

Tadeusz RODACKI, Edward PIECHA

Instytut Podstawowych Problemów
Elektrotechniki i Energoelektroniki
Politechniki Śląskiej

Wincenty POLOCZEK

Instytut Metalurgii Żelaza

NOWOCZESNE UKŁADY ZASILANIA URZĄDZEŃ ŁUKOWYCH I PLAZMOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono kierunki badań i rozwoju nowoczesnych układów zasilania urządzeń łukowych i plazmowych. Podano zalety i wady różnych rozwiązań oraz możliwości ich stosowania.

1. Wstęp

W urządzeniach, w których wykorzystany jest łuk elektryczny, od wielu lat stosowane były klasyczne już układy zasilania łuku, takie jak:

- transformator ze szczeliną powietrzną,
- transformator z dławikami lub rezystorami,
- transformator z podmagnesowywanym rdzeniem,
- transformator i transduktory.

Takie zasilacze pozwalały poprzez odpowiedni dobór parametrów i połączeń układu zapewnić pewny zapłon i stabilne jarzenie się łuku elektrycznego oraz skokową lub płynną nastawę wymaganego prądu łuku. Jednakże w ostatnich latach nastąpił szybki rozwój urządzeń z łukiem elektrycznym, zwiększył się zakres ich zastosowań, wzrosły wymagania co do jakości procesu technologicznego, kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych, możliwość automatyzacji pracy. Dlatego też w wielu krajach prowadzone są intensywne badania nad opracowaniem nowoczesnego układu zasilania łuku elektrycznego, tzn. takiego, który po pierwsze spełnia wymagania zapewniające stabilne jarzenie się łuku, po drugie zapewnia możliwość płynnej w szerokim zakresie nastawy prądu łuku i jego regulacji z dużą dokładnością (poniżej 1%), po trzecie pozwala na automatyzację całego procesu technologicznego, po czwarte posiada wysoki współczynnik sprawności.

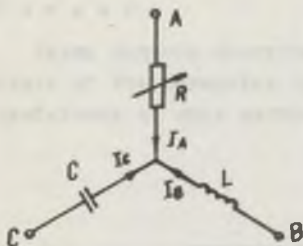
W oparciu o rozeznanie literaturowe można stwierdzić, że obecnie rysują się dwa kierunki rozwoju układów zasilania łuku elektrycznego:

- zasilacze rezonansowe (parametryczne),
- zasilacze tyrystorowe.

2. Zasilacze rezonansowe

Zasilacze rezonansowe (parametryczne) opracowane zostały w ZSRR. Prowadzone tam badania pozwoliły wdrożyć do przemysłu szereg zasilaczy tego typu dużej mocy.

W oparciu o schemat przedstawiony na rys. 1 można napisać równanie na prąd w gałęzi A:



Rys. 1. Schemat jednofazowy zasilacza rezonansowego

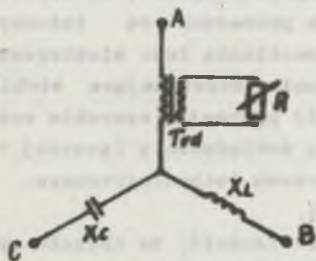
$$I_A = \frac{U_{AB} Z_C - U_{CA} Z_B}{Z_A (Z_B + Z_C) + Z_B Z_C}$$

Jeśli spełniony jest warunek $Z_B + Z_C = 0$, tzn. warunek $Z_B = j\omega L = jX$ i $Z_C = -j\frac{1}{\omega C} = -jX$, prąd obciążenia w gałęzi A wynika z równania:

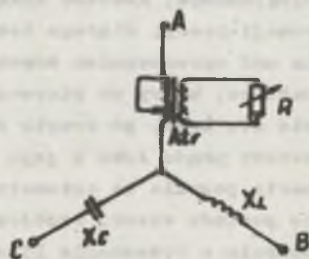
$$I_A = -j \frac{1}{X} (U_{AB} + U_{CA}) = j \frac{U_{BC}}{X}$$

Prąd obciążenia fazy A teoretycznie nie zależy od zmian rezystancji obciążenia R.

