



PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

Ćwiczenie B5

Dławiki

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:
Łukasz Starzak

Łódź 2012

Spis treści

B Wprowadzenie do ćwiczenia	5
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Dławiki.....	7
2.1. Najważniejsze właściwości dławików mocy	7
2.1.a. Działanie	7
2.1.b. Indukcyjność.....	8
2.1.c. Nasycenie rdzenia.....	9
2.1.d. Indukcja i natężenie pola magnetycznego	10
2.2. Dławik rzeczywisty w przekształtniku elektronicznym.....	12
2.2.a. Zewnętrzne objawy nasycenia.....	12
2.2.b. Wpływ nasycenia dławika na działanie przekształtnika	12
2.2.c. Stan ustalony przekształtnika.....	14
2.2.d. Zdolność gromadzenia energii.....	15
C Doświadczenie	17
3. Pomiary	17
3.1. Przygotowanie układu	17
Układ pomiarowy	17
Konfiguracja układu	18
3.2. Wykonanie pomiarów.....	20
Podstawowe zależności opisujące cewki	20
Charakterystyki dławików w funkcji prądu	20
Zakończenie.....	21
Parametry dławików	21
D Wyniki	23
4. Opracowanie i analiza wyników	23
4.1. Dane liczbowe	23
Uruchomienie oprogramowania	23
Pomiary dla różnych współczynników wypełnienia	23
Pomiary w funkcji składowej stałej prądu	24
4.2. Analiza wyników.....	25
Podstawowe zależności opisujące dławik.....	25
Charakterystyki indukcyjności.....	25
Parametry rdzeni	25
E Informacje	27
5. Literatura	27

Wprowadzenie do ćwiczenia

1. Cel i przebieg ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie zjawiska nasycania dławików mocy, niezwykle istotnego z punktu widzenia praktycznego stosowania tych elementów w układach. Jednocześnie doświadczalnie potwierdzone zostaną podstawowe zależności opisujące pracę dławików w impulsowych układach mocy.

2. Dławiki

2.1. Najważniejsze właściwości dławików mocy

2.1.a. Działanie

Dławikiem (ang. *choke*) nazywa się cewkę (ang. *coil, inductor*) na rdzeniu magnetycznym (ang. *magnetic core*) o takich parametrach (szczególnie indukcyjności), że wykazuje dużą reaktancję dla wysokich częstotliwości, dzięki czemu przepływ prądu o takich częstotliwościach jest blokowany. Dławik przepuszcza natomiast składową stałą prądu i składowe niskiej częstotliwości.

Działanie dławika w obwodzie elektrycznym opisuje podstawowe równanie cewki

$$u = L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

Jeżeli napięcie na dławiku jest stałe, to pochodna również musi być stała (chyba że indukcyjność jest zmienna, o czym niżej), w związku z tym

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U}{L} \quad (3)$$

Oznacza to, że pochodna prądu po czasie jest stała, a więc prąd narasta jednostajnie (prostoliniowo). Teoretycznie mógłby on narastać do nieskończoności; w rzeczywistości nastąpiłoby uszkodzenie dławika wskutek zbyt dużej mocy strat. Przy jednostajnej zmianie prądu w czasie, pochodną można zastąpić ilorazem różnic:

$$\frac{\Delta i}{\Delta t} = \frac{U}{L} \quad (4)$$

Powyższy przypadek występuje w układach przekształtnikowych o działaniu przełączającym. Dławik jest w nich poddawany na przemian napięciu dodatniemu i ujemnemu. W wyniku tego prąd rośnie w jednym takcie pracy, zaś maleje w drugim. Nie dochodzi więc do niekontrolowanego wzrostu prądu, natomiast prąd dławika tętni wokół pewnej składowej stałej, wynikającej z bieżących warunków zasilania, obciążenia i sterowania przekształtnika.

Zwróćmy uwagę, że szybkość narastania prądu di/dt nie zależy wprost od wartości prądu i jako takiej; zależy ona wyłącznie od napięcia U przyłożonego do dławika. Amplituda zmian prądu Δi zależeć zaś będzie dodatkowo od czasu Δt , przez jaki przyłożone jest napięcie U :

$$\Delta i = \frac{U \Delta t}{L} \quad (5)$$

Oznacza to, że w układach elektronicznych zarówno duży, jak i mały prąd może posiadać dużą lub małą amplitudę swoich zmian w czasie. Powyższe przestaje jednak obowiązywać, jeżeli indukcyjność L stanie się zależna od prądu i .

2.1.b. Indukcyjność

Indukcyjność dławika (jak każdej cewki) wyraża się ogólnie wzorem

$$L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{A}{l} \quad (6)$$

gdzie μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m), μ_r – względna przenikalność magnetyczna rdzenia, N – liczba zwojów, A – powierzchnia przekroju poprzecznego rdzenia, l – długość rdzenia. Wzór ten stosuje się ściśle do cewki nawiniętej na prostoliniowym walcu, niemniej co do zasady (zależności od poszczególnych parametrów) opisuje on również inne cewki o podobnej konstrukcji. Na przykład dla dławika na rdzeniu toroidalnym (tj. walcu zamkniętym w formie pierścienia) o średnicy pierścienia D prawdziwy jest wzór

$$L = \mu_0 \mu_r N^2 \frac{A}{\pi D} \quad (7)$$

Jak widać, indukcyjność jest proporcjonalna do przenikalności magnetycznej (ang. *magnetic permeability*) rdzenia oraz do kwadratu liczby zwojów. Względna początkowa (tj. przy zerowym prądzie i niskiej częstotliwości) przenikalność magnetyczna μ_{ri} dla dwóch najpopularniejszych obecnie w elektronice mocy materiałów magnetycznych jest rzędu: dla ferrytów 1000...10000, dla sproszkowanego żelaza 10...100.

Aby ułatwić projektowanie dławików i dobór rdzeni, rdzenie magnetyczne charakteryzuje się zwykle za pomocą indukcyjności charakterystycznej A_L (ang. *inductance factor*), która jest indukcyjnością na kwadrat liczby zwojów:

$$A_L = \frac{L}{N^2} \quad (8)$$

Parametr ten pozwala szybko ocenić, ile zwojów trzeba nawinąć na danym rdzeniu, aby uzyskać dławik o danej indukcyjności, gdyż

$$L = A_L N^2 \quad (9)$$

Należy zwrócić uwagę, że chociaż A_L jest indukcyjnością 1 zwoju, nie oznacza to, że 10 zwojów daje 10-krotnie większą indukcyjność.

Indukcyjność charakterystyczną podaje się zwykle w nH/t² (nanohenrach na zwój kwadrat). Oznaczenie zwyczajowej (choć nie przewidzianej w normach) pseudojednostki „zwój” – „t” pochodzi od ang. *turn*, chociaż spotyka się również polskie „zw”. Można je również spotkać w zwyczajowej pseudojednostce przepływu

$$\Theta = NI \quad (10)$$

którą jest amperozwój (ang. *Ampere-turn*) oznaczany „At” lub „Azw”. Zgodnie z europejską normą, prawidłową jednostką indukcyjności charakterystycznej pozostaje henr, zaś przepływu – amper.

Przy tej okazji warto też wspomnieć, że producenci amerykańscy często podają parametry rdzeni magnetycznych nie w jednostkach SI, ale w jednostkach układu CGS. W szczególności indukcja B podawana jest w gausach ($1 \text{ Gs} = 10^{-4} \text{ T}$), natężenie pola magnetycznego H – w

oerstedach ($1 \text{ Oe} = 1000/4\pi \text{ A/m}$). W układzie CGS przenikalność magnetyczna próżni μ_0 wynosi 1; przenikalność całkowita μ w układzie CGS jest więc liczbowo równa przenikalności względnej μ_r w układzie SI.

