī nodaļā tiek izklāstīts par darba gaitā izmantotajām metodēm un resursiem. Tiek apskatīti arī pētītie modeļi un spriests par to darbības principiem. Vēl nodaļā aprakstīta specifiska vara celiņu izkodināšanas tehnika.

### 2.1. Shēmu analizēšana un modelēšana

Darbu veikšanai tika izmantotas dažādas metodes. Sākotnēji tika apgūta literatūra par to kā tiek kausēti silīcija un germānija kristāli šobrīd. Kas savukārt noveda pie pieņemto uzdevumu izvirzīšanas un izpētes. Tāpēc pētījuma izpilde arī ir sadalījusies trīs pagaidām vēl atsevišķās daļās, kur pirmā ir impulsu ģenerēšanas shēmas izveide, otrā draiveru palaišana uz norakstītas “Huttinger” gala kaskādes bāzes, kā apstrāde arī būtu trešais posms Tālākā posmā tiks pieslēgta atbilstoša augstfrekvences indukcijas spole.

Izveides procesa gaitā šāda konstrukciju atsevišķa komplektēšana šķita drošāks risinājums, jo tad pieļautās kļūdas, kuras elektronikas jomā ir teju neizbēgams posms, ir vieglāk atrast un izlabot. Lai gan tehniski katra atsevišķā daļa pati par sevi darbojas, tomēr gala variantā impulsu ģenerators, izejas kaskāde un pati spole visi kopā vienotā ierīcē savienoti netika.

Izstrāde aizsākās meklējot tipveida risinājumus līdzīgām problēmām literatūras avotos, un pārstrādājot tos uz atbilstoši ātrdarbīgu elementu bāzi, veidojot arī iespiedplates trasējumu. Sākotnēji shēmas tika uzzīmētas ar roku, līdz derīgam risinājumam. Tad tika izmantota datormodelēšanas programma “SPICE LT” (sk. 10. pielikumu). Ar šo programmu pirms shēmas palaišanas atsevišķi shēmas fragmenti tika pārbaudīti - vai attiecīgā komponentu ķēde izejā dod vēlamu rezultātu. Lai gan pati programma nesaturēja visu izmantoto un vēlamu komponentu datubāzi, t.sk. mikroshēmas, tad nācās iztikt ar līdzvērtīgu komponentu risinājumiem, kuri tomēr dažu fizisko parametru ziņā atšķiras (ātrdarbība, iekšējā kapacitāte, maksimālā pieļaujamā jauda u.c.).

### 2.2. Praktiskā darba izpilde

Darba praktiskā daļā daudz laika paņēma montāžas platīšu lodēšanas. Tika izmantotas dažādas elektroniskās komponentes: atšķirīgu izmēru vadi, rezistori un maiņrezistori, kondensatori (gan elektrolītiskie, gan keramikas) un maiņkondensatori, spoles, diodes, visdažādākie tranzistori, optroni, dažādi loģiskie elementi (UN-NE, VAI-NE), AC/DC adapteri

kā strāvas avoti (t.sk. telefona un citu ierīču lādētāji), sprieguma regulatori, komparatori, trigeri u. c.

Nākamā apjomīgākā daļa sevī ietvēra izveidoto shēmu darbības pārbaudīšanu. Ar to šeit domāts, ka sākotnēji ar lupas vai mikroskopa palīdzību tika novērtēta lodēto savienojumu kvalitāte, kā arī vajadzēja pārlicināties vai vēlamā komponente ir nonākusi atbilstošajā vietā, vai nesaskarās ar citām, vai tiek darīts viss, lai izvairītos no īsslēguma. Pēc tam, kad montējums uz iespiedplates bija vizuāli novērtēts, to slēdza pie strāvas avota.

Kā barošanas strāvas avoti impulsu ģenerators darbināšanai izmantoja AC/DC adapteri piemēram, 9 V (sk. 2.2 a) attēlu), kurš ar sprieguma lineārā regulatora (LDO) 7805 palīdzību tālākajā shēmā padeva 5 V spriegumu. Tādā pašā veidā tika risināta situācija 12 V sprieguma iegūšanai, kur pielietots 18 V (skatīt 2.2 b) attēlu) līdzstrāvas adapteris un 7812. Savukārt negatīva sprieguma iegūšanai tika izmantoti līdzīgi regulatori, bet no 7900 sērijas.



a)



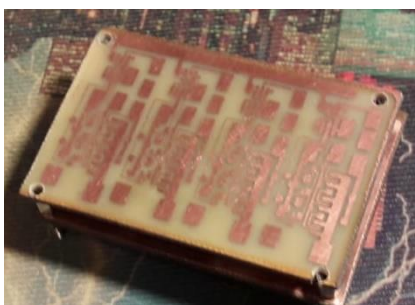
b)

2.2 att. AC/DC adapteri ar izejā dodošu a) 9 V; b) 18 V spriegumu

### 2.3. Sākotnējās iespiedplates izveide

Ar "Sprint Layout v.6" palīdzību tika izkonstruēta divslāņu iespīestās plates topoloģija, kas domāta lodēšanai ar SMD tehnikai raksturīgiem paņēmieniem (t.i. bezcaurumu tehnika) (sk. 3. un 6. pielikumu) tika izdrukāts ar augstas izšķirtspējas krāsainu lāzerprinteri uz caurspīdīgas kodoskopa plēves ar 120% krāsas blīvumu, jo šādi melno komplektējot no RGB vienlaicīgi, var iegūt nesalīdzināmi labāku melnā toņa optisko necaurlaidību, un tas tālāk ir svarīgi. Uz FR4 [12]

materiāla ar foliju pārklāta stikla tekstolīta sagataves no rokas aerosola baloniņa tika uzpūsts “Positivus-20” fotorezists, nožāvēts gaisā, tad nocietināts aptumšotā žāvēšanas skapī pie 60 °C, eksponēts 11 sekundes zem 405 nm LED lampu matricas ar 24 gabalas 3W LED attālumā 20 cm no plates. Tad plati attīstīja NaOH 10 g/l remdeni siltā šķīdumā ar maigu otiņu, tad pastiprināti žāvēja skapī un kodināja koncentrētā Fe<sub>2</sub>Cl<sub>3</sub> pie apmēram 60 °C 10 minūtes. Tehniski būtu bijis iespējams plati pārklāt ar zaļā fotorezista speciālo laku, tas uzlabotu plates noturību pret smagiem ekspluatācijas mikro meteoroloģiskajiem apstākļiem telpās, taču stipri apgrūtinātu jebkādu izmaiņu veikšanu platē. Tā kā apjoms šāda veida darbam sākotnēji nešķīta tik liels, tad labi, ka laku nepielietojām (sk. 2.3 attēlu).



