

Przekształtniki elektroniczne

Moduł D – Wytyczne do projektu, wer. 1.4.0

opracował: Łukasz Starzak

Politechnika Łódzka, Katedra Mikroelektroniki i Technik Informatycznych

(nagłówki – patrz schemat blokowy)

I. Wprowadzenie

Założenia projektowe

- Przedmiotem projektu jest przetwornica o topologii podwyższającej, beztransformatorowej.
- Przetwornica docelowa będzie stabilizować napięcie na określonym poziomie U_o . Jednak regulacja współczynnika wypełnienia będzie na razie ręczna; układ automatycznej regulacji będzie mógł zostać zaprojektowany i zrealizowany na bloku USEP.
- Napięcie wejściowe U_i oraz obciążenie I_o mogą się zmieniać w podanych granicach.
- Częstotliwość przełączania przetwornicy powinna być równa podanej ($\pm 10\%$).
- Przetwornica powinna pracować w trybie ciągłego przewodzenia prądu (CCM), zaś współczynnik tętnienia prądu dławika powinien osiągać wartość optymalną w najgorszych warunkach obciążenia.
- Tętnienie napięcia wyjściowego $\Delta u_o/U_o$ nie powinno przekraczać podanej wartości.
- Zasilanie układu sterowania należy zrealizować z wejścia mocy (U_i) poprzez liniowy stabilizator napięcia.
- Częścią projektu jest projekt dławika, który należy również samodzielnie wykonać.

Uwagi perspektywiczne

- Forma skonstruowanego układu może podnieść ocenę, ale nie może jej obniżyć. Może to być płytka wytrawiona, płytka uniwersalna lutowana, wtykana. Należy wziąć pod uwagę, że prototyp może wymagać zmian, co okaże się dopiero na etapie testów. Układ z UEP nie jest też ostateczny; jego ewentualna finalizacja (na bloku USEP) będzie wymagać wymiany obwodu sterowania – zamiany generatora na modulator.
- Obliczenia zaleca się prowadzić w arkuszu kalkulacyjnym lub pakiecie obliczeniowym ze względu na liczne sprzężenia między blokami projektu, z których może wielokrotnie wynikać konieczność ponownego przeliczenia większości poprzednich wyników. Naprawdę tak postępują inżynierowie.
- Zajęcia projektowe polegają głównie na konsultacji wyników uzyskanych *poza* godzinami zajęć. Nie da się zaprojektować, zbudować i uruchomić przetwornicy w ciągu 14 godzin. Program przedmiotu przewiduje na to dużą ilość pracy własnej. Być może nie wszystkim muszą się zajmować 2 osoby jednocześnie? Na prowadzenie prac konstrukcyjnych i pomiarowych można się umówić z prowadzącym lub kierownikiem laboratorium również poza godzinami zajęć (w granicach ich wolnego czasu).
- Układ dobrze jest konstruować i testować stopniowo, a nie całość na sam koniec. Takie podejście zwiększy prawdopodobieństwo bezproblemowego uruchomienia. Nie należy

czekać na realizację całego niezbędnego materiału na wykładach; jeżeli nie wiadomo jeszcze, jak zaprojektować określoną część układu, to należy się zająć konstrukcją i uruchomieniem części poprzedniej.

- Zasadniczo konstrukcja powinna się zakończyć do ostatnich zajęć. Uruchomienie może się przedłużyć do końca sesji (jeżeli projekt odbywa się w pierwszej połowie semestru – do końca semestru); laboratorium będzie w tym czasie dostępne.

