



PODSTAWY ENERGOELEKTRONIKI
LABORATORIUM

Ćwiczenie 6

Analiza przetwornicy dławikowej obniżającej napięcie

Ćwiczenie powinno zostać wykonane w całości w laboratorium.

Opracowanie:
Łukasz Starzak

Łódź 2006

Spis treści

| | |
|--|----|
| 1. Wstęp..... | 3 |
| 2. Działanie przetwornicy obniżającej napięcie | 4 |
| 2.1. Przetwornica jako układ impulsowy | 4 |
| 2.2. Idea działania układu..... | 4 |
| 2.3. Układ rzeczywisty – podstawowy tryb pracy | 6 |
| Zasada działania układu..... | 6 |
| Współczynnik przetwarzania napięcia..... | 9 |
| 2.4. Praca z nieciągłym prądem dławika | 10 |
| 3. Symulacyjne badania układu..... | 14 |
| 3.1. Przygotowanie symulacji..... | 14 |
| 3.2. Obserwacja pracy przetwornicy i sprawdzenie poprawności doboru elementów | 15 |
| 3.3. Wpływ elementów biernych na pracę przetwornicy | 15 |
| 3.4. Charakterystyka sterowania | 18 |
| 4. Oczekiwana zawartość sprawozdania | 19 |
| 5. Literatura | 19 |

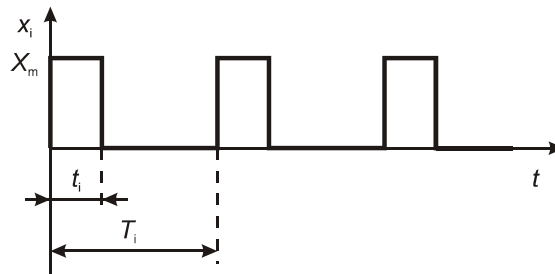
1. Wstęp

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania przetwornicy dławikowej obniżającej napięcie. Dokonuje się tego na drodze badań symulacyjnych w symulatorze PSpice, dzięki czemu możliwe jest swobodne dokonywanie zmian w układzie w dużo większym zakresie, niż miałyby to miejsce w układzie rzeczywistym. Eliminacja zjawisk pasożytniczych pozwala skupić się na zasadniczych cechach przetwornicy. Symulacja pozwala dobrać wartości parametrów układu odpowiednie dla spełnienia podanych założeń oraz wyznaczyć przewidywaną charakterystykę sterowania.

2. Działanie przetwornicy obniżającej napięcie

2.1. Przetwornica jako układ impulsowy

Badana przetwornica obniżająca napięcie (ang. *step-down converter* lub *buck converter*) jest przekształtnikiem DC/DC należącym do klasy układów elektronicznych zwanych układami impulsowymi mocy (ang. *switched-mode power circuits*). Ich cechą charakterystyczną jest praca elementów aktywnych (tranzystorów, tyrystorów, diod) jako dwustanowych kluczy, cyklicznie przełączanych między skrajnymi stanami: załączenia (przewodzenia prądu) i wyłączenia (nieprzewodzenia prądu). Czas, jaki upływa między kolejnymi załączeniami, nazywany jest okresem impulsowania i będziemy go oznaczać T_i ; natomiast czas, przez który klucz jest załączony, nazywany jest czasem trwania impulsu i będzie przez nas oznaczany t_i (zob. rys. 1).



Rys. 1. Zasada sterowania impulsowego – przykładowy przebieg sterujący kluczem tranzystorowym

Układy impulsowe posiadają liczne zalety w stosunku do wcześniejszych rozwiązań przekształtników; najważniejsze z nich to łatwość sterowania przy pomocy układów cyfrowych oraz możliwość uzyskania lepszych parametrów energetycznych (jak np. współczynnik mocy). Częstotliwość pracy tych układów, zwana też częstotliwością impulsowania i równa odwrotności okresu impulsowania T_i , jest rzędu od pojedynczych kiloherców do setek kiloherców. Jest więc ona dużo większa od częstotliwości sieci, z którą układy przekształtnikowe często współpracują od strony wejścia lub wyjścia.

Oprócz przetwornic, jako układy ze sterowaniem impulsowym realizuje się również falowniki napięcia i prądu, kompensatory mocy biernej, sterowniki napięcia i przemienniki częstotliwości.

Przetwornice obniżające napięcie są jednymi z najczęściej spotykanych przekształtników DC/DC. Znajdują one zastosowanie w zasilaczach impulsowych (ang. *switched-mode power supplies*, *SMPS*), które spotkać można w urządzeniach elektronicznych powszechnego użytku, jak również w układach sterowania silników prądu stałego.

2.2. Idea działania układu

Idea przetwornicy obniżającej napięcie została zobrazowana na rys. 2. Klucz K jest cyklicznie przełączany w pozycję 1 na czas t_i , a następnie w pozycję 2 na czas $T_i - t_i$. Załóżmy, że wszystkie elementy układu są idealne i pominiemy na początek obecność filtra (rys. 2a). Wówczas w czasie, gdy klucz jest w pozycji 1, napięcie wejściowe U_{we} jest w całości podane na obciążenie; natomiast gdy klucz jest w pozycji 2, obciążenie jest zwarte, a więc napięcie wyjściowe wynosi 0 (zob. rys. 2c):

$$u_{wy} = \begin{cases} U_{we} & \text{dla } 0 < t < t_i \\ 0 & \text{dla } t_i < t < T_i \end{cases} \quad (1)$$

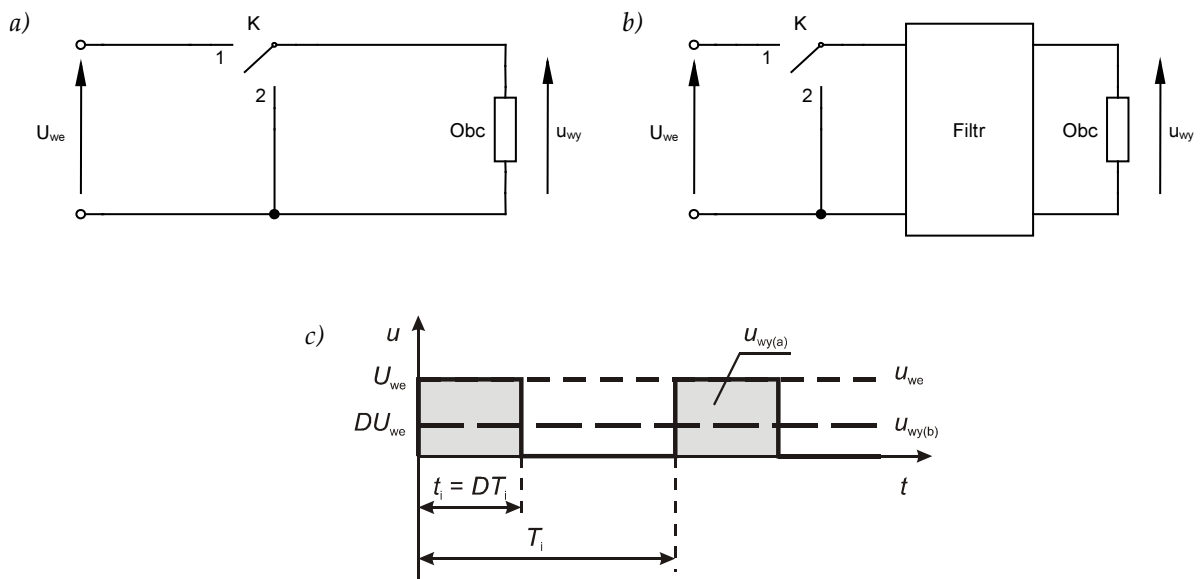
Zdefiniujmy nową wielkość – współczynnik wypełnienia impulsów sterujących D – jako stosunek czasu trwania impulsu do okresu impulsowania:

