



PODSTAWY ENERGOELEKTRONIKI
LABORATORIUM

Ćwiczenie 5

Przetwornica dławikowa podwyższająca napięcie

W laboratorium należy wykonać wszystkie pomiary, o których mowa w paragrafie 4.2 instrukcji. Opracowania wyników zgodnie z paragrafem 4.3 można dokonać w domu.

Opracowanie:
Adam Olszewski
Łukasz Starzak

Łódź 2006

Spis treści

1. Wstęp.....	3
2. Moc a wydzielanie energii w układach elektronicznych.....	4
2.1. Moc chwilowa i moc czynna	4
2.2. Obliczanie mocy czynnej	4
Napięcie i prąd stały	5
Stałe napięcie, zmienny prąd.....	5
3. Przetwornica podwyższająca napięcie.....	7
3.1. Przekształcanie energii elektrycznej	7
3.2. Przetwornice jako przekształtniki	7
3.3. Przetwornica podwyższająca napięcie – koncepcja układu	8
Układ wyjściowy.....	8
Pierwszy krok do zbudowania przetwornicy.....	9
Układ z cewką	9
Układ z cewką i kondensatorem.....	13
3.4. Zastosowanie tranzystorów MOSFET	15
3.5. Kompletny obraz działania przetwornicy podwyższającej napięcie	16
3.6. Sprawność.....	19
4. Przebieg ćwiczenia	23
4.1. Układ pomiarowy.....	23
4.2. Wykonanie pomiarów.....	24
Pomiary wstępne	24
Obserwacja i rejestracja charakterystycznych przebiegów w układzie.....	25
Pomiar charakterystycznych przebiegów w poszczególnych punktach	
układu.....	26
Pomiar charakterystyk układu.....	27
4.3. Opracowanie wyników.....	27
5. Oczekiwana zawartość sprawozdania	29
6. Literatura	29

1. Wstęp

W ćwiczeniu badana jest impulsowa przetwornica dławikowa podwyższająca napięcie (ang. *boost converter*).

Celem niniejszego ćwiczenia jest:

- przeanalizowanie działania badanego przekształtnika DC/DC;
- wyznaczenie charakterystyki przetwarzania przekształtnika;
- wyznaczenie charakterystyki sprawności układu.

2. Moc a wydzielanie energii w układach elektronicznych

2.1. Moc chwilowa i moc czynna

Moc dostarczona do układu w każdej chwili t równa się iloczynowi napięcia chwilowego na jego zaciskach i prądu chwilowego płynącego przez ten układ:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t). \quad (1)$$

Moc jest wielkością zmienną w czasie, tak samo jak zmienne są napięcie i prąd. Dla precyzji wielkość tę często nazywa się mocą chwilową.

Z dostarczaniem mocy do układu jest zawsze związane wydzielanie w nim energii w różnej postaci (ciepła, światła, dźwięku, ruchu itd.). Energia wydzielona od początku obserwacji ($t = 0$) do pewnej chwili t równa jest całce z mocy chwilowej za ten odcinek czasu:

$$E(t) = \int_0^t p(t) dt. \quad (2)$$

Energia jest więc wielkością zmienną w czasie, która w przypadku układów pobierających (a nie oddających) energię zawsze stopniowo narasta. Z tego powodu wielkość ta nie ma praktycznego zastosowania do charakteryzowania procesu wydzielania energii w układach.

Poszukiwania wskaźnika, który opisywałby procesy energetyczne zachodzące w układach za pomocą jednej wartości liczbowej, doprowadziły do wprowadzenia pojęcia mocy czynnej. Z definicji jest ona równa wartości średniej z mocy chwilowej $p(t)$ obliczonej za okres zmienności T :

$$P = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt. \quad (3)$$

Aby więc obliczyć moc czynną, konieczne jest założenie, że moc chwilowa wykazuje okresową powtarzalność. W takim przypadku całka może być oczywiście obliczona za dowolny przedział czasu o długości T (niekoniecznie od $t = 0$).

Z porównania wzorów (3) i (2) widać, że moc czynna bardzo dobrze nadaje się do opisywania wydzielania energii w układzie. Przyrost energii wydzielonej w układzie w danym odcinku czasu Δt jest równy iloczynowi mocy czynnej i długości tego odcinka:

$$\Delta E(\Delta t) = P \cdot \Delta t. \quad (4)$$

Dokładnie rzecz biorąc, jest tak pod warunkiem, że Δt jest całkowitą wielokrotnością okresu T , co w przybliżeniu jest spełnione jeżeli tylko $\Delta t \gg T$.

2.2. Obliczanie mocy czynnej

Należy pamiętać, że wzór definicyjny (3) jest jedynym słusznym w każdych warunkach. Wszelkie inne wzory pozwalające na obliczenie mocy czynnej są ważne jedynie wtedy, gdy rozpatrywany układ spełnia przyjęte założenia. Stosowanie definicji jest jednak zwykle niewygodne, a w czasie, gdy nie dysponowano współczesnymi narzędziami

komputerowymi, bywało niemożliwe. W związku z tym wyprowadzono szereg zależności pozwalających w prosty sposób obliczyć moc czynną w konkretnych warunkach. Przez „konkretne warunki” należy rozumieć kształt przebiegów prądu i napięcia. Poniżej przedstawione zostaną przypadki, z którymi mamy do czynienia w niniejszym ćwiczeniu.

Napięcie i prąd stały

Najprostszym przypadkiem jest sytuacja, w której stałe napięcie przyłożone do zacisków układu powoduje przepływ prądu stałego. Napięcie i prąd można wówczas opisać następującymi równaniami:

$$\begin{cases} u(t) = U \\ i(t) = I \end{cases} \quad (5)$$

gdzie U i I oznaczają stałe wartości napięcia i prądu. Podstawiając powyższe do definicji (3) otrzymujemy:

$$P = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_T u(t)i(t) dt = \frac{1}{T} \int_T UI dt = \frac{1}{T} UI \int_T dt = \frac{1}{T} UIT = UI. \quad (6)$$

Powyższa zależność stosuje się do wszelkich układów o charakterze rezystancyjnym, np. do odbiornika w postaci opornika.

Stałe napięcie, zmienny prąd

W tym przypadku zależność prądu od czasu $i(t)$ może być dowolna okresowa z pewnym okresem T . Ponieważ napięcie u jest stałe, więc okres zmienności prądu będzie jednocześnie okresem zmienności mocy chwilowej i za ten okres należy obliczyć wartość średnią. Z definicji mamy

$$P = \frac{1}{T} \int_T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_T u(t)i(t) dt = \frac{1}{T} \int_T [U \cdot i(t)] dt. \quad (7)$$

Po wyłączeniu stałej U przed całkę otrzymujemy

$$P = U \cdot \frac{1}{T} \int_T i(t) dt. \quad (8)$$

Zwróćmy uwagę, że drugi czynnik tego iloczynu wyraża wartość średnią prądu i . A więc

$$P = U \cdot I_{AV}. \quad (9)$$

Wyznaczenie wartości średniej prądu jest kolejnym problemem do rozwiązania. Jest na to kilka sposobów.

1. Jeżeli dysponujemy sondą prądową i oscyloskopem, to na podstawie obserwacji przebiegu prądu można zdecydować się na aproksymację tego przebiegu jakimś przebiegiem o znanej wartości średniej, np. trójkątnym lub sinusoidalnym. Następnie na oscyloskopie wyznaczamy parametry tego przebiegu występujące w odpowiednim wzorze (np. amplitudę sinusoidy) i podstawiamy do wzoru.

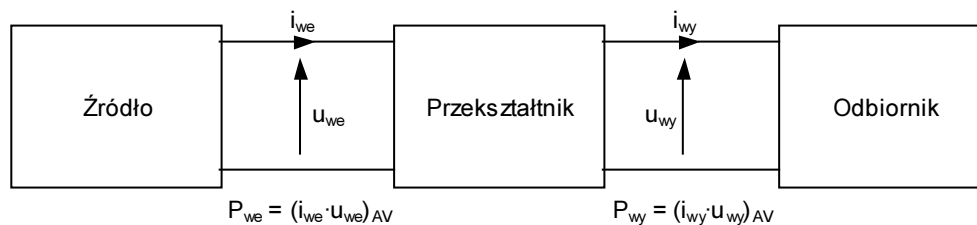
2. Jeżeli dane z oscyloskopu można przesłać do komputera, to wartość średnią można obliczyć z definicji jako całkę. Do tego celu można zastosować arkusz kalkulacyjny, program do obliczeń numerycznych jak np. Matlab, lub oprogramowanie dostarczone przez producenta oscyloskopu (o ile posiada taką funkcję). Oscyloskop może również mieć wbudowaną funkcję wartości średniej – odbywa się to wówczas w identyczny sposób, jak w programie komputerowym.
3. Jeżeli dysponujemy amperomierzem wartości średniej, to można taki przyrząd włączyć w obwód i odczytać wartość bezpośrednio. W obecnej chwili mierniki przeznaczone do pomiaru wartości średniej są rzadko produkowane. Zwróćmy jednak uwagę na zasadę, na jakiej multimetry mierzą wartość stałą przebiegów. Otóż aby wyeliminować wpływ szumów układu badanego i samego miernika, w multimetrze następuje najpierw zgromadzenie dużej liczby próbek, a następnie numeryczne ich uśrednienie; dopiero ten wynik pojawia się na wyświetlaczu. W przypadku przebiegów wolno zmiennych wartość wyświetlana będzie się stopniowo zmieniać w takt zmian wielkości mierzonej. Jednak w przypadku przebiegu szybko zmiennego wartość wyświetlana będzie jego wartością średnią za czas całkowania wynikający z wewnętrznego algorytmu multimetru.

W ćwiczeniu badany jest układ o częstotliwości pracy kilkudziesięciu kiloherców. Przyjmując, że multimetr uśrednia pomiary za 0,5 sekundy, w czasie całkowania mieści się co najmniej kilkanaście tysięcy okresów przebiegu badanego. Stąd przebieg badany zostanie bardzo dobrze uśredniony, a patrząc na wyświetlacz nawet nie zauważymy, że ma on charakter zmienny. W tym przypadku multimetr ustawiony w tryb pomiaru wartości stałej (DC) pracuje więc *de facto* jako miernik wartości średniej.