W praktyce zbliżenie do warunków teoretycznych zależy jest od dobroci dławika L. Dla dobrze wykonanego dławika przy zmianach R od 0 do wartości znamionowej zakres zmian natężenia prądu I_A wynosi 4 - 6%. W takim układzie rezonansowym nie można dopuścić do przerwy w obwodzie obciążenia z powodu wystąpienia rezonansowych przebiegów w szeregowym układzie zasilanym z fazy B i C. Dlatego w rozwiązaniach praktycznych odbiornik łukowy zasilany jest przez transformator dopasowujący (rys. 2). W celu osiągnięcia możliwości regulacji prądu I_A można zastosować autotransformator

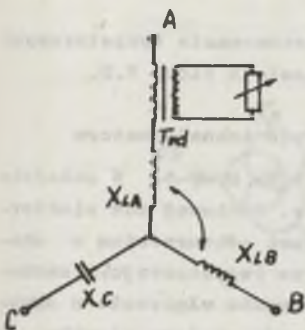


Rys. 2. Zasilacz rezonansowy z transformatorem dopasowującym



Rys. 3. Zasilacz rezonansowy z autotransformatorem

(rys. 3). Wtedy praktyczny zakres regulacji wynosi $(0,5 - 1)I_N$. Ciągłą regulację prądu I_A można uzyskać również przez wprowadzenie dodatkowego dławika w fazie A sprzężonego magnetycznie z dławikiem w fazie B (rys. 4).



Rys. 4. Zasilacz rezonansowy z dławika sprzężonymi

Poszerzenie zakresu regulacji prądu można uzyskać stosując układ kombinowany: przełącznik zaoczepów w transformatorze dopasowującym i zmianą sprzężenia magnetycznego dławików w fazie A i B.

W oparciu o przedstawioną powyżej zasadę działania w ZSRR budowane są zasilacze rezonansowe o mocach do kilkunastu MW. Rozważania teoretyczne, charakterystyki i opisy rozwiązań przemysłowych zamieszczone są w pracach 1, 2, 3, 4.

Zasilacze rezonansowe posiadają szereg zalet takich jak: prosta budowa, duża niezawodność działania, wysoki współczynnik sprawności (powyżej 90%), pojemnościowy współczynnik mocy. Posiadają jednak też takie wady, jak: mała dokładność regulacji prądu łuku (4-6%), trudności z realizacją praktyczną szerokiego za-

zakresu regulacji prądu łuku, co wynika z konieczności budowy dławików o dużej indukcyjności i dużej mocy - sprzężonych magnetycznie, trudności przy realizacji automatycznego sterowania procesem technologicznym.

W naszym kraju jak dotychczas nie prowadzono żadnych badań związanych z wykorzystaniem zasilaczy rezonansowych w przemyśle. Biorąc pod uwagę zalety tych zasilaczy, celowe byłoby podjęcie badań nad zastosowaniem ich do zasilania stalowniczych pieców łukowych.

2.1. Zasilacze tyrystorowe

Zasilacze tyrystorowe najlepiej spełniają wymagania stawiane nowoczesnym układom zasilania łuku elektrycznego, a w szczególności palnika plazmowego. Wyposażenie ich w elektroniczne układy regulacji pozwala na regulację prądu łuku w szerokim zakresie z dużą dokładnością, a przy optymalnym doborze parametrów regulatorów zapewnia dużą szybkość zmian prądu łuku bez dużych przeregulowań (mniejszych od 10%).

