

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za elektrotehniko

Matej Kirn

Hibridni močnostni ojačevalnik

Diplomsko delo univerzitetnega študija
Mentor: izr. prof. dr. Peter Zajec, uni. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2015

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Petru Zajcu, uni. dipl. inž. el., ki me je vzel pod mentorstvo in za številne nasvete ter razlage pri diplomskem delu.

Zahvaljujem se dr. Alešu Lebanu, univ. dipl. inž. el. za pomoč pri meritvah in ostale nasvete pri izdelavi naprave.

Zahvaljujem se tudi Smiljanu Dečmanu, Sandiju Abramoviču ter Božu Gerlici za pomoč pri nabavi komponent in druge nasvete. Zahvala gre tudi ostalemu osebju LRTME za pomoč in prijazno besedo ter prijetno vzdušje v laboratoriju.

Iz srca bi se rad zahvalil mojim staršem, ki so mi stali ob strani in me podpirali ter vzpodbujali pri izdelavi diplome.

Zahvala gre tudi mojim prijateljem in sošolcem, ki so me spodbujali in mi po svojih močeh pomagali pri študiju in izdelavi diplomskega dela.

Kazalo vsebine

1	Uvod	1
2	Aktuator.....	2
2.1	Hidravlični in pnevmatski	2
2.2	Termični ali magnetni aktuatorji.....	3
2.3	Električni aktuatorji.....	3
2.4	Elektromagnetni aktuator	4
2.5	Aktuator CAL-36-015-5.....	6
3	Hibridni ojačevalnik	9
3.1	Linearni del	9
3.2	Stikalni del.....	11
3.2.1	Časovno diskretno modularana stopnja.....	12
3.2.2	Pulzno širinska modulacija	15
4	Nadzor in sestava hibridnega ojačevalnika	18
4.1	Zgradba logičnega vezja.....	20
4.1.1	Prvi korak – vklop PWM pretvornika.....	20
4.1.2	Drugi del logičnega vezja	21
4.1.3	Tretji korak – vklop TDM pretvornika	22
4.1.4	Četrti korak – priklop bremena	23
4.2	Zgradba TDM ploščice.....	24
4.3	Zgradba PWM ploščice	27
4.4	Tiskano vezje močnostnega tokokroga PWR	30
4.4.1	Regulacija izhodnega toka	34
4.5	Pomožni sestavni deli hibridnega ojačevalnika	35
4.5.1	Napajalniki	35
4.5.2	Hladilno telo	36
5	Meritve.....	37
5.1	Izkoristek hibridnega ojačevalnika	37
5.2	Frekvenčni odziv hibridnega ojačevalnika	39
5.3	Vsebnost višjih harmonikov (THD)	40
6	Sklep.....	42
7	Priloge	43
7.1	Močnostno vezje PWR.....	43
7.1.1	Uporabljeni elementi na PWR	45
7.1.2	Položaj elementov PWR.....	46
7.2	Nadzorna tiskanina TDM	48
7.2.1	Uporabljeni elementi TDM.....	49
7.2.2	Položaj elementov TDM.....	50
7.3	Nadzorno vezje PWM	51
7.3.1	Uporabljeni elementi	52
7.3.2	Položaj elementov PWM	53
8	Viri.....	54

Kazalo slik

Slika 1: Blokovni diagram celotnega pogonskega sklopa.	1
Slika 2: Hidravlični aktuator (povzeto po: http://www.exlar.com).	2
Slika 3: Prerez aktuatorja (povzeto po: (http://airwatch.com)).	4
Slika 4: princip zgradbe Elektromagnetnega aktuatorja (povzeto po: http://www.engnetglobal.com).	6
Slika 5: Tehnična skica CAL-36 (povzeto po: http://www.smac-mca.com).	7
Slika 6: Blokovna shema hibridnega ojačevalca (povzeto po: http://lrtme.fe.uni-lj.si).	9
Slika 7: Močnostni linearni ojačevalnik OPA 549 in razpored kontaktov (pinov) (povzeto po: http://www.tubecad.com).	10
Slika 8: Idealni neinvertirajoči oziroma elektrometrski ojačevalnik (povzeto po: http://lrtme.fe.uni-lj.si).	11
Slika 9: Blokovna shema hibridnega ojačevalca.	11
Slika 10: Skica poteka tokov.	12
Slika 11: Tokovi I _{opa} , ITDM in I _{out}	13
Slika 12: UTDM(± 25 V) ter proženje tranzistorjev (viola) in I _{opa} (rumena).	14
Slika 13: Blokovna shema TDM.	14
Slika 14: Shema PWM dela.	15
Slika 15: Razlika v velikosti vrednosti U _{out} glede na vrednost UC1.	16
Slika 16: Blokovna shema PWM.	17
Slika 17: CPLD shema priključnih kontaktov (povzeto po: http://www.xilinx.com/)	18
Slika 18: Logično vezje za vklop PWM pretvornika.	20
Slika 19: Generiranje monostabilnega pulza procedure start.	21
Slika 20: Generiranje signalov takt not in clk16.	21
Slika 21: Logično vezje za vklop linearnega ojačevalnika.	22
Slika 22: Logično vezje za vklop TDM pretvornika.	22
Slika 23: Generiranje signala procedure stop.	23
Slika 24: Generiranje signala procedure stop.	23
Slika 25: Priključni kontakti TDM ploščice.	24
Slika 26: Pretvorba I _{opa} signala ter njegova diskretizacija.	25
Slika 27: Časovno vzorčenje tokovnega regulacijskega pogreška.	25
Slika 28: Generiranje prožilnih signalov H TDM in L TDM ter mrtvega časa.	26

Slika 29: Napetostni sledilnik (IC1) in polnovalni usmernik za I_{opa}	26
Slika 30: Primerjalnik za $I_{opa \min}$	27
Slika 31: Priključni kontakti za PWM.....	27
Slika 32: Vezava PWM čipa na PWM ploščici.....	28
Slika 33: Način generiranja U_{zel}	29
Slika 34: Določitev logičnih stanj $I_{pwm \min}$ in $I_{pwm \max}$	29
Slika 35: Primerjalnik, da dobimo $U_{DC \min}$	30
Slika 36: Detajlna shema linearnega ojačevalnika s tokovno sondo.....	31
Slika 37: Detajl močnostnega vezja podpornimi kondenzatorji in konektorji za priklop bremena.....	32
Slika 38: Detajl močnostnega TDM pretvornika z izhodom (K3).....	32
Slika 39: Pretvorba signala V_a v U_{out}	33
Slika 40: Detajl močnostnega vezja PWM pretvornika.....	33
Slika 41: Elektronika na potencialu UC1.....	34
Slika 42: Sestava P regulatorja.....	35
Slika 43: Fazni odziv hibridnega ojačevalnika.....	39
Slika 44: Amplitudni odziv hibridnega ojačevalnika.....	40
Slika 45: Graf THD pri osnovni frekvenci 1500 Hz.....	41
Slika 46: Shema tiskanine PWR.....	43
Slika 47: Shema tiskanine PWR.....	44
Slika 48: Postavitev elementov gornji del tiskanine.....	46
Slika 49: Postavitev elementov spodnji del tiskanine.....	47
Slika 50: Shema vezja TDM tiskanine.....	48
Slika 51: Položaj elementov TDM tiskanine.....	50
Slika 52: Shema vezja PWM tiskanine.....	51
Slika 53: Položaj elementov PWM tiskanine.....	53

Kazalo tabel

Tabela 1: Prednost in slabosti hidravličnih in pnevmatskih aktuatorjev.....	3
Tabela 2: Prednosti in slabosti električnih aktuatorjev.....	4
Tabela 3: Prednosti in slabosti elektromagnetnih aktuatorjev.....	6
Tabela 4: Pripadniki serije in osnovni podatki elektromagnetnih aktuatorjev CAL-36.....	7
Tabela 5: Vhodni CPLD signali.....	19
Tabela 6: Izhodni CPLD signali.....	19
Tabela 7: Merjenje izkoristka pri različnih frekvencah in konstantnem bremen $R = 32 \Omega$ in $L = 100 \mu H$	37
Tabela 8: Merjenje izkoristka pri različnih frekvencah in različnim bremenskim tokom.....	38
Tabela 9: Vrednosti THD pri različnih frekvencah.....	41
Tabela 10: Uporabljeni elementi na PWR tiskanini.....	45
Tabela 11: Uporabljeni elementi na TDM tiskanini.....	49
Tabela 12: Uporabljeni elementi na PWM tiskanini.....	52

Povzetek

V diplomski nalogi je podan podroben opis zgradbe in delovanje hibridnega ojačevalnika, ki sestoji iz linearne in stikalne stopnje. Kombinacija obeh omogoča doseganje višjega izkoristka, kot bi ga dosegli le z linearno stopnjo, saj slednjo tokovno razbremeni stikalna stopnja. Tok, ki se zaključuje skozi linearno stopnjo, pa je nasprotno enak tokovni valovitosti stikalne stopnje – linearni ojačevalnik deluje torej kot kompenzator višjeharmonskih komponent povzročenih s stikalnim delom ojačevalnega vezja. S ciljem učinkovite pretvorbe je vezju dodan PWM pretvornik, ki omogoča, da izhodna napetost doseže poljubno vrednost v celotnem razponu napajalne napetosti.

Ključne besede: hibridni ojačevalnik, aktuator, linearni ojačevalnik, stikalni del, pulzno širinska modulacija PWM, časovno diskretna modulacija TDM, CPLD vezje.

Abstract

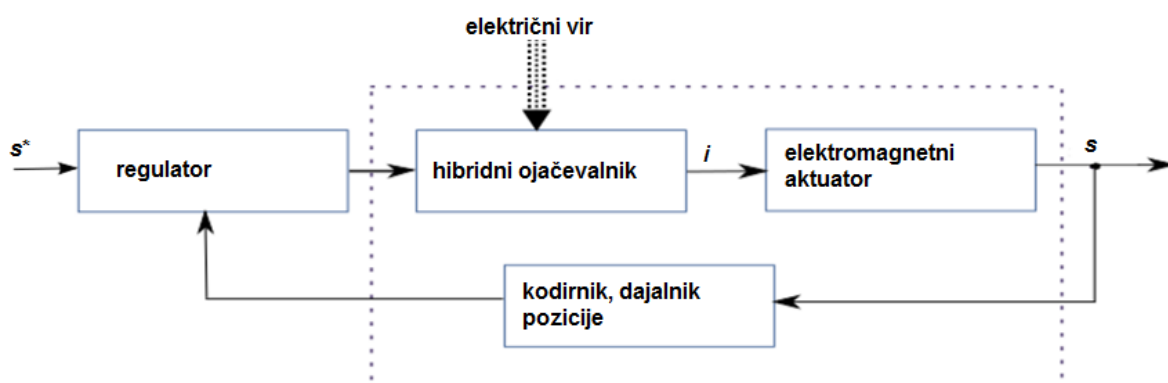
The thesis gives a detailed description of the construction and operation of a hybrid amplifier consisting of linear and switching part. The combination of both allows achieving higher efficiency that would be achieved only with linear part, since the switching part takes over majority of the load current. The current terminating through a linear part is an opposite to the current ripple of switching part - the linear amplifier thus acts as a compensator for harmonic components caused by switching part of the amplifier circuit. For the purpose of efficient conversion a PWM inverter has been added to the amplifier, which allows the output voltage to reach an arbitrary value in the range of the supply voltage.

Keywords: hybrid amplifier, actuator, linear amplifier, a switching part, pulse width modulation PWM, time discrete modulation TDM, CPLD circuit.

1 Uvod

Prvi avdio ojačevalnik je za namen ojačitve AM signala leta 1909 zgradil Lee De Forest izumitelj vakuumске cevi – triode. Temu odkritju je sledil nagel vzpon ojačevalnih komponent (bipolarni in unipolarni tranzistorji) in različnih topologij ojačevalnih vezij [1]. V vezjih močnostne elektronike zasledimo ojačevalna vezja, kjer močnostni tranzistorji delujejo bodisi v linearnem ali stikalnem načinu. Izbrani način delovanja je podrejen kriterijem kot so: faktor ojačenja, popačitev izhodnega signala (u , i), izkoristek, velikost in teža naprave – torej specifičnim zahtevam konkretne aplikacije.

V nadaljevanju diplomskega dela je podan opis in zgradba ojačevalnega vezja, ki je namenjen napajanju elektromagnetnega aktuatorja (angl. voice coil actuator) z majhno mehansko časovno konstanto. Aktuator je namenjen izvajanju hitrih, premih gibov njegovega pomičnega dela, zaradi česar sta v ospredju dimenzioniranja ojačevalnega vezja dinamika ter majhna valovitost izhodne veličine – toka.



Slika 1: Blokovni diagram celotnega pogonskega sklopa.

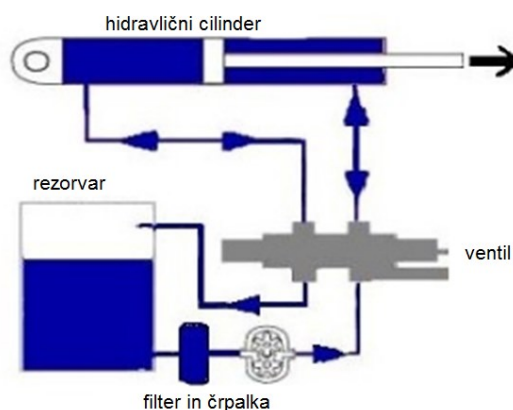
Čeprav bo kasneje ojačevalno vezje vpeto v regulacijski sistem (slika 1) (z merilnikom pomika, regulatorjem) za nadzor pomika, je v diplomskem delu ojačevalno vezje sprva obravnavano kot samostojna enota – torej kot ojačevalnik napetosti. Za namen končne aplikacije pa mu je dodan merilnik izhodnega toka in tokovni regulator, s čimer tvori podrejeni (tokovni) regulacijski krog, ki na sliki 1 ni ponazorjen.

2 Aktuator

Aktuator je pogonska naprava za izvrševanje nadzorovanega fizičnega gibanja. Njihovo gibanje je v splošnem nadzorovano – krmiljeno z električnimi signali. V praksi so aktuatorji pogosto uporabljeni kot mehanizmi za premikanje predmetov (angl. pick and place). Obstaja več različnih tipov: hidravlični, pnevmatski, termični ali magnetni in mehanični, električni, elektromagnetni [2].

2.1 Hidravlični in pnevmatski aktuator

Premik hidravličnega aktuatorja (cilindra na sliki 2) dosežemo s tlačno razliko med levo in desno stranjo premičnega bata. Tlačno razliko nadziramo z (elektro) ventilom, ki uravnava pretok hidravlične tekočine in s tem določa smer in velikost premika ter silo aktuatorja.



Slika 2: Hidravlični aktuator [povzeto po: <http://www.exlar.com>].

Ker se nadzor premika vrši preko uravnavanja pretoka hidravlične tekočine, imajo tovrstni sistemi, zaradi končne hitrosti medija in upornosti tlačnega cevovoda, relativno velike zakasnitve in posledično slabši dinamični odziv. Izstopajoča prednost, ki jo omogoča nestisljivost hidravličnega medija, je velika proizvedena sila.

Pnevmatski aktuatorji uporabljajo kot medij stisnjeni zrak pod velikim pritiskom. Ti aktuatorji omogočajo generiranje velikih sil. Krmiljeni so na enak način kot hidravlični [2].

Tabela 1: Prednost in slabosti hidravličnih in pnevmatskih aktuatorjev.

Aktuator	Hidravlični	Pnevmatski
Prednosti	Za pogon uporabljajo nestisljivo tekočino, ki omogoča hitre premike in velike sile, imajo majhne izgube, lahko delujejo pri visokih temperaturah, tiho delovanje (razen črpalke), ne proizvajajo nobenih magnetnih in električnih motenj, velik premi pomik.	Uporabljajo poceni delovni medij (zrak), čist, razumno hiter, lahek nadzor moči, velik premi pomik.
Slabosti	Hidravlična tekočina je korozivna, ločljivost je relativno slaba glede na električne sisteme, potrebujejo veliko dodatkov za delovanje, so relativno počasni, dragi.	Nekontrolirana pozicija, glasen, še posebej kompresor, ima veliko dodatkov, težaven za določanje napak (odkrivanje lukenj v sistemu).

2.2 Termični ali magnetni aktuatorji

To so aktuatorji, ki delujejo na magnetno ali termično energijo. Navadno so kompaktni, lahki, poceni ter imajo visoko energijsko gostoto. Za svoje delovanje uporabljajo tako imenovane spominske zlitine (angl. sma, smart alloy). To so zlitine, ki se pod vplivom toplote ali magnetnega polja deformirajo. Ta deformacija ni trajna, torej se vrnejo v začetno stanje. Zlitine služijo kot nadomestek hidravlične tekočine. Uporabljamo jih kot elektrostatske ventile za nastavljanje temperature [2].

2.3 Električni aktuatorji

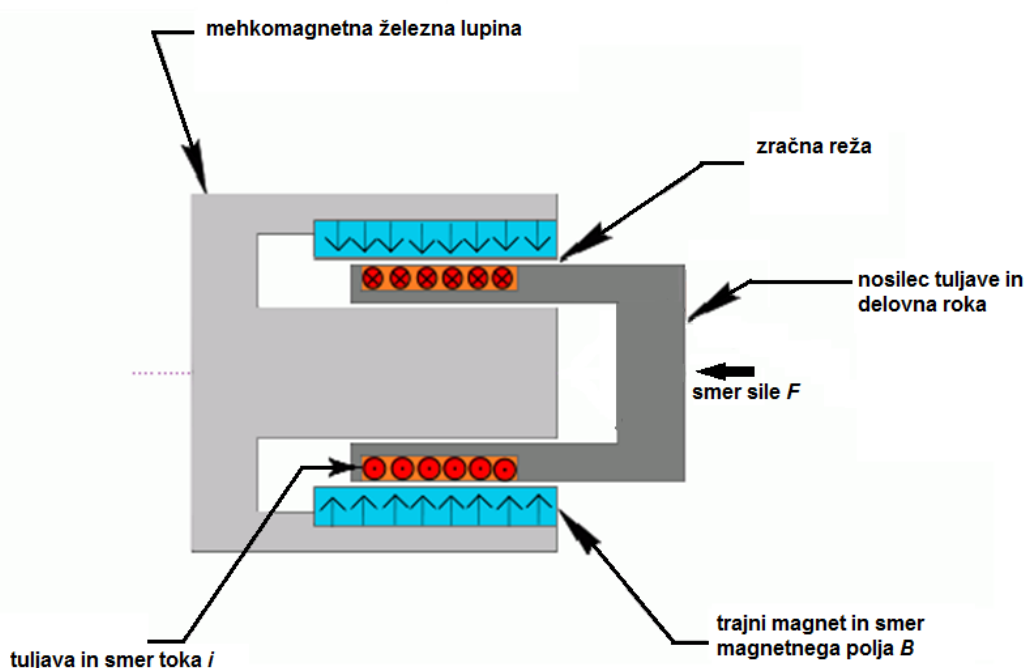
Električni aktuatorji so motorji, ki prek mehanskega aktuatorja pretvorijo električno energijo v mehanično silo ali navor. Mehanski aktuatorji spreminjajo krožno gibanje v premo. Delujejo kot nekakšni reduktorji, na primer gibanje volanskega obroča v premi premik levo desno. Električni aktuatorji so eni od čistejših in lažje dobavljivih, saj za delovanje ne potrebujejo olja [2].

Tabela 2: Prednosti in slabosti električnih aktuatorjev.

Aktuatorji	Električni
Prednosti	Visoka natančnost in občutljivost, lahka montaža, konstantna sila in navor, visoka kontrola sile ter pozicije, nizka cena obratovanja.
Slabosti	Kompleksna zgradba, imajo dodaten sklop (mehanski aktuator) za spremembo smeri gibanja, relativno drago vzdrževanje, dragi dodatki ter komponente.

2.4 Elektromagnetni aktuator

Med elektromagnetne aktuatorje prištevamo najpogostejše zastopane električne motorje – tako rotacijske kot linearne, ki omogočajo translatorsno gibanje. Zasuk oziroma pomik le teh je pogosto zelo velik in ga dosežemo s komutacijo med posameznimi navitji ali deli teh navitij. Manj znani so nekomutirani elektromagnetni aktuatorji (angl. voice coil actuator). Ti aktuatorji so neposredno vodene naprave z omejenim gibanjem, ki uporabljajo magnetno polje trajnega magneta ter navitje tuljave za proizvodnjo sile, katera je proporcionalna toku tuljave.



Slika 3: Prerez aktuatorja [povzeto po: <http://airwatch.com>].

Zaradi izostanka komutacij elektromagnetnega vzbujanja je proizvedena sila enakomerna vzdolž celotnega premika, zato so te naprave uporabljene v aplikacijah, ki zahtevajo premo ali rotacijsko gibanje in linearno silo ali navor ter visoke pospeške oziroma dinamiko [3].