2.1.c. Nasycenie rdzenia

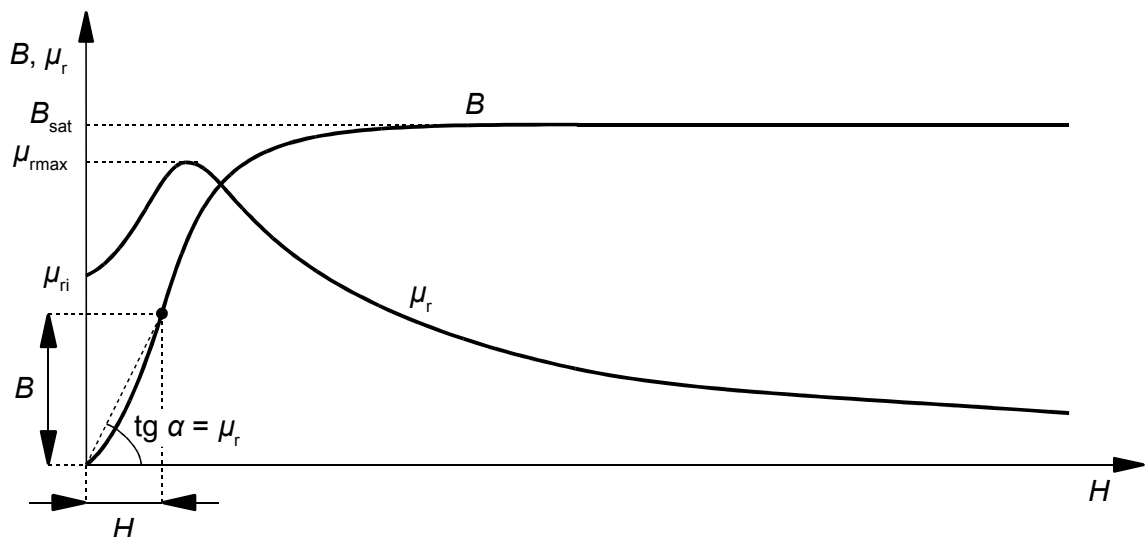
Całkowita przenikalność magnetyczna materiału jest równa iloczynowi przenikalności próżni i przenikalności względnej tego materiału:

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (11)$$

Wyraża ona stosunek indukcji magnetycznej B występującej w materiale (wyrażonej w teslach – T) do natężenia pola magnetycznego H (wyrażonego w A/m) w nim panującego:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (12)$$

W celu uzyskania dużych wartości indukcyjności, dławiki nawija się na rdzeniach z materiałów ferromagnetycznych (tj. wykazujących podobne właściwości, co żelazo), które posiadają dużą przenikalność magnetyczną [por. wzór (7)]. Z drugiej jednak strony ferromagnetyki wykazują silną zależność przenikalności od punktu pracy rdzenia na płaszczyźnie $B - H$. Graficznie opisuje to krzywa magnesowania $B = f(H)$ (rys. 1).



Rys. 1. Krzywa magnesowania ferromagnetyka (B) i zależność względnej przenikalności magnetycznej (μ_r) od natężenia pola magnetycznego H

Równanie (12) mówi, że przenikalność magnetyczna jest współczynnikiem kierunkowym prostej łączącej punkt pracy rdzenia z początkiem układu współrzędnej. Punkt pracy może leżeć wyłącznie na krzywej magnesowania. Prowadząc w myślach taką prostą i poruszając się po krzywej magnesowania łatwo zauważyć, że przenikalność początkowo rośnie do pewnego maksimum μ_{max} , po czym radykalnie spada, co obrazuje również rys. 1.

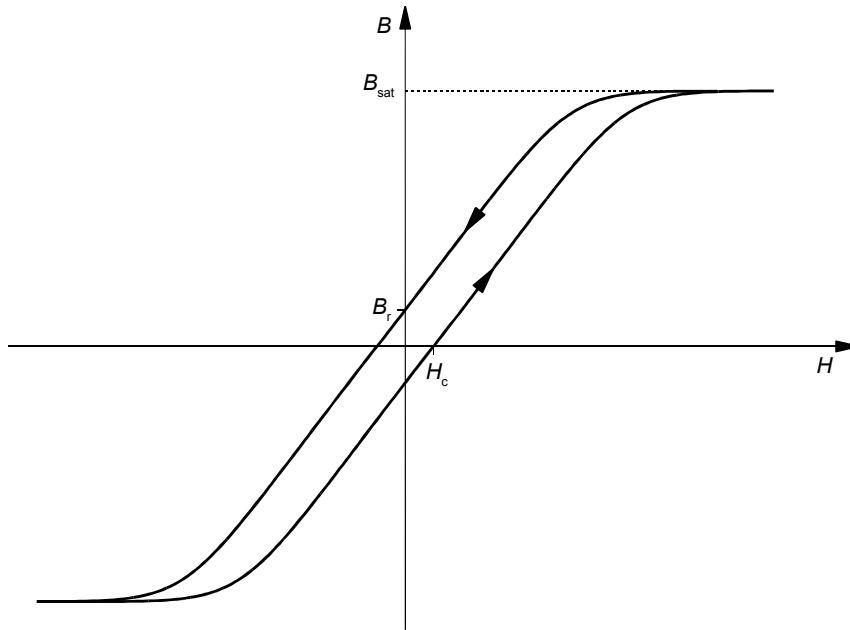
Powyższe jest konsekwencją zjawiska zwanego nasyceniem (ang. *saturation*) rdzenia. Każdy materiał ferromagnetyczny wykazuje bowiem nasycenie indukcji B wraz ze wzrostem natężenia pola magnetycznego, gdy indukcja zbliża się do pewnej charakterystycznej wartości, zwanej indukcją nasycenia i oznaczaną B_{sat} . Ponieważ indukcja nie rośnie znacząco ze wzrostem natężenia pola, więc współczynnik kierunkowy prostej łączącej punkt pracy z początkiem układu współrzędnych stale maleje.

Należy przypomnieć, że magnesowanie i rozmagnesowywanie ferromagnetyka przebiega po nieco innych liniach, tworzących tzw. pętlę histerezy (rys. 2). W przekształtnikach elektronicznych

zwykle nie ma to dużego wpływu na działanie układu, gdyż pętla histerezy wykorzystywanych materiałów jest wąska (niska wartość natężenia koercji H_c).

W konkretnych aplikacjach elementów magnetycznych bardziej użyteczne mogą być wartości przenikalności magnetycznej inne niż przenikalność lokalna określona wzorem (12). Na przykład w przypadku niewielkiej składowej przemiennej ΔH natężenia pola magnetycznego nałożonej na znaczącą składową stałą H_d , stosuje się przenikalność rewersyjną, definiowaną jako

$$\mu_{\text{rev}}(H_d) = \left. \frac{\Delta B}{\Delta H} \right|_{\Delta H \rightarrow 0} \quad (13)$$



Rys. 2. Pętla histerezy ferromagnetyka

2.1.d. Indukcja i natężenie pola magnetycznego

Jak wynika ze wzoru (7), spadek przenikalności powoduje proporcjonalny spadek indukcyjności dławika. Z kolei zależność (3) wskazuje, jakie będą konsekwencje tego faktu: wzrost (lub spadek) prądu w czasie będzie szybszy niż wcześniej (przed nasyceniem, kiedy indukcyjność była większa).

