

# Sterowniki impulsowe, część 1

Rozpoczynamy publikację cyklu artykułów, w których przedstawimy szereg zagadnień związanych z konstrukcjami zasilaczy impulsowych i przetwornic.

Pierwszy artykuł cyklu poświęcamy przybliżeniu teoretycznych podstaw konstrukcji typowych sterowników impulsowych.

Alternatywą dla standardowych układów stabilizatorów liniowych są sterowniki i przetwornice impulsowe (DC/DC), które ze względu na swoje korzystne cechy stają się obecnie bardzo popularne i szeroko stosowane. Umożliwiają one bowiem w porównaniu ze standardowymi układami stabilizatorów liniowych znaczne zmniejszenie gabarytów i ciężaru zasilacza oraz znaczące zwiększenie sprawności (do ponad 90% w porównaniu z ok. 50% dla stabilizatorów liniowych).

Te korzyści są jednak okupione pewnymi niedogodnościami - przetwornice napięcia stałego są z reguły bardziej skomplikowane w konstrukcji i, co ważniejsze, są źródłem zakłóceń (propagowanych zarówno za pośrednictwem przewodów zasilających, jak i wytwarzanego pola elektromagnetycznego). Dla wielu układów elektronicznych zakłócenia te nie są krytyczne, jednak często muszą być uwzględnione w celu zapewnienia prawidłowej pracy zasilanego układu. Należy zatem mieć świadomość, jak dalece konstrukcja sterownika lub przetwornicy wpływa na poziom generowanych zakłóceń.

W niniejszym opracowaniu dokonano przeglądu sterowników i przetwornic impulsowych ze szczególnym uwzględnieniem problemów zakłóceń emitowanych przez nie. Zawiera także wzory i wskazówki projektowe, które mogą być wykorzystane podczas konstruowania zasilaczy impulsowych.

Artykuł podzielony jest na trzy części tematyczne. Pierwsza traktuje o sterownikach impulsowych, druga o przetwornicach (konwerterach), natomiast w trzeciej poruszono problem pomiaru zakłóceń i działań, które mogą być podjęte w celu ich minimalizacji.

## Sterowniki impulsowe

Sterowniki impulsowe są stosowane wtedy, gdy nie jest potrzebna bariera galwaniczna w układzie zasilania. Umożliwiają one zarówno zmniejszanie napięcia wejściowego, jego zwiększanie, jak i zmianę biegunowości napięcia wyjściowego. Nie są skomplikowane w konstrukcji, gdyż występuje w niej tylko jedna indukcyjność (w postaci dławika).

## Sterownik STSI

Podstawowy schemat sterownika STSI (szeregowy tranzystor, szeregowo indukcyjność) przedstawiono na rys.1. Dławik L wraz z kondensatorem C stanowią filtr dolnoprzepustowy tłumiący wyższe harmoniczne przebiegu wyjściowego. Zakładając, że w stanie ustalonym napięcie na kondensatorze filtrującym C jest w przybliżeniu stałe i równe  $U_o$  oraz przyjmując, że elementy przełączające (dioda i tranzystor) są idealne, można dokonać przybliżonej analizy układu. W momencie załączenia tranzystora kluczującego, prąd w indukcyjności rośnie liniowo według zależności:

$$I_L(t) = I_{L \min} + \frac{U_{we} - U_o}{L} \cdot t$$

Po upływie czasu  $t$  tranzystor kluczujący jest wyłączany. Wielkość prądu jest równa:

$$I_L(\tau) = I_{L \max} = I_{L \min} + \frac{U_{we} - U_o}{L} \cdot \tau$$

Zatkanie tranzystora powoduje powstanie przepięcia, które odblokowuje diodę D (jest to tzw. dioda obejściowa, która umożliwia ciągły przepływ prądu w obwodzie obciążenia). W czasie od  $\tau$  do T prąd w cewce L opada liniowo według zależności:

$$I_L = I_{L \max} - \frac{U_o}{L} \cdot (t - \tau),$$

aby w czasie T osiągnąć wartość:

$$I_L(T) = I_{L \min} = I_{L \max} - \frac{U_o}{L} \cdot (T - \tau)$$

Obliczając wahania prądu płynącego przez dławik otrzymujemy się:

$$\Delta I_L = I_{L \max} - I_{L \min} = \frac{U_{we} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)}{L} \cdot T$$

gdzie

$$\gamma = \frac{\tau}{T}$$

( $\gamma$  współczynnik wypełnienia przebiegu sterującego), natomiast charakterystyka sterowania opisana jest wzorem:

$$U_o = U_{we} \cdot \gamma$$

Jest ona liniową funkcją parametru  $\gamma$ .

