



PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

Ćwiczenie C52

Przetwornica obniżająca napięcie

Składowe prądu dławika

Podejścia do sterowania

Ramowy plan pracy

15'	30'	45'	1 ^h	1 ^h 15'	1 ^h 30'	po zajęciach

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2011

wer. 1.2.0. 11.5.2011

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
C Doświadczenie.....	7
2. Pomiary	7
2.1. Przygotowanie układu.....	7
Układ pomiarowy.....	7
Konfiguracja układu	7
2.2. Wykonanie pomiarów.....	9
Wpływ parametrów pracy na składowe prądu dławika.....	9
Charakterystyka sterowania przy stałym wejściu	9
Charakterystyka sterowania przy stałym wyjściu.....	10
D Wyniki.....	11
3. Opracowanie i analiza wyników.....	11
3.1. Dane liczbowe.....	11
Składowe prądu dławika.....	11
Charakterystyki sterowania.....	11
3.2. Analiza wyników	12
Wpływ parametrów pracy na parametry prądu dławika.....	12
Charakterystyki sterowania przy stałym wejściu	12
Charakterystyki sterowania przy stałym wyjściu.....	13
E Informacje	15
4. Literatura.....	15

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie charakterystyk przetwornicy dławikowej obniżającej napięcie z uwzględnieniem dwóch strategii sterowania: ze stałym napięciem wejściowym (charakterystyczne np. dla sterowania prędkością obrotową silników prądu stałego) oraz ze stałym napięciem wyjściowym (charakterystyczne np. dla zasilaczy). Zbadany również zostanie wpływ parametrów pracy (prądu wyjściowego), układu (indukcyjności) i sterowania (częstotliwość i współczynnik wypełnienia) na wartości składowych prądu dławika.

Wiadomości niezbędne do wykonania ćwiczenia zostały podane na wykładzie.

2. Pomiary

2.1. Przygotowanie układu

Układ pomiarowy

Niebieskie gniazdo na panelu układu umożliwia włączenie w obwód dowolnego dławika, natomiast gniazda bananowe na wyjściu – przyłączenie dowolnego odbiornika. Dostępne są 2 dławiki o indukcyjności nominalnej $100\ \mu\text{H}$ każdy, które w razie potrzeby można połączyć szeregowo lub równolegle.

Tranzystor w układzie jest sterowany przebiegiem prostokątnym z zewnętrznego generatora. Napięcie z generatora jest optycznie izolowane od reszty układu, dzięki czemu fakt uziemienia masy generatora nie ogranicza możliwości przyłączenia masy sond oscyloskopowych. Przebieg sterujący jest podawany na bramkę tranzystora po wciśnięciu zielonego (załączenie na czas przytrzymania) lub czerwonego (załączenie na stałe) przycisku na panelu układu. Działanie obwodu sterowania sygnalizowane jest przez żółtą kontrolkę.

Pomiaru prądu dławika dokonuje się poprzez napięcie sondy prądowej na fragmencie przewodu wprowadzonym nad panel obok niebieskiego złącza.

Konfiguracja układu

Aby nie tracić czasu, równolegle z pkt. 1 należy wykonywać kolejne punkty.

1. Włączyć komputer. Po zakończeniu logowania, włączyć oscyloskop i skonfigurować połączenie z komputerem postępując ściśle według instrukcji dostępnej na stanowisku.
2. Do zasilenia obwodu mocy (wejście mocy przetwornicy) wykorzystać zasilacz o wydajności 20 A. Wszystkie pokrętki zasilacza skrócić do zera.
3. Do zasilenia obwodu sterowania (wejście U_{GG}) wykorzystać osobny zasilacz. Pokrętko Cal skrócić do zera. Przyciskami ustawić sumaryczne napięcie 15 V. Pokrętkami Limit Current ustawić ograniczenie prądowe na 100 mA.

