

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Elektryczny

**Projektowanie urządzeń
energoelektronicznych**

Projekt

Patryk Kuryj

Prowadzący
dr inż. Mariusz Zdanowski

WARSZAWA, 2025

1 Parametry przekształtnika

Parametry znamionowe pracy przekształtnika dla jakich został wykonany i zoptymalizowany układ:

- Napięcie wejściowe $U_1 = 250-350$ V
- Moc znamionowa $P_2 = 9$ kW
- Tętnienia prądu $\Delta i_1 = 8\%$
- Tętnienia napięcia $\Delta U_2 = 20$ V
- Temperatura maksymalna złącza $Tj_{max} = 110$ °C

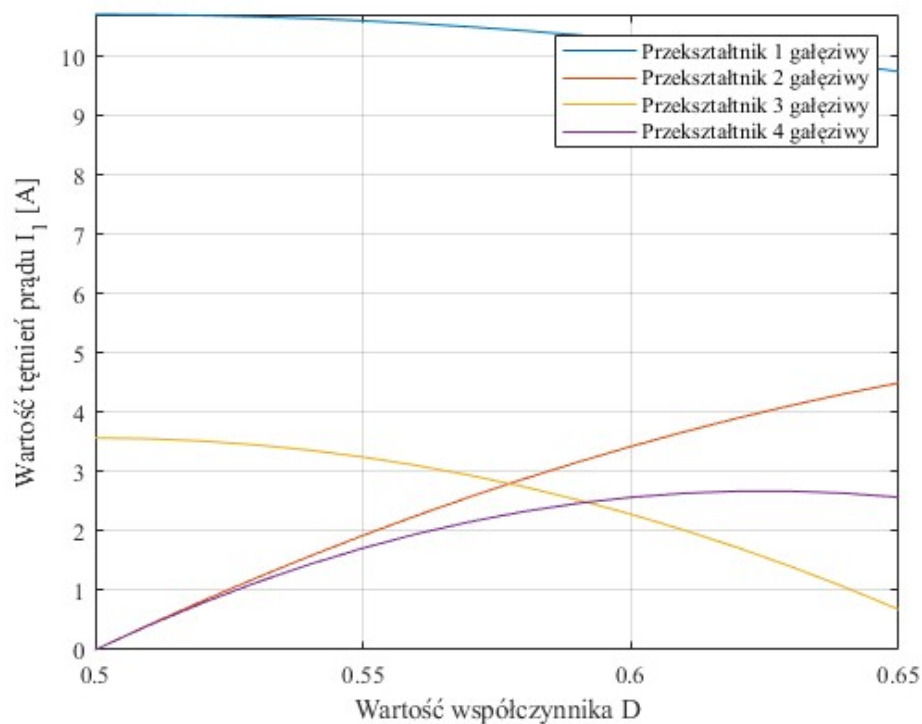
2 Topologia układu

Projekt topologii układu zakładał dobranie ilości gałęzi przekształtnika w celu redukcji wilekości elementów magnetyczny i tętnień prądów wejściowych. Układ podczas pracy nominalnej będzie pracować z wypełnieniem z przedziału (50-65%). Dalsze analizy zostały wykonane z uwzględnieniem jakości pracy we wskazanym przedziale wypełnień.

