

III. Rzeczywiste elementy bierne obwodu mocy

Dławik (konstrukcja)

Należy zaprojektować dławik o parametrach ustalonych wcześniej (po uwzględnieniu spadków potencjału na elementach półprzewodnikowych):

- indukcyjności równej obliczonej w bloku *Dławik (obliczenia)*,
- prądzie maksymalnym dopuszczalnym nie mniejszym niż obliczony w bloku *Najgorsze warunki*.

Maksymalny dopuszczalny prąd dławika wynika z dwóch czynników (patrz wykład PiUSM): nasycenia rdzenia i mocy strat, której wpływ przejawia się z kolei poprzez możliwość przegrzania samego dławika oraz spadek sprawności urządzenia. Projekt dławika należy rozpocząć od uwzględnienia zjawiska nasycenia rdzenia. W drugiej kolejności należy wykonać obliczenia cieplne i ewentualnie zmodyfikować projekt, jeżeli okaże się, że temperatura dławika jest zbyt wysoka lub że moc strat w dławiku zbyt silnie obniży sprawność przetwornicy (patrz szczegółowe uwagi niżej).

Dla uproszczenia i ograniczenia liczby rozpatrywanych rozwiązań, dławik powinien być nawinięty na rdzeniu toroidalnym, bez szczeliny.

Projekt należy rozpocząć od doboru odpowiedniego materiału pod kątem (patrz wykład PiUSM):

- sugerowanego zastosowania (przekształtniki o znaczącej składowej stałej prądu – *DC power conversion*, *DC chokes* itp., lub uniwersalne materiały do układów mocy),
- kształtu pętli histerezy,
- częstotliwości pracy,
- dostępności szerokiej gamy rdzeni o różnych wymiarach (aby umożliwić optymalizację elementu),
- przenikalności magnetycznej (aby liczba zwojów do nawinięcia nie była zbyt duża),
- indukcji nasycenia (natężenia prądu w projektach można uznać za średnie, jednak z drugiej strony rdzeń nie będzie miał szczeliny),
- stratności (przy założonej częstotliwości przełączania).

Dalej proces projektowy powinien przebiegać następująco (patrz wykład PiUSM).

1. Obliczyć szczytową energię, jaką należy zgromadzić w dławiku.
2. Z charakterystyki magnesowania $B=f(H)$ ustalić maksymalną indukcję pola magnetycznego – jako taką, przy której przenikalność przyrostowa nie zaczyna jeszcze wyraźnie spadać.
3. Obliczyć minimalną objętość rdzenia z wybranego materiału, korzystając z przenikalności początkowej i uwzględniając jej ewentualny spadek dla danej częstotliwości przełączania.
4. Odczytać z katalogu (lub obliczyć) objętości dostępnych rdzeni i wybrać pierwszy, który spełnia warunek.
5. Na podstawie indukcyjności charakterystycznej rdzenia, obliczyć liczbę zwojów (jako liczbę całkowitą). Uwzględnić ewentualny spadek przenikalności dla częstotliwości przełączania.

6. Obliczyć natężenie pola magnetycznego dla obliczonej wartości szczytowej prądu.
7. Na podstawie charakterystyki przenikalności magnetycznej $\mu=f(H)$ stwierdzić, czy nie dojdzie do wyraźnego nasycenia rdzenia. Należy przyjąć rozsądny akceptowalny spadek przenikalności.