4. Skonfigurować oscyloskop:
 - na obu kanałach (*CHx Menu*) włączyć sprzężenie ze składową stałą (*Coupling: DC*), wyłączyć odwracanie (*Invert: Off*);
 - uwzględnić tłumienie sondy napięciowej 10:1 na kanale 1 (*Probe, Voltage*) i przelicznik 10 A/V na kanale 2 (*Probe, Current*);
 - ustawić wyzwalanie (*Trig Menu*) zboczem (*Type: Edge*) narastającym (*Slope: Rising*) ze składową stałą (*Coupling: DC*) w trybie automatycznym (*Mode: Auto*), źródło wyzwalania ustawić na kanał 1;
 - poziom wyzwalania (*Level*) ustawić na ok. 0 V.
5. Włączyć generator funkcyjny. Na generatorze wybrać przebieg prostokątny (przycisk *Func*). Ustawić częstotliwość (*Freq*) 20 kHz, współczynnik wypełnienia (*Duty*) 0,5 (50%), poziom niski amplitudę (*Ampl*) 10 V (*Vpp*).
6. Podstawę czasu oscyloskopu dostosować tak, by móc obserwować (w przyszłości) 2–5 okresów przebiegu o częstotliwości podanej w pkt. 5. Przyłączyć wyjście *Main Output* (nie inne) generatora do gniazda BNC na panelu układu laboratoryjnego.
7. W niebieskie złącze układu włączyć jeden z pary dostępnych dławików. Do wyjścia przetwornicy, w gniazda oznaczone symbolem opornika, podłączyć opornik regulowany 3,5 Ω , 14 A w sposób umożliwiający zmianę rezystancji (patrz schemat połączeń na korpusie opornika). Ślizgacz opornika ustawić mniej więcej w połowie. Równolegle do opornika włączyć multimetr ustawiony w tryb woltomierza wartości stałej, zaś szeregowo – multimetr Metex M-3860M ustawiony w tryb amperomierza (nie miliamperomierza) wartości stałej; zwrócić uwagę na użycie odpowiednich gniazd multimetrów.
8. Do kanału 1 oscyloskopu przez sondę napięciową z tłumieniem 10:1 przyłączyć napięcie na dławiku (przeciwnie do faktycznego zwrotu prądu dławika). Włączyć wyświetlanie przebiegów z obu kanałów (*CH1/2 Menu*).
9. Włączyć i skonfigurować sondę prądową zgodnie z instrukcją dostępną na stanowisku. W odpowiednim momencie wyjście wzmacniacza sondy przyłączyć do kanału 2 oscyloskopu. Ustawić na wzmacniaczu sprzężenie DC oraz wzmocnienie 10 A/V. Sondę prądową zapiąć na wyprowadzonym fragmencie przewodu wiodącego prąd dławika tak, aby strzałka na korpusie sondy była zgodna z faktycznym kierunkiem przepływu prądu.

Przed wykonaniem kolejnych punktów poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący.

10. Włączyć zasilacz obwodu sterowania. Powinna zapalić się zielona dioda, zaś wskazanie amperomierza (w procentach ustawionego ograniczenia prądowego) nie powinno przekraczać kilkudziesięciu miliamperów. W przeciwnym razie należy wyłączyć zasilacz i poprosić o pomoc prowadzącego. Na panelu układu żółta kontrolka powinna być zgaszona; w przeciwnym razie wcisnąć czerwony przycisk. Jeżeli kontrolka jest zgaszona upewnić się, że wciśnięcie czerwonego przycisku powoduje jej zapalenie i zgaszenie.
11. Włączyć zasilacz obwodu mocy. Próg ograniczenia prądowego ustawić na maksimum. Powoli ustawić napięcie 10 V obserwując, czy amperomierz zasilacza nie wykazuje przepływu stałego prądu – w przeciwnym razie wyłączyć zasilacz i poprosić o pomoc prowadzącego.
12. Włączyć sterowanie przetwornicy czerwonym przyciskiem. Na oscyloskopie dostosować wzmocnienia kanałów i położenie poziomów zera do obserwowanych przebiegów tak, aby prąd był widoczny od swojego poziomu zera, wskazywanego przez strzałkę na lewo od podziałki, do wartości maksymalnej, zaś napięcie było widoczne od swojej wartości minimalnej do swojej wartości maksymalnej. Ponieważ kształt obu przebiegów jest znany i łatwo odróżnialny, więc przebiegi mogą się na siebie nakładać.
13. Na oscyloskopie włączyć funkcję pomiaru (*Measure*) wartości średniej (*Mean*) i amplitudy międzyszczytowej (*Pk-pk*) przebiegu z kanału 2.

