

Tadeusz ROOACKI
Kazimierz GIERLOTKA
Mariusz KLYTTA

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

UKŁADY REGULACJI TYRYSTOROWYCH PRZETWORNIKÓW DO ZASILANIA ŁUKU ELEKTRYCZNEGO PRĄDU STAŁEGO

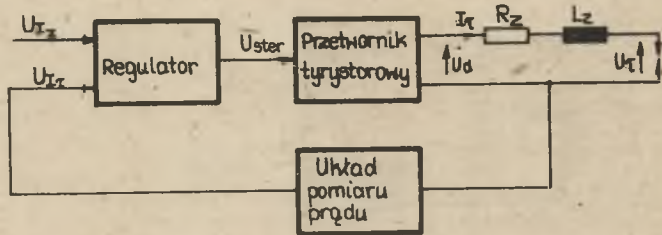
Streszczenie. W artykule przedstawiono struktury układów regulacji, podano zasady doboru nastaw regulatora prądu i określono wpływ różnych parametrów obwodu łuku elektrycznego prądu stałego na stabilną pracę układu.

1. Wstęp

Układy zasilania łuku elektrycznego muszą spełniać wymagania stawiane im w celu zapewnienia stabilnego palenia się łuku elektrycznego oraz zapewnić możliwość szybkiego i dokładnego nastawiania optymalnych parametrów elektrycznych dla uzyskania najkorzystniejszych wskaźników procesu technologicznego. W ostatnich latach coraz częściej wykorzystuje się do tego celu przetworniki tyrystorowe, pracujące w różnych układach połączeń z przekształtnikami tyrystorowymi w układzie mostkowym oraz z regulacją po stronie prądu przemiennego po pierwotnej lub wtórnej stronie transformatora dopasowującego. Przetworniki tyrystorowe, pracujące w układzie otwartym, nie bardzo nadają się do zasilania łuku elektrycznego, głównie z powodu stosunkowo sztywnych charakterystyk zewnętrznych i pulsacji prądu na wyjściu. W celu zapewnienia poprawnej pracy konieczne jest stosowanie elektronicznych układów regulacji, których zadaniem będzie odpowiednie ukształtowanie charakterystyk zewnętrznych przetwornika tyrystorowego, rozszerzenie zakresu regulacji, poprawa dynamiki układu w stanach przejściowych, stworzenie możliwości sterowania programowego całego procesu technologicznego. Dlatego też bardzo ważnym zagadnieniem jest wybór właściwej struktury układu regulacji i określenie optymalnych nastaw regulatora prądu łuku, który jest obiektem o silnie nieliniowej charakterystyce zależnej od wielu czynników zewnętrznych.

2. Układ ze sprzężeniem zwrotnym prądowym i regulatorem PI

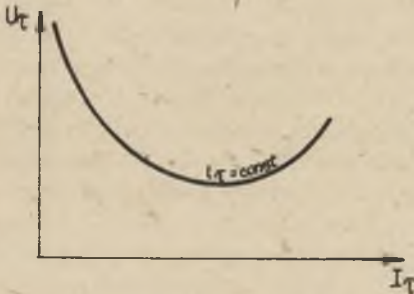
Uproszczony schemat zamkniętego układu regulacji prądu łuku, do którego można sprowadzić wszystkie układy z przetwornikiem tyrystorowym, przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu regulacji

Łuk elektryczny określony jest nieliniową charakterystyką napięciowo-prądową, przedstawioną na rys. 2, z charakterystyki tej można określić dynamiczny współczynnik wzmocnienia łuku k_{τ} , który jest funkcją prądu łuku i jego długości