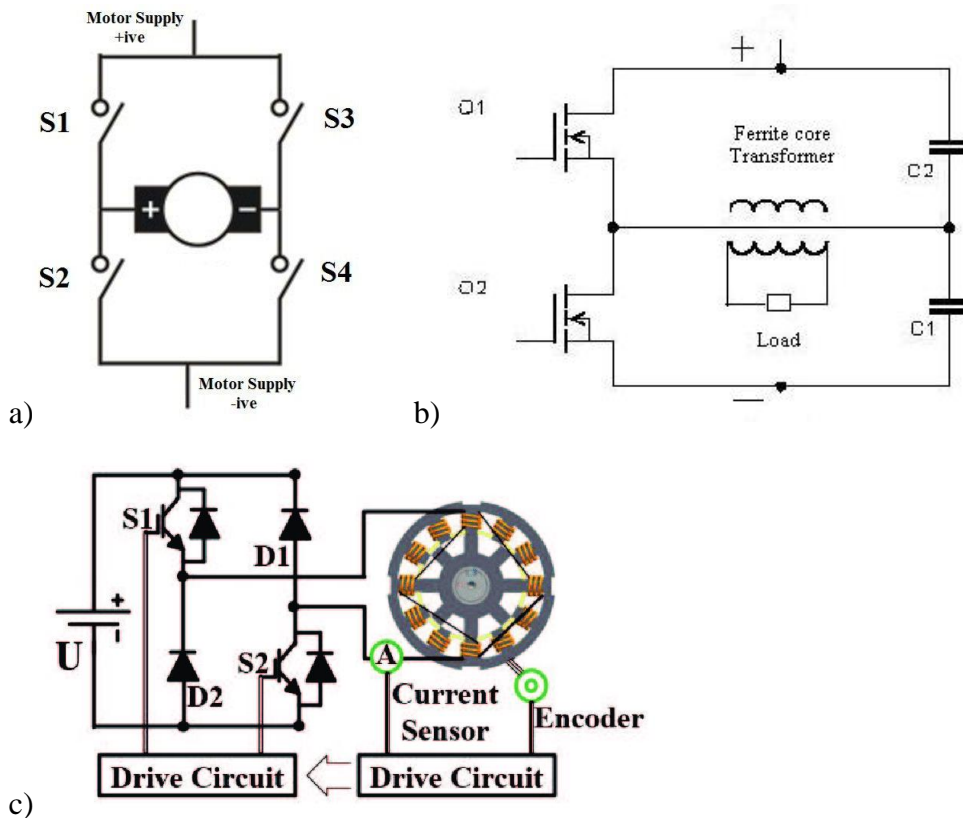
2.3 att. Izkodinātā iespiedplate

#### 2.4. Pirmās shēmas izvēle

Kā iepriekš pēc modeļa noskaidrots, ka AF ģeneratoram jādarbojas ar frekvenci robežās no 0,5 līdz 3 MHz, tad tika izvēlēta 3 MHz ģenerators izveide ar maksimālo vērtību ap 30 kW.

Sākotnēji šķīta, ka šo ģeneratoru varēs uzkonstruēt pēc Klappa vai modificētā Klappa shēmas, jo tā ir spējīga spoles spriegumu daudzkārtēji palielināt līdz pat desmitiem kilovoltu un vairāk. Taču līdz šim LU-ASI eksperimentos šāda veida ģeneratorus ir spējuši izveidot līdz orientējoši kilovatom, un tālāk neeksistē pienācīga elementu bāze. Protams, var galā saslēgt vairākus tranzistoru paralēli, taču tādā gadījumā strauji nokrītas iespējamā darba frekvence, palielinās fāžu salāgošanas kļūdas, silšana un tik un tā jauda nerasniedz vēlamo. Turklāt jāņem vērā, ka Klappa shēmai spole ir vienlaikus frekvenci ierobežojošs elements, tāpēc sistēma ir grūti pārskatājama un vēl grūtāk pārskatājama operatīvi. Tāpēc Klappa shēma tika atmesta [13].

Parasti jaudām sākot ar kilovatu un vairāk, lieto tilta (sk. 2.4 a) attēlu) vai pustilta (sk. 2.4 b) un c) attēlu) izejas kaskādi [14].



2.4 att. a) Tipisks H-tilta slēgums jeb pilna tilta slēgums, kur motors ir slodze [15]; b) tipisks (vertikālā) pustilta slēgums [16]; c) tipisks asimetriskais pustilta slēgums [17]

Respektīvi DC/DC SMPS barošanas avota shēma (ar ne sevišķi izdevušos latviskojumu - impulsu barošanas avots), sākas ar specializētu daudzfunkciju mikroshēmu, kas ģenerē atbilstošu frekvenci, realizē tai impulsa platuma modulācijas vadību (tas ir regulē D-faktoru), organizē minimālās aiztures laikus starp augšējo un apakšējo izejas tilta plecu, lai nepieļautu caurpūtes strāvas, un atrisina jautājumus par izejas IGBT draivera nepieciešamību, ja vien nav paredzēta ārēja būstera kaskāde aizvara stūrēšanai. Turklāt shemotehnika būtiski neatšķiras, vai tiltā izmanto IGBT atslēgas vai MOSFET atslēgas. Tomēr tikai pēc darba uzdevumu izvirzīšanas tapa skaidrs kāpēc pasaules tirgos nav laba piedāvājuma 3 MHz indukcijas ģeneratoriem. Lai arī vispār eksistē zinātniskās publikācijas par eksperimentiem SMPS jomā ar 1,5 un 3, un pat 5 MHz [8], tomēr pašas ātrākās specializētās PWM mikroshēmas šajā nozarē ir 1 MHz ar iespēju daļēji pietuvoties 1,5 MHz, un tām nav iespējas panākt impulsa platuma jaudas regulēšanas režīmu. Respektīvi, nav mikroshēmas, tāpēc nav aparātu. Tomēr te var iztēloties laikus, kad dažas desmitgades atpakaļ parādījās pirmie diezgan neveiklie impulsu barošanas avoti, un tiem atbilstošās funkcijas tūri labi realizēja vēl neveiklākie Padomju Savienības operacionālie

pastiprinātāji tādi kā 140YД1 vai Rīgas produkts 153YД1 u.tml. To darba frekvence bija dažāda kHz, bet mūsu mērķis ir 3 MHz [18]. Tāpēc tika izvērtēts par kādām prasībām ātrdarbībai vispār iet runa, un faktiski rezultāts būs stipri šokējošs.

Lai panāktu pietiekami ideālu aizvarus stūrējošajam meandram kreisās puses atslēgu pusperioda laika atbilstību labās puses atslēgu pusperiodam, tad parasti tiek ģenerēta divas reizes lielāka frekvence un to dalot ar divi kādā trigerī (TT vai D, vai retāk RS) iegūst atbilstoši supersimetrisku signālu [13]. Vispārīgā gadījumā, pat tik mazai nesimetrijai kā 0,1-0,01 % ir tieksme uzkrāties serdeņa materiālā kā palielošajam laukam, pakāpeniski izveidojot DC magnētiskā lauka pārsātinājumu, tā radot problēmu. Tātad signāla impulsa platums būs minimāli 10% dēļ PWM regulācijas uz 10% jaudas kopā ar 6 MHz jeb 60 MHz. Bet frontes augšanas ātrumam jābūt vismaz 100 reiz labākam, tātad 6 GHz, kas ir pilnīgi nereāli. Tomēr 0,6 - 1 GHz ir iedomājami, tikai jā rūpējas par pietiekami simetrisku shemotehniku un tās izpildījuma topoloģiju. Te ar 1 GHz frekvenci tiek iztaisīta 1:200 jeb 0,5% novirze, kas nemagnētiskam serdenim ir pieļaujams ierobežojums.

Tālākais uzdevums ir ģeneratoram ietaisīt impulsa platuma attiecības jeb koeficienta D regulēšanas iespējas. Protams, principā gan varētu jaudas regulēšanu veikt arī mainot barošanas spriegumu, taču 30 kW gadījumam operatīvi (mikrosekundēs) izregulēt barošanas maģistrāles ar 535 V spriegumu un  $I = \frac{30 \text{ kW}}{535 \text{ V}} = 56 \text{ A}$  strāvu ar analogās tehnikas metodēm ir grūti, izdalāmā siltuma plūsmas, kā arī pieejamo elementu bāzes dēļ.

Cits paņēmiens iespējams kā regulēt taisnoto barošanas spriegumu ir ar atsevišķu PWM regulatoru, piemēram līdzīgi kā jaudas koeficienta korekcijas shēmās [13]. Tomēr tāda atsevišķa impulsa platuma regulatora lietojums nozīmē visas tās pašas problēmas tikai ar dubultā dārgu jaudas tranzistoru matricas izmēru un skaitu, turklāt jaudas koeficienta korekcija zinātniskas nozīmes eksperimentālām ierīcēm pagaidām nav obligāta. Tāpēc impulsa platumu visizdevīgāk ir realizēt uzreiz uz RF tranzistorus stūrējošā signāla.

Vispār gan, PWM papildus kaskādes regulējošie tranzistori varētu būt pieļaujami lēnāki par sākotnēji izvēlētajām gala kaskādes atslēgām, taču ne ļoti. Un tas būtiski atvieglotu frekvences prasības ģenerators un tā izejas kaskādēm. Principā, vēl šo jaudas regulēšanu var arī realizēt ar samērā vienkāršu tiristoru jaudas regulatora palīdzību, taču tad sistēmas jaudas izmaiņas aizkave būtu ar kārtu 10 milisekundes, kas ir apmēram 3 līdz 4 kārtas par lēnu, un elektromagnētisko traucējumu tīklā blīvums varētu reāli traucēt tīkla apakšstacijas ietvaros [13]. Tāpēc optimāli ir

organizēt PWM jau pamata signālā, un barošanu reducēt uz pilna viļņa trīsfāzu tiltu ar ne pārāk lielu kondensatoru bateriju, un minimālistisku prettraucējumu filtru.