3. Przetwornica podwyższająca napięcie

3.1. Przekształcanie energii elektrycznej

W tej części ćwiczenia badany jest układ przetwornicy podwyższającej napięcie. Przetwornice należą do grupy układów elektronicznych zwanych przekształtnikami, których zadaniem jest przekształcanie energii elektrycznej poprzez zmianę parametrów prądu lub napięcia. Te parametry to np. natężenie prądu stałego lub wartość napięcia stałego, amplituda prądu lub napięcia przemiennego, częstotliwość prądu lub napięcia oraz charakter przebiegu (stały – przemienny). Ogólnie rzecz biorąc, przekształtnik pobiera ze źródła zasilania energię elektryczną, co oznacza przepływ pewnego prądu i_{we} przy pewnym napięciu u_{we} , a następnie oddaje do odbiornika energię elektryczną przekształconą, co oznacza przepływ innego prądu i_{wy} przy innym napięciu u_{wy} (zob. rys. 1).



Rys. 1. Ogólny schemat układu przekształcania energii elektrycznej

Przekaz energii elektrycznej jest charakteryzowany przez moc czynną wejściową P_{we} i moc czynną wyjściową P_{wy} , bowiem to moc czynna odpowiada energii użytecznej, czyli takiej, którą faktycznie można wykorzystać np. do zaświecenia żarówki czy wprowadzenia w ruch windy. W idealnym przypadku w przekształtniku nie ulega zmianie ilość energii, a jedynie forma jej przekazu (przebieg prądu, przebieg napięcia). W przyrodzie nie ma jednak układów idealnych, dlatego w przekształtniku pewna ilość energii jest bezpowrotnie tracona, w związku z tym $P_{wy} < P_{we}$. Z tego punktu widzenia ważnym parametrem każdego przekształtnika jest sprawność energetyczna, którą definiuje się jako stosunek mocy czynnej wyjściowej (dostarczanej do odbiornika) do mocy czynnej wejściowej (pobieranej ze źródła):

$$\eta = \frac{P_{wy}}{P_{we}}. \quad (10)$$

3.2. Przetwornice jako przekształtniki

Podstawowej klasyfikacji przekształtników dokonuje się na podstawie kryterium stałości–zmienności wielkości wejściowej i wyjściowej (za wielkość tę przyjmuje się prąd lub napięcie w zależności od zasady działania danego układu). Możliwe są tu 4 kombinacje:

- 1) zmienna wielkość wejściowa, zmienna wielkość wyjściowa – przekształtniki AC/AC, do których należą np. sterowniki prądu (przekształcają przebieg zmienny o pewnej wartości skutecznej na przebieg zmienny o innej wartości skutecznej) i przemienniki częstotliwości (przekształcają przebieg zmienny o pewnej częstotliwości na przebieg zmienny o innej częstotliwości);

- 2) zmienna wielkość wejściowa, stała wielkość wyjściowa – przekształtniki AC/DC, zwane też prostownikami, gdyż przekształcają przebieg zmienny na przebieg stały („wyprostowany”);
- 3) stała wielkość wejściowa, zmienna wielkość wyjściowa – przekształtniki DC/AC, zwane też falownikami, gdyż przekształcają przebieg stały na przebieg przemienny („falujący”);
- 4) stała wielkość wejściowa, stała wielkość wyjściowa – przekształtniki DC/DC, czyli przetwornice prądu stałego (chodzi o prąd wyjściowy), które zamieniają przebieg stały o pewnej wartości na przebieg stały o innej wartości.

Z przetwornicami prądu stałego stykamy się codziennie. Stanowią one podstawowy składnik zasilaczy impulsowych (np. komputerowych), ładowarek oraz niektórych układów sterowania silników prądu stałego; mogą być też wykorzystywane w ściemniaczach lamp fluorescencyjnych (światłówek) i halogenowych. Poza tym przetwornice podwyższające napięcie, ze względu na ich specyficzną konstrukcję, stosuje się jako dodatkowy blok na wejściu układu w celu zmniejszenia poziomu zaburzeń elektromagnetycznych emitowanych przez układ do sieci zasilającej (zagadnienie to stanowi jeden z aspektów tzw. kompatybilności elektromagnetycznej). Zastosowanie to jest powszechne w przypadku droższych komputerowych zasilaczy impulsowych.

Najprostsza przetwornica zawiera 4 elementy:

- 1) przyrząd półprzewodnikowy sterowalny,
- 2) przyrząd półprzewodnikowy niesterowalny,
- 3) dławik (cewkę),
- 4) kondensator.

Łącząc te elementy w różny sposób można uzyskać 3 podstawowe układy o różnych funkcjach: obniżający napięcie, podwyższający napięcie oraz odwracający napięcie.

Właśnie układ z tej podstawowej grupy jest obiektem badań w niniejszym ćwiczeniu. Trzeba jednak wiedzieć, że często dla uzyskania wymaganych parametrów pracy przetwornicy konieczne jest zastosowanie układu bardziej skomplikowanego, co może oznaczać np. dodanie obwodu sprzężenia zwrotnego, zabezpieczenia przeciwprzetężeniowego, czy też transformatora separującego wejście od wyjścia.

3.3. Przetwornica podwyższająca napięcie – koncepcja układu

Układ wyjściowy

W jaki więc sposób należy połączyć nasze 4 elementy, aby uzyskać układ podwyższający napięcie? Zaczniemy od początku, a więc od narysowania układu bez przekształtnika; na razie składa się on ze źródła napięcia stałego o pewnej wartości U_{we} oraz odbiornika o pewnej rezystancji R_o – zob. rys. 2.

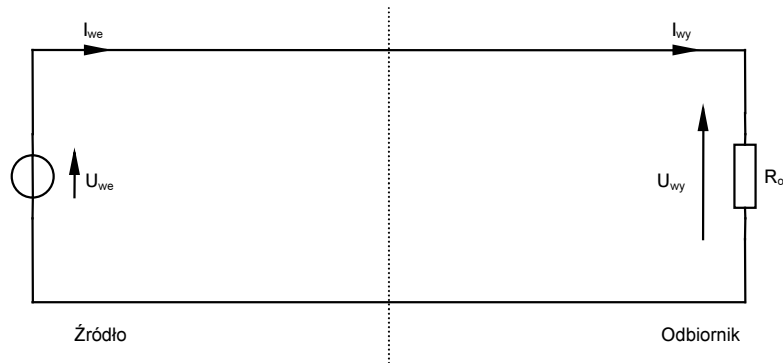
Naszym zadaniem jest uzyskanie, dla zadanego źródła i obciążenia, napięcia U_{wy} większego od U_{we} . Z prawa Ohma wiadomo, że

$$U_{wy} = I_{wy} R_o \quad (11)$$

oraz

$$I_{wy} = I_{we} = \frac{U_{we}}{R_o}. \quad (12)$$

Wynika z tego, że aby otrzymać $U_{wy} > U_{we}$, należy w jakiś sposób uzyskać $I_{wy} > U_{we} / R_o$, nie zmieniając samego R_o .



Rys. 2. Wyjściowy układ bez przekształtnika

Pierwszy krok do zbudowania przetwornicy

Jak wspomniano w paragrafie 3.2, mamy do dyspozycji dwa elementy półprzewodnikowe. W energoelektronice naturalne jest stosowanie ich jako kluczy – przełączników. Z jednego przyrządu półprzewodnikowego można uzyskać klucz na przemian załączający i wyłączający prąd w danej gałęzi; natomiast z dwóch przyrządów można stworzyć klucz przełączający prąd między dwiema gałęziami. Gdyby taki klucz dwupołożeniowy wstawić do naszego układu i cyklicznie na pewien czas przełączać nim prąd do dodatkowej gałęzi z rezystancją $R_{male} < R_o$, to przez część okresu pracy klucza prąd wejściowy wynosić będzie