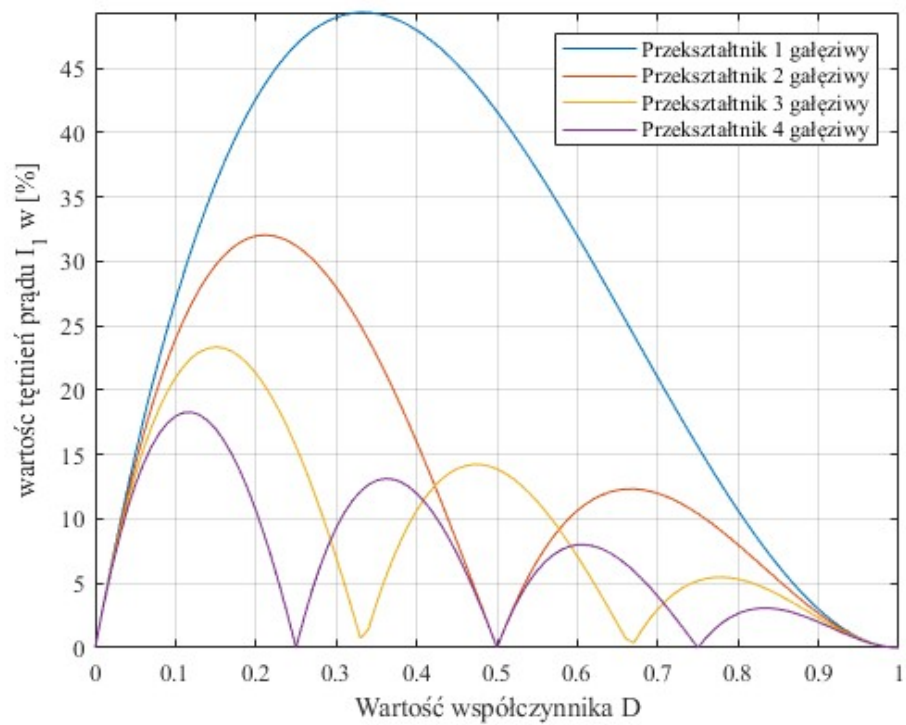
2.1 Tętnienia prądu

Obliczenie tętnień prądu Wejściowego i_1 jest uzależnione od topologii projektowanego przegształtnika i wielkości dławików występujących w układzie. Wilekość tętnień prądu można zredukować zwiększając wielkość dławików wejściowych lub zwiększając ilość gałęzi występujących w układzie. Zależność zmiany wartości tętnień prądu wynikająca z zmiany ilości gałęzi układu w zakresie 1-4 gałęzie została przedstawiona na Rys. 2. Zmiana wartości tętnień prądu w przedziale pracy przekształtnika z wypełnieniem $D = 50-65\%$ został przedstawiony na Rys. 1. Rys. 3 przedstawiona konieczną wartości indukcyjności jaka jest wymagana w przekształtniku w celu utrzymania zadanej wartości tętnień prądu. Największa redukcja paramterów zachodzi dla układów trój- lub cztero- gałęziowych. Dalsze zwiększanie liczby gałęzi nie prowadzi do znaczącej poprawy parametrów. Stosując stałą wartość indukcyjności dławika podczas zwiększania ilości gałęzi możliwe jest zmniejszenie wartości tętnień prądu wejściowego. Natomiast skutkuje to pozostawieniemwiększej

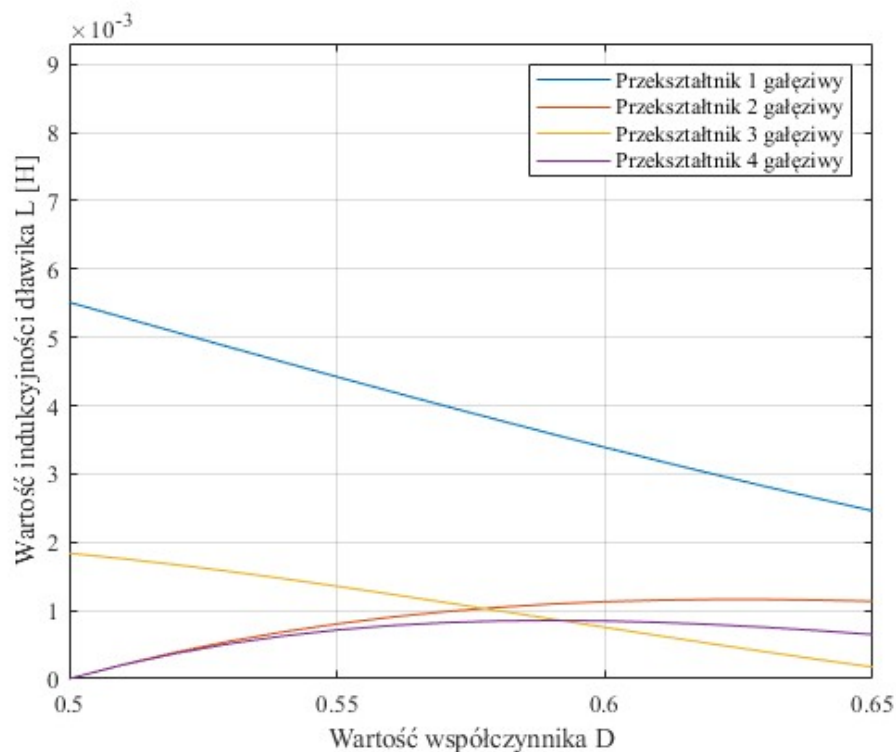
wartości indukcyjności dławików. W projekcie wymagane jest maksymalne tętnienie prądu wejściowego na poziomie 8%. Wartość ta została zachowana dla najgorszych parametrów pracy układu. Zastosowanie czterogałęziowego układu pozwoliło na zmniejszenie indukcyjności dławików o 81.2% względem wartości indukcyjności dla układu jednogałęziowego przy zachowaniu maksymalnej wartości tętnień prądu wejściowego.



Rys 1: Przybliżenie przebieg zależności wartości tętnień prądu i_1 w zależności od wypełniania.



Rys 2: Przebieg zależności wartości tętnień prądu i_1 w zależności od wypełniania.



Rys 3: Przebieg zmiany koniecznej wartości indukcyjności dławików w zależności od ilości gałęzi przekształtnika w celu utrzymania wymaganej wartości tętnienia prądu.