Proponowany rozkład prac

Tydzień	Wyniki uzyskane do kolejnego tygodnia
1	Warunki pracy i elementy obwodu mocy
2	Obwód mocy (weryfikacja); Układ sterowania – bez konstrukcji
3	Dławik (konstrukcja) – obliczenia, zakup rdzenia
4	Układ sterowania (konstrukcja) – łącznie z uruchomieniem i przetestowaniem
5	Dławik (konstrukcja) – wykonanie, pomiar; Kondensator (dobór); Obwód mocy (weryfikacja); Zakup brakujących elementów
6	Konstrukcja obwodu mocy; Złożenie całego układu
7	Rezerwa
...	Pomiary

Literatura

- działanie przetwornicy: wykład z przedmiotu *Przekształtniki elektroniczne*; instrukcja do ćwiczenia C51 (wersja z 2011 r. odwołuje się do instrukcji PiUM 3B z 2009 r.)
- działanie dławików mocy i kondensatorów: wykład z przedmiotu *Podzespoły i układy scalone mocy*; instrukcje do ćwiczeń B5 i B6
- dobór i obliczenia elementów obwodu mocy: wykład z przedmiotu *Podzespoły i układy scalone mocy*
- projektowanie obwodu bramki tranzystora: wykład z przedmiotu *Podzespoły i układy scalone mocy*; instrukcja do ćwiczenia B1
- generator przebiegu prostokątnego (jedna z możliwości): instrukcja PiUM 7A

II. Warunki pracy i elementy obwodu mocy

Zasilanie + obciążenie + sterowanie

Parametry projektu (indywidualne):

- nominalne napięcie wejściowe $U_{i(nom)}$
- obliczyć granice zakresu napięcia wejściowego $\{U_{i(min)}; U_{i(max)}\} = \{U_{i(nom)} - \Delta U_i; U_{i(nom)} + \Delta U_i\}$
- obciążenie nominalne $I_{o(nom)}$
- obliczyć granice zakresu obciążenia $\{I_{o(min)}; I_{o(max)}\} = I_{o(nom)} \cdot \{100\% - \Delta I_o; 100\%\}$
- napięcie wyjściowe U_o (stałe w układzie docelowym)
- obliczyć zastępczą rezystancję obciążenia w warunkach znamionowych $R_{o(nom)} = U_o / I_{o(nom)}$
- obliczyć nominalną moc czynną wyjściową $P_{o(nom)}$
- częstotliwość przełączania f_s
- tętnienie napięcia na wyjściu $\Delta u_o / U_o$ (Δu_o – wartość międzyszczytowa)

Zakres sterowania

Obliczyć zakres współczynnika wypełnienia $D \{D_{min}; D_{max}\}$ wynikający z wartości U_i i U_o . Należy skorzystać ze wzoru łączącego współczynnik wypełnienia z napięciem wejściowym i wyjściowym, uwzględniającego spadki napięć na elementach półprzewodnikowych (patrz wykład z PiUSM). Jak wynika ze schematu blokowego, wymagana będzie co najmniej jedna kolejna iteracja z blokami *Najgorsze warunki* i *Tranzystor + dioda*. Obliczyć również współczynnik wypełnienia w warunkach nominalnych, czyli $U_{i(nom)}$, $I_{o(nom)}$.

W pierwszym przebiegu (przed doбором przyrządów) można założyć, że spadki napięć są zerowe lub przyjąć spadki typowe, np. 0,7 V na diodzie i 1 V na tranzystorze. W dalszych przebiegach ze wzoru należy skorzystać tak, by uzyskać najmniejszą możliwą wartość D_{min} i największą możliwą wartość D_{max} ; oznacza to przemyślane przyjęcie odpowiednio zerowych lub maksymalnych możliwych spadków napięć na elementach (uwzględniając rozrzut parametrów).

Najgorsze warunki

Ustalić, dla których skrajnych U_i i I_o (min/max) występują najgorsze warunki obciążenia przekształtnika (I_{pk}) dla danej topologii (patrz wykład z PiUSM). Z obliczonych granic D_{min} i D_{max} wybrać wartość dla najgorszego przypadku D_{wc} (worst-case).

Obliczyć charakterystyczne wartości prądu dławika: $I_{L(av)}$ (I_{dc}), Δi_L (I_{ac}) i $I_{L(pk)}$ (I_{pk}) w najgorszych warunkach przyjmując optymalny współczynnik tętnienia (patrz wykład z PiUSM).