$$I_{we} = \frac{U_{we}}{R_{male}} > \frac{U_{we}}{R_o}. \quad (13)$$

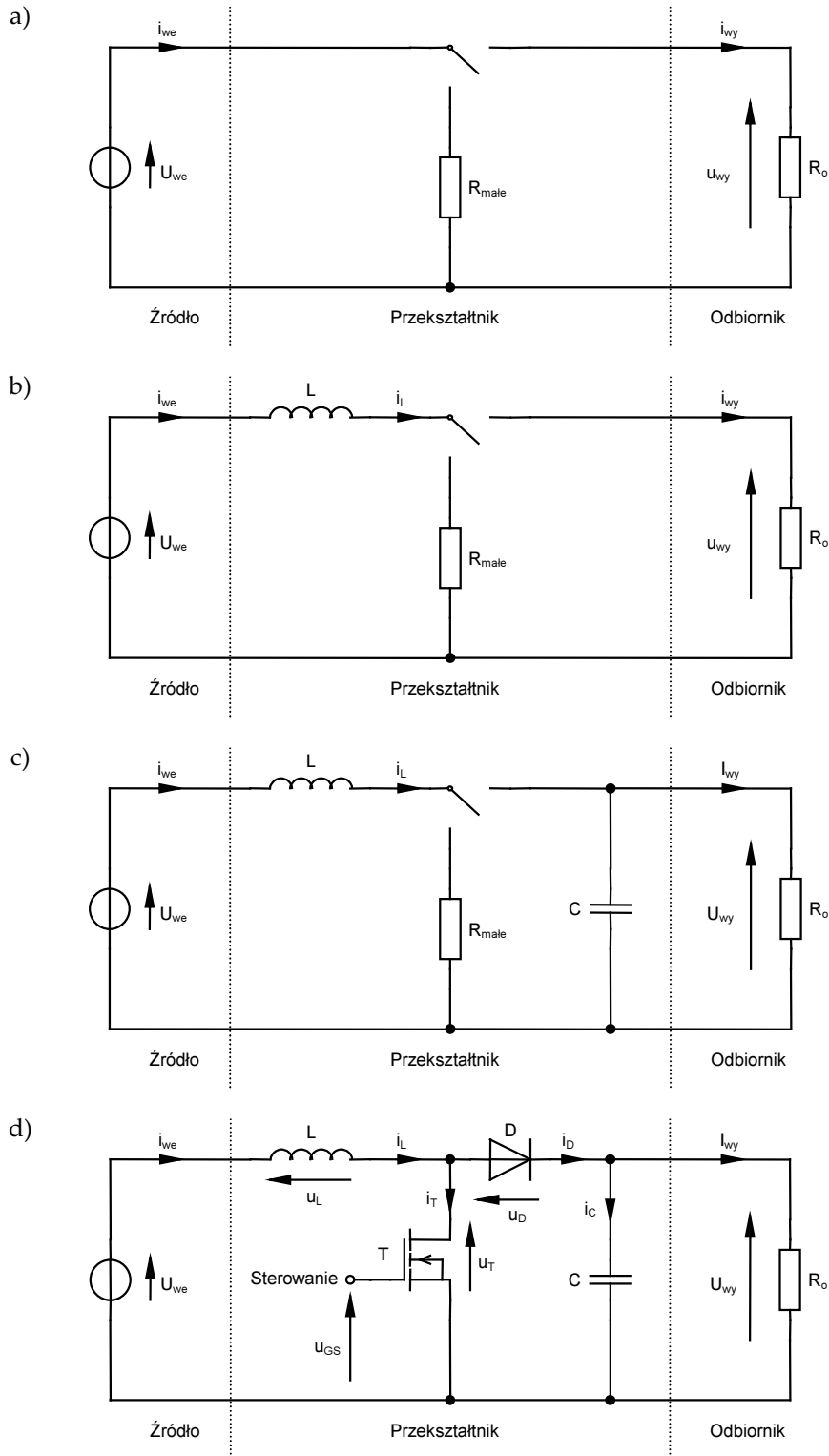
Układ taki przedstawiono na rys. 3a, uwzględniając w oznaczeniach, że z powodu działania klucza, prądy i_{we} i i_{wy} oraz napięcie u_{wy} przestały być stałe – stąd małe litery. Natomiast przebieg prądu wejściowego przedstawiono na rys. 4a. Założono, że klucz jest przełączany z okresem impulsowania T_i , przy czym przez czas $D \cdot T_i$ prąd jest kierowany przez R_{male} – w związku z czym przez czas $(1-D) \cdot T_i$ prąd kierowany jest przez R_o . Liczbę D (zawierającą się w przedziale od 0 do 1) nazywa się współczynnikiem wypełnienia impulsów sterujących, w skrócie – współczynnikiem wypełnienia.

Układ z cewką

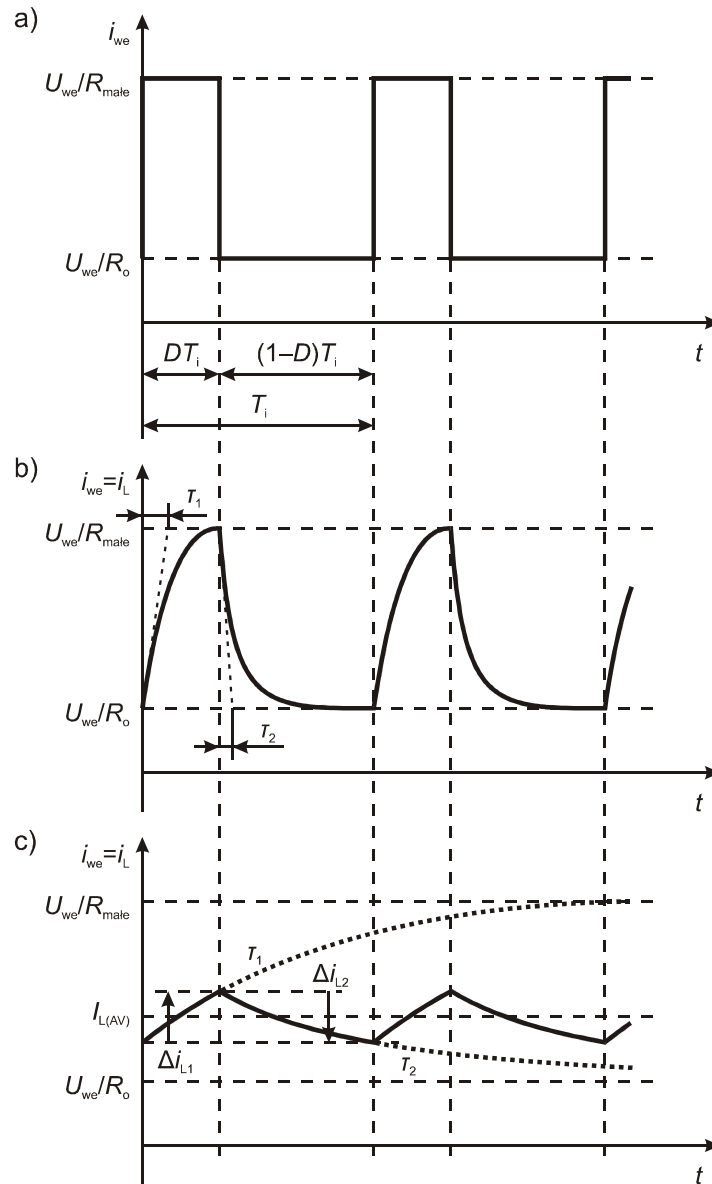
Zauważmy jednak, że potencjał płynącego w powyższym układzie większego prądu pozostaje niewykorzystany, bowiem po przełączeniu klucza na gałąź z odbiornikiem od razu zaczyna płynąć prąd U_{we} / R_o i napięcie wyjściowe jest takie samo jak w układzie początkowym. W takim razie znajdziemy sposób na to, aby ten duży prąd U_{we} / R_{male} nie

przestawał płynąć od razu. Elementem, który przeciwstawia się zmianom prądu jest, jak wiadomo, cewka, która znajduje się w zbiorze dostępnych elementów.

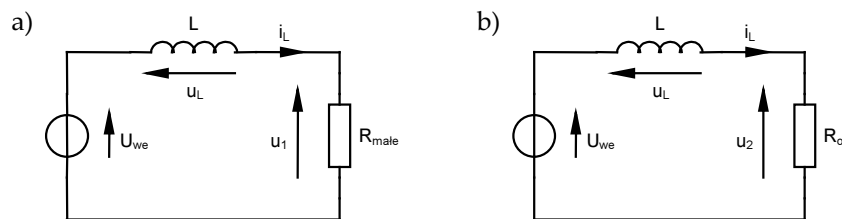
Aby duży prąd nie przestał płynąć, trzeba dławik umieścić na jego drodze, a więc w gałęzi zawierającej U_{we} lub w gałęzi zawierającej R_{male} . Oprócz tego jednak zależy nam, aby duży prąd mógł być przełączony do gałęzi z obciążeniem. Dlatego dławik musi być włączony przed rozgałęzieniem, co przedstawiono na rys. 3b.



Rys. 3. Układ z przekształtnikiem w postaci: a) samego klucza dwupółosiowego; b) klucza i dławika; c) klucza, dławika i kondensatora; d) kluczy rzeczywistych, dławika i kondensatora



Rys. 4. Przebieg prądu wejściowego w układach z rys. 3: a) brak dławika (rys. 3a); b) dławik (rys. 3b) o małej indukcyjności; c) dławik od dużej indukcyjności



Rys. 5. Zredukowana topologia obwodu z rys. 3b: a) w fazie 1; b) w fazie 2

Im większa indukcyjność dławika, tym silniej będzie się on przeciwstawiał zmianom prądu, czyli prąd ten będzie wolniej narastał do U_{we}/R_{male} i wolniej opadał do U_{we}/R_o ; zmiany prądu dławika będą wykładnicze ze stałą czasową odpowiednio $\tau_1 = L/R_{male}$ lub $\tau_2 = L/R_o$ (zob. rys. 4b). Jeżeli indukcyjność będzie odpowiednio duża, możemy uzyskać tak duże stałe czasowe, że między kolejnymi przełączeniami klucza prąd ani nie zdąży narosnąć do U_{we}/R_{male} , ani opaść do U_{we}/R_o . Jednocześnie zmiany prądu będą praktycznie liniowe,

gdyż widoczny będzie tylko początkowy, prawie liniowy fragment przebiegu wykładniczego. Zilustrowano to na rys. 4c.

Spróbujemy teraz obliczyć, ile zyskaliśmy na wprowadzeniu dławika. W fazie 1, trwającej przez czas DT_i , prąd płynie w oczku $U_{we}-L-R_{male}$ (zob. rys. 5a). Oznaczmy napięcie na R_{male} przez u_1 . Wówczas z napięciowego prawa Kirchhoffa otrzymujemy:

$$U_{we} - u_1 - u_L = 0, \quad (14)$$

skąd

$$U_{we} - i_L R_{male} = L \frac{di_L}{dt}. \quad (15)$$

Założmy, że indukcyjność L jest duża, w związku z czym zmiany prądu dławika i_L wokół jego wartości średniej $I_{L(AV)}$ są niewielkie i liniowe. W takim razie zmienny prąd dławika można przybliżyć stałą wartością $I_{L(AV)}$, zaś pochodną tego prądu – ilorazem $\Delta i_L / \Delta t$:

$$U_{we} - I_{L(AV)} R_{male} = L \frac{\Delta i_L}{\Delta t}. \quad (16)$$

Przyjmijmy, zgodnie z rys. 4c, że zmiana prądu wynosi $+\Delta i_{L1}$ (wzrost prądu) i dokonuje się na odcinku czasu o długości DT_i . Ostatecznie otrzymujemy

$$U_{we} - I_{L(AV)} R_{male} = L \frac{\Delta i_{L1}}{DT_i}. \quad (17)$$

Rozważmy teraz fazę 2, trwającą przez czas $(1-D)T_i$. Prąd płynie w oczku $U_{we}-L-R_o$ (zob. rys. 5b) i odkłada na rezystancji R_o pewne napięcie u_2 . Z napięciowego prawa Kirchhoffa

$$U_{we} - u_2 - u_L = 0, \quad (18)$$

otrzymujemy

$$U_{we} - I_{L(AV)} R_o = L \frac{-\Delta i_{L2}}{(1-D)T_i}, \quad (19)$$

przy czym znak „-” przy zmianie prądu wynika z faktu, że w fazie 2 prąd ten maleje.

