

Tadeusz RODACKI  
Andrzej KANDYBA

## OPTIMALIZACJA NASTAW REGULATORA PRĄDU W TRANZYSTOROWYM ZASILACZU PLAZMOTRONU ŁUKOWEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono sposób optymalizacji nastaw regulatora układu zasilania plazmotronu metodą linii pierwiastkowych, z zastosowaniem programu CC-Sit. Jako kryterium optymalnych nastaw przyjęto maksymalny stopień stabilności i minimalną oscylacyjność układu. Dla takich kryteriów opracowano zależność stopnia stabilności od czasu całkowania regulatora i zależność wzmocnienia regulatora od czasu całkowania.

## SETTINGS OPTIMISATION OF THE CURRENT CONTROLLER IN TRANSISTOR SUPPLY SYSTEM FOR PLASMA ARC

**Summary.** The paper presents the way of optimising the controller settings of root the plasmatron supply system by means of the method of lines when using the CC-Sit program. Maximum stability degree and the minimal oscillations of the control system were taken as the criterion for optimal setting. For such criterion the relationships between the stability degree and integration time of the controller as well as between the controller gain and the integration time were deduced.

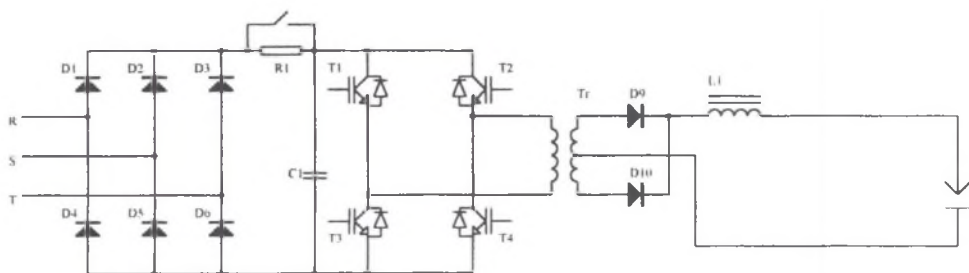
### 1. WPROWADZENIE

Energoelektroniczne układy zasilania ze względu na swoje stosunkowo sztywne charakterystyki zewnętrzne nie bardzo nadają się do zasilania odbiorników łukowych. Aby zapewnić poprawną pracę w całym zakresie roboczym, muszą być wyposażone w elektroniczne układy regulacji, których zadaniem jest odpowiednie ukształtowanie charakterystyki zewnętrznej, zapewnienie poprawnej regulacji w całym zakresie prądów roboczych, ograniczenie przeregulowań w stanach przejściowych oraz poprawa dynamiki. Dlatego bardzo ważne jest odpowiednie wybranie optymalnej struktury układu regulacji i obliczenie optymalnych nastaw regulatorów. Możliwe jest stosowanie struktur z regulatorem prądu typu PI lub PID, z regulatorem prądu i napięcia PI lub PID oraz z regulatorem prądu i

mocy łuku. Przy czym w artykule ograniczono się do badania regulatora PI dobrze spełniającego podstawowe wymagania układu regulacji.

## 2. MODEL UKŁADU ZASILACZA TRANZYSTOROWEGO Z REGULATOREM PRĄDU

Obwód elektryczny układu zasilania i łuku składa się ze źródła, w którym można wyróżnić tranzystorowy przekształtnik oraz transformator, i tak zwanego obwodu łuku, składającego się z elementów po stronie wtórnej transformatora, to jest rezystancji obwodu, indukcyjności i plazmotronu, rys.1.



Rys. 1. Obwody główne układu zasilania  
Fig. 1. Main circuits of the supply system

Układ należy uzupełnić jeszcze regulatorem i układem pomiaru prądu. Ze względu na występowanie w obwodzie wielkości zależnych od napięcia i prądu, silnie nieliniowych i zmiennych w czasie niezbędne jest wprowadzenie pewnych założeń upraszczających.