$$D = \frac{t_i}{T_i} \quad (2)$$

i obliczmy średnią wartość napięcia wyjściowego:

$$\bar{u}_{wy} = \frac{1}{T_i} \int_0^{T_i} u_{wy} dt = \frac{1}{T_i} \left(\int_0^{t_i} U_{we} dt + \int_{t_i}^{T_i} 0 \cdot dt \right) = \frac{1}{T_i} \cdot U_{we} t_i = D U_{we}. \quad (3)$$

Okazuje się więc, że średnią wartość napięcia wyjściowego i napięcie wejściowe łączy bardzo prosta zależność. Wobec tego zmieniając współczynnik wypełnienia D od 0 do 1 (co odpowiada zmianie czasu trwania impulsu t_i od 0 do T_i), można sterować średnim napięciem na wyjściu, zmieniając je w granicach od 0 do U_{we} .



Rys. 2. Idea przetwornicy obniżającej napięcie: a) schemat układu bez filtru; b) schemat układu z filtrem; c) przebiegi przy obciążeniu rezystancyjnym: $u_{wy(a)}$ – napięcie wyjściowe w układzie bez filtru, $u_{wy(b)}$ – napięcie wyjściowe w układzie z filtrem idealnym

Tylko krok dzieli nas już od zbudowania przekształtnika DC/DC – wystarczy włączyć w obwód filtr dolnoprzepustowy, zgodnie z rys. 2b. Jeżeli założymy, że filtr ten jest idealny o nieskończenie małej częstotliwości granicznej, odetnie on składową zmienną napięcia wyjściowego, pozostawiając jedynie składową stałą, której wartość U_{wy} – jak wiadomo z teorii przebiegów niesinusoidalnie zmiennych – jest równa średniemu napięciu przed odfiltrowaniem, a więc $D U_{we}$ (patrz rys. 2c). W ten sposób otrzymaliśmy równanie opisujące działanie rozważanego przekształtnika:

$$U_{wy} = D U_{we}. \quad (4)$$

Należy pamiętać, że wynik ten uzyskaliśmy przy założeniu idealności klucza (brak spadku napięcia w czasie przewodzenia, brak prądu upływu w czasie blokowania) oraz idealności filtru (przepuszczana wyłącznie składowa stała).

2.3. Układ rzeczywisty – podstawowy tryb pracy

Zasada działania układu

Na idei przedstawionej w poprzednim punkcie opierają się rzeczywiste układy przetwornic. Jednym z nich jest układ przetwornicy dławikowej, przedstawiony na rys. 3. Rolę klucza spełnia tu tranzystor polowy Q w połączeniu z diodą D , natomiast filtrację przebiegu wyjściowego zapewnia filtr LC w układzie Γ .

Przeanalizujemy działanie tego układu, podtrzymując następujące założenia:

- 1) klucz jest idealny – tzn. brak spadku napięcia na przewodzących tranzystorze i diodzie oraz brak prądów upływu w tych elementach;
- 2) filtr jest idealny – tzn. do obciążenia trafia tylko składowa stała, zaś cała składowa zmienna (prądu) wpływa do kondensatora C o nieskończonej pojemności; w związku z tym napięcie u_{wy} jest stałe i możemy je oznaczyć przez U_{wy} ;
- 3) obciążenie jest czysto rezystancyjne.

Czas T_i podzielmy na dwa takty, o długościach t_i i $T_i - t_i$ (zob. rys. 4). Pierwszy takt rozpoczyna się z chwilą podania na bramkę tranzystora Q napięcia o amplitudzie większej od napięcia progowego, w wyniku czego następuje załączenie tranzystora. Prąd płynie z wejścia przez dławik L do kondensatora C i obciążenia R_o . Napięcie u_D jest równe U_{we} , gdyż dioda D zostaje zwarta do wejścia przez przewodzący tranzystor; w związku z tym dioda jest spolaryzowana w kierunku zaporowym i nie przewodzi prądu, czyli $i_L = i_Q$. Układ redukuje się więc do postaci z rys. 3b.

Trzeba zauważyć, że prąd dławika nie jest stały; narasta on zgodnie ze znanym wzorem

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} . \quad (5)$$

Jak widać na rys. 3b,

$$u_L = U_{we} - U_{wy} . \quad (6)$$

Przyjeliśmy, że filtracja jest idealna i napięcie wyjściowe jest stałe. Z porównania wzorów (5) i (6) wynika, że pochodna prądu dławika jest również stała, co świadczy, że prąd ten narasta liniowo. Pochodną można więc zastąpić ilorazem przyrostów i przekształcić (5) do postaci

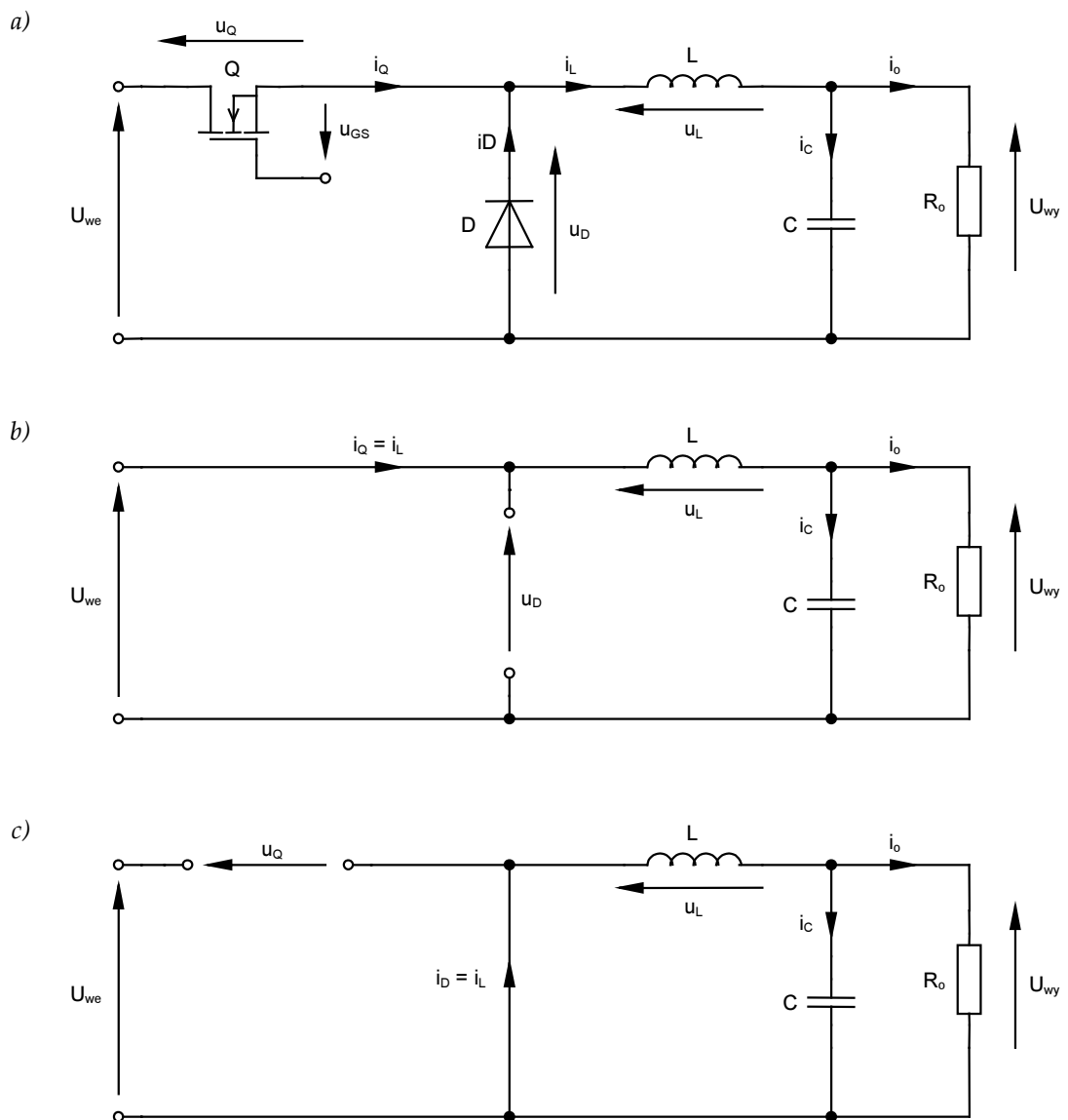
$$\Delta i_L = \frac{u_L}{L} \Delta t , \quad (7)$$