Dławik (obliczenia)

Z równania dławika dla któregoś z taktów pracy (oba powinny dać ten sam wynik, dzięki czemu można sprawdzić poprawność obliczeń), obliczyć L wymagane do uzyskania tętnienia Δi_L i w konsekwencji optymalnego współczynnika tętnienia r_{opt} w najgorszych warunkach obciążenia.

Zgodnie z założeniem, należy również zapewnić pracę przetwornicy w trybie CCM (tj. z $r \leq 2$) dla całego zakresu U_i i I_o , przy czym zakres U_i przekłada się bezpośrednio na zakres D . Aby to sprawdzić, należy:

- z wykresu dla rozważanej topologii (patrz wykład PiUSM) odczytać wartość D_{crit} , przy której tętnienie prądu jest maksymalne (jeżeli przy tej wartości przetwornica pracuje w trybie CCM, to będzie pracować również przy każdej innej);
- jeżeli wartość D_{crit} nie mieści się w przedziale $[D_{min}; D_{max}]$, to należy zamiast niej przyjąć najbliższe D z tego przedziału;
- z równania przetwornicy (tego samego, z którego została obliczona wartość D użyta następnie do wyliczenia indukcyjności L) obliczyć U_i , które odpowiada D_{crit} ;
- z równania dławika obliczyć ΔI_L ;
- obliczyć r_{max} – wartość dla D_{crit} i najgorszego (z punktu widzenia r) przypadku I_o .

Jeżeli r_{max} przekracza wartość krytyczną (ze względu na tryb CCM) $r_{crit} = 2$, należy zmienić wartość L tak, by jej nie przekraczała:

- z równania dławika dla D_{crit} i $I_{o(min)}$ obliczyć L takie, by $r_{max} < 2$ z zapasem np. 10%;
- z równania dławika obliczyć ΔI_L w najgorszych warunkach obciążenia (jak w bloku *Najgorsze warunki*);
- obliczyć r i ponownie $I_{L(pk)}$ w najgorszych warunkach.

W tym bloku obliczamy wyłącznie indukcyjność. Pozostałe parametry fizycznego dławika zostaną ustalone w bloku *Dławik (dobór)*.

Tranzystor + dioda

Oba elementy należy dobrać na:

- odpowiednie napięcie (stan blokowania) – maksymalne napięcie na przyrządzie wynika z topologii i wartości U_i i U_o (patrz wykład PE). Należy jednak uwzględnić możliwość awarii układu (np. zwarcia), w wyniku której na dowolnym przyrządzie wystąpić może maksymalne napięcie występujące w układzie – w tej topologii jest to U_o . Względem tej wartości konieczne jest dodatkowo zapewnienie odpowiedniego zapasu (patrz wykład PiUSM lub PiUM ćw. 6);
- odpowiedni prąd (stan przewodzenia) – również wynika z topologii (patrz wykład PE lub PiUSM). Należy przewidzieć przynajmniej minimalny zapas (10%) związany z rozrzutem parametrów pracy;
- odpowiednią szybkość przełączania – za bardzo dobry nominalny czas przełączania (t_r , t_f) tranzystorów o rozważanej mocy przetwarzanej i częstotliwości przełączania można uznać 50 ns, diod (t_{rr} , t_{fr}) – 25 ns; z kolei wartości 200 ns dla tranzystora i 100 ns dla diody należałoby już uznać za kiepskie. W przypadku tranzystorów warto zwrócić uwagę na rezystancję bramkową R_G , dla której podane zostały nominalne czasy przełączania – przy bardzo małej (np. 5 Ω) należy się spodziewać dłuższych czasów w rzeczywistym układzie, natomiast przy realnej (np. 50 Ω) z podanych wartości można korzystać bez zastrzeżeń (patrz również dalej nt. szacowania mocy strat);
- decyduje kryterium niskiej mocy strat (wysokiej sprawności urządzenia) i mniej złożonego układu chłodzenia (wymiarów i kosztu urządzenia). Zazwyczaj lepiej dobrać przyrząd

ściślej według kryterium prądowego (gdyż przyrządy są optymalizowane pod kątem mocy strat przy prądzie znamionowym), a zawyżyć napięcie znamionowe (nawet znacząco, ale bez przesady – na pewno nie o rząd wielkości), niż odwrotnie.

