

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
Infotehnoloogia teaduskond
Thomas Johann Seebecki elektroonikainstituut

IE40LT

Miina Kannel 142538

LED LAUALAMBI PÜSIVOOLUGA JUHTSKEEMI VÄLJATÖÖTAMINE

Bakalaureusetöö

Juhendaja: Kaiser Pärnamets
Magistrikraad
Doktorant

Tallinn 2017

Autorideklaratsioon

Kinnitan, et olen koostanud antud lõputöö iseseisvalt ning seda ei ole kellegi teise poolt varem kaitsmisele esitatud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on töös viidatud.

Autor: Miina Kannel

22.05.2017

Allkiri: /allkirjastatud digitaalselt/

Annotatsioon

Antud töö käsitleb valgusdiod (LED) valgusti elektriskeemi ja trükkplaadi välja töötamist. Töö käigus on teostatud lähteandmete abil arvutused leidmaks lambi elektriskeemi jaoks sobivad toitepinge ning elektroonikakomponentide väärtused koos nende funktsiooni ja vajalikkuse põhjendusega.

Lisaks elektriskeemi koostamisele on skeemi ka simuleeritud ning simulatsiooni tulemusi on võrreldud lähteandmete ning oodatavate tulemustega. Töö tulemusena valmib valgusti elektriskeem ning trükkplaadi kujundus.

Lõputöö on kirjutatud eesti keeles ning sisaldab teksti 33 leheküljel, 6 peatükki, 9 joonist, 5 tabelit.

Abstract

Development of constant current LED driver for desk lamp

The goal of this thesis is to design a LED lamp's schematic and a printed circuit board. Throughout this work using initial data were calculated the values for electrical schematic to find suitable power supply unit and the values of the electronic components provided with explanations of their functions.

In addition to creation of electrical schematic, the schematic has been simulated and the results have been compared with initial data and expected results. As a result an electronic schematic of a LED lamp and a printed circuit board layout was achieved.

The thesis is in estonian and contains 33 pages of text, 6 chapters, 9 figures, 5 tables.

Lühendite ja mõistete sõnastik

Valgusdiod	<i>Light-Emitting Diode, LED</i> ; on diod pn-siirdega, mis muudab elektrienergia nähtavaks valguseks või optiliseks kiirguseks nagu infrapuna või ultraviolet spekter.
Pn-siire	<i>P-n junction</i> ; Elektrilaengu ülekanne positiivselt negatiivsele monokristall pooljuht alale.
Värvustemperatuur	Värvustemperatuur (K) on silmale nähtava valguse omadus, mis näitab valguskiirguse jaotust spektris ning mida mõõdetakse Kelvinites.
RGB	RGB süsteem kasutab kolme põhivärvust: <i>Red</i> - punane, <i>Green</i> - roheline, <i>Blue</i> - sinine.
Värvieraldusindeks	<i>Color Rendering Index, CRI</i> ; värvieraldusindeks.
LED draiver	Üldine nimetus UI impulssmuundurile, mille eesmärgiks on toita valgusdiodmaatriksit.
Valgusvoog	Lumen (lm) on valgusvoo ühik, mis näitab valgusallika (lambi) nn. valgusjõudu.
Läbiviik	Loob vertikaalse ühenduse kahe või enama trükkplaadi kihi vahel.

Sisukord

1 Sissejuhatus	9
2 LED lambi ülevaade	10
2.1 Lampide võrdlus	10
2.2 LED valgusti struktuurskeem	12
3 Elektriskeemi väljatöötamine ja komponentide valik	14
3.1 Valgusdiodide valik	15
3.2 LED draiveri valik	19
3.3 Toiteploki valik	22
3.4 Muud elektriskeemis kasutatavad komponendid	23
4 Elektriskeemi simulatsioon	25
4.1 Simulatsiooni skeemi analüüs	25
4.2 Simulatsiooni tulemused	26
5 Trükkplaadi koostamine	28
5.1 Komponentide hinnatabel	28
5.2 Trükkplaadi kujundamine	29
6 Kokkuvõte	31
Kasutatud kirjandus	32

Jooniste loetelu

Joonis 1. LED lambi struktuurskeem.	12
Joonis 2. LED lambi elektriskeem.....	14
Joonis 3. LT3474 efektiivsus [15].	20
Joonis 4. LT3474 draiveri väljaviigud [15].	21
Joonis 5. Simulatsiooni elektriskeem	25
Joonis 6. LED draiveri sisend- ning väljundpinge graafik.	26
Joonis 7. Valgusdioode läbiv vool.....	27
Joonis 8. Trükkplaadi kujundus.....	30
Joonis 9. Trükkplaadi 3D mudel	30

Tabelite loetelu

Tabel 1. LED lambi võrdlus säästulambi ning hõõglambiga [13].....	10
Tabel 2. LED-ide võrdlustabel [20], [21], [22].	16
Tabel 3. LT3474 väljaviigid [15].	21
Tabel 4. Toiteploki spetsifikatsioon [4].....	22
Tabel 5. Komponentide hinnatabel.....	28

1 Sissejuhatus

Valgusdiodide tutvustati juba 1960-ndatel, kuid laiemasse kasutusse on valgusdiodid jõudnud just viimase paarikümne aasta jooksul. Eesti Energia sõnul on võimalik valgusdiod (LED) lampe kasutades mitu korda rohkem energiat kokku hoida kui hõõglambi või säästulambi puhul [7]. LED lampide eelised teiste lampide ees on ka pikk eluiga ning töökindlus.

Antud töö teema sai valitud, sest on huvi uurida, kuidas töötab üks valgusti ning selle olulisemad komponendid. Lõputöö eesmärgiks seati LED lambi struktuurskeemi koostamine ning selle põhjal LED lambi skeemi koostamine, skeemi simuleerimine ning skeemi trükkplaadile kandmine.

Eelneva uurimustöö tulemusena leiti, et kõige laialdasemalt levinud lauavalgusti oli 60 vatine hõõglambiga valgusti. Selle alusel leiti samaväärne LED valgusti, analüüsiti selle parameetreid ning nendest lähtuvalt määrati lõputöö lähteandmed. Nendeks olid lambi võimsus, mis võiks jääda 5 W ning 10 W vahemikku ning lambist tulev valgusvoog, mis võiks jääda 400 lm ning 800 lm vahele.

Töös kasutatavate komponentide puhul arvestati komponentide parameetritega. Arvutuste tulemusena leiti simulatsiooni eeldatavad väljundid ning kontrolliti neid simulatsiooni teel. Simulatsiooni teel veenduti, et koostatud elektriskeem töötab korrektselt ning skeemi kujundus kanti trükkplaadile.

Bakalaureuse töö käigus kasutati kahte erinevat programmi. Elektriskeemi simulatsioonid tehti tarkvaraga LTSpice ning trükkplaadi kujunduse tegemisel kasutati programmi CircuitMaker [3], [16].

2 LED lambi ülevaade

Hõõgpirni ajastust on jäänud inimestel sisse harjumus valida valgusteid vattide järgi. Kui varasemalt oli 60 W hõõglamp kodudes tavaline, siis ostes sama vattide arvuga valgusdiod (LED) lambi, siis sellega võiks ära valgustada mitu korda suurema ala.

2.1 Lampide võrdlus

Tänapäeval soovitatakse valgusteid valida pigem luumenite järgi. Mida rohkem on luumeneid, seda rohkem valgust pirn toodab. LED pirni võrdlusena on 6 – 9 W LED lamp sama tugeva valgusvooga nagu näiteks 60 W hõõgpirn, luumenite arv sealjuures on aga võrdne [2]. Lähtuvalt hõõglambi parameetritest on valitud LED lambi võimsus 5 W kuni 10 W vahele ning valgusvoog 400 lm kuni 800 lm vahele.

Tabelis 1 toodud võrdluse põhjal on leitud, et 400 lm – 800 lm valgusvooga lambi puhul jääb LED lambi võimsus 4 W – 9 W vahele. Säästulambi puhul jääb võimsus 9 W - 15 W vahele ning hõõglambi puhul 40 W – 60 W vahele. Seega LED lamp tarbib ligi 10 korda vähem võimsust ning elektrienergiat kui hõõglamp ja ligi 2 korda vähem võimsust ning elektrienergiat kui säästulamp.

Tabel 1. LED lambi võrdlus säästulambi ning hõõglambiga [13].