skąd wzrost prądu dławika w czasie pierwszego taktu

$$\Delta i_{L+} = \frac{U_{we} - U_{wy}}{L} \cdot t_i . \quad (8)$$

Z chwilą zdjęcia impulsu sterującego z bramki tranzystora Q, rozpoczyna się drugi takt pracy układu. Tranzystor wówczas nie przewodzi, lecz przepływ prądu w obwodzie musi być podtrzymany z powodu obecności dławika. Jest to ważne, gdyż świadczy o tym, że dławik pełni nie tylko rolę składnika filtra LC, ale również stanowi magazyn energii dla obwodu na czas braku ścieżki prądowej między wejściem a wyjściem.

Wyłączenie tranzystora powoduje otwarcie dotychczasowego obwodu prądowego; w konsekwencji w dławiku gwałtownie indukuje się coraz większe napięcie ujemne, aż do momentu, gdy przekroczy ono (co do modułu) wartość U_{wy} o napięcie progowe diody. Następuje wówczas spolaryzowanie diody w kierunku przewodzenia i jej załączenie (gdyż $u_D = U_{wy} + u_L$, należy zwrócić uwagę na strzałkowanie tego napięcia na schemacie od anody do katody). W konsekwencji prąd dławika zamyka się przez diodę, a napięcie u_L utrzymuje się na stałym poziomie $u_L \approx -U_{wy}$ (przypomnijmy, że przyjęliśmy założenie o idealnym kluczu, a więc zaniedbujemy spadek napięcia na przewodzącej diodzie). Układ redukuje się do postaci z rys. 3c.

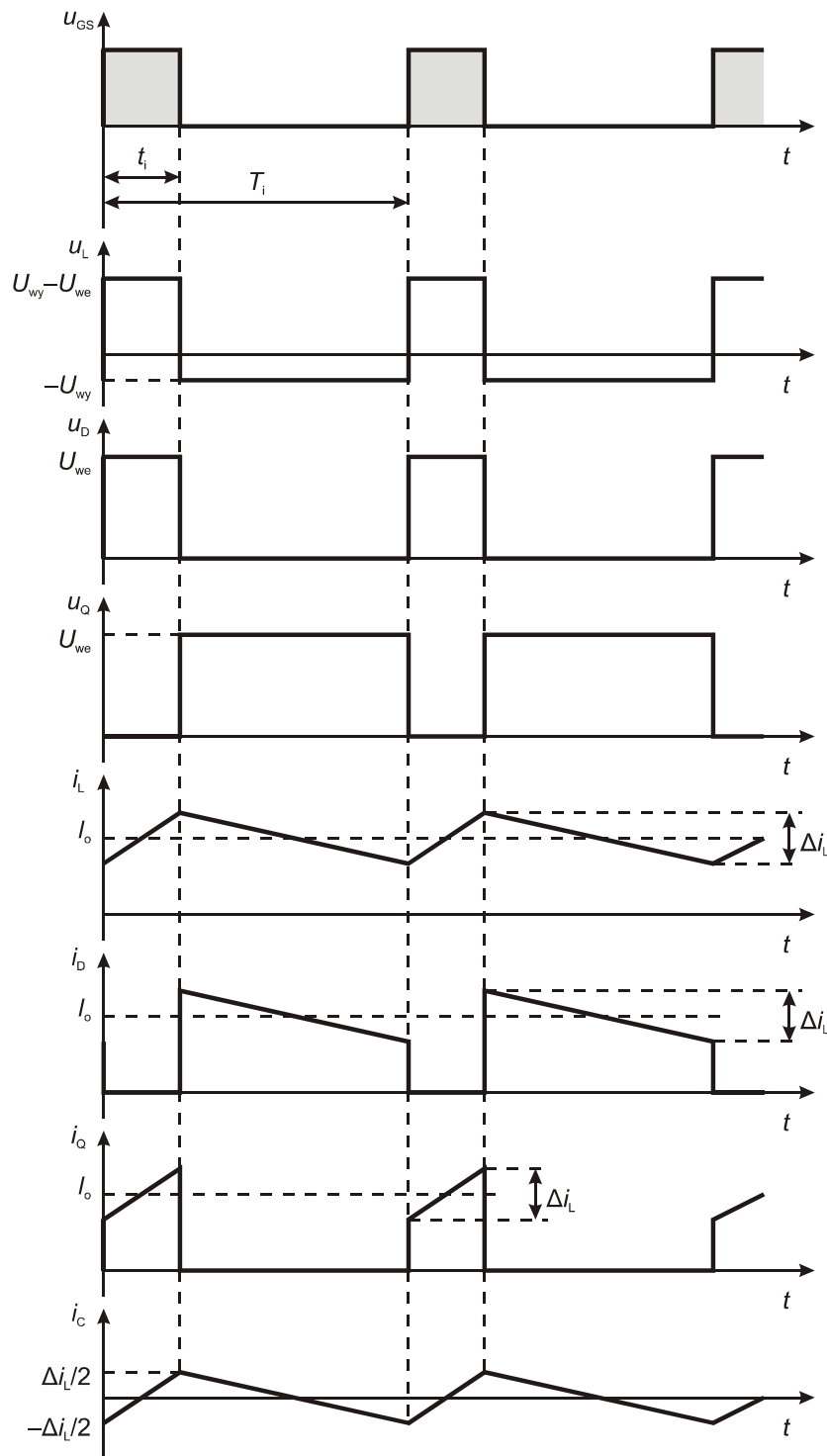


Rys. 3. Układ dławikowej przetwornicy obniżającej napięcie:
a) schemat ogólny; b) schemat zredukowany w pierwszym takcie pracy; c) schemat zredukowany w drugim takcie pracy

Podobnie jak poprzednio, można podać przybliżony wzór określający zmianę prądu dławika w drugim takcie pracy układu:

$$\Delta i_{L-} = \frac{-U_{wy}}{L} \cdot (T_i - t_i). \quad (9)$$

Określenie spadku napięcia na nieprzewodzącym tranzystorze jest łatwe; jest on równy U_{we} , gdyż źródło tranzystora jest zwarte przez diodę do masy.