Powyższe zależności są prawdziwe dla ciągłego przepływu strumienia  $\phi$  w dławiku L, tzn. dla prądu obciążenia  $I_o$  większego od wartości prądu krytycznego  $I_{okr}$  danego wzorem:

$$I_{okr} = \frac{U_{we} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)}{2 \cdot L \cdot f}$$

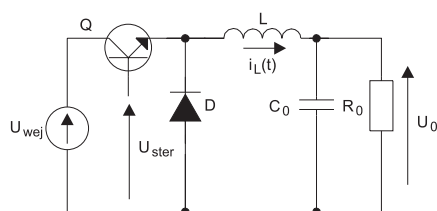
Jeśli przepływ strumienia w rdzeniu dławika L jest nieciągły, to charakterystyka sterowania jest nieliniowa i dana wzorem:

$$U_o = \frac{U_{we}}{1 + \frac{2 \cdot I_o \cdot L}{\gamma^2 \cdot U_{we} \cdot T}}$$

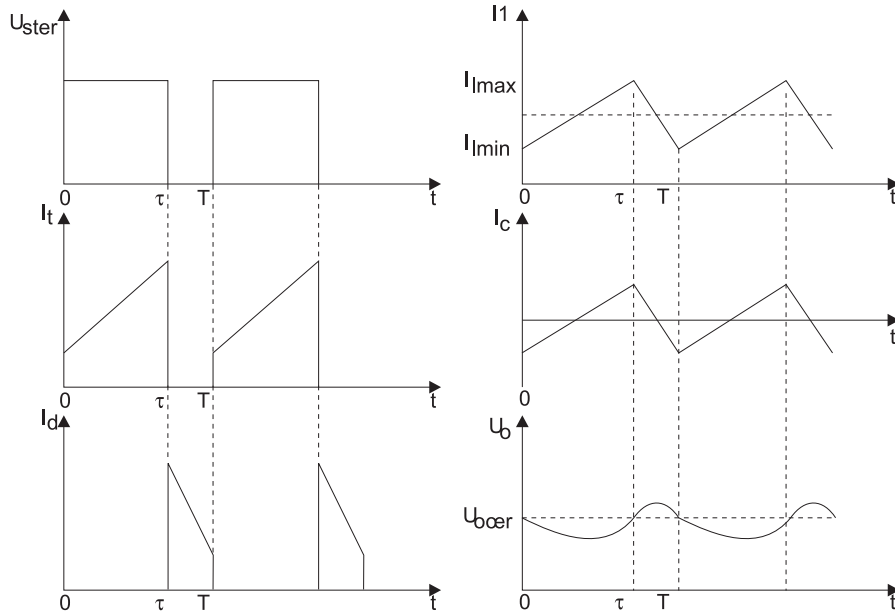
Napięcie wyjściowe zaczyna zależeć w tym przypadku od wielkości obciążenia, częstotliwości pracy i kwadratu współczynnika wypełnienia przebiegu. Z reguły unika się pracy dla prądów obciążenia mniejszych od wartości prądu krytycznego. Przebiegi napięć i prądów w obwodzie sterownika STSI przedstawia rys.2.

## Analiza pracy sterownika STSI pod względem wielkości tętnień napięcia wyjściowego

W celu dokonania analizy przyjmuje się, że kondensator wyjściowy C nie posiada elementów pasywnych (tzn. rezystancji szeregowy ESL). Wpływ tych parametrów będzie opisane dalej.



Rys. 1.



Rys. 2.