Lai organizētu impulsa platuma regulēšanu ir nepieciešams spēt mainīt stūrējošo impulsu D-faktoru, kas ir attiecība starp atvērto laiku un aizvērtu laiku. Lai nesamaitātu supersimetrijas prasību, sistēmai jābūt izteikti lineārai. Tāpēc tika izvēlēts sākumā šķietami sarežģīts paņēmieni, kas tomēr ļauj vienā mezglā apvienot vairākas funkcijas vienlaicīgi, tāpēc galu galā izrādās saprātīgi vienkāršs. Uzdodošajam signāla takts avotam ir jābūt nevis meandriskam kā parasti līdzīgās shēmās, bet ultra-lineāram zāģzoba signālam. Uz tā ultra-ātrdarbīgu komparatoru ķēde spēj identificēt iecirkņus, kas atbild par gala tranzistoru atvēršanu un aizvēršanu, vienlaikus saglabājot iespēju atdalīti katru ar savu kloķi operatīvi regulēt D-faktoru, frekvenci, un pat drošības zonas platumu (lai nepieļautu caurpūtes strāvas) [19].

Ir zināmas dažādas sistēmas, kas spēj ģenerēt zāģzoba formas signālu [13], taču tās par ultra-lineārām nevar nosaukt pat ar piespiešanos, un par 6 MHz darba frekvenci ne tik. Tāpēc pirmajā shēmas gadījumā tika pieņemts lēmums par kvalitatīva kondensatora uzlādi ar ultra-konstantas strāvas avotu (Vilsona spoguļi) un uzlādes/izlādes atsākšanu pēc vēl cita, atsevišķa komparatora signāla.

## 2.5. Optiskā atsaistīšana

Parasti indukcijas spoles vai kādas citas slodzes divpusējai darbināšanas (pulksteņrādītāj virzienā un pretēji) iespējai izmanto H tiltu vai kādu no tā paveidiem [13] (sk. 2.3 attēlu). Mūsu gadījumā tas ir nepieciešams, lai iegūtu mainīgu elektromagnētisko lauku, ar kura palīdzību arī tiktu sildīti attiecīgie diamagnētiķi. Tā kā šī procesa darbināšanai ir nepieciešama 30 kW liela jauda, tad arī ir jāizmanto gana liels, ap 535 V, spriegums. Tas nozīmē, ka starp šīnī slēgumā izmantotajiem IXFH42N60 [20] arī pastāv šī lielā potenciālu starpība. Tas arī rada draudus, ka šāda sprieguma nonākšana citās, ne tam domātās komponentēs momentāni tās iznīcinās.

Sākotnējās shēmas ietvaros arī tika nolemts, ka starp ģenerēto signālu un indukcijas spoles darbināšanu jāizveido optiskā atsaistīšana (sk. 5. pielikumu). Pat tika izkodināta speciāla iespiedplate šai izpildei. Tātad no impulsu ģeneratora iespiedplates signāli nonāk uz optronu (ISO721M [21]) matricu, lai nerastos problēmas ar augšējā pleca un apakšējā pleca līmeņu atšķirībām (sk. 2.5 attēlu). Optroni atkal tika atlasīti ātrākie no ātrākajiem, ar mazāku kā nanosekundes aizkavi.



2.5 att. Optiskās atsaistes shemotehnika ar tālāk sekojošo draiveru kaskādi

Tiesa, vēlāk izrādījās, ka bez tiem var iztikt (kas ir rets gadījums SMPS shemotehnikā). Izvēlētais “Huttinger” karkass ar tajā jau ievietotajām vara un ūdens dzesēšanas masīvajām elektromehānikas detaļām “ļāva” izveidot tikai un vienīgi kādu īpašu, literatūrā maz aprakstītu “horizontālā” pustilta slēgumu. Šādā gadījumā starp gala atslēgām (IXFH42N60) nemaz domātā potenciālu starpība nepastāv, jo šīs komponentes nav pievienotas pie zemes.

## 2.6. Draiveru komplekts, gala kaskāde un spoles izvēle

Tā kā šis no impulsu ģeneratora nākošais signāls ir pārāk vājš, tas ir jāpastiprina. Protams, to var paveikt ar radiatoraidītāju shemotehnikas paņēmieniem, taču tad jāaizmirst par frekvences regulējamību un D-faktora mainīšanu, jo shēma būs rezonātīva. Tāpēc izvēlēti tika klasiski digitāli risinājumi, no kuriem pats vienkāršākais būtu gatava aizvara draivera mikroshēma. Izrādās ka, pasaulē tik ātru ražo tikai viena firma, un tā ir samērā mazjaudīga mikroshēma, kas strauji samazina ātrdarbību, ja aizvara kapacitāte ir virs 1000 pF. Taču tā pieļauj brutāli paralēlu slēgumu pati ar sevi. Tāpēc tika izvēlēts katram plecam viens kanāls, kas aizvaru atver, un otrs, kas aizver. Katrs šis kanāls sastāv no 2 paralēliem draiveriem. Un izejas kaskāde ir pustilta kaskāde, tāpēc komutējamo gala atslēgu skaits ir 2 (bloki). Respektīvi, ir 4 izejas no impulsu ģeneratora shēmas, kur katrai seko divi paralēli 1 GHz spējīgi draiveri, kur viens slēgts no aizvara uz peldošu masu, otrs uz peldošu 12 V spriegumu. Gala atslēgas ir 6 gabali paralēli IXFH42N60 katram plecam [20], kas LU-ASI sevi pierādījuši par ļoti uzticamiem līdz gandrīz 100 MHz spējīgiem augstas jaudas MOSFET, kas tālu pārspēj ātrdarbībā un daļēji arī jaudas ziņā un pamatīgi robustuma ziņā vēl nesen tik slavēto “IXYSRF” sērijas, tādu kā DE275 vai DE375

[22]. Tātad gala kaskādē uz kopēja radiatora ir samontēti 12 gabali šādi tranzistori, kas ir labākais ko šobrīd par naudu var nopirkt.

To, ka radiators ir kopīgs, nosaka fakts, ka tika izmantots lietots 20 kHz 30 kW ģenerators konstruktīvs (sk. 2.6 attēlu). Tajā ir pareiza šķērsriezuma masīvas vara vadotnes uz pareiza izmēra radiatoriem ar garajiem ieurbumiem, dzeses ūdens cirkulācijai u.c. rupjas elektromehānikas elementi, kādus paša spēkiem būtu grūti izgatavot. Un, ja tajā radiators izmanto pustiltu, tad pārtaisīt to uz H-tiltu ir pārāk darbietilpīgi. Respektīvi, 6 reizes par 5000 pF ir aizvaru kopējā kapacitāte 30 nF, bet draiveris pieļauj maksimums 2 nF. Tāpēc starp katru draiveri un gala atslēgām tiek pielietoti divi tikai šogad ražošanā palaists tranzistors, kuram bijām vieni no pirmajiem pircējiem, APT6038, kas ļauj strādāt nedaudzu simtu MHz rajonā ar 1850 pF aizvara kapacitāti [23], tādā veidā nepārslogojot draiveru pāra slodzes spēju.



2.6 att. Uz “Huttinger” karkasa bāzes izveidota gala kaskāde

Aiz gala atslēgām seko rezonanses tanks, un uz to paredzama ļoti ievērojama reaktīvā jauda, respektīvi, kondensatoru silšana. Šobrīd nav resursu šo kondensatoru attīstīšanai, tāpēc kā pagaidu līdzeklis tiek izmantota augstsprieguma DC impulsu cauruļveida teflona kondensatoru baterija. Varētu lietot arī DC domātus diskveida keramisko kondensatoru bateriju, taču tā biežāk sasprāgst un slikti iederas konstrukcijā pēc formas. Izmēģinājumu gaitā kondensatori var sasprāgt, taču nākotnē ir divas iespējas - dabūt finansējumu un iepirkt kvalificētus “Vishay” kondensatorus [24] apmēram 6000 Eur vērtībā par gabalu, vai iepirkt Rogers ražotu “Duroid” iespiestshēmas plati [25], kas ir uz galvanizētas armētas teflona bāzes, domāta darbam līdz 1 GHz un atšķirībā no parasta stikla tekstolīta FR2, FR4 un tamlīdzīgiem tam ir nevis  $\tan(\varphi) = 0,05$  bet gan 0,0003. Tātad silšana ir tikai pusotru reizi stiprāka kā labākajiem no Vishay reaktīvās jaudas spējīgiem kondensatoriem, toties cena ir daudz mazāka. Ja 1 cm<sup>2</sup> ar “Duroid”

materiālu dod orientējoši 2 pF, tad viena A3 izmēra loksne ar to maksā apmēram 400 USD.