Rys. 4. Dławikowa przetwornica obniżająca napięcie – uproszczone przebiegi w charakterystycznych punktach układu

Biorąc pod uwagę, że po ustaleniu się pracy przetwornicy, spadek prądu w drugim takcie musi być równy jego wzrostowi w pierwszym takcie (w przeciwnym razie prąd ten rósłby do nieskończoności), można wyznaczyć charakterystykę sterowania układu:

$$\begin{aligned} |\Delta i_{L+}| &= |\Delta i_{L-}| = \Delta i_L \\ \frac{U_{we} - U_{wy}}{L} t_i &= \frac{U_{wy}}{L} (T_i - t_i) \\ U_{we} t_i - U_{wy} t_i &= U_{wy} T_i - U_{wy} t_i \\ U_{wy} &= U_{we} \frac{t_i}{T_i} \end{aligned}$$

skąd

$$U_{wy} = D U_{we} \quad (10)$$

Współczynnik przetwarzania napięcia

Podstawową wielkością charakteryzującą pracę przetwornicy jest współczynnik przetwarzania napięcia K_U , definiowany jako stosunek średniego (w naszym uproszczeniu – stałego) napięcia wyjściowego do stałego napięcia wejściowego:

$$K_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \quad (11)$$

Zgodnie ze wzorem (10), dla przetwornicy obniżającej napięcie wynosi on

$$K_U = D \quad (12)$$

Zależność współczynnika przetwarzania napięcia od współczynnika wypełnienia impulsów sterujących nazywana jest charakterystyką sterowania przetwornicy. Została ona wykreślona na rys. 5 (linia ciągła).

Składowa stała (wartość średnia) prądu dławika, wokół której mają miejsca tętnienia o amplitudzie Δi_L , jest równa prądowi obciążenia i_o . Przyjęliśmy bowiem założenie, że cała składowa zmienna prądu dławika płynie przez kondensator. Prąd obciążenia można obliczyć z prawa Ohma (zgodnie ze wspomnianym założeniem ma on stałą wartość, którą oznaczamy przez I_o):

$$i_o = I_o = \frac{U_{wy}}{R_o} \quad (13)$$

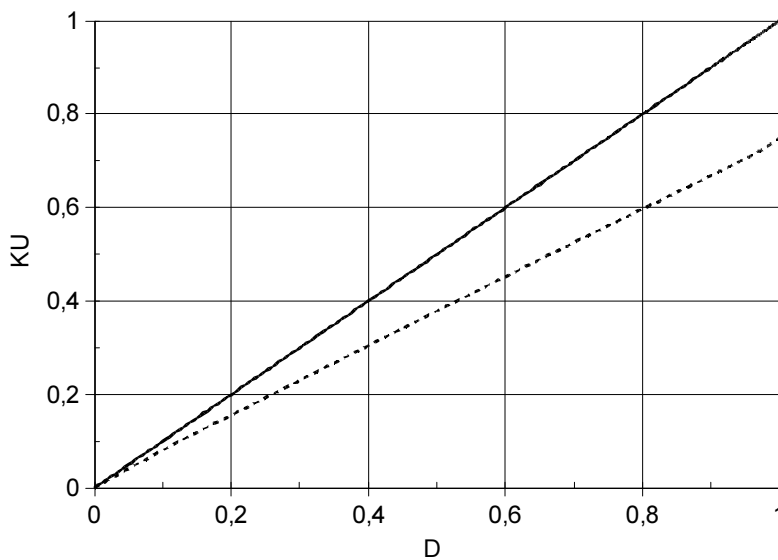
natomiast prąd kondensatora będzie wynosił

$$i_C = i_L - I_o \quad (14)$$

i będzie miał w związku z tym postać tętnień o amplitudzie Δi_L bez składowej stałej.

Trzeba pamiętać, że w układzie rzeczywistym przyjęte powyżej założenia upraszczające nie będą spełnione i charakterystyki przetwornicy będą odbiegały od idealnych. Przede wszystkim rezystancje pasożytnicze związane ze wszystkimi elementami układu powodują

zmniejszenie wartości prądów oraz powstanie dodatkowych spadków napięć, w wyniku czego napięcie wyjściowe jest mniejsze od oczekiwanego. Typowy kształt charakterystyki przetwarzania w układzie rzeczywistym przedstawiono na rys. 5 linią przerywaną.



Rys. 5. Charakterystyka sterowania przetwornicy obniżającej napięcie: linia ciągła – układ idealny; linia przerywana – typowy przebieg po uwzględnieniu stratności elementów biernych i aktywnych

2.4. Praca z nieciągłym prądem dławika

W przypadku rozpatrzonym w punkcie 2.1 w każdej chwili przez dławik płynął niezerowy prąd, co nazywa się trybem pracy z ciągłym prądem dławika (ang. *continuous conduction mode*, CCM). Zwróćmy jednak uwagę, że ze wzoru (13) wynika, iż przy zwiększaniu rezystancji obciążenia, prąd obciążenia I_o będzie malał, a prąd ten stanowi składową stałą prądu dławika i_L .