Pamiętać o względności prądu maksymalnego (zależność od chłodzenia):

- w pierwszym przybliżeniu należy poszukiwać przyrządu dobierając prąd znamionowy na prąd tego przyrządu w projektowanym układzie w najgorszych warunkach;
- podstawowy prąd znamionowy diody jest prądem średnim. Prąd ten jest prądem dławika z wypełnieniem $1-D$, z czego wynika, że ostatecznie w tej topologii średni prąd diody nie zależy od D , co eliminuje rozważanie najgorszego przypadku (patrz wykład PE, PiUSM);
- podstawowy prąd znamionowy tranzystora MOSFET jest prądem skutecznym. Prąd ten jest prądem dławika z wypełnieniem D , natomiast wartość skuteczną prądu dławika można obliczyć znając jego wartość średnią i tętnienie (patrz wykład PiUSM);
- wzory na wartość średnią i skuteczną przebiegu o współczynniku wypełnienia D zostały podane na wykładzie z PiUSM (patrz też PiUM instrukcja 7A);
- w kontekście strat dynamicznych, tranzystor załącza się przy prądzie $I_{L(av)} - \Delta i_L$, zaś wyłącza przy prądzie $I_{L(av)} + \Delta i_L$ (patrz wykład z PE lub PiUSM). Daje to z dobrym przybliżeniem taki efekt, jakby oba przełączenia zachodziły przy $I_{L(av)}$;
- w drugim przybliżeniu wystarczy dokonać uproszczonych obliczeń przyjmując $T_c = \text{const}$ (patrz wykład PiUSM);
- ostatecznie będzie trzeba dokonać obliczeń przy założeniu $T_a = \text{const}$. Wymaga to wiedzy o układzie chłodzenia – patrz blok *Chłodzenie*; niekiedy wynik może doprowadzić do wniosku, że konieczny jest wybór innego przyrządu.

Będzie potrzebne oszacowanie mocy czynnej strat (całkowitej – tj. statycznych + dynamicznych, patrz wykład), oczywiście w najgorszych warunkach (z punktu widzenia danego przyrządu):

- w tranzystorze – uwzględnić charakter obciążenia odpowiadający rozważanemu układowi, a czasy przełączania przyjąć na podstawie nominalnych z karty katalogowej (patrz wykład PiUSM oraz uwaga wyżej nt. rezystancji bramkowej w odniesieniu do nominalnych czasów przełączania);
- w diodzie – patrz wskazówka wyżej. Parametrów $U_{F(TO)}$ i r_f nie trzeba znać – można odczytać U_f z charakterystyki dla znanego I_{av} . Wartość U_{off} potrzebna do strat dynamicznych wynika z topologii (w funkcji U_i i U_o – są jakieś najgorsze warunki);
- należy uwzględnić zależność spadku napięcia na przyrządzie w stanie przewodzenia od temperatury (patrz wykład PiUSM, instrukcja A21 oraz PiUM ćw. 6) – przyrząd powinien pracować bezpiecznie w każdych warunkach, a więc również przy maksymalnej możliwej mocy wydzielanej.

Jak wynika z powyższego, niniejszy blok należy rozpatrywać łącznie z blokiem *Chłodzenie*.

Chłodzenie

Osiągnięcie warunków pracy $T_c = 100\text{ °C}$ (patrz blok *Tranzystor + dioda*) będzie najprawdopodobniej niemożliwe bez zewnętrznego radiatora, szczególnie w przypadku tranzystora (chyba że wybrano go z bardzo dużym zapasem prądowym, co jednak może być z kolei nieekonomiczne). Należy to sprawdzić, weryfikując zachowanie warunków bezpiecznej pracy przy założeniu $T_a = \text{const}$ przyjmując, że docelowe urządzenie byłoby zamknięte w kiesko

wentylowanej obudowie (patrz wykład PiUSM). Jeżeli nie są one zachowane bez radiatora, należy obliczyć jego wymaganą rezystancję cieplną $R_{\theta(s-a)}$. Następnie należy wybrać konkretny radiator o odpowiedniej rezystancji cieplnej; jeżeli jest to niemożliwe lub wybrany radiator jest nieakceptowalny ze względów ekonomicznych lub gabarytowych, należy wrócić do bloku *Tranzystor + dioda* i dobrać tranzystor o mniejszej faktycznej mocy strat lub większej dopuszczalnej mocy strat.