Salīdzinot ar klasisku FR4 materiālu par 10 - 15 EUR par tādu pašu loksni, tas var šķist daudz, taču ar FR4 nav iespējams panākt kontūra labumu (Q) virs 10, 20, savukārt “Duroid” nodrošina 200 - 1000. Tāpēc izvēle ir šaura un nav lēti atrisināma.

Ja mēģina uzminēt induktora spoli ar trim vijumiem un 55 mm diametrā, tad tādas induktivitāte būs orientējoši (atkarīgs no plānotā spoles izstiepuma 55 mm, vara 8 mm caurulītes, kam tek cauri dzeses destilāts, veidotā vada diametra u. tml.), tad 3 MHz rezonanse veidojas pie 13 nF, bet pie 0,5 MHz pie 500 nF. Tā rāda modelēšanas programmatūra “Coil v.1”. Tātad izejas kondensatoriem jābūt pats mazākais 1 mikrofāradam, lai novērstu izejas ķēdes rezonātīvu raksturu.

Respektīvi, ja orientējas uz “Duroid”, tad nepieciešamais laukums ir pusmiljons  $\text{cm}^2$  jeb 50  $\text{m}^2$ . Respektīvi, zemākajās frekvencēs “Duroid” nav risinājums vispār. Savukārt pie 3 MHz jeb

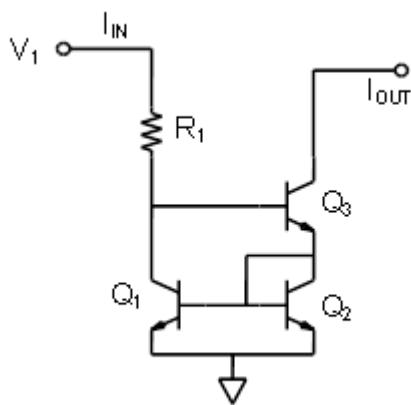
$S = \frac{13000 \text{ pF}}{2 \frac{\text{pF}}{\text{cm}^2}} = 0,65 \text{ m}^2$ , kas ir ļoti sakarīgs izmērs, īpaši, ja plati sadala daudzās sekcijās.

### 3. REZULTĀTU ANALĪZE

Šajā nodaļā tiek pastāstīts par izskatītajiem variantiem galvenokārt impulsu ģenerators izveidei, par tehniku un komponentu izvēli.

#### 3.1. Pirmās iespiedplates realizējums

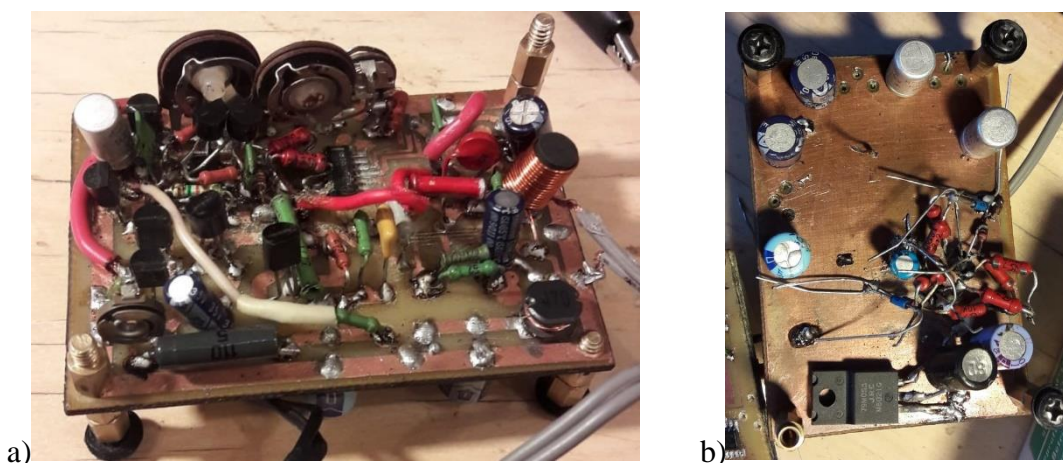
Lai uzorganizētu kvalitatīvu strāvas avotu tika izvēlēta strāvas spoguļa shēma. Taču, lai minimizētu nevēlamus temperatūras efektus un panāktu labāko iespējamo strāvas stabilizācijas faktoru, tika pielietota Vilsona strāvas spoguļa shēmatēhnika [26] uz visai parastu bipolāro tranzistoru bāzes (sk. 3.7 attēlu). Sākotnēji tika iepļānoti bipolārie tranzistori BC548 [27] to salīdzinošas ātrdarbības un pieejamības dēļ, taču drīz tika saprasts, ka ērti būtu ģeneratoru slēgt (barošanas terminos) ultra-lineārajam kondensatoram “no augšas”. Tas nozīmē pnp nevis npn tranzistora struktūru, tāpēc tika izmantoti Rīgā ražoti KT3107 tranzistori [28], kas atlasīti ar vienādām beta vērtībām. Pieņemot, ka tiem reglamentētā  $f(T) = 300 \text{ MHz}$  ir 50 reizes lielāka par 6 MHz darba frekvenci, tad ietekmi uz gala signāla precizitāti tiem nevajadzētu radīt. Operatīvi mainot viena pleca darba punktu šai shēmai, otrs plecs atseko un stabilizē šo strāvu, kas arī uzlādē kondensatoru. Tika vērtēta izvēle starp vizlas vai keramikas 300 pF kondensatoru. Ir zināms, ka vizla pie 6 MHz jūtami silst (tātad nemaz nav tik lineāra), tāpēc tika izmantots caurulītes tipa KT2 keramikas kondensators, kas atlasīts ar mazu noplūdi (sk. 1. pielikumu).



3.7 att. Tipiska Vilsona strāvas spoguļa topoloģija [29]

Atsevišķs ultra-ātrdarbīgs komparators kontrolē šī kondensatora spriegumu, kad tas paceļas virs 2,5 V references sprieguma, ko organizē augstas precizitātes inversais paralēlais stabilizators uz TL431 [30] bāzes, tad tas pārmet ultra-ātrdarbīgo trigeri tā, ka kondensatoru noīšina izlādi

kontrolējošais tranzistors. Kad kondensatora spriegums nokrīt zem 1 V, kuru organizē tas pats jau pieminētais TL431 caur pretestību dalītāju, tad trigeris pārmetas pretējā stāvoklī, noīsinošais tranzistors atslēdzas un atkal atsākas kondensatora uzlādes cikls. Ja var paredzēt, ka pie ļoti maziem un ļoti augstiem spriegumiem ar zāģa signāla linearitāti var būt problēmas, tad šajā samērā šaurajā apgabalā linearitāte ir maksimizēta. Respektīvi zāģzoba formas ultra-lineārs signāls ar 1 - 6 MHz frekvenci ir uzģenerēts. Par trigeri tika izvēlēti paši ātrākie pieejamie VAI-NE elementi ar 1,1 GHz darba frekvenci un aizturi ar kārtu 1 - 10 ns. Netika izmantota specializēta trigeru shēma, jo izejas signāla formēšanai arī ir nepieciešami VAI-NE elementi, tāpēc šādi var ietaupīt mikroshēmu korpusu skaitu (iespiedplātes izmērus un līdz ar to laika aizkaves uz vadu parazitisko induktivitāti, kas orientējoši mēdz būt apmēram 10 nH/cm) [31] (sk. 3.8 attēlu).



