

Tadeusz RODACKI

Witold BRYŁKA

## PRĄDOWE PARAMETRYCZNE ŹRÓDŁA REZONANSOWE DO ZASILANIA ODBIORNIKÓW ŁUKOWYCH

**Streszczenie.** Opracowanie dotyczy parametrycznego prądowego rezonansowego źródła prądowego służącego do zasilania różnorodnych odbiorników łukowych. Przedstawiona tu została ogólna zasada działania tego urządzenia oraz podstawowe rodzaje źródeł rezonansowych i ich praktyczne sposoby realizacji. Opisane zostały również sposoby regulacji prądu roboczego w powyższych układach.

## PARAMETRICAL CURRENT POWER SOURCES FOR SUPPLYING OF ARC RECEIVERS

**Summary.** This paper concerns the problem of the parametrical current sources, which use property of alternating current circuit with electric resonance. These sources can be applied to supply various arc receivers. The paper contains principle of operation and methods of realization of parametrical sources. Methods of control of work current are given, too.

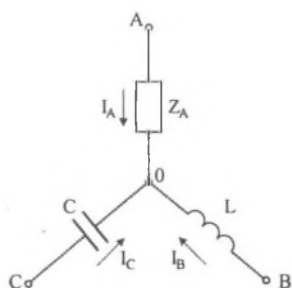
### 1. WPROWADZENIE

Nowoczesne technologie z zastosowaniem nagrzewania łukowego i plazmowego należą do najbardziej uniwersalnych i najszybciej rozwijających się. Charakteryzują się one małą ilością stadiów przeróbki materiału i niewielką ilością odpadów, dużą szybkością i wysoką jakością obróbki elementów konstrukcyjnych. Jest możliwe elastyczne sterowanie przy wykorzystaniu najnowocześniejszych środków automatyki. Technologia łukowa znajduje zastosowanie w elektrometalurgii żelaza i metali kolorowych, w procesach przeróbki metali i stopów z niskogatunkowych odpadów i złomu, do uzyskiwania stopów jakościowych, bezpośredniej redukcji metali z tlenków, do spajania i cięcia detali, do obróbki wymiarowej i powierzchniowej oraz przy otrzymywaniu materiałów optycznych i półprzewodnikowych struktur monokrystalicznych.

Procesy elektrochemiczne i elektrotechnologiczne należą do najbardziej energochłonnych, dlatego problem konstruowania wyspecjalizowanych układów, o najlepszych własnościach techniczno-ekonomicznych do zasilania tego typu urządzeń, jest bardzo istotny. Specyfika znacznej części urządzeń elektrotermicznych polega na tym, że uzyskują one optymalne warunki pracy przy ustabilizowanym prądzie roboczym. Dla urządzeń łukowych objawia się to poprawą stabilności wyładowania, dla urządzeń podlegających prawu Faradaya (elektrolizery, urządzenia elektrochemiczne) – stabilizacją technologicznego procesu, a dla urządzeń elektronowych – redukcją strukturalnej niestabilności powstającej w wyniku wzajemnego naświetlania katody i nagrzewanego wsadu. Należy zauważyć, że w urządzeniach tych opór obciążenia zmienia się zazwyczaj w bardzo szerokim zakresie, czasem od zera do nieskończoności. Stabilizacja prądu przy zmiennej impedancji wewnętrznej obciążenia jest możliwa wyłącznie z układem zasilania o stromej charakterystyce zewnętrznej. Charakterystykę taką można otrzymać za pomocą dodatkowych rezystancji lub reaktancji, co jest jednak nieekonomiczne i technologicznie nieracjonalne. Różnego rodzaju przekształtniki mechaniczne lub systemy zasilające budowane w postaci zamkniętych układów regulacji automatycznej często charakteryzują się niską sprawnością. Wśród urządzeń zapewniających stabilizację prądu obciążenia, obok energoelektronicznych układów przekształcających, rezonansowe źródła prądowe wydają się bardzo obiecujące z uwagi na korzystne własności stabilizacyjne i względy ekonomiczne.