W przypadku diod w obudowie osiowej należy z kolei zwrócić uwagę na warunki chłodzenia, dla których obowiązują parametry katalogowe (patrz wykład PiUSM). Niekoniecznie mogą być one zachowane na płytce uniwersalnej (np. powierzchnia pól lutowniczych). Oprócz zaprojektowania i wykonania płytki drukowanej dla prototypu, rozwiązaniem może być maksymalne skrócenie wyprowadzeń i umieszczenie diody na płytce uniwersalnej w miejscu umożliwiającym dolutowanie blaszki miedzianej przynajmniej przy jednym z wyprowadzeń; jeżeli jednak podczas uruchamiania dioda taka ulegnie przegrzaniu, konieczny będzie powrót do bloku *Tranzystor + dioda* i dobranie innej, w obudowie umożliwiającej przytwierdzenie radiatora.

Zakres sterowania [2]

Po wyborze tranzystora i diody, należy wrócić do bloku *Zakres sterowania*, dokonać obliczeń z uwzględnieniem spadków napięć na tych przyrządach, a następnie przeliczyć wszystkie kolejne wyniki. Iteracje należy powtarzać do czasu, gdy w kolejnych iteracjach różnica w wartościach kluczowych parametrów pracy układu (np. $I_{L(av)}$, $P_{T(tot)}$, $P_{D(tot)}$) będzie mniejsza niż 10%.

Kondensator (obliczenia)

W tym bloku obliczamy wyłącznie wartość pojemności. Kondensator jako element rzeczywisty zostanie rozważony w bloku *Kondensator (dobór)*.

Ze wzoru na tętnienie napięcia wyjściowego Δu_o dla danej topologii (patrz wykład z PE, podręcznik lub internet), wyliczyć pojemność kondensatora wyjściowego C tak, aby w najgorszym (z punktu widzenia tętnienia) przypadku D tętnienie (wartość międzyszczytowa) nie przekroczyło założonego.

Należy uwzględnić, że tętnienie posiada dwa składniki: wynikający z pojemności C i wynikający z rezystancji szeregowej R_s . Na tym etapie wartość R_s nie jest znana, gdyż nie znamy nawet pojemności, a co dopiero konkretnego kondensatora. Dlatego można założyć, że pojemność i rezystancja mają po 50% wkładu w tętnienie napięcia, tj. jeżeli ze wzoru na Δu_o wynika określone tętnienie, to rzeczywiste będzie 2 razy większe. Zostanie to zweryfikowane po wykonaniu bloku *Kondensator (dobór)*.

Wartości kondensatora nie trzeba obecnie wyrównywać do typoszeregu. Gama dostępnych elementów silnie zależy od napięcia znamionowego, zaś tego rodzaju parametry zostaną uwzględnione w bloku *Kondensator (dobór)*.

Obwód mocy (weryfikacja)

Należy sprawdzić w drodze symulacji, w różnych warunkach (U_i , I_o):

- czy układ pracuje w trybie CCM,
- oraz czy wartość r (w najgorszych warunkach) jest w przybliżeniu zgodna z założeniem;
- czy zakres wartości $\{D_{min}; D_{max}\}$ jest zgodny z szacunkami (po uwzględnieniu mocy strat w elementach),

- oraz czy średni i szczytowy prąd dławika $I_{L(av)}$ i $I_{L(pk)}$ w najgorszych warunkach są zgodne z szacunkami;
- czy tętnienie $\Delta u_o/U_o$ w najgorszym przypadku nie wykracza poza założenia projektowe.

