

Henryk Kolka, Maciej Kulawik
Instytut Elektroniki

CHARAKTERYSTYKI ZEWNĘTRZNE IMPULSOWYCH REGULATORÓW NAPIĘCIA

Streszczenie. W artykule przeanalizowano (w oparciu o przyjęte schematy zastępcze sterowników) wpływ poszczególnych parametrów układu i jego struktury na charakterystykę zewnętrzną impulsowego regulatora napięcia. Rozważono także wpływ sprzężenia zwrotnego na oporność wyjściową takiego regulatora.

W pracy [1] schematy zastępcze różnego rodzaju struktur sterowników impulsowych podzielono na trzy grupy układów, przy czym:

- w pierwszej grupie układów - klucz (tyrystorowy lub tranzystorowy) jest połączony szeregowo z dławikiem (rys. 1a)
- w drugiej - klucz jest podłączony szeregowo a dławik równolegle (rys. 2a)
- w trzeciej - dławik jest podłączony szeregowo a klucz równolegle (rys. 3a).

Wprowadzenie w miejsce dławika autotransformatora pozwala w zależności od tego, czy k jest większe czy mniejsze od jedności ($k^2 = \frac{L}{L_0}$), otrzymać z każdego układu podstawowego dwie wersje pochodne. W ten sposób pogrupowane układy sterowników są przedstawione na rys. 1, 2 i 3.

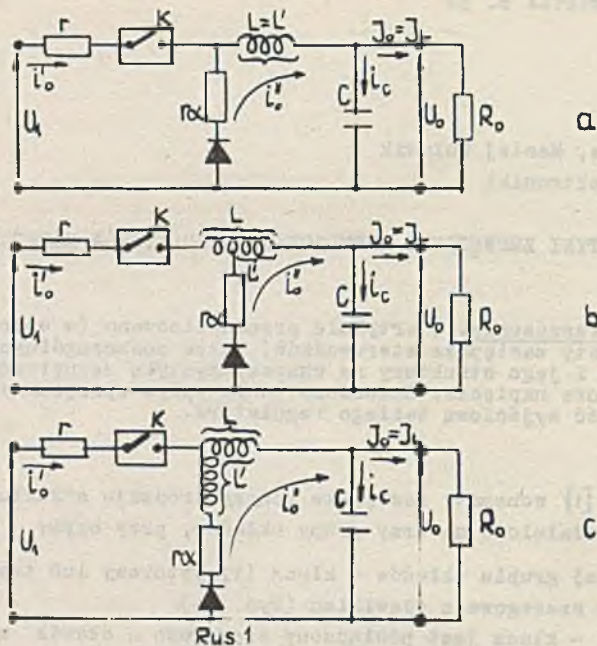
Takie usystematyzowanie struktur układów sterowników pozwala na wyznaczenie ich własności statycznych, poprzez przeprowadzenia jednej, wspólnej analizy [1].

Jak to wykazano (dla przypadku, gdy sterownik pracuje w zakresie ciągłości przepływu prądu w dławiku) prądy obciążenia wszystkich układów mają postać następującą

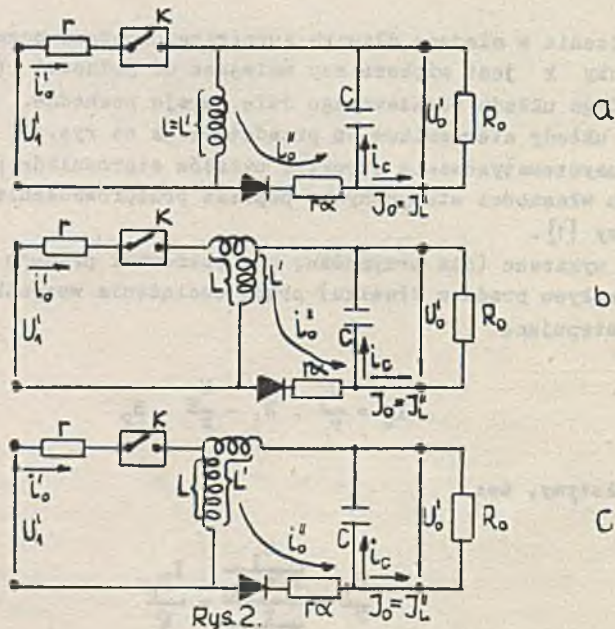
$$I_0 = \frac{U_1}{r} \cdot B_1 - \frac{U_0}{r} \cdot B_2 \quad (1)$$