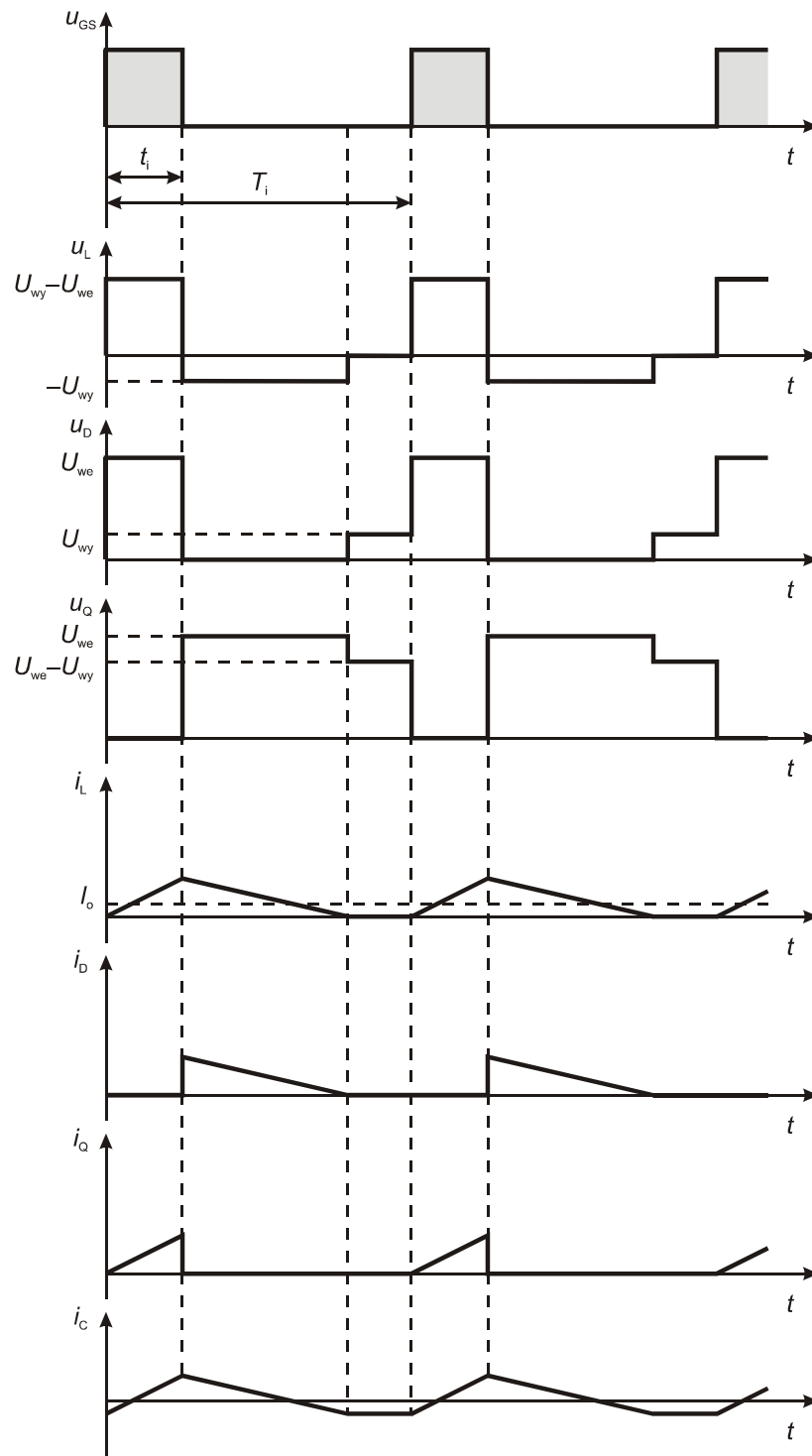
Jak widać na rys. 4, prąd dławika i_L zmienia się o $1/2 \Delta i_L$ w górę i w dół względem wartości średniej I_o , pulsuje więc między wartościami: $I_o - 1/2 \Delta i_L$ i $I_o + 1/2 \Delta i_L$. Rysunek ten przedstawia sytuację, gdy $I_o > 1/2 \Delta i_L$. Gdy odciążymy przetwornicę do tego stopnia, że wartość I_o stanie się równa $1/2 \Delta i_L$, prąd dławika będzie się zmieniać między wartościami 0 i $2I_o$. Dolne wierzchołki pily znajdują się więc na osi.

Powstaje pytanie, co stanie się, gdy zmniejszymy obciążenie jeszcze bardziej. Gdyby było to możliwe, piła przesunęłaby się jeszcze niżej, a jej dolne wierzchołki znalazłyby się poniżej osi. W rozpatrywanym układzie nie ma jednak takiej możliwości. Prąd cewki w tym takcie pracy jest przewodzony przez diodę; może ona przewodzić prąd tylko w jednym kierunku, a więc w momencie osiągnięcia przezeń wartości 0, dioda wyłączy się. Tranzystor nie może przejąć prądu, gdyż w tej chwili jego bramka nie jest wysterowana. Ponieważ w obwodzie nie ma drogi dla prądu dławika, prąd ten po prostu przestaje płynąć. Powstaje w ten sposób dodatkowy, trzeci takt pracy, w którym prąd nie płynie ani przez tranzystor, ani przez diodę (zob. rys. 6). Przypadek ten nazywa się trybem pracy z nieciągłym prądem dławika (ang. *discontinuous conduction mode*, DCM).

Zmiana kształtu prądu i_L wpływa oczywiście na zmianę przebiegów i_Q i i_D , gdyż $i_L = i_Q + i_D$. Z drugiej strony zmianie ulega również przebieg prądu i_C , będącego składową zmienną prądu i_L . Przebiegi napięć na elementach u_L , u_Q i u_D pozostają bez zmian w pierwszych dwóch taktach pracy; zmiana następuje natomiast w takcie trzecim. Prąd

dławika nie zmienia się, a więc spadek napięcia na nim wynosi 0. W związku z tym całe napięcie wyjściowe odkłada się na diodzie ($u_D = U_{wy}$). Jest oczywiste, że w tej sytuacji spadek napięcia na tranzystorze wynosi $U_{we} - U_{wy}$.

Charakterystyki sterowania w układzie idealnym w zależności od średniego prądu obciążenia I_o zostały przedstawione na rys. 7. Widać wyraźnie, że w obszarze względnie dużych prądów obowiązuje wcześniej wyprowadzona liniowa zależność (12). Natomiast po obniżeniu średniego prądu obciążenia poniżej pewnej wartości krytycznej, współczynnik przetwarzania napięcia staje się większy od D i rośnie do 1. Jest to związane z wejściem



Rys. 6. Uproszczone przebiegi w przetwornicy pracującej z nieciągłym prądem dławika

przetwornicy w tryb pracy z nieciągłym prądem dławika.

Dokonując podobnej analizy jak w punkcie 2.1, można wyprowadzić wzór określający współczynnik przetwarzania napięcia dla trybu DCM:

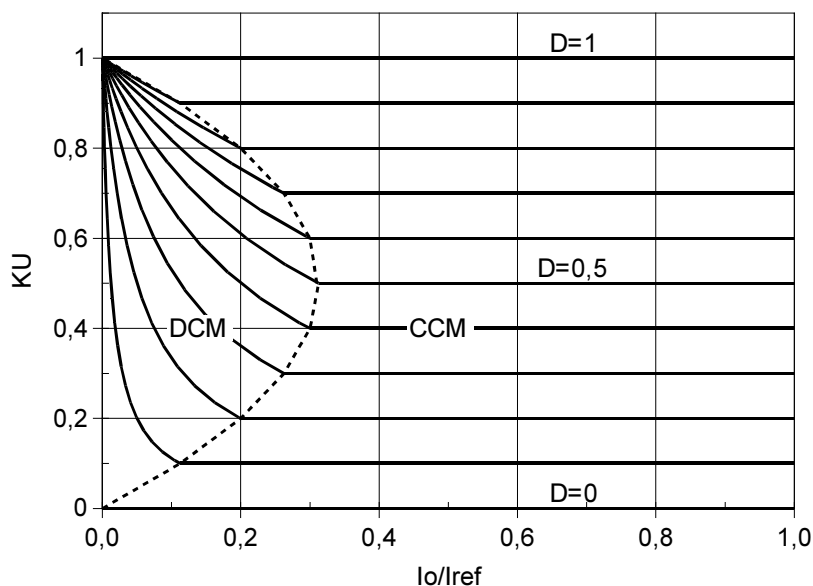
$$K_U = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{D^2}}}, \quad (15)$$

gdzie

$$A = \frac{2L}{R_o T_i}. \quad (16)$$

Natomiast wartość krytyczną średniego prądu obciążenia $I_{o(crit)}$, określającą granicę trybów CCM i DCM, można wyznaczyć ze wzoru (9), biorąc pod uwagę, że – zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami – graniczny prąd średni jest równy połowie amplitudy tętnień dla trybu CCM:

$$\begin{aligned} I_{o(crit)} &= \frac{|\Delta i_{L-}|}{2} = \frac{1}{2} \frac{U_{wy}}{L} \cdot (T_i - t_i) = \frac{DU_{we}}{2L} \cdot (T_i - DT_i) = \\ &= \frac{U_{we} T_i}{2L} \cdot D(1 - D) = \frac{DT_i}{2L} (U_{we} - U_{wy}) \end{aligned} \quad (17)$$