HALOGEENLAMBI ASENDAMINE LED-LAMBIGA

luumenit	LED-LAMP	SÄÄSTULAMP	HÕÕGLAMP
220—250	2—3w	5—7w	25w
410—470	4—5w	9—13w	40w
700—810	6—9w	13—15w	60w
920—1060	9—13w	18—25w	75w
1300—1530	16—20w	23—30w	100w
2600	25—28w	30—55w	150w

Järgnevalt on välja toodud valgusdiodide positiivsed omadused võrreldes teise lampidega ning valgusdiodide kasutusala.

- Väga pikk tööiga – ligikaudu 50 000 tundi.
- Väga väike energiakulu.
- Toitevoolu sagedane sisse- ja väljalülitamine ei mõju lampide tööeale.
- Värvitoonide mitmekesisus [12].
- Valgusdiodlampide kasutegurist moodustab valgus 25 % ja eralduv soojus 75 % [5].

Valgusdiodide niisugused eelised võimaldavad neid kasutada mitmeks erinevaks otstarbeks. Elamutes saab neid kasutada valve- või öövalgustites, trepiastmete valgustamiseks või näiteks mööbli taustvalgustuses [12]. Lisaks elamutele kasutatakse valgusdioode ka tänavavalgustuses, autotuledes, reklaamtahvlites ning valgusfoorides.

Mõningatel juhtudel jäävad aga valgusdiodid hõõglampidele alla.

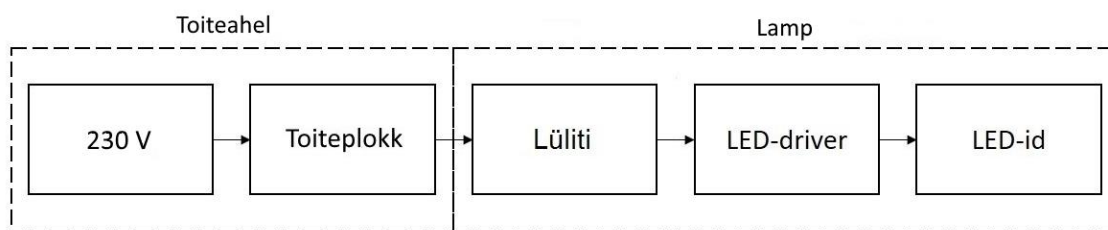
- Sinine oht. Sinise värvuse komponent valges valguses võib tekitada ebameeldivusi silmale.
- Sõltuvus temperatuurist, liiga kõrge ümbritseva temperatuuri korral võib LED läbi põleda.
- Valguse kvaliteet. Valgusdiodide valguses ei pruugi objektide värvid õiged paista.
- Valgustatuse nurk. Ühe valgusdiodiga ei saa valgustada suurt ala. Suurema ala valgustamiseks tuleb kasutada mitmeid LED-e.
- Pingetundlikkus. Kuna valgusdiodid on vooluga tüüritavad seadmed, siis lähtuvalt nende volt-amper karakteristikust toob väiksemgi pingemuutus endaga kaasa suure voolumuutuse.
- Kõrgem hind luumeni kohta võrreldes teiste valgustehnoloogiatega [11].

Olles võrrelnud valgusdiodide positiivseid ja negatiivseid külgi, ning erinevate lampide võimsust, leian, et positiivsed küljed kaaluvad negatiivsed üle ning soovin antud töös kasutada just valgusdiodide lambi koostamisel.

2.2 LED valgusti struktuurskeem

Valgusti struktuurskeem koosneb kahest plokist, milleks antud töö puhul on toiteahel ning lamp. Lambi struktuurskeem ei näita reaalseid ühendusi ning on illustreeriv.

Esimeseks plokiks on toiteahel, mis koosneb elektrivõrgu vahelduvvoolu nimipingest, milleks on 230 V ning toiteploki. Vastavalt määruse „Elektripaigaldise käidule ja elektritööle esitatavad nõuded,“ paragrahvi 4 alusel ei tohi tavalisikud elektritööd teha üle 50-voldise vahelduvpingega või kuni 120-voldise alalispingega elektriseadmetega, mida toidetakse kaitsevääikepingeallikast [9]. Sellel põhjusel on lambi ja elektrivõrgust tuleva voolu ning LED draiveri vahele lisatud väline toiteplokk. Toiteplokk on seade, mis muundab elektrivõrgust saadava vahelduvpinge elektroonikakomponentide toiteks sobivaks alalispingeks [14].



Joonis 1. LED lambi struktuurskeem.

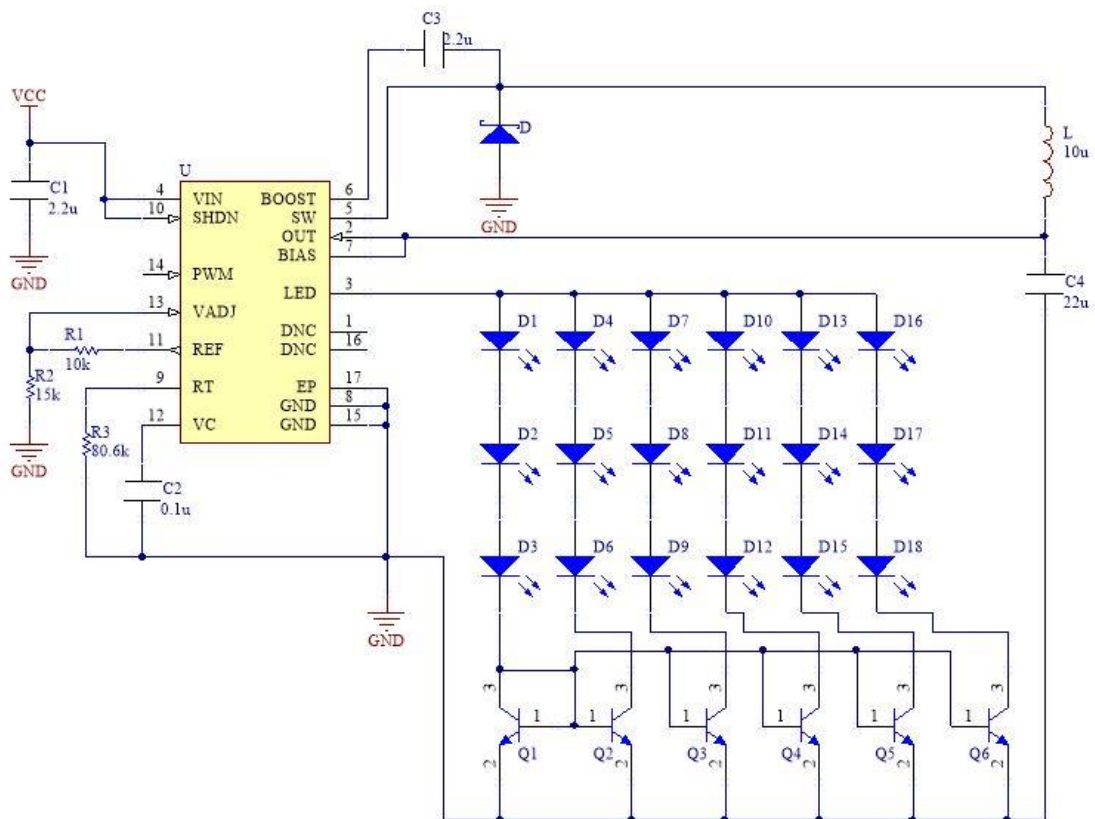
Teiseks struktuurskeemi plokiks on lamp, mis koosneb lülitist, LED draiverist ning LED-idest. Toiteploki ning LED draiveri vahele jääb lüliti, mis vastavalt oma olekule sulgeb või avab vooluringi. Lüliti ülesandeks on võimaldada lampi sisse ja välja lülitada. Draiver, mis jääb lüliti ning LED-ide vahele peab suutma valgusdiodide piisavalt vooluga varustada, et kindlustada valgusdiodide töö. Lambi ploki viimaseks osaks on LED-id ehk valgusdiodid, mis süttivad põlema juhul kui lüliti on sisse lülitatud.

LED draiver on elektroonikaseade, mis reguleerib valgusdiodi, valgusdiodide jadühenduse või paralleelühenduse voolu arvestades valgusdiodi omadusi. LED draiver vastab ühe valgusdiodi või mitme valgusdiodi muutuvatele vajadustele varustades valgusdiodide pidevalt eelseatud vooluga [10].