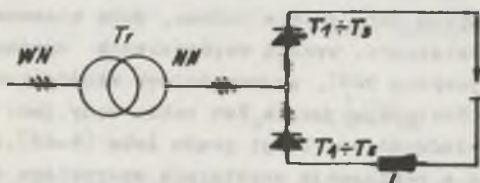
Zastosowanie układów tyrystorowych pozwala łatwo automatyzować proces technologiczny i stosować sterowanie programowe. Analizując układy tyrystorowe przeznaczone do zasilania łuku elektrycznego, należy jednak zwrócić uwagę na konieczność spełnienia warunku stabilnego nieprzerwanego palenia się łuku. Stąd wynika, że należy tu stosować takie układy, w których przy niewysterowanych tyrystorach płynie pewien minimalny ciągły prąd łuku lub też układy, w których tyrystory mają ograniczony kątysterowania zapewniający przy danych parametrach obwodu łuku elektrycznego przepływ

minimalnego ciągłego prądu łuku, zapewniającego stabilne nieprzerwanie palenie się łuku. W grupie zasilaczy tyrystorowych można wyróżnić dwa zasadnicze kierunki rozwiązania (budowy). Pierwszy z nich polega na wykorzystaniu mostka tyrystorowego włączonego po wtórnej stronie transformatora zasilającego. Drugie rozwiązanie oparte jest na zastosowaniu regulatorów tyrystorowych napięcia przemiennego włączonych po pierwotnej stronie transformatora zasilającego.

Poniżej przedstawiono przegląd możliwych do zastosowania tyrystorowych zasilaczy łuku elektrycznego przy założeniu zasilania z sieci W.N.

a) Układ z tyrystorowym mostkiem po wtórnej stronie transformatora

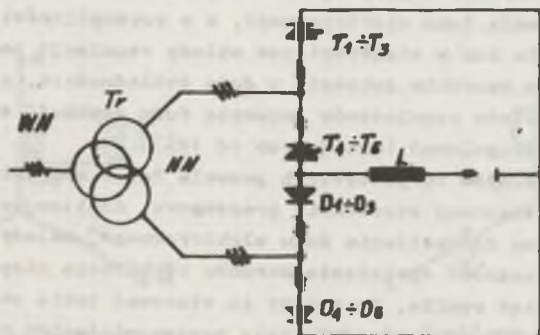
Uproszczony schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 5. W układzie tym transformator zasila mostek sześciotyrystorowy. Ponieważ łuk elektryczny jest odbiornikiem o charakterze rezystancyjnym, zachodzi potrzeba włączenia w obwódzie prądu stałego dławika L o stosunkowo dużej indukcyjności w celu zapewnienia ciągłości minimalnego prądu łuku.



Rys. 5. Układ z mostkiem tyrystorowym po wtórnej stronie transformatora

b) Układ z mostkiem tyrystorowym i dodatkowym źródłem napięcia stałego

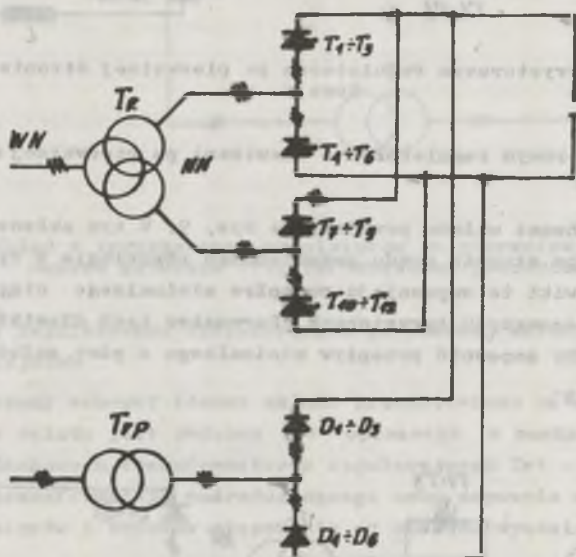
Uproszczony schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 6. W układzie tym w celu zmniejszenia dodatkowej indukcyjności w obwodzie łuku oraz poprawy pracy w zakresie małych prądów zastosowano pomocnicze źródło napięcia stałego w postaci mostka prostownikowego.