- Charakterystyka prądowo-napięciowa odbiornika łukowego jest linearyzowana przedziałami. W każdym przedziale charakterystyka jest wtedy określona jako odcinek prostej o nachyleniu  $k_1$ , który może być obliczony dla zadanego punktu pracy. Obliczenia prowadzone są dla małych odchyżeń od stanu ustalonego. Transmitycję łuku w takim przypadku można opisać zależnością [3].

$$W_{u,i} = \frac{u(s)}{i(s)} = \frac{\theta_1 s}{\theta_1 + 1} + \frac{1 - k_1}{\theta_1 s + 1} \quad (1)$$

- Transmitycję przekształtnika tranzystorowego upraszcza się do elementu inercyjnego pierwszego rzędu:

$$G_F(s) = \frac{K_F}{1 + sT_F} \quad , \quad (2)$$

gdzie:

$K_F$  - średni współczynnik wzmocnienia przekształtnika,

$T_F$  - średni czas opóźnienia równy połowie okresu cyklu pracy falownika.

- Transmittancję transformatora w obwodzie pośrednim o podwyższonej częstotliwości opisano zależnością :

$$G_T(s) = \frac{K_T s}{T_T s + 1} \quad , \quad (3)$$

gdzie:

$$K_T = \frac{M_{1,2} R_0}{R_1 (R_0 + R_2)} \quad , \quad (4)$$

$$T_T = \frac{R_1 L_2 + (R_0 + R_2) L_1}{R_1 (R_0 + R_2)} \quad ,$$

przy założeniu że transformator jest bez rozproszenia [1]. Poszczególne wielkości we wzorach (3) i (4) oznaczają:

$K_T$  - średni współczynnik wzmocnienia transformatora,

$T_T$  - średni czas opóźnienia transformatora,

$M_{1,2}$  - indukcyjność uzwojenia transformatora,

$R_1, R_2$  - odpowiednio rezystancja uzwojenia pierwotnego i wtórnego transformatora,

$R_0$  - całkowita rezystancja obciążenia transformatora w punkcie pracy,

$L_1, L_2$  - odpowiednio indukcyjność uzwojeń pierwotnego i wtórnego.

- Założono, że jednofazowy mostek diodowy po stronie wtórnej transformatora jest elementem bezinercyjnym o stałym współczynniku wzmocnienia  $K_M = 1$ .

- Indukcyjność w obwodzie  $L = \text{const}$ .

Równanie obwodu z łukiem ( przy założeniu że  $U_z(t)$  - jest napięciem wyjściowym układu zasilania) ma postać:

$$U_z = Ri + sLi + \frac{\frac{1}{sC} W_{u,j}(s)}{\frac{1}{sC} + W_{u,j}(s)} i \quad (5)$$

Po przekształceniu wzoru (5) i wstawieniu równania (3) otrzymuje się transmitancję obwodu z łukiem w postaci:

$$\frac{I(s)}{U_z(s)} = \frac{[(\theta_\mu s + 1) + sC(\theta_\mu s + 1 - k_\mu)]}{(R + sL)[(\theta_\mu s + 1) + sC(\theta_\mu s + 1 - k_\mu)] + \theta_\mu s + 1 - k_\mu} \quad (6)$$