3.8 att. Sākotnējās iespiedplātes shemotehnika tapšanas procesā a) no priekšpuses; b) no aizmugures

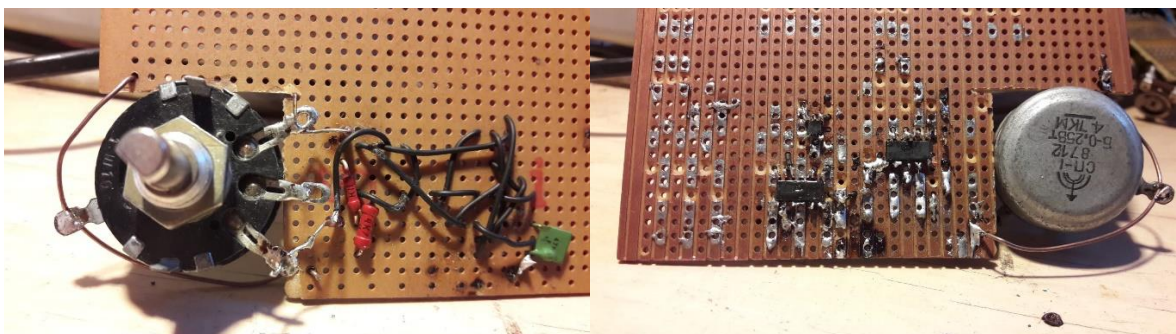
Otrs ultra-ātrdarbīgs dubultais komparators ar izejām rāda vai zāģzoba signāla tekošais sprieguma līmenis ir virs vai zem izvēlētajiem salīdzināšanas sliekšņiem, kurus iestata ar atbilstošiem potenciometriem. Tāpēc ar citu TL431 tiek organizēts augsti stabils 2,5 V references sprieguma avots, kur tas vēl ar rezistora palīdzību vadības ieejā tiek pacelts līdz 2,9 V, no kura ar trim potenciometriem izvēlas pašu mazāko spriegumu jeb drošības zonu, lai nenotiktu caurpūte, kur tālāk minimālais spriegums nodrošina aizvēršanos un lielākais spriegumu atvēršanos. Šo abu komparatoru izejas uzrauga atlikušie četri VAI-NE elementi no daļēji izmantotā korpusa. Izmanto reti lietotu neparasti ātru KMOP sēriju, kas dod 1,1 GHz ar kāpuma/krituma laikiem ar kārtu starp 1 un 10 ns.

Kad komparators ir norādījis uz ieslēgšanos, tad izejas trigeris tiek iemests ieslēgtā stāvoklī, un kad komparators rāda zāģa sprieguma līmeni, kas atbilst impulsa pārtraukšanai, tad trigeri iemet izslēgtā stāvoklī. Trigeris pie viena realizē arī frekvences dalīšanas ar divi funkcionalitāti (sk. 4. pielikumu). Tāpat tika izvēlēts 1 GHz spējīgs mazpazīstams trigeris KMOP līmeņos ar kāpuma/krituma laikiem dažu nanosekunžu robežās.

Ievērojamas problēmas radās jau pēc samontēšanas, kad izrādījās, ka komparatori ir nevis ar cerēto ultra-ātrā paveida KMOP līmeni izejā, bet ar ESL pretfāzu signālu. Jau uz gatavas plates nācās iekarināt veiksmīgi sameklētu divu kaskādes tranzistoru līmeņu salāgošanas shēmu, (sk. 2. pielikumu) kura maz sabojā ātrdarbību. Izmantotie bipolārie tranzistori garantē gan tikai 3 ns nevis 0,01, taču, ja tas radītu problēmas, tad tehniski iespējams pasūtīt SMD izmēru specializētos bipolāros tranzistorus ar izpildes frekvenci intervālā 3...6...12...40 GHz.

### 3.2. Otrais variants

Nākamā impulsu ģenerācijas shēma tika uztaisīta tāpēc, ka komparatori pirmajai versijai tika pasūtīti ar dažiem kļūdainiem parametriem un pasūtījuma kļūdas labošana aizņem vismaz 2 mēnešus. Tā veidota no jauna, bet pēc pirmās līdzības. Tanī tika saglabātas vecās komponentes, tas ir SN74AS02 [32], kas ir 4 gabali divu ieeju VAI-NE elementi, un SN74LVC2G74 [33], kas savukārt tiek izmantots kā D trigeris (sk. 4. pielikumu). Šai mazāk komplicētajai shēmai vajadzēja sākotnējā posmā ģenerēt ap 6 MHz augstu, regulējamu frekvenci, kas tālāk D trigerī tiek dalīta ar 2 un tiek palaista divās izejās, kur vienā nāk invertētais signāls. Un gala posmā signāls tiek sadalīts divās daļās, kur no vienas ārā nāk katrs pāra impulss, bet no otra katrs nepāra iegūstot vēlamos 3 MHz. Kā arī iegūtie signāli tiek vēl nogludināti ar atlikušajiem VAI-NE elementiem (sk. 3.9 attēlu un 7. pielikumu).



a)

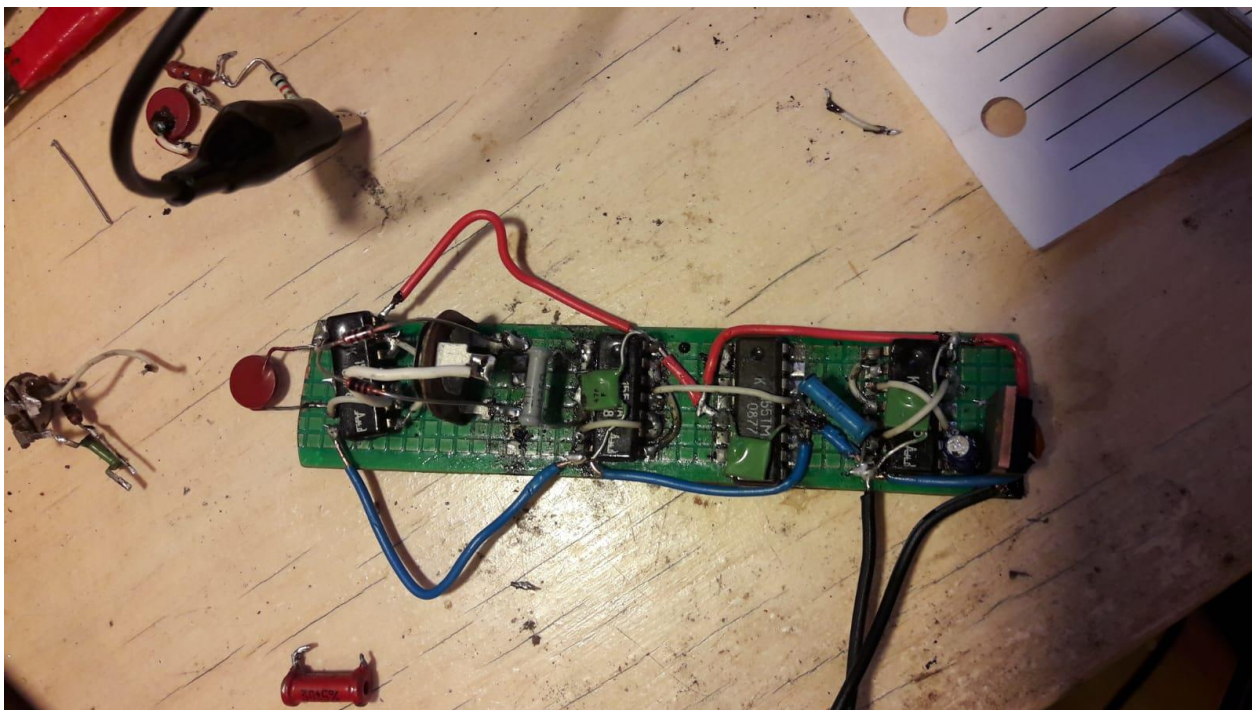
b)

3.9 att. Otrās iespiedplates shemotehnika tapšanas procesā a) no priekšas; b) no aizmugures

Šī modelis netika atzīts par labu, jo iegūtās frontes izrādījās ārkārtīgi negludas, nekvalitatīvas. Kā arī pati ģenerācija brīžiem strādāja un brīžiem nē (tā nenotika stabili). Šāda nestabilitāte kaut uz mirkli, pie pieslēgtas gala pakāpes, nozīmētu nodegušus tranzistorus daudzu simtu EUR vērtībā.

### 3.3. Trešais variants

Nu jau trešajā mēģinājumā tika veidota nākamā shemotehnika. Šoreiz impulsu ģenerāciju arī izdevās iegūt. Tos uzģenerēja ar UN-NE loģisko elementu palīdzību. Tika izvēlētas lielas DIP formas Padomju Savienības “tabletes” - 155LA3 [34] - lai izvairītos no mehānisku kļūdu pieļaušanas nu jau ierobežotā laika dēļ. Tās tika montētas uz universālās lodēšanas plates (plekšņu panelis). Attiecīgi shēma izskatās ļoti līdzīga iepriekšējai, tomēr šeit viss tas pats tiek īstenots tikai ar UN-NE elementiem (sk. 3.10 attēlu).