Rys. 6. Układ z mostkiem tyrystorowym i dodatkowym źródłem napięcia stałego

c) Układ z mostkami tyrystorowymi i transformatorem pomocniczym

Uproszczony schemat ideowy przedstawiono na rys. 7. Układ ten zbudowany jest w oparciu o dwa transformatory: Tr - transformator główny trójuzwojeniowy, którego każde wtórne uzwojenie zasila osobny mostek tyrystorowy. Mostki tyrystorowe pracują równolegle.

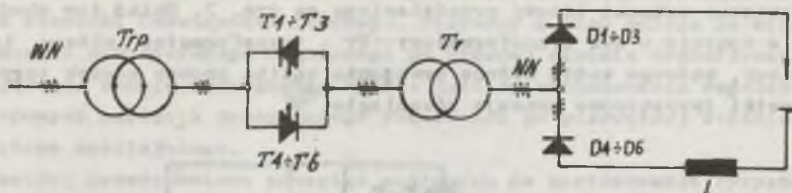


Rys. 7. Układ z mostkiem tyrystorowym i transformatorem pomocniczym

Poprzez odpowiedni dobór grupy połączeń transformatora głównego można uzyskać efekt prostowania 12-pulsowego. Trp - transformator pomocniczy o mocy dobranej ze względu na minimalny prąd łuku. Reaktancja rozproszenia tego transformatora musi być duża, aby zapewnić silnie opadającą charakterystykę zewnętrzną. Aby to osiągnąć, można również włączyć dodatkowe dławiki w każdą fazę po pierwotnej stronie tego transformatora.

d) Układ z tyrystorowym regulatorem po pierwotnej stronie transformatora

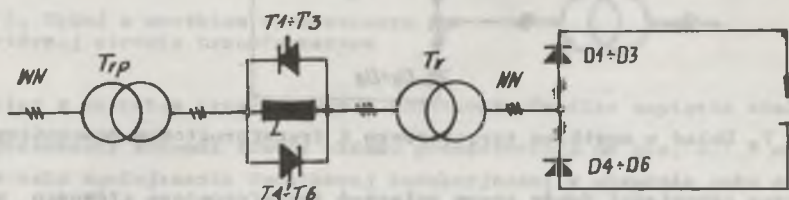
Uproszczony schemat przedstawiono na rys. 8. W układzie tym w przypadku zasilania z sieci WN zachodzi potrzeba stosowania transformatora pośredniczącego Trp, który poprzez tyrystorowe regulatory napięcia przemiennego zasila transformator główny. W obwodzie prądu wyprostowanego znajduje się dławik L, który spełnia tę samą rolę co w układzie opisanym w punkcie a. Zmniejszenie indukcyjności tego dławika lub jego całkowite wyeliminowanie można osiągnąć poprzez zastosowanie wielouzwojeniowego transformatora głównego i odpowiednie łączenie mostków prostownikowych po jego stronie wtórnej.



Rys. 8. Układ z tyrystorowym regulatorem po pierwotnej stronie transformatora

e) Układ z tyrystorowym regulatorem i dławikami po pierwotnej stronie transformatora