Do dalszych obliczeń został przyjęty układ czterogałęziowy z dławikami o indukcyjności 27.2 mH. Konfiguracja ta pozwala na zminimalizowanie gabarytów dławików przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych tętnień prądu wejściowego.

2.2 Sprężenie magnetyczne dławików

Sprężenie magnetyczne dławików realizowane jest za pomocą odpowiedniego nawinięcia zwojów elementów sprzężonych na rdzeń magnetyczny. Wprowadzenie tego zjawiska do obwodu elektrycznego wpływa na wartość prądu wejściowego grupy cewek sprzężonych jak i prądu poszczególnych uzwojeń dławika. Zmiana prądów spowodowana sprzężeniem elementów magnetycznych została policzona dla układu dwugałęziowego. Obliczenia zostały wy-

konane za pomocą następujących wzorów dla dzenia magnetycznego typu U i E: Kształtka typu E sprzężenie ujemne:

$$i_{1(p \rightarrow p)} = U_2(D - 1) \cdot \frac{1 - 2D}{L_s(1 - k)f_s}$$

Kształtka typu E sprzężenie dodatnie:

$$i_{1(p \rightarrow p)} = U_2(D - 1) \cdot \frac{1 - 2D}{L_s(1 + k)f_s}$$

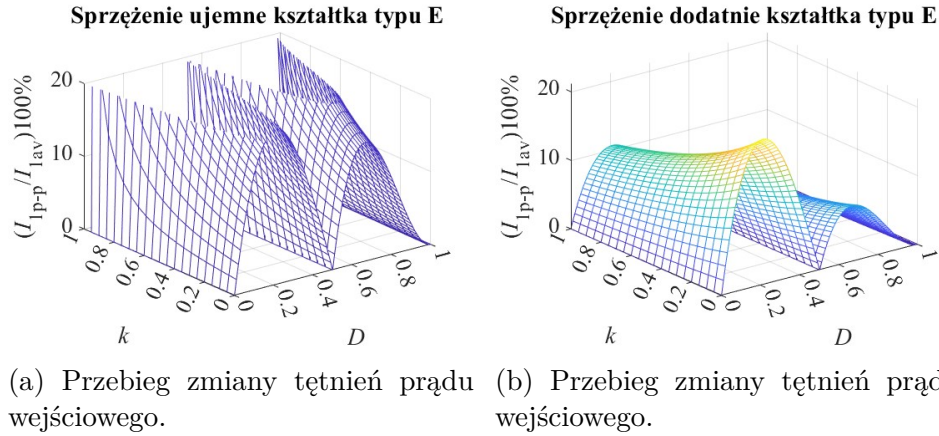
Kształtka typu U sprzężenie ujemne:

$$i_{1(p \rightarrow p)} = U_2D \cdot \frac{1 - 2D}{L_\sigma f_s}$$

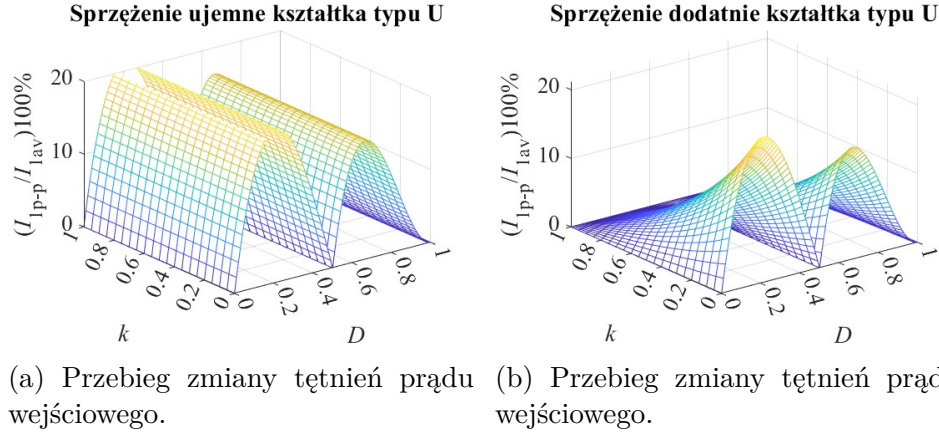
Kształtka typu U sprzężenie dodatnie:

$$i_{1(p \rightarrow p)} = U_2D \cdot \frac{(1 - k)(1 - 2D)}{L_\sigma(1 + k)f_s}$$

Wyniki uzyskane z przeprowadzonych obliczeń



Rys 4: Zależność zmiany prądu wejściowego układu od wartości współczynnika sprzężenia dławików i wypełnienia sygnału sterującego tranzystorami.



Rys 5: Zależność zmiany prądu wejściowego układu od wartości współczynnika sprzężenia dławików i wypełnienia sygnału sterującego tranzystorami.