V najbolj preprosti izvedbi je aktuator s premim premikom zgrajen v obliki cilindrične tuljave, ki se nahaja v polju trajnega magneta (slika 3). Trajni magnet je vgrajen v feromagnetni steber (cilinder) tako, da zagotavlja radialno orientirano magnetno polje, ki ob podani smeri toka tuljave ustvari aksialno Lorentzovo silo

$$\vec{F} = k\vec{B} \times \vec{i} lN \quad (1)$$

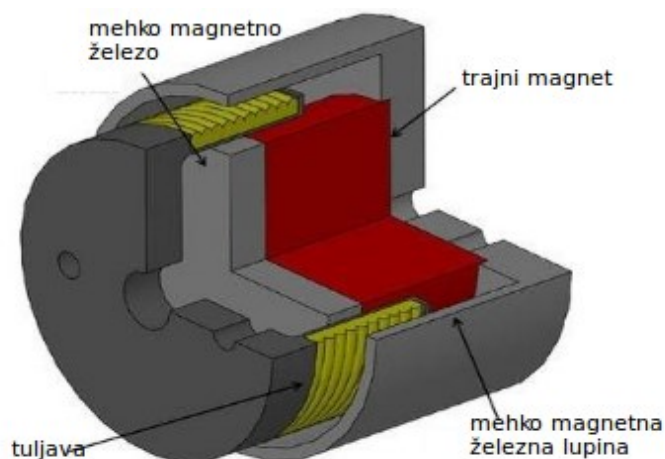
in posledično aksialno gibanje nosilca tuljave, na katerega je vpeto navitje.

Iz (1) je razvidno, da je sila F premo sorazmerna vektorskemu produktu toka in magnetnega pretoka. Torej, če obrnemo smer toka i , se obrne tudi smer sile. Če sta velikost magnetnega polja B ter dolžina prevodnika l konstantna, je velikost sile odvisna le od velikosti toka i . Prav tako se v prevodniku, ki se premika v magnetnem polju s hitrostjo v , inducira napetost,

$$\vec{E} = k\vec{B} \times \vec{v} lN \quad (2)$$

pri čemer je: k = konstanta.

V nekaterih izvedbah – t.i. "izvedba z dolgo tuljavo" - je dolžina slednje daljša od trajnega magneta za dolžino premega premika oziroma hoda. S tovrstno izvedbo dosežemo boljše razmerje med silo in močjo ter zaradi večje površine tudi boljše odvajanje toplote [3]. Prav tako je lahko za isto dolžino daljši trajni magnet – t.i. "izvedba s kratko tuljavo". Ta izvedba ima manjšo električno časovno konstanto, manjšo maso ter manjši vpliv reakcije indukta. Nobena izmed teh dveh izvedb ne zagotavlja popolnoma linearne karakteristike med silo in premikom. Za aplikacije, ki potrebujejo bolj linearno karakteristiko med silo in premikom, lahko uporabimo dva aktuatorja, tako da eden potiska, drugi pa vleče [3].



Slika 4: Princip zgradbe elektromagnetnega aktuatorja [povzeto po: <http://www.engnetglobal.com>].

Tabela 3: Prednosti in slabosti elektromagnetnih aktuatorjev.

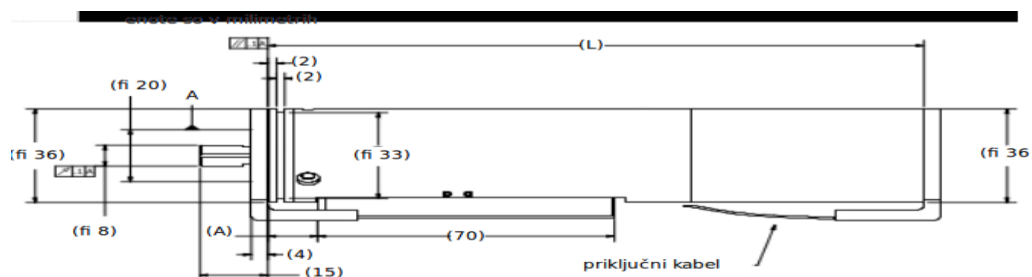
Aktuatorji	Elektromagnetni (angl. voice coil)
Prednosti	Zmožnost zelo hitre spremembe smeri gibanja (v primerjavi s hidravličnim ali pnevmatskim), visoki pospeški, so direktno vodeni, so tihi, relativno poceni, malo gibajočih delov, ustvarijo relativno veliko silo, visoka natančnost nastavljanja, relativno enostavno vodenje zaradi linearne odvisnosti med silo in tokom.
Slabosti	Majhna dolžina premega pomika, natančnost odvisna od senzorjev, občutljivost na elektromagnetne motnje.

2.5 Aktuator CAL-36-015-5

Na razpolago sem imel elektromagnetni aktuator podjetja SMAC iz serije CAL-36, ki so natančneje predstavljeni v tabeli 4 [4].

Tabela 4: Modeli serije in osnovni podatki elektromagnetnih aktuatorjev CAL-36.

Tipi CAL-36	enota	-015-5	-025-5	-050-5	-025-6	-015-6	-015-8
Premi premik	mm	15	25	50	25	15	15
Maksimalna sila	N	18	15	12	27	30	41
Konstanta sile	N/A	18	15	12	27	15	18
Ločljivost kodirnika	μm	20, 5, 1, 0,5, 0,1, 0,05	20, 5, 1, 0,5, 0,1, 0,05	20, 5, 1, 0,5, 0,1, 0,05	20, 5, 1, 0,5, 0,1, 0,05	20, 5, 1, 0,5, 0,1, 0,05	20, 5, 1, 0,5, 0,1, 0,05
Ponovljivost kodirnika	štetje	4	4	4	4	4	4
Maksimalni tok	A	1	1	1	2	2	2.3
Upornost tuljave	Ω	23,5	23,5	23,5	11,8	11,8	20
Gibajoča masa	kg	0,080	0,080	0,095	0,150	0,130	0,130
Celotna masa	kg	0,800	0,950	1,150	1,270	1,180	1,180
Dolžina aktuatorja (l)	mm	145	155	230	212	202	202
Širina aktuatorja (A)	mm	13	13	35	13	13	12



Slika 5: Tehnična skica CAL-36 [povzeto po: <http://www.smac-mca.com/>].

Aktuatorji CAL-36 imajo premer 36 mm in premi premik (s) od 15 mm do 50 mm. Oblika tuljave in vodil zagotavljata majhno trenje in posledično zelo majhno silo za njegovo premagovanje. Aktuatorji lahko dosežejo pospeške do 50 g in imajo dolgo pričakovano življenjsko dobo.

CAL-36 aktuatorji omogočajo neodvisno regulacijo pozicije, hitrosti in sile. Imajo tudi vgrajeno patentirano mehko prileganje (angl. Soft-Land), ki omogoča nežno prijemanje in polaganje obdelovancev (angl. pick and place). To je idealno za obdelavo dragih in krhkih materialov. Ima pa tudi zmožnost sprotnega opravljanja operacij in posredovanja informacij, če je prišlo do napake. Za določanje pozicije podjetje SMAC ponuja vgrajene kodirnike z ločljivostjo od 20 μm do 50 nm in s ponovljivostjo štetja 4 (na 2 bita natančno) [4].

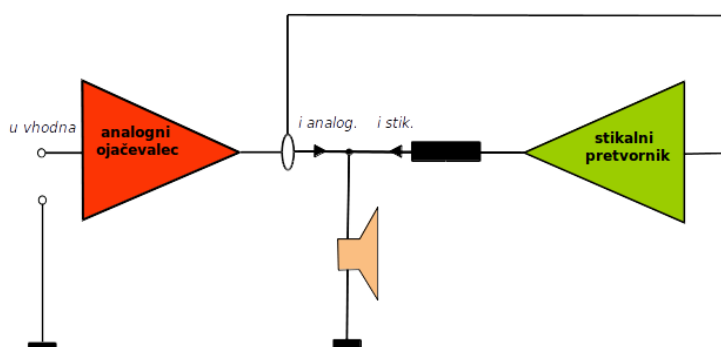
Za poganjanje aktuatorja CAL-36-015-5 je bilo potrebno zgraditi močnostni ojačevalnik, za katerega smo morali poznati še električno časovno konstanto

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{5,4 \text{ mH}}{23,5 \Omega} = 0,23 \text{ ms.} \quad (3)$$

Zbrani podatki so bile osnovne zahteve za močnostni ojačevalnik. Zaradi nekaterih prednosti smo se odločili za izdelavo hibridnega ojačevalnika. Tako je bilo to diplomsko delo osredotočeno na hibridni ojačevalnik, kot krmiljeno enoto, ne pa kot popolnoma reguliran pogonski sklop za elektromagnetni aktuator.

3 Hibridni ojačevalnik

Ojačevalniki se uporabljajo v različne namene (najpogosteje v avdio in video tehniki za ojačenje raznih signalov). Njihove izvedbe, ki jih lahko umestimo v dve večji podskupini linearnih in stikalnih ojačevalnikov, so posledično različne in z različnimi prednostmi in slabostmi. Linearni ojačevalnik ima hitrejšo odzivnost ter bolj gladek izhodni tok, a ima nizek izkoristek ($< 50\%$). Stikalni ojačevalnik ima nasprotno velik izkoristek ($> 80\%$), ampak tudi veliko izhodno valovitost toka.

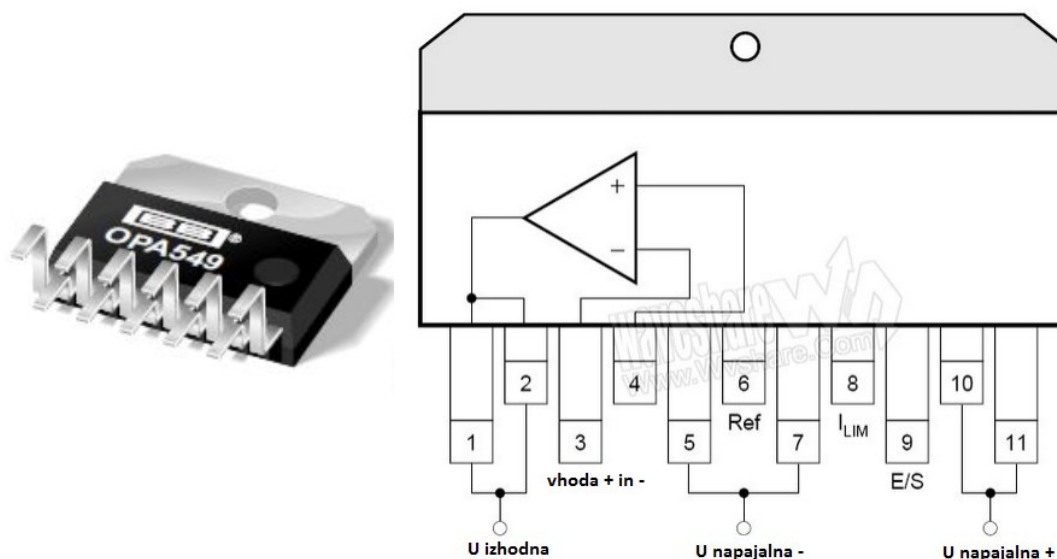


Slika 6: Blokovna shema hibridnega ojačevalnika [povzeto po: <http://lrtme.fe.uni-lj.si>].

V uporabljenem hibridnem ojačevalniku (slika 6) pa se skuša s kombiniranjem obeh izkoristiti prednosti in izničiti slabosti posameznega dela ojačevalnika. Tovrstna topologija tokovno razbremeni linearni del, s čimer izboljša energijski izkoristek celotne naprave, medtem ko linearna stopnja, preko katere se nadzoruje oblika izhodne veličine, "skrbi" za njen gladek potek.

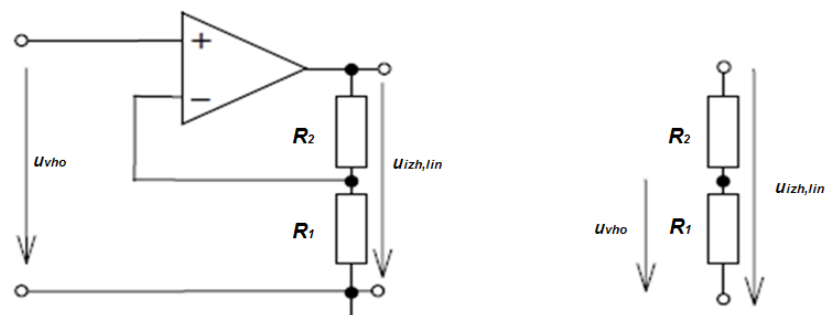
3.1 Linearni del

Za linearni del je uporabljen močnostni linearni ojačevalnik (OPA549) proizvajalca Burr-Brown, ki ga umeščamo v skupino nizkocenovnih visoko-napetostnih (do 50V) in visokotokovnih (do 10 A) operacijskih ojačevalnikov [5].



Slika 7: Močnostni linearni ojačevalnik OPA 549 in razpored priključkov (pinov) [povzeto po: <http://www.tubecad.com>].

OPA 549 ima 11 priključkov (angl. pin), ki so razporejeni kot kaže (slika 7). Za boljše odvajanje toplote se ga montira na hladilnik. Močnostni ojačevalnik je notranje zaščiten proti pregretju in proti prevelikemu toku, ki ga lahko uporabnik omeji z nastavitvijo tokovne limite od 0 A do 10 A (priključek 8). Informacija o delovanju notranje zaščite je dostopna na priključku 9 (E/S kontakt). Isti kontakt se uporablja tudi kot digitalni vhod, preko katerega sprostimo (omogočimo) izhod. Logično stanje (logična 0, če je $U_{(\text{priključek } 9)} \leq 0,8 \text{ V}$ in logična 1, če je $U_{(\text{priključek } 9)} \geq 2,4 \text{ V}$) vhodnega signala na priključku 9 je definirano glede na referenčni potencial (priključek 6). Ojačevalnik sprostimo s postavitvijo logične 1 na E/S, a če med delovanjem pride do termične preobremenitve vezja, slednji vsili na taisti priključek logično 0. Da omogočimo opisano delovanje, moramo ojačevalnik sprostiti z logičnim vezjem, ki ima izhod zasnovan kot "open collector" [6].



Slika 8: Idealni neinvertirajoči oziroma elektrometrski ojačevalnik [povzeto po: <http://lrtme.fe.uni-lj.si/>].

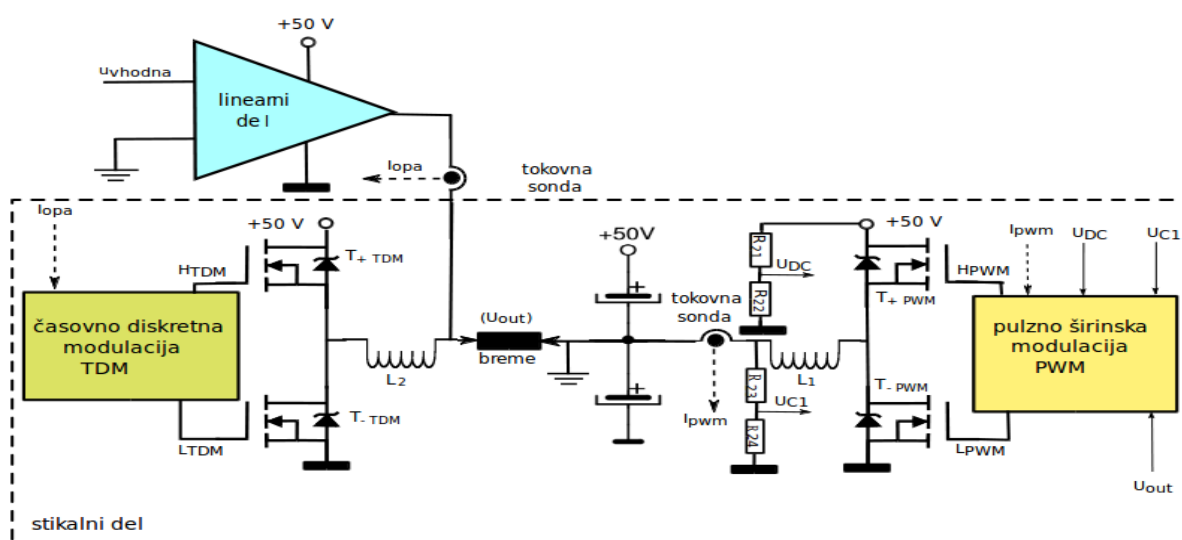
V tem diplomskem delu linearni ojačevalnik služi tudi kot vhod hibridnega ojačevalnika in določa njegovo ojačenje. Zvezan je kot neinvertirajoči oziroma elektrometrski ojačevalnik (slika 8) [7], z ojačenjem

$$A = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (4)$$

V našem primeru, kjer je $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$ in $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$, je ojačenje $A = 4$.

3.2 Stikalni del

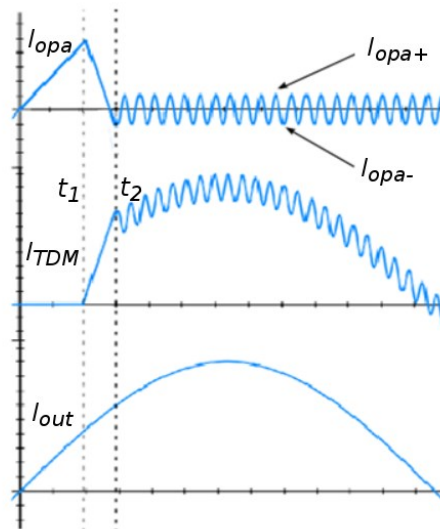
Stikalni del pa je sestavljen iz dveh namensko razvitih vezij, ki sta regulirana s časovno diskretno metodo (TDM) in pulzno širinsko metodo (PWM). Njuna vloga je razvidna v nadaljevanju.



Slika 9: Blokovna shema hibridnega ojačevalnika.

3.2.1 Časovno-diskretno modulirana stopnja

TDM del stikalnega ojačevalnika, ki sestoji iz tranzistorjev T_{+TDM} , T_{-TDM} ter dušilke L_2 , je z linearnim delom vzporedno zvezan (slika 9). V tej postavitvi ima linearni ojačevalnik vodilno vlogo (angl. master), ker neposredno nadzoruje izhodno napetost na izhodu hibridnega ojačevalnika. Že omenjena tokovna razbremenitev linearnega dela in s tem povečanje izkoristka celotne naprave je dosežena z namenskim prevzemanjem toka linearnega ojačevalnika. To je doseženo s časovno diskretno moduliranim pretvornikom, ki deluje podrejeno (slave), na način, da sta tranzistorja prožena neposredno na podlagi polaritete izhodnega toka linearnega dela (I_{opa}) [9].



Slika 10: Skica poteka tokov.

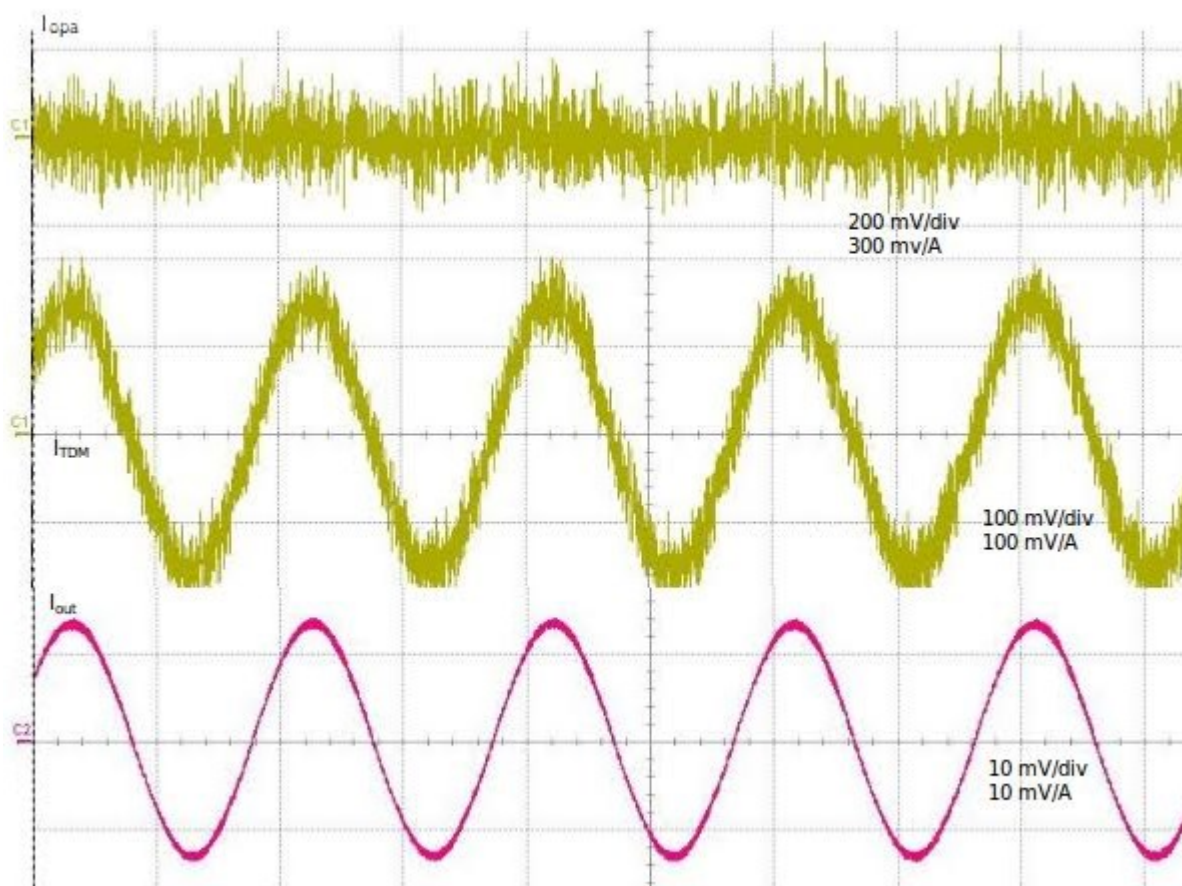
Posledico tovrstnega delovanja ponazorimo na zgledu (slika 10). Pri tem izpustimo vlogo PWM pretvornika in predpostavimo, da znaša središčni potencial kondenzatorjev $U_{CI}=U_{DC}/2$. Do trenutka t_1 je vklopljena le linearna stopnja, zato je tok linearne stopnje (linearnega ojačevalnika) I_{opa} enak bremenskemu I_{out} .