Jeżeli założymy, że:

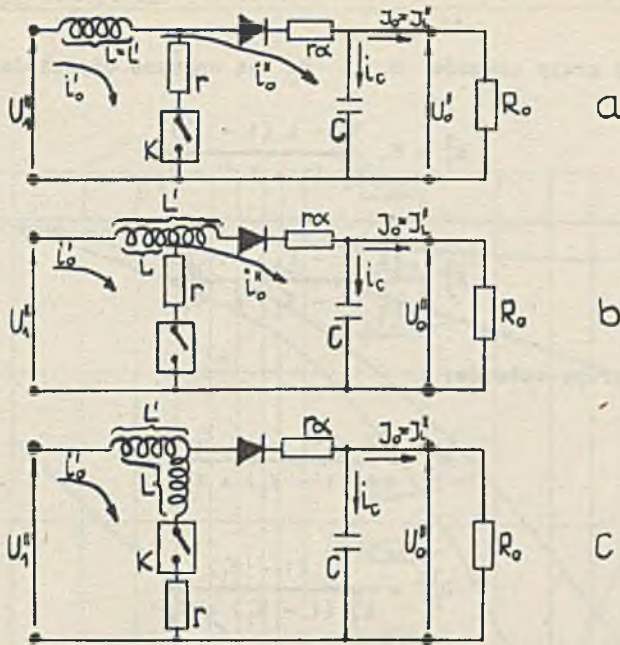
$$\frac{U_1}{r} = \frac{\frac{U_1}{r + R_0}}{\frac{r}{R_0 + r}} = \frac{I_{L_0}}{S} \quad (2)$$



Rys. 1. Sterownik impulsowy z szeregowym kluczem i szeregowym dławikiem, wersja podstawowa (a) i wersje autotransformatorowe (b) i (c)



Rys. 2. Sterownik impulsowy z szeregowym kluczem i równoległym dławikiem, wersja podstawowa (a) i wersje autotransformatorowe (b) i (c)



Rys. 3. Sterownik impulsowy z szeregowym dławikiem i równoległym kluczem, wersja podstawowa (a) i wersje autotransformatorowe (b) i (c)

przy czym

$$I_{L_0} = \frac{U_1}{R_0 + r}$$

oraz

$$\xi = \frac{r}{R_0 + r} \quad (3)$$

to wówczas zależność (1) przyjmie postać następującą:

$$\frac{U_0}{U_1} = \frac{B_1}{B_2} - \left(\xi \cdot \frac{1}{B_2} \right) \cdot \frac{I_0}{I_{L_0}} \quad (4)$$

Zależność ta opisuje charakterystykę zewnętrzną sterownika impulsowego.

W równaniu (4) - członek $\left(\xi \cdot \frac{1}{B_2} \right)$ jest miarą stopnia opadania charakterystyki zewnętrznej i nazywamy go względną zastępczą opornością wewnętrzną.

Analogicznie $(r_w = r \cdot \frac{1}{B_2})$ - nazywamy zastępczą opornością wewnętrzną przetwornicy impulsowej.