Natężenie pola magnetycznego wiąże z prądem prawo Ampère'a

$$\oint H dl = \Theta \quad (14)$$

Jeżeli materiał rdzenia jest jednorodny, to natężenie pola magnetycznego H jest stałe. Wówczas

$$\oint H dl = H \oint dl = Hl = \Theta \quad (15)$$

Dla rdzenia toroidalnego o promieniu pierścienia D , długość rdzenia l równa jest obwodowi okręgu, stąd

$$H = \frac{\Theta}{l} = \frac{NI}{l} = \frac{NI}{\pi D} \quad (16)$$

Tak więc natężenie pola magnetycznego jest proporcjonalne do prądu, a ściślej rzecz biorąc – do przepływu Θ ; zależy więc także od liczby zwojów N .

Również indukcja magnetyczna jest ściśle powiązana z prądem zależnością

$$NA \frac{dB}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (17)$$

skąd

$$dB = \frac{L di}{NA} \quad (18)$$

Tak więc zmiana indukcji jest proporcjonalna do zmiany prądu. Jest również proporcjonalna do liczby zwojów, gdyż indukcyjność L jest proporcjonalna do N^2 .

Jak już powiedzieliśmy, dla większości materiałów magnetycznych używanych w elektronice mocy pętla histerezy jest stosunkowo wąska. Dlatego zerowemu prądowi i odpowiada prawie zerowa indukcja remanencji B_r (rys. 2). Jeżeli przyjąć, że $B_r = 0$ (co implikuje też $H_c = 0$), to z zależności (18) wynika również silniejsza proporcjonalność – nie tylko zmian, ale również wartości jako takich:

$$B = \frac{Li}{NA} \quad (19)$$

Zależność ta obowiązuje wyłącznie przy założeniu, że $B_r \approx 0$ (i $H_c \approx 0$) oraz tylko na odcinku, na którym $\mu_r \approx \text{const.}$

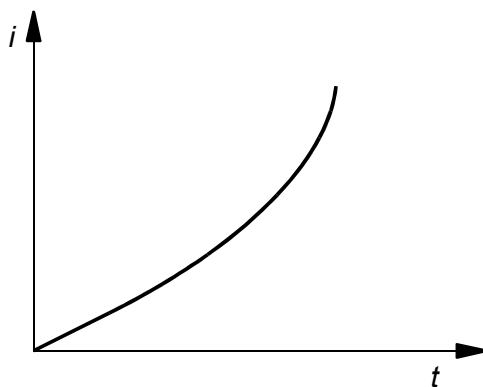
2.2. Dławik rzeczywisty w przekształtniku elektronicznym

2.2.a. Zewnętrzne objawy nasycenia

Z zależności (16) i (19) wynika, że w miarę wzrostu prądu płynącego przez dławik, rośnie natężenie pola magnetycznego i indukcja magnetyczna w rdzeniu. Przy tym punkt pracy rdzenia porusza się po krzywej magnesowania na płaszczyźnie $B - H$. Przy pewnej wartości prądu indukcja zbliży się do indukcji nasycenia B_{sat} , co spowoduje nasycenie się rdzenia i w konsekwencji – spadek indukcyjności. Wobec tego, zgodnie z zależnością (3), prąd będzie narastał w czasie szybciej (zakładając, że na zaciskach dławika wymuszone jest stałe napięcie U). Większy prąd spowoduje jeszcze głębsze nasycenie [punkt pracy przesunie się w prawo zgodnie z zależnością (16)], a więc dalsze zmniejszenie indukcyjności L , a więc znów zwiększenie szybkości narastania prądu w czasie. Narastanie prądu, początkowo następujące po linii prostej, będzie więc zachodzić po linii coraz bardziej stromej, co przedstawiono na rys. 3.

Na rys. 4 przedstawiono typowe przebiegi obserwowane w praktyce w impulsowych układach przekształtnikowych. Założono, że w układzie tym napięcie wymuszane na dławiku ma kształt symetrycznego prostokąta o pewnej amplitudzie $2U$ (poziom wysoki U , poziom niski $-U$, $\Delta t_1 = \Delta t_2$), oraz że składowa stała prądu dławika I_d jest niezależna od napięcia na jego zaciskach, może więc przyjmować dowolne wartości. Założenia te spełnione są (lub mogą być) w układzie wykorzystywanym do badania dławików w niniejszym ćwiczeniu.

Przebieg prądu oznaczony cyfrą 1 występuje przy pewnej składowej stałej I_d . W żadnym momencie prąd nie przekracza wartości powodującej nasycenie rdzenia, dlatego jego przebieg jest trójkątny zgodnie z zależnością (3), gdyż indukcyjność dławika L pozostaje stała. W przypadku 2 w pobliżu swoich wierzchołków prąd osiąga już wartości powodujące, że indukcja B w rdzeniu zbliża się do indukcji nasycenia B_{sat} . W związku z tym przenikalność magnetyczna rdzenia spada, a w ślad za nią – indukcyjność dławika L . Zgodnie z zależnością (3) i wnioskami z wcześniej przeprowadzonej analizy, oznacza to coraz szybsze narastanie prądu w czasie, gdyż w miarę dalszego wzrostu prądu, przenikalność spada tym bardziej. W przypadku 3 dławik pracuje stale w nasyceniu. Amplituda tętnienia prądu dławika Δi może być nawet o kilka rzędów wielkości większa niż w przypadku 1.



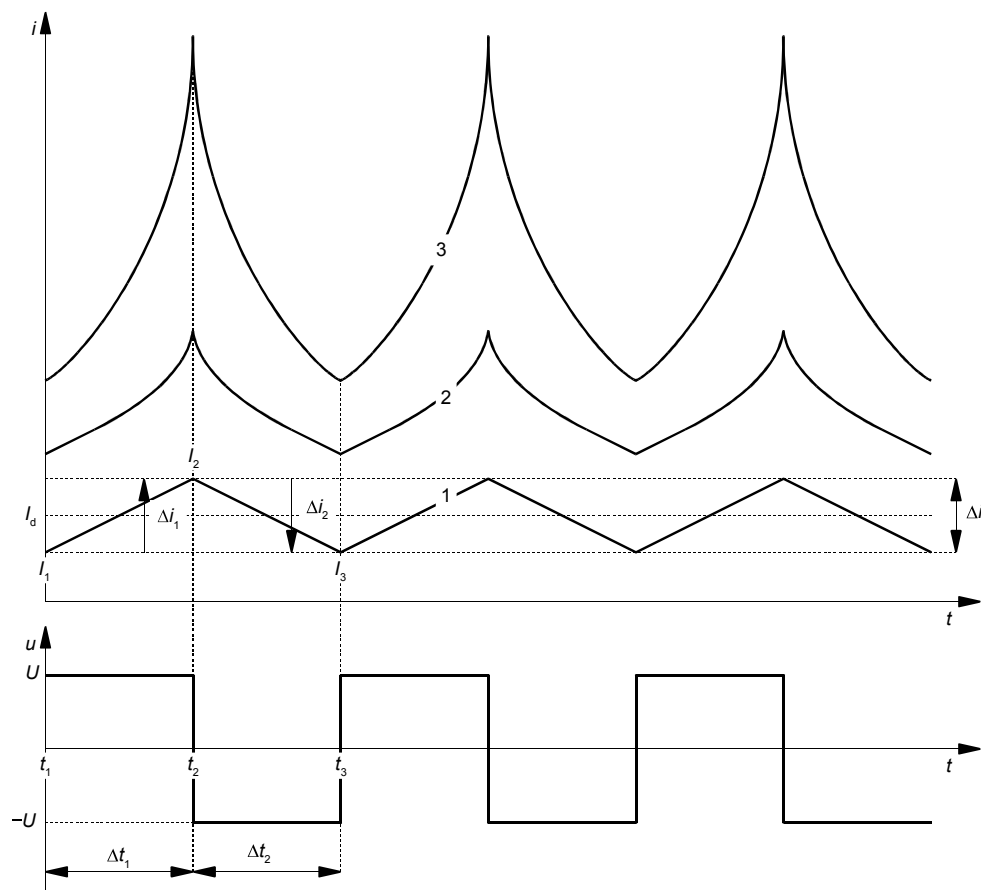
Rys. 3. Narastanie prądu w dławiku po przyłożeniu stałego napięcia do jego zacisków

2.2.b. Wpływ nasycenia dławika na działanie przekształtnika

W projektowaniu układów przekształtnikowych zakłada się oczywiście, że indukcyjności dławików są stałe i ściśle określone. W związku z tym ewentualne nasycenie jest źródłem sporych problemów, do uszkodzenia podzespołów układu włącznie. Niektóre z niebezpieczeństw są następujące.