W symulacji należy zapewnić spełnienie założeń dotyczących warunków pracy układu, a przyjętych podczas obliczeń:

- obciążenie I_o odzwierciedlić przez odpowiednio obliczoną zastępczą rezystancję obciążenia R_L ;
- wartość D w każdych warunkach dostosować (bez przesadnej dokładności – 0,005 będzie wystarczającą) doświadczalnie tak, aby zawsze uzyskiwać napięcie wyjściowe U_o .

Przy okazji potwierdzić, że faktycznie spełnione są założenia przyjęte na podstawie analizy teoretycznej topologii podwyższającej:

- największe obciążenie dławika występuje dla $D = D_{wc}$,
- największe tętnienie prądu dławika występuje dla $D = D_{crit}$,
- składowa $I_{L(dc)}$ zależy od I_o , zaś $I_{L(ac)}$ – nie zależy,
- średni prąd diody $I_{D(av)}$ w tej topologii nie zależy od D , a tylko od I_o , i wynosi w przybliżeniu $(1-D)I_{L(av)}$,
- średni prąd tranzystora $I_{T(av)}$ w tej topologii zależy od D i I_o i wynosi w przybliżeniu $DI_{L(av)}$.

Należy użyć wiarygodnych (tj. poprawnie oddających spadki napięć) modeli przyrządów półprzewodnikowych w najgorszych warunkach temperaturowych. Jeżeli z tego względu nie jest możliwe użycie modeli dostarczonych z symulatorem, należy użyć modeli idealizowanych kluczy, nadając ich parametrom wartości z kart katalogowych dobranych przyrządów półprzewodnikowych.

Jeżeli symulacje wykażą znaczące (większe niż 10%) odstępstwa od wyników obliczeń w kierunku większego obciążenia układu (np. prąd dławika) lub gorszej jego pracy (np. większe tętnienie napięcia wyjściowego), należy znaleźć źródło rozbieżności. Jeżeli nie jest nim błąd w obliczeniach lub w schemacie symulowanego obwodu, należy zmodyfikować projekt zgodnie z wynikami symulacji – np. przyjąć w obliczeniach szerszy zakres D , zwiększyć pojemność kondensatora C i oczywiście powtórzyć wszystkie kolejne obliczenia.

Sposób generacji sygnału sterującego tranzystorem nie ma wpływu na działanie obwodu mocy. Dlatego do tego celu wystarczy idealne źródło napięcia o przebiegu impulsowym (prostokątnym).

III. Układ sterowania

Generator impulsów (dobór + obliczenia)

Można wykorzystać układ 555 z nastawą D potencjometrem (patrz ćwiczenie B1k, PiUM ćwiczenie 7) lub dowolny inny układ. Współczynnik D należy ograniczyć do wyznaczonego zakresu $[D_{\min}; D_{\max}]$, szczególnie od góry. Jednak ze względu na możliwość niedoszacowania lub przeszacowania np. mocy strat, istnieje prawdopodobieństwo, że współczynnik ten będzie musiał być zmieniany w szerszych granicach niż to wynika z dotychczasowych obliczeń i symulacji. Dlatego w tym bloku wartość $D_{\min}$ należy zmniejszyć, a $D_{\max}$ zwiększyć o 0,1...0,2.

Prąd pobierany przez zewnętrzny obwód RC układu 555 należy ograniczyć do sensownej wartości, która nie spowoduje znaczącego poboru mocy na sterowanie (rzędu 1 mA).

Obwód bramki

Należy dobrać amplitudę napięcia sterującego $U_{GG(on)}$ odpowiednią dla uzyskania maksymalnego prądu tranzystora występującego w projektowanym układzie (w najgorszych warunkach) oraz rezystancję bramkową R_G odpowiednią do uzyskania założonych wcześniej czasów przełączania (patrz ćwiczenie B1p). Jeżeli nie da się osiągnąć takich czasów z realnymi wartościami $U_{GG(on)}$ i R_G (czyli z przedziału 10...100 Ω), to należy przyjąć inne czasy i przeliczyć straty dynamiczne.

Obliczyć prąd I_G pobierany ze źródła na odcinku t_r i t_f [$I_G(t_r)$, $I_G(t_f)$] oraz średni $I_{G(av)}$.