Jeżeli spadek przenikalności jest zbyt duży – należy sprawdzać kolejne rdzenie z listy do skutku. Jeżeli lista rdzeni skończy się lub wymiary rdzenia będą nieakceptowalnie duże – oznacza to, że trzeba wybrać inny materiał.
8. Jeżeli w pierwszej iteracji spadek jest akceptowalny, należy dokonać kolejnych iteracji (poczynając od obliczenia liczby zwojów), za każdym razem uwzględniając zmniejszenie przenikalności wyznaczone w iteracji poprzedniej (przejawi się ono w indukcyjności charakterystycznej rdzenia). Iteracje należy zakończyć, gdy różnica natężenia pola i indukcyjności charakterystycznej między kolejnymi iteracjami będzie mniejsza niż (co najwyżej) 10% – wówczas należy przejść do kolejnego punktu, lub gdy okaże się, że spadek przenikalności jednak nie jest akceptowalny – wówczas należy sprawdzić kolejny rdzeń z listy.
9. W oparciu o charakterystykę magnesowania zweryfikować, czy rzeczywiście przy obliczonym ostatecznie natężeniu pola rdzeń nie wchodzi wyraźnie w nasycenie. Zależnie od przyjętego akceptowalnego spadku przenikalności może się okazać, że założona wcześniej wartość maksymalna indukcji zostanie nieznacznie przekroczona – nie ma to obecnie znaczenia, gdyż jako podstawowe, nowe założenie przyjęliśmy określony spadek przenikalności magnetycznej, a nie trudną do określenia lokalizację punktu pracy na pętli histerezy, które to założenie musiało być przyjęte na początku, gdy brak było innych danych o rdzeniu.
10. Obliczyć składową stałą natężenia pola magnetycznego (tj. dla wartości średniej prądu) i z charakterystyki odczytać odpowiadający jej spadek przenikalności.
11. Obliczyć ostatecznie przewidywaną indukcyjność dławika w najgorszych warunkach obciążenia, tj. dla największej wartości średniej prądu (uwzględniając spadek przenikalności odczytany w poprzednim punkcie oraz ewentualnie ustalony wcześniej spadek przenikalności dla częstotliwości przełączania). W celu uzyskania wartości do porównania z wynikiem pomiaru miernikiem, obliczyć także indukcyjność dla zerowej składowej stałej prądu, tj. przy przenikalności równej 100% początkowej.
12. Z zależności uniwersalnej (napięciowej) obliczyć amplitudę indukcji pola magnetycznego.
13. Korzystając z danych z katalogu obliczyć moc czynną strat w wybranym rdzeniu przy wyznaczonej amplitudzie indukcji (zwrócić uwagę na różnicę między wartościami ΔB i od B_{ac}).
14. Oszacować rezystancję cieplną rdzenia korzystając z możliwie odpowiedniej aproksymacji (w zależności od dostępnych danych rdzenia).
15. Obliczyć przyrost temperatury rdzenia.

Sprawdzić, czy przy założonej wcześniej maksymalnej temperaturze otoczenia, temperatura rdzenia nie przekracza dopuszczalnej (przy braku danych przyjąć wartość typową 100 °C). Jeżeli tak – należy zmniejszyć moc strat w rdzeniu, a więc tętnienie indukcji; w tym celu można np. wybrać rdzeń o większej objętości, materiał o mniejszej przenikalności magnetycznej, lub zmniejszyć zakładane tętnienie prądu.
16. Obliczyć wymagany przekrój uzwojenia oraz odpowiadającą mu średnicę drutu, zakładając rozsądny akceptowalny przyrost temperatury oraz uwzględniając wymaganie

dotyczące udziału strat w rdzeniu i w uzwojeniu w całkowitej mocy strat w dławiku.

17. Rozważyć, czy przy rozpatrywanej częstotliwości, kształcie i tętnieniu prądu, nie należy uwzględnić zjawiska naskórkowości; jeżeli tak – powinno się to przejawiać poprzez odpowiednie zwiększenie mocy strat w uzwojeniu w dalszym ciągu obliczeń, lub poprzez użycie przewodu licowego o odpowiednio obliczonej liczbie i przekroju nitek.
18. Na podstawie wymiarów przekroju rdzenia, oszacować długość uzwojenia. Obliczyć jego rezystancję (w najgorszym przypadku – zależy od temperatury) i na tej podstawie moc czynną strat w uzwojeniu (uwzględniając w razie konieczności efekt naskórkowy).
19. Porównać przyrosty temperatury i moce strat w rdzeniu i w uzwojeniu. W przypadku, gdyby oba te parametry osiągały znacząco większe wartości dla rdzenia, należy zmniejszyć moc strat w rdzeniu (patrz wyżej).
20. Obliczyć sumaryczną moc strat w dławiku. Ocenic, czy jest ona akceptowalna pod względem zmniejszenia sprawności przetwornicy – założyć, że nie powinno być ono większe niż o 0,05.