## 2. ZASADA DZIAŁANIA

Parametrycznym, rezonansowym źródłem prądowym przyjęto nazywać statyczny układ przekształcający złożony z nieregulowanych pasywnych elementów połączonych według określonego schematu i posiadający stromo opadającą charakterystykę zewnętrzną [2]. Zasada działania takiego układu opiera się na wykorzystaniu rezonansu w obwodzie prądu przemiennego. Układ zasilany jest z trójfazowej sieci prądu przemiennego. Obciążenie  $Z_A$  włącza się w gwiazdę w ten sposób, że jego jeden zacisk włącza się bezpośrednio w fazę A, natomiast drugi poprzez indukcyjność L i pojemność C do dwóch pozostałych faz sieci.



Rys. 1. Schemat zasadniczy parametrycznego źródła prądowego

Fig. 1. Fundamental scheme of a parametrical source

Schemat z rysunku 1 można opisać układem równań wynikających z praw Kirchoffa:

$$\begin{aligned} Z_A \bar{I}_A + Z_B \bar{I}_B &= \bar{U}_{AB}, \\ Z_C \bar{I}_C + Z_A \bar{I}_A &= \bar{U}_{CA}, \\ \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Rozwiązanie układu równań (1) względem prądu  $I_A$  ma postać:

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{U}_{AB} Z_C - \bar{U}_{CA} Z_B}{Z_A (Z_B + Z_C) + Z_B Z_C} \quad (2)$$

Układ odgrywa rolę źródła prądowego względem fazy A, jeśli spełniony jest warunek:

$$Z_B + Z_C = 0, \quad (3)$$

stąd 
$$j\omega L = j \frac{1}{\omega C}, \quad (3a)$$

zatem 
$$Z_b = -Z_c = jX. \quad (3b)$$

Jest to równoznaczne włączeniu idealnej pojemności i idealnej indukcyjności o równych wartościach reaktancji. Rezystancje tych elementów są równe zero, a wartości impedancji wynikają z warunku rezonansu dla częstotliwości napięcia zasilania. W takim przypadku prąd obciążenia wynosi:

$$\bar{I}_A = -j \frac{1}{X} (\bar{U}_{AB} + \bar{U}_{CA}) = j \frac{\bar{U}_{BC}}{X}. \quad (4)$$

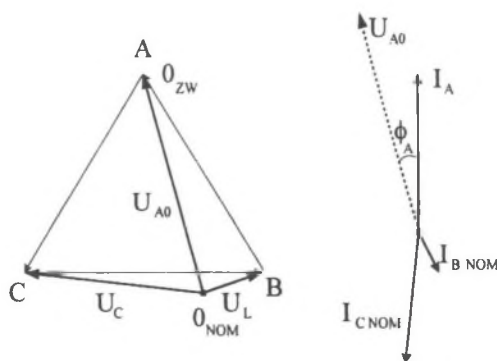
Napięcie na obciążeniu jest proporcjonalne do impedancji obciążenia

$$\bar{U}_{A0} = Z_A \bar{I}_A. \quad (5)$$

Fizyczne zasady działania układu można przedstawić w następujący sposób. Przy zwartej impedancji obciążenia  $Z_A$  potencjał zerowego punktu węzłowego 0 jest równy potencjałowi fazy A i prąd w gałęzi obciążenia określa się wektorową sumą prądów elementów biernych włączonych na napięcia fazowe sieci. Im większa wartość impedancji  $Z_A$ , tym układ jest bliższy pracy rezonansowej i tym większe są napięcia na elementach biernych oraz wyższy jest potencjał punktu zerowego względem punktu A. Wzrost napięcia na roboczej gałęzi kompensuje wzrost impedancji obciążenia, w związku z czym prąd płynący przez obciążenie nie zmienia się. Zwarcie obciążenia nie wywołuje wzrostu prądu obciążenia i jest normalnym roboczym trybem pracy układu. Przerwa w obwodzie obciążenia doprowadza do rezonansu w obwodzie BOC, składającym się z szeregowo połączonej pojemności C i indukcyjności L o jednakowych reaktancjach. Prądy i napięcia na reaktancjach układu gwałtownie rosną, a napięcie na obciążeniu dąży przy tym do nieskończoności. Przerwa w fazie A jest awaryjnym trybem pracy i konieczne jest natychmiastowe wyłączenie układu.