I tak:

dla pierwszej grupy układów B_1 i B_2 są opisane odpowiednio:

$$B_1^I = \tau_1 \frac{\tau_1 + k(1 - \tau_1)}{k_1^2(1 - \tau_1) + \tau_1} \quad (5)$$

$$B_2^I = \frac{[k(1 - \tau_1) + \tau_1]^2}{k_1^2(1 - \tau_1) + \tau_1}$$

dla drugiej grupy układów:

$$B_1^{II} = \frac{k \cdot \tau_1 (1 - \tau_1)}{k_1^2(1 - \tau_1) + \tau_1} \quad (6)$$

$$B_2^{II} = \frac{k^2 (1 - \tau_1)}{k_1^2(1 - \tau_1) + \tau_1}$$

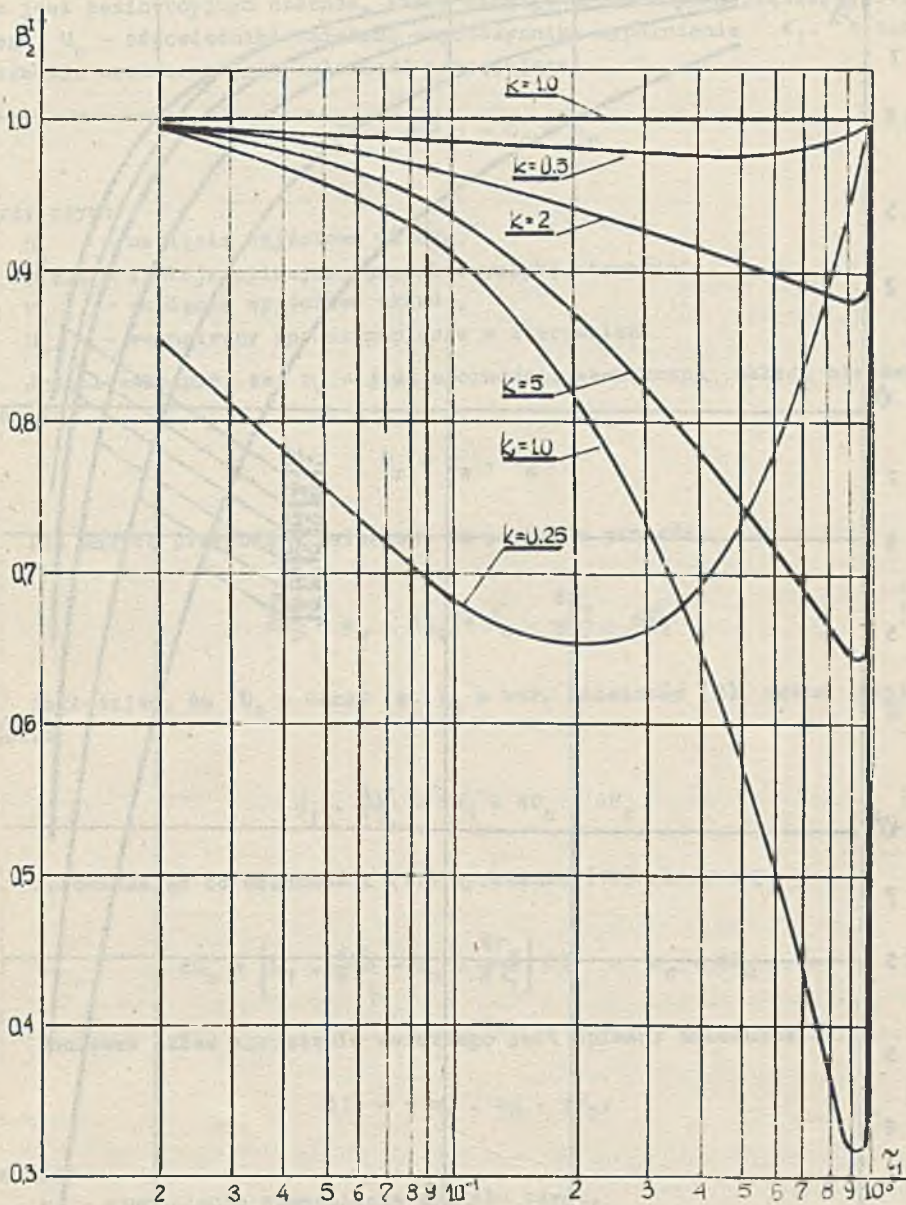
dla trzeciej grupy układów:

$$B_1^{III} = B_1^{II} + B_2^{II} \quad (7)$$

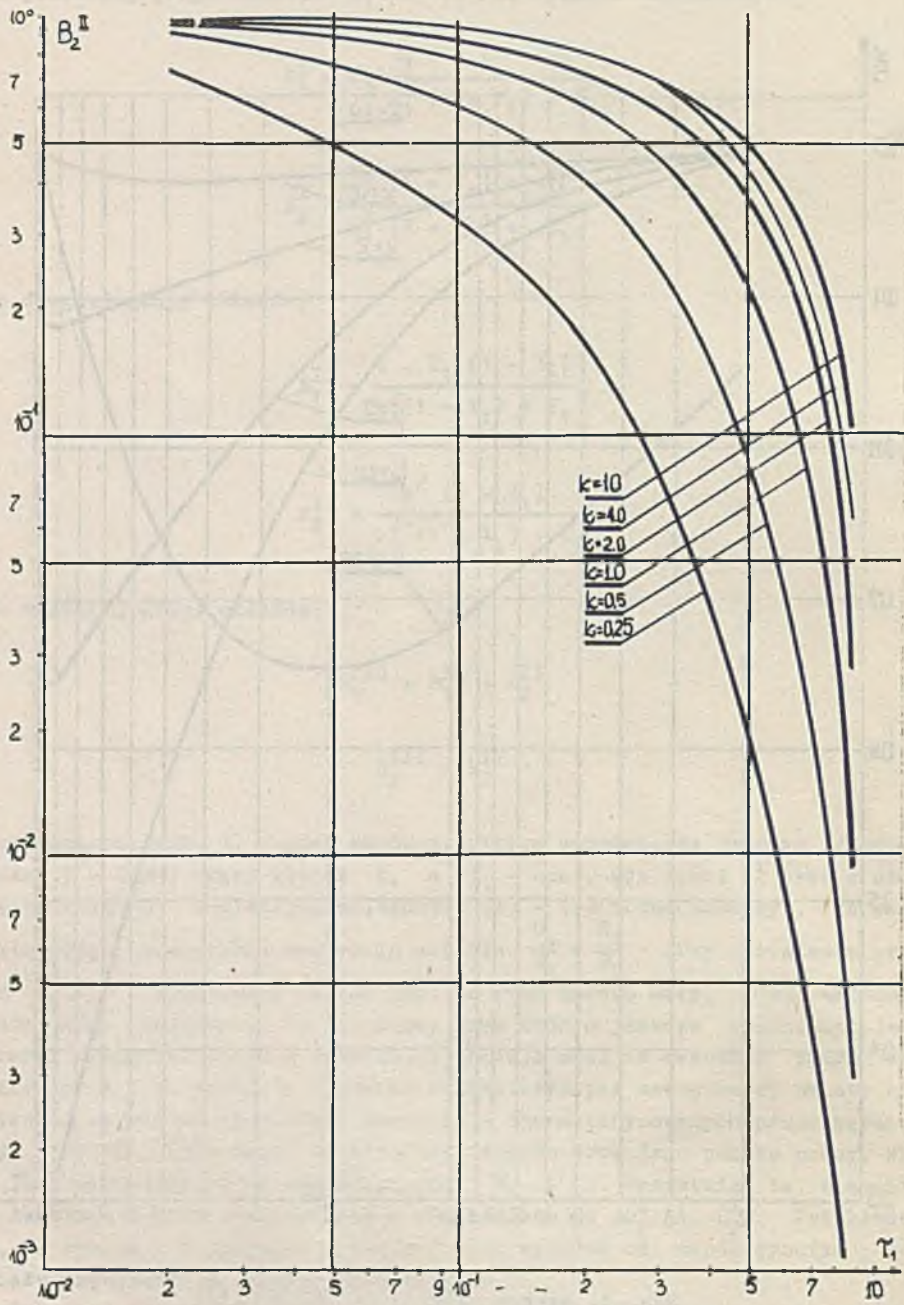
$$B_2^{III} = B_2^{II}$$

W równaniach tych τ_1 - jest współczynnikiem wypełnienia impulsu ($\tau_1 = \frac{T_1}{T}$, gdzie T - okres pracy klucza k , a T_1 - czas, gdy klucz k jest w stanie zamkniętym). Analizując zależności (4) - (7) można zauważyć, że charakterystyki zewnętrzne zaczynają się dla $\frac{U_0}{U_1} = \frac{B_1}{B_2}$ - przy obciążeniu prądem $I_L = 0$ (dokładniej mówiąc jest to prąd bardzo mały, równy wartości granicznego obciążenia, tj. takiego, przy którym jeszcze spełniony jest warunek ciągłości prądu w dławiku) i opadają wraz ze wzrostem prądu obciążenia I_0 . Ta szybkość opadania charakterystyki zewnętrznej zależy nie tylko od oporności czynnych w obwodzie - charakteryzowanych przez parametry r i α , lecz także od struktury układu oraz jego punktu pracy, który jest określony przez współczynniki τ_1 i k . Wszystkie te elementy są związane z sobą analitycznie w wyrażeniach na B_2^I i B_2^{II} . Przykładowo, na rys. 4 i 5 pokazano zależność tych wyrażań od współczynnika podziału uzwojenia k autotransformatora.

Omawiane własności wyjściowe będzie posiadał układ sterownika impulsowego w przypadku, gdy pracuje on w układzie bez sprzężenia zwrotnego. Gdy



Rys. 4. Wykres zależności $B_2^I = f(\tau_1)$



Rys. 5. Wykres zależności $B_2^{II} = f(\bar{\tau}_1)$