$$k_{\tau} = \frac{dU_{\tau}}{dI_{\tau}} = f(I_{\tau}, l_{\tau}).$$



Rys. 2. Charakterystyka zewnętrzna łuku elektrycznego

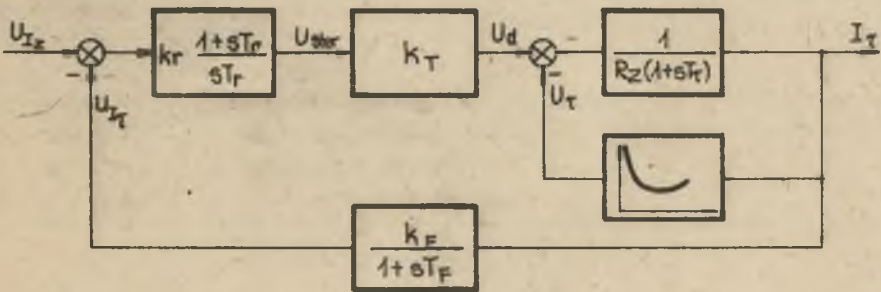
Jak widać z rys. 2, dynamiczny współczynnik wzmocnienia łuku k_{τ} zmienia się nieliniowo w szerokich granicach od wartości ujemnych dla małych prądów do wartości dodatnich dla prądów dużych. W obwodzie prądu stałego znajduje się indukcyjność zastępcza L_Z równa sumie indukcyjności włączonych w obwód łuku i indukcyjności układu zasilania sprowadzonych na stronę prądu stałego oraz rezystancja zastępcza R_Z równa rezystancji obwodu łuku i układu zasilania. Stała czasowa samego łuku jest bardzo mała, rzędu $10 \mu s - 100 \mu s$ [2], jednakże ponieważ w obwodzie łuku znajduje się pewna indukcyjność i rezystancja, można wówczas określić stałą czasową całego obwodu łuku $T_{\tau} = \frac{L_Z}{R_Z}$. Zwiększanie indukcyjności w obwodzie łuku jest zjawiskiem korzystnym, ponieważ pozwala zwiększyć stałą czasową łuku oraz wpływa na wygładzenie prądu łuku, co z kolei pozwala zmniejszyć stałą czasową filtra układu pomiaru prądu.

Układ pomiaru prądu jest elementem inercyjnym pierwszego rzędu, którego współczynnik wzmocnienia oznaczono przez k_F , a stałą czasową przez T_F . W celu uproszczenia dalszych rozważań założono, że przetwornik tyrystorowy jest elementem bezinercyjnym, bez opóźnienia i ma współczynnik wzmocnienia k_T .

W układzie zastosowano regulator typu PI, którego funkcja przejścia określona jest równaniem

$$G_r(s) = k_r \frac{1 + sT_r}{sT_r}$$

W oparciu o te rozważania można narysować schemat blokowy układu regulacji prądu, przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy układu regulacji

Ze względu na silnie nieliniową zależność współczynnika wzmocnienia łuku k_T od prądu, tak opisany układ można stosunkowo łatwo analizować tylko przy małych odchyleniach od stanu ustalonego charakteryzowanego ustalonymi parametrami napięcia łuku U_{1u} i prądu łuku I_{1u} :

$$u_1 = U_1 - U_{1u}$$

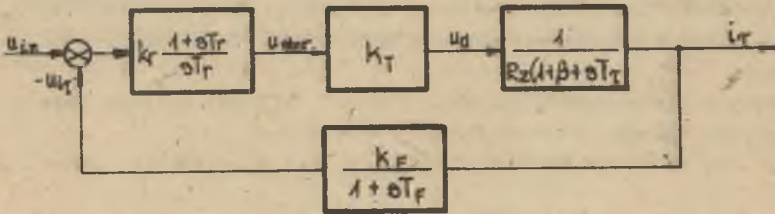
$$i_1 = I_1 - I_{1u}$$

gdzie u_1 i i_1 są niewielkimi wartościami odchylenia napięcia i prądu od stanu ustalonego. Przy tych założeniach można napisać

$$\frac{i_1(s)}{u_d(s)} = \frac{\frac{1}{R_z(1+sT_f)}}{1 + \frac{1}{R_z(1+sT_f)} k_T} = \frac{1}{R_z(1 + \beta + sT_f)}$$

gdzie $\beta = \frac{k_T}{R_z}$.

Dla małych odchyień od stanu ustalonego schemat blokowy układu regulacji będzie więc wyglądał tak, jak na rys. 4.