Dławik należy samodzielnie nawinąć w laboratorium w obecności prowadzącego. Długość przewodu powinna być o ok. 20% większa od oszacowanej ze względu na rozrzut parametrów rdzenia i niedokładność innych obliczeń. Zmierzyć indukcyjność; powinna ona być równa założonej, z tym że miernik dokonuje pomiaru przy niewielkim prądzie, pomijalnym w porównaniu z prądem znamionowym, na który dławik został zaprojektowany – w związku z tym wynik pomiaru należy porównać z wartością obliczoną dla zerowej składowej stałej. W razie potrzeby dwinąć lub odwinąć odpowiednią liczbę zwojów. Aż do zbadania przetwornicy, należy pozostawić dłuższe końce przewodu, tak by w razie konieczności możliwa była korekta indukcyjności dla obciążenia znamionowego, jak również dla umożliwienia pomiaru przebiegu prądu.

Zmierzyć również rezystancję uzwojenia ostatecznie uzyskanego dławika (dla składowej stałej) i porównać z oszacowaną – nie powinna być ona znacząco większa, gdyż oznaczałoby to moc strat większą niż szacowana.

Kondensator (dobór)

Jako podstawowego zaleca się użyć kondensator elektrolitycznego aluminiowego. W przypadku prototypu jego napięcie znamionowe powinno być o min. 100% większe niż przewidywane, ze względu na brak stabilizacji napięcia wyjściowego, możliwość wykroczenia poza założone warunki pracy podczas uruchamiania i testowania, a także potrzebę wykonania pomiarów układu dla różnych wartości współczynnika wypełnienia.

Parametry kondensatora wyjściowego przetwornicy mają decydujący wpływ na jakość napięcia wyjściowego. Dlatego należy wybrać kondensator, dla którego dostępna jest oryginalna karta katalogowa. Karta ta powinna podawać przynajmniej prąd znamionowy oraz rezystancję szeregową lub tangens kąta strat dielektrycznych. Jednak im więcej parametrów i informacji o ich zmienności (w funkcji częstotliwości, temperatury itd.) – tym lepiej. Z jak największej liczby tych informacji należy skorzystać do potwierdzenia poprawności doboru elementu (pojemność, rezystancja, prąd dopuszczalny) oraz przewidzenia jego wpływu na działanie układu (np. obie składowe tętnienia napięcia).

Pojemność kondensatora podstawowego nie może być nigdy mniejsza niż ustalona w bloku *Kondensator (obliczenia)*. Z tego powodu pojemność nominalną należy wybrać (z typoszeregu dostępnego dla wybranej serii) uwzględniając tolerancję i spadek w wyniku starzenia (zgodnie z kartą katalogową) – najmniejsza możliwa wartość wynikająca z tolerancji, pomniejszona o

maksymalny spadek w czasie życia kondensatora, nie może być mniejsza od obliczonej. We wszelkich dalszych obliczeniach należy uwzględnić tę minimalną pojemność konkretnego dostępnego kondensatora.

Prąd znamionowy powinien on być większy od prądu występującego w projektowanym układzie w najgorszym (z punktu widzenia tego prądu) przypadku, który to prąd należy najpierw obliczyć (patrz wykład PiUSM). Ponieważ założenia projektowe nie zawierają pożądanego czasu życia urządzenia, można przyjąć, że nominalny czas życia kondensatora jest adekwatny do aplikacji; nie trzeba więc uwzględniać dodatkowego współczynnika dla prądu znamionowego związanego z tym zagadnieniem. Jeżeli prąd znamionowy jest zbyt mały, należy wybrać optymalną pod względem funkcjonalnym i kosztowym opcję rozwiązania tego problemu (patrz wykład PiUSM).