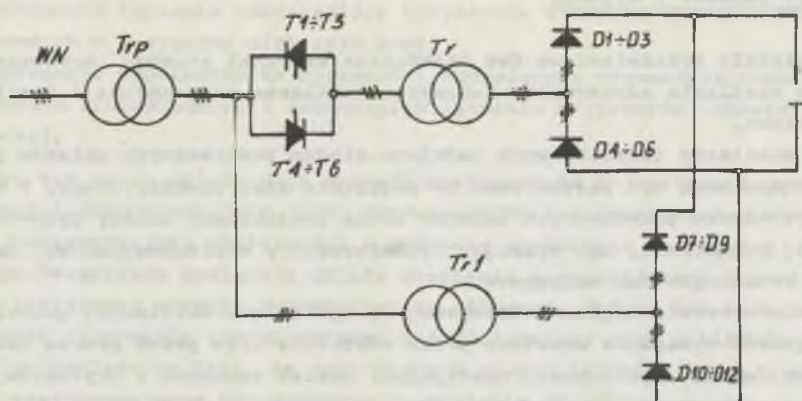
Uproszczony schemat układu przedstawia rys. 9. W tym układzie dławiki włączone zostały po stronie prądu przemiennego równolegle z tyrystorowymi regulatorami. Dławiki te zapewniają przepływ minimalnego ciągłego prądu łuku przy niewysterowanych tyrystorach. Parametry tych dławików powinny być tak dobrane, aby zapewnić przepływ minimalnego z góry założonego prądu łuku $(0,1 - 0,2)I_N$.



Rys. 9. Układ z tyrystorowym regulatorem i dławikami po pierwotnej stronie transformatora

f) Układ z tyrystorowym regulatorem po pierwotnej stronie transformatora głównego i transformatorem pomocniczym

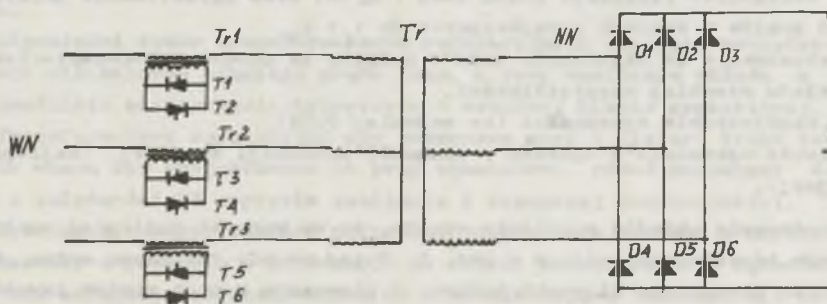
Uproszczony schemat układu przedstawia rys. 10. W porównaniu do układu opisanego w punkcie d wprowadzono tutaj transformator pomocniczy Tr_1 o takiej samej przekładni jak transformator główny Tr i o dużej reakcji rozproszenia, aby uzyskać silnie opadającą charakterystykę wewnętrzną. Moc tego transformatora pomocniczego jest znacznie mniejsza od mocy transformatora głównego i powinna być tak dobrana, aby zapewnić przepływ minimalnego prądu łuku. Regulację prądu łuku zapewniają regulatory tyrystorowe w obwodzie uzwojenia pierwotnego transformatora Tr .



Rys. 10. Układ z tyrystorowym regulatorem po pierwotnej stronie transformatora głównego i transformatorem pomocniczym

g) Układ z regulatorami tyrystorowymi po wtórnej stronie transformatorów regulacyjnych

Uproszczony schemat ideowy układu przedstawiono na rys. 11. Zasada działania tego układu jest podobna do opisanego w punkcie e. Zastosowanie trzech jednakowych transformatorów regulacyjnych $Tr1 - Tr3$ pozwala zrezygnować z transformatora pośredniczącego oraz zapewnia oddzielnie galwaniczne tyrystorów i obwodów sterowania od obwodów wysokiego napięcia.



Rys. 11. Układ z regulatorami tyrystorowymi po wtórnej stronie transformatorów regulacyjnych

Dobór przekładni tych transformatorów zależy od zastosowanych tyrystorów. Parametry uzwojeń pierwotnych transformatorów regulacyjnych włączonych szeregowo do obwodu zapewniają ciągły minimalny prąd łuku przy niewysterowanych tyrystorach. Zwiększanie tego prądu uzyskuje się przez zmianę kąta wysterowania tyrystorów.

3. Uwagi końcowe i wnioski

W artykule przedstawiono dwa zasadnicze kierunki rozwoju nowoczesnych układów zasilania odbiorników łukowych: zasilacze rezonansowe i zasilacze tyrystorowe.