Z wyrażenia (2) wynika, że w rzeczywistym źródle prądowym z cewkami o skończonej dobroci (straty aktywne w kondensatorach są znikomo małe i można je pominąć) niemożliwe jest osiągnięcie absolutnej niezmienności prądu  $I_A$ , przy zmianach impedancji  $Z_A$ . Własności układu rzeczywistego są tym bliższe własnościom układu idealnego, im większa jest dobroć cewek Q. Przy prawidłowo skonstruowanej cewce, gdzie dobroć  $Q \geq 30$ , zmiany prądu  $I_A$  przy zmianach impedancji obciążenia w pełnym zakresie od zwarcia do wartości znamionowej wynoszą od 4 – 6%.

Wektorowy wykres napięć i prądów źródła przedstawiono na rys. 2. Prąd obciążenia  $I_A$  ma wartość stałą i zawsze wyprzedza wektor napięcia  $U_{BC}$  o kat  $\pi/2$ . Przy obciążeniu czynno-indukcyjnym wektor napięcia  $U_{A0}$  wyprzedza wektor prądu  $I_A$  o kąt  $\phi_A$ .



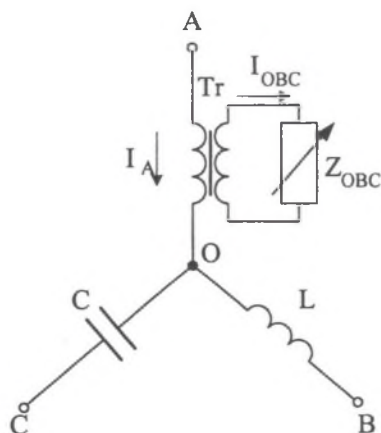
Rys. 2. Wykres wektorowy prądów i napięć parametrycznego źródła prądowego  
 Fig. 2. Vectorial current and voltage diagram

Trójfazowe źródło prądu można uzyskać przez odpowiednie połączenie trzech źródeł jednofazowych. Parametryczne źródło prądu może być wykorzystane do zasilania odbiornika stałym prądem. Jak wiadomo, prostownik zniekształca przebiegi prądów fazowych transformatora, co jest równoznaczne pojawieniu się wyższych harmonicznych naruszających rezonansowy tryb pracy układu. Parametryczne źródła prądowe zazwyczaj poprawnie pracują w zespole z prostownikami, które nie powodują przerw w przebiegach fazowych prądów transformatora (trójfazowy lub jednofazowy układ mostkowy), albo powodującym takie przerwy w pobliżu przejścia przebiegu przez zero (układ gwiazda odwrócona - gwiazda z dławikiem wygładzającym).

### 3. UKŁAD Z TRANSFORMATOREM DOPASOWUJĄCYM

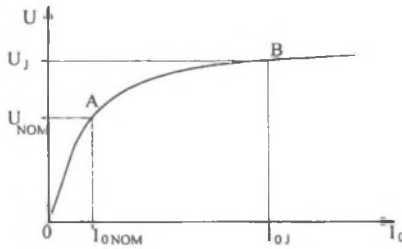
W praktyce zasilanie wszystkich odbiorników przeprowadza się przez transformator dopasowujący Tr (rys.3). Przy zmianie impedancji obciążenia proporcjonalnie zmienia się napięcie na pierwotnym uzwojeniu transformatora. Roboczy punkt na krzywej magnesowania (rys.4) przemieszcza się od punktu 0 ( $U_{ZW} \approx 0$ ), odpowiadającemu zwarciovemu trybowi pracy, w górę do punktu A, odpowiadającemu pracy przy znamionowej impedancji obciążenia. Transformatory mocy przeznaczone do pracy w parametrycznym źródle prądu dobiera się w ten sposób, że punkt A odpowiadający ich znamionowemu trybowi pracy, w celu zachowania właściwości stabilizujących układu, położony jest na liniowym odcinku charakterystyki w pobliżu kolana krzywej magnesowania. Zmiana napięcia na uzwojeniu