2.2. Wykonanie pomiarów

Wpływ parametrów pracy na składowe prądu dławika

1. Opornik obciążający ustawić tak, by uzyskać prąd wyjściowy 4 A.
2. Zanotować wartości napięcia wejściowego U_i i napięcia wyjściowego U_o .
3. Zapisać:
 - a) parametry prądu dławika (funkcja pomiaru – *Measure*):
 - wartość średnią $I_{L(av)}$ prądu dławika,
 - amplitudę międzyszczytową ΔI_L prądu dławika;

Jeżeli z powodu zbyt małej zajmowanej liczby działek, amplituda ΔI_L prądu dławika nie może być odczytana z dobrą dokładnością przy sprzężeniu DC, należy na wzmacniaczu przełączyć sprzężenie na AC, i na oscyloskopie dostosować wzmocnienie. Zaraz po dokonaniu odczytu amplitudy należy powrócić do sprzężenia DC.

- b) parametry pracy:
 - indukcyjność L (wypadkowa – zależnie od konfiguracji dławików),
 - obciążenie I_o – wskazanie amperomierza,
 - częstotliwość przełączania f_s – nastawa generatora,
 - współczynnik wypełnienia D – nastawa generatora;
 - c) oscylogram.
4. Powtórzyć pkt 3 (oscylogram wystarczy dla 1 z 2 wartości z każdego podpunktu poniżej) dokonując następujących zmian w stosunku do powyższych ustawień, które zawsze należy uważać za początkowe (tj. parametry nie zmieniane w danym podpunkcie muszą mieć wartość jak w pkt. 3):

W kolejnym podpunkcie, przy rozłączeniu lub przełączeniu dławika należy wyłączyć sterowanie przetwornicy i poczekać na spadek wskazania amperomierza do zera.

- a) dla dwukrotnie większej (połączenie szeregowo) i dwukrotnie mniejszej (połączenie równoległe) indukcyjności L ;
- b) dla dwukrotnie większego i dwukrotnie mniejszego obciążenia I_o ;
- c) dla dwukrotnie większej i dwukrotnie mniejszej częstotliwości przełączania f_s ;
- d) współczynnika wypełnienia 0,75 i 0,25 (w tej kolejności – dzięki temu trudno będzie przypadkowo uzyskać niebezpiecznie duży prąd), przy czym za każdym razem należy tak zmienić napięcie wejściowe U_i , aby uzyskać to samo napięcie wyjściowe U_o , co w pkt. 2).

Charakterystyka sterowania przy stałym wejściu

5. Wyłączyć sterowanie przetwornicy. Włączyć w obwód dwa dławiki połączone równolegle. Odbiornik zmienić na opornik regulowany 25 Ω , 5 A włączony w sposób umożliwiający wykorzystanie możliwości regulacji w pełnym zakresie rezystancji (patrz schemat połączeń na obudowie). Ślizgacz opornika ustawić mniej więcej w połowie.
6. Włączyć sterowanie i przywrócić pozostałe (tj. oprócz L) parametry z pkt. 3 i napięcie U_i z pkt. 2.
7. Wyznaczyć charakterystykę sterowania przy stałym napięciu wejściowym ($U_i = 10$ V):
 - a) zanotować wartości U_i i D ;
 - b) dla $D = 0,5$, zmieniając obciążenie I_o od minimalnego uzyskiwalnego do ok. 5–8 A, dla 5–10 punktów, zanotować wartości I_o i napięcia wyjściowego U_o ;

jeden z pomiarów wykonać dla trybu BCM (tj. dokładnie na granicy trybów DCM i CCM – kiedy poziom doliny prądu dławika i_L jest równy 0, zaś przy większym obciążeniu staje się już większy od 0) – zaznaczyć ten przypadek;

- c) powtórzyć podpunkty a)–b) dla 1–2 innych wartości D , np. 0,25 i 0,75 (nie przekraczać 0,8).