Przypomnijmy sobie, do czego dążymy: chcemy uzyskać prąd odbiornika większy niż U_{we} / R_o . Ponieważ przez odbiornik płynie obecnie (w fazie 2) prąd $I_{L(AV)}$, więc trzeba obliczyć jego wartość. Skorzystamy tu z oczywistego faktu, że $\Delta i_{L1} = \Delta i_{L2}$; w przeciwnym razie, gdyby np. $\Delta i_{L1} > \Delta i_{L2}$, prąd rósłby do nieskończoności, co w rzeczywistości nie ma miejsca (można to zaobserwować w laboratorium). Wyliczając Δi_{L1} z równania (17) i Δi_{L2} z równania (19) i przyrównując jedno do drugiego, otrzymujemy

$$\frac{DT_i}{L} (U_{we} - I_{L(AV)} R_{male}) = \frac{(1-D)T_i}{L} (U_{we} - I_{L(AV)} R_o), \quad (20)$$

a po przekształceniach

$$I_{L(AV)} = \frac{U_{we}}{(1-D)R_o + DR_{male}}. \quad (21)$$

Można łatwo udowodnić, że skoro $R_{male} < R_o$, to mianownik jest zawsze większy od R_o , a więc $I_{L(AV)} > U_{we} / R_o$. O to chodziło, jednak jest to sukces połowiczny. Prąd o tej wartości płynie przez odbiornik tylko przez czas $(1-D)T_i$, natomiast przez pozostałą część okresu prąd odbiornika wynosi 0. Jaki jest tego skutek dla napięcia wyjściowego? W najlepszym razie, gdy $R_{male} = 0$, prąd dławika wyniesie

$$I_{L(AV)} = \frac{1}{1-D} \frac{U_{we}}{R_o}. \quad (22)$$

W takim razie napięcie wyjściowe

$$u_{wy} = \begin{cases} \frac{1}{1-D} \frac{U_{we}}{R_o} \cdot R_o = \frac{U_{we}}{1-D} & \text{w fazie 2} \\ 0 \cdot R_o = 0 & \text{w fazie 1} \end{cases} \quad (23)$$

Średnio uzyskujemy napięcie wyjściowe

$$U_{wy(AV)} = \frac{1}{T_i} \int_{T_i} u_{wy} dt = \frac{1}{T_i} \left(\int_{(1-D)T_i} \frac{U_{we}}{1-D} dt + \int_{DT_i} 0 dt \right) = \frac{1}{T_i} \frac{U_{we}}{1-D} (1-D)T_i = U_{we}. \quad (24)$$

Okazuje się więc, że w kwestii napięcia jesteśmy w punkcie wyjścia mimo uzyskania korzystnego wzrostu prądu płynącego przez odbiornik – a to dlatego, że prąd, mimo że większy, nadal płynie przez odbiornik tylko przez część okresu. Poszliśmy jednak w dobrym kierunku, gdyż dla układu z rys. 3a średnie napięcie wyjściowe wynosiło DU_{we} (można to prosto obliczyć zapisując równania analogiczne do dwóch powyższych), a więc nawet mniej niż w układzie bez przekształtnika. Otrzymane do tej pory układy mają też drugą wadę – trudno je nazwać przekształtnikami DC/DC, gdyż napięcie wyjściowe okresowo zmienia się od zera do wartości maksymalnej.

Układ z cewką i kondensatorem

W zestawie elementów pozostał jeszcze nie wykorzystany kondensator. Jeżeli będzie on miał wystarczająco dużą pojemność, to można w nim zmagazynować energię potrzebną do zasilania odbiornika w fazie 1, gdy prąd dławika płynie przez rezystor R_{male} . Jeżeli kondensator ma służyć jako „bateria” dla odbiornika, to oczywiście należy go przyłączyć bezpośrednio na zaciski rezystancji R_o . Taki obwód przedstawia rys. 3c, natomiast rys. 6 pozwala zrozumieć jego działanie. W fazie 1 prąd dławika zasila odbiornik i jednocześnie ładuje kondensator (rys. 6a); w fazie 2 prąd dławika płynie przez rezystancję R_{male} , a odbiornik jest zasilany z kondensatora C (rys. 6b). Dodatkowo kondensator będzie się przeciwstawiał zmianom napięcia wyjściowego; przy odpowiednio dużej wartości C napięcie to będzie praktycznie stałe i układ stanie się rzeczywistym przekształtnikiem DC/DC.

Sprawdźmy jednak, czy nasze przewidywania są słuszne. Oznaczmy stałe (dzięki dużej pojemności C) napięcie wyjściowe przez U_{wy} i przepiszmy równanie (18):

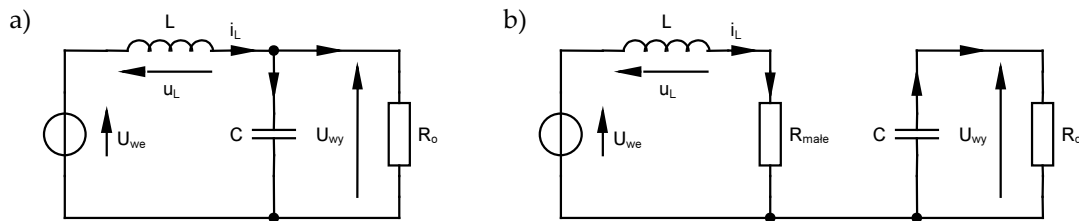
$$\begin{aligned} U_{we} - u_2 - u_L &= 0, \\ U_{we} - U_{wy} &= L \frac{di_L}{dt}. \end{aligned} \quad (25)$$

Skoro jego lewa strona jest stała, to i prawa strona musi być stała. Oznacza to, że prąd dławika i_L będzie narastał liniowo (stała pochodna), można go więc tak jak poprzednio wyrazić ilorazem różnic [por. równanie (19)]:

$$U_{we} - U_{wy} = L \frac{-\Delta i_{L2}^*}{(1-D)T_i}, \quad (26)$$

gdzie „*” wskazuje, że zmiany prądu cewki mogą mieć inną amplitudę niż w układzie bez kondensatora. W fazie 1 nic się nie zmieniło, możemy jedynie mieć do czynienia z innymi wartościami $I_{L(AV)}$ i Δi_{L1} ; można więc przepisać równanie (17):

$$U_{we} - I_{L(AV)}^* R_{male} = L \frac{\Delta i_{L1}^*}{DT_i}. \quad (27)$$



Rys. 6. Zredukowana topologia obwodu z rys. 3c: a) w fazie 1; b) w fazie 2

Tak jak poprzednio, wyliczmy i przyrównajmy zmiany prądu dławika w fazie 1 i 2. Otrzymamy

$$\frac{DT_i}{L} (U_{we} - I_{L(AV)}^* R_{male}) = -\frac{(1-D)T_i}{L} (U_{we} - U_{wy}). \quad (28)$$

Założmy, że konstruując układ zapewnimy na tyle małą wartość R_{male} , że spadek napięcia na tej rezystancji $I_{L(AV)}^* R_{male} \ll U_{we}$ i można go zaniedbać. Wówczas po uproszczeniu i przekształceniach otrzymujemy ostatecznie wyrażenie na napięcie wyjściowe

$$U_{wy} = \frac{U_{we}}{1-D}. \quad (29)$$

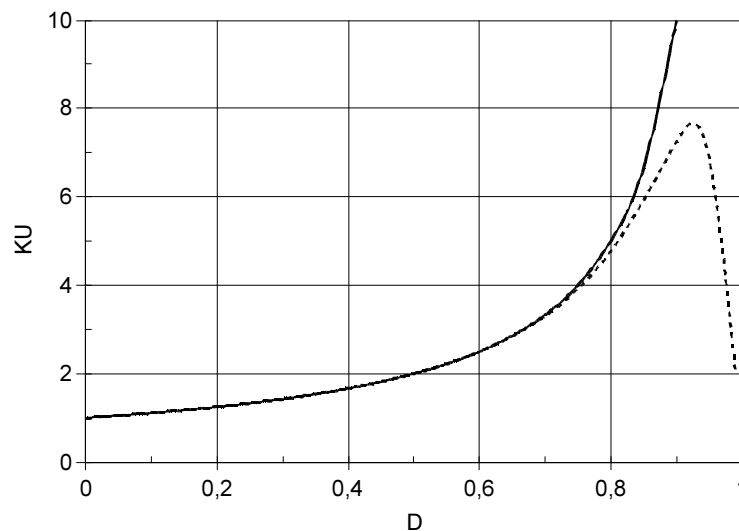
Ponieważ $0 < D < 1$, więc $U_{wy} > U_{we}$. Tym samym zaprojektowaliśmy przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie. Wykorzystaliśmy przy tym wszystkie 4 elementy, wykazując tym samym, że nie da się zbudować przetwornicy z mniejszej ich liczby. Każdy ma do spełnienia swoje zadanie.

Przekształcając zależność (29) otrzymuje się charakterystykę współczynnika przetwarzania napięcia dla układu idealnego:

$$K_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{1}{1-D}. \quad (30)$$

Charakterystykę tę przedstawiono na rys. 7 (linia ciągła).

W rzeczywistym układzie współczynnik przetwarzania napięcia K_U nigdy nie będzie dążył do nieskończoności, lecz zacznie spadać do 1. Dzieje się tak z powodu wzrostu strat energii w elementach układu, co uniemożliwia dostarczenie odpowiednio dużej mocy na wyjście. Osobnym ograniczeniem jest skończona wydajność prądowa źródła zasilania. Typowy przebieg charakterystyki przetwarzania uwzględniającej nieidealność kluczy półprzewodnikowych (głównie niezerowe spadki napięć w stanie przewodzenia) naniesiono na rys. 7 linią przerywaną.



Rys. 7. Charakterystyka przetwarzania przetwornicy podwyższającej napięcie: linia ciągła – układ idealny; linia przerywana – po uwzględnieniu spadków napięć na kluczach półprzewodnikowych

3.4. Zastosowanie tranzystorów MOSFET

Jako przyrządy półprzewodnikowe do konstrukcji klucza dwupołożeniowego wykorzystuje się najczęściej diodę i tranzystor MOSFET. Sposób, w jaki należy włączyć do obwodu te elementy, pokazany został na rys. 3d. Tranzystor MOSFET w stanie załączenia stanowi, jak wiadomo, pewną rezystancję rzędu 0,1–1 Ω ; może on zatem pełnić jednocześnie rolę rezystora $R_{małe}$.