1. Bardzo znacząco rośnie amplituda tętnień prądu Δi , w wyniku czego rośnie moc strat w rdzeniu. Oprócz tego rośnie także wartość skuteczna prądu, w wyniku

- czego rośnie moc strat w uzwojeniach. Może to doprowadzić do nadmiernego wzrostu temperatury i uszkodzenia rdzenia lub uzwojeń.
- Prąd dławika o dużej wartości skutecznej płynie także przez inne elementy układu, np. przyrządy półprzewodnikowe i kondensatory. Może więc dojść do przegrzania i uszkodzenia tych elementów. Na etapie projektowania były one bowiem dobrane przy założeniu, że prąd dławika ma kształt 1 (stąd również określoną amplitudę tętnienia Δi), a nie 3.
 - Nawet jeżeli w układzie zaimplementowano obwody zabezpieczeń prądowych, ich skuteczność w przypadku nasycenia dławika jest bardzo ograniczona. Charakteryzują się one bowiem niezerowym czasem reakcji. Prąd nasyczonego dławika narasta bardzo szybko na krótkim odcinku czasu. Dlatego zanim zabezpieczenie zadziała i wyłączy przyrząd półprzewodnikowy, prąd może już narosnąć do wartości, która ten przyrząd uszkodzi.
 - W wyniku przełączania przyrządów półprzewodnikowych przy znacząco większym prądzie (w szczycie odkształconego prądu dławika) rośnie poziom emitowanych zaburzeń elektromagnetycznych, które mogą zakłócić pracę układu sterowania, co doprowadzi do trudnych do przewidzenia skutków, np. niepożądanego wzrostu napięcia na wyjściu, co może być groźne dla odbiornika.
 - Wzrost poziomu zaburzeń utrudnia również spełnienie norm dotyczących oddziaływania urządzenia na środowisko pracy.



Rys. 4. Prąd w dławiku poddanym impulsom napięcia o takiej samej wartości U i $-U$ oraz takim samym czasie trwania polaryzacji dodatniej Δt_1 i ujemnej Δt_2 , dla trzech różnych poziomów składowej stałej tego prądu I_d

Praca w nasyceniu (zwykle chwilowa) jest niekiedy wręcz wykorzystywana w zasadzie działania układu (przykładem może być pewne rozwiązanie falownika sterującego lampą fluorescencyjną [2]). Liczba takich aplikacji jest jednak ograniczona. Jako ogólną zasadę należy przyjąć, że nasycenia dławika należy za wszelką cenę unikać. Jedyną drogą do osiągnięcia tego celu jest poprawny dobór

lub projekt dławika, tak, aby zapewnić, że w przewidywanym zakresie warunków pracy układu do nasycenia nie dojdzie.

2.2.c. Stan ustalony przekształtnika

Przypomnijmy, że stanem ustalonym układu o działaniu przełączającym nazywamy stan, w którym przebiegi wielkości elektrycznej wykazują powtarzalność z okresu na okres, zaś energia zgromadzona w elementach biernych jest taka sama na koniec każdego okresu. Oznacza to, że *per saldo* w każdym okresie pracy układu każda cewka dostarcza tyle samo energii do układu, co z niego pobiera; podobnie każdy kondensator.

Prawidłowo zaprojektowany i działający przekształtnik pracuje zasadniczo w stanie ustalonym, przy czym osiągnięcie stanu ustalonego wymaga oczywiście określonego czasu. Gdyby bowiem przekształtnik nie osiągnął stanu ustalonego, to:

- 1° gdyby energia na koniec każdego okresu była mniejsza niż na jego początku, to stopniowo malałaby ona do zera; oznaczałoby to zatrzymanie pracy przekształtnika, którego działanie opiera się właśnie na przekazie energii gromadzonej czasowo w elementach biernych;
- 2° w przeciwnym wypadku energia stopniowo rosłaby do nieskończoności, co jest albo niemożliwe ze względu na określoną pojemność elementu, albo oznaczałoby zniszczenie tego elementu (i zapewne innych).

Energia zgromadzona w polu magnetycznym cewki wynosi w każdej chwili

$$W = \frac{Li^2}{2} \quad (20)$$

Założmy, że dławik został zaprojektowany poprawnie i nie dochodzi do jego nasycenia. Wówczas indukcyjność L nie zmienia się w czasie, więc dla spełnienia warunku stanu ustalonego potrzeba, aby prąd dławika na początku każdego okresu był równy prądowi dławika na koniec tego okresu. Tak więc suma zmian prądu w poszczególnych taktach pracy układu musi być zerowa:

$$\Delta i(T) = \sum_i \Delta i_i = 0 \quad (21)$$

W przypadku przebiegu 1 z rys. 4, który odpowiada przekształtnikowi dwutaktowemu, oznacza to

$$\Delta i_2 = -\Delta i_1 \Leftrightarrow |\Delta i_2| = |\Delta i_1| \quad (22)$$

czyli że wzrost prądu dławika w takcie pierwszym musi być równy jego spadkowi w takcie drugim. W przypadku układów o więcej niż 2 taktach pracy, suma wzrostów musi być równa wartości bezwzględnej sumy spadków.

Przy przyjętym założeniu, że dławik nie nasycy się, a napięcie na dławiku w każdym takcie pracy jest stałe, zmianę prądu można wyrazić zależnością (5). Warunek (22) można więc przedstawić w postaci

$$U_1 \Delta t_1 = -U_2 \Delta t_2 \quad (23)$$

gdzie U_1 i U_2 – napięcie na dławiku w takcie 1 i 2. Powyższa zależność jest szeroko wykorzystywana w analizie i syntezie (projektowaniu) przekształtników elektronicznych.

Zależność (23) można przedstawić w bardziej ogólnej postaci całkowej. Przekształcając równość (3) mamy

$$di = \frac{u}{L} dt \quad (24)$$

Całkując stronami za pierwszy takt dostajemy (patrz rys. 4, przebieg 1)

$$\int_{I_1}^{I_2} di = \int_{t_1}^{t_2} \frac{u}{L} dt = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} u dt \quad (25)$$

$$[i]_{I_1}^{I_2} = I_2 - I_1 = \Delta i_1 = \frac{1}{L} \int_{\Delta t_1} u dt \quad (26)$$

Analogicznie dla taktu 2

$$\Delta i_2 = \frac{1}{L} \int_{\Delta t_2} u dt \quad (27)$$

Podstawiając powyższe do (22) otrzymujemy

$$\int_{\Delta t_1} u dt = - \int_{\Delta t_2} u dt \quad (28)$$

Oznacza to, że pola powierzchni między przebiegiem napięcia a osią czasu w obu taktach pracy muszą być sobie równe. W przypadku napięcia prostokątnego, dla którego uzyskany został wzór (23), iloczyn napięcia i czasu wyraża również pole powierzchni. Zależność (23) jest więc szczególną postacią zależności (28).