Valgusdiod ehk LED on pooljuhtvalgusallikas. Valgusdiodi põhiosaks on legeritud pooljuhtmaterjal. Valgus eraldub pn-siirdega pooljuhist päri voolu läbi lastes, kui elektronide ja aukude rekombineerumisel eralduvad valguseosakesed ehk footonid. Seda nähtust nimetatakse elektroluminestsentsiks. Alalispinge abil genereeritakse aktiivsel kihil kindla spektriga valgus, mille värvsus oleneb kasutatavast materjalist ja mida edastatakse kas otse või peegeldununa [23].

3 Elektriskeemi väljatöötamine ja komponentide valik

Valgusti elektriskeemi välja töötamisel on aluseks võetud Joonisel 1 kujutatud struktuurskeem, mida analüüsid on jõutud peatükis vaja minevate skeemi lahenduste ja komponentide valikuni.



Joonis 2. LED lambi elektriskeem

Joonisel 2 on toodud seadme väljatöötatud elektriskeem. Skeemi esimese asjana valitakse välja valgusdiodid, mida antud töö juures kasutada, sest pärast valgusdiodide välja valimist saab teada valgusdiodide parameetrid ning nende alusel saab hakata sobivat LED draiverit otsima ning kõige viimasena saab välja valida toiteploki. Nagu esimeses peatükis mainitud, siis lambi võimusus võiks jääda 5 W – 10 W vahele nimi lambi valgusvoog võiks jääda 400 lm – 800 lm vahele.

Pärast sobivate valgusdiodide leidmist saab edasi liikuda LED draiveri valikuni. Draiver peab sobima valgusdiodide parameetrite ning omadustega.

Toiteploki valimisel tuleb arvestada elektrivõrgust tuleva vahelduvvoolu nimipingega 230 V ning sellega, et toiteplokk suudaks tagada stabiilse draiveri ning valgusdiodide töö.

Lambil kasutatakse välist toiteallikat, mis ühendatakse juhtskeemi sisendisse orienteeruva nimipingega 12 V, mis läbib seejärel LED draiveri, et pinget alandada 12 V pealt 9 V peale. Edasi liigub signaal valgusdiodidesse, mis seejärel süttivad põlema.

3.1 Valgusdiodide valik

Valgusdiodide valimisel on lähtutud järgnevatest parameetritest:

- Pinge – Valgusdioode on laia toitepinge vahemikuga, isegi ühe valgusdiodi kohta 24 V või 48 V, seega ühe valgusdiodi pinge võiks jääda alla 5 V.
- Valgusvoog – valgusvoog võiks jääda 400 lm ja 800 lm vahele. Antud töö eesmärgiks ei ole koostada punktvalgustit vaid pigem rohkem väiksema võimsusega valgusdioode suuremale pinnale hajutatuna.
- Vool – Valgusdiodide vool on oluline parameeter, mis kitsendab LED draiveri valikut. Enamus laialt levinud LED draiverid on väljundvooluga kuni 1A. Siinkohal võetakse seda arvesse ning vastavalt valgusdiodide konfiguratsioonile veendutakse valgusdiodide töövoolu sobivuses ehk valgusdiodide koguvool ei tohi ületada 1 A.
- Värvustemperatuur – värvustemperatuur võiks jääda 2700 K ning 4000 K vahele. Mida väiksem Kelvini arv, seda soojem ehk kollakam on valgus ning mida suurem Kelvini arv, seda külmem ehk sinakam on valgus. Uurimused on näidanud sinise valguse negatiivset mõju ka uneajale. Sinise valguse foonis oleva inimese unetsükli algus on pärsitud, kuna bioloogiline kell ei fikseeri sinise valguse mõju all olles uneaja algust. See põhjustab pikema ärkveloleku, aga ka organismi kurnatuse/väsimuse [19].

- Värvieraldusindeks – Värvieraldusindeksiga väljendatakse valgusallika võimet näidata erinevate objektide värve usutavalt, võrreldes ideaalse või loomuliku valgusallikaga. Mida lähemal värvieraldusindeks on 100-le, seda realistlikum on valgus.
- Hind – võttes arvesse, et antud töös on planeeritud ainult ühe lambi väljatöötamine, siis mida odavam hind ühe komponendi kohta, seda parem.

Kuna töö lõppedes soovitakse seade ka konstrueerida, siis valitakse komponente nende saadavuse kohaselt eelistatult kohalikest poodidest. Head näited kodumaistest poodidest on Oomipood ning Elfa Distrelec [6], [18]. Kodumaistes poodides komponentide puudumisel on võimalik komponente valida poest A Premier Farnell Company, mis teeb koostööd Oomipoega [1], [18]. Koostöö erinevate poodide vahel on hea, sest sedasi suureneb komponentide valik. Negatiivse poole pealt aga on komponentide hind kallim. Komponentide valikul pööratakse tähelepanu ka komponentide laoseisule. Pole mõistlik valida komponente, mida enam ei toodeta.

A Premier Farnell Company kodulehel eelnevalt seotud parameetrite alusel parameetrilist otsingut teostades leiti järgnevad sobivad komponendid:

- Osram Duris E3
- Osram Duris E5
- Osram Duris S5

Tabelis 2 on eelnevalt kolme välja valitud valgusdiodi parameetrid.

Tabel 2. LED-ide võrdlustabel [20], [21], [22].

Parameeter	Osram Duris E3	Osram Duris E5	Osram Duris S5
Hind	0,29 €	0,31 €	0,32 €
Pinge (tüüpiline)	3,02 V	3,0 V	2,9 V
Vool (maksimum)	150 mA	180 mA	200 mA
Värvustemperatuur	2700 K – 6500 K	2700 K – 4000 K	2700 K – 6500 K
Valgusvoog	25 lm	35 lm	25 lm
Värvieraldusindeks	min. 80	min. 90	min. 80
Töötemperatuur	-40 °C ... +85 °C	-40 °C ... +85 °C	-40 °C ... +100 °C

Tabelis 2 toodud andmete alusel võrreldi selliseid parameetreid nagu värvieraldusindeks, valgusvoog ning värvustemperatuur. Hind, pinge, vool ning töötemperatuur erinesid kolmel väljavalitud komponendil piisavalt vähe ning nende väärtused ei muutnud otsust kasutada töös kõige sobivamate näitajatega Osram Duris E5 valgusdiodide.

Arvatavasti kasutatakse lambi toiteplokiks mõnda standardset lahendust, väljundpingega vahemikus 12 V – 24 V. Eeldades, et toiteploki valgusti sisendisse tulev sisendpinge on 12 V – 24 V, siis tuleb LED-ide koguse valimisel sellega arvestada. Kui hiljem LED draiverit või toiteploki valides selgub, et komponendid ei sobi omavahel kokku, siis alati on võimalik valgusdiodide konfiguratsiooni muuta. Esmapilgul vaadates paistab sobivat 4 valgusdiodi ühe riba peale. Ühe riba pinget U_{TOT} valgusdiodi nominaalpinge 3 V puhul saab arvutada valemiga (1):

$$U_{TOT} = U_{LED} \cdot n = 3 \text{ V} \cdot 4 = 12 \text{ V} \quad (1)$$

kus U_{LED} on ühe valgusdiodi pinge ning n on valgusdiodide arv ribas [21].

Üks riba koosneb kolmest jadamisi ühendatud valgusdiodist. LED draiveri valimisel tuleb tähelepanu pöörata sellele, et LED draiveri peale jääb ligikaudu 0,5 V – 1 V pinget [15]. See tähendab, et sisendpinge peab olema suurem kui väljundpinge. Vajadusel on võimalus sisendpinget tõsta või siis väljundis valgusdiodide ühendusskeemi muuta. LED-il on antud lisaks tavapingele ja pinge maksimum ja miinimum väärtused. Miinimumpingeks on antud valgusdiodi puhul 2,8 V ning maksimumpingeks 3,4 V [21]. Olgu täpsustatud, et miinimum- ning maksimumpinge arvutamisel on kasutatud valemit (1), kuid miinimumpinget tähistatakse U_{TOT_MIN} ning maksimumpinget U_{TOT_MAX} . Miinimumi puhul, kasutades valemit (1) tuleb ühe riba väärtuseks $U_{TOT_MIN} = 11,2 \text{ V}$ ning maksimumi puhul, kasutades valemit (1), saame arvutuse tulemusena $U_{TOT_MAX} = 13,6 \text{ V}$ ning sellisel juhul LED-id lähevad küll põlema, aga mitte nominaalvõimsusel. Sellisel põhjusel sai valitud ühe riba peale 3 jadamisi ühendatud valgusdiodi, mis annab valemit (1) kasutades ühe riba pingeks $U_{TOT} = 9 \text{ V}$. Valgusdiodi miinimumpinge korral tuleb ühe riba väärtuseks valemit (1) kasutades $U_{TOT_MIN} = 8,4 \text{ V}$. Maksimumpinge korral tuleb valemit (1) kasutades riba väärtuseks $U_{TOT_MAX} = 10,2 \text{ V}$.