Popularność tranzystorów MOSFET w przetwornicach wiąże się z wymaganiem wysokiej częstotliwości pracy tych układów. Wraz ze spadkiem częstotliwości rosną bowiem zawsze konieczne rozmiary elementów magnetycznych – w tym przypadku dławika. Oznacza to nie tylko wzrost objętości i masy całego układu, ale także wzrost strat mocy w dławiku. Tranzystory MOSFET są obecnie przyrządami półprzewodnikowymi mocy o najmniejszych czasach załączania i wyłączenia. Dzięki temu mogą pracować z wysoką częstotliwością, a jednocześnie przy małych stratach energii, gdyż faza przełączania trwa krótko. Większa rezystancja tranzystorów MOSFET w stanie załączenia (w stosunku do

przrzędów bipolarnych) jest oczywiście niekorzystna, ma jednak tutaj mniejsze znaczenie, gdyż w miarę wzrostu częstotliwości decydujące stają się straty mocy w czasie przełączania.

Klucz w postaci diody i tranzystora MOSFET nie jest jedynym stosowanym rozwiązaniem. Z jednej strony spotyka się – choć dużo rzadziej – przetwornice z tranzystorami BJT. Z drugiej – istnieją konstrukcje z dwoma tranzystorami MOSFET, z których jeden, odpowiednio sterowany, zastępuje diodę.

3.5. Kompletny obraz działania przetwornicy podwyższającej napięcie

Przeprowadzając nieskomplikowane obliczenia można uzyskać komplet zależności opisujących przebiegi w układzie przetwornicy z rys. 3d. W tym celu przyjmuje się z reguły założenie o idealności przekształtnika, tzn.:

- 1) napięcie wyjściowe U_{wy} jest idealnie stałe dzięki zerowej rezystancji wewnętrznej i nieskończonej dużej stabilności generatora;
- 2) prąd wyjściowy I_{wy} jest idealnie stały dzięki nieskończonej dużej pojemności kondensatora C;
- 3) klucz półprzewodnikowy (dioda, tranzystor) załączony ma zerową rezystancję, więc zerowy spadek napięcia;
- 4) klucz wyłączony ma nieskończonej dużej rezystancję, więc zerowy prąd;
- 5) przełączanie kluczy jest nieskończonej szybkie.

Zależność napięcia wyjściowego od wejścia i sterowania dla powyższych założeń określa wyprowadzony już wzór (29):

$$U_{wy} = \frac{U_{we}}{1-D}, \quad (31)$$

skąd dla odbiornika w postaci opornika o wartości R_o

$$I_{wy} = \frac{U_{wy}}{R_o} = \frac{U_{we}}{(1-D) \cdot R_o}. \quad (32)$$

Amplitudę tętnienia prądu dławika Δi_L można obliczyć przekształcając zależność (27) i podstawiając – zgodnie z założeniem 3 – $R_{mala} = 0$:

$$\Delta i_L = \frac{U_{we}}{L} \frac{D}{f_i}, \quad (33)$$

gdzie $f_i = T_i^{-1}$ jest częstotliwością pracy przetwornicy (częstotliwością powtarzania impulsów sterujących).

Aby podać zależność na składową stałą prądu dławika $I_{L(AV)}$ musimy przeanalizować działanie układu w jego ostatecznej postaci (rys. 3d). Przebiegi we wszystkich punktach i elementach układu zostały zamieszczone na rys. 8 (przebiegi stałe w czasie pominięto).

Faza 1 – o czasie trwania DT_i . Podanie impulsu (przedstawionego tu w uproszczeniu jako prostokąt) na bramkę tranzystora powoduje jego załączenie. Napięcie na tranzystorze u_T spada więc do zera (w rzeczywistości – do pewnej wartości $I_D \cdot R_{DS(on)}$), a prąd i_T przyjmuje wartość, którą w tym momencie osiąga prąd dławika i_L , jako że prąd dławika zamyka się w obwodzie U_{we} –L–T. Dioda w tym momencie wyłącza się, gdyż załączony tranzystor zwiernia

jej anodę z masą, w wyniku czego napięcie na diodzie u_D jest ujemne i wynosi dokładnie $-U_{wy}$; prąd diody i_D jest oczywiście zerowy. Identycznie do masy zwierana jest prawa końcówka dławika, w wyniku czego napięcie u_L na nim wynosi U_{we} . Prąd dławika w tej fazie narasta, gdyż jego pochodna jest proporcjonalna do napięcia u_L . Ponieważ przy idealnej przetwornicy przez odbiornik musi ciągle płynąć stały prąd I_{wy} , przepływ tego prądu zapewnia kondensator C; dlatego prąd i_C w tej fazie musi wynosić $-I_{wy}$.

Faza 2 – o czasie trwania $(1-D)T_i$. Zdjęcie napięcia z bramki tranzystora powoduje jego wyłączenie (przyjmujemy, że natychmiastowe), a więc prąd tranzystora maleje do zera. W wyniku tego (nagły zanik prądu w dotychczasowym obwodzie $U_{we}-L-T$) na dławiku indukuje się ujemne napięcie. W chwili, gdy suma napięć $U_{we} - u_L$ ($u_L < 0$) przekroczy wartość U_{wy} (w rzeczywistości – gdy przewyższy U_{wy} o napięcie progowe diody), dioda załącza się i przejmuje dotychczasowy prąd dławika ($i_D = i_L$). Dzieje się to bardzo szybko, a w naszym uproszczeniu – natychmiastowo. Od tego momentu napięcie na diodzie $u_D = 0$, natomiast napięcie na tranzystorze wynosi U_{wy} , gdyż załączona dioda zwiera dren z górną końcówką odbiornika. Napięcie na cewce jest równe różnicy $U_{we} - U_{wy}$, co wynika w prosty sposób z napięciowego prawa Kirchhoffa. W paragrafie 3.3 udowodniliśmy, że w tym układzie $U_{wy} > U_{we}$, dlatego $u_L < 0$; w związku z tym prąd cewki spada, bo jego pochodna jest proporcjonalna do u_L . Kondensator w tej fazie jest ładowany ze źródła U_{we} , w związku z czym pobiera nadwyżkę prądu dławika ponad I_{wy} . Nadwyżka ta musi być taka, że ładunek dostarczony do kondensatora w fazie 2 (pole pod krzywą i_C) równa się ładunkowi oddanemu w fazie 1 do odbiornika (pole nad krzywą i_C); w przeciwnym razie po pewnym czasie kondensator albo rozładowałby się całkowicie, albo ładunek w nim zgromadzony rósłby do nieskończoności.

Zapisując ostatni wniosek w formie matematycznej:

$$\begin{aligned} -\Delta Q_{C,f1} &= \Delta Q_{C,f2} \\ -\int_{DT_i} i_{C,f1} dt &= \int_{(1-D)T_i} i_{C,f2} dt, \end{aligned} \quad (34)$$

gdzie $f1$ i $f2$ oznaczają odpowiednio fazę 1 i fazę 2 pracy, można wyprowadzić wzór na składową stałą prądu dławika:

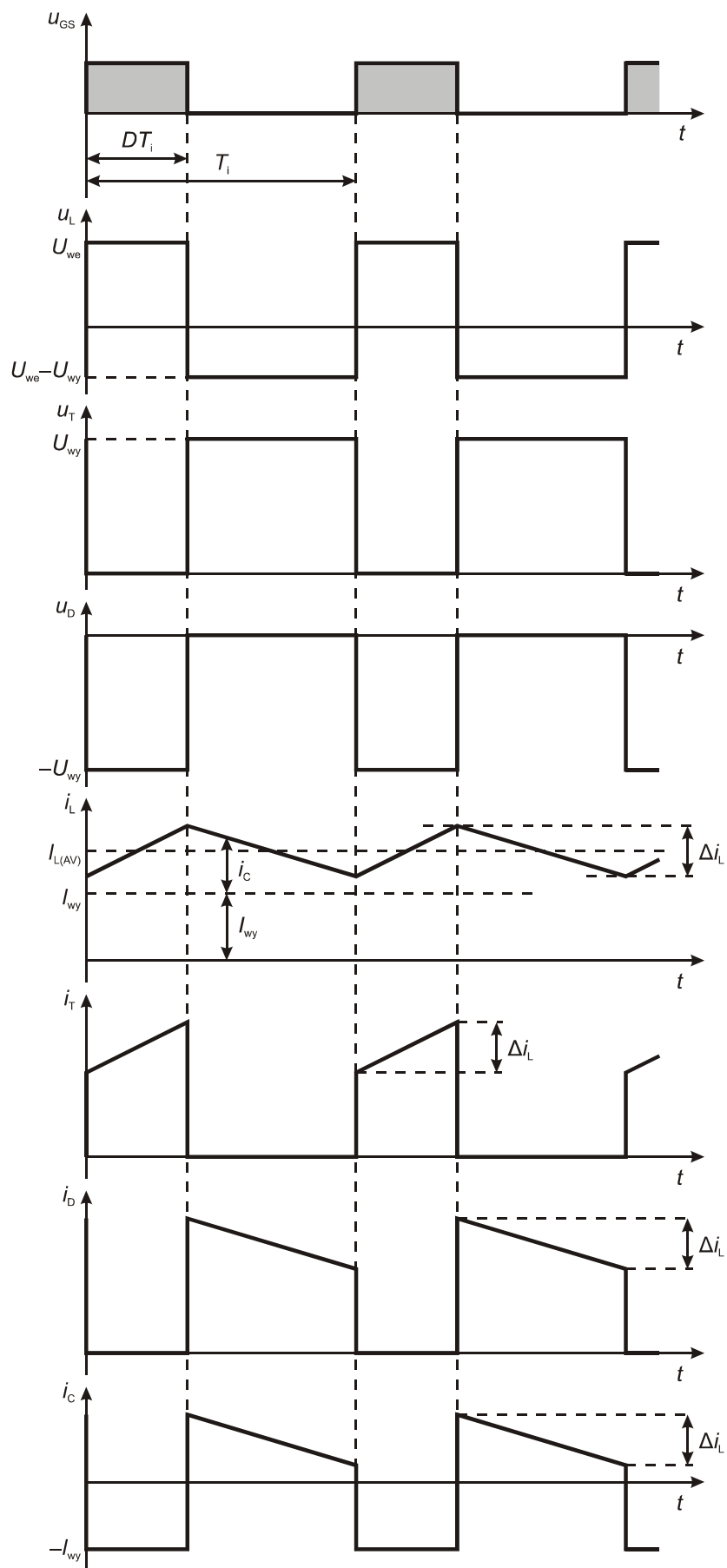
$$\begin{aligned} -\int_{DT_i} (-I_{wy}) dt &= \int_{(1-D)T_i} i_{C,f2} dt \\ I_{wy} DT_i &= (1-D)T_i \cdot I_{C,f2(AV)} \\ I_{C,f2(AV)} &= I_{wy} \frac{D}{1-D}, \end{aligned} \quad (35)$$