pierwotnym transformatora (rys.4) doprowadza do zmiany prądu magnesującego  $I_0$  transformatora. Jeżeli układ źródła prądowego posiada własność utrzymywania niezmiennego prądu  $I_A$  w uzwojeniu pierwotnym transformatora, a prąd obciążenia  $I_{OBC}$  określony jest jako suma wektorowa prądu uzwojenia pierwotnego  $I_A$  i prądu magnesowania  $I_0$ , zmiana prądu magnesującego  $I_0$  wprowadza dodatkowy błąd regulacji prądu obciążenia  $I_{OBC}$ . W typowych transformatorach błąd ten jest mniejszy niż 1% w pełnym zakresie zmiany impedancji obciążenia. Przy zasilaniu obciążenia przez transformator przerwa w obwodzie odbiornika nie doprowadza do rezonansu napięć na reaktywnych elementach układu. W tym przypadku (przy  $I_{OBC}=0$ ) cały prąd gałęzi obciążenia  $I_A$  jest prądem magnesującym  $I_0$  transformatora i prąd  $I_0$  osiąga wartość 10-20 razy wyższą od prądu  $I_{0\text{ NOM}}$ . Prądowi  $I_0$  odpowiada nowy punkt roboczy B na krzywej magnesowania i napięcie  $U_J$  na pierwotnym uzwojeniu transformatora. Położenie punktu B określone jest kształtem krzywej magnesowania transformatora i wyborem roboczego punktu  $U_{\text{NOM}}$  przy znamionowym prądzie obciążenia. W ten sposób, dzięki nieliniowemu charakterowi krzywej magnesowania, przerwa w obwodzie obciążenia nie powoduje tak gwałtownego wzrostu napięcia wyjściowego. Dla standardowych transformatorów mocy wartość  $U_J$  zawiera się w granicach 1,2—1,35 $U_{\text{NOM}}$ .



Rys. 3. Układ źródła z transformatorem dopasującym

Fig. 3. Scheme of a source with matching transformer



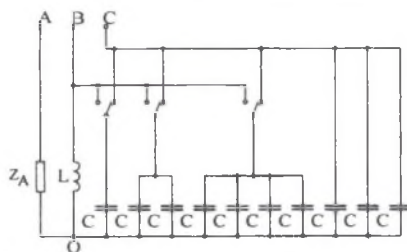
Rys. 4. Krzywa magnesowania transformatora

Fig. 4. B-H curve

#### 4. METODY REGULACJI PRĄDU ROBOCZEGO

Istnieją dwie możliwości regulacji prądu  $I_A$  gałęzi z obciążeniem. Pierwszy sposób pozwala na płynną regulację prądu  $I_A$  (praktycznie w zakresie od 100% do 50%) w wyniku płynnej zmiany napięcia zasilającego. Dlatego przed źródłem prądu powinien być włączony autotransformator dobrany na znamionową moc źródła. Taki sposób regulacji znacznie podnosi koszty urządzenia, pogarsza jego energetyczne właściwości i może być stosowany jedynie w źródłach stosunkowo niskiej mocy.