Charakterystyka sterowania przy stałym wyjściu

8. Stosując się do uwagi poniżej, ustawić napięcie wejściowe 10 V oraz współczynnik wypełnienia D tak, by uzyskać napięcie wyjściowe $U_o = 5$ V. Ostatecznie ustawić obciążenie $I_o \approx 4$ –6 A; może to spowodować zmianę napięcia wyjściowego, które należy wówczas skorygować, ponownie zmieniając współczynnik D i stosując się do uwagi poniżej.

Podczas ustawiania parametrów będą one wpływać (niekiedy bardzo niekorzystnie) na prąd wyjściowy. Należy uważać, aby w żadnej chwili nie przekroczył on ok. 8 A – w razie potrzeby zmienić ustawienie opornika.

9. Wyznaczyć charakterystykę sterowania przy stałym napięciu wyjściowym ($U_o = 5$ V):
- zanotować wartości U_o i U_i ;
 - zmieniając obciążenie I_o od maksymalnego (tj. ustawionego w pkt. 8) do minimalnego uzyskiwalnego, dla 5–10 punktów:
 - dostosować współczynnik D tak, aby zawsze uzyskać tę samą, zapisaną w podpunkcie a), wartość U_o (bez przesadnej dokładności – większa niż 1% może być potrzebna wyłącznie gdy D spadnie poniżej 0,25),
 - zanotować współczynnik wypełnienia D i uzyskane ostatecznie (po dostosowaniu D) obciążenie I_o ;

jeden z pomiarów wykonać dla trybu BCM (tj. dokładnie na granicy trybów DCM i CCM – kiedy poziom doliny prądu dławika i_L jest równy 0, zaś przy większym obciążeniu staje się już większy od 0) – zaznaczyć ten przypadek.
10. Powtórzyć punkty 8–9 dla 1–2 innych wartości napięcia wejściowego U_i , utrzymując niezmienną wartość U_o , tak, by otrzymać U_i/U_o większe i mniejsze od 2, np. 1,5 i 4.

Zwrócić szczególną uwagę na zastosowanie się do uwagi w pkt. 8.

3. Opracowanie i analiza wyników

3.1. Dane liczbowe

Składowe prądu dławika

1. W tabeli 1 zebrać wyniki uzyskane w pkt. 2.2/3–4 (wartości $I_{L(av)}$ i ΔI_L dla różnych parametrów pracy L , I_o , f_s , D).
2. Na podstawie wyników z tabeli 1 wyznaczyć wartości: składowej stałej I_{dc} , składowej przemiennej I_{ac} , wartości szczytowej I_{pk} , współczynnika tętnień r .

Charakterystyki sterowania

3. W tabeli 2 zebrać wyniki uzyskane w pkt. 2.2/7 – przy stałym napięciu wejściowym (jedna tabela z dodatkową kolumną zawierającą współczynnik D). Na ich podstawie oraz z użyciem wartości napięcia wejściowego U_i zanotowanej w pkt. 2.2/7.a), obliczyć i dodać do tabeli stosunek U_o/U_i . W jednoznaczny sposób zaznaczyć punkty odpowiadające trybowi BCM.
4. W tabeli 3 zebrać wyniki uzyskane w pkt. 2.2/9–10 – przy stałym napięciu wyjściowym (jedna tabela z dodatkową kolumną zawierającą napięcie wejściowe U_i). Obliczyć i dodać do tabeli stosunek U_i/U_o .

3.2. Analiza wyników

Wpływ parametrów pracy na parametry prądu dławika

1. Na podstawie danych zawartych w tabeli 1, uzyskać 4 wykresy zawierające 4 charakterystyki każdy:

- a) $I_{dc}, I_{ac}, r, I_{pk} = f(L)$,
- b) $I_{dc}, I_{ac}, r, I_{pk} = f(I_o)$,
- c) $I_{dc}, I_{ac}, r, I_{pk} = f(f_s)$,
- d) $I_{dc}, I_{ac}, r, I_{pk} = f(D)$, przy czym oś D powinna mieć zakres 0...1.