V trenutku t_1 sprostimo še delovanje stikalnega TDM-pretvornika. Zaradi opisane vzročne povezave med polariteto toka I_{opa} ter proženjem tranzistorjev se s pričo pozitivnega toka I_{opa} vklopi tranzistor T_{+TDM} . Tok skozi dušilko L_2 prične naraščati glede na napetost na dušilki L_2 .

$$U_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{U_{dc} - U_{out}}{L}. \quad (5)$$

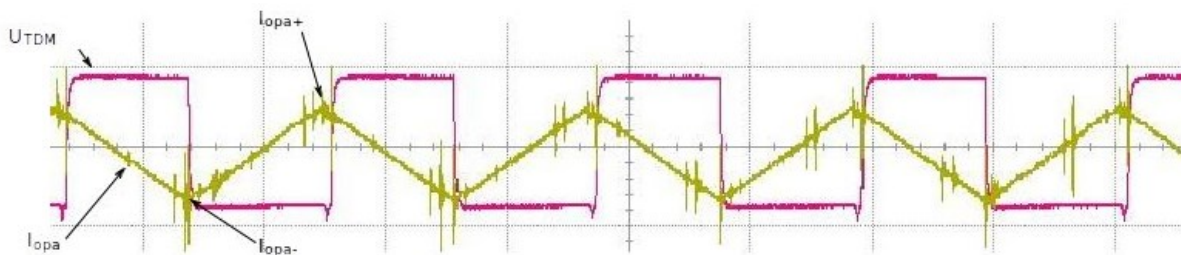
Hkrati pa se prične izhodni tok linearnega ojačevalca I_{opa} zmanjševati za enak iznos, ker želi

ohraniti želeno napetost oziroma tok. Ko tok skozi dušilko L_2 naraste preko želene vrednosti (slednja je pravzaprav enaka vrednosti bremenskega toka), tok linearnega ojačevalca I_{opa} spremeni polariteto in prične naraščati v nasprotni smeri. Ko v trenutku t_2 naraste do neke negativne vrednosti (I_{opa-}), se tranzistor T_{+TDM} izklopi in T_{-TDM} vklopi, zaradi česar prične tok skozi dušilko L_2 upadati. Hkrati pa prične tok linearnega ojačevalnika naraščati in ko pride do neke pozitivne vrednosti (I_{opa+}) se vloga tranzistorjev ponovno obrne.



Slika 11: Tokovi I_{opa} , I_{TDM} in I_{out} .

Tako pride do potekov tokov, kot so skicirani na sliki 10 ter izmerjeni na sliki 11. Iz teh lahko razberemo, da tok I_{TDM} valovi okoli želene vrednosti in ima prvo harmonsko komponento enako bremenskemu toku.



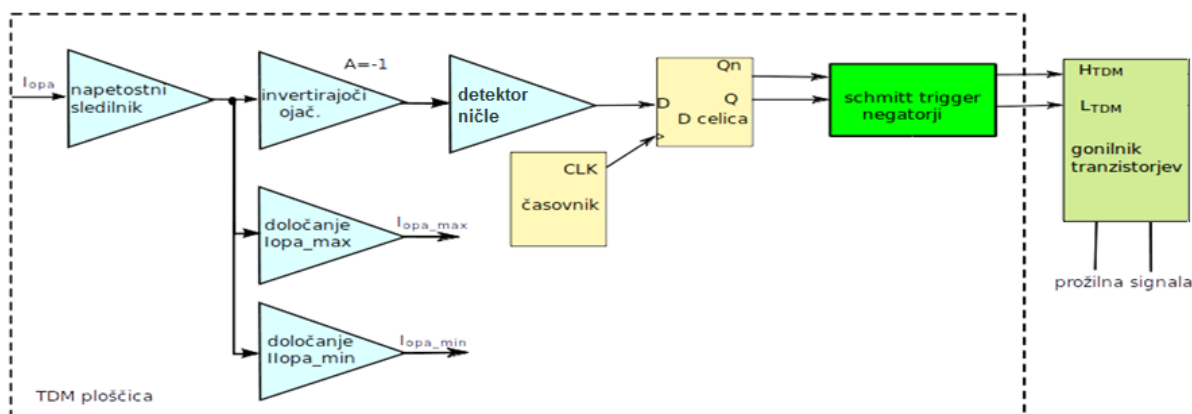
Slika 12: $U_{TDM}(\pm 25\text{ V})$ ter proženje tranzistorjev (viola) in I_{opa} (rumena).

Tok linearnega ojačevalnika pa valovi okoli vrednosti nič s frekvenco valovanja toka I_{TDM} (slika 10). Valovitost obeh tokov sta si po amplitudi enaki, a nasprotnega predznaka, zato lahko rečemo, da linearni ojačevalnik dela tudi v vlogi kompenzatorja valovitosti. Ker je amplituda toka valovitosti veliko nižja od amplitude bremenskega toka, je obremenitev linearnega ojačevalca majhna, s pričo česar se poveča tudi celotni izkoristek naprave [9].

TDM stopnja lahko tako dovaja večino delovnega toka do takrat, ko je strmina bremenskega toka manjša od strmine toka skozi dušilko L_2 – torej, če frekvenca delovanja ni previsoka. Mejna frekvenca (f_m) je definirana z enačbo

$$f_m = \frac{R_b}{2\pi L_2} \sqrt{\left(\frac{I}{U_{out}/U_{DC}}\right)^2 - 1}. \quad (6)$$

Če prekoračimo to frekvenco, se glavnina toka preseli iz TDM stopnje na linearni del, ki se zaradi svojega slabšega izkoristka začne močno segrevati.[10]



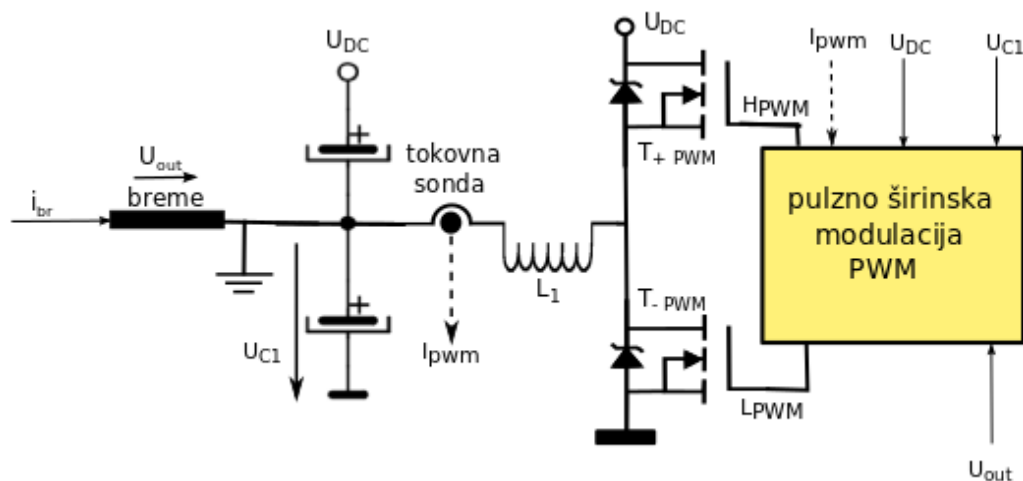
Slika 13: Blokovna shema TDM.

Nadzorno vezje TDM pretvornika kaže slika 13. Delovanje pretvornika sloni na odločitvi polaritete toka I_{opa} , zato je meritev omenjenega neizogibna. Le-ta je merjen s tokovno sondo (LA25-NP) in je priključen tako, da znaša občutljivost meritve ($1\text{ A} \equiv 0,3\text{ V}$) v merilnem

območju do 8 A. Izmerjeni signal I_{opa} (slika 13) se na TDM ploščici sprva ojača, nato pa se uporabi kot modulatorjski signal za časovno diskretno modulacijo. V ta namen se ga primerja z vrednostjo nič (detektor ničle). Detektor ničle pretvori analogen signal v digitalnega z logično vrednostjo 1 ali 0 (5 V ali 0 V). Ta signal gre nato v D celico, katere izhod se prek nekaj logičnih vrat (schmitt trigger) spremeni v dva signala H_{TDM} in L_{TDM} , ki prek gonilnika tranzistorjev prožita tranzistorja. Izmerjeni in ojačeni signal I_{opa} se dodatno uporabi za zaznavo prekoračitve dveh logičnih stanj I_{opa_max} in I_{opa_min} , ki služita nadtokovni zaščiti pretvornika in za pravilen vklop celotnega ojačevalnika (slednje bo obrazloženo v nadaljevanju).

3.2.2 Pulzno širinska modulacija

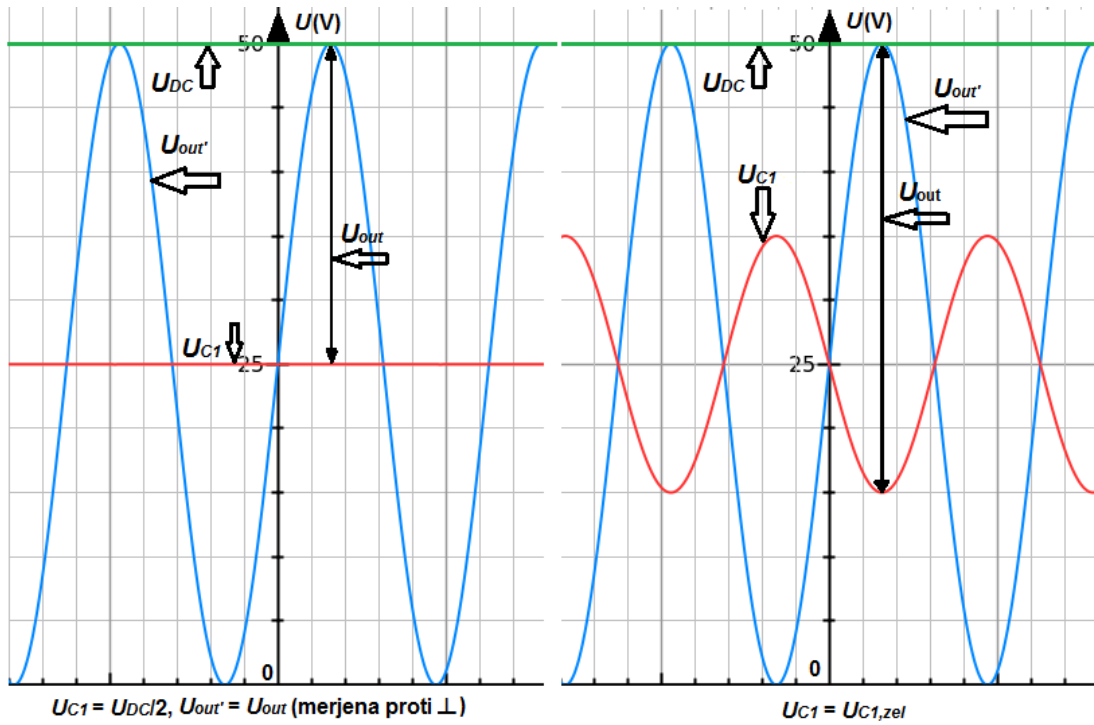
Pulzno širinski pretvornik nadzoruje srednjo vrednost napetosti (U_{Cl}) oziroma središčni potencial kondenzatorjev.



Slika 14: Shema PWM dela.

Povedati je treba, da za delovanje hibridnega ojačevalnika PWM stopnja ni obvezna, saj za delovanje zadoščajo le kondenzatorji, ki vzdržujejo napetost $U_{Cl} \approx U_{DC}/2$ (sliki 9 in 13). A slednja se pri obremenitvi spreminja, saj bremenski tok I_{br} teče skozi kondenzatorja in jih tako polni ali prazni. Opisani vzročni povezavi se je sicer možno izogniti z vgradnjo kondenzatorjev z veliko kapacitivnostjo, a kot bo razvidno iz nadaljevanja, je namenska sprememba napetosti U_{Cl} celo dobrodošla. S tem namenom mora biti njuna kapacitivnost nasprotno čim manjša, da uspemo doseči dinamični odziv napetosti U_{Cl} . Slednje je seveda možno le ob pomoči dodatnega PWM pretvornika, ki s proženjem tranzistorjev (T_{+PWM} in

T. P_{WM}) skuša izenačiti tok skozi dušilko L_1 z bremenskim tokom I_{br} , s čimer posredno regulira napetost na kondenzatorjih. V primeru, da je njen iznos konstanten $U_{DC}/2$, je trenutna vrednost izhodne napetosti (U_{out}) omenjena le na razpon $\pm U_{DC}/2$.

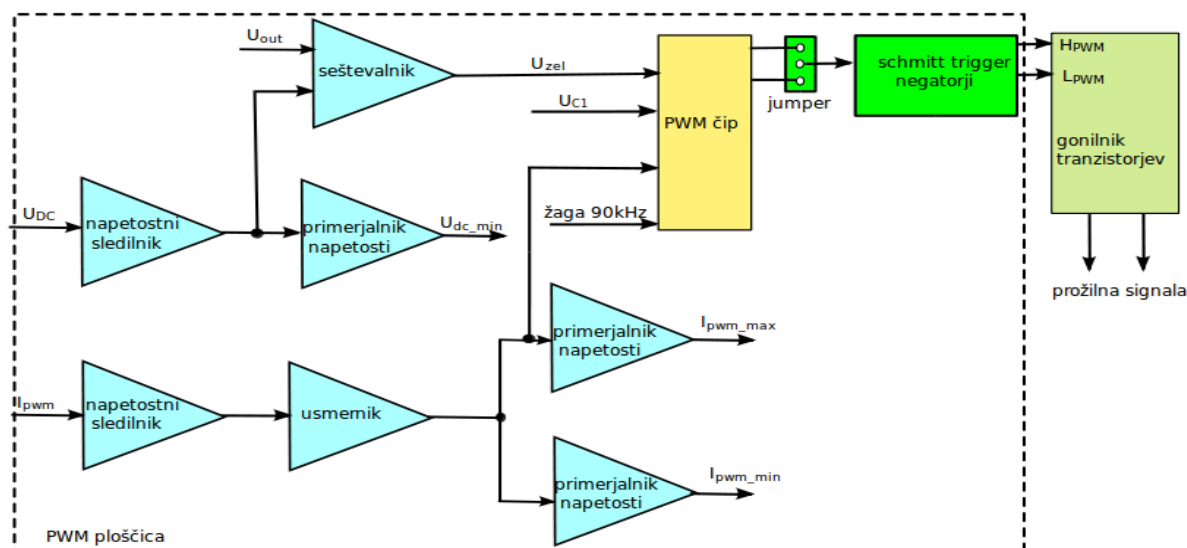


Slika 15: Razlika v velikosti vrednosti U_{out} glede na vrednost U_{C1} .

Njen razpon je možno povečati tako (slika 15), da se ob povečanju napetosti linearnega ojačevalnika (oziroma potenciala pripadajočega kontakta bremena – merjene proti GND), napetost U_{C1} (potencial nasprotnega kontakta bremena) zmanjša za enak iznos – podobno kot je doseženo z mostično konfiguracijo ojačevalnika (slika 9). Referenčna napetost PWM modulatorja je zato v splošnem

$$U_{C1,zel} = \frac{U_{DC}}{2} - k \cdot u_{out} \quad (7)$$

kjer konstanta k ne sme preseči 0,5. Dinamika kot tudi preostala valovitost napetosti U_{C1} , ki se odraži tudi v poteku napetosti U_{out} , je pogojena z izbiro stikalne frekvence. Zato sem jo nastavil na 90 kHz, torej nekoliko višje od delovanja TDM pretvornika.

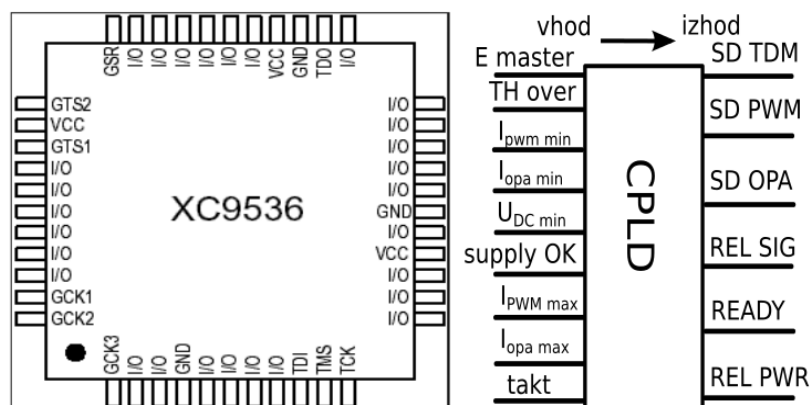


Slika 16: Blokovna shema PWM.

Nadzorno vezje PWM pretvornika kaže slika 16. Vezje na PWM ploščici generira prožilna signala tranzistorjev (T_{+PWM} in T_{-PWM}) z vklopnim razmerjem, čigar iznos se podreja vplivnim regulacijskim veličinam: napajalna napetost (U_{DC}), izhodna napetost (U_{out}), napetost U_{C1} . Napetosti so izmerjene prek prilagoditvenih vezij: U_{out} (s 50 V na 10 V), U_{DC} (s 50 V na 5 V), U_{C1} (s 25 V na 5 V). Izmerjena vrednost toka dušilke L_1 (I_{pwm}) ne sodeluje pri oblikovanju referenčne regulacijske vrednosti (9), temveč služi nadtokovni zaščiti pretvornika in zanesljivi zagonski proceduri ojačevalnika. Meritev toka se izvaja s tokovno sondo (LA25-NP), z merilnim dosegom 25 A in s prilagoditvijo $1 \text{ A} \equiv 0,1 \text{ V}$.

4 Nadzor in sestava hibridnega ojačevalnika

Za brezhibno delovanje hibridnega ojačevalnika skrbi kompleksno programirljivo logično vezje (CPLD, angl. Complex Programmable Logic Device). Slednje je sestavljeno iz enostavnih logičnih in spominskih gradnikov, ki jih povezujemo s programirljivo matriko, kar omogoča izgradnjo različnih logičnih vezij. Logična vezja se v grafični ali tekstovni obliki kreirajo s pomočjo računalniškega programa, ki omogoča tudi programiranje CPLD-ja v sistemu.



Slika 17: CPLD shema priključnih kontaktov [povzeto po: <http://www.xilinx.com/>].

Uporabljeno je bilo vezje XC9536 proizvajalca Xilinx z 800 logičnimi vrati z zakasnitvijo do približno 5 ns. CPLD je napajan z napetostjo 5 V in ima 44 priklonih kontaktov (slika 17).

CPLD vezje skrbi predvsem za pravilno vklopno zaporedje posameznih pretvorniških stopenj ter za njihov izklop ob zaznanih napakah. Vklop posameznih stopenj se izvrši v določenem zaporedju, s čimer se izognemo njihovi potencialni preobremenitvi (predvsem tokovni) in prekinitvi zagonske procedure zaradi aktivacije zaščitnih vezij. Logično vezje je zasnovano v obliki koračnega vezja, kjer se v vsakem izmed korakov izvrši vklop posamezne stopnje. Prehod v naslednji korak je pogojen z izpolnjevanjem povratnih signalov zaščitnih vezij (tabela 5) ter s krmilnimi signali. Tako se najprej vklopi PWM pretvornik z izhodnim signalom **SD PWM**, nato se omogoči linearni del s signalom **SD OPA**, za linearnim delom pa se omogoči TDM pretvornik s signalom **SD TDM**. Vklopno zaporedje pričnemo s postavitvijo krmilnega signala **E master** na logično vrednost 0. Med opisanim zaporedjem sta vhodna kontakta ojačevalnika kratkostičeni s pomožnim relejem, ki ga naknadno razklenemo s signalom **REL SIG**. Nazadnje šele omogočimo obremenitev ojačevalnika, tako da preko močnostnega releja (s signalom **REL PWR**) sklenemo breme z izhodom ojačevalnika. Ob tem se spremeni stanje tudi pomožnima signaloma **READY** in **Ready SIG**, ki sta namenjena

signalizaciji uspešno zaključene vklopne procedure.