Tętnienia na pojemności wyjściowej można określić poprzez podanie współczynnika tętnień  $\chi$ :

$$\chi = \frac{\Delta U_c}{U_o}$$

gdzie  $\Delta U_c$  to zmiany napięcia na kondensatorze filtrującym,  $U_o$  - średnie napięcie wyjściowe.

Jest on równy:

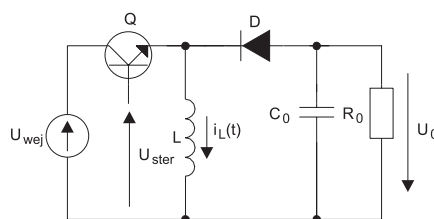
$$\chi = \frac{1 - \gamma}{8 \cdot L \cdot C \cdot f^2}$$

Wzór powyższy jest słuszny dla  $I_o > I_{okr}$  (ciągły przepływ strumienia w rdzeniu dławika).

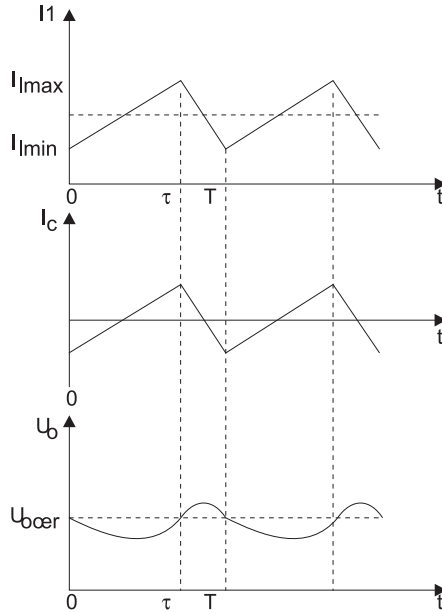
Dla takich warunków pracy (przepływ ciągły) współczynnik tętnień jest odwrotnie proporcjonalny do  $f^2$ ,  $L$  oraz  $C$ . Przy dużej częstotliwości przełączania można zatem stosować niezbyt duże wartości pojemności i indukcyjności, co jest bardzo korzystną cechą.

Po uwzględnieniu elementów pasywnych kondensatora filtru wyjściowego (szeregowej rezystancji ESR oraz indukcyjności ESL) tętnienia zwiększają się o składową trójkątną równą iloczynowi  $ESR \cdot (I_L(t) - I_o)$  oraz o składową prostokątną o amplitudzie równej  $ESL \cdot di_L(t)/dt$ . Ponieważ prądy przepływające przez ESL nie wykazują nagłych skoków wartości, zatem i poziom impulsów szpilkowych na wyjściu sterownika jest niewielki (znacznie mniejszy niż w przypadku sterownika STRI i RTSI).

Reasumując sterownik STSI stanowi dobre rozwiązanie jeżeli chodzi o wielkość tętnień napięcia wyjściowego i poziom zakłócających impulsów szpilkowych.



Rys. 3.



### Sterownik STRI

Sterownik STRI (szeregowy tranzystor, równoległa indukcyjność) umożliwia uzyskanie napięcia wyjściowego o odwrotnej biegunowości względem napięcia wejściowego. Podstawowy układ pokazano na rys.3. Jest to sterownik dwutaktowy, tzn. podczas pierwszego taktu pracy energia pobierana ze źródła wejściowego jest gromadzona w rdzeniu dławika (w postaci energii pola magnetycznego), a w drugim taktie jest przekazywana do wyjścia układu. Zakładając, że w stanie ustalonym napięcie na kondensatorze filtrującym jest w przybliżeniu stałe i równe  $U_o$  oraz przyjmując, iż tranzystor T oraz dioda D są idealne można dokonać przybliżonej analizy pracy układu.