Sterownik bramki

Należy dobrać do napięcia $U_{GG(on)}$ i prądów $I_G(t_r)$ i $I_G(t_f)$ (patrz ćwiczenie B1p).

Stabilizator napięcia

Można wykorzystać stabilizator typu 7800 (x78xyy). Zwrócić uwagę na zakres napięcia wejściowego i spadek napięcia między wejściem a wyjściem. Układ może, ale nie musi wymagać użycia radiatora – należy to sprawdzić (w razie potrzeby obliczeniowo). Prąd znamionowy dobrać odpowiednio do zapotrzebowania (bramka – obliczona wartość $I_{G(av)}$, sterownik bramki – karta katalogowa, generator impulsów – PiUM ćwiczenie 7), ze sporym zapasem (50...100%).

Zwrócić uwagę, że napięcie zasilania będzie to samo dla wszystkich elementów obwodu sterowania, tj. generatora impulsów, sterownika bramki i bramki tranzystora (a w przypadku ewentualnego projektu na bloku USEP – również dla pętli sprzężenia zwrotnego). Uzgodnienie wymagań tych 3 elementów może spowodować konieczność modyfikacji wcześniejszych założeń, a nawet wymiany niektórych elementów.

Obwód sterowania (weryfikacja)

W drodze symulacji sprawdzić działanie:

- stabilizatora (poprawne U_o dla założonego przedziału U_i i poboru prądu),
- generatora (poprawne f_s , $D_{\min}$, $D_{\max}$, pobór prądu).

W przypadku korzystania z układu 555, należy użyć modelu wskazanego na PiUM, ćwiczenie 7.

Obwód sterowania (konstrukcja)

W docelowym układzie generator zostanie zastąpiony przez *modulator* szerokości impulsów (zupełnie inny układ). Należy przewidzieć możliwość dokonania tej zamiany.

Sterownik bramki *musi* się znajdować zaraz przy bramce tranzystora.

Pamiętać o kondensatorach odprężających jak najbliżej nóżek zasilania *każdego* układu scalonego i nóżek stabilizatora. Pamiętać o *jednym* punkcie wspólnym obwodów sterowania i mocy.

IV. Rzeczywiste elementy bierne obwodu mocy

Dławik (konstrukcja)

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

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

Prąd maksymalny 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 przeprowadzić uwzględniając wyłącznie zjawisko nasycenia rdzenia. Dopiero na koniec należy wykonać obliczenia cieplne, a projekt zmodyfikować tylko, gdyby okazało się, że temperatura rdzenia będzie zbyt wysoka lub moc strat znacząco 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,
- 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.

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

1. Obliczyć szczytową energię, jaką należy zgromadzić w dławiku.
2. Ustalić maksymalną indukcję z charakterystyki magnesowania $B=f(H)$ – jako taką, przy której przenikalność przyrostowa nie zaczyna jeszcze spadać radykalnie.
3. Obliczyć minimalną objętość rdzenia z wybranego materiału, uwzględniając ewentualny spadek przenikalności 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. Na charakterystyce magnesowania sprawdzić, 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 przekroczona – nie ma to obecnie znaczenia, gdyż jako podstawowe, nowe założenie przyjęliśmy określony spadek przenikalności magnetycznej, a nie trudne do określenia miejsce 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). 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 czy w katalogu moc uzależniona jest od ΔB czy od B_{ac}).
14. Jak najdokładniej (w zależności od dostępnych danych rdzenia) oszacować rezystancję cieplną 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.
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. Ocenić, 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 należy obliczyć przewidywaną indukcyjność dla zerowej składowej stałej i wynik pomiaru porównać z tą wartością. 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 i porównać z oszacowaną – nie powinna być ona znacząco większa, gdyż oznaczałoby to moc strat większą niż szacowana dotychczas.

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 unikać elementów „no-name”, a wybrać kondensator, do którego karty katalogowej można dotrzeć. 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 płycie 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 szeregową 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 (patrz PiUM ćwiczenie 6). W porządknej 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.