przy czym $I_{C,f2(AV)}$ jest wartością średnią prądu kondensatora w fazie 2. Jak zauważyliśmy, w tej fazie prąd dławika

$$i_{L,f2} = i_{C,f2} + I_{wy}, \quad (36)$$

skąd wartość średnia prądu dławika w fazie 2

$$I_{L,f2(AV)} = I_{C,f2(AV)} + I_{wy} = I_{wy} \left(\frac{D}{1-D} + 1 \right) = I_{wy} \frac{1}{1-D}. \quad (37)$$



Rys. 8. Przebiegi w układzie przetwornicy podwyższającej napięcie

Zauważmy jednak, że przy założeniu, iż przebieg prądu i_L jest trójkątny, jego wartość średnia w fazie 2 jest równa wartości średniej w fazie 1 i równa wartości średniej za cały okres impulsowania T_i . Ostatecznie otrzymujemy

$$I_{L(AV)} = \frac{I_{wy}}{1-D} = \frac{U_{we}}{(1-D)^2 \cdot R_o}. \quad (38)$$

3.6. Sprawność

Na koniec spróbujemy oszacować sprawność przetwornicy z rys. 3d. W tym celu przedstawimy moc wejściową jako sumę mocy wyjściowej i mocy strat w elementach układu ΔP :

$$P_{we} = P_{wy} + \Delta P, \quad (39)$$

$$\Delta P = P_T + P_D + P_L + P_C, \quad (40)$$

gdzie: P_T – moc strat w tranzystorze, P_D – moc strat w diodzie, P_L – moc strat w dławiku i P_C – moc strat w kondensatorze. Podstawiając (39) do definicji (10) otrzymujemy

$$\eta = \frac{P_{wy}}{P_{wy} + \Delta P}. \quad (41)$$

Statyczne straty energii w tranzystorze MOSFET wynikają z faktu występowania rezystancji dren-źródło $R_{DS(on)}$. Prąd płynie przez tranzystor jedynie przez czas DT_i i jest wówczas równy prądowi dławika i_L . Przyjmijmy dla uproszczenia, że tętnienie tego prądu

$$\Delta i_L \ll I_{L(AV)}; \quad (42)$$

w takim wypadku

$$i_L \approx I_{L(AV)} = \text{const}, \quad (43)$$

co znacznie ułatwi obliczenia. Przez pozostałą część okresu, o długości $(1-D)T_i$, prąd tranzystora wynosi oczywiście 0. Korzystając z zależności (4) mamy

$$P_{Ts} = \frac{E_{Ts}}{T_i} = \frac{I_{L(AV)}^2 R_{DS(on)} \cdot DT_i + 0 \cdot (1-D)T_i}{T_i} = I_{L(AV)}^2 R_{DS(on)} D. \quad (44)$$

Do tego wyniku należy dodać straty dynamiczne, na które składają się energia tracona w czasie załączania tranzystora i energia tracona w czasie wyłączenia tranzystora:

$$P_{Td} = \frac{E_{Td}}{T_i} = \frac{E_{on} + E_{off}}{T_i} = (E_{on} + E_{off}) \cdot f_i, \quad (45)$$

przy czym maksymalne wartości E_{on} i E_{off} można obliczyć ze wzorów

$$E_{on} = \frac{U_{DD} I_o t_r}{T_i}, \quad (46)$$

$$E_{off} = \frac{U_{DD} I_o t_f}{T_i}, \quad (47)$$

gdzie t_r i t_f są czasami narastania i opadania napięcia u_{DS} podawanymi przez producenta, natomiast U_{DD} jest ustalonym poziomem napięcia u_{DS} w stanie blokowania, a I_o – ustalonym poziomem prądu i_D w stanie przewodzenia. W naszym przypadku $U_{DD} = U_{wy}$ (patrz rys. 8), zaś $I_o \approx I_{L(AV)}$, skąd ostatecznie otrzymujemy

$$P_{Td} = U_{wy} I_{L(AV)} (t_r + t_f) f_i. \quad (48)$$

Statyczne straty energii w diodzie wynikają z faktu utrzymywania się na niej napięcia podczas przepływu prądu. Prąd ten płynie przez diodę jedynie w czasie $(1-D)T_i$ i jest wówczas równy $i_L \approx I_{L(AV)}$. Napięcie na diodzie wynika z charakterystyki statycznej i wynosi

$$U_F = U_{F(TO)} + r_F I_{L(AV)}, \quad (49)$$

gdzie $U_{F(TO)}$ – napięcie progowe, r_F – rezystancja dynamiczna; stąd

$$P_{Ds} = \frac{E_{Ds}}{T_i} = \frac{I_{L(AV)} (U_{F(TO)} + r_F I_{L(AV)}) \cdot (1-D)T_i + 0 \cdot T_i}{T_i} = I_{L(AV)} (U_{F(TO)} + r_F I_{L(AV)}) (1-D). \quad (50)$$

Do tego wyniku należy dodać straty dynamiczne, które w przypadku diody ograniczają się praktycznie do strat przy wyłączaniu. Straty te wynikają z przepływu prądu wstecznego i_R wymuszonego przyłożonym do diody napięciem wstecznym, które w przypadku rozpatrywanego układu ma wartość U_{wy} (patrz rys. 8). Ma to miejsce przez czas odzyskiwania zdolności zaworowych t_{rr} , stąd

$$P_{Dd} = \frac{E_{Dd}}{T_i} = \frac{\int i_R U_{wy} dt}{T_i} = \frac{U_{wy} \int i_R dt}{T_i} = U_{wy} Q_{rr} f_i, \quad (51)$$

gdzie Q_{rr} – ładunek przejściowy przy wyłączaniu, parametr podawany przez producenta.

W przypadku elementów biernych przyjmiemy dla uproszczenia, że straty energii wynikają wyłącznie z występowania pasożytniczych rezystancji szeregowych R_{sL} i R_{sC} . W takim wypadku, dla $i_L \approx I_{L(AV)}$,

$$P_L = I_{L(AV)}^2 R_{sL}. \quad (52)$$

Jak wynika z rys. 8, o prądzie kondensatora nie można założyć, że jest stały. Moc strat w rezystancji szeregowej tego elementu trzeba więc zapisać jako

$$P_C = I_C^2 R_{sC}. \quad (53)$$

Z przeprowadzonej wcześniej analizy wynika, że

$$i_C = \begin{cases} -I_{wy} & \text{w fazie 1} \\ i_L \approx I_{L(AV)} & \text{w fazie 2} \end{cases} \quad (54)$$

skąd wartość skuteczna

$$I_C = \sqrt{\frac{1}{T_i} \int_{T_i} i_C^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T_i} \left(\int_{DT_i} (-I_{wy})^2 dt + \int_{(1-D)T_i} I_{L(AV)}^2 dt \right)} = \sqrt{I_{wy}^2 D + I_{L(AV)}^2 (1-D)}. \quad (55)$$

Podstawiając I_{wy} z (38) mamy

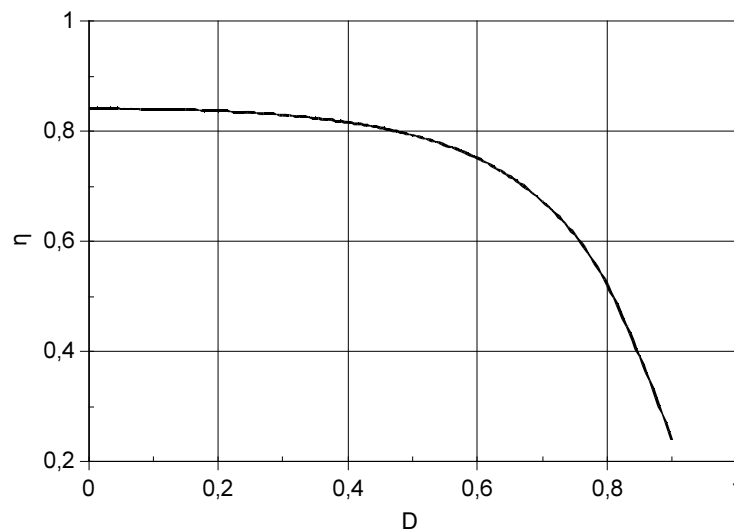
$$I_C = \sqrt{I_{L(AV)}^2 [(1-D)^2 D + 1-D]} = I_{L(AV)} \sqrt{1 + D^2 (D-2)}. \quad (56)$$

Ostatecznie

$$P_C = I_{L(AV)}^2 R_{sC} [1 + D^2 (D-2)]. \quad (57)$$

Określenie brakującej jeszcze mocy wyjściowej jest proste; korzystając ze wzoru (29) otrzymujemy

$$P_{wy} = \frac{U_{wy}^2}{R_o} = \frac{U_{we}^2}{(1-D)^2 R_o}. \quad (58)$$



Rys. 9. Szacunkowa zależność sprawności przetwornicy podwyższającej napięcie od współczynnika wypełnienia impulsów sterujących dla przykładowych wartości parametrów układu

Opierając się na wynikach powyższych rozważań obliczono charakterystykę sprawności dla następujących przykładowych parametrów układu: $U_{we} = 5 \text{ V}$, $R_o = 50 \Omega$, $f_i = 10 \text{ kHz}$, $R_{DS(on)} = 0,4 \Omega$, $U_{F(TO)} = 0,6 \text{ V}$, $r_F = 10 \text{ m}\Omega$, $Q_{rr} = 75 \text{ nC}$, $R_{sL} = 1 \Omega$, $R_{sC} = 2 \Omega$. Uzyskaną zależność przedstawia rys. 9. Należy pamiętać, że jest to zależność szacunkowa, za którą kryje się wiele założeń upraszczających. Jak widać, maksymalna sprawność występuje dla współczynnika wypełnienia równego 0 (czyli przetwornica praktycznie nie pracuje) i wynosi 0,84. Dla

$D > 0,8$ sprawność spada poniżej 0,5. Wynika z tego, że praktyczny zakres sterowania przetwornicy dławikowej podwyższającej napięcie jest ograniczony. Potwierdza to wcześniejszy wniosek sformułowany w oparciu o charakterystykę przetwarzania układu.