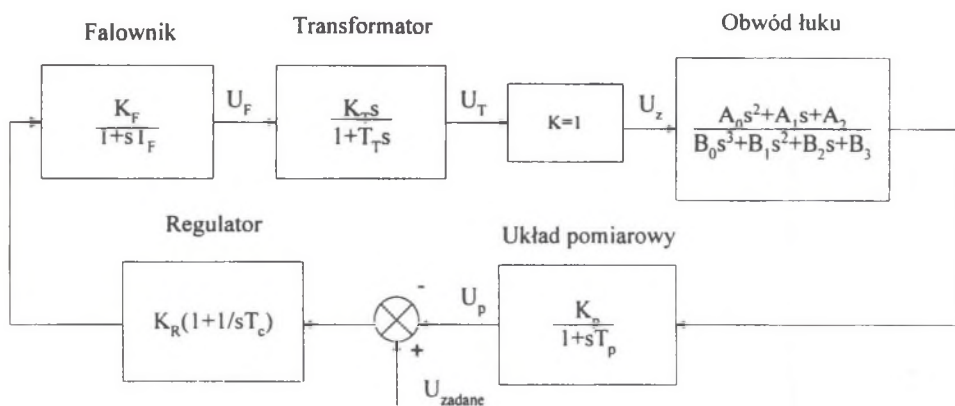
Po przekształceniu równania (6) i podstawieniu:

$$\begin{aligned} A_0 &= C\theta_\mu, \\ A_1 &= \theta_\mu + C(1 - k_\mu), \\ A_2 &= 1, \\ B_0 &= LC\theta_\mu, \\ B_1 &= RC\theta_\mu + L[\theta_\mu + C(1 - k_\mu)], \\ B_2 &= R[\theta_\mu + C(1 - k_\mu)] + L + \theta_\mu, \\ B_3 &= R + 1 - k_\mu, \end{aligned} \quad (7)$$

otrzymuje się ostatecznie transmitancję obwodu z łukiem w postaci:

$$\frac{I(s)}{U_z(s)} = \frac{A_0 s^2 + A_1 s + A_2}{B_0 s^3 + B_1 s^2 + B_2 s + B_3} \quad (8)$$

Schemat zastępczy obwodu wraz z układem regulacji można przedstawić w postaci podanej na rys.2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu zasilania i regulacji prądu łuku

Fig. 2. Block diagram of the system

Jako element regulacyjny zastosowano regulator proporcjonalno - całkujący. Wynika to z następujących względów:

- skokowa zmiana wartości zadanej  $U_{zadane}$  powoduje pojawienie się uchybu regulacji o ustalonej wartości,
- stały uchyb regulacji, całkowany w regulatorze PI, powoduje wystąpienie narastającego sygnału za regulatorem - na wejściu falownika i dalej transformatora,
- zatem stały sygnał wartości zadanej jest przenoszony przez układ pomimo występowania części różniczkującej w modelu transformatora.

Widać zatem, że przenoszenie przez układ stałej wartości zadanej wymaga występowania w regulatorze członu całkującego. Stąd zastosowanie regulatora PD w takim układzie uniemożliwia przenoszenie stałej wartości zadanej, a tym samym realizację celu stawianego układowi regulacji. Z tych samych powodów nie można stosować regulatora typu P.

Ze względu na dużą szybkość działania falownika w obwodzie podwyższonej częstotliwości oraz występujące w nim odkształcenia przebiegów napięć i prądów częścią różniczkująca wprowadzałyby do układu regulacji duże zakłócenia. Z tego względu oraz z powodu wzajemnego wpływu poszczególnych członów regulatora PID dobór trzech zmiennych parametrów tego regulatora jest w praktyce bardzo kłopotliwy.

Modelowanie dynamiki układu pomiaru prądu w postaci inercji pierwszego rzędu wynika z zastosowania w układzie rzeczywistym filtra RC w obwodzie pomiaru prądu.