3.10 att. Trešais variants impulsu ģeneratoram tapšanas procesā

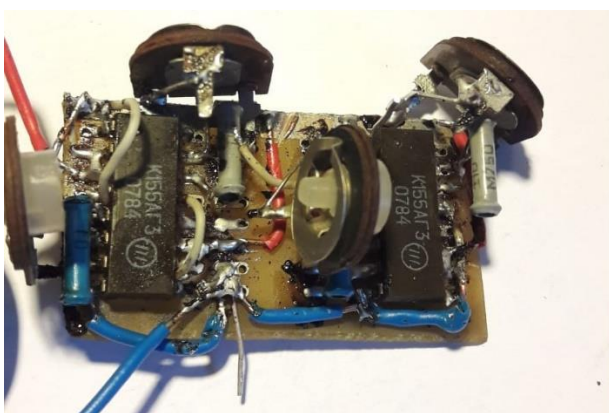
Pēc vairākkārtējas shēmas pārtaisīšanas izrādījās, ka pie kropļotā signāla vainas ir pati loģisko elementu virkne jeb 155LA3 komponente. Ģenerētais signāls sākotnēji likās gana apmierinošs pat ar nelielu iekritumu katras frontes sākumā. Toties pēc frekvences dalīšanas ar divi izrādījās, ka ar maiņrezistora palīdzību, kas bija domāts frekvences regulēšanai, “izdalītā” frekvence nāca ārā robežās no 6 - 12 MHz. Vai tas patiesībā nozīmē, ka frekvence tika nevis

dalīta ar divi, bet gan reizināta? Šādu rezultātu varētu skaidrot ar to, ka mazais kabatas osciloskops “INTRUSTAR” varēja arī neuztvert patieso ģenerētā signāla formu, tas ir, iespējams, ka signāls sastāvēja ar dažu “matiņu” jeb necīgu iekritienu/izlēcienu formas veidojumiem, kuri ar pieejamo osciloskopu nevarēja tikt identificēti pirms frekvences dalīšanas ar divi ierobežotās izšķirtspējas dēļ (maksimāli 50 MHz).

Izrādījās ka šai shematizācijai ir vēl viena problēma. Otrs mainīrezistors shēmā tiek izmantots, lai varētu mainīt izolēti D faktoru, kas atbild par impulsa platumu, izrādījās, ka ar to apmēram divkārtīgi mainījās arī frekvence. Šādi tas varēja notikt tāpēc, ka loģikai ir savi noteikti loģiskās nulles un loģiskā vieninieka līmeņi. Lai notiktu ģenerācija, elementa ieeja tiek turēta tuvu pie puslīmeņa (kas normāli būtu aizliegts stāvoklis). Iespējams, ka mainot šī rezistora pretestību, varēja arī izmainīt šo puslīmeņa vērtību, tādejādi ģenerācijas sliekšni un līdz ar to laiku. Lai arī šo shēmu vispār var pārcelt uz ātrāku elementu bāzi, tā ir kaprīza, slikti regulējama un salīdzinoši šaurā diapazonā, un atstāja nevēlama risinājuma iespaidu (sk. 8. pielikumu).

### 3.4. Gala rezultāts

Pašā beidzamajā variantā līdzīgi kā iepriekšējā tika strādāts ar TTL loģiku un citu Padomju Savienības 155 sērijas komponenti vienkāršības labad. Izvēlēta 155AG3 komponente ir tīra kopija no 74LS123. Šis monovibrators sastāv no diviem vienādiem elementiem, kuru funkcija ir laist ārā stabilu, meandrisku signālu ar uzdotu garumu [35] (sk. 3.11 attēlu).



3.11 att. Noslēdzošais variants impulsu ģeneratoram tapšanas procesā

Lai gan iegūtais signāls izrādījās nemaz nav tik gluds kā gribētos, bet tomēr shēma tika palaista un darbojās apmierinoši. Šeit līdzīgi kā iepriekš tiek izmantotas divas izejas, gala signāla A kanālam un B kanālam, kur no viena nāk ārā katrs pāra un no otra katrs nepāra impulss.

Šīs shēmas īpatnība ir tāda, ka vēljoprojām ar vienu no maiņrezistoru pāriem kontrolē frekvenci, bet ar otru pāri šoreiz tiek regulēts pauzes garums nevis impulsa platums. Tas nozīmē, ka mainot pēdējo divu rezistorus vērtības, patiesībā tāpat mainās katra atsevišķā impulsa platums, tikai abiem rezistoriem jābūt sapārotiem, lai impulsu platumi mainītos vienādi, kas arī nozīmē mainīt pauzes garumu. Proti, strādājot ar indukcijas krāsni šāda regulācija ir ļoti neērta (sk. 9. pielikumu).

Rezultātā var minēt, ka izvirzītie uzdevumi ir izpildīti. Tika novērots, ka katra komponente atsevišķi darbojas, tomēr gala modelis ir vairākas atsevišķi darbojošās komponentes nevis viena vesela iekārta. Attiecīgi sākotnēji tika izveidots datormodelējums pašam impulsu ģeneratoram, tālāk salodēta elektroniskā platīte un pārbaudīta tās veikspēja izpildot dažādus mērījumus. Kā iepriekš minēts tika apskatīti dažādi varianti impulsu ģenerācijas izveidei un labākā varianta izvēlei. Tika izsecināts, ka pirmās montāžas variants būtu vislabākais tikai vēl jāiegādājas visas nepieciešamās komponentes. Tad tika uzkonstruēta draiveru kaskāde uz jau kādreiz lietotā gala "Huttinger" karkasa ūdens dzeses radiatoriem. No kā var secināt, ka iegūtais rezultāts būtu vēl jāpapildina un jāuzlabo kopējā prototipā.

## SECINĀJUMI

- Šajā darbā tika eksperimentāli modelēts un izpētīts 3 MHz impulsu ģenerators, tā pielāgošana gala kaskādei caur lielas jaudas draiveriem augstas frekvences indukcijas spoles darbināšanai kā vienu daļu no kopējā vakuuma diamagnētiskās kristāla (germānija) kausēšanas iekārtas. Izrādījās, ka izvirzītā hipotēze apstiprinājās.
- Tika noskaidrots, ka ar “Sprint Layout v.6” programmatūru ir iespējams izveidot trasējumu iespiedplašu vēlākai izkodināšanai. Vēl ir izzināts, ka datormodelēšanas programma “SPICE LT” ir piemērota elektrisko ķēžu iepriekšējai izmēģināšanai, kur arī lielākā daļa no konstruētajiem mezgliem tika pārbaudīta.
- Gala variantā iekārta ir uzkonstruēta divās atsevišķās daļās. Kur viena ir izveidotā impulsu ģenerators shemotehnika, otrā draiveru komplekts un gala kaskāde kopā. Uztaisītais impulsu ģenerators laiž ārā meandrisku signālu, kurš tiek sadalīts divos atsevišķos posmos, kur no viena kanāla nāk ārā katra nepāra un no otra katra pāra fronte. Tālāk šie signāli tiek padoti uz draiveru komplektu, kuri iepriekš iegūto signālu aizvada uz gala kaskādi, kur arī tiek veikta pašas indukcijas spoles darbināšana.
- Šāda tipa eksperimentiem pienācīgus mērījumus ir iespējams veikt ar osciloskopu “INTRUSTAR”, kurš izpildes laikā kalpoja kā galvenais instruments, lai pārliecinātos par samontētās shemotehnikas rezultātiem.
- Procesa gaitā autors apguva lietderīgas prasmes:
  - veikt elektroniskus mērījumus ar dažāda veida testeriem, piemēram, GM328;
  - veikt iespiedplašu montāžu pēc dažādiem paņēmieniem (SMD, DIP, universālo panelišu metodes);
  - tika apgūta specifiskas mikroelektornikas lodēšanas prasme;
  - tika iepazīta un praksē izmantota TTL, KMOP un ECL sistēmu savietošana digitālās elektronikas izstrādēs.
- Ir secināts, ka lai iegūtu impulsu ģeneratoram regulējamu frekvenci un impulsu platumu atsevišķi ir jāizmanto sākotnējās shemotehnikas paraugs ar pasūtītām darba veikšanai atbilstošajām komponentēm. Lai gan ir vēl viens variants, darīt visu PWM signāla ģenerāciju pilnīgi digitāli ar ātrdarbīga procesora palīdzību. Nākotnē to varētu īstenot ar nesen ražošanā palaistā jaunas paaudzes “ARM” procesora STM32 sērijas H7 palīdzību ( $f_{clk} = 400 \text{ MHz}$ ). Jau šobrīd 220 MHz versiju F7 LU-ASI mēģinās pielietot, un šo pieredzi nākotnē būtu vērts izmantot.