W każdym podpunkcie należy wybrać tylko takie 3 punkty z tabeli, dla których zmienia się parametr podany w nawiasie, natomiast wszystkie pozostałe parametry są takie same (warunki wyjściowe – pierwszy punkt pomiarowy).

Ponieważ parametry r i I_{ac} osiągają wartości wyraźnie mniejsze niż I_{dc} i I_{pk} , należy je wykreślić na drugiej osi y . Osie y każdego wykresu muszą zaczynać się w zerze tak, aby można było wizualnie ocenić zmianę parametru w stosunku do jego wartości.

2. Przeanalizować otrzymane zależności:

- a) stwierdzić, w jaki sposób każdy z analizowanych parametrów pracy (L, I_o, f_s, D) wpływa na każdy z analizowanych parametrów prądu dławika ($I_{dc}, I_{ac}, r, I_{pk}$):
 - znacząco, nieznacząco?
 - rosnąco, malejąco?
 - w przybliżeniu proporcjonalnie, odwrotnie proporcjonalnie, silniej, słabiej?

Należy uwzględnić, że składowa przemienna I_{ac} jest w badanym układzie dużo mniejsza od składowej stałej I_{dc} . W związku z tym przy ocenie wpływu I_{dc} i I_{ac} na wartość szczytową I_{pk} należy raczej stwierdzić, czy zmiana wartości I_{pk} jest taka sama, jak odpowiednio zmiana I_{dc} lub I_{ac} , czy też jest dużo mniejsza lub dużo większa. Jeżeli jest taka sama – świadczy to o wpływie proporcjonalnym. Jest natomiast oczywiste, że względna zmiana I_{pk} pod wpływem I_{ac} będzie – w badanym układzie – mniejsza niż zmiana pod wpływem I_{dc} , gdyż wartość I_{ac} ma po prostu mniejszy udział w wartości I_{pk} niż wartość I_{dc} . Zmiany te można by porównywać ze sobą tylko w wypadku, gdyby obie składowe I_{dc} i I_{ac} stanowiły po 50% wartości I_{pk} .

- b) wyjaśnić obserwowany wpływ, odwołując się (między innymi) do topologii badanej przetwornicy oraz do oscylogramów zapisanych w pkt. 2.2/3–4;
- c) biorąc pod uwagę, że rozmiary dławika rosną wraz z maksymalną energią, jaką należy w nim zgromadzić, zaś

$$W_{L,max} = \frac{LI_{L(pk)}^2}{2} \quad (1)$$

stwierdzić, jaki wpływ na rozmiar dławika będzie miało:

- zwiększenie obciążenia I_o ?
- praca w szerszym zakresie współczynnika wypełnienia D ?
- zwiększenie częstotliwości pracy przetwornicy f_s ?

Charakterystyki sterowania przy stałym wejściu

3. W oparciu o wyniki zgromadzone w tabeli 2, wykreślić na jednym wykresie rodzinę charakterystyk $U_o/U_i = f(I_o)$ przy stałym U_i dla różnych wartości współczynnika wypełnienia D . Zaznaczyć punkty odpowiadające trybowi BCM. W opisie wykresu podać wartość U_i , dla której został uzyskany. Oś U_o/U_i powinna mieć zakres 0...1. W razie potrzeby (w zależności od zarejestrowanego zakresu

prądu I_0) korzystne może być wykonanie 2 wersji wykresu z różną skalą osi I_0 : z pełnym zarejestrowanym zakresem I_0 oraz z zakresem ograniczonym tak, aby uwidocznili przejście w zakres DCM. Porównać uzyskany wykres z teoretycznym dla przetwornicy idealnej [2].