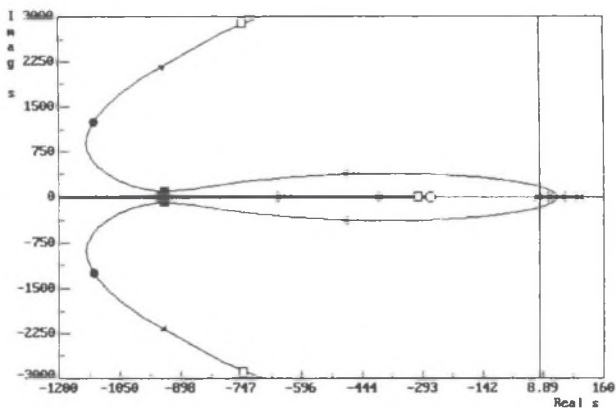
### 3. OPTIMALIZACJA PARAMETRÓW REGULATORA

Optymalizując nastawy regulatora rozpatrzono dwa przypadki. W pierwszym zastosowano model, w którym pomija się pojemność, a w drugim model uwzględniający tylko parametry statyczne palnika plazmowego. Uwzględnianie przy syntezie układu regulacji jedynie modelu zawierającego dynamikę łuku z pominięciem dynamiki przekształtnika jest niecelowe, gdyż stałe czasowe łuku i przekształtnika są porównywalne, w przypadku gdy obwód pośredniczący pracuje z częstotliwością 2 kHz. Kierując się przesłankami przedstawionymi przy omawianiu syntezy modelu układu zasilacza tranzystorowego z regulatorem prądu, przyjmuje się, że zastosowany będzie regulator typu PI. Jako metodę doboru optymalnych nastaw regulatora przyjęto metodę opartą na badaniu linii pierwiastkowych. Zastosowanie tej metody wynika z występowania w modelu członów niestabilnych związanych z właściwościami dynamicznymi łuku. Istotą metody linii pierwiastkowych jest wyznaczanie położenia pierwiastków równania charakterystycznego układu zamkniętego na płaszczyźnie zespolonej ( $\text{Im } s$ ,  $\text{Re } s$ ) w oparciu o transmitancję

układu otwartego. Uzyskiwane linie pierwiastkowe (miejsca geometryczne położenia pierwiastków) pokazują, jak zmienia się położenie pierwiastków na płaszczyźnie zespolonej wraz ze zmianą wzmocnienia regulatora od zera do nieskończoności. Wpływ czasu całkowania regulatora badany jest przez obserwację zmiany kształtu linii pierwiastkowych uzyskiwanych dla różnych czasów  $T_c$ . Przedstawiane w pracy wykresy linii pierwiastkowych uzyskano za pomocą programu CC-Sit, wyznaczającego pierwiastki równania charakterystycznego układu zamkniętego dla wzmocnienia regulatora  $K_R$  zmieniającego się od zera do nieskończoności. Linia pierwiastkowa powstaje poprzez znalezienie pierwiastków równania charakterystycznego układu zamkniętego dla konkretnej wartości wzmocnienia  $K_R$  i zaznaczenie tych pierwiastków na płaszczyźnie zespolonej. Rozwiązując równanie charakterystyczne dla kolejnych wartości wzmocnienia  $K_R$  i zaznaczając je na płaszczyźnie zespolonej uzyskuje się wykres linii pierwiastkowych. Przykładowy kształt linii pierwiastkowych dla analizowanego układu przedstawiono na rys.3. Na prezentowanym rysunku zera transmitancji układu otwartego zaznaczone są kółkami, a bieguny x-ami. Zmiana pierwiastków równania charakterystycznego układu zamkniętego przedstawiona jest w następujący sposób: każda z linii pierwiastkowych ilustruje zmianę pierwiastka dla wzmocnienia regulatora zmieniającego się od zera do nieskończoności, x odpowiada położeniu pierwiastka dla  $K_R = 0$ , a kółko dla  $K_R = \text{nieskończoność}$ . Parametry regulatora, dla których linie pierwiastkowe przebiegają z prawej strony osi liczb urojonych (pierwiastki mają część rzeczywistą dodatnią), nie spełniają warunku stabilności. Tak więc z warunku stabilności wynika konieczność takiego doboru parametrów regulatora, aby odpowiadające im fragmenty linii pierwiastkowych leżały na lewo od osi liczb urojonych.