Sprawność układu można podnieść przez stosowanie elementów aktywnych i biernych o jak najmniejszej stratności, należy się jednak wówczas liczyć ze wzrostem ich kosztu. Przykładowo, jeżeli udałoby się obniżyć wartości $R_{DS(on)}$, $U_{F(TO)}$, R_{sL} i R_{sC} dwukrotnie, to szacunkowa maksymalna sprawność wzrosłaby do 0,91.

4. Przebieg ćwiczenia

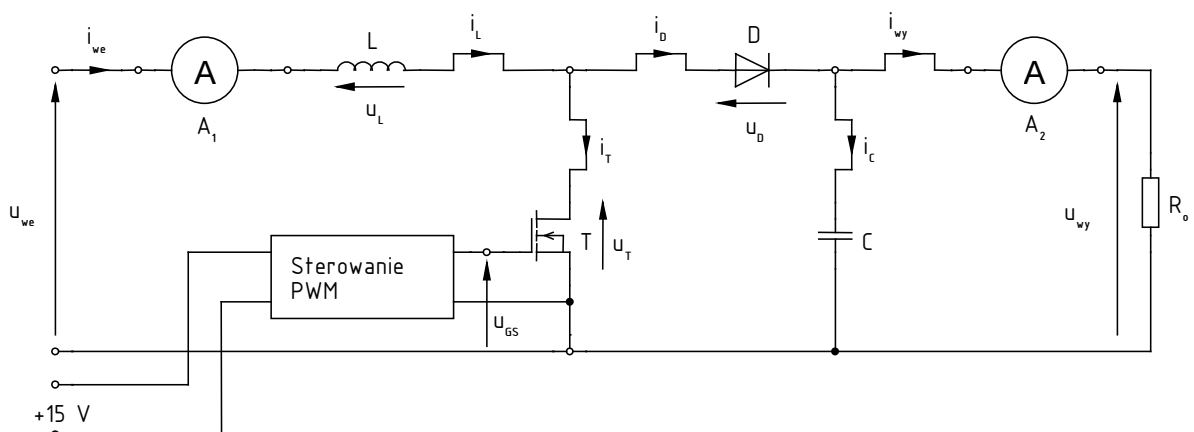
4.1. Układ pomiarowy

Ogólny schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 10. Potencjometr układu sterowania PWM pozwala na zmianę współczynnika wypełnienia impulsów sterujących tranzystorem T. Odbiornik R_o stanowi opornik o rezystancji $100\ \Omega$. Poprzez gniazda bananowe wyprowadzone zostały potencjały najważniejszych punktów. Obserwacja przebiegów prądów jest możliwa przez zaciśnięcie sondy prądowej na jednym z wyprowadzonych fragmentów przewodów. Pomiar prądu wyjściowego i średniego prądu wejściowego możliwy jest przez włączenie amperomierzy A_1 i A_2 szeregowo w obwód prądowy lub przez zwarcie odpowiednich punktów krótkimi przewodami, a następnie założenie na odpowiedni z nich sondy cęgowej.

Rejestracji danych z oscyloskopu dokonujemy za pomocą programu WaveStar for Oscilloscopes dostępny z menu Start, zakładka *Pomiary*. Jeżeli zespół uruchamia program po raz pierwszy, należy wprowadzić dane oscyloskopu zgodnie z procedurą opisaną na stronie laboratorium PPM (<http://neo.dmcs.p.lodz.pl/ppm/>), sekcja *Oprogramowanie*, nagłówek *Instrukcje postępowania*, pozycja *Konfiguracja programów do komunikacji ze sprzętem pomiarowym*.

Po uruchomieniu programu WaveStar należy otworzyć nowy arkusz typu *YT Sheet*. Pobieranie przebiegów z oscyloskopu dokonuje się przez wybór z rozwijanej listy z lewej strony: *Local* ▶ *nazwa oscyloskopu* ▶ *Data* ▶ *Waveforms*, a następnie przeciągnięcie nazwy odpowiedniego przebiegu (CH1/2/3/4) do okna *YT Sheet*. Raz przeciągnięte przebiegi wystarczy później tylko odświeżać wciskając przycisk *Refresh Sheet*. Przebieg można skasować klikając na jego numerze z lewej strony podziałki i wciskając klawisz Delete.

Zgodnie z instrukcją, dane z mierników zapisujemy w arkuszu kalkulacyjnym. W laboratorium dostępny jest arkusz kalkulacyjny pakietu OpenOffice. Jeżeli przy uruchamianiu pojawi się informacja o konieczności dokonania instalacji, należy ją przeprowadzić zgadzając się na wszystkie domyślne ustawienia, bez wypełniania danych i rejestrowania programu. Obsługa arkusza kalkulacyjnego w zakresie potrzebnym na laboratorium jest identyczna z programem Microsoft Excel. Aby bezproblemowo odczytać arkusz w programie Microsoft Excel, należy na koniec zapisać go w formacie XLS (menu *Plik, Zapisz jako*).



Rys. 10. Schemat układu pomiarowego

Przygotowanie układu do pracy należy przeprowadzić ściśle zgodnie z poniższymi punktami.

1. Jako amperomierz w obu miejscach A_1 i A_2 zostanie wykorzystany jeden multimetr z cęgową sondą prądową. W związku z tym zaciski A_1 i A_2 należy na stałe zewrzeć krótkimi przewodami, na które zakładana będzie sonda.

Niezwarcie zacisków A_2 grozi uszkodzeniem układu!

Sonda prądowa na swoim wyjściu podaje napięcie proporcjonalne do prądu płynącego przez przewód znajdujący się w cęgach. Końcówki sondy należy więc umieścić w gniazdach COM i V, jak do pomiaru napięcia, a multimetr ustawić w tryb pomiaru wartości stałej napięcia (mV, DC). Współczynnik proporcjonalności prądu i napięcia – współczynnik przetwarzania sondy jest podany na jej obudowie.

Sonda posiada zasilanie bateryjne, z tego powodu nie należy włączać jej przed pierwszym pomiarem.

Należy koniecznie zanotować współczynnik przetwarzania sondy prądowej. W przeciwnym razie nie będzie możliwe przeliczenie zapisanych wyników na ampery.

2. Do zasilenia układu badanego wykorzystuje się 2 zasilacze: dwusekcyjny o wydajności prądowej 3 A – do układu sterowania oraz jednosekcyjny o wydajności prądowej co najmniej 10 A – do obwodu silnoprądowego. Przed włączeniem zasilaczy należy skrócić wszystkie pokręta do zera. Na zasilaczu dwusekcyjnym włączyć niezależny tryb pracy dwóch sekcji (INDEPENDENT).
3. Z zasilacza dwusekcyjnego doprowadzić zasilanie sterowania układu badanego.
Z zasilacza o dużej wydajności prądowej doprowadzić zasilanie do obwodu silnoprądowego układu badanego.

Uwaga! Przed włączeniem zasilaczy prowadzący sprawdza poprawność połączeń!

4. Włączyć zasilacz sterowania. Zwiększyć nieco prąd graniczny odpowiedniej sekcji (pokrętko CURRENT) do zgaśnięcia czerwonej kontrolki ograniczenia prądowego (C.C.) Ustawić napięcie zasilania na 15 V. Przy poprawnej pracy układu zasilacz powinien wykazywać pobór prądu rzędu dziesiątek miliamperów.

4.2. Wykonanie pomiarów

Pomiary wstępne

1. Poprzez sondę 1:10 dołączyć do kanału 1 oscyloskopu napięcie u_{GS} .
2. Wprowadzić odpowiednie ustawienia oscyloskopu:
 - wyłączyć wyświetlanie przebiegów ze wszystkich kanałów oprócz 1 (dokonuje się tego odpowiednim przyciskiem CH1/2/3/4 MENU; jeżeli wyświetlanie danego kanału jest włączone, po lewej stronie ekranu wyświetlany jest jego numer ze strzałką wskazującą poziom zera);
 - na kanale 1, uwzględnianie tłumienia sondy 10:1 (10x) – przycisk CH1 MENU (uwaga, aby nie wyłączyć wyświetlania przebiegu) i 4. przycisk ekranowy;
 - Invert – odwracanie przebiegu (5. przycisk ekranowy): Off;

- Coupling – sprzężenie (1. przycisk ekranowy): DC.
- poziom zera i wzmocnienie kanału 1 (pokręta POSITION i VOLTS/DIV) można ustawić dowolnie;
- podstawa czasu (pokręta SEC/DIV) powinna umożliwiać obserwację kilku okresów pracy układu;
- ustawić przebieg z kanału 1 jako synchronizujący (przycisk TRIGGER MENU, odpowiednim przyciskiem ekranowym wybrać Source: CH1);
- pozostałe ustawienia w menu Trigger: Edge, Slope: Rising, Mode: Normal, Coupling: Noise Reject;
- wyregulować poziom wyzwalania (pokręta LEVEL) tak, aby oscyloskop wyzwał się poprawnie, o czym świadczy stale wyświetlany komunikat „Trig'd” (Triggered) na górze ekranu.

W trakcie pomiarów może zaistnieć potrzeba ponownej regulacji poziomu wyzwalania, aby oscyloskop wyzwał się, a obraz był stabilny.