Tabela 5: Vhodni CPLD signali.

Ime signala	Pomen signala	Pripadajoča logična vrednost signala
<i>E master</i>	Z zunanjim signalom omogočimo ojačevalnik.	0
<i>TH over</i>	OPA stopnja je omogočena ali linearni ojačevalnik se je pregrel.	0
<i>I_{opa min}</i>	$I_{opa} < I_{opa\ min}$	0
<i>I_{opa max}</i>	$I_{opa} < I_{opa\ max}$	0
<i>I_{pwm min}</i>	$I_{pwm} > I_{pwm\ min}$	0
<i>Reset G</i>	Tipka reset ni pritisnjena.	1
<i>I_{pwm max}</i>	$I_{pwm} < I_{pwm\ min}$	0
<i>Supply ok</i>	Napajalnik hibridnega ojačevalnika deluje pravilno.	0
<i>U_{DC min}</i>	$U_{DC} > U_{DC\ min}$ $U_{DC\ min} = U_{DC}/5$	1

Tabela 6: Izhodni CPLD signali.

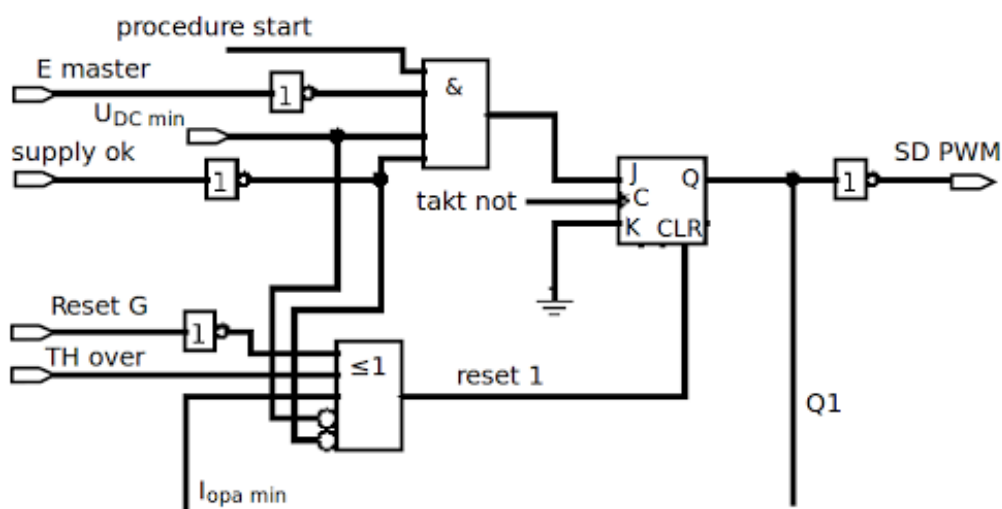
Ime signala	Pomen signala	Pripadajoča logična vrednost signala
<i>SD TDM</i>	Omogoči delovanje TDM stopnje.	0
<i>SD PWM</i>	Omogoči delovanje PWM stopnje.	0
<i>SD OPA</i>	Omogoči delovanje OPA stopnje.	1
<i>READY</i>	Delovanje brez napak.	0
<i>REL PWR</i>	Omogoči izhod hibridnega ojačevalnika.	1
<i>REL SIG</i>	Omogoči vhod linearnega ojačevalnika.	0

4.1 Zgradba logičnega vezja

Logično vezje CPLD je sestavljeno iz štirih skoraj identičnih delov tako, da se deli hibridnega ojačevalnika vklopijo zaporedno po korakih, kjer se preverijo vhodni signali in če imajo ustrezne logične vrednosti, se koraki izvedejo, s čimer preprečimo nezaželene vklope delov vezja.

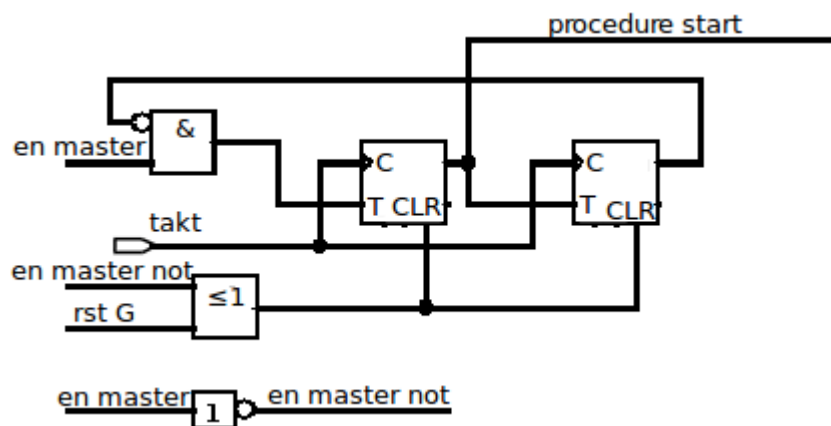
4.1.1 Prvi korak – vklop PWM pretvornika

Vklop PWM pretvornika (slika 18) se izvede s postavitvijo izhoda **JK** celice na logično vrednost 1 (**SD PWM** = 0). Vklopni pogoji **E master**, $U_{DC\ min}$ in **supply ok** (tabela 5) so združeni v IN vratih. Vklop/odpahovanje naprave pričnem s postavitvijo stikala na posluževalnem polju.



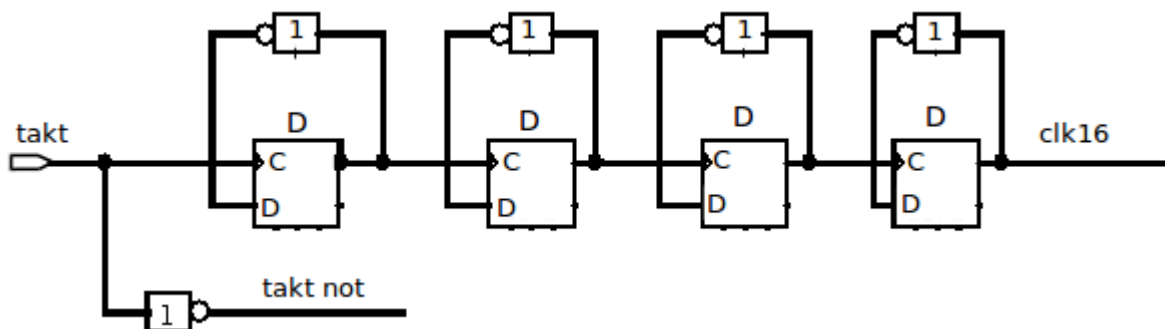
Slika 18: Logično vezje za vklop PWM pretvornika.

Ob tem zavzame **E master** vrednost 0, medtem ko se v pomožnem delu vezja (slika 19) izoblikuje monostabilni pulz(log. 1) **procedure start**. Slednji služi kot pomožni vklopni pogoj, s katerim onemogočim nezaželeni ponovni vklop po nastopu katerekoli napake ($U_{DC\ min}$, **supply ok**, **Reset G**, **TH over**, in $I_{opa\ min}$), ki jih z vezjem zaznavam in povzročijo takojšnje brisanje JK celice preko vhoda CLR.



Slika 19: Generiranje monostabilnega pulza **procedure start**.

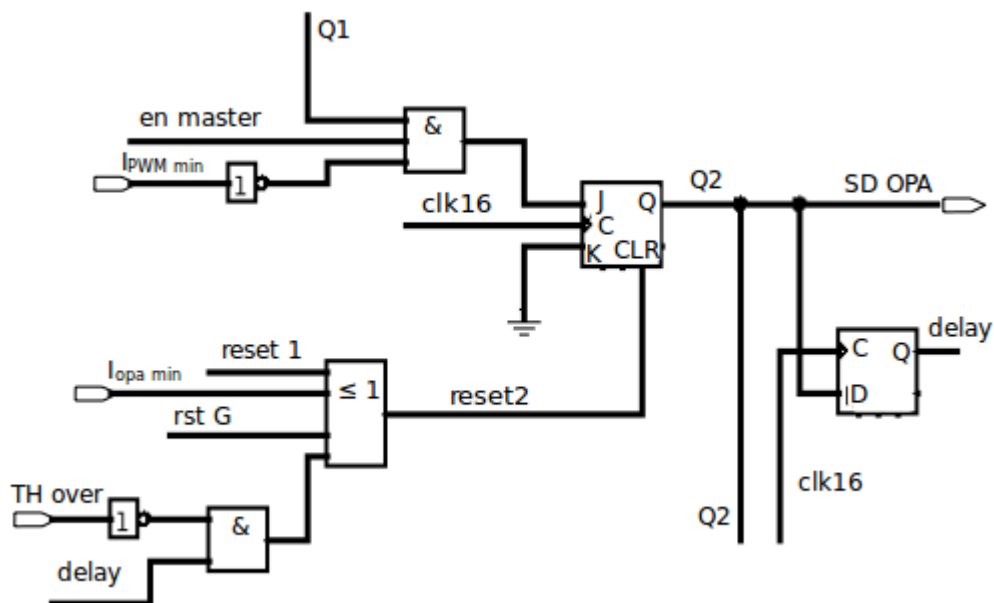
Z razliko od takojšnjega brisanja JK celic s signalom reset x ($x = 1,2,3$), je njihov vklop sinhroniziran s signalom **takt not** ali s signalom **clk16**, ki ima šestnajstkrat nižjo frekvenco (slika 19).



Slika 20: Generiranje signalov **takt not** in **clk16**.

4.1.2 Drugi del logičnega vezja

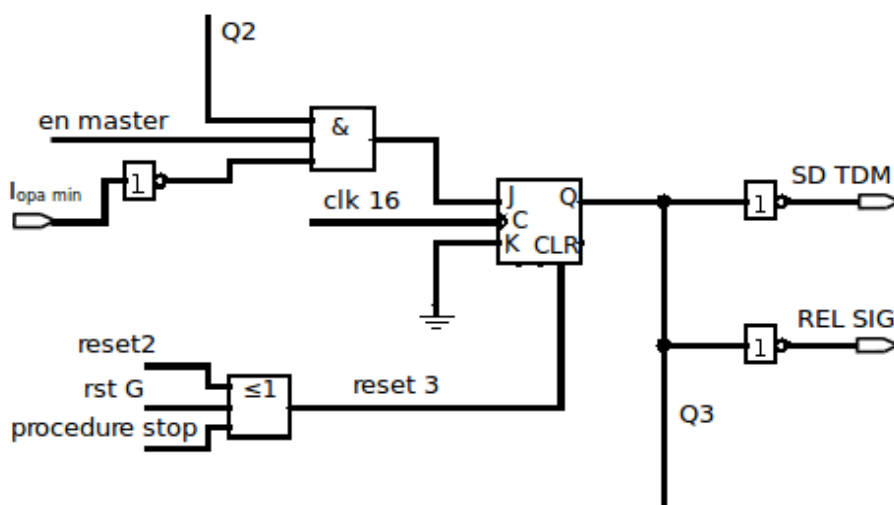
Vklop linearnega ojačevalnika (slika 21) je pogojen z vklopnimi pogoji **en master**, $I_{PWM\ min}$ (tabela 5) ter s signalom **Q1**, ki sporoča, da je predhodni korak uspešno zaključen (vklop PWM pretvornika). Brisanje JK celice ter s tem izklop ojačevalnika nastopi ob zaznani napaki ($I_{opa\ min}$) **TH over**, **rst G**,) kot tudi ob napaki (**reset 1**) v hierarhično višjem (pomembnejšem) sklopu hibridnega ojačevalnika. Signal napake **TH over** v logično ALI vezje ne vstopa neposredno, temveč je kombiniran z zakasnjnim signalom (**SD OPA**). Z omenjenim preprečim, da bi vklopni signal **SD OPA** povzročil takojšnji naknadni izklop JK celice, saj ne gre pozabiti, da signala **SD OPA** in **TH over** fizikalno ustrezata dvosmernemu krmilnemu/zaščitnemu signalu E/S (priključek 9) linearnega ojačevalnika.



Slika 21: Logično vezje za vklop linearnega ojačevalnika.

4.1.3 Tretji korak – vklop TDM pretvornika

Zasnova tretjega koraka je identična zasnovi prvega in drugega koraka.

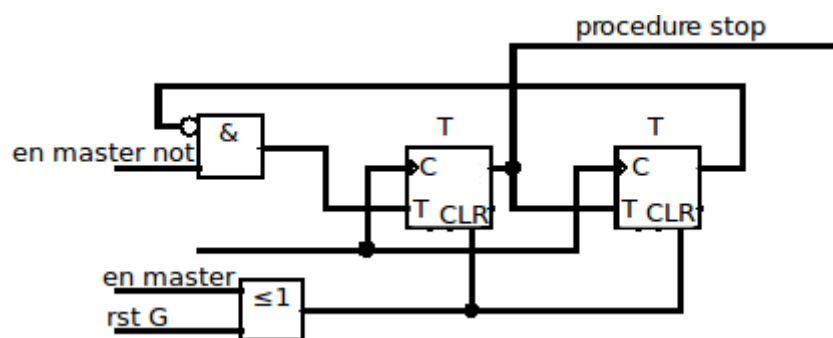


Slika 22: Logično vezje za vklop TDM pretvornika.

Ob vklopu TDM pretvornika (**SD TDM**) se istočasno sprosti (razklene do sedaj kratkostično povezani, **REL SIG**) vhod linearnega (hibridnega) ojačevalnika. Vklop se omogoči šele, ko tok linearnega ojačevalnika upade pod določen nivo ($I_{oppa\ min}$), kar je indikator, da je TDM pretvornik prevzel nase večinski tok z linearne stopnje (glej sliko 11)

Za resetiranje (vhod CLR) tretjega koraka so uporabljeni signali **reset 2**, **rstG** in

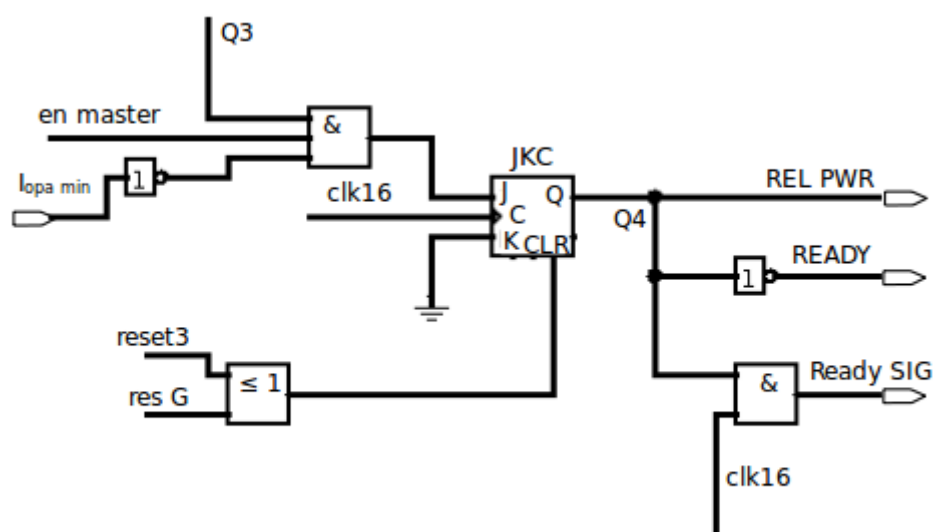
procedure stop, ki je kreiran podobno kot signal **procedure start** - le da se generira ob preklopu stikala na posluževalnem polju v mirovno lego. Ob izklopu/zapahu naprave torej ne omogočim delovanja vseh pretvorniških stopenj, temveč le delovanje TDM pretvornika.



Slika 23: Generiranje signala **procedure stop**.

4.1.4 Četrti korak – priklop bremena

Po uspešnem vklopu TDM pretvornika – za kar štejem, da tok linearnega ojačevalnika ne presega vrednosti $I_{opa\ min}$, – sledi priklop bremena na izhodu hibridnega ojačevalnika. Slednje se izvrši z vklopom močnostnega releja, ki ga krmilim s signalom **REL PWR**.



Slika24: Generiranje signala **procedure stop**.

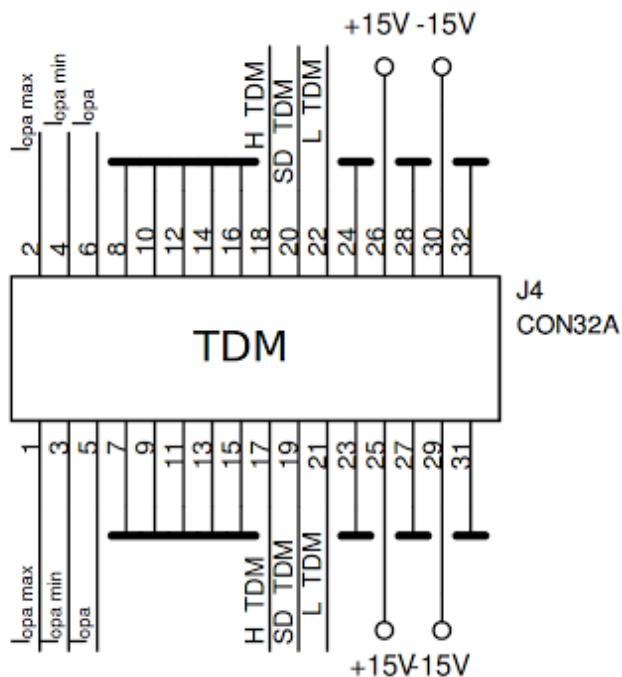
Signala **READY** in **Ready SIG** signalizirata zaključen postopek vklopa oziroma pravilno delovanje ojačevalnika.

Za delovanje hibridnega ojačevalnika je logično vezje realizirano v CPLD-ju vitalnega

pomena. Slednji pa lahko deluje ob pravilnih vhodnih signalih, ki jih dobimo iz tiskanega vezja hibridnega ojačevalnika, torej vezij PWM in TDM pretvornika ter iz tiskanine močnostnega (PWR) tokokroga.

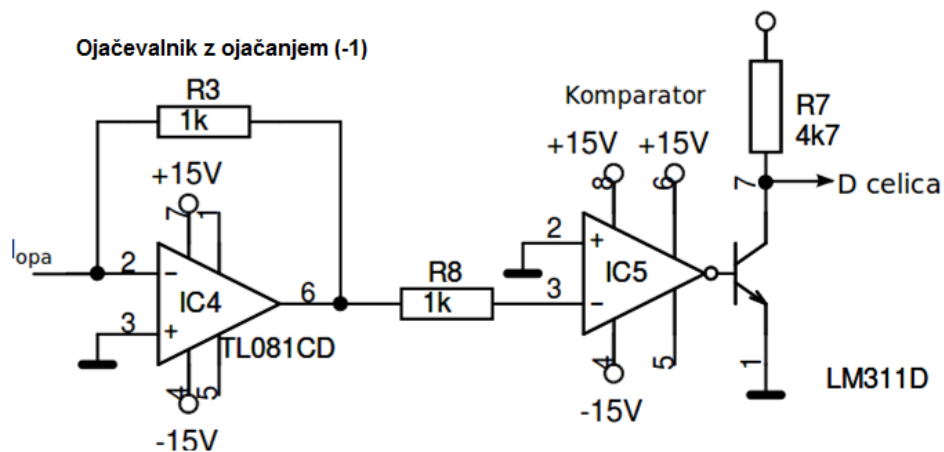
4.2 Zgradba TDM ploščice

Nadzorno vezje TDM pretvornika (slika 25) je realizirano na tiskanem vezju, ki je z večpolnim konektorjem priključeno na tiskano močnostnega (PWR) tokokroga.