Dla zasilaczy tyrystorowych omówiono siedem podstawowych układów połączeń, które mogą być zastosowane do zasilania łuku elektrycznego. W oparciu o te siedem podstawowych układów można projektować układy tyrystorowe bardziej rozbudowane, m.p. stosując transformatory wielouzwojeniowe, łącząc układy równolegle lub szeregowo.

W celu wybrania najkorzystniejszej wersji układu zasilania, pozwalającego spełnić wymagania stawiane przez odbiornik oraz przez proces technologiczny, można zaproponować następujący zestaw warunków i kryteriów, które umożliwią analizę porównawczą różnych układów:

- moc układu co najmniej 1 MW z perspektywą zwiększenia,
- napięcie zasilania co najmniej 6 kV,
- możliwość budowy zasilacza na napięcie wyjściowe niskie (< 1000 V) jak i wysokie (> 3000 V),
- uniwersalność ze względu na rodzaj prądu zasilania palnika plazmowego (- lub ~),
- zachowanie ciągłości przepływu prądu w całym zakresie regulacji,
- możliwość łatwego nastawiania prądu łuku w zakresie $(0,1 - 1)I_N$ w sposób ciągły,
- zdolność do pracy w układzie automatycznej regulacji,
- duża dokładność regulacji prądu łuku ($\leq 1\%$) oraz ograniczenie przeregulowań prądów w stanach przejściowych do $1,1 I_N$,
- przystosowanie do zajarzania łuku w palniku za pomocą wysokonapięciowego układu wysokiej częstotliwości,
- duży współczynnik sprawności (co najmniej 0,85),
- możliwość wykonania w oparciu o elementy produkcji krajowej (najlepiej seryjnej).

Z porównania układów zasilania wynika, że ww warunki najlepiej spełniają układy tyrystorowe opisane w pkt. 2. W tej grupie zasilaczy można wyróżnić dwa zasadnicze kierunki budowy. W pierwszym z nich mostek tyrystorowy włączony jest po wtórnej stronie transformatora głównego. W drugim tyrystorowe regulatory umieszczone są po pierwotnej stronie transformatora głównego.

Analizując przydatność zasilacza z mostkiem tyrystorowym po wtórnej stronie transformatora do zasilania palników plazmowych, należy podkreślić ich następujące wady:

- mała uniwersalność, nadają się one tylko do zasilania odbiorników prądu stałego na napięcie nie większe niż 1000 V,
- duże wymiary i ciężar koniecznego dławika wygładzającego lub ewentualnie stosowanie pomocniczego źródła napięcia,

- konieczność łączenia równoległego tyrystorów w mostku lub mostków tyrystorowych w przypadku większych mocy,
- pogorszenie współczynnika sprawności spowodowane obecnością dławika w obwodzie wieloprądowym i równoległym łączeniu tyrystorów (dławiki wyrównawcze).

Dlatego też takie układy mogą znaleźć zastosowanie do zasilania urządzeń łukowych i plazmowych, ale tylko prądem stałym i o ograniczonej mocy.

Najkorzystniejsze właściwości w zakresie spełnienia przyjętych kryteriów porównawczych posiadają układy zasilania z regulatorami tyrystorowymi po pierwotnej stronie transformatora głównego. Jedyną ich wadą jest konieczność stosowania transformatora pośredniczącego przy zasilaniu z sieci WN ze względu na fakt, że przy obecnym stanie techniki w kraju regulatory tyrystorowe mogą być budowane na napięciu do 1000 V.

Do podobnych wniosków prowadzi również analiza literatury związanej z zastosowaniem układów tyrystorowych do zasilania łuku elektrycznego. Produkcję w tej dziedzinie firmy, takie jak: Brown Boveri, Siemens ASEA, produkują seryjnie zasilacze dużej mocy oparte na regulacji tyrystorowej po pierwotnej stronie transformatora (opisane w punkcie 2d), z tym że w celu poprawy właściwości eksploatacyjnych stosuje się w tych rozwiązaniach transformatory ostro- lub pięciouzwojeniowe [5,6].