Przeprowadzone obliczenia wskazują że zależność wpływu sprzężeń magnetycznych zależy od rodzaju kształtki rdzenia. Sprężenie dodatnie zmniejsza wartość tętnień prądu wejściowego układu. Jednocześnie powoduje zwiększenie wartości tętnień prądów poszczególnych uzwojeń dławików. Sprężenie ujemne wpływa negatywnie na wartość tętnień prądu wejściowego w układzie. Powoduje jednak zmniejszenie tętnień prądów uzwojeń dławików. Kształtka typu U powoduje rozbieżne efekty zmiany prądów w stosunku do kształtki typu E z powodu możliwości kształtowania strumienia własnego cewki osobnie od strumienia wspólnego uzwojeń.

2.3 Dobór kondensatora wyjściowego

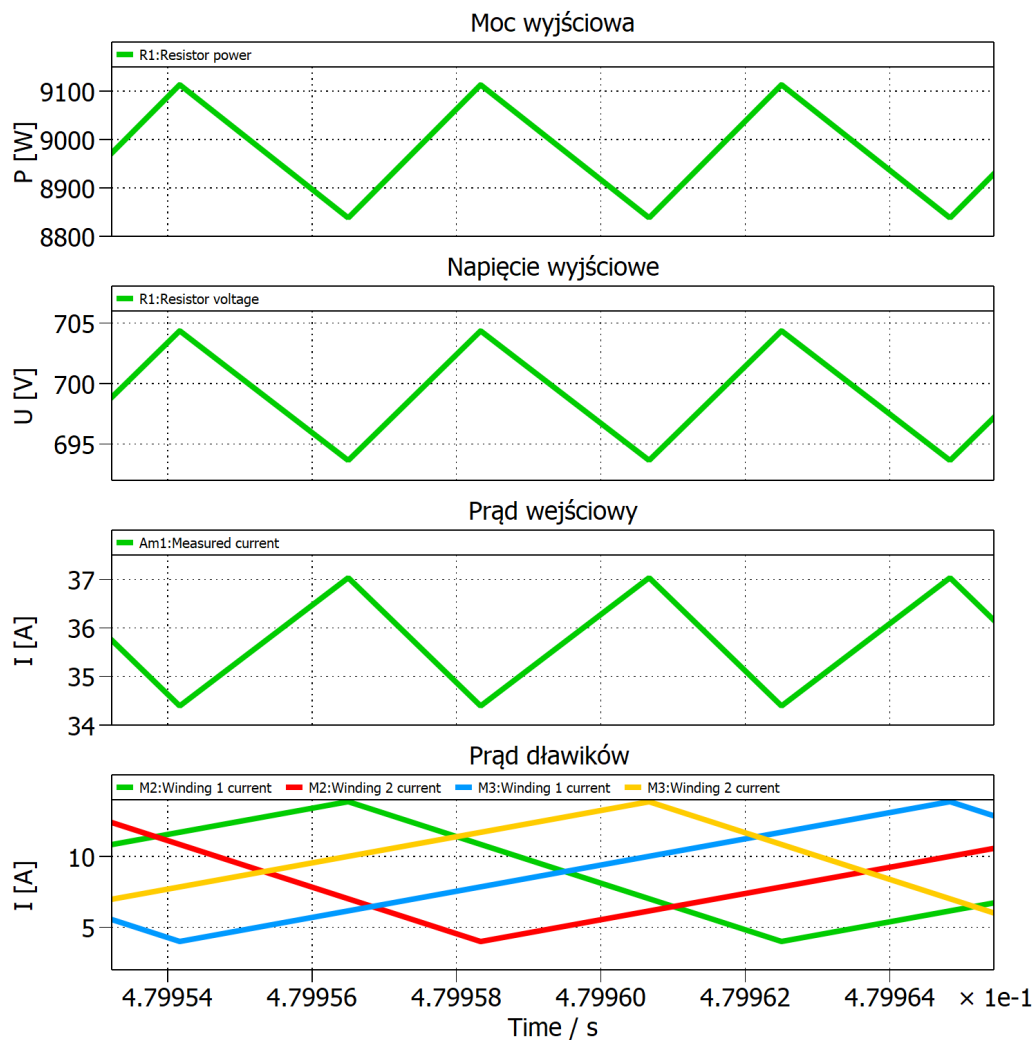
W celu dobrania kondensatora wyjściowego zostały wykonane obliczenia z uwzględnieniem zadanych warunków tętnień napięcia wyjściowego $\Delta U_2 = 20 \text{ V}$. Przeprowadzone obliczenia dla obwodu 1 gałęziowego:

$$C = \frac{D * T_s * U_2}{\Delta U_2 * R} = 6.86 \mu F$$

gdzie R zostało wyliczone w następujący sposób:

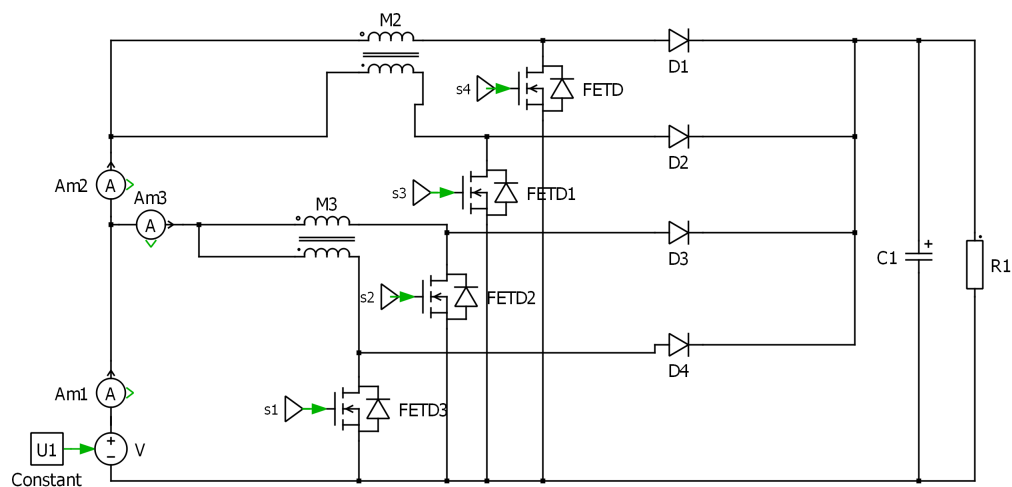
$$R = \frac{U_2^2}{P_2} = 54.44 \Omega$$

Parametry pracy wstępnie zaproponowanego układu zostały przedstawione na Rys. 6. Parametry układu zgadzają się w założeniach projektowych. Tętnienia napięcia wyjściowego są mniejsze niż zakładane z powodu wykorzystania wzoru na pojemność kondensatora do określonych tętnień napięcia dla układu jednogłęziowego przy zastosowaniu układu o czterech gałęziach.



Rys 6: Przebiegi sygnałów napięcia dławików, mocy wyjściowej, prądu wejściowego i napięcia wyjściowego.

Schemat proponowanego układu został zaprezentowany na Rys. 7



Rys 7: Schemat zaproponowanego układu.

3 Projekt dławików

Elementy magnetyczne zaproponowane w projekcie zostały zaprojektowane od podstaw w celu jak najlepszego dopasowania indukcyjności do projektowanego obwodu. Pierwszym etapem projektu dławika było dobranie odpowiedniego rdzenia ferytowego. Etap ten składał się z wyliczenia wartości minimalnej objętości rdzenia magnetycznego z wykorzystaniem parametrów elektrycznych. W drukiej części należało porównać ten wynik z objętością geometryczną rdzenia.

$$A_p = \frac{LI_{\max}I_{\text{RMS}} \cdot 10^4}{B_{\max}Jk} \quad [\text{cm}^4]$$

Porównanie wartości Area Product zostało przedstawione w tabeli 1. Do dalszych obliczeń zostały wybrane rdzenie EC70/34/17, E42/33/20, 2x E41/17/12.

Tabela 1: Zestawienie porónanych rdzeni.

Lp.	rdzeń	A_p	A_{p2}
1	E100/60/28	4.7184	147.9982
2	U100/57/25	4.7184	41.6128
3	E80/38/20	4.7184	43.4437
4	U126/91/20	4.7184	246.9600
5	EC70/34/17	4.7184	13.4887
6	U93/76/16	4.7184	36.8775
7	E55/28/25	4.7184	15.4351
8	E71/33/32	4.7184	38.4914
9	UI93/76/30	4.7184	139.5072
10	E13/6/3	4.7184	0.02608
11	E35/18/10	4.7184	1.8125
12	E42/33/20	4.7184	10.5253
13	E41/17/12	4.7184	2.3850
14	2x E41/17/12	4.7184	4.7701

Następnie została wyliczona ilość zwojów przewodnika konieczna do umieszczenia w rdzeniu. Następnie liczba ta została sprawdzona z wymiarami zaproponowanych rdzeni.

$$N = \frac{LI_{\max}}{B_{\max}S_{Fe}}$$

Uzyskano następujące wyniki przedstawione w Tabeli. 2

Tabela 2: Zestawienie ilości zwojów w wybranych rdzeniach.