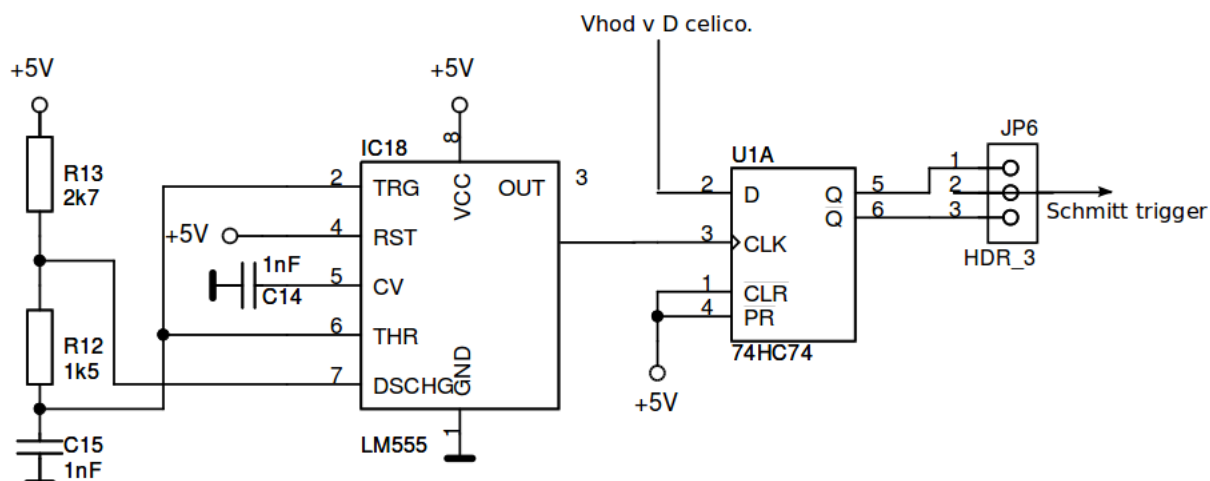
Slika 25: Priključni kontakti TDM ploščice.

Vezje generira prožilna signala tranzistorjev T_{+TDM} in T_{-TDM} ter pripadajoče signale, ki določajo pravilno delovanja pretvornika ali pa so merodajni za njegov varen vklop. Informacijo o polariteti tokovnega pogoška TDM pretvornika pridobim iz merjenega toka I_{opa} , ki ga z vhodnim operacijskim ojačevalnikom pretvorim v napetostni signal (i/u pretvorba) v merilu $1 A \equiv 0,3 V$.



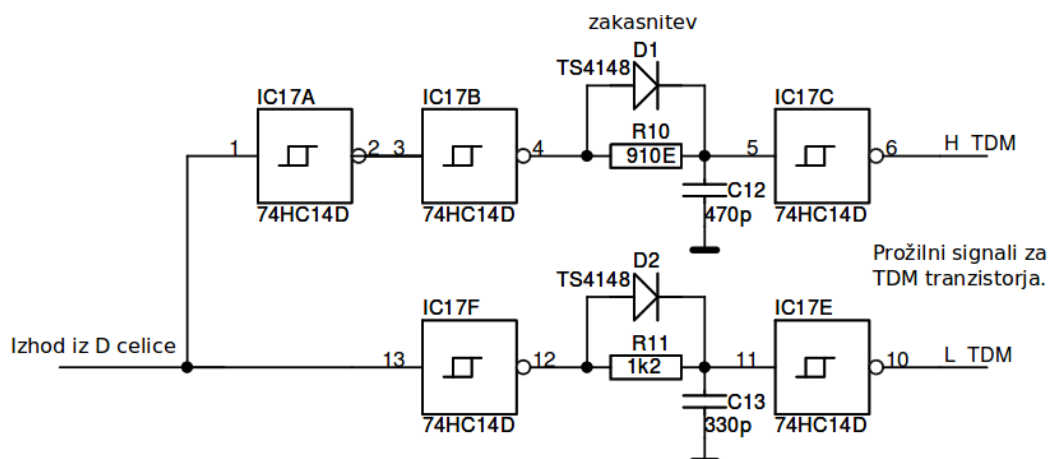
Slika 26: Pretvorba I_{opa} signala ter njegova diskretizacija.

Iz napetostnega primerjalnika (komparatorja) dobim diskretizirano informacijo o polariteti toka, ki ju speljem na D spominsko celico. Slednja vzorči informacijo o polariteti s frekvenco, ki jo določa časovnik LM555.



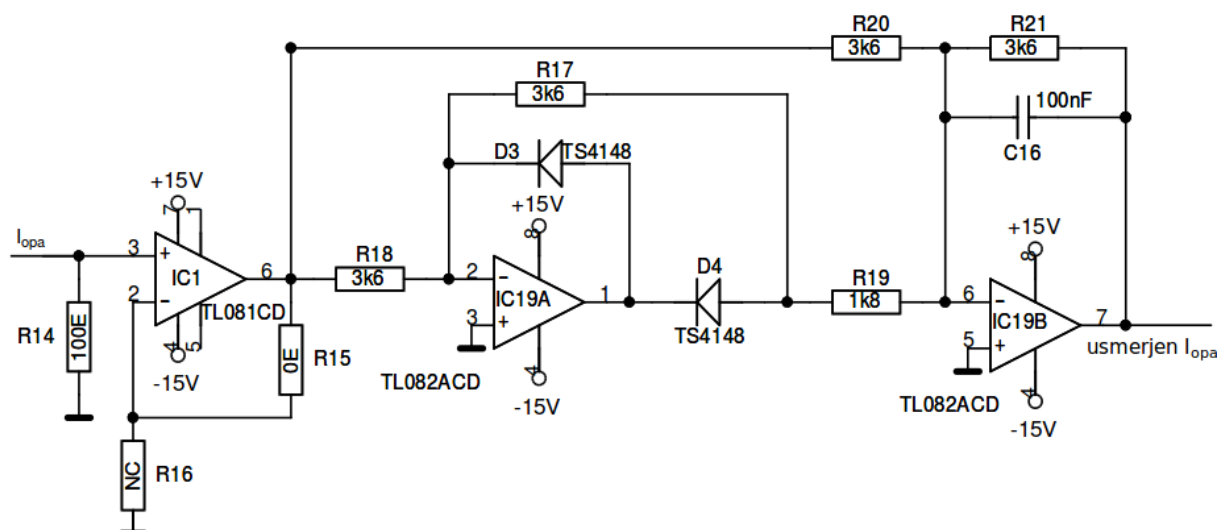
Slika 27: Časovno vzorčenje tokovnega regulacijskega pogoška.

Iz enotnega izhodnega signala (bodisi Q ali negirani Q) se nato izoblikuje komplementarni par prožilnih signalov ($H\ TDM$, $L\ TDM$) za proženje tranzistorjev z dodatnim mrtvim časom (poglavje 2.2.1).



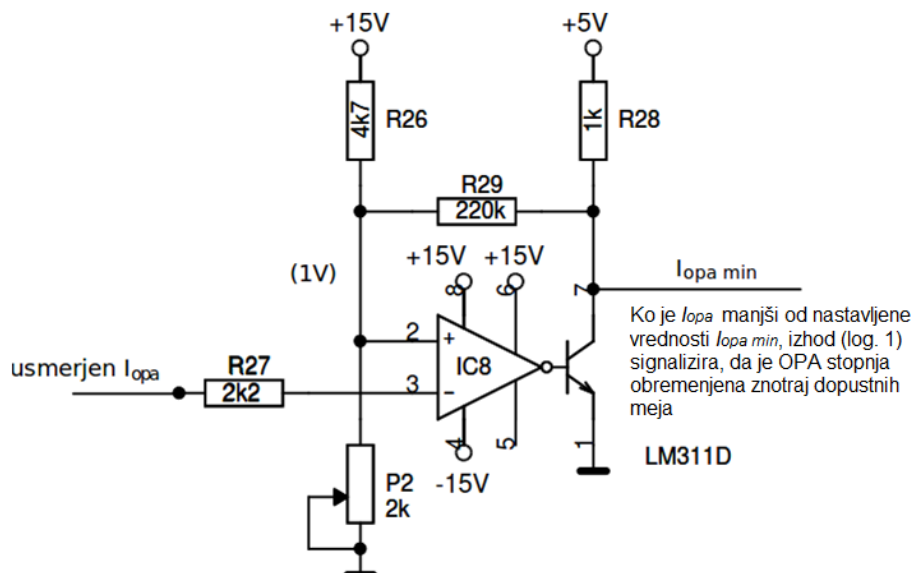
Slika 28: Generiranje prožilnih signalov H TDM in L TDM ter mrtvega časa.

Za določanje logičnih stanj $I_{opa \min}$ in $I_{opa \max}$ gre merjeni tokovni signal I_{opa} še preko polnovalnega usmernika realiziranega z operacijskimi ojačevalniki TL081.



Slika 29: Napetostni sledilnik (IC1) in polnovalni usmernik za I_{opa} .

Tako usmerjen signal gre na primerjalnik (LM 311D), kjer se primerja s prednastavljeno dopustno vrednostjo, ki določa, pri kateri vrednosti se bo spremenila logična vrednost signaloma $I_{opa \min}$ in $I_{opa \max}$, ki sta pomembna za delovanje oziroma nadzor, ki se izvaja v CPLD logičnem vezju.

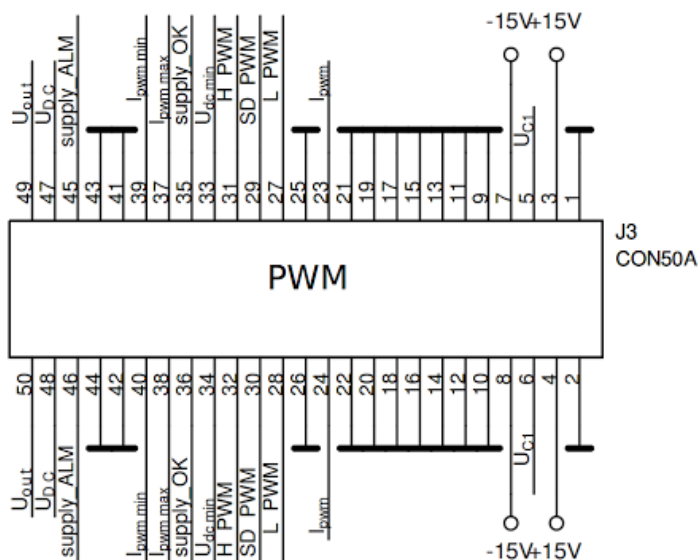


Slika 30: Primerjalnik za $I_{opa min}$.

Tiskano vezje TDM je napajano z napetostjo ± 15 V. Na njem se nahaja še napajalnik (LM 1117 SQT223), ki zagotavlja $+5$ V, ki jih potrebujemo za delovanje primerjalnikov (LM 311D), časovnika (LM 555) ter D celice in schmit triggerjev. Na ploščico in z nje gre še signal **SD TDM** (signal omogoči proženje TDM tranzistorjev), ki pa ne sodeluje v nobeni operaciji na ploščici TDM.

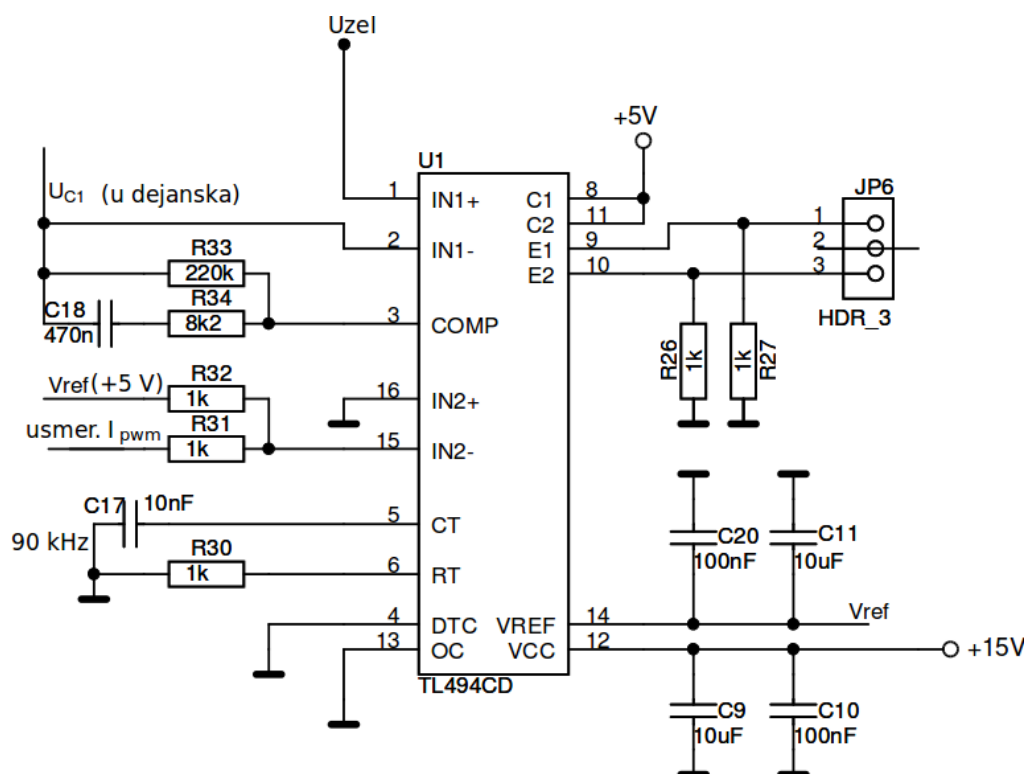
4.3 Zgradba PWM ploščice

Nadzorno vezje PWM pretvornika (slika 31) je realizirano na tiskanem vezju, ki je z večpolnim konektorjem priključeno na tiskanino močnostnega PWR tokokroga.



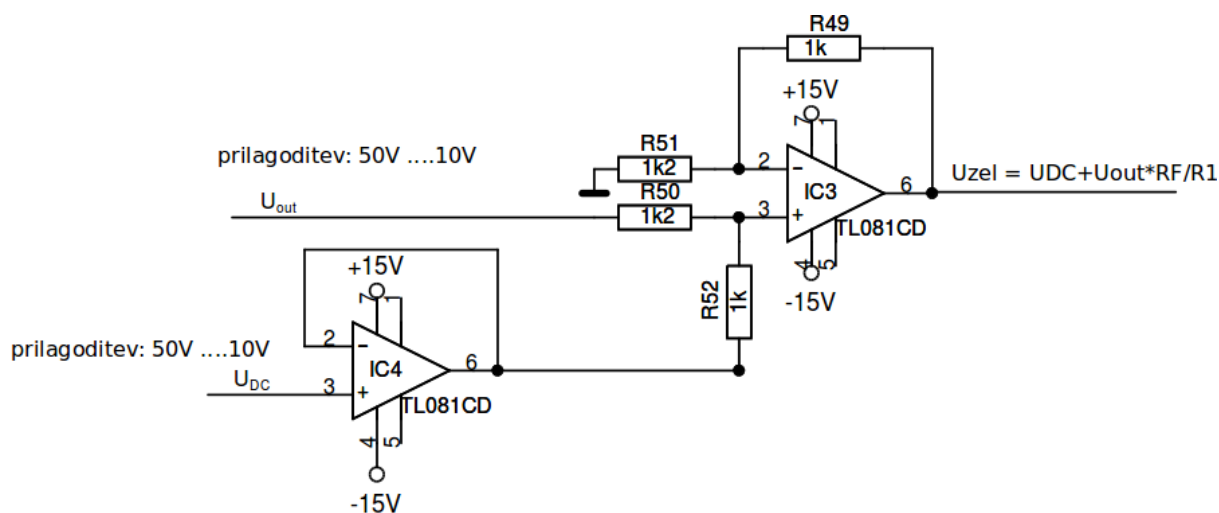
Slika 31: Priključni kontakti za PWM.

Vezje generira prožilna signala tranzistorjev T_{+PWM} in T_{-PWM} ter pripadajoče signale, ki določajo pravilno delovanja pretvornika ali so merodajni za njegov varen vklop. Nadzor proženja PWM tranzistorjev opravlja PWM integrirano vezje (TL499), ki vsebuje kompletno vezje za pulzno širinsko modulacijo z vgrajenim oscilatorjem, referenčno napetost 5 V, ojačevalca napake ter sklop za nastavitve mrtvega časa [12].



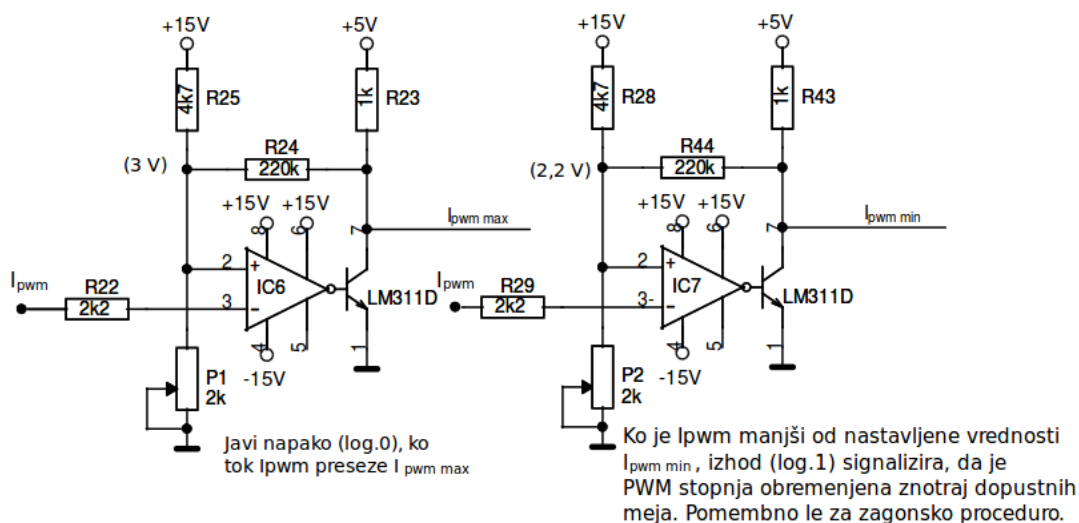
Slika 32: Vezava PWM čipa na PWM ploščici.

Vklopno razmerje PWM modulatorja je določeno z izhodnim signalom napetostnega regulatorja, na vhod katerega pripeljem razliko napetosti med želeno (U_{zel}) in dejansko napetostjo na kondenzatorju (U_{C1}). Želena napetost je enaka vsoti enosmerne napetosti, ki ustreza $U_{DC}/2$, ter protifazne napetosti (potenciala), ki je bremenu vsiljena s strani linearnega ojačevalnika in TDM pretvornika.



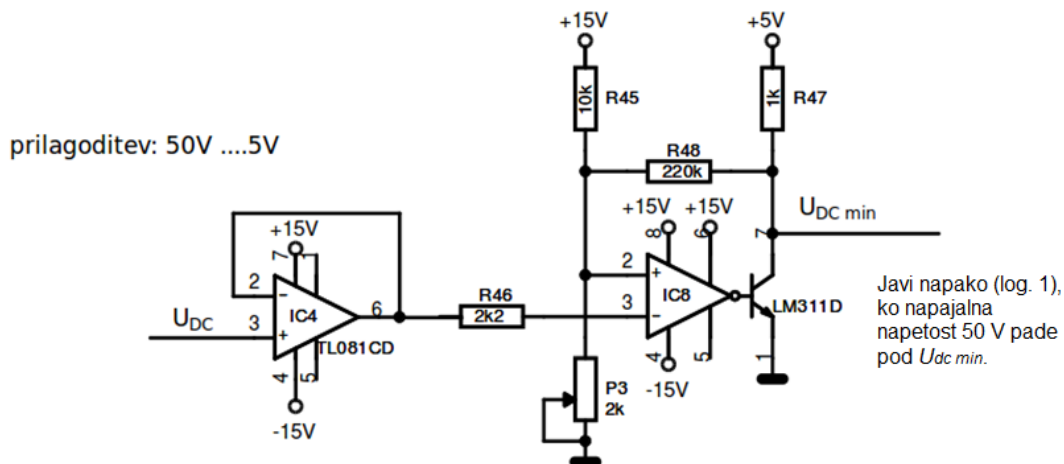
Slika 33: Način generiranja U_{zel} .

Logične signale $I_{pwm\ min}$, $I_{pwm\ max}$, $U_{DC\ min}$, **supply OK**, ki javljajo pravilnost delovanja in so merodajni za zanesljiv vklop/sprostitev hibridnega ojačevalnika, generiram na podoben način, kot sem podrobno opisal v predhodnem poglavju. Logična signala $I_{pwm\ min}$ in $I_{pwm\ max}$ izoblikujem iz merjenega toka I_{pwm} , ki je najprej polnovalno usmerjen (enako kot tok I_{opa} slika 29) ter vmesno tokovno-napetostno prilagoditvijo ($1\ A \equiv 0,1\ V$).



Slika 34: Določitev logičnih stanj $I_{pwm\ min}$ in $I_{pwm\ max}$.

Logični signal $U_{DC\ min}$ dobimo tako, da primerjamo napajalno napetost U_{DC} na primerjalniku z nastavljivo napetostjo v našem primeru 1 V (po prilagoditvi 10 V). Torej je logični signal $U_{DC\ min}$ (0 ali 1) odvisen od velikosti napajalne napetosti in nastavljene primerjalne vrednosti.