Mikroprocesora versija ļautu bez problēmām ne tikai ģenerēt, bet arī atdalīti regulēt un uzraudzīt (piemēram, displejā) gala rezultātus.

- Kopsavilkuma secinājums - darba izpildes gaitā iegūtās zināšanas, pieredze, prasmes un iemaņas autoram paver iespēju turpināt darbu kopā ar projekta komandu pie iekārtas laboratorijas prototipa izstrādes maģistra studiju laikā.

## IZMANTOTĀ LITERATŪRA UN AVOTI

- [1] H. Y. I. Ohnaka, Y. Ninomiya, R. Ishii, S. Fujita un K. Kishio, «Levitation of metallic melt by using the simultaneous imposition of the alternating and the static magnetic fields,» *Journal of Crystal Growth*, sēj. 260, nr. 3-4, pp. 475-485, 2004.
- [2] A. Krauze, A. Muižnieks, K. Bergfelds, K. Janisels un G. Chikvaidze, «Reduction of silicon crust on the crucible walls in silicon melt purifying processes with electron beam technology by low-frequency travelling magnetic fields,» *Magnetohydrodynamics, Vol.47(4)*, pp. 369 -384, 20 jūlijs 2011.
- [3] Baltic Scientific Instruments, «<http://bsi.lv/en/products/>,» 17 April 2018. [Tiešsaiste].
- [4] Leibniz Institute for Crystal Growth, «<https://www.ikz-berlin.de/en/>,» 17 April 2018. [Tiešsaiste].
- [5] R. Thomas, *The Plasma Source*, Gaithersburg, 2001, pp. 26-39.
- [6] A. Rudevics, *Silīcija kristalu audzēšanas procesa ar peldošās zonas metodi kausejuma formas nestacionaritāte un 3D raksturs*, Rīga, 2007.
- [7] S. Spitans, *ŠĶIDRĀ METĀLA AR BRĪVO VIRSMU TURBULENTĀS PLŪSMAS IZPĒTE ELEKTROMAGNĒTISKAJĀ LAUKĀ*, Rīga, 2015.
- [8] M. Wünscher, *Crucible-free Crystal Growth of Germanium – Experiments and Simulations*, Berlin, 2011.
- [9] G. Yang, «Zone Refinement of Germanium Crystals,» *Journal of Physics: Conference Series*, sēj. 606, 2015.
- [10] International Thermonuclear Experimental Reactor, «<https://www.iter.org/mach/Tokamak>,» 25 April 2018. [Tiešsaiste].
- [11] P. Y. Yu un M. Cardona, *Fundamentals of Semiconductors*, Heidelberg Dordrecht London New York: Springer, 2010.
- [12] F. Sarvar, N. J. Poole un P. A. Witting, «PCB glass-fibre laminates: Thermal conductivity measurements and their effect on simulation,» *Journal of Electronic Materials*, sēj. 19, nr. 12, pp. 1345-1350, 1990.

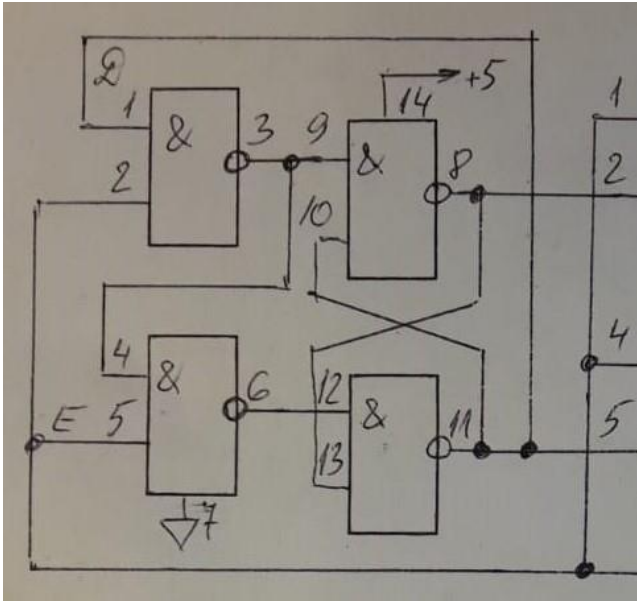
- [13] P. Scherz, Practical Electronics for Inventors, New York: The McGraw-Hill Companies, 2000.
- [14] V. Vodovozov, Introduction to Power Electronics, Ventus Publishing ApS, 2010.
- [15] L. George, «<https://electrosome.com/dc-motor-driving-using-h-bridge/>,» Electrosome, 13 05 2018. [Tiešsaiste]. [Pieklūts 02 05 2018].
- [16] G. M. Sharif, S. M. M. Islam un K. M. Salim, «Design & Construction of Microcontroller Based maximum power point PWM Charge Controller for Photovoltaic Application,» January 2010.
- [17] B. Li, X. Ling, Y. Huang, L. Gong un C. Liu, «An Improved Model Predictive Current Controller of Switched Reluctance Machines Using Time-Multiplexed Current Sensor,» *Sensors*, sēj. 1146, p. 17, 2017.
- [18] AS "ALFA RPAR", «<http://www.alfarzpp.lv/>,» AS "ALFA RPAR". [Tiešsaiste]. [Pieklūts 30 04 2018].
- [19] Maxim Integrated, «<https://www.maximintegrated.com/en/glossary/definitions.mvp/term/Shoot-Through%20Current/gpk/1040>,» Maxim Integrated. [Tiešsaiste]. [Pieklūts 03 05 2018].
- [20] Mouser Electronics, «[eu.mouser.com](http://eu.mouser.com),» Mouser Electronics. [Tiešsaiste]. [Pieklūts 30 04 2018].
- [21] T. I. Incorporated, «<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso722.pdf>,» Texas Instruments Incorporated. [Tiešsaiste]. [Pieklūts 06 05 2018].
- [22] IXYS Company, «[https://ixysrf.com/wp-content/uploads/2017/06/DE375-501N21A-00\\_Datasheet\\_RevA.pdf](https://ixysrf.com/wp-content/uploads/2017/06/DE375-501N21A-00_Datasheet_RevA.pdf),» IXYS Company. [Tiešsaiste]. [Pieklūts 05 05 2018].
- [23] Advanced Power technology Inc., «<http://datasheetz.com/data/Discrete%20Semiconductor%20Products/MOSFETs%20-%20Single/APT6038SLLG-datasheetz.html>,» Advanced Power technology Inc.. [Tiešsaiste]. [Pieklūts 03 05 2018].

- [24] V. Intertechnology, «<https://www.vishay.com/capacitors/>,» Vishay Intertechnology. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 05 05 2018].
- [25] Rogers Corporation, «<https://www.rogerscorp.com/acs/producttypes/6/RT-duroid-Laminates.aspx>,» Rogers Corporation. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 05 05 2018].
- [26] P. Horowitz un W. Hill, The Art Of Electronics - 2nd Edition, New York: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1994.
- [27] Fairchild semiconductor, «<http://www.philohome.com/sensors/gp2d12/gp2d12-datasheets/bc548.pdf>,» Fairchild semiconductor. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 03 05 2018].
- [28] ОАО "ИНТЕГРАЛ", «<http://www.transistor.by>,» ОАО "ИНТЕГРАЛ". [Tiešsaiste]. [Piekļūts 30 04 2018].
- [29] Analog Devices, Inc,  
«<https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/chapter-11>,» Analog Devices, Inc, 06 06 2017. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 03 05 2018].
- [30] Texas Instruments Incorporated, «<http://www.ti.com>,» Texas Instruments Incorporated, [Tiešsaiste]. Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl431.pdf>. [Piekļūts 30 04 2018].
- [31] F. W. Grover, Inductance Calculations, Dover Publications, 2004.
- [32] Texas Instruments Incorporated,  
«<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74als02a.pdf>,» Texas Instruments Incorporated. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 02 05 2018].
- [33] Texas Instruments Incorporated,  
«<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lvc2g74.pdf>,» Texas Instruments Incorporated. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 02 05 2018].
- [34] Электроника и связь, «<https://eandc.ru/pdf/mikroskhema/k155la3.pdf>,» Электроника и связь. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 30 04 2018].
- [35] Электроника и связь, «<https://eandc.ru/pdf/mikroskhema/k155ag3.pdf>,» Электроника и связь. [Tiešsaiste]. [Piekļūts 30 04 2018].