Lp.	Rdzeń	N
1	EC70/34/17	56
2	E42/33/20	101
3	2x E41/17/12	85

Następnym etapem był dobór przewodnika do nawinięcia na rdzenie. Obliczona została głębokość wnikania, minimalny przekrój przewodnika i średnica przewodu.

$$S_{cu} = \frac{I_{\text{RMS}}}{J} = 1.87 \text{ mm}^2$$

$$d_{cu} = 2\sqrt{\frac{S_{cu}}{\pi}} = 1.57 \text{ mm}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi\mu_0\mu_w f}} = 0.27 \text{ mm}$$

Do tak wyliczonych parametrów przewodnika dobrana została lica kwadratowa Firmy Dackpol. Dokładne parametry dobranej licy przedstawione są na Rys. 8. Lica kwadratowa pozwala na ciaśniejsze ułożenie w oknie rdzenia i wypełnienie go w większym stopniu.

Wymiary		Przekrój przewodu [mm ²]	Prostokąt		Kwadrat	
Liczba żył	Średnica każdej żyły [mm]		Max. szerokość [mm]	Max. wysokość [mm]	Max. szerokość [mm]	Max. wysokość [mm]
60	0,100	0,47	1,20	0,80	Inne wymiary na zapytanie	
90	0,100	0,77	1,50	1,00	1,20	1,20
100	0,100	0,79	1,40	1,20	Inne wymiary na zapytanie	
135	0,100	1,06	1,50	1,10	1,30	1,30
160	0,100	1,26	1,80	1,20	1,40	1,40
200	0,100	1,57	2,30	1,70	Inne wymiary na zapytanie	
245	0,100	1,93	2,00	1,50	2,00	2,00
256	0,125	3,14	2,90	2,20	Inne wymiary na zapytanie	
300	0,100	2,36	2,50	1,60	Inne wymiary na zapytanie	
350	0,100	2,75	2,90	1,80	Inne wymiary na zapytanie	
420	0,100	3,30	3,10	2,00	2,50	2,50

Rys 8: Parametry dobranej licy zaznaczone na żółto.

Sprawdzenie czy zakładana ilość zwojów zmieści się w rdzeniu zostało przedstawione w Tabeli 3. Do dalszych obliczeń wybrany został rdzeń E42/33/20.

Tabela 3: Zestawienie ilości zwojów w wybranych rdzeniach i zapasu miejsca.

Lp.	Rdzeń	N	Ilość wolnego miejsca
1	EC70/34/17	56	183%
2	E42/33/20	101	12%
3	2x E41/17/12	85	-50%

4 Dobór elementów półprzewodnikowych

W części tej sprawdzone zostały wartości prądów i napięć jakie muszą wytrzymywać elementy półprzewodnikowe. Wartości znamionowe elementów

półprzewodnikowych zostały dobrane wraz z wsłczynnikiem zapasu $k = 1.5$. Wartość ta ma zapewnić dodatkowe zabezpieczenie przeciwprzepięciowe w układzie. Obliczone wartości prądów i napięć przedstawia Tabela 4

Tabela 4: Zestawienie Prądów i napięć elementoe półprzewodnikowych.

Wartość	Tranzystor	Dioda	k	Tranzystor *k	Dioda *k
I_{av}	5.71	3.21	1.5	8.57	4.82
I_{rms}	7.49	5.62	1.5	11.24	8.43
I_{max}	13.86	13.86	1.5	20.79	20.79
U	700	700	1.5	1050	1050

5 Elementy półprzewodnikowe i straty mocy

Elementy półprzewodnikowe zostały dobrane zgodnie z wartościami prądowymi i napięciowymi zawartymi w tabeli 4. Dla elemrntów tych zostały obliczone straty mocy przewodzenia i przełączania. Straty mocy blokowania i sterowania zostały pominięte w dalszych obliczenia. Straty przełącznia zostały obliczone za pomocą następującego podstawowego wozru:

$$P_{SWT} = f_S (E_{ON} + E_{OFF}) \frac{I_{in}}{I_n} \frac{U_{in}}{U_n}$$

Stratyt przewodzenia zostały obliczone za pomocą następujących wzorów dla tranzystora typu MOSFET:

$$P_{C(T)} = r_{DS(on)} I_{T(rms)}^2$$

Dla Diody i Tranzystora typu JGBT:

$$P_{CD} = U_{F0} I_{D(av)} + r_D I_{D(rms)}^2$$

$$P_{CT} = U_{T0} I_{T(av)} + r_T I_{T(rms)}^2$$

Straty obliczone za pomocą powyższych wzorów w programie MATLAB i porównane z wynikami symulacji dlementów wybranyc przedstawiono w Tabeli. 5. Obliczenie i symulacje przedstawiają rozbierżność w uzyskanych wynikach. Największe różnicze widać w stratach diody straty uzyskane w symulacji są zwiększone względem obliczeń w MATLAB o 39%. Dalsze obliczenia

zostały wykonane z uwzględnieniem strat mocy o większej wartości w celu dodatkowego zabezpieczenia termicznego układu.