Jako parametry wiążące jakość przebiegów czasowych w układzie z położeniem pierwiastków na płaszczyźnie zespolonej przyjmuje się stopień stabilności (odległość pierwiastka położonego najbliżej osi liczb urojonych od tej osi) i stopień oscylacyjności (maksymalny tangens kąta pomiędzy osią rzeczywistą a prostą łączącą środek układu współrzędnych z pierwiastkiem). Optymalizacja układu regulacji polega na znalezieniu parametrów regulatora zapewniających maksymalny stopień stabilności i minimalny stopień oscylacyjności. Odpowiada to uzyskaniu w układzie minimalnego przesterowania i minimalnego czasu regulacji. Postawione wymagania związane są z wyposażeniem rzeczywistego układu w system zabezpieczeń wyłączających układ po przekroczeniu pewnej progowej szczytowej wartości prądu. Takie wyłączenie jest niekorzystne, ponieważ prowadzi do przerwania realizowanego procesu technologicznego.

Z postaci transmitancji opisującej regulator PI wynika, że zmiana czasu całkowania powoduje zmianę położenia jednego z zer na płaszczyźnie zespolonej [2]. Na rys. 3. zero związane z wartością czasu całkowania zaznaczone jest kółkiem leżącym bliżej osi liczb urojonych. Analiza linii pierwiastkowych z rys.3. pozwala stwierdzić, że dla pewnych wartości wzmocnienia układ jest niestabilny (linie przechodzą z ujemnej półpłaszczyzny rzeczywistej do półpłaszczyzny dodatniej).

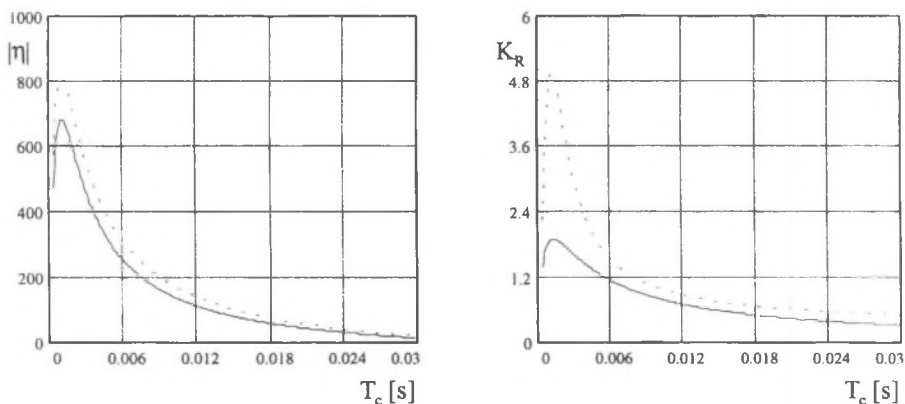


Rys. 3. Linie pierwiastkowe układu dla  $T_c = 3.6\text{ms}$   
 Fig. 3. Root lines of the system for  $T_c = 3.6\text{ms}$

Białe kwadraty na rys. 3. oznaczają pierwiastki dla wzmocnienia dającego minimalny stopień stabilności i maksymalny stopień oscylacyjności. Czarne kółka na rys. 3. oznaczają pierwiastki dla wzmocnienia dającego średni stopień stabilności i średni stopień oscylacyjności. Czarne kwadraty na rys. 3. oznaczają pierwiastki dla wzmocnienia dającego maksymalny stopień stabilności i minimalny stopień oscylacyjności. W taki sposób można określić pierwiastki równania charakterystycznego najlepiej spełniające wymagane kryterium, a tym samym określa się optymalne wzmocnienie dla wybranego czasu całkowania. W kolejnych etapach bada się kształt linii pierwiastkowych dla innych czasów całkowania, dla których również określa się optymalne wzmocnienie.