Arvestades, et üks LED suudab välja anda ligikaudu 35 luumenit, saab välja arvutada ühe riba valgusvoo φ_{TOT} valemiga (2):

$$\varphi_{TOT} = \varphi_{LED} \cdot n = 35 \text{ lm} \cdot 3 = 105 \text{ lm} \quad (2)$$

kus φ_{LED} on ühe valgusdiodi valgusvoog ning n on valgusdiodide arv.

Arvutuse tulemusena selgub, et ühe riba kogu valgusvoost ei piisa eelnevalt seatud eesmärgi 400 lm – 800 lm täitmiseks. Selleks, et lambist tulev valgus oleks piisavalt efektiivne, valiti terve valgusti jaoks 18 LED-i, mis annab valemit (2) kasutades valgusti kogu valgusvooks $\varphi_{TOT} = 630 \text{ lm}$. 18 valgusdiodi puhul tuleb kasutada kuute paralleelselt ühendatud valgusdiodi riba. Paralleelse ühenduse puhul võib ette tulla, et kõikide ribade pinged ei ole võrdsed. Selle parandamiseks on iga riba lõppu, pärast valgusdioode, lisatud voolupeeglid, mis tasakaalustavad valgusdiodide ribale jäävat pinget. Voolupeeglis on transistori kollektor ja baas kokku ühendatud ning transistor muutub diodiks. Selleks, et leida diodile jääv pinge, uuritakse transistori baas-emitteri pinge (V_{BE}) parameetrit, mis on maksimaalselt 1,2 V (transistori valikust on juttu alapeatükis 2.4). Arvestades valgusdiodi miinimum- ning maksimumpingega ning voolupeeglele jääva pingega, selgub, et draiver peab olema suuteline oma väljundit muuta vahemikus 9,6 V – 11,4 V, et tagada valgusdiodide korrapärane töö.

Andmelehelte selgub, et valgusdiodi päri vool on maksimaalselt 180 mA. Kuna ei ole mõistlik valgusdiodi juhtida maksimaalse lubatud vooluga, siis valitakse juhtvooluks 100 mA, et jätta piisav varu maksimumvoolu jaoks. Ühest ribast läbi minev vool kattub sellega, mida vajab üks valgusdiod, seega üks riba vajab 100 mA voolu. Eelnevalt valiti, et valgusti koosneb kuuest ribast, seega kuue rea puhul saab vajaliku voolu I_{TOT} välja arvutada valemiga (3):

$$I_{TOT} = I_{LED} \cdot n = 100 \text{ mA} \cdot 6 = 600 \text{ mA} \quad (3)$$

kus I_{LED} on ühe riba vool ning n on ribade arv.

Viimasena arvutatakse välja valgusdiodide poolt tarbitav koguvõimsus P_{LEDS} valemiga (4):

$$P_{LEDS} = U \cdot I \cdot n = 3 \text{ V} \cdot 100 \text{ mA} \cdot 18 = 5,4 \text{ W} \quad (4)$$

kus U on pinge, I on vool ning n on valgusdiodide arv.

Valgusdiodi valgusti võimsuseks tuleks valitud LED-ide puhul 5,4 W, mis jääb eesmärgiks seatud 5 W ja 10 W vahemikku. Valgusdiodidele on jäetud üsna suur juhtvoolu varu ning vajadusel saab seda olenevalt draiveri valikust ka vastavalt vajadusele suurendada. Lühiajaliselt on võimalus draiver seadistada nii, et LED-id töötavad maksimaalse lubatud vooluga ning sellisel juhul on valgusdiodide poolt tarbitav koguvõimsus välja arvatav valemiga (4) ning lambi koguvõimsuseks tuleb 9,72 W. Selle abil on võimalik hinnata, milline oleks valgusvoog ligikaudu 10 vatise lambi korral.

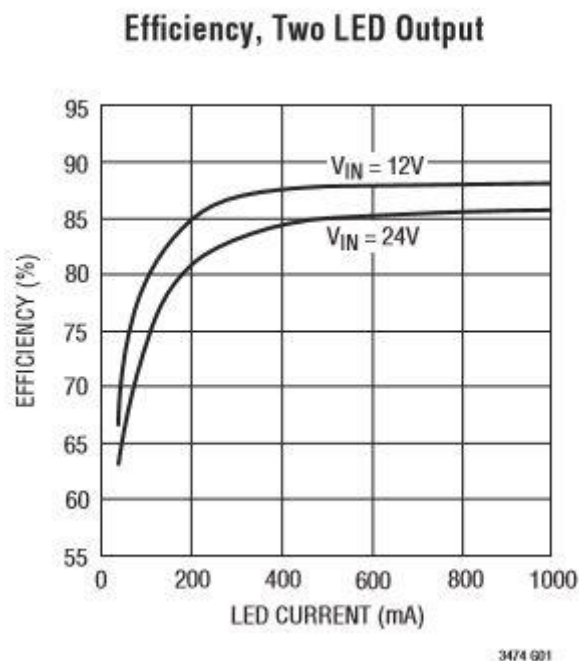
3.2 LED draiveri valik

Eelmises alapeatükis leitud valgusdiodi parameetrite alusel valitakse järgmisena välja LED draiver. Otsing on teostatud analoogselt nagu alapeatükis 2.1 valgusdiodide puhul.

Otsinguparameetrid, mille põhjal LED draiverit otsitakse:

- Draiveri sisendpinge – Kuna hetkel on toiteploki väljundpingeks valitud 12 V, seega draiveri toitepinge peab olema vastav.
- Draiveri väljundpinge – Alapeatükis 2.1 koostatud arvutuste põhjal peab draiveri väljund olema võimeline muutuma vahemikus 9,6 V – 11,4 V.
- Draiveri väljundvool – Alapeatükis 2.1 koostatud arvutuste põhjal selgus, et draiveri väljundvool peab olema vähemalt 600 mA. Kuna aga soovitakse säilitada võimalust kõrgema väljundvoolu testimiseks, siis võiks väljundvool olla vähemalt 1 A.

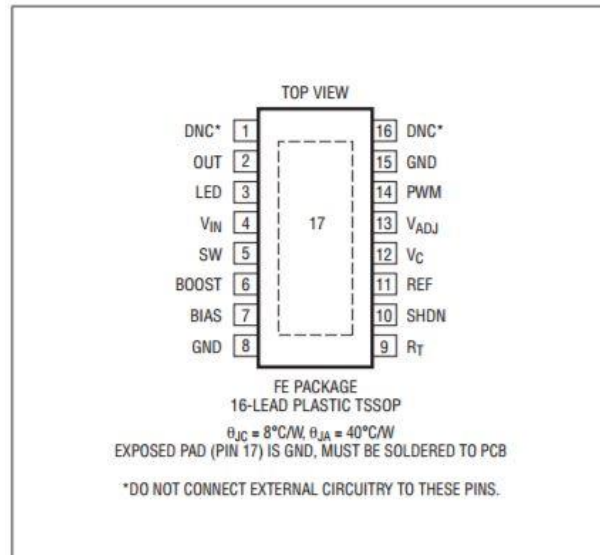
Draiveri otsinguparameetreid arvesse võttes sai järgmiseks välja valida LED draiveri, milleks osutus Linear Technology LT3474. Antud draiver on step-down draiver, mis tähendab, et tegu on lülitava draiveriga ning draiveri väljundpinge on väiksem kui sisendpinge. Andmelehel selgub, et draiveri lüliti pingelang $U_{CE SAT}$ on maksimaalselt 500 mV 1 A draiveri lüliti voolu korral [15]. Toiteploki valiku lihtsustamiseks analüüsitakse draiveri efektiivsust, mis on leitav järgnevalt jooniselt.