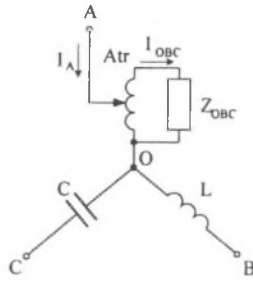
Drugi sposób pozwala na płynną regulację prądu  $I_A$  w przedziałach 100-25% na drodze synchronicznej zmiany oporu biernych gałęzi źródła. Na rys.6 pokazany jest prostszy układ, pozwalający przez przełączanie tylko pojemnościowych elementów, na uzyskanie zmiany reaktancji źródła przy ścisłym zachowaniu równowagi ramion z elementami biernymi. Przy przełączeniu części baterii kondensatorów ramienia pojemnościowego OC do gałęzi indukcyjnej OB rezonans zostanie zachowany, przy czym reaktancja obwodu wzrośnie.



Rys. 5. Stopniowa regulacja prądu obciążenia przez równoległe przełączenie części pojemności do gałęzi z indukcyjnością

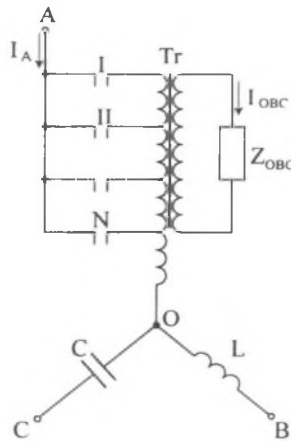
Fig. 5. Gradual control of the receiver current by switching the part of capacitors to inductive Branch





Rys. 6. Płynna regulacja prądu obciążenia przy podłączeniu obciążenia przez autotransformator

Fig. 6. Fluent control of the receiver current when using an autotransformer



Rys. 7. Stopniowa regulacja prądu obciążenia przez przełączanie zwojów transformatora

Fig. 7. Gradual control of the receiver current when using a coil switching transformer

Przy podłączeniu obciążenia przez transformator dopasowujący pojawia się możliwość regulacji prądu obciążenia na drodze zmiany przekładni transformatora płynnej, jeśli w układzie wykorzystuje się autotransformator (rys.6), lub stopniowej (rys.7). Regulacja przebiega w dół od wartości nominalnej. W układzie przedstawionym na rys.7 skokową zmianę prądu gałęzi roboczej uzyskuje się przez przełączanie poszczególnych stopni ( $W_{1,1}$  do  $W_{1,N}$ ) pierwotnego uzwojenia transformatora za pomocą styczników (I do N).

Uniwersalny układ pozwalający na płynną regulację prądu roboczej gałęzi  $I_A$  przedstawia rys.8. Różni się on od rozpatrywanego powyżej tym, że w fazę A szeregowo z obciążeniem włączona jest dodatkowa indukcyjność  $L_D$ , sprzężona magnetycznie z indukcyjnością  $L$  w fazie B. Cewki  $L_D$  i  $L$  mogą być włączone zgodnie lub przeciwnie.

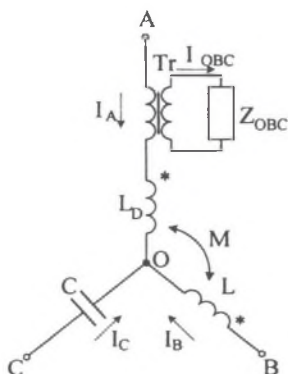


Prąd  $I_A$  określony jest następującym wyrażeniem:

$$I_A = \frac{U_{A0}}{X \left( 1 + M \sqrt{\frac{X_D}{X}} \right)}, \quad (6)$$

gdzie:  $X_D$  - opór dodatkowej indukcyjności  $L_D$ ,

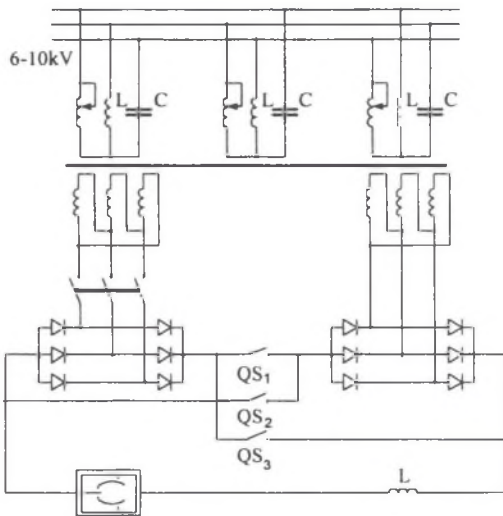
$M$  - współczynnik sprzężenia magnetycznego cewek  $L$  i  $L_D$ .