Na rys.4 przedstawiono odpowiednio zależności optymalnego (według przyjętego kryterium) wzmocnienia regulatora  $K_R$  oraz stopnia stabilności od czasu całkowania  $T_c$  dla modelu obwodu z rys. 2. Dla przypadku gdy uwzględniana jest dynamika łuku przy  $C = 0$  oraz dla statycznej charakterystyki palnika plazmowego. Na podstawie przedstawionych rysunków można wnioskować, że do poszukiwania optymalnych nastaw regulatora wystarczająca jest statyczna charakterystyka palnika dla analizowanego zakresu częstotliwości obwodu pośredniczącego. Niewielkie rozbieżności przedstawionych

charakterystyk wskazują na wystarczające przybliżenie modelu łuku charakterystyką statyczną, gdy proces technologiczny nie wymaga precyzyjnej regulacji.



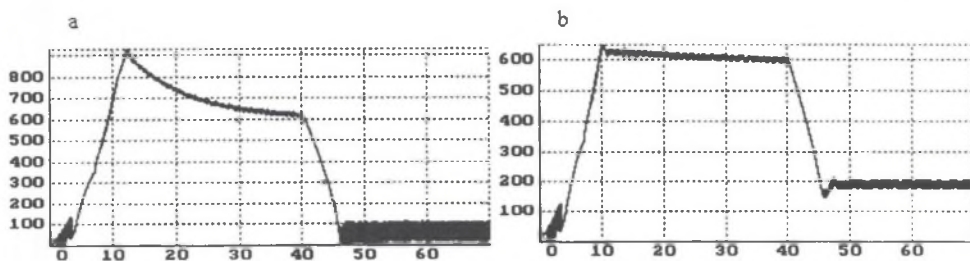
Rys. 4. Zależność stopnia stabilności  $|\eta|$  i współczynnika wzmocnienia  $K_R$  od czasu całkowania regulatora  $T_c$ , dla modelu uwzględniającego dynamikę łuku (linie przerywane) i dla statycznego modelu palnika plazmowego (linia ciągła)

Fig. 4. Dependence of stability degree  $|\eta|$  and gain coefficient  $K_R$  upon controller integration time  $T_c$  for the model taking into account arc dynamics (broken lines) and for the static model of plasmatron (full line)

Jakość syntezy układu regulacji w dużej mierze zależy od dokładności przyjętego modelu układu. Przy mało dokładnej identyfikacji elementów układu model obciążony jest znacznym błędem, co może uniemożliwić dobranie optymalnych nastaw regulatora, a nawet zapewnienie stabilnej pracy. Zastosowana do syntezy układu regulacji metoda linii pierwiastkowych pozwala ocenić, dla jakich czasów całkowania jest możliwe dobranie wzmocnienia regulatora zapewniającego zadany stopień stabilności i oscylacyjności. Charakterystyki przedstawione na rysunku 4, a opracowane za pomocą metody linii pierwiastkowych pozwalają tak dobrać parametry regulatora, aby zapewnić maksymalny stopień stabilności i minimalne przeregulowanie w układzie. Wydaje się słuszne, aby dla czasu całkowania, przy którym występuje największy zapas stabilności, dobierać wzmocnienie na podstawie charakterystyk opracowanych tą metodą.

W analogiczny sposób możliwe jest badanie dowolnej struktury układu regulacji. Tą metodą analizowano również układ sterowany regulatorem prądu z inercją. Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki symulacji układu tranzystorowego zasilacza palnika plazmowego wyposażonego w regulator prądu PI przeprowadzonej za pomocą programu TCAD. Nastawy regulatora dobierano za pomocą prezentowanej metody [3].