Na szczególną uwagę przy wyborze koncepcji zasilania odbiorników łukowych dużej mocy zasługuje rozwiązanie opisane w punkcie 2g, w którym regulatory tyrystorowe włączone są po pierwotnej stronie transformatora głównego w sposób pośredni, za pomocą jednofazowych transformatorów regulacyjnych.

Odpowiedni dobór transformatorów regulacyjnych zapewnia przepływ wymaganego minimalnego ciągłego prądu łuku, a przy zasilaniu układu z sieci WN umożliwia zastosowanie tyrystorów o dowolnej klasie napięciowej.

Transformatory regulacyjne nie przenoszą mocy i dlatego tylko ich uzwojenia muszą być projektowane na prąd znamionowy, rdzeń natomiast dobiera się w zależności od napięcia zasilania i wymaganej indukcyjności.

Rozwiązanie takie spełnia wszystkie proponowane warunki i kryteria porównawcze, a poza tym w porównaniu do innych prezentowanych układów odznacza się mniejszym oddziaływaniem na sieć zasilającą (szczególnie przy głębokim wystawianiu tyrystorów) i większą niezawodnością pracy.

Układ taki może pracować poprawnie nawet przy uszkodzeniu jednego tyrystora w każdej fazie jako układ z tyrystorowo-magnetyczną regulacją napięcia [7].

LITERATURA

- [1] Gutterman K.D. i inni: Автоматическое регулирование электрических печей. МЭ I, Moskwa 1972.

- [2] Gutterman K.D. i inni: Istoczniki pitaniya dla plazmiennykh tehnologicheskikh ustanovok. Nauka, Moskwa 1973.
- [3] Swienozanski A.D. i inni: Problemy elektrosnableniya moszcznykh dugowych staleplawilnykh piecoz i trebowaniya kirtocznikom pitaniya. Wszechmirnyj Elektrotechnicheskij Kongress Dokład 82, Sekcja 4b, Moskwa 1977.
- [4] Wołkow I.W.: Istoczniki elektropitaniya so specyjnymi charakteristikami. Naukowa Dumka, Kijów 1979.
- [5] Bardhal N.: Stromversorgung fur lichtogenanlagen. Siemens - Zeitschrift nr 12, 1967.
- [6] Jaysinghani N.: Geregelte Gleichstromversorgung fur Plasmauntersuchungen. Brown Boveri Mitt. nr 2/3, 1974.
- [7] Kuczewski Z., Rodacki T., Gielotka K., Piecha E.: Układ zasilania łuku elektrycznego prądu stałego. Zgłoszenie patentowe nr P.222135.
- [8] Iwanow G.P.: Tiristornyje regulatory toka swarocznykh transformatorów. Awomaticheskaja Swarka nr 11, 1973.
- [9] Sirojan G.A.: Elektricheskaja duga w elektricheskoi pieczy. Metalurgija, Moskwa, 1974.
- [10] Kuczewski Z., Rodacki T. i inni: Tyrystorowy układ zasilania łuku elektrycznego. Zgłoszenie patentowe nr 225777.

Recenzent: doc. dr inż. Józef Danciewicz

Wpłynęło do redakcji dn. 15.VI.1982 r.

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ПИТАНИЯ ДУГОВЫХ И ПЛАЗМОВЫХ УСТАНОВОК

Резюме

В статье представлены направления исследований и развития современных систем питания дуговых и плазмовых установок. Показаны недостатки и достоинства различных концепций и возможности их применения.

MODERN SUPPLYING SYSTEM OF THE ELECTRIC ARC AND ARC TORCHES

Summary

The article presents directions of the research and development of modern supplying systems of the electric arc and arc torches. The advantages and disadvantages of different systems and possibilities of their application are also discussed.