Biorąc pod uwagę, że suma czasów trwania obu taktów pracy daje w wyniku okres T ,

$$\int_{\Delta t_1} u dt + \int_{\Delta t_2} u dt = \int_T u dt = 0 \quad (29)$$

Zwróćmy uwagę, że również

$$\frac{1}{T} \int_T u dt = 0 \quad (30)$$

gdzie lewa strona wyraża definicję wartości średniej za okres u_{av} napięcia na dławiku. Z kolei średnia za okres tożsama jest ze składową stałą U_d . Stąd dodatkowy wniosek, że w stanie ustalonym składowa stała napięcia na dławiku jest równa zero:

$$u_{av} = U_d = 0 \quad (31)$$

2.2.d. Zdolność gromadzenia energii

Zjawisko nasycenia ogranicza prąd dławika, a więc – zgodnie ze wzorem (20) – również jego zdolność do gromadzenia energii w polu magnetycznym:

$$W_{\max} = \frac{LI_{\text{sat}}^2}{2} \quad (32)$$

Korzystając z prawa Ampère'a (15), przyjmując założenie upraszczające o stałą przenikalności magnetycznej, otrzymujemy

$$I_{\text{sat}} = \frac{H_{\text{sat}} l}{N} = \frac{B_{\text{sat}} l}{\mu N} \quad (33)$$

Stąd

$$W_{\max} = \frac{1}{2} L \frac{B_{\text{sat}}^2 l^2}{\mu^2 N^2} \quad (34)$$

Aby uzyskać pełny obraz wpływu parametrów rdzenia na gromadzoną energię, należy uwzględnić, że od parametrów tych zależy również indukcyjność dławika. Podstawiając (6) i uwzględniając, że objętość rdzenia równa jest iloczynowi jego przekroju A i długości l , otrzymujemy

$$W_{\max} = \frac{1}{2} \frac{\mu N^2 A}{l} \frac{B_{\text{sat}}^2 l^2}{\mu^2 N^2} = \frac{1}{2} \frac{V B_{\text{sat}}^2}{\mu} \quad (35)$$

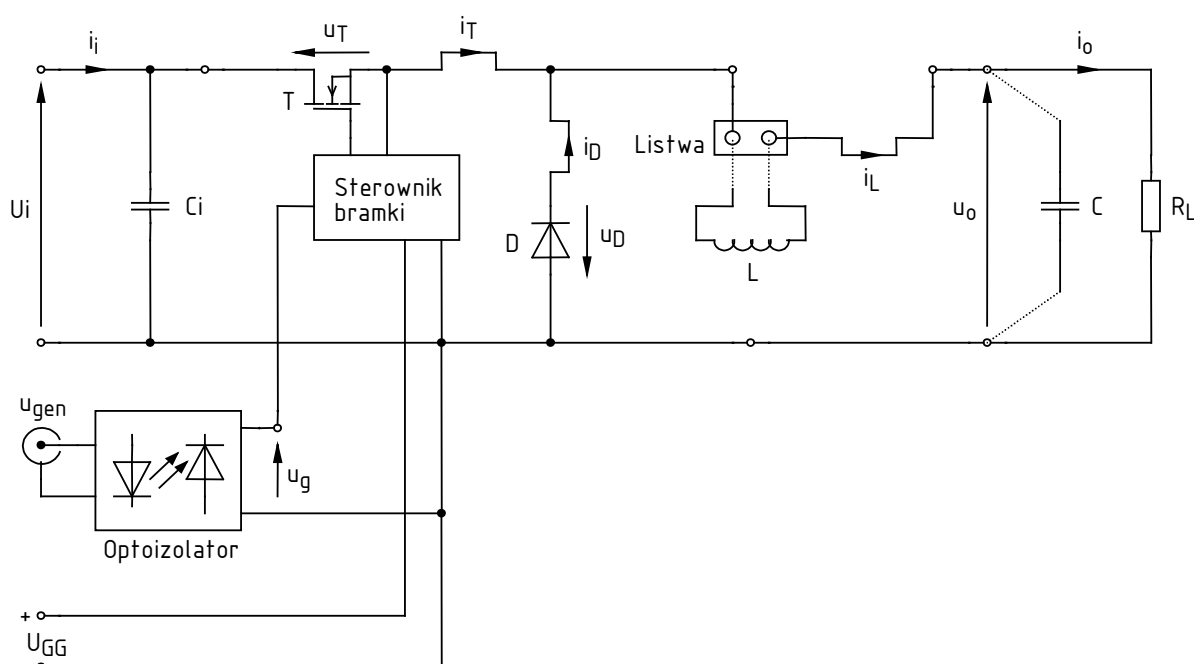
Maksymalna energia, jaką można zgromadzić w konkretnym dławiku zależy więc wyłącznie od parametrów rdzenia: objętości, indukcji nasycenia i przenikalności magnetycznej. Brak natomiast zależności od liczby zwojów, a ściślej – zależność ta ulega redukcji w wyniku przeciwnego wpływu na indukcyjność L (proporcjonalną do N^2) i na kwadrat prądu nasycenia (proporcjonalny do $1/N^2$).

3. Pomiary

3.1. Przygotowanie układu

Układ pomiarowy

Do badania dławików w niniejszym ćwiczeniu wykorzystywany jest układ przetwornicy obniżającej napięcie, której schemat przedstawia rys. 5. Niebieskie gniazdo na panelu układu umożliwia włączenie w obwód dowolnego dławika, natomiast gniazda bananowe na wyjściu – przyłączenie dowolnego odbiornika.



Rys. 5. Schemat układu przetwornicy obniżającej napięcie wykorzystywanej w ćwiczeniu

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 mas 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 napięcia na dławiku dokonuje się przez przyłączenie sondy napięciowej do wyprowadzeń z odpowiednich gniazd bananowych. Pomiaru prądu dławika dokonuje się poprzez zapięcie sondy prądowej na fragmencie przewodu wyprowadzonym nad panel obok niebieskiego złącza.

Tab. 1. Wybrane parametry badanych dławików mocy

Lp.	Cechy zewnętrzne	Prąd znamionowy	Indukcyjność nominalna	Indukcyjność początkowa (bez obciążenia)	Rezystancja szeregową dla składowej stałej	Pole przekroju rdzenia	Średnica pierścienia	Objętość rdzenia	Średnica przekroju uzwojenia
		I_{rat} [A]	L_{nom} [μH]	L_0 [μH]	R_0 [Ω]	A [mm ²]	D [mm]	V [mm ³]	d_w [mm]
1	Żółty mały	5,0	100	172 ± 15%	0,059	73,4	20,5	4730	0,8
2	Żółty duży	10	100	152 ± 15%	0,044	205	35,5	22900	1,0
3	Ciemnoszary		100			101	32,0	10200	

W ćwiczeniu badaniu poddane zostaną 3 różne dławiki toroidalne o tej samej indukcyjności nominalnej. Ich wybrane parametry zebrano w tab. 1. Średnica D oznacza średnicę okręgu poprowadzonego środkiem toroidu; jest to więc średnia z zewnętrznej i wewnętrznej średnicy pierścienia. Powszechnie przyjęło się uznawać tę właśnie wartość za parametr charakterystyczny, jako że z jednej strony jest łatwo wyznaczalna, a z drugiej – jej użycie w obliczeniach nie prowadzi do znaczących błędów.