Rys. 7. Przykładowe charakterystyki sterowania idealnej przetwornicy obniżającej napięcie w zależności od średniego prądu obciążenia (znormalizowanego względem pewnej wartości odniesienia); linią przerywaną oznaczono granicę trybów pracy z ciągłym (CCM) i nieciągłym (DCM) prądem dławika, zgodnie ze wzorem (17)

Ogólnie rzecz biorąc, tryb DCM nie jest korzystny, gdyż znacznie utrudnia sterowanie układu przez zmianę współczynnika wypełnienia impulsów D . Nie tylko bowiem zależność współczynnika przetwarzania napięcia od D staje się nieliniowa, ale również współczynnik zaczyna zależeć od parametrów obwodu zewnętrznego (R_o), filtru (L) i częstotliwości pracy układu (T_i), które to wielkości we wzorze (15) zostały „ukryte” we współczynniku A .

Zazwyczaj tak dobiera się wartość indukcyjności L , aby zapewnić pracę z ciągłym prądem dławika dla założonych wartości U_{we} , U_{wy} i T_i oraz przy założeniu, że średni prąd obciążenia nie spadnie poniżej pewnej wartości $I_{o(min)}$ – z reguły 5–10% maksymalnego obciążenia (na jakie projektowany jest układ). W tym celu ze wzoru (17) można wyprowadzić wzór na minimalną indukcyjność w postaci

$$L_{min} = \frac{DT_i}{2I_{o(min)}} \cdot (U_{we} - U_{wy}). \quad (18)$$

W przypadku, gdy z założeń projektowych wynika, że $U_{we} = \text{const}$, zaś regulować będziemy napięcie wyjściowe przez zmianę współczynnika D , powyższy wzór daje

$$L_{min} = \frac{DT_i}{2I_{o(min)}} \cdot (U_{we} - DU_{we}) = \frac{U_{we}T_i}{2I_{o(min)}} \cdot D(1-D). \quad (19)$$

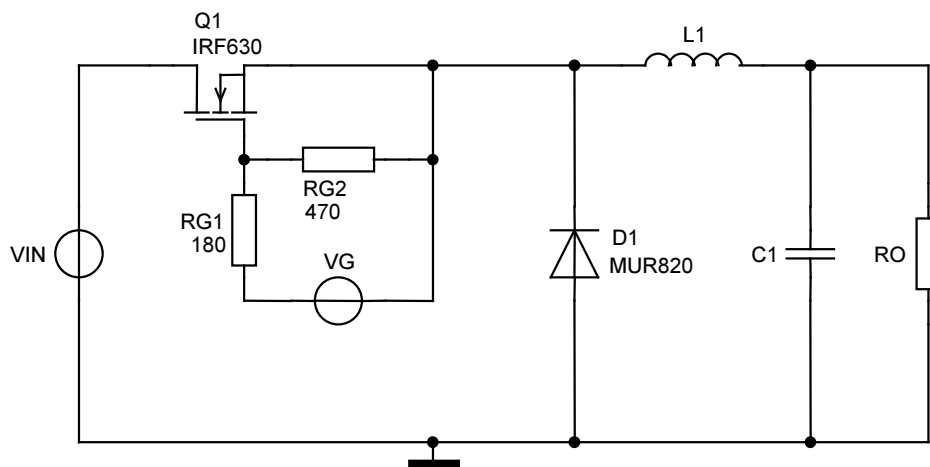
Minimalna indukcyjność zależy więc od współczynnika wypełnienia. Aby zapewnić pracę w trybie CCM dla każdego D , należy z możliwych L_{min} wybrać największą i taką wstawić do obwodu – wówczas dla żadnego przypadku nie będzie ona zbyt mała i nie wejdziemy w tryb DCM. Jak można łatwo stwierdzić, wyrażenie $D(1-D)$ osiąga maksimum dla $D = 0,5$. Stąd uniwersalna minimalna indukcyjność (przy której dla dowolnego D przetwornica będzie pracować w trybie CCM) wynosi

$$L_{min} = \frac{U_{we}T_i}{8I_{o(min)}}. \quad (20)$$

3. Symulacyjne badania układu

3.1. Przygotowanie symulacji

1. Korzystając z programu MicroSim Schematics, należy zbudować obwód zgodnie z rys. 8.
 - a) Należy wykorzystać modele: tranzystora VDMOS IRF630 ($V_{(BR)DSS} = 200 \text{ V}$; $I_{D(AV)} = 9,3 \text{ A}$) oraz diody mocy MUR820 ($V_{BR} = 200 \text{ V}$; $I_{F(AV)} = 8 \text{ A}$) o nazwach IRF630_PEE i MUR820_PEE znajdujące się w bibliotece PEE_CW6. Oba te elementy są oryginalnie przewidziane przez producenta do zastosowania (między innymi) właśnie jako klucze w układach przetwornic.



Rys. 8. Schemat układu przetwornicy do badań symulacyjnych

- b) Do nazwy rezystora obciążenia (RO) należy dodać numer zespołu (konta), np. RO14.
 - c) Przyjąć wstępnie pojemność kondensatora $C_1 = 0,1 \mu\text{F}$.
 - d) V_{IN} jest źródłem stałego napięcia wejściowego o wartości podanej przez prowadzącego (element VDC).
 - e) Źródło V_G stanowi model układu IR2125 sterującego bramką tranzystora. Powinno ono zapewniać prostokątne impulsy sterujące (w programie Schematics element VPULSE). Czas narastania (*rise time*) na wyjściu sterownika wynosi 43 ns, zaś czas opadania (*fall time*) – 26 ns. Amplituda impulsów powinna wynosić 15 V. Pozostałe parametry tego źródła zostaną uzupełnione później.
2. Dokonać obliczeń brakujących elementów schematu.
 - a) Obliczyć wartość współczynnika wypełnienia D konieczną do uzyskania napięcia wyjściowego podanego przez prowadzącego. Na podstawie obliczonej wartości oraz częstotliwości pracy podanej przez prowadzącego, uzupełnić okres (ang. *period*) i czas trwania impulsu (*pulse width*) dla źródła V_G .
 - b) Obliczyć i wpisać na schemat rezystancję obciążenia R_o odpowiadającą maksymalnemu prądowi obciążenia podanemu przez prowadzącego.
 - c) Obliczyć i wpisać na schemat indukcyjność dławika L_1 zapewniającą pracę z ciągłym prądem dławika przy założeniu, że minimalny prąd może wynieść 20%

maksymalnego oraz że napięcie wejściowe będzie stałe, a współczynnik wypełnienia impulsów – zmienny.