Z karty katalogowej należy odczytać lub obliczyć (na podstawie tangensa kąta strat) rezystancję szeregową kondensatora. Następnie obliczyć tętnienie napięcia wyjściowego wynikające z tej rezystancji; należy przy tym uwzględnić jej zwiększenie w wyniku starzenia (w stopniu podanym w karcie katalogowej). Stwierdzić, czy tętnienie całkowite (pojemnościowe plus rezystancyjne) nie przekracza podanej w założeniach projektu wartości maksymalnej. Jeżeli przekracza – należy dobrać inny kondensator lub zestaw kondensatorów tak, aby zmniejszyć jedną, drugą lub obie składowe tętnienia (patrz wykład PiUSM).

W celu minimalizacji zaburzeń wysokiej częstotliwości (w formie szpilek i oscylacji) w napięciu wyjściowym, kondensator elektrolityczny – posiadający znaczną rezystancję i indukcyjność pasożytniczą – należy w rzeczywistym układzie uzupełnić kondensatorem w technologii niskoimpedancyjnej (patrz wykład PiUSM). Na początek należy zastosować element o typowej pojemności. Po uruchomieniu układu można podjąć próbę eksperymentalnej optymalizacji tej wartości; jednakże w pełni możliwe byłoby to wyłącznie w przypadku montażu na optymalnie zaprojektowanej płytce drukowanej.

Przetwornica wymagać będzie również kondensatora wejściowego, który zmniejszy wpływ rezystancji wyjściowej źródła i indukcyjności doprowadzeń na przebieg napięcia wejściowego (które powinno być w miarę stałe) oraz zmniejszy oddziaływanie przetwornicy na źródło. Kondensator wejściowy również należy uzupełnić o kondensator niskoimpedancyjny o typowej wartości.

Obwód mocy (weryfikacja) [2]

Rezystancja szeregową dławika i kondensatora mogą mieć znaczący wpływ na sprawność urządzenia, a poprzez to – na zakres współczynnika wypełnienia i z kolei na składową stałą prądu dławika i moc strat w przyrządach półprzewodnikowych. W związku z tym po ustaleniu parametrów elementów rzeczywistych, należy je uwzględnić w projekcie. Można to zrobić na etapie symulacji – powtarzając blok *Obwód mocy (weryfikacja)*.

Schemat symulowanego układu należy uzupełnić o rezystancje szeregowo dławika i kondensatora wyjściowego. Kondensator wejściowy nie będzie oczywiście miał żadnego wpływu na wyniki symulacji ze względu na idealność źródła zasilania w symulatorze; można go wobec tego pominąć.

Nie należy oczywiście powtarzać symulacji mających na celu potwierdzenie założeń wynikających z teorii, a jedynie te, które weryfikują poprawną pracę układu i wartości kluczowych parametrów w najgorszych warunkach (szczególnie współczynnik wypełnienia oraz wynikające stąd np. $I_{L(av)}$). W szczególności na podstawie uzyskanych wyników:

- jeżeli kluczowe parametry (np. $I_{L(av)}$) wykazują odstępstwo od poprzednio uzyskanych (po uwzględnieniu jedynie spadków napięć na elementach półprzewodnikowych) większe niż 10% w górę – należy powtórzyć odpowiednie obliczenia (np. tranzystora, diody, dławika jako elementu rzeczywistego);

- jeżeli tętnienie prądu dławika odbiega o więcej niż 10% od założonego, należy eksperymentalnie (w drodze symulacji) ustalić indukcyjność dławika zapewniającą odpowiednią jego wartość i – w razie rozbieżności o więcej niż 10% – powtórzyć obliczenia dławika jako elementu rzeczywistego.

Wyznaczyć sprawność układu (z definicji) – potrzebne do tego będzie wyznaczenie za pomocą programu Probe mocy czynnej wejściowej i wyjściowej. W porządnej przetwornicy nie powinna ona być mniejsza niż ok. 0,8 dla nominalnego prądu wyjściowego (średnio 0,05 spadku na każdy z 4 elementów obwodu mocy). W przeciwnym razie należy element (elementy) o największej mocy strat dobrać lub zaprojektować tak, by warunek ten został spełniony.