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 (obecnie wyłączony) o wydajności 20 A. Wszystkie pokręta zasilacza skrócić do zera.
3. Do zasilenia obwodu sterowania (wejście U_{GG}) wykorzystać osobny zasilacz (obecnie wyłączony). Pokręto Cal skrócić do zera. Przyciskami ustawić sumaryczne napięcie 15 V. Pokrętłami Limit Current ustawić ograniczenie prądowe na 100 mA.
4. Włączyć generator funkcyjny. Wyjście generatora (Func Out) połączyć kablem bezpośrednio z kanałem 1 oscyloskopu.
5. Skonfigurować oscyloskop:
 - na kanale 1 wyłączyć uwzględnianie tłumienia sondy 10:1 (przycisk AC DC wcisnąć i przytrzymać do sygnału dźwiękowego, uwzględnianie tłumienia 10:1 sygnalizuje symbol sondy obok symbolu kanału na dole ekranu);
 - na obu kanałach włączyć sprzężenie ze składową stałą (przycisk AC DC wcisnąć krótko, nastawę DC sygnalizuje znak = obok symbolu kanału na dole ekranu, AC – znak ~);
 - ustawić źródło wyzwalania na kanał 1 (przyciskiem Trig. ustawić CH I);
 - ustawić wyzwalanie ze składową stałą (przycisk Trig. Mode);
 - ustawić automatyczne wyzwalanie (przycisk NM AT do sygnału, tak aby zgasła kontrolka NM).
6. Na ekranie powinien pojawić się przebieg sinusoidalny z generatora. Dostosować podstawę czasu (Time/Div.), wzmocnienie kanału (Volts/Div.) oraz poziom wyzwalania (Level) tak, aby uzyskać na ekranie stabilny obraz.

7. Na generatorze przyciskiem Mode/Func ustawić strzałkę w kierunku napisu Sine. Przyciskami strzałek zmienić ustawienie na Square. Wcisnąć Range/Attn, w wyniku czego powinna pojawić się opcja Range. Przyciskami strzałek przestawić generator na zakres 20 kHz ... 200 kHz. Pokrętle Frequency ustawić częstotliwość 50 kHz. Pokrętle Amplitude, patrząc na obraz na oscyloskopie, ustawić amplitudę (międzyszczytową) przebiegu ok. 10 V. Wcisnąć Sub Func tyle razy, by wyświetliła się opcja DC Offset. Przyciskami strzałek włączyć ją. Pokrętle DC Offset przesunąć przebieg tak, by jego poziom niski miał wartość 0 V (poziom zera na oscyloskopie wskazywany jest przez znacznik w formie odwróconej litery T).
8. Podstawę czasu oscyloskopu dostosować tak, by obserwować 2–5 okresów przebiegu.
9. Odłączyć kabel od oscyloskopu i przyłączyć generator do gniazda BNC na panelu układu laboratoryjnego.
10. W niebieskie złącze włączyć żółty mały dławik.

Niewykonanie lub niepełne wykonanie kolejnego punktu grozi zniszczeniem układu wskutek zwarcia!

11. Dołączyć odbiornik:
 - a) do wyjścia przetwornicy, w gniazda oznaczone symbolem opornika, podłączyć opornik regulowany 25 Ω , 5 A w sposób umożliwiający zmianę rezystancji w pełnym zakresie 0...25 Ω (patrz schemat połączeń na korpusie opornika);
 - b) w szereg z opornikiem włączyć multimetr M-3860M ustawiony w tryb amperomierza (nie miliamperomierza; wykorzystać odpowiednie gniazdo multimetru) składowej stałej;
 - c) ślizgacz opornika ustawić mniej więcej w połowie.
12. Do kanału 1 oscyloskopu przez sondę napięciową z tłumieniem 10:1 przyłączyć napięcie na dławiku (przeciwnie do faktycznego zwrotu prądu dławika). Włączyć uwzględnianie tłumienia 10:1. Włączyć wyświetlanie przebiegów z obu kanałów (przycisk Dual).
13. 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 AC oraz wzmocnienie 10 A/V. Na kanale 2 oscyloskopu ustawić sprzężenie DC oraz uwzględnianie przelicznika 10:1. Sondę prądową zapiąć na wyprowadzonym fragmencie przewodu tak, aby strzałka na korpusie sondy była zgodna z faktycznym kierunkiem przepływu prądu.

Przed wykonaniem kolejnych punktów poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący.

14. 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.
15. Włączyć zasilacz obwodu mocy. Próg ograniczenia prądowego (pokrętle regulacji zgrubnej Current Coarse) 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.
16. Włączyć sterowanie przetwornicy czerwonym przyciskiem. Na oscyloskopie dostosować wzmocnienia kanałów i położenie poziomów zera do obserwowanych przebiegów.

3.2. Wykonanie pomiarów

Podstawowe zależności opisujące cewki

1. Opornik obciążający ustawić tak, by uzyskać składową stałą prądu wyjściowego (wskazanie multimetru) ok. 1 A. Korzystając z programu SP107 pobrać i zapisać przebiegi w formacie programu SP107 (MES).
2. Na generatorze pokrętko Symmetry ustawić mniej więcej w połowie jego zakresu. Wcisnąć Sub Func tyle razy, by wyświetliła się opcja Symmetry. Przyciskami strzałek włączyć funkcję zmiany symetrii. Pokrętkiem Frequency przywrócić częstotliwość podaną w pkt. 3.1/7. Pokrętkiem Symmetry uzyskać przebiegi o współczynniku wypełnienia wyraźnie mniejszym od 50%, ale nie minimalnym (może to wymagać dostosowania na oscyloskopie podstawy czasu i poziomu wyzwalania); prąd wyjściowy nie powinien spaść bardziej niż dwukrotnie. Pokrętkiem Frequency przywrócić częstotliwość. Sprawdzić, czy prąd nadal ma kształt trójkątny, zaś napięcie – prostokątny; w przeciwnym razie należy zwiększyć współczynnik wypełnienia i przywrócić częstotliwość. Dostosować ustawienia oscyloskopu i zarejestrować obserwowane przebiegi.
3. Powtórzyć pkt 2 dla współczynnika wypełnienia większego od 50%, ale nie maksymalnego. Dostosować ustawienia oscyloskopu i zarejestrować obserwowane przebiegi.

Charakterystyki dławików w funkcji prądu

4. Na generatorze wyłączyć opcję Symmetry. Pokrętkiem Frequency przywrócić częstotliwość podaną w pkt. 3.1/7.

Przed wykonaniem kolejnego punktu należy go przeczytać w całości do końca.

5. Opornik obciążający ustawić w położeniu dającym minimalny prąd wyjściowy. Zmieniając prąd wyjściowy od minimalnego w górę, dla kilku-kilkunastu punktów pomiarowych:
 - zanotować prąd wyjściowy I_o (wskazanie amperomierza),
 - zarejestrować przebiegi napięcia i prądu dławika upewniając się, że ustawienia oscyloskopu są nadal optymalne.

Pomiary należy przerwać, gdy spełniony zostanie jeden z poniższych warunków:

- 1° prąd dławika obserwowany na oscyloskopie zacznie wykazywać wyraźne odkształcenie od trójkąta – należy wówczas:
 - zapisać wyniki jako ostatni punkt pomiarowy,
 - sprowadzić prąd wyjściowy do minimum,
 - sprowadzić napięcie zasilania obwodu mocy do zera,
 - zakończyć pomiary dla bieżącego dławika;
- 2° prąd wyjściowy osiągnie ok. 3 A na oporniku 25 Ω – należy wówczas:
 - sprowadzić napięcie zasilania obwodu mocy do zera,
 - wymienić opornik obciążający na 3,5 Ω , 14 A,
 - koniecznie ustawić ślizgacz opornika w połowie zakresu,
 - przywrócić napięcie zasilania obwodu mocy jak w pkt. 3.1/15,
 - kontynuować pomiary dla prądów powyżej 3 A;

Przy wartościach prądu ok. 8–10 A może być obserwowany powolny spadek prądu wyjściowego w czasie. Wynika to z nagrzewania się tranzystora MOSFET przetwornicy i wynikającego stąd znacznego wzrostu jego rezystancji (co można stwierdzić dotykając radiatora z tyłu układu). W celu eliminacji negatywnego wpływu tego faktu na pomiary, można utrzymywać prąd stale na niskiej wartości, a tylko na krótko zmniejszyć rezystancję, zatrzymać przebiegi na oscyloskopie przyciskiem HOLD i jednocześnie

zapisać wskazanie amperomierza; od razu zwiększyć rezystancję do uzyskania na powrót niskiego prądu i dopiero teraz pobrać i zapisać przebiegi. Nie należy stosować zielonego przycisku do krótkotrwałego załączania przetwornicy, gdyż przy dużym obciążeniu spowoduje to znaczące przetężenie podczas załączania, które podmagnesuje sondę prądową i zwiększy jej błąd pomiarowy.