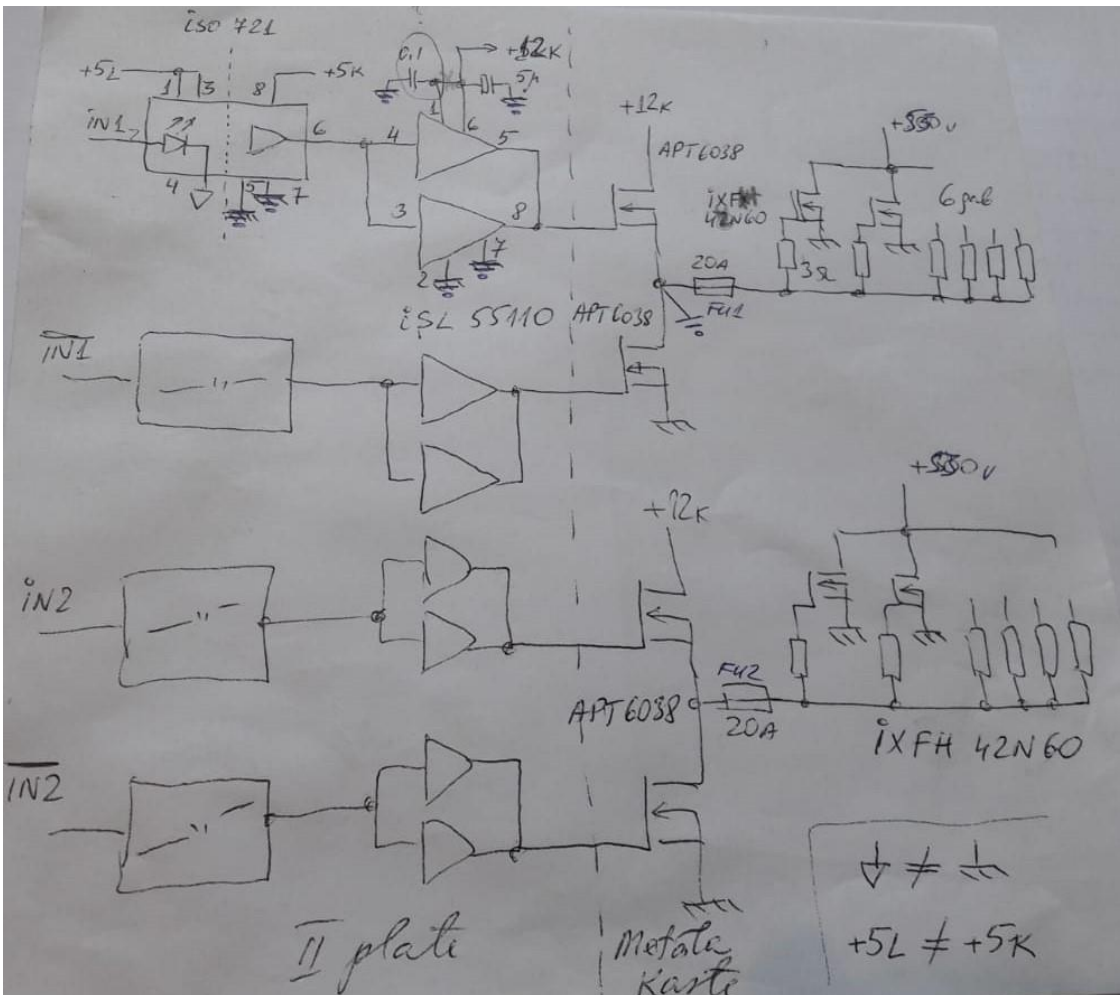




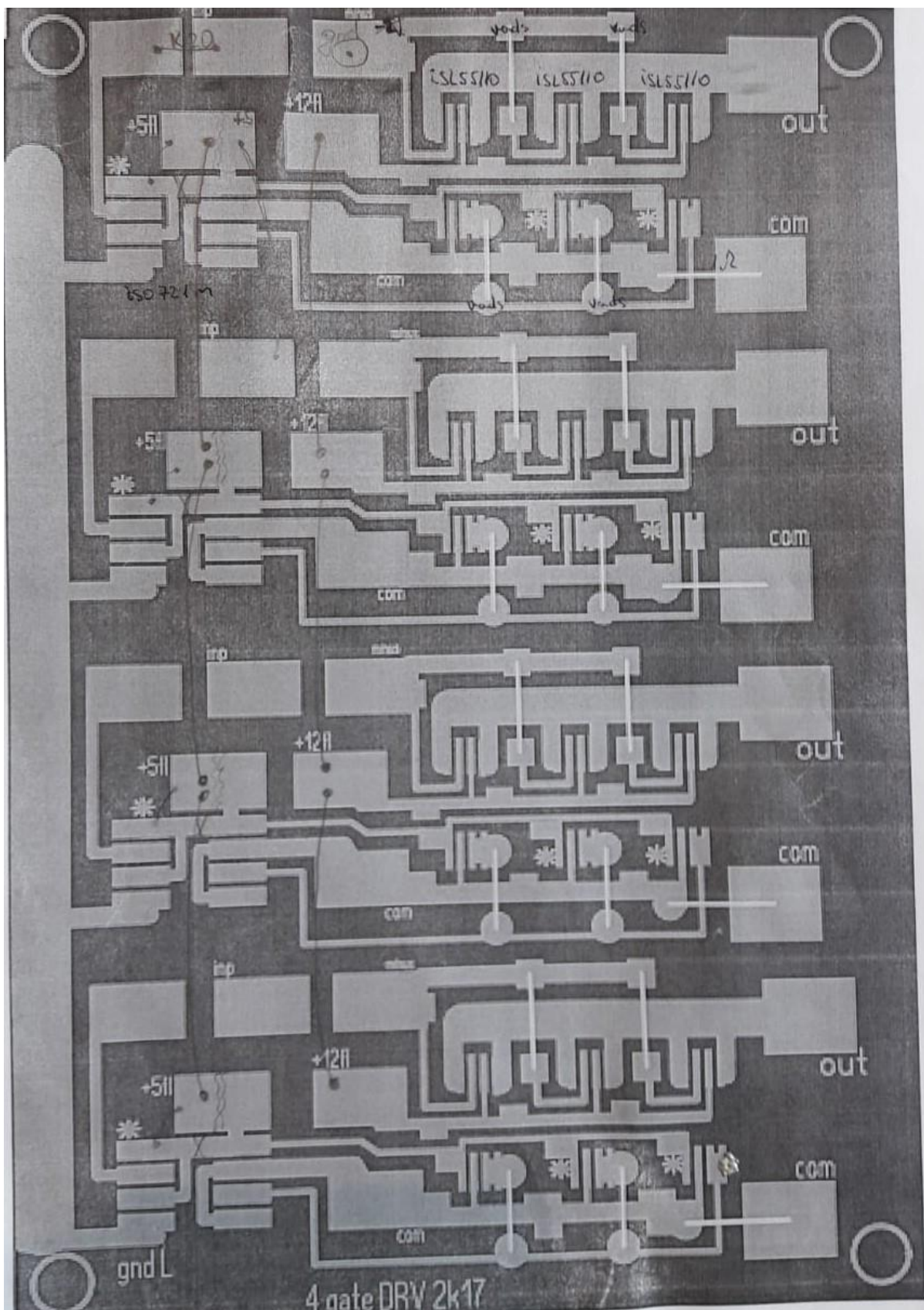
4. pielikums. D trigeris frekvenču dalīšanai ar divi



5. pielikums. Elektriskā shēma optiskajai atsistei



6. pielikums. Trasējuma ceļi optiskās atsaistes iespiedplatei





9. pielikums. Galējā impulsu ģenerators elektriskā shēma