4. Przeanalizować charakterystyki w trybie CCM (pierwsza wersja wykresu):
 - a) czy spełniają one równanie przetwornicy obniżającej (zależność łączącą D , U_i i U_o)?
 - b) w którą stronę występuje odchylenie od równania teoretycznego – czy przy danym współczynniku D uzyskuje się napięcie wyjściowe mniejsze, czy większe niż teoretyczne? czy ta różnica napięć zmienia się z obciążeniem I_0 i w jaki sposób?
 - c) z czego może wynikać obserwowany spadek napięcia? – zwrócić uwagę na jego zmianę z prądem I_0 oraz na topologię przetwornicy – elementy znajdujące się między napięciem wejściowym a napięciem wyjściowym (można założyć, że elementy bierne są idealne);
 - d) czy rzeczywista przetwornica będzie pracować poprawnie (tj. dawać założone napięcie wyjściowe), jeżeli współczynnik wypełnienia będzie obliczony z równania teoretycznego?
 - e) gdyby nawet wyliczyć odpowiednio wyższy współczynnik wypełnienia, czy rzeczywista przetwornica może pracować poprawnie w warunkach zmiennego obciążenia bez wiedzy o wyjściu (np. o prądzie I_0)? czy stosowanie sprzężeń zwrotnych wydaje się wobec tego istotne czy nieistotne?
5. Przeanalizować charakterystyki w trybie DCM (druga wersja wykresu):
 - a) czy zaznaczone punkty BCM układają się mniej więcej na granicy trybu DCM naniesionej na charakterystyce teoretycznej [2] (wartości prądu nie analizować – są one w postaci względnej)?
 - b) czym skutkuje wejście w tryb DCM? do jakiej wartości dąży napięcie wyjściowe, kiedy obciążenie przetwornicy się zmniejsza?
 - c) czy przy niewielkich obciążeniach sterowanie napięciem wyjściowym jest łatwiejsze czy trudniejsze (dlaczego)?

Charakterystyki sterowania przy stałym wyjściu

6. W oparciu o wyniki zgromadzone w tabeli 3, wykreślić na jednym wykresie rodzinę charakterystyk $D = f(I_0)$ przy stałym U_o dla różnych wartości stosunku U_o/U_i . Zaznaczyć punkty odpowiadające trybowi BCM. Oś D powinna mieć zakres 0...1, natomiast należy uzyskać 2 wersje wykresu z różną skalą osi I_0 : z pełnym zarejestrowanym zakresem I_0 oraz z zakresem ograniczonym tak, aby uwidocznili przejście w zakres DCM. W opisie wykresu podać wartość U_i , dla której został uzyskany. Porównać uzyskany wykres z teoretycznym dla przetwornicy idealnej [2].
7. Przeanalizować charakterystyki w trybie CCM (pierwsza wersja wykresu):
 - a) czy spełniają one równanie przetwornicy obniżającej (zależność łączącą D , U_i i U_o)?
 - b) w którą stronę występuje odchylenie od równania teoretycznego – czy do uzyskania danego stosunku U_o/U_i konieczne jest podanie współczynnika D mniejszego czy większego niż teoretyczny? czy obserwacja ta jest spójna z poczynioną w punkcie 4.b)?
8. Przeanalizować charakterystyki w trybie DCM (druga wersja wykresu):
 - a) czy zaznaczone punkty BCM układają się mniej więcej na granicy trybu DCM naniesionej na charakterystyce teoretycznej [2] (wartości prądu nie analizować – są one w postaci względnej)?
 - b) czym skutkuje wejście w tryb DCM? czy do uzyskania danego stosunku U_o/U_i potrzebna jest większy czy mniejszy współczynnik wypełnienia D (niż w trybie CCM)? do jakiej wartości dążyłoby napięcie wyjściowe, gdyby obciążenie przetwornicy się zmniejszało przy niezmienniej wartości D ? czy obserwacja ta jest spójna z poczynioną w punkcie 5.b)?

4. Literatura

- [1] Nowak M., Barlik R.: *Poradnik inżyniera energoelektronika*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1998.
- [2] Mohan N., Undeland T.M., Robbins W.P.: *Power electronics: Converters, applications and design*. Wiley, 2003.
- [3] Starzak Ł.: *Podstawy energoelektroniki. Laboratorium. Ćwiczenie 6. Analiza przetwornicy dławikowej obniżającej napięcie*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2006, <<http://neo.dmcs.p.lodz.pl/pee/>>.
- [4] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 3^B. Tranzystor MOSFET*. Wer. 6.3 lub późniejsza. Łódź: Politechnika Łódzka, 2010 lub późniejszy.