- 3° prąd wyjściowy osiągnie ok. 10 A na oporniku $3\ \Omega$ – należy wówczas:
- zapisać wyniki jako ostatni punkt pomiarowy,
 - sprowadzić napięcie zasilania obwodu mocy do zera,
 - zakończyć pomiary dla bieżącego dławika.
6. Przywrócić stan początkowy układu:
- a) jeżeli zamontowany jest opornik $3,5\ \Omega$, wymienić go na $25\ \Omega$;
 - b) koniecznie ustawić ślizgacz opornika w połowie zakresu;
 - c) przywrócić napięcie zasilania obwodu mocy jak w pkt. 3.1/15.
7. Powtórzyć pkt. 5–6 dla dławików (dla ostatniego z nich pkt 6 można pominąć):
- a) ciemnoszarego,
 - b) żółtego o większych wymiarach geometrycznych (dowolnego jednego z dwóch).

Zakończenie

8. Wyłączyć sterowanie przetwornicy czerwonym przyciskiem.
9. Wyłączyć zasilacz obwodu mocy. Wyłączyć generator funkcyjny. Wyłączyć zasilacz obwodu sterowania. Rozłączyć układ.

Parametry dławików

10. Włączyć cyfrowy miernik RLC. Sprawdzić i w razie potrzeby skorygować tryb pomiaru:
- indukcyjności (L) – wskazanie L/C/R z lewej strony wyświetlacza, zmiana przyciskiem L/C/R;
 - rezystancji (Ω) – wskazanie Q/D/ Ω w prawym górnym rogu wyświetlacza, zmiana przyciskiem Q/D/R;
 - szeregowego obwodu zastępczego (SER) – wskazanie PAL/SER u góry wyświetlacza, zmiana przyciskiem PAL SER;
 - przy średniej częstotliwości pomiarowej 1 kHz – wskazanie 1kHz lub 120Hz z prawej strony wyświetlacza, zmiana przyciskiem FREQ.

Używając miernika, do przyłączania dławików należy wykorzystywać przewody pomiarowe z końcówkami krokodylkowymi. Nie należy korzystać z prostokątnych gniazd bezpośrednio w obudowie miernika, gdyż zbyt duża średnica drutów nawojowych spowoduje ich zniszczenie.

11. Za pomocą miernika, dla każdego ze zbadanych dławików, zmierzyć indukcyjność dla zerowego prądu L_0 (wskazanie główne) i rezystancję szeregową dla składowej stałej R_d (wskazanie w prawym górnym rogu wyświetlacza).
12. Policzyc i zanotować liczbę zwojów N każdego ze zbadanych dławików.

4. Opracowanie i analiza wyników

4.1. Dane liczbowe

Uruchomienie oprogramowania

1. Uruchomić program SP107.
2. Uruchomić program Scilab. Wczytać skrypty *sp107* i *wavestar_calka* wpisując polecenia

```
exec('ścieżka_dostępu_do_skryptu\sp107.sce');  
exec('ścieżka_dostępu_do_skryptu\wavestar_calka.sce');
```

Pomiary dla różnych współczynników wypełnienia

3. W programie SP107 wyznaczyć parametry przebiegów pozwalające na sprawdzenie podstawowych zależności opisujących działanie dławika:
 - a) otworzyć oscylogramy zarejestrowane dla pierwszego dławika, dla współczynnika wypełnienia 50% (pkt. 3.2/1);
 - b) za pomocą kursorów odczytać dla dwóch taktów pracy (dowolnie wybranych sąsiednich, tj. dla załączonego i dla wyłączonego tranzystora) wartości (por. rys. 4, krzywa 1):
 - napięcia na dławiku U (jeżeli wykazuje zmienność – odczytać wartość średnią, możliwie najdłużej się utrzymującą),
 - czasu trwania taktu Δt ,
 - zmiany prądu Δi ;
 - c) wyeksportować dane do pliku TAB [*Data*, *Save*, wybrać typ *Table (*.tab)*]; stwierdzić, na którym kanale rejestrowane było napięcie na dławiku;
4. W programie Scilab, dla każdego z 3 współczynników wypełnienia:
 - a) wczytać wyeksportowane dane poleceniem (ewentualnie dodając ścieżkę dostępu lub zmieniając uprzednio katalog roboczy poleceniem *cd*)

```
[naglowek,dane]=wczytaj_sp107('nazwa_pliku.tab');
```

- b) wyznaczyć częstotliwość przebiegu wpisując polecenie

```
[T,f]=czest(dane,nr_przebiegu)
```

gdzie T – okres, f – częstotliwość, $nr_przebiegu$ – numer kanału, na którym było rejestrowane napięcie; poprawność automatycznej detekcji można sprawdzić wyświetlając przebieg napięcia poleceniem

```
wykresl(dane, nr_przebiegu)
```

wyznaczona częstotliwość powinna być równa ustawionej w pkt. 3.1/7; w razie stwierdzenia błędnego działania funkcji *czest*, w następnym kroku można podać częstotliwość odczytaną ręcznie kursorami w programie SP107 (wskazanie $1/dt$ w oknie Cursor po zaznaczeniu jednego okresu);

- c) wyznaczyć wartość średnią za okres napięcia na dławiku poleceniem

```
srednia_okres(dane, nr_przebiegu, f)
```

- d) wyznaczyć całkę z napięcia za każdy z dwóch taktów pracy [por. zależność (28)] poleceniem

```
calka_takt(dane, nr_przebiegu, nr_taktu)
```

gdzie nr_taktu jest kolejnym numerem taktu pracy liczonym od początku zarejestrowanego przebiegu, przy czym funkcja *calka_takt* za takt uznaje odcinek czasu między kolejnymi przejściami przebiegu przez zero.

5. Na podstawie wyników uzyskanych w pkt. 3, wyznaczyć iloczyn $U\Delta t$ za każdy z taktów pracy [por. zależność (23)].
6. Powtórzyć pkt. 3–5 dla pozostałych dwóch wartości współczynnika wypełnienia (pkt. 3.2/2–3).
7. Wyniki zebrać w tabeli 1.

Pomiary w funkcji składowej stałej prądu

8. W programie SP107, dla pierwszego dławika, dla każdego punktu pomiarowego (pkt. 3.2/5):
 - a) otworzyć zarejestrowany oscylogram przebiegów napięcia i prądu dławika;
 - b) za pomocą kursorów odczytać dla jednego z dwóch taktów pracy (dowolnie wybranego, ale zawsze tego samego, tj. albo dla narastania, albo dla opadania prądu) wartości:
 - napięcia na dławiku U (jeżeli wykazuje zmienność – odczytać wartość średnią, możliwie najdłużej się utrzymującą),
 - czasu trwania taktu Δt ,
 - zmiany prądu Δi .
9. Dla każdego punktu pomiarowego wyznaczyć:
 - a) indukcyjność dławika L – z odpowiednio przekształconej zależności (4);
 - b) względną przenikalność magnetyczną materiału rdzenia $\mu_{r,rev}$ – z odpowiednio przekształconej zależności (7), korzystając z parametrów rdzenia podanych w tab. 1 oraz zapisanych w pkt. 3.2/12. Wynik będzie przybliżoną przenikalnością rewersyjną, gdyż został uzyskany przy znaczącej składowej stałej prądu – a więc i natężenia pola magnetycznego – oraz dużo mniejszej składowej przemiennej.
10. Powtórzyć pkt. 8–9 dla pozostałych dławików (pkt 3.2/7).
11. Wyniki zebrać w tabeli 2, wraz ze zmierzonymi multimetrem wartościami prądu (z topologii przetwornicy obniżającej napięcie wynika, że prąd wyjściowy I_o jest równy składowej stałej prądu dławika I_d).
12. Dla każdego punktu pomiarowego obliczyć i dodać do tabeli przepływ Θ_d (składową stałą), a stąd składową stałą natężenia pola magnetycznego w rdzeniu H_d .