W momencie załączenia tranzystora dioda D jest spolaryzowana w kierunku zapornym i nie przepływa przez nią prąd. Prąd w dławiku narasta liniowo w czasie według zależności:

$$I_L(t) = I_{L \min} + \frac{U_{wej}}{L} \cdot t$$

osiągając dla czasu  $t$  wartość maksymalną  $I_{L \max}$ . W tym czasie obciążenie pobiera prąd z kondensatora wyjściowego  $C_o$ . Następnie tranzystor zostaje wyłączony. Na dławiku powstaje przepięcie, które polaryzuje diodę i wymusza przepływ prądu do obwodu obciążenia. Prąd w dławiku maleje liniowo według zależności:

$$I_L(t) = \frac{-U_o}{L} \cdot (t - \tau) + I_{L \max}$$

Po upływie czasu  $T$  tranzystor jest znowu załączany. Wówczas prąd dławika jest równy:

$$I_L(T) = I_{L \min} = -\frac{U_o}{L} \cdot (T - \tau) + I_{L \max}$$

Charakterystyka sterowania opisana jest zależnością:

$$U_o = U_{wej} \cdot \frac{\gamma}{1 - \gamma}$$

Sterownik ten umożliwia więc nie tylko

zmianę biegunowości napięcia, ale także jego zmniejszenie (dla współczynnika wypełnienia przebiegu sterującego  $\gamma < 0,5$ ) lub zwiększenie (dla  $\gamma > 0,5$ ). Napięcie wyjściowe może być także stabilizowane przy zmianach napięcia wejściowego przez zmianę współczynnika wypełnienia  $\gamma$ , ale nie jest to liniowa zależność od  $\gamma$ .

Powyższe zależności są prawdziwe dla przypadku, gdy strumień  $\phi$  w rdzeniu nie spada do zera (jest to przepływ ciągły). Warunkiem takiego przepływu jest, aby  $I_L > 0$  i jest on zachowany, gdy średni prąd obciążenia  $I_o$  nie spada poniżej wartości prądu obciążenia krytycznego  $I_{okr}$  równego:

$$I_{okr} = \frac{U_{wej} \cdot T}{2 \cdot L} \cdot \gamma \cdot (1 - \gamma)$$

Dla prądów obciążenia  $I_o < I_{okr}$  charakterystyka sterowania jest bardziej złożona i określona zależnością:

$$U_o = \gamma \cdot U_{wej} \cdot \sqrt{\frac{R_o}{2 \cdot f \cdot L}}$$

Napięcie wyjściowe zależy wówczas od częstotliwości pracy, wielkości obciążenia oraz wartości indukcyjności. Dlatego też unika się pracy sterownika w zakresie nieciągłego przepływu strumienia w rdzeniu dławika.

Dla przepływu nieciągłego z charakterystyki sterowania wynika, iż jeśli  $R_o$  wzrasta (sterownik jest coraz mniej obciążony), to wzrasta także napięcie wyjściowe  $U_o$ , teoretycznie do nieskończenia dużej wartości.

Sterownik STRI nie może zatem pracować bez obciążenia, a przy obciążeniu zmieniającym się w dużych granicach należy zastosować obciążenie wstępne.

Napięcie na tranzystorze przełączającym w momencie jego wyłączenia jest równe:

$$U_{ce \max} = U_{wej} + U_o = \frac{U_{wej}}{1 - \gamma}$$

Dla dużych wartości współczynnika wypełnienia napięcie to znacznie wzrasta, co może doprowadzić do uszkodzenia tranzystora.

Sterownik STRI jest niekorzystny jeżeli chodzi o rozmiar rdzenia. Ponieważ cała energia przekazywana do obciążenia musi najpierw być zgromadzona w rdzeniu transformatora, zatem powinien on charakteryzować się dużą wartością indukcji nasycenia. Najbardziej istotne przebiegi napięć i prądów w obwodzie sterownika STRI zostały przedstawione na rys.4.