Rys. 4. Schemat blokowy układu regulacji dla małych odchyień od stanu ustalonego

Transmitancja operatorowa zamkniętego układu regulacji, przedstawionego na rys. 4, jest opisana równaniem

$$G_z(s) = \frac{i_z(s)}{u_{1z}(s)} = \frac{(1 + sT_r)(1 + sT_F)}{\frac{R_z T_r T_T}{k_r k_T} s^3 + \frac{R_z T_r}{k_r k_T} [T_z + (1 + \beta)T_F] s^2 + \frac{R_z T_r}{k_r k_T} \left(\frac{k_r k_T k_F}{R_z} + 1 + \beta \right) s + k_F}$$

Określając warunki stabilności układu z kryterium Hurwitza, otrzymamy:

$$\frac{k_r k_T k_F}{R_z} + 1 + \beta > 0,$$

$$T_z + T_F(1 + \beta) > 0,$$

$$\frac{R_z T_r}{k_r k_T k_F} \frac{k_r k_T k_F}{R_z} + 1 + \beta [T_z + T_F(1 + \beta)] - T_z T_F > 0.$$

Z warunków tych określić można wartości stałej czasowej filtra, współczynnika wzmocnienia i stałej czasowej regulatora, aby zapewnić dla danego β stabilność układu regulacji. Z analizy pracy łuku wynika, że krytyczne warunki tej pracy występują przy małych prądach łuku, gdy wartości współczynnika β , określającego nachylenie charakterystyki napięciowo-prądowej łuku w stosunku do rezystancji R_z obwodu zasilania, są $\beta \leq -1$. Zauważmy, że wówczas całkowita rezystancja układu $R_z(1 + \beta)$ jest równa lub mniejsze od zera

$$R_z(1 + \beta) \leq 0.$$

Aby zapewnić możliwie krótki czas trwania przebiegów przejściowych w układzie i nie pozwolić na niedopuszczalne oscylacje prądu łuku, przy możliwie najmniejszej indukcyjności zastępczej w obwodzie łuku, nastawy regulatora powinny być dobrane w oparciu o kryterium optymalizujące. Chcąc zapewnić możliwie szeroki zakres poprawnej pracy, nastawy regulatora należy dobrać dla β odpowiadającego minimum prądu łuku I_{zmin} . Optymalne wartości współczynnika k_r i stałej czasowej regulatora T_r można wyznaczyć w oparciu o kryterium modułowe Kesslera.

Transmitancja operatorowe otwartego układu regulacji (z ryc. 4)

$$G_o(s) = \frac{u_{zł}(s)}{u_{ster}(s)} = \frac{k_T k_F}{(1 + \beta)} \cdot \frac{1}{(1 + s \frac{T_z}{1 + \beta})(1 + s T_F)}$$

Dla takiego obiektu optymalne nastawy regulatora można obliczyć [1]:

- dla przypadku $\frac{T_z}{1 + \beta} \approx T_F$

$$k_r = \frac{R_z (1 + \beta)}{2 k_T k_F} \left[\frac{T_z}{(1 + \beta) T_F} + \frac{(1 + \beta) T_F}{T_z} \right]$$

$$T_r = \frac{T_z}{1 + \beta} + \frac{T_F}{1 + \frac{T_z}{(1 + \beta) T_F} + \left[\frac{T_z}{(1 + \beta) T_F} \right]^2}$$