3. Zaobserwować kształt sygnału u_{GS} na wejściu tranzystora T. Zaobserwować działanie regulacji współczynnika wypełnienia – potencjometr PWM na płycie badanego układu.

Na oscyloskopie zmierzyć minimalną i maksymalną wartość współczynnika wypełnienia impulsów sterujących D , przyjmując, że przebieg napięcia bramka–źródło jest odpowiedzią pojemności wejściowej na idealny prostokątny przebieg sterujący.

Wartości t_i i T_i można odczytać na oscyloskopie w następujący sposób:

- włączyć kursory – przycisk CURSOR;
- przyciskami ekranowymi wybrać Type: Time; Source: CH1;
- przesunąć kursory do odpowiednich punktów za pomocą pokręteł CURSOR 1 (VERTICAL POSITION CH1) i CURSOR 2 (VERTICAL POSITION CH2);
- odczytać długość odcinka czasu z pola Delta;
- w razie potrzeby (np. aby skorzystać z pierwotnych funkcji pokręteł VERTICAL POSITION CH1/2) kursory można wyłączyć ustawiając 1. przyciskiem ekranowym Type: Off.

4. Nastawić minimalną wartość współczynnika D . Uważając, aby masy wszystkich sond były dołączone do jednego potencjału, przyłączyć poprzez sondy 1:10: do kanału 3 – napięcie u_{we} , do kanału 4 – napięcie u_{wy} .

Obserwacja i rejestracja charakterystycznych przebiegów w układzie

5. Zwiększyć nieco prąd graniczny zasilacza obwodu silnopiętowego (pokręta nastawy zgrubnej CURRENT COARSE) do zgaśnięcia czerwonej kontrolki ograniczenia prądowego C.C. Ustawić wartość napięcia wejściowego zgodnie z poleceniem prowadzącego (nastawa zgrubna – VOLTAGE COARSE, nastawa dokładna – VOLTAGE FINE). Podczas ustawiania należy kontrolować, czy nie włącza się ograniczenie prądowe – w razie potrzeby zwiększyć prąd graniczny. Przy poprawnej pracy układu pobór prądu dla minimalnego D nie powinien przekraczać 200 mA.

Po upewnieniu się, że prąd pobierany nie przekracza podanej wyżej wartości, należy:

- ustawić maksymalny prąd graniczny,

- ustawić maksymalny współczynnik wypełnienia,
- zmniejszyć prąd graniczny zasilacza do wartości nieco większej od powodującej włączenie ograniczenia prądowego (zaświecenie kontrolki),
- ustawić ponownie minimalny współczynnik wypełnienia.

Wykonanie powyższych czynności gwarantuje, że ograniczenie prądowe nie włączy się po zwiększeniu współczynnika wypełnienia, a z drugiej strony zabezpieczy układ na wypadek przypadkowego zwarcia.

6. Dla obu kanałów 3 i 4 wprowadzić odpowiednie ustawienia:
 - uwzględnianie tłumienia sondy 10:1 (10x) – przycisk CH3/4 MENU i 4. przycisk ekranowy;
 - Invert: Off, Coupling: DC;
 - wzmacnienie kanału największe takie, że przebieg mieści się na ekranie – pokrętko CH3/4 VOLTS/DIV (w dalszym ciągu pomiarów należy dopasowywać to ustawienie do nowych warunków).
7. Jeżeli nie zostało to wykonane wcześniej, uruchomić program WaveStar i otworzyć nowy arkusz typu *YT Sheet*.

Pomiar charakterystycznych przebiegów w poszczególnych punktach układu

8. Ustawić $D \approx 0,3$ (w przybliżeniu; pomiar na oscyloskopie jak poprzednio).
9. Pobrać do programu WaveStar przebiegi u_{GS} , u_{we} i u_{wy} .
Jaki jest charakter przebiegów napięć u_{we} i u_{wy} ? czy można uznać je za stałe?
10. Jeżeli wzmacniacz sondy prądowej jest wyłączony, włączyć go, a następnie:
 - zamknąć sondę bez przewodu w szczelinie, o czym informuje zgaśnięcie kontrolki Probe Open na wzmacniaczu;
 - przyciskiem COUPLING na wzmacniaczu wybrać REF;
 - wcisnąć przycisk PROBE DEGAUSS w celu skalibrowania i rozmagnesowania sondy, począkać na zgaśnięcie czerwonej diody;
 - przyciskiem COUPLING wybrać DC;
 - przyciskami CURRENT/DIVISION wybrać maksymalną wartość – 5 A/DIV.

W dalszym ciągu ćwiczenia, w celu obserwacji podanego prądu, należy: otworzyć sondę, wprowadzić odpowiedni przewód w szczelinę i na powrót zamknąć sondę (zgaśnięcie kontrolki Probe Open).
11. Wyjście wzmacniacza sondy podłączyć do kanału 2 oscyloskopu poprzez obciążenie dopasowujące 50Ω (w formie „przejściówki”) włączone po stronie oscyloskopu. Następnie wprowadzić odpowiednie ustawienia dla kanału 2 (przycisk CH2 MENU):
 - uwzględnianie tłumienia sondy wyłączone, czyli 1x – przycisk CH2 MENU i 4. przycisk ekranowy;
 - Invert: Off, Coupling: DC;
 - wzmacnienie kanału 10 mV/dz – pokrętko CH2 VOLTS/DIV; tego ustawienia nie należy w żadnym wypadku zmieniać w dalszym ciągu ćwiczenia.
12. Założyć sondę prądową najpierw tak, aby móc obserwować prąd wejściowy i_{we} .

Dostosować wzmacnienie wzmacniacza sondy tak, aby przebieg zajmował maksymalny obszar ekranu. Zmiany wzmacnienia dokonuje się przyciskami CURRENT/DIVISION na wzmacniaczu, nie pokrętem VOLTS/DIV na oscyloskopie. Zanotować ustawione wzmacnienie z wyświetlacza wzmacniacza, podawane w A / 10 mV lub mA / 10 mV. Pobrać przebieg do programu WaveStar (nie usuwając poprzednich).

Powtórzyć czynności dla przebiegu i_{wy} .

Jaki jest charakter przebiegów prądów i_{we} i i_{wy} ? czy można uznać je za stałe?

13. Powtórzyć odpowiednie czynności w celu pobrania do programu WaveStar przebiegów prądów i_T , i_D i i_C oraz napięcia na tranzystorze u_T (przełączyć sondę z kanału 3).
14. Zapisać komplet pobranych przebiegów do pliku. Upewnić się, że plik ma rozmiar większy niż 10 kB (co wskazuje na poprawność zapisu).

Pomiar charakterystyk układu

15. Włączyć sondę cęgową multimetru. Powinna zaświecić się czerwona dioda sygnalizacyjna ON.

Bez przewodu w cęgach skalibrować sondę – wciskając i kręcąc czarnym pokrętem doprowadzić do wskazania multimetru jak najbliższego zera.

16. Zmieniając współczynnik wypełnienia od D_{min} do D_{max} , dla 6–10 wartości D :
 - a) przy użyciu oscyloskopu wyznaczyć aktualną wartość D ;
 - b) odczytać z woltomierza zasilacza wartość U_{we} ;
 - c) za pomocą multimetru z sondą cęgową zmierzyć wartości $I_{we(AV)}$ i I_{wy} (na razie zapisać wskazania napięcia: $U_{I_{we}}$ i $U_{I_{wy}}$);
 - d) z ekranu oscyloskopu odczytać wartość U_{wy} .

Wszystkie wyniki należy zapisywać w arkuszu kalkulacyjnym, który powinien pozostać po zajęciach na koncie zespołu.

Odczytu napięcia z oscyloskopu można odczytać mnożąc liczbę działek liczoną od poziomu zera odpowiedniego kanału przez jego wzmacnienie, lub też automatycznie:

- włączyć menu automatycznego pomiaru – przycisk MEASURE;
- 1. przyciskiem ekranowym wybrać nastawianie źródła (Source);
- na dowolnym z 4 pól ustawić przyciskiem ekranowym kanał, do którego przyłączone jest napięcie wyjściowe;
- 1. przyciskiem ekranowym wybrać nastawianie typu pomiaru (Type);
- na wybranym wcześniej polu ustawić wartość średnią (Mean);
- wyświetlana w wybranym polu wartość liczbową jest wartością średnią napięcia z wybranego kanału.

17. Wyłączyć sondę cęgową multimetru.

18. Zmniejszyć napięcie zasilania obwodu silnopiętowego do zera. Wyłączyć oba zasilacze.

4.3. Opracowanie wyników

1. Przeliczyć wskazania multimetru z sondą cęgową na wartości prądu $I_{we(AV)}$ i I_{wy} w amperach, opierając się na zapisanym współczynniku przetwarzania sondy.

2. Obliczyć moc czynną wejściową P_{we} , moc czynną wyjściową P_{wy} oraz sprawność energetyczną η dla każdej wartości D .
3. Wyznaczyć współczynnik przetwarzania napięcia K_u dla każdej wartości D .
4. Wykreślić i przeanalizować charakterystyki:
 - a) $K_u = f(D)$;
 - b) $\eta = f(D)$.
5. Przeanalizować i omówić zarejestrowane przebiegi prądów i napięć, zwracając szczególną uwagę na działanie układu w dwóch taktach jego pracy. Podczas analizy przebiegów prądowych uwzględnić mnożnik w postaci zanotowanego wzmocnienia wzmacniacza sondy prądowej.

5. Oczekiwana zawartość sprawozdania

W sprawozdaniu powinny znaleźć się:

- wyznaczone wartości minimalna i maksymalna współczynnika wypełnienia impulsów sterujących D ;
- odpowiedzi na pytania postawione w paragrafie 4.2;
- tabela z wynikami pomiarów i obliczeń, wraz z zastosowanymi wzorami i przykładem obliczeń;
- wykreślone charakterystyki, ich analizę i wnioski;
- zarejestrowane przebiegi (mogą być rozdzielone na kilka osobnych wykresów) wraz z ich analizą.

W katalogu sieciowym zespołu należy zostawić plik arkusza kalkulacyjnego z wynikami pomiarów oraz pliki z zarejestrowanymi przebiegami.

6. Literatura

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