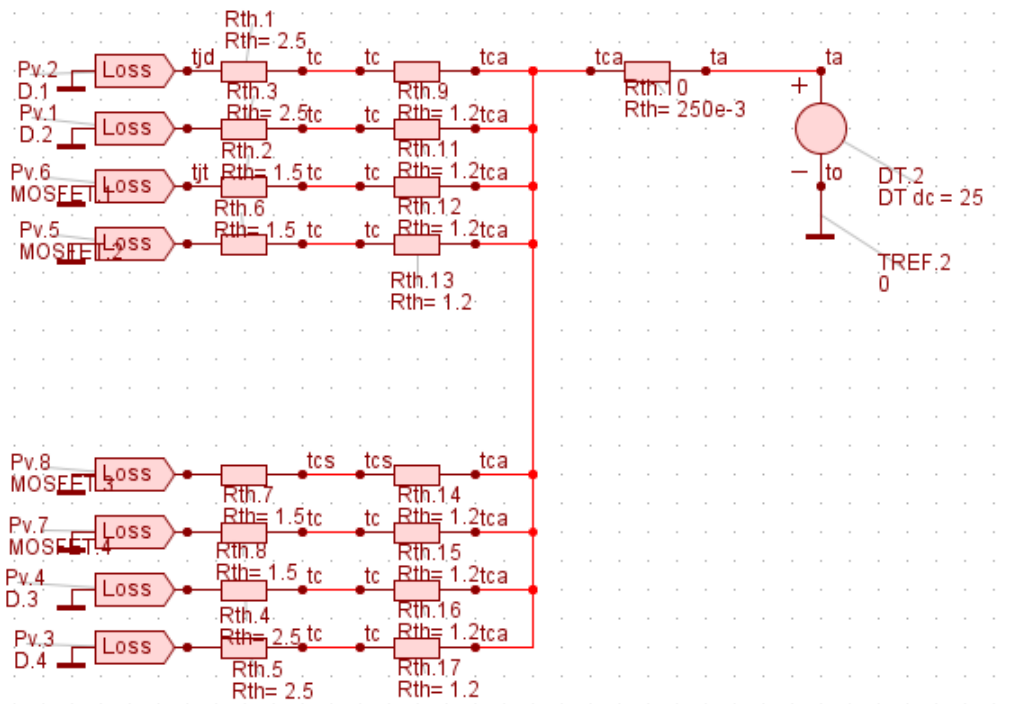
Tabela 5: Zestawienie strat obliczonych i uzyskanych z symulacji dla elementów wybranych.

Element	PC obl.	Psw obl.	Pc sym.	Psw sym.
C3M0120100J	7.75	0.87	8.08	0.58
IXFL44N100P	43.28	37.52	-	-
APT25GT120BRDQ2	51.39	69.86	-	-
STTH810G	3.13	3.52	7.41	1.82
S4D10120A	17.37	1.83	-	-

Tranzystory C3M0120100J i IXFL44N100P są to tranzystory typu MOS-FET natomiast tranzystor APT25GT120BRDQ2 jest typu IGBT. Dioda STTH810G jest to dioda wysoko napięciowa z szybkim czasem odzyskiwania parametrów zaporowych. Dioda S4D10120A jest diodą w technologii SIC SCHOTTKY-iego. Elementy te zostały sprawdzone z powodów swojej różnorodności i dopasowanie parametrów znamionowych do parametrów panujących w układzie.

6 Obwód termiczny

Projektując układ elektryczny konieczne jest uwzględnienie temperatury pracy elementów elektronicznych. Straty energii występujące w przekształtniku powodują wzrost temperatury złącza elementu półprzewodnikowego co prowadzi do wzrostu temperatury obudowy i złącza takiego elementu. Temperatura złącza nie może przekroczyć temperatury granicznej do jakiej został zaprojektowany element. Przekroczenie temperatury granicznej może prowadzić do trwałego uszkodzenia elementu. Projekt ten posiada dodatkowe ograniczenie maksymalna temperatura złącza nie może przekroczyć 110 ° C. Sprawdzenie obwodu termicznego zostało wykonane w programie GECKO-CIRCUIT. W programie tym został również dobrany radiatorze i podkładka izolująca elementy od radiatora. Schemat układu termicznego zamodelowanego w programie GECKOCIRCUIT został przedstawiony na Rys. 9



Rys 9: Schemat układu termicznego z uwzględnieniem rezystancji obudowy, rezystancji podkładki izolującej i rezystancji radiatora.

Wyniki obliczeń termicznych zostały przedstawione w Tabeli 6. Radiator 1 model LAM 6 100 24 z wymuszonym przepływem powietrza w sposób mechaniczny posiada rezystancję termiczną o wartości $0.25 \frac{K}{W}$. Podkładka izolacyjna jest podkładką mikową o rezystancji termicznej $1.2 \frac{K}{W}$. Radiator 2 model A6023 posiada rezystancję termiczną o wartości $0.8 \frac{K}{W}$. Zwiększenie rezystancji termicznej radiatora wpływa na zwiększenie temperatury złącza elementu półprzewodnikowego. Temperatura złącza podczas zastosowania radiatora 2 wykracza poza dopuszczalny zakres.