Joonis 3. LT3474 efektiivsus [15].

Jooniselt 3 leitakse, et 12 V toitepinge puhul on draiveri efektiivsuseks 600 mA koormusel korral orienteeruvalt 87,5 %, mis tähendab, et tarbitav sisendvool peab olema 15 % võrra suurem. Juhul kui kasutatav toiteallikas on väljundiga 12 V, siis on draiveri väljund maksimaalselt 11,5 V. Eelmises alapeatükis arvatud ühe LED riba maksimumpinge tuli 11,4 V. Eeldusel, et kasutatakse 12 V toidet, siis on tagatud valgusdiodide stabiilne töörežiim. Ülejäänud toitepingete korral on stabiilsus samuti tagatud.

Takisti R1 hoolitseb selle eest, et LED draiveri lülitussagedus oleks 500 kHz. Takistid R2 ning R3, mis on ühendatud väljaviikudega V_{ADJ} ning REF määravad ära draiveri väljundvoolu. Takistite R2 ning R3 parameetrite muutmise on võimalik muuta väljundvoolu suurust.



Joonis 4. LT3474 draiveri väljaviigud [15].

Antud draiveril on 16 erinevat väljaviiku (PIN), mis kõik on vajalikud draiveri tööks.

Tabel 3. LT3474 väljaviigud [15].

Väljaviik	Väljaviigu nimi	Väljaviigu ülesanne
PIN 1, 16	DNC	Tuleb jätta välise voluringi ning maandusega ühendamata.
PIN 2	OUT	Shunt takisti sisendiks. Väljaviik ühendada induktoriga ning kondensaatori väljundiga.
PIN 3	LED	Shunt takisti väljundiks. Väljaviiku tuleb ühendada valgusdiodi anood.
PIN 4	V _{IN}	Varustab vooluga sisemist voluringi ja lülitit ning selle lähedale peab olema lisatud toitekondensaator.
PIN 5	SW	Sisemise lüliti väljundiks. Väljaviik tuleb ühendada induktori ja Schottky diodiga.
PIN 6	BOOST	Kasutatakse, et suurendada juhtpinget sisemise NPN lüliti jaoks.
PIN 7	BIAS	Ühendatakse OUT-i ja läbi Schottky diodi BOOST-i.
PIN 8, 15, 17	GND	Maa ühendus.
PIN 9	R _T	Määrab sisemise ostsillaatori sageduse.
PIN 10	SHDN	Lülitab välja lülitusregulaatori ning sisemise eelvooluahela.
PIN 11	REF	Väljavoolu muutmiseks lisa takisti ja ühenda V _{ADJ} -ga tekitades pingejaguri.
PIN 12	V _C	Veavõimendi väljund, mida kasutatakse tagasiside ahela stabiilsuse kompenseerimiseks

Väljaviik	Väljaviigu nimi	Väljaviigu ülesanne
PIN 13	V _{ADJ}	Väljavoolu seadmise sisend.
PIN 14	PWM	Pulss Laius Modulatsiooni sisend, mille abil on võimalik väljundi heledust digitaalse signaaliga muuta.

3.3 Toiteploki valik

Eelnevalt on välja valitud valgusdiodid ning LED draiver, mida töös kasutatakse. Toiteploki valimisel on kasutatud analoogset viisi, mida on kasutatud valgusdiodide ning LED draiveri otsimisel ning mida on kirjeldatud alapeatükis 2.1.

Toiteploki valimisel seati järgnevad tingimused:

- Sisendpinge - Elektrivõrgu vahelduvvoolu nimipinge, milleks on 230 V.
- Väljundpinge – Kuna arvutuste käigus on leitud, et skeem töötab 12 V sisendpinge puhul, siis toiteploki väljundpingeks valitakse 12 V.
- Vool – Alapeatükis 2.1 koostatud arvutuste käigus on valgusdiode läbiv vool 600 mA.
- Võimsus – Alapeatükis 2.1 koostatud arvutuste käigus peab toiteploki võimsus olema vähemalt 5,4 W.
- Tolerants – Madalamate väljundpingete puhul peaks tolerants olema võimalikult väike, et tagata draiveri stabiilne töö.

Otsingu tulemusel on antud töös kasutatud CELLEVIA POWER AC/DC-CL12/1 toiteploki põhjusel, et toiteplokk vastab etteantud tingimustele, on hõlpsasti kättesaadav ning on üks odavamaid samalaadsete toiteallikate seas.

Tabel 4. Toiteploki spetsifikatsioon [4].

Sisendpinge	100 V ... 240 V
Väljundpinge	12 V
Väljundvool	1 A
Tolerants	+/- 5 %
Maksimaalne võimsus	12 W

Tabelist 4 lähtuvalt selgub, et sobivad on toiteploki sisendpinge, väljundpinge, väljundvool ning maksimaalne võimsus. Lisaks kontrollitakse, kas valitud toiteallika väljundpinge tolerants on piisavalt väike, et tagada draiveri stabiilne töö. Selleks võetakse arvesse draiveri kadu ja tolerantsi, mis arvutatakse välja valemiga (5):

$$U_{OUTMIN} = (U_{OUTPSU} \cdot 0,95) - U_{CE SAT} = (12 V \cdot 0,95) - 0,5 V = 10,9 V \quad (5)$$

kus U_{OUTPSU} on toiteploki väljundpinge, 0,95 on toiteploki tolerants ning $U_{CE SAT}$ on draiveri pingelang.

Sellest lähtuvalt selgub, et valitud toiteplokk ei ole sobilik antud töös kasutamiseks. Eelnevate arvutuste käigus võeti arvesse valgusdiodide maksimaalset päripinget. Eeldades, et nende päripinge on siiski andmelehes toodud tüüpilise väärtuse läheduses, siis selgub, et 12 V toiteplokk on piisav. Juhul kui selgub, et valitud toiteplokk ikkagi ei ole piisav, siis valitakse uus toiteplokk, mis on pingega kuni 24 V.

3.4 Muud elektriskeemis kasutatavad komponendid

Ülejäänud elektriskeemis kasutatud komponendid on valitud identsed komponentidega, mida on kasutatud draiveri LT3474 andmelehel skeemi koostamisel. Muude komponentide valimisel on kasutatud analoogset viisi, mida on kasutatud valgusdiodide ning LED draiveri otsimisel ning mida on kirjeldatud alapeatükis 2.1.

Kondensaator C1 täidab toitekondensaatori rolli varustades LED draiverit lülitushetkedel. Kondensaator C2 on ühendatud V_C külge, mis on veavõimendi väljund. C2 väärtus on valitud andmelehel soovitatud 100 nF. Kondensaatori C3 ülesanne skeemis on induktori väljundi filtreerimine nii, et väljund oleks võimalikult müravaba. Kondensaatorit C4 kasutati, et viia NPN transistori juhtpinget üle toitepinge, väärtus on võetud andmelehe soovituslik.

Induktoris talletatakse energiat hetkel mil draiveri väljund on välja lülitatud. Moodustub skeem induktorist, diodist, väljundkondensaatorist ja koormusest. Sellest tulenevalt on näha, et induktorit läbib tarbijale minev vool.

Schottky diodi ülesanne skeemis on voolu juhtimine ainult väljalülitatud aja jooksul. Diodi puhul on kaks põhilist parameetrit, mida jälgida, päri vool ning vastupinge ja stabiilse töö tagamiseks ei tohi neid ületada.

Transistor, mida kasutatakse voolupeeglis, valiti järgnevate parameetrite alusel:

- Maksimaalne kollektori ja emitteri vaheline pinge (V_{CEO}) – ületades seda parameetrit, läheb transistor katki ja see peab olema vähemalt 24 V.
- Kollektorvool (I_C) – ületades kollektorvoolu, ei tööta transistor stabiilselt. Kuna ühest ribast läbi minev vool on 100 mA, siis peab ka kollektorvool olema vastav.
- Baas-emitter vaheline pinge (V_{BE}) – kuna transistori kasutatakse voolupeeglis diodi režiimis, siis see parameeter määrab ära voolupeeglile jääva pinge, mis võetakse arvesse võimsuse arvutamisel, mida väiksem see on, seda parem.
- Hajuvõimsus (P_{tot}) – kui seda parameetrit ületada, siis transistor kuumeneb üle ning läheb katki.