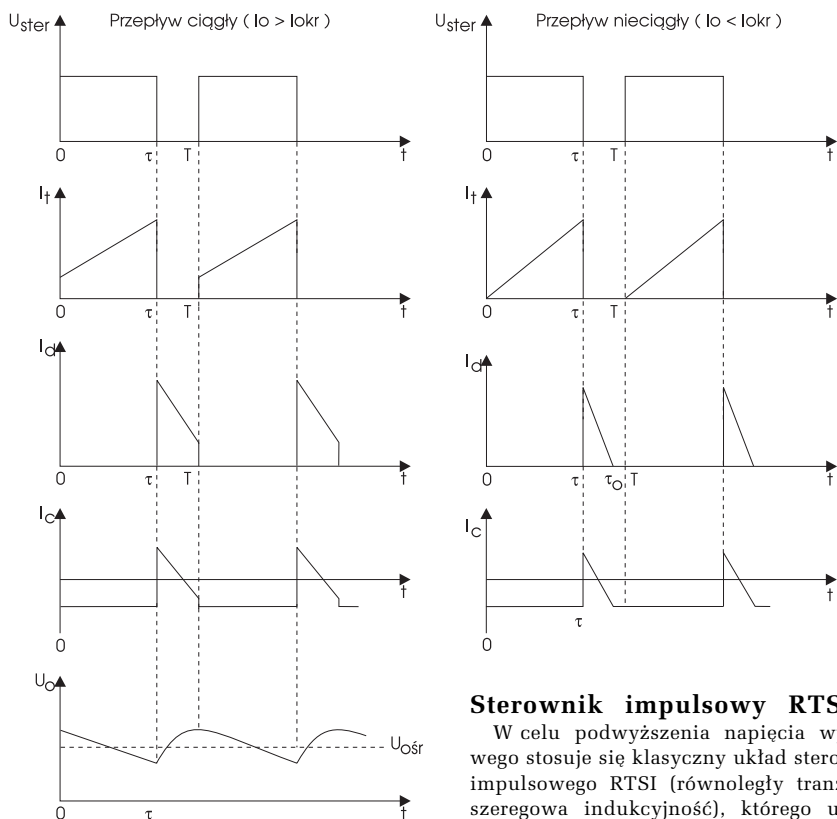
### Analiza pracy sterownika STRI pod względem wielkości tętnień napięcia wyjściowego

W celu dokonania analizy wielkości tętnień napięcia wyjściowego przyjęto wstępne założenie, że kondensator filtrujący  $C$  nie posiada elementów pasywnych, tzn. szeregowej rezystancji ESR oraz szeregowej indukcyjności ESL. Wpływ tych parametrów pasywnych będzie omówiony dalej.

Współczynnik tętnień napięcia wyjściowego jest równy (dla przepływu ciągłego):

$$\chi = \frac{\gamma}{R_o \cdot C \cdot f}$$

Jak wynika z powyższego wzoru dla interesującego przypadku pracy (przepływ ciągły) współczynnik tętnień jest proporcjonalny



Rys. 4.

do  $1/f$ . Współczynnik ten jest także zależny od wielkości obciążenia, przy czym dla przepływu ciągłego im rezystancja obciążenia jest większa, tym tętnienia są mniejsze.

Powyższe zależności zostały wyprowadzone dla przypadku, gdy pasywna rezystancja szeregową była równa zero ( $ESR=0$ ), oraz pasywna indukcyjność szeregową także była równa zero ( $ESL=0$ ). Jeśli uwzględnić rezystancje szeregową, to okazuje się, że zwiększa ona wartość tętnienia napięcia wyjściowego o składową równą:

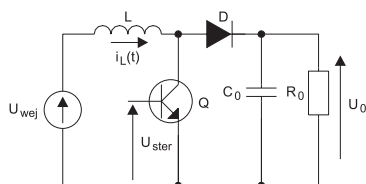
$$ESR \cdot (I_L(t) - I_o)$$

Natomiast pasywna indukcyjność szeregową powoduje powstawanie dodatkowej składowej równej:

$$ESL \cdot \frac{dI_L(t)}{dt}$$

Ponieważ w sterowniku STRI występują znaczne, nagłe skoki prądów płynących przez ESL, zatem znacznie zwiększa się poziom zakłócających impulsów szpilkowych na wyjściu.

Reasumując można powiedzieć, że sterownik STRI nie jest korzystny, zarówno jeżeli chodzi o wielkość tętnień napięcia wyjściowego, jak i poziomu generowanych zakłóceń typu szpilkowego.