4.2. Analiza wyników

Podstawowe zależności opisujące dławik

1. W oparciu o wyniki zgromadzone w tabeli 1, sprawdzić, czy dla każdego z trzech przypadków spełnione są zależności: (5) w każdym z dwóch taktów pracy, (22), (23), (28), (31). Niezbędną do tego celu wartość indukcyjności należy pobrać z tabeli 2 dla odpowiedniego dławika i składowej stałej prądu (patrz pkt 3.2/1). Oczywiście z powodu skończonej dokładności pomiarów należy przyjąć, że dwie strony zależności są równe, gdy różnica jest dużo (więcej niż o rząd wielkości) mniejsza od rozpatrywanych wielkości.

Charakterystyki indukcyjności

2. Na podstawie wyników zgromadzonych w tabeli 2, wykonać dwa wykresy (na każdym wykresie wszystkie zbadane elementy):
 - a) indukcyjności w funkcji składowej stałej prądu $L = f(I_d)$, w skali logarytmicznej osi prądu,
 - b) względnej rewersyjnej przenikalności magnetycznej rdzenia w funkcji składowej stałej natężenia pola magnetycznego $\mu_{r,rev} = f(H_d)$, w skali logarytmicznej obu osi.
3. Stwierdzić, czy wartości indukcyjności początkowej L_0 i rezystancji dla składowej stałej R_d zmierzone mostkiem RLC (3.2/11) zgadzają się z podanymi przez producenta.
4. Na podstawie wykreślonych charakterystyk indukcyjności stwierdzić, czy wartości indukcyjności wyznaczone w drodze pomiarów zgadzają się z podanymi przez producenta (patrz tab. 1 w niniejszej instrukcji). Dla jakiej wartości składowej stałej prądu obowiązuje nominalna indukcyjność dławika? Na podstawie uzyskanej charakterystyki $L = f(I_d)$ ustalić przybliżony prąd znamionowy I_{rat} dla trzeciego dławika, jeżeli wiadomo, że został on również wykonany na indukcyjność nominalną $L_{nom} = 100 \mu H$.
5. Wartości porównywane w pkt. 3–4, a także wyznaczony prąd znamionowy trzeciego dławika, zestawić w tabeli 3.
6. Dla dławika, dla którego zmiana kształtu przebiegu prądu jest najlepiej widoczna, porównać kształt przebiegu przed nasyceniem oraz w nasyceniu. Ile razy (w przybliżeniu) wzrosła amplituda zmian prądu Δi ?

Parametry rdzeni

7. Przeanalizować charakterystyki przenikalności magnetycznej:
 - a) W oparciu o uzyskane charakterystyki $\mu_{r,rev} = f(H_d)$ stwierdzić, które rdzenie wykonane są z jednakowego, a które – z różnych materiałów.
 - b) W oparciu o wiadomości podane w par. 2.1.b ustalić, jakiego rodzaju mogą to być materiały (podać konkretne uzasadnienia).
 - c) Scharakteryzować ewidentne właściwości każdego z tych materiałów co do:
 - rzędu wielkości przenikalności początkowej μ_{ri} (przyjąć, że jest to wartość przy najmniejszej zmierzonej składowej stałej prądu I_d);
 - rzędu wielkości składowej stałej natężenia pola magnetycznego H_d , przy której zaczyna być obserwowane nasycenie się rdzenia (wyraźny spadek przenikalności).
 - d) Porównując wyniki z danymi udostępnionymi przez producenta rdzeni proszkowo-metalowych – firmę Micrometals (www.micrometals.com, Material Details, Power Conversion Materials, strony General Material Properties oraz Introduction to Magnetic Characteristics – charakterystyki DC), odnaleźć najbardziej prawdopodobny konkretny materiał, z którego wykonano badane rdzenie proszkowo-metalowe (zamieścić dane, na podstawie których wysnuto te wnioski).

8. Dokonać analizy indukcyjności charakterystycznej:
 - a) Ze wzoru (8) obliczyć indukcyjność charakterystyczną A_L każdego z rdzeni. Ze względu na zmienność indukcyjności, wartość tę wyznacza się z indukcyjności dla zerowej składowej stałej L_0 , dlatego należy skorzystać z wyników pomiaru mostkiem RLC.
 - b) W oparciu o wyniki dla dwóch dławików wykonanych z tego samego materiału, stwierdzić, czy zależność między wymiarami rdzenia (patrz tab. 1) a indukcyjnością charakterystyczną A_L jest zgodna z teorią [patrz wzory (8) i (7); nazwać konkretnie tę zależność].
 - c) W oparciu o wyniki dla dwóch dławików z różnych materiałów, a posiadających najbardziej zbliżone stosunki A/l , ocenić, czy zależność między początkową przenikalnością magnetyczną μ_{ri} a indukcyjnością charakterystyczną A_L jest zgodna z teorią.
9. Dokonać analizy zdolności gromadzenia energii:
 - a) Ze wzoru (32), obliczyć nominalną energię $W_{\max}$, jaką można zgromadzić w każdym z dławików. W tym celu należy przyjąć, że prąd graniczny nasycenia I_{sat} to prąd, dla którego indukcyjność dławika spada do swojej wartości nominalnej L_{nom} ; prąd ten należy odczytać (lub oszacować przez ekstrapolację) z charakterystyki $L = f(I_d)$.
 - b) W oparciu o wyniki dla dwóch dławików wykonanych z tego samego materiału, stwierdzić, czy zależność między wymiarami rdzenia (patrz tab. 1) a energią, jaką można zgromadzić w dławiku W_{nom} jest zgodna z teorią [patrz wzór (35); nazwać konkretnie tę zależność].
10. Dokonać analizy indukcji magnetycznej:
 - a) Dla wybranego rdzenia proszkowego (dla obu wynik powinien być zbliżony), obliczyć ze wzoru (16) natężenie pola magnetycznego H_{sat} ; prąd nasycenia I_{sat} przyjąć jak w pkt. 9.a).
 - b) Z charakterystyki $B = f(H)$ materiału ustalonego w pkt. 7.d), odczytać wartość indukcji nasycenia B_{sat} materiału proszkowo-metalowego – przyjmując, że odpowiada ona określonej wyżej prądowi I_{sat} , a więc natężeniu H_{sat} .
 - c) Oszacować indukcję nasycenia drugiego z materiałów. W tym celu należy:
 - skorzystać z zależności (35);
 - użyć obliczonej wyżej indukcji nasycenia B_{sat} materiału proszkowo-metalowego, wartości energii $W_{\max}$ obliczonych w pkt. 9.a) oraz objętości rdzeni podanych w tab. 1;
 - założyć, że stosunek przenikalności obu materiałów magnetycznych w punkcie nasycenia jest taki sam, jak stosunek ich przenikalności początkowych, w związku z czym można użyć wartości μ_{ri} jak w pkt. 7.c).
11. Wyniki liczbowe uzyskane w pkt. 7–10 zebrać w tabeli 4.

5. Literatura

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