3.2. Obserwacja pracy przetwornicy i sprawdzenie poprawności doboru elementów

3. Proszę dokonać analizy czasowej (*transient*) obwodu w czasie zapewniającym ustalenie się pracy przetwornicy. Należy wymusić w układzie zerowe warunki początkowe przez zaznaczenie opcji *Skip initial transient solution* (pomiń obliczenie warunków początkowych) w oknie *Analysis Setup* ▶ *Transient*.

Sprawdzić spełnienie założeń projektowych – częstotliwości pracy, napięcia wyjściowego i (maksymalnego) prądu obciążenia. Zapisać odpowiednie przebiegi.

Ponieważ filtracja na wyjściu układu nie jest idealna, przebiegi wyjściowe nie są stałe. Należy więc wziąć pod uwagę ich wartości średnie za okres pracy układu, obliczone za pomocą odpowiedniej funkcji programu Probe.

4. Proszę sprawdzić poprawność doboru indukcyjności dławika. (Zapisać wykresy niezbędne do wykonania poniższych podpunktów.)
- Stwierdzić, czy przetwornica pracuje w trybie CCM.
 - Zmienić współczynnik wypełnienia impulsów D na 0,5 (wartość, dla której najwcześniej może nastąpić wejście w tryb DCM – patrz punkt 0). Stwierdzić, czy przetwornica nadal pracuje w trybie CCM.
 - Zmieniając odpowiednio rezystancję obciążenia, zmniejszyć obciążenie do minimalnej wartości założonej w punkcie 2 c) i sprawdzić, czy przetwornica pracuje zgodnie z postawionymi wymaganiami. Sprawdzić wartość napięcia wyjściowego.
 - Zmniejszyć obciążenie jeszcze bardziej, tak, aby przetwornica weszła w tryb DCM. Sprawdzić wartość napięcia wyjściowego i porównać z poprzednią, odnosząc się do charakterystyk podanych w punkcie 0.

W celu eliminacji oscylacji w obwodzie po wyłączeniu diody, można równolegle do niej włączyć tłumik RC o wartościach elementów 1 k Ω i 1 nF.

- Powrócić do pierwotnych wartości współczynnika wypełnienia impulsów i rezystancji obciążenia.
5. Wykreślić prądy dławika, tranzystora i diody, przebieg sterujący bramką tranzystora oraz napięcie u_{DS} tranzystora (na jednym rysunku, który może zawierać 2 wykresy). Przeanalizować działanie układu – przede wszystkim rolę tranzystora i diody jako kluczy oraz cewki jako elementu magazynującego energię. Wskazać poszczególne takty pracy układu.

Analizy proszę dokonać dla dwóch przypadków:

- tryb CCM – obciążenie maksymalne;
- tryb DCM – dowolne obciążenie.

3.3. Wpływ elementów biernych na pracę przetwornicy

6. Z punktu widzenia jakości przetwarzania napięcia, bardzo ważnym parametrem jest amplituda tętnienia napięcia wyjściowego. Jak już zaobserwowaliśmy, w rzeczywistym

układzie napięcie to nie jest stałe (w przeciwieństwie do założenia, które przyjęto w punkcie 2.1), ale wykazuje okresowe wahania wokół pewnej wartości średniej, co jest związane z impulsowym działaniem układu i nieidealnością filtru. Zbadamy teraz, jaki wpływ na tętnienie mają wartości elementów filtru LC.

- a) Proszę zdefiniować dwa parametry globalne i przypisać im obecne wartości indukcyjności dławika i pojemności kondensatora.

Parametry globalne definiuje się przez dodanie do schematu (w dowolnym miejscu) wirtualnego elementu PARAM, co odpowiada wstawieniu do pliku CIR instrukcji o tej samej nazwie. Każdy element tego typu (może ich być w obwodzie dowolnie wiele) pozwala na zdefiniowanie trzech nazw parametrów NAME1...NAME3 i przypisanie im wartości – odpowiednio VALUE1...VALUE3.

- b) Dotychczasowe, sztywne wartości elementów L_1 i C_1 zamienić na zmienne, równe zdefiniowanym wyżej parametrom. W tym celu zamiast liczby należy wpisać nazwę odpowiedniego parametru ujętą w nawiasy klamrowe.

Przypomnijmy, że nawiasy klamrowe pozwalają skorzystać z opcji modelowania behawioralnego, a więc wprowadzić dowolne formuły określające parametry elementów. W tym przypadku formuła jest bardzo prosta, gdyż składa się z samej tylko nazwy jednej zmiennej.

- c) Włączyć analizę parametryczną (w pliku CIR odpowiada jej instrukcja STEP) przez zaznaczenie odpowiedniej opcji w oknie *Analysis Setup* oraz ustawić jej parametry. W oknie *Parametric* wybieramy *Swept Var. Type: Global Parameter*, w polu *Name* wpisujemy nazwę zmiennej określającej wartość elementu C_1 lub L_1 , a w dolnej części okna wybieramy tryb zmienności i jej parametry.

Należy zacząć od uzmiennienia pojemności kondensatora C_1 w zakresie 100 nF–100 μ F.

W programie PSPICE dostępne są następujące tryby zmienności parametrów:

- *linear* – zmiana liniowa od wartości Start Value do End Value ze stałym krokiem Increment;
np. wpisanie do kolejnych pól liczb 1, 10, 2 spowoduje wykonanie symulacji dla pięciu wartości parametru: 1, 3=1+2, 5=3+2, 7 i 9;
- *octave* – zmiana wykładnicza od wartości Start Value do End Value przy liczbie punktów na oktawę (2-krotną zmianę wartości parametru) równej wartości z pola Pts/Octave;
np. wpisanie liczb 2, 50, 1 spowoduje wykonanie symulacji dla sześciu wartości parametru: 2, 4=2·2¹, 8=4·2¹, 16, 32, 64; natomiast wpisanie liczb 2, 50, 2 spowoduje wykonanie symulacji dla jedenastu wartości parametru (między każde dwie poprzednie zostanie wstawiona jeszcze jedna): 2, 2,828=2·2^{1/2}, 4=2,828·2^{1/2}, 5,657=4·2^{1/2}, 8, 11,31, 16, 22,63, 32, 45,26 i 64;
- *decade* – jak poprzednio, lecz przy liczbie punktów na dekadę (10-krotną zmianę wartości parametru) równej wartości z pola Pts/Decade;
np. wpisanie liczb 1, 100, 4 spowoduje wykonanie symulacji dla dziewięciu wartości parametru: 1, 1,778=1·10^{1/4}, 3,162=1,778·10^{1/4}, 5,623=3,162·10^{1/4}, 10=5,623·10^{1/4}, 17,78, 31,62, 56,23 i 100;
- *value list* – analiza zostanie wykonana dla wartości wpisanych w pole Value (rozdzielonych spacjami);

np. wpisanie „1 5 14 23” spowoduje wykonanie symulacji dla czterech wartości parametru: 1, 5, 14 i 23.

- d) Uruchomić symulację. Po wykonaniu analizy powinniśmy uzyskać serię wyników dla kilku wartości C_1 . W razie potrzeby należy wydłużyć czas symulacji tak, aby dla każdej wartości C_1 napięcie wyjściowe ustaliło się. Zapisać wykres.