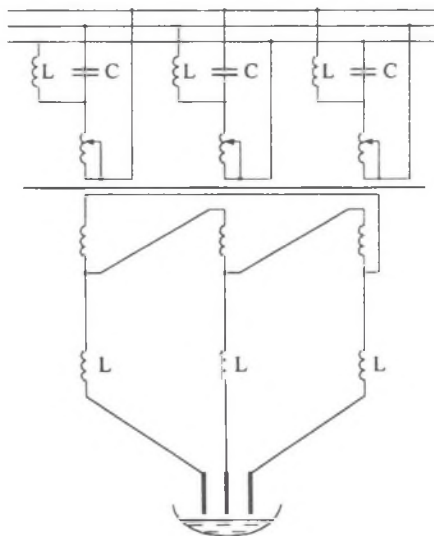
Rys. 8. Schemat sterowanego źródła parametrycznego  
Fig. 8. Scheme of a steerable parametrical source

Przez płynną zmianę indukcyjności wzajemnej możliwa jest płynna regulacja prądu  $I_A$ . Przy każdej z wartości współczynnika  $M$  wartość prądu  $I_A$  nie zależy od impedancji obciążenia. Ze wzrostem głębokości regulacji prądu  $I_A$  rośnie zainstalowana moc reaktywnych elementów układu. Ekonomicznie uzasadniona jest płynna regulacja prądu w zakresie do 50% wartości znamionowej. Jeśli wymagany jest wyższy zakres regulacji, należy zastosować regulację mieszaną – stopniową przez przełączanie zwojów transformatora i płynną wewnątrz każdego stopnia.

Poniżej przedstawiono przykłady schematów praktycznie zrealizowanych urządzeń, które wykorzystują w swej strukturze parametryczne prądowe źródła rezonansowe [1]. Na rysunku 9 zaprezentowano układ zasilania odbiorników plazmowych. Dzięki zastosowaniu styczników  $QS_1, QS_2, QS_3$  uzyskuje się w tym układzie możliwość różnorodnego przełączania prostowników zasilających. Istnieje możliwość ich podłączenia szeregowego, równoległego oraz odłączenia dowolnego z prostowników. Rysunek 10 przedstawia trójfazowy układ zasilania pieca łukowego.



Rys. 9. Podstawowy schemat źródła zasilania odbiorników plazmowo-łukowych  
 Fig. 9. Fundamental scheme of a source for supplying plasma-arc receivers



Rys. 10. Transformatorowy agregat do zasilania łukowych pieców do topienia stali, wykorzystujący parametryczne źródło prądowe  
 Fig. 10. Transformer power source with a parametrical current source for steel melting arc furnaces supply