Valitud transistoriks osutus BC817-25, mille V_{CEO} on 45 V, I_C on 500 mA, V_{BE} on 1,2 V, kuid 100 mA koormusvoolu korral on V_{BE} ligikaudu 0,75 V, ning P_{tot} on 250 mW [17]. Selleks, et veenduda transistori stabiilses töös, tuleb välja arvutada ka hajuvõimsus P_D valemiga (6):

$$P_D = V_{BE} \cdot I_C = 0,75 \text{ V} \cdot 0,1 \text{ A} = 75 \text{ mW} \quad (6)$$

kus V_{BE} on baas-emitter pingekoormusvoolu 100 mA korral ja I_C on kollektorvool.

Lähtuvalt püsitatud parameetritest ja tehtud arvutustest, veenduti, et transistor BC817-25 on sobiv.

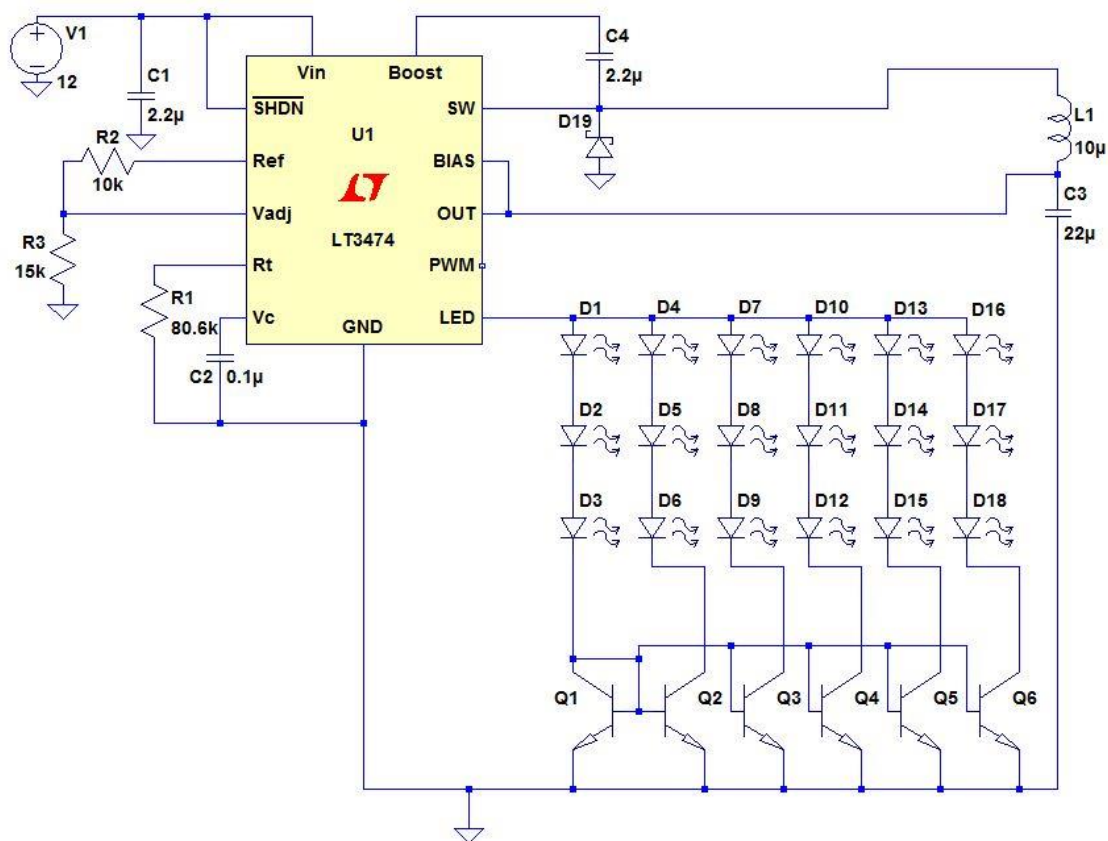
Kuna nende komponentide valikul on kasutatud tootja poolt soovitatud parameetreid, siis eeldati, et skeem töötab selliste andmetega.

4 Elektriskeemi simulatsioon

Elektriskeemi simuleerimine on vajalik, et kindlaks teha, kas antud töösse valitud komponendid omavahel sobivad ning kas skeem töötab korrektselt. Aluseks on võetud skeem, mis on välja toodud peatükis 2.

4.1 Simulatsiooni skeemi analüüs

Elektriskeemi sisendpingeks ning ühtlasi LED draiveri toitepingeks on 12 V, mis tuleb alapeatükis 2.3 välja valitud toiteplokiist. Draiver peab muutma 12 V valgusdiiodidele sobivaks sisendpingeks, mis jääb vahemikku 8,4 V ning 10,2 V. Vool, mis valgusdiode läbib, peab olema stabiilne 600 mA.



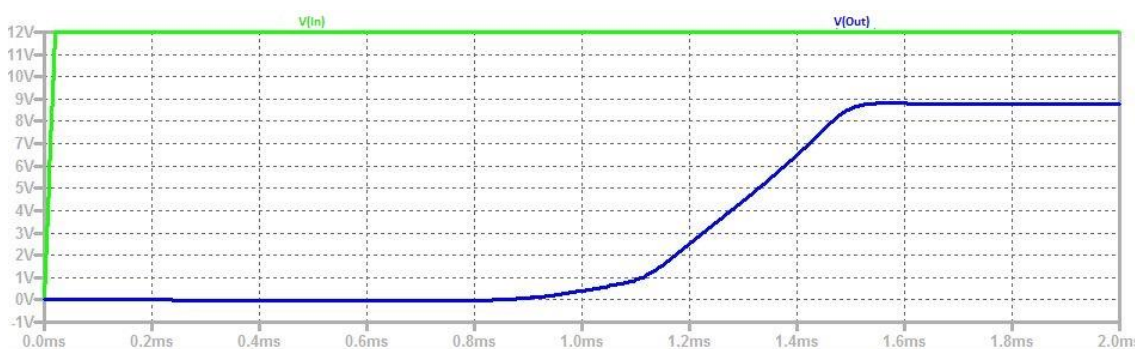
Joonis 5. Simulatsiooni elektriskeem

Oodatavad tulemused on, et LED draiver suudab pinget 12 V pealt ligikaudu 9 V peale alandada ning valgusdioode läbiv vool ühe LED-i puhul on 100 mA ning valgusdioidide summaarne tarbitav vool on 600 mA. Skeemi simuleerimisel peaks tulemused klappima enam-vähem tulemustega, mis eespool arvatati.

Skeemi simuleerimisel on kasutatud programmi LTSpice. Skeemi komponendid on valitud arvutustega samade parameetritega.

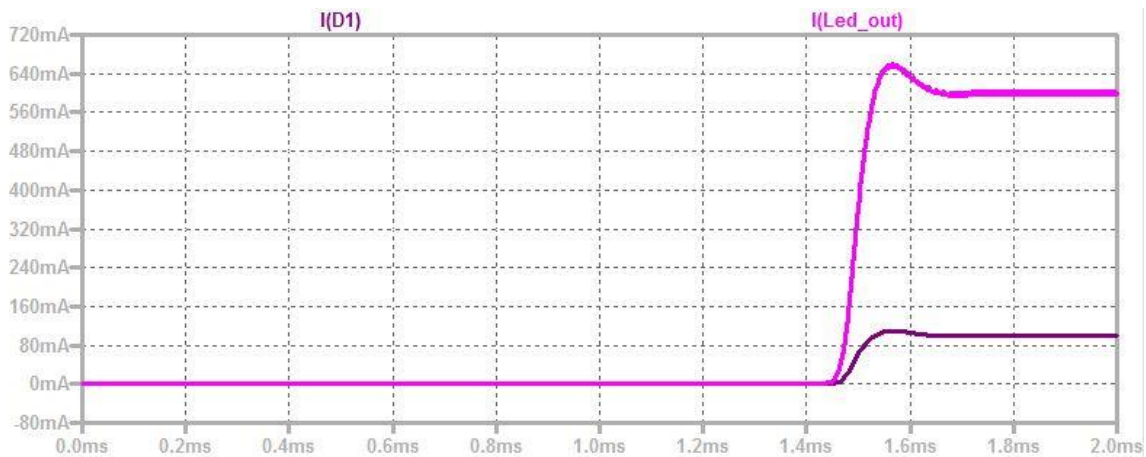
4.2 Simulatsiooni tulemused

Joonisel 6 on kujutatud graafik, kus LED draiveri sisendpinge väärtus rohelisega on 12 V, V(In) ning väljundpinge väärtus sinisega on 9 V, V(Out). Suurused klapiivad arvutustega, millest võib järeldada, et skeem töötab nii nagu ette nähtud.