Rys. 5. Wpływ parametrów regulatora prądu PI na prąd obciążenia, dla przypadku gdy  $T_c = 0.0006$  ms i  $K_R = 2$  oraz gdy  $T_c = 0.003$  ms i  $K_R = 4.8$ . Prąd podano w amperach, czas w ms

Fig. 5. Influence of controller PI parameters upon load current for:  $T_c = 0.0006$  ms and  $K_R = 2$  as well as  $T_c = 0.003$  ms and  $K_R = 4.8$ . Current unit is A, time unit - ms

Na rys. 5. przedstawiono wyniki symulacji tranzystorowego układu zasilania palników plazmowych, w którym jako regulator zastosowano regulator typu PI. Jak widać, jakość regulacji zmienia się w szerokich granicach. Na rys. 5. a. przedstawiono wyniki symulacji dla przypadku, gdy czas całkowania jest zbyt krótki. W takim przypadku występuje silne przesterowanie i aperiodyczne dojście do wartości zadanej. Dla małych prądów roboczych występują silne oscylacje, układ znajduje się na granicy stabilności i nie osiąga wartości zadanej. Przypadek z rys.5.b. to optymalne nastawy regulatorów, gdzie układ regulacji ma największy stopień stabilności i może najszybciej zareagować na zmianę wartości prądu zadanego. Układ pracuje stabilnie w całym zakresie prądów roboczych. Niewielkie przesterowanie dla dużych prądów roboczych i niewielkie oscylacje dla małych prądów spowodowane są wpływem współczynnika  $k_i$  i stałej czasowej łuku, gdyż te wielkości dobierane są jako pewne średnie i obowiązują w zasadzie tylko w punkcie pracy, dla którego zostały wyznaczone. Uwzględnienie w modelu obwodu pewnych średnich wartości tych wielkości powoduje więc wystąpienie oscylacji lub przeregulowań dla innych punktów pracy. Wydaje się, że w układzie rzeczywistym nie stanowi to większych niedogodności, gdyż optymalne nastawy regulatora zapewniają stabilną pracę w całym zakresie roboczym. Należy uwzględnić tylko ograniczenie prądowe i parametry regulatora dobrać tak, aby przesterowanie nie przekroczyło nastawionego ograniczenia, gdyż w innym przypadku nastąpi zadziałanie zabezpieczenia i układ zasilania zostanie wyłączony, a tym samym przerwany zostanie proces technologiczny. Zastosowana metoda linii pierwiastkowych pozwala więc tak dobrać parametry regulatora PI, aby możliwa była stabilna praca w całym zakresie.

#### 4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej syntezy układów regulacji można stwierdzić, że możliwe jest optymalizowanie nastaw regulatora metodą linii pierwiastkowych. W pracy do obliczania nastaw zastosowano program CC Sti Systems Technology, a obliczenia przeprowadzono w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej. Zastosowanie programu CC Sti pozwoliło obliczać nastawy regulatorów i wyznaczać charakterystyki stopnia stabilności i wzmocnienia regulatora w sposób bardzo efektywny i dokładny. Proponowana metoda linii pierwiastkowych pozwala w trakcie obliczeń kontrolować stabilność układu dla dowolnego wzmocnienia oraz badać stopień stabilności. Pozwala ponadto na badanie wpływu poszczególnych elementów modelu na jakość regulacji. Przeprowadzona analiza dla innych układów regulacji pozwala wyciągnąć następujące wnioski. Zastosowanie tylko regulatora PD powoduje niestabilną pracę układu. W związku z tym w analizowanym tranzystorowym układzie zasilania nie należy stosować regulatora typu PD. Regulator typu PID w obwodzie pozwala wprawdzie wyznaczyć obszar stabilnej pracy, jednak jakość regulacji jest niezadowalająca. Można stosować regulator PID, jednak należy liczyć się z bardzo wąskim zakresem prądów roboczych i złą jakością regulacji. Najlepsze wyniki uzyskuje się stosując regulator PI lub regulator z inercją. Dla obu typów regulatora można uzyskać stabilną pracę w szerokim zakresie prądów roboczych. W procesie doboru parametrów regulatora bardzo ważny jest model obiektu rzeczywistego, a w związku z tym jego identyfikacja. Przekształtnik tranzystorowy można przybliżyć inercją wyższego rzędu, gdyż ten element obwodu w niewielkim stopniu wpływa na dobór parametrów regulatora. Bardzo ważne jest określenie parametrów transformatora w pośredniczącym obwodzie podwyższonej częstotliwości i parametrów dławika, gdyż te elementy głównie decydują o stopniu stabilności i wartościach szukanych parametrów regulatora.