jednak w regulatorze impulsowym zostanie zastosowane sprzężenie zwrotne, to wówczas zmieniają się własności wyjściowe układu. Załóżmy, że sprzężenie to jest bezinercyjnym członem, który reaguje na zmiany napięcia wyjściowego U_o - odpowiednimi zmianami współczynnika wypełnienia τ_1 . W takim układzie spełniona jest zależność następująca:

$$U_1 \cdot \varphi(\tau_1) = U_o + U_r \quad (8)$$

przy czym:

- U_1 - napięcie wejściowe układu,
- $\varphi(\tau_1)$ - funkcja opisująca charakterystykę sterowania,
- U_o - napięcie wyjściowe układu,
- U_r - wewnętrzny spadek napięcia w sterowniku.

Jeżeli założymy, że r_w - jest opornością wewnętrzną układu sterownika, to

$$U_r = r_w \cdot I_o \quad (9)$$

Dla małych przyrostów zależność ta przyjmie postać:

$$dU_r = r_w \cdot dI_o + I_o \cdot \frac{dr_w}{d\tau_1} \cdot d\tau_1 \quad (10)$$

Zakładając, że $U_1 = \text{const}$ a $I_o = \text{var}$, zależność (8) można zapisać jako:

$$U_1 \cdot \frac{d\varphi}{d\tau_1} \cdot d\tau_1 = dU_o + dU_r \quad (11)$$

Wprowadzając do zależności (11) wyrażenie (10) otrzymamy:

$$dU_o = \left[U_1 \cdot \frac{d\varphi}{d\tau_1} - I_o \cdot \frac{dr_w}{d\tau_1} \right] d\tau_1 - r_w \cdot dI_o \quad (12)$$

Ponieważ układ sprzężenia zwrotnego jest opisany zależnością:

$$d\tau_1 = -w_r \cdot w_u \cdot dU_o, \quad (13)$$

gdzie:

- w_u - wzmacnienie wzmacniacza sygnału błędu,
- w_r - nachylenie charakterystyki modulatora.