Jeżeli na wykresie widocznych jest kilka krzywych dla różnych wartości parametrów, wartość parametru odpowiadającą danej krzywej można odczytać klikając dwukrotnie na symbolu znacznika tej krzywej w legendzie pod wykresem.

7. Użyjemy teraz funkcji analizy charakterystyk (*performance analysis*) do wykreślenia zależności amplitudy tętnienia napięcia wyjściowego od pojemności C_1 . Analiza charakterystyk polega na wykreśleniu wybranej funkcji celu (*goal function*) w funkcji parametru uzmiennionego instrukcją STEP.

Funkcja celu to funkcja, która podany przebieg (będący zwykle funkcją czasu – jak w naszym przypadku – lub częstotliwości) charakteryzuje za pomocą jednej liczby. Może to być np. wartość maksymalna, okres, pasmo przepuszczania itp. Funkcję celu można obliczyć dla pojedynczego przebiegu wybierając *Trace ▶ Goal Functions ▶ Eval* lub *Trace ▶ Eval Goal Function*.

- a) Na początek, korzystając z instrukcji do programu Probe, proszę wybrać funkcję celu, która nadaje się do określenia amplitudy tętnienia napięcia. Następnie proszę przetestować jej działanie na pojedynczym przebiegu napięcia wyjściowego (dla dowolnie wybranej wartości C_1). Potrzebny będzie do tego rozsądnie wybrany zakres danych (na osi czasu), dla którego obliczymy funkcję celu.

Aby wybrać jeden przebieg z serii, należy za jego nazwą dodać znak @ i numer kolejny przebiegu w serii. Np. jeżeli analiza parametryczna została wykonana dla wartości C_1 zmieniającej się liniowo od 50 μF do 500 μF z krokiem 100 μF , to przebieg dla 50 μF nosi numer 1, dla 150 μF – numer 2 itd.; w tym przypadku, jeżeli napięcie na obciążeniu jest oznaczone $V(\text{ROBC}:1)$, to przebieg dla 250 μF oznaczymy jako $V(\text{ROBC}:1)@3$.

Otrzymany wynik powinien być amplitudą tętnień napięcia wyjściowego – należy sprawdzić z wykresem (np. przy użyciu kursorów) czy tak rzeczywiście jest.

- b) Powyższe czynności można by powtórzyć dla pozostałych przebiegów z serii (pozostałych wartości C_1), zebrać dane w tabeli i wykreślić otrzymaną zależność. Jednak program Probe może wykonać to za nas, gdyż dokładnie w ten sposób działa funkcja *Trace ▶ Performance Analysis*. Po jej uruchomieniu otwiera się okno, które pozwala na wybór przebiegów, które mają być poddane analizie (przycisk *Select Sections*); w naszym przypadku wybieramy wszystkie przebiegi. Następnie:

- klikamy *Wizard* i *Next*;
- zaznaczamy wybraną wcześniej funkcję celu i klikamy *Next*;
- w pole *Name of trace to search* wpisujemy oznaczenie napięcia wyjściowego (tym razem oczywiście bez wybierania pojedynczego przebiegu z serii);
- w pola *Beginning of X range* i *End of X range* wpisujemy ustalone wcześniej granice zakresu na osi czasu;
- klikamy *Next*;

- pojawia się przykładowy wynik obliczenia dla pierwszego przebiegu z serii; jeżeli odpowiada on temu, co chcieliśmy uzyskać, klikamy *Next*, w wyniku czego powinna się pojawić pożądana charakterystyka.
- c) Włączyć skalę logarytmiczną na obu osiach. Zapisać uzyskany wykres.
8. Na podstawie wykreślonej zależności wybrać wartość C_1 , która zapewni tętnienie napięcia wyjściowego nie większe niż 1%, i wpisać ją na schemat.
9. Dla stałej, nowej wartości C_1 , uzmiennić indukcyjność cewki L_1 , dokonując symulacji dla indukcyjności bieżącej oraz np. 2 razy mniejszej i większej. W jaki sposób indukcyjność wpływa na stałość napięcia wyjściowego? Zapisać odpowiedni wykres. Zastanowić się, dlaczego w praktyce raczej nie korzysta się z tej zależności.

3.4. Charakterystyka sterowania

10. Uzmiennić współczynnik wypełnienia impulsów sterujących D .
- a) Zdefiniować nowy parametr globalny i przypisać mu dotychczasową wartość współczynnika D .
 - b) Parametr lub parametry źródła sterującego, które zależą od D , zdefiniować za pomocą wzorów w nawiasach klamrowych, zastępując dotychczasowe wartości liczbowe.
 - c) Sprawdzić poprawność wprowadzonych zmian – dokonać symulacji układu i sprawdzić, czy jego działanie pozostało niezmienione.
 - d) Dokonać symulacji układu ze zmieniającym się współczynnikiem D . Ze względu na to, że nie da się zdefiniować źródła sterującego o wypełnieniu impulsów dokładnie 0 ani dokładnie 1, a także dlatego, że w rzeczywistych układach takie wartości D nie są stosowane, symulacje należy przeprowadzić dla przedziału 0,1–0,9. Wykreślić i zapisać przebiegi napięcia wyjściowego.
11. Wyznaczyć charakterystykę sterowania badanej przetwornicy. Ponieważ napięcie wyjściowe w rzeczywistym układzie wykazuje tętnienia, do obliczenia współczynnika przetwarzania napięcia należy użyć jego wartości średniej.
- a) Dodać do uzyskanego poprzednio wykresu przebieg wartości średniej za okres napięcia wyjściowego (wykorzystać odpowiednią funkcję programu Probe).
 - b) Wybrać funkcję celu, która zwróci wartość średniego napięcia wyjściowego w stanie ustalonym. Proszę sprawdzić poprawność działania wybranej funkcji celu.
 - c) Jeżeli test wypadł pomyślnie, należy wykorzystać wybraną funkcję w analizie charakterystyk (*Trace ▶ Performance Analysis*).
 - d) Zmienić wyświetlany przebieg tak, aby zamiast średniego napięcia wyjściowego wykreślił się współczynnik przetwarzania napięcia – wpisać wyrażenie odpowiadające wzorowi definicyjnemu (z uwzględnieniem konieczności uśrednienia u_{wy}). Zapisać uzyskaną charakterystykę.
12. Proszę porównać otrzymaną charakterystykę z teoretyczną i spróbować wyjaśnić ewentualne rozbieżności.

4. Oczekiwana zawartość sprawozdania

Sprawozdanie powinno zawierać:

- parametry źródła V_G (pkt 1, 2, 4, 10);
- wyznaczone parametry elementów układu wraz z wykorzystanym wzorem lub wykresem (pkt 2, 8);
- zmienione wartości elementów obwodu, dla których wykonane zostały symulacje (pkt 4, 6, 9);
- uzasadnienie wyboru funkcji celu i ich parametrów (pkt 7, 11);
- uzyskane przebiegi i zależności oraz ich analizę i wnioski, zgodnie z poleceniami w poszczególnych punktach.

5. Literatura

- [1] Nowak M., Barlik R.: Poradnik inżyniera energoelektronika. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1998.