Rys. 5.

### Sterownik impulsowy RTSI

W celu podwyższenia napięcia wyjściowego stosuje się klasyczny układ sterownika impulsowego RTSI (równoległy tranzystor, szeregową indukcyjność), którego uproszczony schemat pokazano na rys.5.

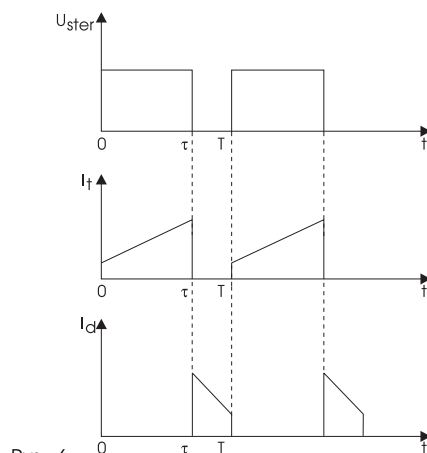
W tym układzie tranzystor działa jako klucz. Zakładając, że elementy są idealne można dokonać uproszczonej analizy układu. W momencie włączenia tranzystora dioda zostaje spolaryzowana w kierunku zaporowym i nie przewodzi prądu. Prąd w dławiku narasta liniowo w czasie według zależności:

$$I_L(t) = \frac{U_{wej}}{L} \cdot t$$

osiągając po czasie  $t$  wartość maksymalną  $I_{Lmax}$ . W tym czasie obciążenie pobiera prąd z kondensatora wyjściowego  $C_o$ . Następnie klucz otwiera się i przepięcie powstające na dławiku wymusza przepływ prądu do obwodu obciążenia. Prąd w cewce maleje liniowo według zależności:

$$I_L(t) = I_{Lmax} - \frac{U_o - U_{wej}}{L} \cdot (t - \tau)$$

osiągając w czasie  $T$  wartość minimalną. Dla



Rys. 6.

warunku przepływu ciągłego strumienia magnetycznego w dławiku otrzymuje się charakterystykę sterowania:

$$U_o = \frac{U_{wej}}{1 - \gamma}$$

Zatem dla współczynnika wypełnienia przebiegu sterującego  $\gamma$ , należącego do przedziału  $0..1$ , układ podwyższa napięcie wyjściowe. Najbardziej istotne przebiegi napięć i prądów w obwodzie sterownika RTSI przedstawiono na rys.6.

### Analiza pracy sterownika RTSI pod względem wielkości tętnień napięcia wyjściowego

Współczynnik tętnień  $\chi$  na pojemności filtrującej  $C$  jest równy (dla przepływu ciągłego):

$$\chi = \frac{\gamma}{R_o \cdot C \cdot f}$$

Współczynnik tętnień jest proporcjonalny do  $1/f$  i jest także zależny od wielkości obciążenia, przy czym dla przepływu ciągłego im rezystancja obciążenia jest większa, tym tętnienia są mniejsze.

Powyższa zależność została wyprowadzona dla przypadku, gdy pasywna rezystancja szeregową była równa zero ( $ESR=0$ ), oraz pasywna indukcyjność szeregową także była równa zero ( $ESL=0$ ). Jeśli uwzględnić rezystancje szeregową, to okazuje się, że zwiększa ona wartość tętnienia napięcia wyjściowego o składową równą:

$$ESR \cdot (I_L(t) - I_o)$$

Natomiast pasywna indukcyjność szeregową powoduje powstawanie dodatkowej składowej równej:

$$ESL \cdot \frac{dI_L(t)}{dt}$$

Podobnie jak w sterowniku STRI, sterownik RTSI charakteryzuje się znacznymi, nagłymi skokami prądów płynących przez ESL, zatem znacznie zwiększa się poziom zakłócających impulsów szpilkowych na wyjściu.

Reasumując można powiedzieć, że sterownik RTSI nie jest korzystny, zarówno jeżeli chodzi o wielkość tętnień napięcia wyjściowego, jak i poziomu generowanych zakłóceń typu szpilkowego.

Adam Myalski