Joonis 6. LED draiveri sisend- ning väljundpinge graafik.

Joonisel 7 on kujutatud graafik, kus ühest valgusdioidist läbi minev vool 100 mA, I(D1) on märgitud lillaga ning kõikidest valgusdioididest läbi minev vool 600 mA, I(Led_out) on märgitud roosaga. Graafikul kujutatud väärtused klapiivad arvutustega, millest võib järeldada, et skeem töötab õigesti.



Joonis 7. Valgusdioode läbiv vool.

Simulatsiooni käigus veenduti voolupeegli töötamisel, et kontrollida, et igast ribast läbi minev vool oleks võrdne. Kuna simulatsioonis kasutatavad valgusdiodi mudelid on kõik ühesugused, siis lühistatakse üks valgusdiod suvalises ribas, et simuleerida olukorda, kus üks valgusdiod on põlenud lühisesse ning valgusdiodi ribad on seetõttu erineva pingega. Simulatsiooni käigus leiti, et vea olukorras igast ribast läbi minev vool oli võrdne, millest võib järeldada, et antud lahendus on piisav. Simulatsiooni käigus läks igast ribast läbi täpselt sama suur vool, mis on tingitud transistori ideaalsetest parameetritest.

Simulatsiooni käigus võeti arvesse esialgselt püstitatud toitepinge vahemikku ja toiteallika tolerantsi ning veenduti, et skeemi stabiilne töö on tagatud kõige minimaalsema ja tüüpilisema valgusdiodi päripinge puhul. Olles testinud erinevaid toitepingeid, sai leitud, et $I(\text{Led_out})$ väljundvoolu ülevool ei ole sellest sõltuv. Lähtuvalt simulatsiooni tulemustest on valgusdiodide valikul sellega arvestatud, et võib esineda väike ülevool ja see ei mõjuta skeemi töötamist.

5 Trükkplaadi koostamine

Olles simuleerimise teel veendunud, et välja valitud komponentidega elektriskeem töötab, tuleb viimase osana enne lambi kokku panemist kujundada trükkplaat. Lisaks uuritakse komponentide saadavust ning maksumust.

5.1 Komponentide hinnatabel

Tulevikus, kui planeeritakse trükkplaati konstrueerida, siis on selleks poest komponendid vaja osta. Antud töös kasutatud üksikud komponendid maksavad vähe, aga kui komponente tekib elektriskeemi rohkem, siis tõuseb ka trükkplaadi koostamise hind.

Komponentide hinnatabeli koostamisel on lähtutud sellest, et peatükis 2 välja toodud elektriskeemis kasutatud komponendid ei oleks väga kallid, sest muidu kujuneb toote väljaarendamine väga kalliks. Samuti on silmas peetud komponentide kättesaadavust. Vaadati, kas komponenti on võimalik ühe kaupa osta või peab komponendi ostmisel neid 100 või 1000 tükki korraga ostma. Kuna antud töö käigus on planeeritud ainult ühe lambi konstrueerimine, siis ei ole vajadust ühte komponenti 100 või 1000 tükki korraga tellida. Ainult kahe komponendi puhul oli juhus, kus minimaalselt sai tellida 5 komponenti korraga. Trükkplaadil kasutatud komponentide nimekiri on välja toodud Tabelis 5.

Tabel 5. Komponentide hinnatabel.

Nimetus	Kogus	Tüki hind	Koguhind
Osram Duris E5	18	0,31 €	5,58 €
Schottky SS14	1	0,12 €	0,12 €
Induktor LQH32PN100MN0L	5	0,054 €	0,27 €
LED draiver LT3474	1	6,16 €	6,16 €
Toiteplokk AC/DC-CL12/1	1	5,06 €	5,06 €
Passiivkomponendid	13	0,1 €	1,3 €
Trükkplaat	5	6 €	30 €
Lüliti	1	1,03 €	1,03 €
Kokku	41		49,52 €

Kõikide komponentide hinnad peale trükkplaadi ning toiteploki hinna on võetud veebilehelt A Premier Farnell Company [1]. Toiteplokk on välja valitud veebilehelt Transfer Multisort Elektronik [24]. Trükkplaadi hind on võetud veebilehelt Elecrow [8]. Antud töö jaoks on vajalik ainult ühte trükkplaati, aga hinnatabelis on märgitud koguseks 5 trükkplaati. Seda sellel põhjusel, et antud veebilehelt ei saanud tellida vähem kui 5 trükkplaati korraga. Trükkplaatide hinna sisse on arvestatud ka transport, mis kulub komponentide saatmiseks Eestisse.

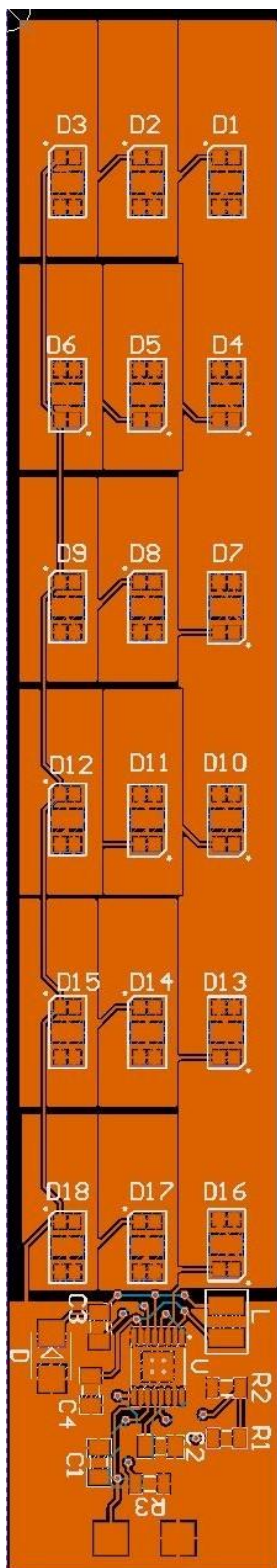
5.2 Trükkplaadi kujundamine

Trükkplaadi kujundamine seisnes peamiselt komponentide sobiva asetuse välja mõtlemises ning ühendusradade vedamises. Kuigi komponentide paigutus ei olnud väga suureks probleemiks, sest seda oli tänu peatükis 2 välja toodud elektriskeemile lihtne teha, siis radade vedamine nii, et rajad omavahel ei ristuks, oli palju keerulisem ning nii mõnigi kord tuli radu ümber teha või komponente ümber tõsta. Radade vedamise tegi natuke kergemaks läbiviikude kasutamine, mis lubas radu ka trükkplaadi alumisel kihil vedada.