#### LITERATURA

1. Philippe De Larminat, Yves T: *Automatyka układy liniowe*. PWN, Warszawa 1983.
2. Rodacki T., Kandyba A.: *Optymalizacja układu regulacji dla tranzystorowego zasilacza obciążonego plazmotronem*, Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, tom 4, zeszyt 2, 1998.
3. Rodacki T., Kandyba A. *Energoelektroniczne układy zasilania plazmotronów prądu stałego*, Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1998.

Pracę wykonano w ramach projektu badawczego Nr. 8T10B00516 finansowanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 1999 – 2000.

Recenzent: Dr hab. inż. Krzysztof Kurek

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 kwietnia 2000 r.

### Abstract

Power electronic supply systems are not appropriate for supplying arc objects because of the tautness of their external characteristics. In order to ensure the correct operation within the whole operating range they have to be equipped with electronic control systems which are to make the correct control in the whole range of the work currents possible, to limit the over-regulation during transient states and to improve the dynamics. That is why the appropriate choice of the control system optimal structure as well as the calculation of the optimal settings of the controllers are very important tasks.

The analysed system consists of a source, which includes a transistor converter and transformer, and the so called arc circuit, which includes the elements at the transformer secondary side such as the circuit resistance and inductance as well as the plasmatron- see Fig. 1. The system should be completed with a controller and a circuit for measuring the current. It is necessary to make some simplifying assumptions as in the circuit there occur quantities which are time variables dependent on the voltage and current and which are strongly non-linear. These assumptions are discussed in the paper. It is possible to present the supply and control systems in the form of the block diagram (Fig. 2 ) when describing the particular elements of the transistor supply system loaded by the plasmatron by their transfer functions. The control system with a PI current controller was optimised. The reasons for choosing this system are as follows:

- step change of the set value  $U_{\text{zadane}}$  causes the occurrence of the constant control error,
- the constant control error integrated in the PI controller causes appearance of the rising signal after the controller- at the inverter input and, next, the transformer,
- so the constant signal of the set value is transmitted by the system despite the existence of the differentiating element in the transformer model.

Two cases were considered when optimising the controller settings. In the first case the model neglecting capacity was used, while in the other only static parameters of the plasmatron were taken into account in the model. The method based on investigation of the root lines was applied to select the optimal settings of the controller. The choice of the method results from the fact that in the model there are unstable elements due to the arc dynamic properties. The method of the root lines consists in determining the locus of the characteristic equation roots of the closed-loop system on the  $s$  plane ( $\text{Im } s, \text{Re } s$ ) basing on the open-loop transfer function. The obtained root lines (the root locus) show how the root locus change on the  $s$  plane when increasing the controller gain from zero to infinity. The influence of the controller integral action time is investigated basing on observation of the change of the root line shape for different times  $T_c$ . The plots of the root lines presented in the paper were obtained by means of the CC-Sit program which determines the characteristic equation roots of the closed-loop system for the controller gain  $K_R$  increasing from zero to infinity. The optimisation of the control system consists in finding the controller parameters ensuring the maximum stability and minimum oscillations. It corresponds to obtaining the minimum over-regulation and the minimum setting time. The exemplary analysis of the root lines is shown in Fig. 3, whereas the optimal settings of the controllers resulting from the made assumptions are presented in Fig 4. From the analysis results one can come to the conclusion that the proposed method enables the optimisation and allows to select the control system parameters in an efficient way.