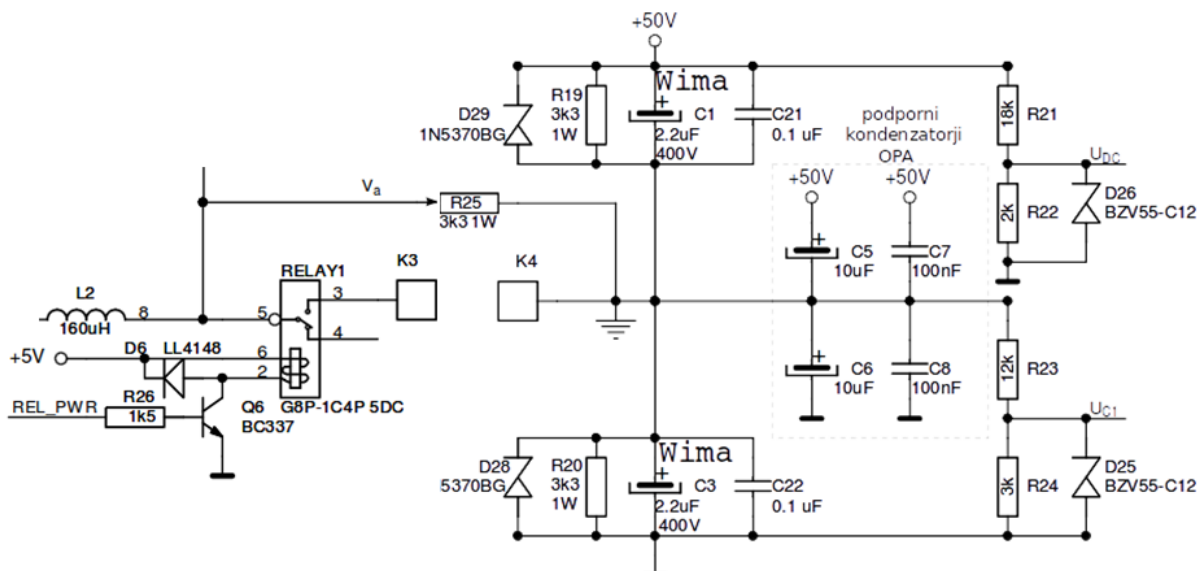


Slika 35: Primerjalnik, da dobimo $U_{DC\ min}$.

Signal *supply ALM* napajalnika U_{DC} , ki posreduje informacijo o njegovi morebitni napaki/okvari, se preverja na nadzorniku napetosti (TL7709), kateri nam izda signal *supply OK* [13].

4.4 Tiskano vezje močnostnega tokokroga PWR

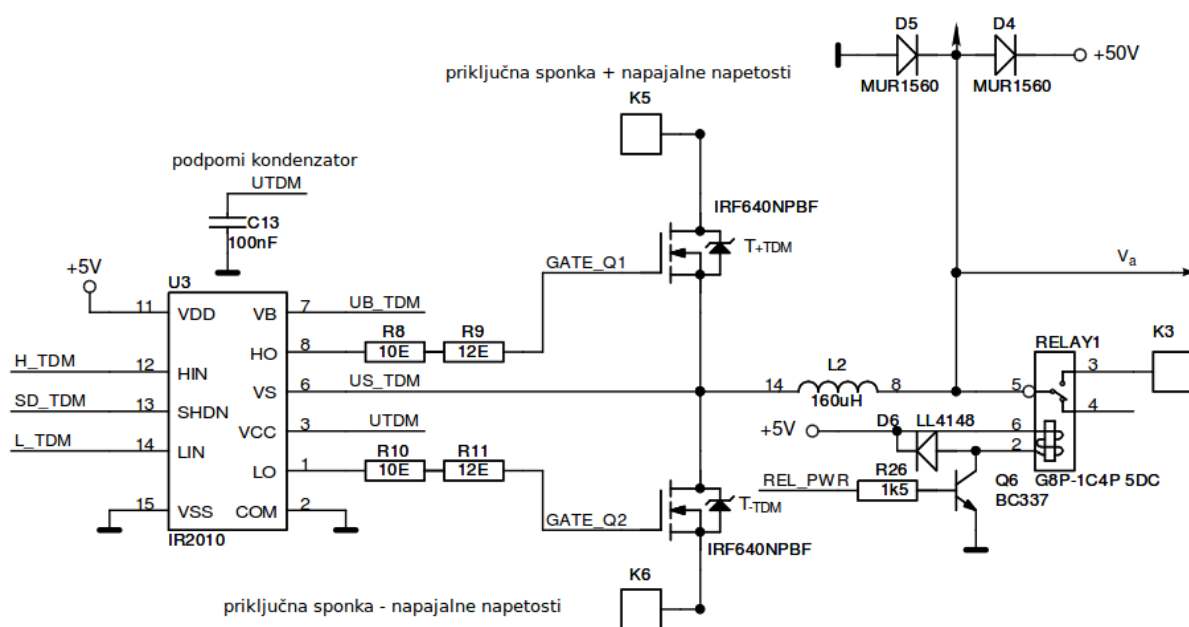
Sklopitev pretvorniških stopenj v celoto zahteva posebno mero pazljivosti, saj so napetosti posameznih podsklopov definirane z različnimi referenčnimi potenciali. Ločimo med dvema referenčnima točkama $\perp$ in $\perp$ s pripadajočim potencialom. Naj za uvod podam le to, da je vhodni signal linearnega in s tem tudi hibridnega ojačevalnika definiran proti potencialu $\perp$, ter da je med referenčnima točkama potencialna razlika, ki se spreminja (U_{Cl}). Slednje je povezano z načinom priklopa bremena ter z vezavo linearnega ojačevalnika, ki posledično zahteva bipolarno napajalno napetost.



Slika 37: Detajl močnostnega vezja podpornimi kondenzatorji in priključki za priklop bremena.

Slika 37 kaže del napajalnega tokokroga z obema izhodnima priključkoma (K3 in K4), podporne kondenzatorje ter napetostne delilnike, ki so prilagojeni za merjenje napetosti U_{DC} in U_{C1} . Podporni kondenzatorji skrbijo za stabilno napajalno napetost U_{DC} . Kondenzatorji C1, C3, C5 in C6 so elektrolitski, ostali pa keramični.

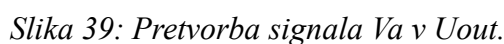
Predhodno opisani tiskani vezji TDM in PWM pretvornika (poglavji 4,3 in 3,2) generirata prožilne signale z ozirom na izbrani potencial $\perp$.



Slika 38: Detajl močnostnega TDM pretvornika z izhodom (K3).

Prožilni signali so tranzistorjem (IRF640N) posredovani preko prožilnih vezij (IR2010). To so zmogljiva, hitra, visokonapetostna MOSFET in IGBT prožilna vezja, z neodvisnim spodnjim

Napetost V_a , ki je merjena med kontaktoma K3 in K4, pa se prek ojačevalnika z ojačenjem 1/5 pretvori v signal U_{out} , ki smo ga uporabili na PWM ploščici, ter v logičnem vezju CPLD.



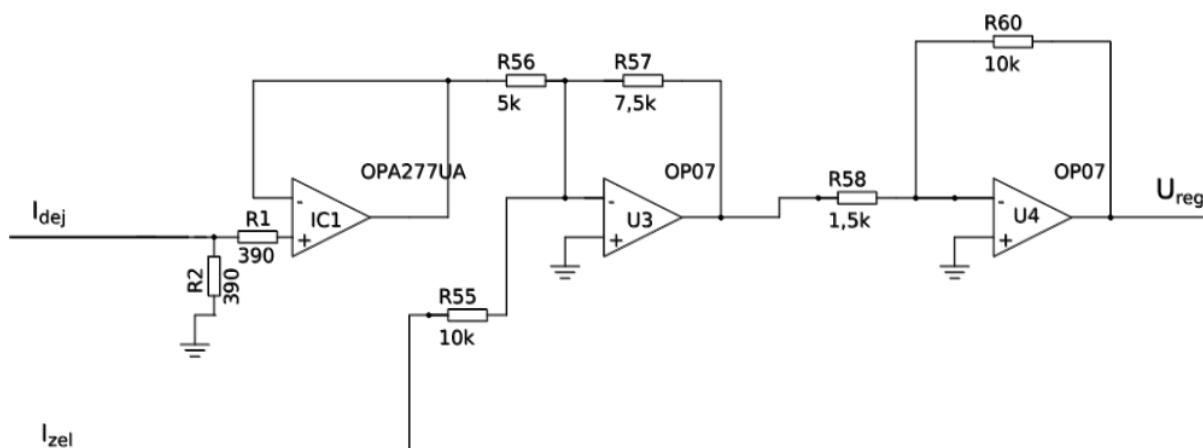
Slika 40: Detajl močnostnega vezja PWM pretvornika.

Uporaba vezij, katerih delovanje temelji na dveh različnih referenčnih potencialih, ima

[illegible]

Negiran signal, s katerim sprostim delovanje linearnega ojačevalnika (priključek 9), dodatno negiram (SN74LVC1G04DBVT). Ta signal služi signalizaciji delovanja (rdeča LED), hkrati pa ga preko prvega sklopnika posredujem nazaj do CPLD vezja (signal *TH over*). Izhod (VO2) drugega optosklopnika krmili tranzistor BC337, s katerim mi je dana možnost vklopa/izklopa poljubne dodatne naprave.

Hibridni ojačevalnik je namenjen priklopu ohmsko induktivnega bremena (aktuator). Pri tem bremenu želim imeti izhodni tok po obliki enak vhodnemu signalu, zato sem potreboval regulator, ki korigira obliko vhodnega signala I_{zel} . Želel sem regulator, ki bi čim boljše opravil nalogo do frekvence 2 kHz kljub spreminjanju bremena.



Slika 42: Sestava P regulatorja.

Za regulacijo sem uporabil P regulator, ki ima za parameter samo ojačenje, določili sem ga eksperimentalno.

Za delovanje regulatorja sem potreboval še meritev izhodnega toka (I_{dej}), ki jo opravlja tokovna sonda LA 55 P. Tokovna sonda je namenjena merjenju toka do 50 A oziroma v našem primeru do 3,3 A, saj sem na sondi naredil 15 ovojev. Ker sonda na izhodu poda izhodni signal z maksimalno vrednostjo 50 mA sem ji dodal še proti masi vezan upor R2 in tako dobil vrednost toka kot napetost I_{dej} s prilagoditvijo ($1 \text{ A} \equiv 5,9 \text{ V}$) [15].

Na izhodu regulatorja dobimo signal U_{reg} , ki služi kot vhodni signal v hibridni ojačevalnik. Ta signal je sestavljen tako, da vrednosti I_{zel} in I_{dej} ojačamo in seštejemo po formuli

$$U_{reg} = \frac{R60}{R58} \cdot \left(I_{dej} \frac{R57}{R56} + I_{zel} \frac{R57}{R55} \right). \quad (8)$$

Za delovanje te dodatne tiskanine sem moral dodati še en napajalnik TEL 3 2023, ki zagotavlja napajalno napetost za ojačevalnike $\pm 15 \text{ V}$ in tako tudi omeji maksimalno vhodno vrednost hibridnega ojačevalnika (U_{reg}).

4.5 Pomožni sestavni deli hibridnega ojačevalnika

4.5.1 Napajalniki

Za napajanje elektronskih vezij hibridnega ojačevalnika je uporabljen napajalnik ET60-C proizvajalca Deutronic. Priključen je na omrežno napetost in ima tri izhode z nazivnimi napetostmi: 5 V, 15 V in -15 V. Izhodna moč napajalnika je 62,5 W z 72% izkoristkom [17]. Drugi napajalnik zagotavlja enosmerno napetost za delovanje močnostnega dela hibridnega

ojačevalnika. Napajalnik SWS600L-60 je proizvod podjetja Lambda. Priključen je neposredno na omrežno napetost, medtem ko je njegova maksimalna izhodna napetost enaka 60 V in maksimalni izhodni tok 10 A. Izkoristek napajalnika je od 82% do 84% [18].

4.5.2 Hladilno telo

Pri stikalnem obratovanju tranzistorjev in delovanju linearnega močnostnega ojačevalnika prihaja do izgub. Da ne bi prišlo do termičnih poškodb ali uničenja, sem na tranzistorje in linearni ojačevalnik montiral hladilno telo iz aluminija, ki hkrati služi še kot nosilec za elektroniko ojačevalnika. Zaradi boljšega hlajenja sem na hladilno telo montiral še ventilator. Uporabili sem hladilno telo s širino 70 mm, višino 65 mm in dolžino 220 mm.

5 Meritve

V nadaljevanju so podani rezultati meritev, s katerimi sem se po izdelavi hibridnega ojačevalnika prepričal, če deluje pravilno in po želenih zahtevah.

5.1 Izkoristek hibridnega ojačevalnika

Merjenje izkoristka naprav je zelo pomemben podatek, saj nam pove, koliko vložene energije naprave pretvorijo v koristno delo. Izkoristek ni konstanten, saj je odvisen od delovne točke, torej v našem primeru od frekvence in obremenitve. Iz poglavja 3 je razvidno, da naj bi imel hibridni ojačevalnik višji izkoristek kot linearni ojačevalnik, torej ($> 50\%$).

Z namenom, da ugotovim, kako se izkoristek naprave spreminja, sem opravil meritve izkoristka pri različnih frekvencah in enaki obremenitvi, ki služi kot nadomestek aktuatorja

Tabela 7: Merjenje izkoristka pri različnih frekvencah in konstantnem bremen $R = 23\ \Omega$ in $L = 100\ \mu\text{H}$.

Vhodne veličine				Izhodne veličine				
U/V_{rms}	I/A_{rms}	P/W	Faktor moči	f/Hz	U/V_{rms}	$I_{\text{out}}/A_{\text{rms}}$	P/W	$\eta/\%$
50,03	0,57	25,56	0,89	50	19,50	0,84	16,36	63
50,01	0,55	25,15	0,91	100	19,50	0,83	16,19	64
49,99	0,53	25,08	0,94	200	19,51	0,83	16,18	64
49,99	0,52	25,04	0,96	300	19,52	0,81	15,75	63
49,98	0,51	25,07	0,97	400	19,54	0,80	15,57	62
49,98	0,51	24,95	0,97	600	19,55	0,780	15,19	61
49,96	0,51	25,17	0,98	800	19,56	0,78	14,92	59
49,96	0,52	25,63	0,98	1000	19,55	0,77	14,58	57
49,84	0,52	25,90	0,98	1200	19,59	0,75	14,34	56
49,84	0,53	26,16	0,98	1400	19,62	0,74	14,06	53
49,84	0,53	26,40	0,98	1600	19,59	0,73	13,76	51
49,83	0,54	26,65	0,98	1800	19,59	0,72	13,52	50
49,83	0,55	27,28	0,98	2000	19,68	0,71	13,32	49

($R = 23 \, \Omega$ in $L = 100 \, \mu H$) nato pa še pri različnih obremenitvah in frekvencah. Meritve sem opravil z analizatorjem moči NORMA D5235.

Iz tabele 7 vidimo, da hibridni ojačevalnik nima tako velikega izkoristka, kot bi ga imel, če bi bil dizajniran za to breme (majhen izhodni tok). Linearni del mora pokrivati velike tokovne špice. Tako se izkoristek s frekvenco manjša in pri frekvenci okoli 2 kHz pade celo pod 50%.

Tabela 8: Merjenje izkoristka pri različnih frekvencah in različnim bremenskim tokom.

Vhodne veličine				Izhodne veličine				
U/V_{rms}	I/A_{rms}	P/W	Faktor moči	f/Hz	U/V_{rms}	I_{out}/A_{rms}	P/W	$\eta/\%$
50,0	0,70	34,8	0,98	100	25,2	1.0	25,3	72,7
50,0	1,28	63,7	0,98	100	25,2	2.0	50,0	78,5
50,0	2,40	120,4	0,98	100	25,1	4.0	97,3	80,8
49,9	3,71	188,0	0,98	100	24,6	6.0	148,9	79,2
50,0	0,70	35,0	0,98	500	25,5	1.0	25,7	73,4
50,0	1,29	64,6	0,98	500	25,3	2.0	50,9	78,8
50,0	2,46	123,1	0,98	500	25,2	4.0	101,0	82,0
49,9	3,77	188,2	0,98	500	24,8	6.0	149,4	79,4
50	0,76	35,0	0,98	1000	25,6	1.0	25,7	73,4
50	1,28	63,0	0,98	1000	25,5	2.0	52,7	83,6
50	2,49	124,5	0,98	1000	25,2	4.0	101,8	81,7
49,9	3,76	187,7	0,98	1000	24,9	6.0	149,6	79,7
49,9	3,74	186,8	0,98	2000	24,9	6.0	150,7	80,1

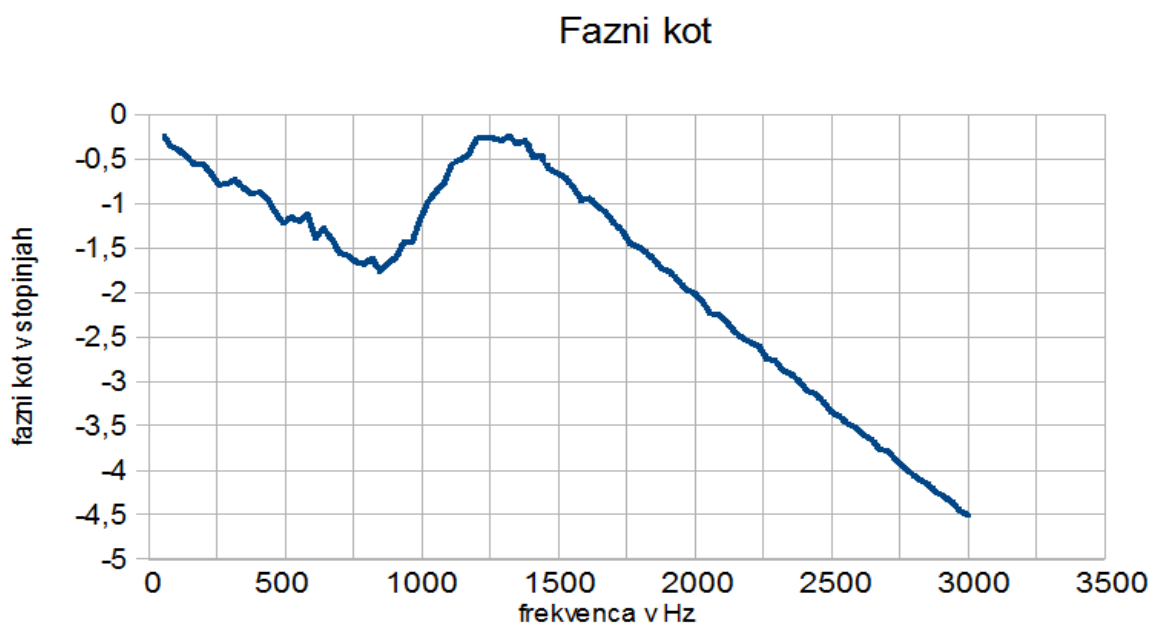
V tabeli 8 so rezultati meritev izkoristka pri čisto ohmskem bremenu pri različnih frekvencah in tokovih. Kot vidimo se izkoristek z obremenitvijo veča celo do 83 %. Pri večji obremenitvi ojačevalnik deluje optimalno, torej stikalni del prevzame večino delovnega toka, linearni del pa le zmanjšuje valovitost (slika 11).

5.2 Frekvenčni odziv hibridnega ojačevalnika

Frekvenčni odziv električnega ali elektronskega vezja nam omogoča, da vidimo, kako se izhodno ojačenje (angl. the magnitude response) in faza izhoda (angl. phase response) spreminjata glede na frekvenco vhodnega signala.

Analiza frekvenčnega odziva vezja ali sistema je lahko prikazana z Bodejevim diagramom, ki je sestavljen iz dveh grafov. En nam kaže amplitudni odziv, drugi pa fazni odziv glede na frekvenco. Ti podatki nam povedo, kako dobro oziroma slabo naše vezje deluje pri različnih frekvencah.