- dla przypadku $\frac{T_z}{1 + \beta} \gg T_F$

$$k_r = \frac{R_z}{k_T k_F} \cdot \frac{T_z}{2 T_F}$$

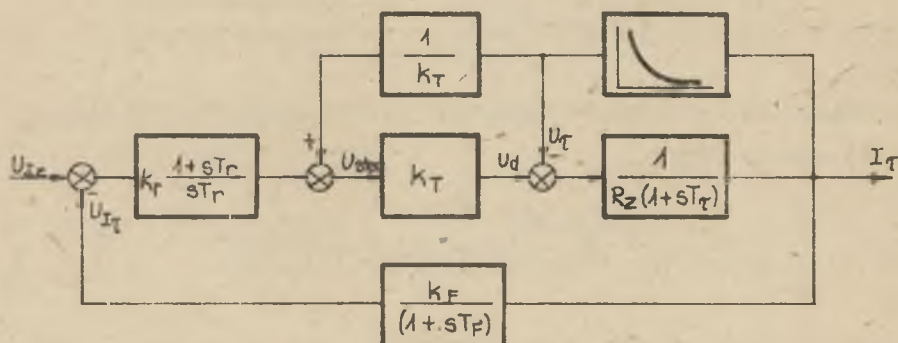
$$T_r = \frac{T_z}{1 + \beta}$$

Należy zaznaczyć, że z powodu uproszczeń zastosowanych w powyższych rozważaniach (pominięcie opóźnienia wnoszonego przez przekształtnik tyrystorowy) oraz z powodu nieliniowej charakterystyki łuku, zależnej dodatkowo od chwilowych warunków jego palenia się, obliczone optymalne nastawy regulatora należy potraktować orientacyjnie. Znacznie dokładniej można analizować pracę układu regulacji prądu łuku stosując modelowanie na maszynie analogowej, pozwoli to na zrezygnowanie z niektórych uproszczeń oraz na optymalny dobór nie tylko nastaw regulatora, ale indukcyjności w obwodzie łuku i stałej czasowej filtra układu pomiaru prądu.

W przypadku gdyby dla założonych warunków pracy i parametrów układu nie udało się uzyskać w proponowanym układzie właściwej pracy, znaczną poprawę można uzyskać wprowadzając dodatkowe kompensujące sprzężenie zwrotne (rys. 5).

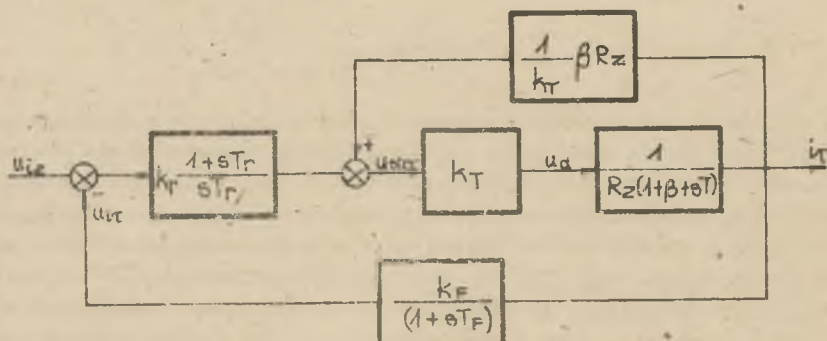
3. Układ z dodatkowym kompensującym sprzężeniem zwrotnym

Na rys. 5 przedstawiono schemat blokowy układu regulacji prądu łuku ze sprzężeniem prądowym i dodatkowym sprzężeniem kompensującym od napięcia łuku.



Rys. 5. Schemat blokowy układu regulacji z dodatkowym kompensującym sprzężeniem zwrotnym

Analizując pracę układu dla małych odchyżeń od stanu ustalonego, można sarysować schemat blokowy podany na rys. 6.



Rys. 6. Schemat blokowy układu regulacji z dodatkowym kompensującym sprzężeniem zwrotnym dla małych odchyżeń od stanu ustalonego

W oparciu o ten schemat można obliczyć transmitancję operatorową zamkniętego układu regulacji

$$G_z(s) = \frac{1_z(s)}{u_{1z}(s)} = \frac{(1 + sT_r)(1 + sT_F)}{\frac{R Z_T T_z T_F}{k_r k_T} s^3 + \frac{R Z_T}{k_r k_T} (T_z + T_F) s^2 + (\frac{R Z}{k_r k_T} + k_F) T_r s + k_F}$$

Wynika stąd, że dzięki takiemu sprzężeniu zwrotnemu eliminujemy nieliniowe właściwości łuku, układ regulacyjny staje się całkowicie liniowy. Optymalne nastawy regulatora, obliczone z kryterium modułowego Keeslera, wynoszą:

- dla przypadku, kiedy $T_z \approx T_F$

$$k_r = \frac{R Z}{2k_T k_F} \left(\frac{T_z}{T_F} + \frac{T_F}{T_z} \right),$$

$$T_r = T_z + \frac{T_F}{1 + \frac{T_z}{T_F} + \frac{T_z}{T_F}}$$

- dla przypadku, kiedy $T_z \gg T_F$

$$k_r = \frac{R Z}{k_T k_F} \cdot \frac{T_z}{2T_F},$$

$$T_r = T_z.$$

W rzeczywistych układach nie uda się osiągnąć tak idealnych wyników, co jest spowodowane następującymi przyczynami:

- W powyższych rozważaniach pominięte opóźnienie, która wnosi do układu przekształtnik tyrystorowy. Powoduje to, że po zmianie sygnału sterującego napięcie na wyjściu przekształtnika zmienia się dopiero po następnym impulsie wyzwalającym.
- Napięcie łuku wykazuje duże i szybkie wahanie, dlatego też wartość mierzona przed wprowadzeniem do układu regulacji musi być wygładzona. Zastosowanie filtra w torze napięciowego sprzężenia zwrotnego powoduje że sygnał napięciowy wprowadzony jest do układu regulacji z pewną stałą czasową. Pomimo tych trudności w układzie z kompensującą sprzężeniem zwrotnym można uzyskać znacznie szerszy zakres regulacji prądu łuku niż w układzie bez tego sprzężenia.

4. Wnioski

- Łuk elektryczny jest odbiornikiem o silnie nieliniowej charakterystyce zależnej od szeregu parametrów zewnętrznych, dlatego też w prostym układzie regulacji z regulatorem PI nie można uzyskać optymalnych warunków pracy w szerokim zakresie zmian prądu łuku.
- W układzie z regulatorem PI stabilna praca jest możliwa dla $\beta > -1$ i dla $\beta < -1$, przy odpowiednio dobranych parametrach układu. Na pracę układu i optymalne nastawy regulatora mają wpływ następujące parametry: rezystancja obwodu zasilania R_z , indukcyjność w obwodzie łuku L_z , stała czasowa filtra w torze sprzężenia prądowego T_F i dynamiczny współczynnik wzmacnienia łuku k_v .
- Wybór optymalnych nastaw regulatora powinien być wykonywany dla najtrudniejszych warunków pracy układu, tzn. dla $\beta \rightarrow -1$ (przy pracy na części charakterystyki łuku, gdzie $\beta > -1$ dla minimalnego prądu łuku).
- Dynamika układu regulacji w szerokim zakresie zmian prądu uległaby poprawie przez zastosowanie adaptacyjnego regulatora PI, w którym nastawy można by było zmieniać w zależności od punktu pracy tak, aby w zależności od aktualnej wartości współczynnika β były zawsze optymalne.
- Zakres regulacji prądu łuku w układzie z regulatorem PI można znacznie rozszerzyć przez zastosowanie kompensującego napięciowego sprzężenia zwrotnego.

LITERATURA

- [1] TUNIA H., WINIARSKI B.: Układy elektroniczne w automatyce napędowej. WNT, Warszawa 1969.
- [2] LÖLLEIN F., STRÖLE D.: Dynamik der Lichtbogenstromregelung. Simens Zeitschrift nr 5/69.
- [3] ESIBJAN E.M.: Плазменно-дуговая аппаратура. Техника, Kijew 1973.

Wpłynęło do Redakcji w lutym 1980

Recenzent:
Doc. dr Józef Dancewicz

СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Резюме

В статье представлены схемы системы регулирования и принципы расчета установки регулятора тока электрической дуги, питаемой от тиристорного преобразователя. Определено влияние параметров цепи электрической дуги постоянного тока на устойчивость системы.

THE CONTROL SYSTEM OF THYRISTOR TRANSDUCERS FOR POWERING
THE D.C. ELECTRIC ARC

S u m m a r y

The paper contains the patterns of the control systems, gives the principles of choosing the current regulator settings, determines the impact of various parameters of the d.c. electric arc on the operational stability.