## 5. UWAGI KOŃCOWE

Ekonomiczne własności układu parametrycznego są bardzo wysokie. Straty w układzie występują właściwie tylko w aktywnych oporach cewek. Przy poprawnie skonstruowanych cewkach ( $Q \geq 30$ ) znamionowa sprawność nie sterowanego źródła przewyższa 99%, a sterowanego źródła 97%. Własnością charakterystyczną układu trójfazowego źródła jest przekształcanie względem sieci fazowego zmiennego kąta obciążenia na przeciwny. Oznacza to, że przy indukcyjnym charakterze obciążenia układ zwraca do sieci moc bierną i może służyć do kompensacji indukcyjnego obciążenia innych odbiorników. Praktycznie wartość współczynnika mocy  $\cos\varphi$  przy znamionowym obciążeniu nie spada poniżej 0,85 (poj.). Istotny jest fakt, że układy te są odporne na przepięcia i przetężenia, co stanowi ich niewątpliwą zaletę. Poważnym mankamentem omawianych układów jest dosyć duży błąd regulacji, utrzymujący się na poziomie 4–6%. Nie bez znaczenia są również znaczne gabaryty elementów układu, a w konsekwencji i samego urządzenia. Układy rezonansowe charakteryzują się poprawnymi parametrami elektrycznymi i ekonomicznymi, cechuje je prostota konstrukcji, niezawodność pracy i odporność na niekorzystne czynniki zewnętrzne. Dodatkową zaletą jest możliwość kompensacji mocy biernej. Obok półprzewodnikowych układów przekształtnikowych źródła rezonansowe są bardzo obiecującym rozwiązaniem technicznym. Można wykorzystać jako układy zasilające między innymi łukowe piece do topienia stali, próżniowe piece łukowe, piece plazmowe, urządzenia elektronowe, elektrolizery i urządzenia do obróbki wymiarowej. Należy pamiętać, że każde z tych urządzeń posiada odmienne warunki pracy, zatem konieczny jest właściwy dobór parametrów i konstrukcji źródła, które będzie spełniało stawiane mu przez odbiornik wymagania.

## LITERATURA

1. Liebidinskaja N. A.: Istoczniki pitanija eliektrotiermiczieskich i eliektroswarocznych ustanowok. Nowosibirskij Eliektrotiechniczieskij Institut, Nowosybirsk 1981.
2. Smielanskij M. J.: Awtomatyczieskoje riegulirowanije eliekticzieskich piecziej. Maskowskij Ordiena Lienina Eliektrotiechniczieskij Institut, Moskwa 1979.
3. Kruczynin M.A. Sawicki A.: Urządzenia elektrotechnologiczne z nagrzewaniem łukowym i plazmowym, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1997.

Recenzent: Dr hab. inż. Czesław Sajdak, prof. Pol. Śl.

Wpłynęło do Redakcji dnia 4 kwietnia 2000 r.

### Abstract

Parametrical current source is a circuit composed of reactive inductive and capacity components. The circuit must have a steep falling output characteristic. The principle of operation is based on property of alternating current circuit with electric resonance. Because of connecting the receiver through a matching transformer, we can avoid abrupt increase in voltage on the receiver in case of rupturing of electrical arc. It can be achieved by an appropriate location of working point on the B-H curve of the transformer. There are a few methods of work current control. We can make it by changing the supply voltage of the source or changing reactance of reactive branches (by switching a few capacitors from the capacity branch to the inductive branch). Due to connecting the receiver through autotransformer or coil switching transformer, we can change the current of the receiver, too. For the work current control we can also use an additional coil, coupled with the main coil of the source. By modulation of magnetic coupling coefficient of coils, the value of current can be changed. A combination of control methods is possible. We can combine the gradual and fluent methods of current control inside the each stage.

Economical properties of such a source are favorable. Losses of energy in the circuit appear only in resistance of the coils. If the coils are properly constructed ( $Q \geq 30$ ), the declared value of efficiency is very high (97-99 percent). The very important property is the fact that the source can transform the value of the receiver phase angle to the opposite one. It means that at an inductive receiver, the circuit returns the passive power to the power network and it can be used for compensation of inductive load of other receivers. Practically the value of  $\cos\phi$  does not decrease below 0,85 (capacity meaning). Parametrical sources are resistant to overcurrent and overvoltage. Serious shortcoming of these circuits is a significant value of control error (4-6 percent). Unfortunately the dimensions of the components are significant, so the source is sizeable.

Resuming the parametrical sources have got good electrical and economical parameters. Very simple structure makes them be reliable. The possibility of compensation of reactive power is a very important advantage, too. For these reasons, the parametrical sources are a very interesting technical solution.

The parametrical sources can be used for supplying the arc furnaces for steel melting, vacuous arc and plasma furnaces, contouring arc attachments, electrolyzers and other arc receivers. We have to remember that each device has got different working conditions, so the power supply must be chosen properly.