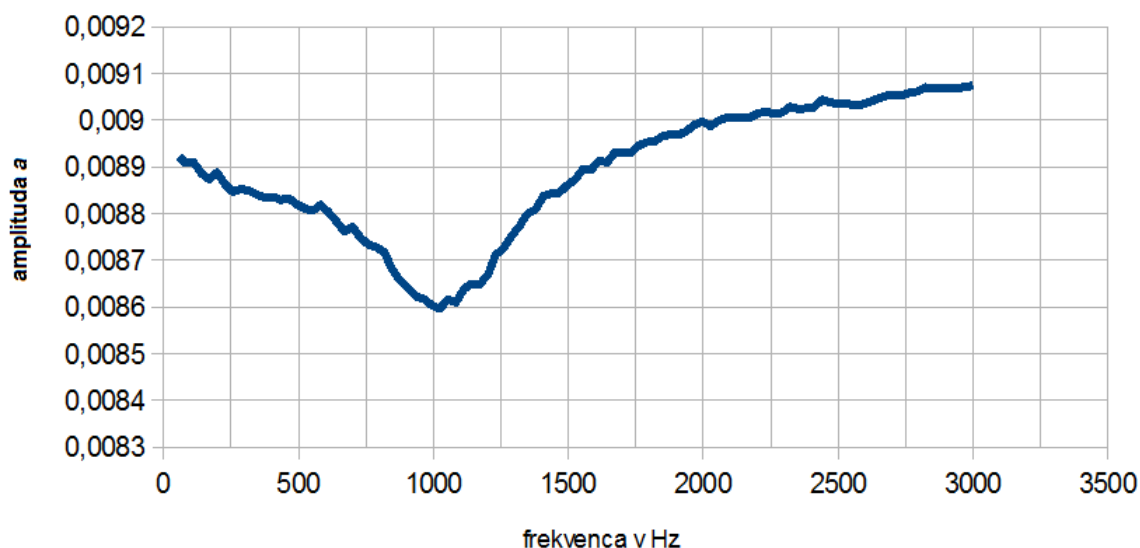
Meritve sem opravil z napravo Dynamic Signal Analyzer 35665A in to od frekvence 50 Hz do 3000 Hz in pri bremenu $R = 32 \, \Omega$ in $L = 100 \, \mu\text{H}$. Meril sem odziv pri vhodnem signalu $U_{\text{vhodni}} = 2,5 \, \text{V}$. Za izhodni signal sem vzel izhodni tok I_{out} , ki sem ga meril s tokovno sondo TEX A3602 in z ojačevalnikom za tokovne sonde AM 503 s prilagoditvijo $0,1 \, \text{A} \equiv 10 \, \text{mV}$. Ker signal analizator primerja napetosti in je amplituda toka prilagojena, je na grafu tako nizka.



Slika 43: Fazni odziv hibridnega ojačevalnika.

Pri faznem odzivu vidimo, da se fazni zamik giblje do -2 stopinj do frekvence 2 kHz ter da se začne linearno večati nad frekvenco okoli 1200 Hz.

Frekvenčni odziv amplituda



Slika 44: Amplitudni odziv hibridnega ojačevalnika.

Kot vidimo, amplituda najprej do 1 kHz pada, potem pa počasi narašča. Če želimo vedeti natančno velikost toka, ga izračunamo po enačbi, kjer je a = izmerjena amplituda.

$$I_{out} = 2,5V \cdot a \cdot \left(\frac{0,1A}{0,01V} \right). \quad (9)$$

Iz enačbe tako dobimo, da je amplituda toka I_{out} okoli 0,2 A.

5.3 Vsebnost višjih harmonikov (THD)

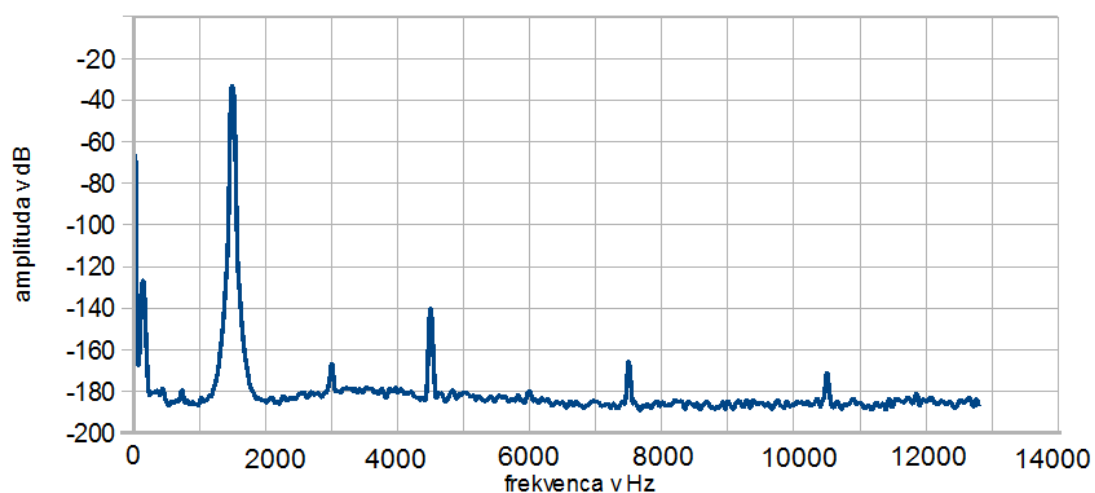
Vsebnost višjih harmonikov THD (angl. total harmonic distortion) v signalu je meritev vseh prisotnih frekvenc in je definirano kot razmerje vsote vseh moči ostalih harmonikov proti moči glavnega harmonika. THD je uporabljen za opis linearnosti audio sistemov in kvaliteto moči električnih močnostnih sistemov.

V audio sistemih nižji THD pomeni, da deli v zvočnikih, ojačevalniku, mikrofoni ali ostalih elementih naredijo bolj natančno reprodukcijo zvočnega posnetka.

Za merjenje THD-ja sem uporabil Dynamic Signal Analyzer 35665A. Meritve sem opravil pri vhodnem signalu $U_{vhodni}=2,5$ V in pri različnih frekvencah ter pri bremenu, ki je bilo nadomestek aktuatorja. Pri merjenju THD sem upošteval frekvence do 12,5 kHz pri različnih osnovnih frekvencah.

Tabela 9: Vrednosti THD pri različnih osnovnih frekvencah.

Frekvenca v Hz	THD v %
100	0,6
300	0,14
500	0,16
700	0,16
1000	0,19
1500	0,21
2000	0,25



Slika 45: Frekvenčni spekter pri osnovni frekvenci 1500 Hz.

Kot vidimo iz tabele, se vsebnost z višanjem frekvence počasi zvišuje, kar pomeni, da se zmanjšuje tudi kvaliteta izhodnega toka, a je vsebnost višjih harmonikov vseeno zelo nizka.

6 Sklep

V okviru diplomske naloge sem izdelal hibridni ojačevalnik s tokovnim regulatorjem za napajanje elektromagnetnega aktuatorja.

Meritve so pokazale, da ojačevalnik z regulatorjem deluje s frekvenčno omejitvijo (3000 Hz), kar sem opazil pri meritvah frekvenčnega ter amplitudnega odziva. Pri tem bremenu (nadomestek aktuatorja) je opaziti nižji izkoristek od pričakovanega (do 63%), predvsem zaradi nizkega izhodnega toka. Pri višjih tokovnih obremenitvah se izkoristek ojačevalnika občutno poveča tudi do 20 %.

Linearni in stikalni del ojačevalnika skupaj delujejo zelo dobro, kar je tudi razvidno iz poglavja 3.2.1, natančneje slika 10. Tu vidimo, da ojačevalnik deluje pravilno, saj stikalni del prevzame glavnino delovnega toka I_{TDM} . Linearni del pa deluje kot nekakšen kompenzator valovitosti tok I_{opa} , njuna vsota pa je izhodni tok I_{out} .

Namensko razvit in zgrajen PWM stikalni del nadzoruje vrednost napetosti U_{CI} in s svojim delovanjem omogoči ojačevalniku višji možni razpon izhodne napetosti U_{out} od $\pm U_{DC}/2$, kot je razloženo v poglavju 3.2.2.

V nadaljevanju bi bilo smiselno ojačevalnik nadgraditi v popolno reguliran pogonski sklop za izbrano breme (aktuator), ter prilagoditi močnostne elemente, da bi bolje ustrezali izhodnemu toku in frekvenci, saj je bil ojačevalnik v osnovi dizajniran za precej višji izhodni tok.

7.1 Močnostno vezje PWR

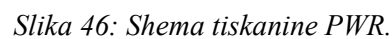
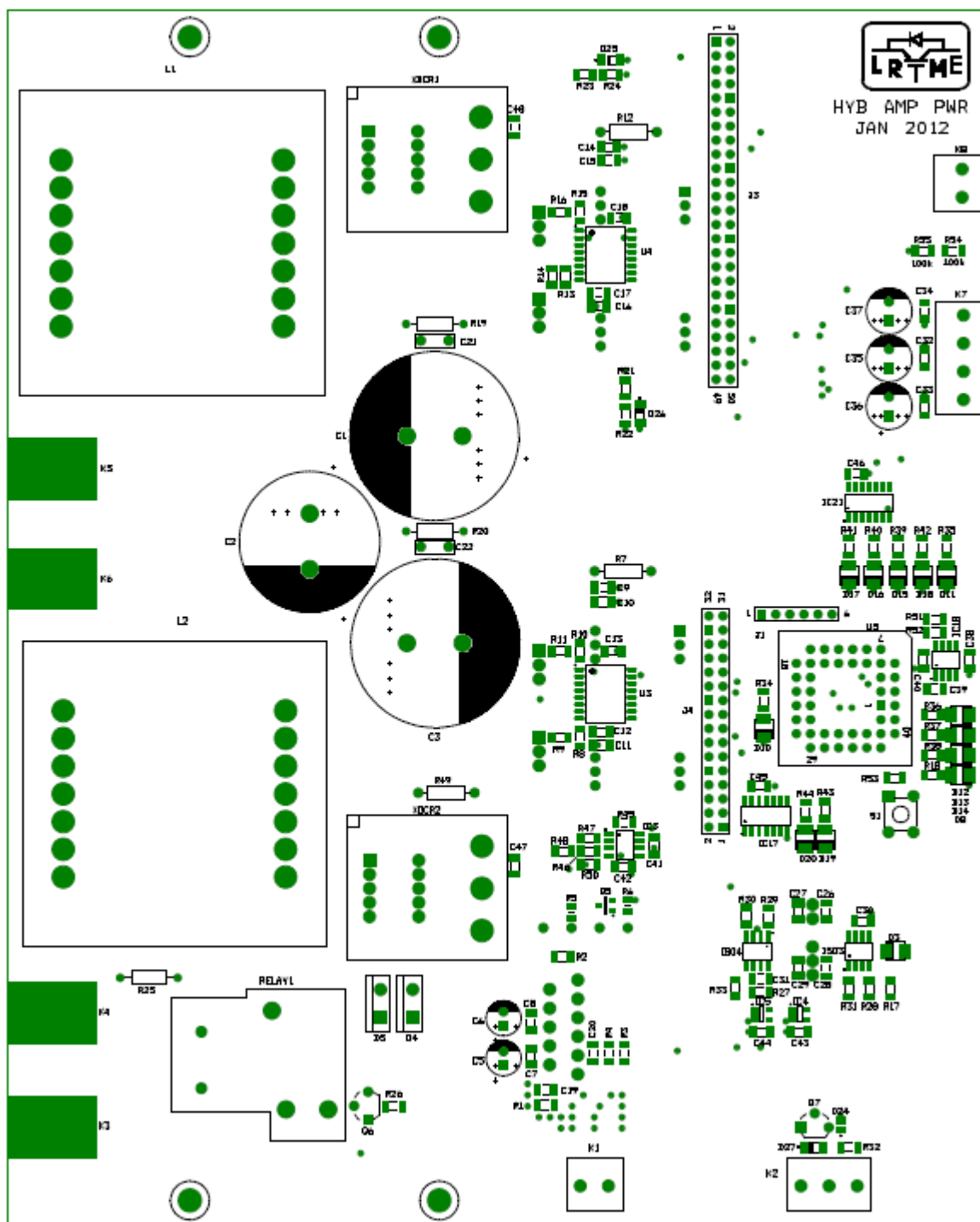


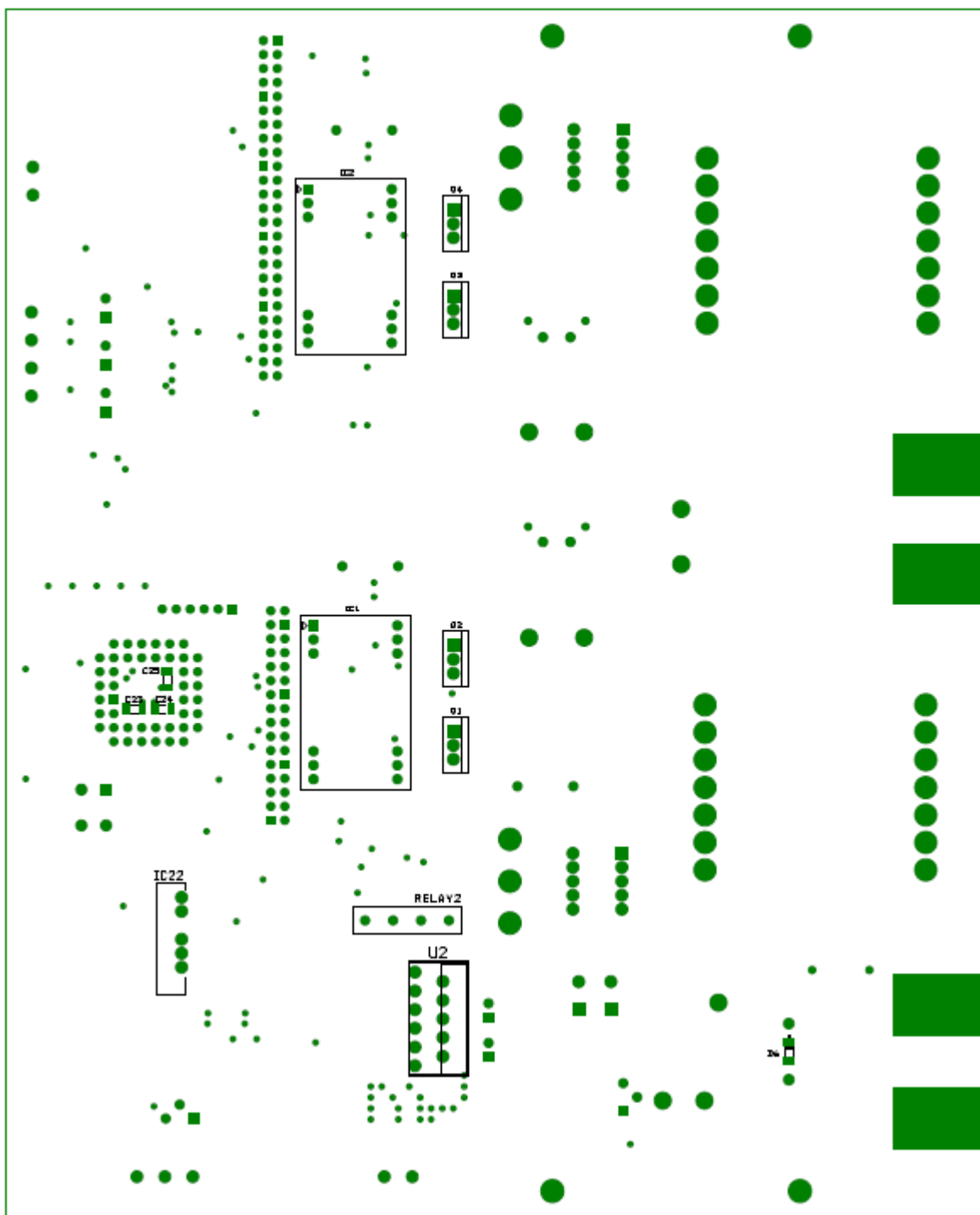
Tabela 10: Uporabljeni elementi na PWR tiskanini.

količina	velikost	PCB Footprint	referenca dela
2	2,2uF	CAP_AL_30X25X10MM	C1 C3
1	2200uF	CAP_AL_25X40X10MM	C2
2	10uF	CAP_AL_6R3X11R5X2R5MM	C5 C6
2	100nF	CAPC3216X130AN	C7 C8
6	10uF	CAPC3216X130AN	C9 C11 C14 C16 C27 C29
25	100nF	CAPC3216X130N	C10 C12 C13 C15 C17 C18 C23 C24 C25 C26 C28 C30 C31 C32 C33 C34 C40 C41 C42 C43 C44 C45 C46 C47 C48
3	10nF	CAPC3216X130N	C19 C20 C38
2	0.1 uF	CAP_5MM_7MM2X2MM5	C21 C22
3	220uF	CAP_AL_D8_H11E5_3E5MM	C35 C36 C37
1	1uF	CAPC3216X130N	C39
8	LED_RED	LED_SMD_1206	D3 D10 D11 D15 D16 D17 D19 D20
2	MUR1560	TO220_V_DIO	D4 D5
1	LL4148	DIOMELF3516N	D6
2	LED_GREEN	LED_SMD_1206	D8 D18
3	LED_SMD_1206	LED_SMD_1206	D12 D13 D14
1	TS4148	DIO2012X95N	D24
2	BZV55-C12	DIOMELF3516N	D25 D26
1	BZV55-C15	DIOMELF3516N	D27
2	1N5370BG	DIOMELF3516N	D28 D29
2	TEL3-2012	TEL3_2012	IC1 IC2
2	74HC14D	SOICL27P600X175-14N	IC17 IC21
1	74L081CD	SOICL27P600X175-8N	IC3
1	SN74LVCLG04DBVT	SOT95P280X145-5N	IC4
1	74V1G05STR	SOT95P280X145-5N	IC5
1	LM555	SOICL27P600X175-8N	IC18
1	E1Z5A5-5	E1Z	IC22
2	ACPL-064L-000E	SOICL27P600X175-8N	ISO3 ISO4
1	CON6	BLKCON.100/VH/TM1SQ/VW.100/6	J1
1	CON50A	BLKCON.100/VH/TM20E/VW.200/50	J3
1	CON32A	BLKCON.100/VH/TM20E/VW.200/32	J4
2	CONN_TB_508_2_MKDS15	CONN_TB_508_2_MKDS15	K1 K8
1	CONN_TB_508_3_MKDS15	CONN_TB_508_3_MKDS15	K2
4	PIN	PIN_6MM2_F14MM	K3 K4 K5 K6
1	CONN_TB_508_4_MKDS15	CONN_TB_508_4_MKDS15	K7
1	280uH	IND_EE55	L1
1	160uH	IND_EE55	L2
4	IRF640NPBF	TO220_V	Q1 Q2 Q3 Q4
1	BSS123	SOT95P240X110-3N	Q5
2	BC337	TO92B	Q6 Q7
1	7k5	RESC3216X60N	R1
2	3k	RESC3216X60N	R2 R24
2	1k	RESC3216X60N	R3 R56
1	100E	RESC3216X60N	R4
1	0E	RESC2012X50N	R5
1	2k2	RESC2012X50N	R6
2	12E	RES_400_60	R7 R12
4	10E	RESC3216X60N	R8 R10 R13 R15
4	12E	RESC3216X60N	R9 R11 R14 R16
6	1k5	RESC3216X60N	R17 R26 R31 R33 R45 R50
15	2k2	RESC3216X60N	R18 R28 R29 R30 R34 R35 R36 R37 R38 R39 R40 R41 R42 R43 R44
3	3k3	RESAD1040W60L620D250P	R19 R20 R25
1	18k	RESC3216X60N	R21
1	2k	RESC3216X60N	R22
1	12k	RESC3216X60N	R23
2	1NC	RESC3216X60N	R27 R55
1	560E	RESC3216X60N	R32
2	3k6	RESC3216X60N	R46 R47
1	3k9	RESC3216X60N	R48
1	3k9	RES_400_60	R49
1	47k	RESC3216X60N	R51
1	22k	RESC3216X60N	R52
2	100k	RESC3216X60N	R53 R54
1	G8P-1C4P 5DC	RELAY_G8P_1C4P_OMRON	RELAY1
1	RELAY_SIL12	SIL12	RELAY2
1	B3W-1000	SW_TACT_B3W	S1
1	OPA549	OPA54X	U2
2	IR2010	SOICL27P1032X265-16AN	U3 U4
1	XC9536_PLCC44	PLCC44	U5
1	25 A	XDCR_LA25NP	XDCR1
1	8 A	XDCR_LA25NP	XDCR2

7.1.2 Položaj elementov PWR

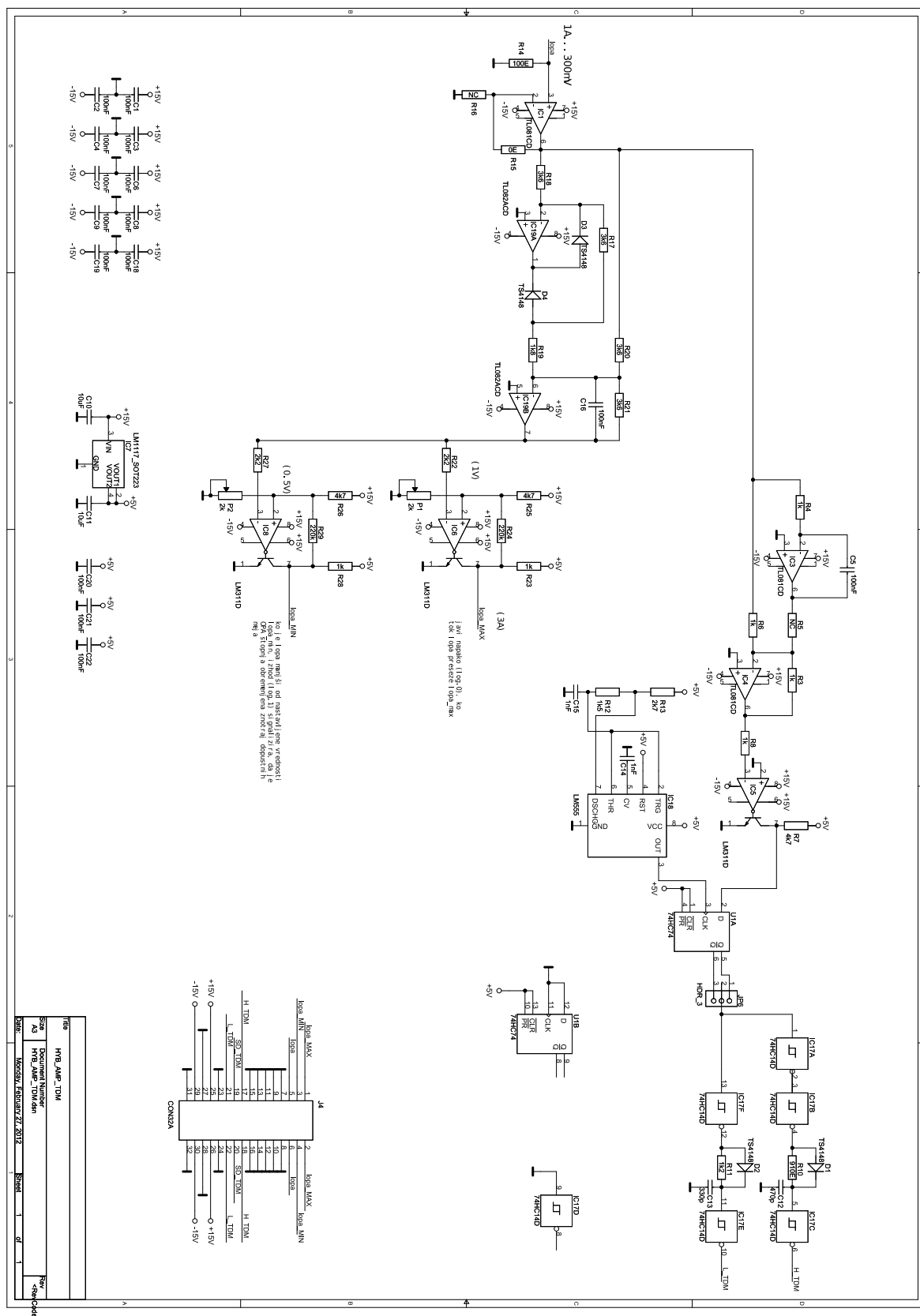


Slika 48: Postavitev elementov gornji del tiskanine.