Tabela 6: Porównanie temperatury układu w zależności od radiatora.

Element	TjD	TjT	Tr
Radiator 1	97	60	45
Radiator 1+podkładka	109	72.5	44.8
Radiator 2	139	106	92
Radiator 2+ podkładka	152	119.5	92

7 Optymalizacja układu

Estymacja objętości dławika dla układów od 1 do 4 gałęzi została przedstawiona w Tabeli 7. Układ o 4 gałęziach mimo zastosowania 4 osobnych dławików posiada najmniejszą wspólną objętość tego typu elementów.

Tabela 7: Zestawienie całkowitej aproksymowanej objętości dławików dla układów od 1 do 4 gałęziowego.

ilość	L	Imax	$L \cdot \text{imax}^2$	alfa	V
1	1.4e-3	38.14	2.037	2	2.037
2	4.1160e-4	20.6	0.165	2	0.349
3	4.8032e-4	14.7	0.086	2	0.311
4	2.7249e-4	13.8	0.028	2	0.208

Estymacja objętości radiatora została przedstawiona w Tabeli 8. Wielkość radiatora zmienia się odwrotnie proporcjonalnie do jego wartości rezystancji termicznej. Zwiększona przenikalność cieplna Radiatora prowadzi do konieczności zwiększenia jego objętości natomiast przyczynia się jednocześnie do zmniejszenia maksymalnej temperatury elementów półprzewodnikowych ze względu na lepsze odbieranie wytwarzanego w nich ciepła. Dobierając radiator do urządzenia elektrycznego trzeba mieć na uwadze wpływ rezystancji termicznej na wymiary radiatora i utrzymanie dopuszczalnej temperatury.

Tabela 8: Zestawienie estymaty objętości radiatora dla R_{th} z zakresu od $0.01 \frac{K}{W}$ do $0.8 \frac{K}{W}$.

R_{th}	CSPI	V_{th}
0.150	3	2.22
0.200	3	1.66
0.250	3	1.33
0.300	3	1.11
0.350	3	0.95
0.400	3	0.83
0.450	3	0.74
0.500	3	0.66
0.550	3	0.61
0.600	3	0.56
0.650	3	0.51
0.700	3	0.47
0.750	3	0.44
0.800	3	0.42

8 Podsumowanie

Dokonane obliczenia i symulacje pozwoliły na zaprojektowanie przekształtnika podwyższającego napięcie spełniającego warunki projektowe. Ostateczna wersja przekształtnika składa się z układu cztero-gałęziowego. Układ posiada 4 dławiki o indukcyjności 27.3 mH i zostały wykonane z kształtki ferromagnetycznej E42/33/20. Nawinięcie dławików zostało zaprojektowane z wykorzystaniem lic kwadratowej firmy DACKPOL. Zastosowanie licy redukuje występowanie efektu naskórkowego. Lica o kształcie kwadratowym pozwala na efektywniejsze wykorzystanie okna rdzenia. Zaprojektowane dławik zostały wykonane bez sprzężeń magnetyczny. Wprowadzeni sprzężenia magnetycznego spowodowało by konieczność zwiększeni wartości indukcji magnetycznej dławików lub spowodowało by nie spełnienia warunków projektowych o wartości tętnień prądu wejściowego. Wartość tętnień została dobrana w taki sposób żeby jej maksymalna wartości nie przekroczyła 8%. Pozwoliło to na znaczne zmniejszenie rozmiarów dławików. Elementy półprzewodnikowe zastosowane w ostatecznym projekcie zostały dobrane pod kątem optymalizacji strat przewodzenia i przełączania. Elementy wybrane do projektu to tranzy-

stor MOSFET model: C3M0120100J wykonany z węgla krzemu SIC i diod model: STTH810G. Zastosowanie wskazanych elementów półprzewodnikowych pozwoliło na minimalizację traconej energii. Chłodzenie układu zostało zaprojektowane z wykorzystaniem jednego radiatora montowanego na wszystkie elementy. Elementy półprzewodnikowe odizolowane będą od radiatora podkładkami mikowymi. Radiator wyposażony jest w wentylator wymuszający przepływ powietrza. Poprawia to możliwości odprowadzania ciepła z układu. Porównując estymowaną objętość radiatora jest on dobrany optymalnie pod względem utrzymania temperatury złącza elementów półprzewodnikowych na wartości maksymalnie 110 °C i wielkości półprzewodnikowych półprzewodnikowych jego objętością. Porównując estymowaną objętość radiatora jest on dobrany optymalnie pod względem utrzymania temperatury złącza elementów półprzewodnikowych na wartości maksymalnie 110 °C i wielkości półprzewodnikowych półprzewodnikowych jego objętością.