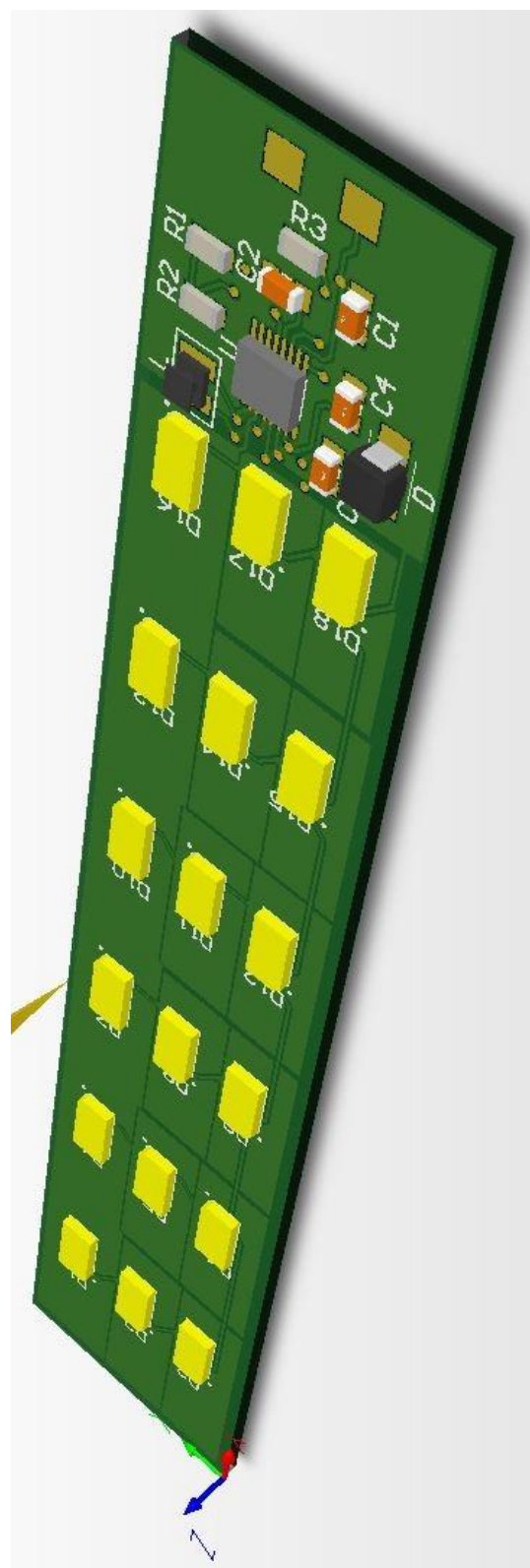
Peatükis 2 valitud komponentide puhul jälgiti, et neid oleks võimalikult kerge trükkplaadile joota. Takistite puhul otsustasin valida 1206 korpuses pindjoodetavad takistid, mis on ühed levinuimad ning piisavalt suured, et neid on ka mugav plaadile joota. Samuti on 1206 korpuses skeemis kasutatud kondensaatorid. Ülejäänud töös kasutatud komponendid pole küll 1206 korpuses, kuid on siiski pindjoodetavad.

Trükkplaadil on iga valgusdiodi alla pandud ka jahutusala, sest 75 % valgusdiodi koguvõimsusest muutub soojuseks. Valgusdiodid on esmalt üksteisest piisavalt kaugele tõstetud, et igäihe alla jääv jahutusala saaks olla piisavalt suur ning seejärel on trükkplaat kaetud vasega. Antud töö raames ei olnud planeeritud soojusarvutuste teostamine, seega ei ole neid ka töös arvatud. Kui trükkplaat peaks tegemisse minema, siis sobivad jahutusosalade suurused saab teada katsetuste teel.

Trükkplaadi kujundamisel on kasutatud tarkvara CircuitMaker. Alumise pinna volurajad on kujutatud sinisega värviga ning ülemised punasega. Trükkplaadi mõõtudeks on 150 mm x 26 mm ning paksus 1,6 mm. Antud trükkplaadi kõikide komponentide umbkaudne maksumus kokku on 50 eurot.



Joonis 8. Trükkplaadi kujundus



Joonis 9. Trükkplaadi 3D mudel

6 Kokkuvõte

Antud töö eesmärgiks oli LED lambi struktuurskeemi koostamine, lambi detailse elektriskeemi koostamine, skeemi parameetrite kontrollimine arvutuste teel, skeemi kontrollimine simulatsiooni teel ning trükkplaadi kujundamine. Eesmärgiks seatud punktid said täidetud. Skeemis kasutatud komponentide parameetrites veenduti.

Töö esimeses osas kirjeldati erinevaid lampe ning koostati töös kasutatud LED lambi struktuurskeemi. Töö teises osas said välja valitud töös kasutatavad komponendid ning seletatud nende tähtsust antud töö juures. Kolmandas osas simuleeriti koostatud elektriskeemi ning võrreldi tulemusi arvutuste ning oodatavate tulemustega. Neljandas osas on välja toodud elektriskeemi põhjal koostatud trükkplaadi esialgne kujundus koos kasutatud komponentide loeteluga.

Leian, et antud töös püstitatud eesmärgid seoses lambi koostamise ning tööpõhimõtte selgeks tegemisega saab lugeda täidetuks.

Kasutatud kirjandus

- [1] "A Premier Farnell Company," [WWW] <http://ee.farnell.com> [Kasutatud 12.05.2017]
- [2] "Ajaviide," [WWW] <http://ajaviide.ee/ledlamp-raha-saast/> [Kasutatud 3.05.2017]
- [3] "Altium Limited," [WWW] <https://circuitmaker.com/> [Kasutatud 17.05.2017]
- [4] "Cellevia Power," [WWW] http://www.tme.eu/en/details/ac_dc-cl12_1/mains-power-supplies/cellevia-power/ [Kasutatud 9.05.2017]
- [5] "Cree," [WWW] <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampThermalManagement.pdf> [Kasutatud 15.05.2017]
- [6] "Distrelec Group Inc." [WWW] <https://www.elfadistrelec.ee/> [Kasutatud 18.05.2017]
- [7] "Eesti Energia," [WWW] <https://www.energia.ee/tark-tarbimine/kokkuhoid> [Kasutatud 19.05.2017]
- [8] "Elecrow Technology," [WWW] <https://www.elecrow.com/> [Kasutatud 12.05.2017]
- [9] "Elektripaigaldise käidule ja elektritööle esitatavad nõuded," Riigi Teataja. 26.06.2015. [WWW] <https://www.riigiteataja.ee/akt/128062015008> [Kasutatud 13.05.2017]
- [10] "Future Electronics," [WWW] <http://www.futureelectronics.com/en/drivers/led-driver.aspx> [Kasutatud 3.05.2017]
- [11] "LEDKE Technology," [WWW] <http://www.ledke.com/news/Advantages-Disadvantages-LED.html> [Kasutatud 29.04.2017]
- [12] "Ledmedia," [WWW] <http://www.ledmedia.ee/shop/mis-on-led> [Kasutatud 29.04.2017]
- [13] "Ledwill," [WWW] <http://www.ledwill.ee/Led-valgusti-eelised> [Kasutatud 3.05.2017]
- [14] "Lifewire," [WWW] <https://www.lifewire.com/power-supply-unit-2618158> [Kasutatud 9.05.2017]
- [15] "Linear Technology," [WWW] <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3474fd.pdf> [Kasutatud 10.05.2017]
- [16] "Linear Technology," [WWW] <http://www.linear.com/designtools/software/> [Kasutatud 17.05.2017]
- [17] "Nexperia," [WWW] http://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/BC817_BC817W_BC337.pdf [Kasutatud 19.05.2017]
- [18] "Oomipood," [WWW] <https://www.oomipood.ee/> [Kasutatud 18.05.2017]
- [19] "Optiline Grupp," [WWW] <http://www.optiline.ee/crizal-prevencia/> [Kasutatud 15.05.2017]
- [20] "Osram Duris E3," OSRAM GmbH, 16.06.2016. [WWW] [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic9/00226801_0.pdf/GW%20JCLPS1.EM%20-%20DURIS%20E%203%20\(EnglishDeutsch\).pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic9/00226801_0.pdf/GW%20JCLPS1.EM%20-%20DURIS%20E%203%20(EnglishDeutsch).pdf) [Kasutatud 3.05.2017]
- [21] "Osram Duris E5," OSRAM GmbH, 10.12.2015. [WWW] [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00196915_0.pdf/GW%20JDSRS1.CC%20-%20DURIS%20E%205%20\(EnglishDeutsch\).pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00196915_0.pdf/GW%20JDSRS1.CC%20-%20DURIS%20E%205%20(EnglishDeutsch).pdf) [Kasutatud 2.05.2017]

- [22] “Osram Duris S5,” OSRAM GmbH, 14.12.2015. [WWW] [http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00196933_0.pdf/GW%20PSLM31.EM%20%20DURIS%20S%205%20\(EnglishDeutsch\).pdf](http://www.osram-os.com/Graphics/XPic1/00196933_0.pdf/GW%20PSLM31.EM%20%20DURIS%20S%205%20(EnglishDeutsch).pdf) [Kasutatud 3.05.2017]
- [23] “Smelta Blogi,” [WWW] <http://www.smelta.com/blog/valgusdioodi-omadused-ja-ajalugu/> [Kasutatud 29.04.2017]
- [24] “Transfer Multisort Elektronik,” [WWW] <http://www.tme.eu/> [Kasutatud 14.05.2017]