Slika 49: Postavitev elementov spodnji del tiskanine.

7.2 Nadzorna tiskanina TDM



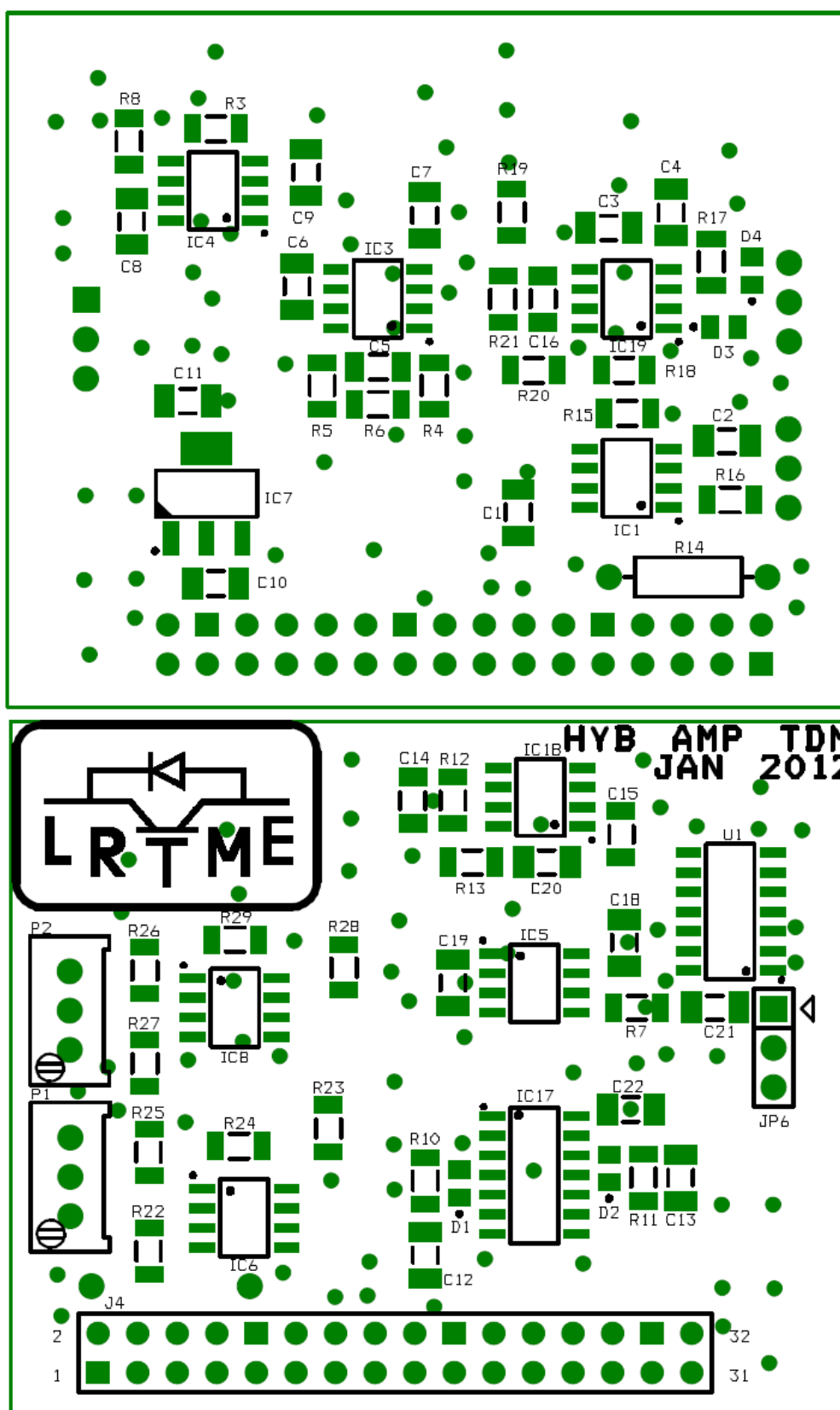
Slika 50: Shema vezja TDM tiskanine.

7.2.1 Uporabljeni elementi TDM

Tabela 11: Uporabljeni elementi na TDM tiskanini.

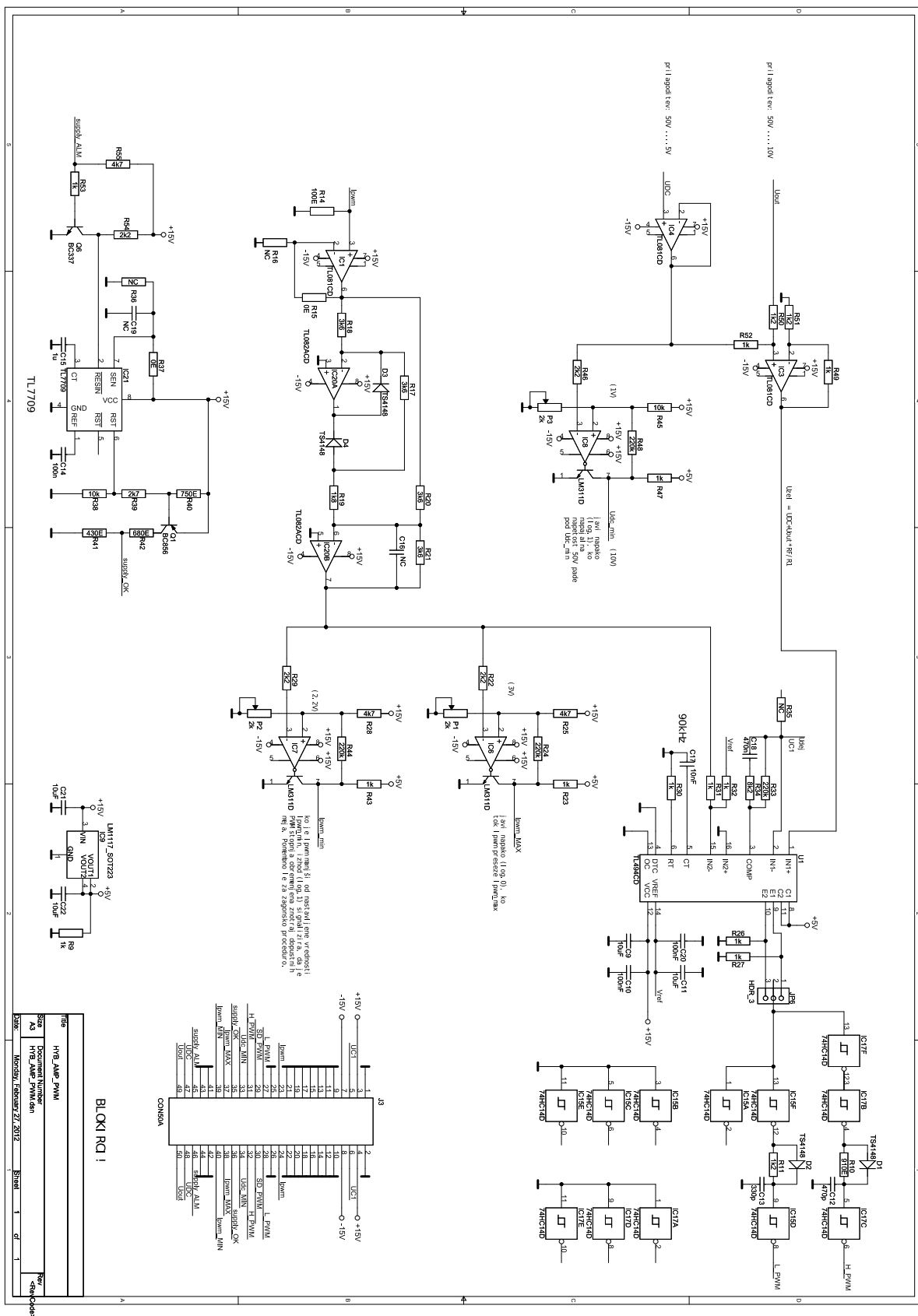
količina	velikost	PCB Footprint	referenca dela
13	100nF	CAPC3216X130AN	C1 C2 C3 C4 C6 C7 C8 C9 C18 C19 C20 C21 C22
2	100nF	CAPC3216X130N	C5 C16
2	10uF	CAPC3216X130AN	C10 C11
1	470p	CAPC3216X130AN	C12
1	330p	CAPC3216X130AN	C13
2	1nF	CAPC3216X130N	C14 C15
4	TS4148	D1OC2012X95N	D1 D2 D3 D4
3	TL081CD	SOIC127P600X175-8N	IC1 IC3 IC4
1	74HC14D	SOIC127P600X175-14N	IC17
1	TL082ACD	SOIC127P600X175-8N	IC19
3	LM311D	SOIC127P600X175-8N	IC5 IC6 IC8
1	LM1117 _SOT223	SOT230P700X180-4N	IC7
1	LM555	SOIC127P600X175-8N	IC18
1	CON32A	BLKCON.100/VH/TM2OE/W.200/32	J4
1	HDR_3	HDR_3	JP6
2	2k	POT_3296W	P1 P2
6	1k	RESC3216X60N	R3 R4 R6 R8 R23 R28
2	NC	RESC3216X60N	R5 R16
3	4k7	RESC3216X60N	R7 R25 R26
1	910E	RESC3216X60N	R10
1	1k2	RESC3216X60N	R11
1	1k5	RESC3216X60N	R12
1	2k7	RESC3216X60N	R13
1	100E	RES 400 60	R14
1	0E	RESC3216X60N	R15
4	3k6	RESC3216X60N	R17 R18 R20 R21
1	1k8	RESC3216X60N	R19
2	2k2	RESC3216X60N	R22 R27
2	220k	RESC3216X60N	R24 R29
1	74HC74	SOIC127P600X175-14N	U1

7.2.2 Položaj elementov TDM



Slika 51: Položaj elementov TDM tiskanine.

7.3 Nadzorno vezje PWM



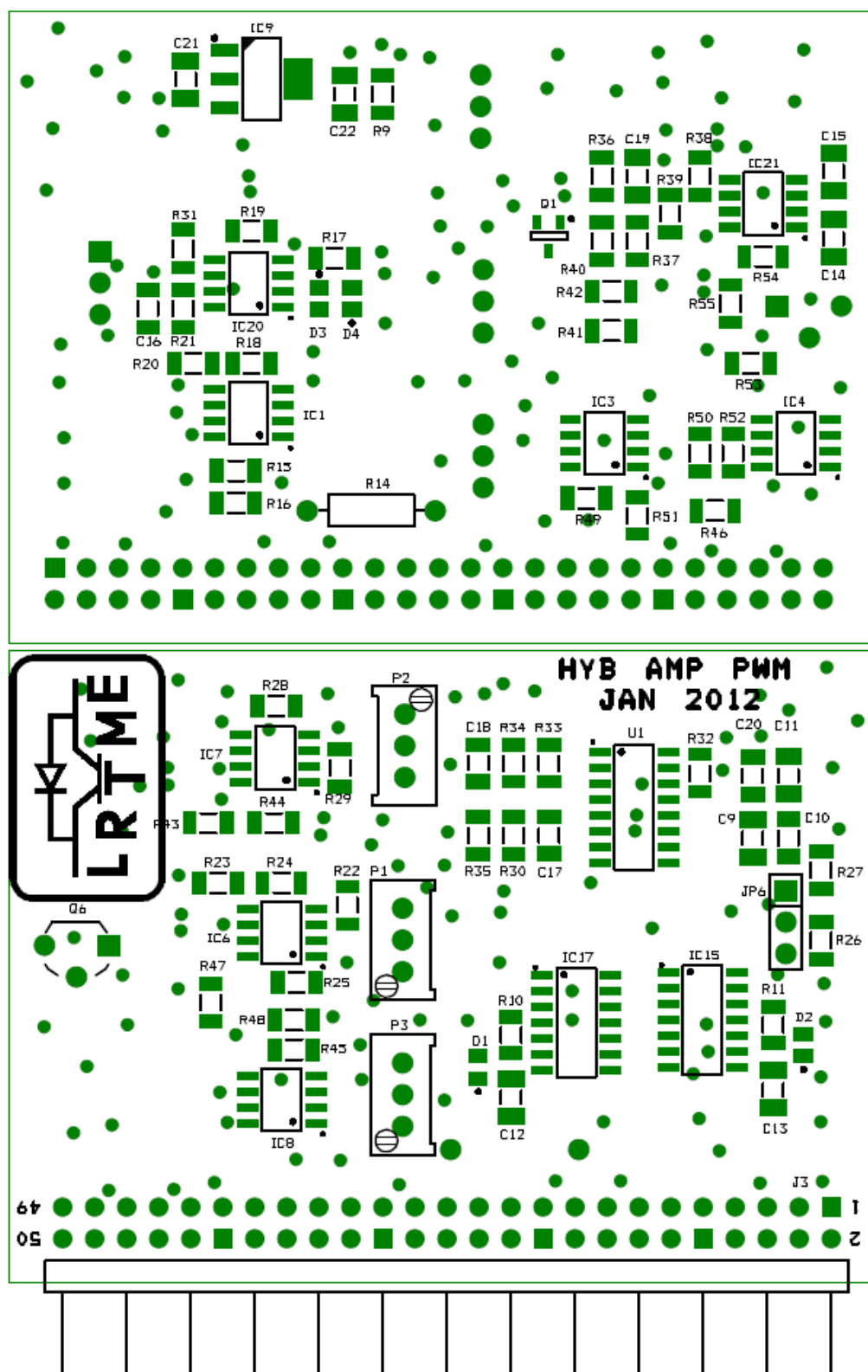
Slika 52: Shema vezja PWM tiskanine.

7.3.1 Uporabljeni elementi

Tabela 12: Uporabljeni elementi na PWM tiskanini.

količina	vrednost	PCB Footprint	referenca dela
4	10uF	CAPC3216X130AN	C9 C11 C21 C22
2	100nF	CAPC3216X130N	C10 C20
1	470p	CAPC3216X130AN	C12
1	330p	CAPC3216X130AN	C13
1	100n	CAPC3216X130AN	C14
1	1u	CAPC3216X130AN	C15
1	NC	CAPC3216X130N	C16
1	10nF	CAPC3216X130N	C17
1	470n	CAPC3216X130N	C18
1	NC	CAPC3216X130AN	C19
4	TS4148	DIOC2012X95N	D1 D2 D3 D4
3	TL081CD	SOIC127P600X175-8N	IC1 IC3 IC4
2	74HC14D	SOIC127P600X175-14N	IC15 IC17
1	TL082ACD	SOIC127P600X175-8N	IC20
3	LM311D	SOIC127P600X175-8N	IC6 IC7 IC8
1	LM1117_SOT223	SOT230P700X180-4N	IC9
1	TL7709	SOIC127P600X175-8N	IC21
1	CON50A	BLKCON.100/RH/TM20E/W.525/50	J3
1	HDR_3	HDR_3	JP6
3	2k	POT_3296W	P1 P2 P3
1	BC856	SOT95P240X110-3N	Q1
1	BC337	TO92B	Q6
12	1k	RESC3216X60N	R9 R23 R26 R27 R30 R31 R32 R43 R47 R49 R52 R53
1	910E	RESC3216X60N	R10
3	1k2	RESC3216X60N	R11 R50 R51
1	100E	RES_400_60	R14
2	0E	RESC3216X60N	R15 R37
3	NC	RESC3216X60N	R16 R35 R36
4	3k6	RESC3216X60N	R17 R18 R20 R21
1	1k8	RESC3216X60N	R19
4	2k2	RESC3216X60N	R22 R29 R46 R54
4	220k	RESC3216X60N	R24 R33 R44 R48
3	4k7	RESC3216X60N	R25 R28 R55
1	8k2	RESC3216X60N	R34
2	10k	RESC3216X60N	R38 R45
1	2k7	RESC3216X60N	R39

7.3.2 Položaj elementov PWM



Slika 53: Položaj elementov PWM tiskanine.

8 Viri

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Audio_power_amplifier, [Dostopano: 26. 1. 2015].
- [2] <http://en.wikipedia.org/wiki/Actuator> [Dostopano: 26. 1. 2015].
- [3] Bill Black, Mike Lopez in Anthony Morcos, Basic of voice coil actuators, Dosegljivo: <http://www.acm-magnetics.com/acm/pdfs/15-BasicsOfVCMs.pdf>, [Dostopano: 26. 1. 2015].
- [4] Podatki o aktuatorju CAL-36-X-X, Dosegljivo: <http://www.smac-mca.com/news-22.php>, [Dostopano: 26. 1. 2015].
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_amplifier [dostopano 22.11.2014]
- [6] Podatkovni list opa549 High-Voltage, High-Current OPERATIONAL AMPLIFIER
- [7] Peter Zajec, Operacijski ojačevalnik, Dosegljivo: http://lrtme.fe.uni-lj.si/lrtme/slo/anadig_elekt/gradivo.html, [Dostopano: 26. 1. 2015].
- [8] Vanja Ambrožič, David Nedeljković: Elektrotehniški vestnik 2003 Primerjalna analiza metode neposredne regulacije toka.
- [9] Henrik Lavrič, Daniel Vončina, Peter Zajec, Janez Nastran, Elektrotehniški vestnik 70(5): 273-278, 2003 Napetostni ojačevalnik z velikim izkoristkom in majhnim tokovnim popačenjem.
- [10] Yundt, George B, Series parallel connected composite amplifiler (stran 192 do 196) Dosegljivo: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/15481> [Dostopano 26 .1. 2015].
- [11] http://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-width_modulation [dostopano 26.1. 2015]
- [12] Podatkovni list TL494CD, Dosegljivo: <http://html.alldatasheet.com/html-pdf/5778/MOTOROLA/TL494CD/258/1/TL494CD.html> [Dostopano 26 .1 . 2015].
- [13] Podatkovni list napetostni nadzor TL7709 Dosegljivo: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/80452/TI/TL7709.html> [Dostopano 26. 1. 2015].
- [14] Podatkovni list IR2010 Dosegljivo: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2010.pdf> [dostopano 26 .1. 2015].
- [15] Podatkovni list tokovna sonda LA55 Dosegljivo: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/115010/LEM/LA55-P.html> [Dostopano 26. 1. 2015].

[16] Podatkovni list napajalnik traco power 2013 Dosegljivo:

<http://www.farnell.com/datasheets/1648715.pdf> [Dostopano 26. 1. 2015].

[17] Podatkovni list napajalnik deutronic Dosegljivo:

http://www.deutronic.de/uploads/tx_fsndproduct/docs/ET60_Einbau_Netzteil_60_Watt_triple_data_de.pdf [Dostopano 26 .1 .2015].

[18] Podatkovni list napajalnik SWS600L-60 Dosegljivo:

<http://www.farnell.com/datasheets/36344.pdf> [Dostopano 26. 1. 2015].