Więc wprowadzając to równanie do (12) otrzymamy wyrażenie opisujące zastępczą oporność wewnętrzną przetwornicy impulsowej napięcia, pracującej ze sprzężeniem zwrotnym w postaci:

$$r_{w_s} = - \frac{dU_o}{dI_o} = r_w \cdot \frac{1}{1 + w_U \cdot w_\tau \cdot [U_1 \cdot \varphi'_\tau - I_o \cdot r'_w]} =$$

$$\approx r_w \frac{1}{w_U \cdot w_\tau \cdot \varphi'_\tau \cdot U_1} = r_w \cdot \frac{\varphi(\tau_1)}{w_U \cdot w_\tau \cdot U_o \cdot \varphi'_\tau} \quad (14)$$

Jak można zauważyć, w układzie ze sprzężeniem zwrotnym wartość zastępczej oporności wewnętrznej zależy nie tylko od parametrów sprzężenia zwrotnego, które są opisane przez $(w_U \cdot w_\tau)$, lecz zależy także od punktu pracy i struktury układu, który jest charakteryzowany przez człon

$$\left(\frac{\varphi(\tau)}{U_o \cdot \varphi'_\tau} \right)$$

W podobny sposób, jak to uczyniono poprzednio, można wyznaczyć współczynnik stabilizacji napięcia wyjściowego ze względu na zmianę napięcia wejściowego.

W tym przypadku równanie (8), dla małych przyrostów będzie miało postać:

$$dU_o = \varphi \cdot dU_1 + U_1 \cdot \varphi'_\tau \cdot d\tau_1 \quad (15)$$

Wprowadzając do tej zależności równanie opisujące układ sprzężenia zwrotnego (13) otrzymamy w wyniku:

$$\frac{dU_o}{dU_1} = \frac{\varphi(\tau_1)}{1 + w_\tau \cdot w_U \cdot \varphi'_\tau \cdot U_1} \approx \frac{\varphi^2(\tau_1)}{w_\tau \cdot w_U \cdot \varphi'_\tau \cdot U_o} \quad (16)$$

Tu także można wyciągnąć podobny wniosek, jak przy zależności (14). Współczynnik stabilizacji układu zamkniętego zależy dodatkowo od punktu pracy układu i jego struktury poprzez człon $\left(\frac{\varphi^2}{\varphi'_\tau \cdot U_o} \right)$.

Wprowadzając np. do zależności (16) uproszczone równania charakterystyk sterowania φ otrzymamy w wyniku wyrażenia opisujące wielkość współczynnika stabilizacji dla:

- pierwszej grupy układów:

$$\frac{k \cdot \varphi}{[1 + \varphi(k - 1)]^2 \cdot (w_\tau \cdot w_U) \cdot U_o} \quad (17)$$

- drugiej grupy układów:

$$\frac{k \cdot \varphi^2}{[1 + \varphi k]^2 \cdot (w_L \cdot w_U)} \cdot U_0 \quad (19)$$

- trzeciej grupy układów:

$$\frac{k^2 \cdot \varphi^2}{[1 + k(\varphi - 1)]^2 \cdot (w_L \cdot w_U)} \cdot U_0 \quad (19)$$

Przedstawione rozważania tłumaczą szereg spostrzeżeń powstałych przy konstrukcji i badaniu omawianych układów, jak i stanowią odpowiedź na szereg uwag zawartych w literaturze.

LITERATURA

- [1] Kolka H.S.: Praca doktorska 1973 r. Politechnika Śląska.
 [2] Pałczyński B., Stefański W.: Półprzewodnikowe stabilizatory napięcia i prądu stałego. MON 1972.

ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ

Резюме

В статье проанализировано влияние отдельных параметров системы и её структуры на внешнюю характеристику импульсного регулятора напряжения. Проанализировано тоже влияние обратной связи на внутреннюю резистанцию описанного регулятора.

OUTPUT CHARACTERISTICS OF SWITCHING VOLTAGE REGULATORS

S u m m a r y

In the paper the influence of separate parameters of switching regulators on the output characteristics has been analysed and the influence of feed back on the internal resistance has been considered.