

Nr 95/2016, 7–15  
ISSN 1644-1818  
e-ISSN 2451-2486

## OPTIMALIZACJA TRANSFERU ENERGII W MIKROFALOWYM (915 MHz) GENERATORZE PLAZMY O STRUKTURZE WSPÓŁOSIOWEJ

### OPTIMIZATION OF POWER COUPLING EFFICIENCY IN THE WAVEGUIDE-SUPPLIED COAXIAL-LINE-BASED NOZZLELESS MICROWAVE (915 MHz) PLASMA SOURCE

Robert Miotk<sup>1</sup>, Mariusz Jasiński<sup>1</sup>, Jerzy Mizeraczyk<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk,  
Gdańsk, Poland

<sup>2</sup> Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroniki Morskiej, Gdynia,  
Poland

\* Corresponding author: Akademia Morska w Gdyni, Wydział Elektryczny, Katedra  
Elektroniki Morskiej, Morska 81-87, 81–581 Gdynia, Poland, e-mail: jm@am.gdynia.pl

**Streszczenie:** Artykuł przedstawia optymalizację mikrofalowego generatora plazmy o strukturze współosiowej. Prezentowane źródło plazmy pracuje przy częstotliwości  $f = 915$  MHz pod ciśnieniem atmosferycznym. Celem przeprowadzonej optymalizacji była maksymalizacja absorpcji dostarczanej energii mikrofal przez generowaną plazmę. W optymalizacji wykorzystano wyznaczony w pracy model plazmy mikrofalowej.

**Słowa kluczowe:** charakterystyka elektrodynamiczna, mikrofalowy generator plazmy, optymalizacja.

**Abstract:** This paper presents an optimization of the waveguide-supplied coaxial-line-based nozzleless microwave plasma source. The presented plasma source operated at a frequency  $f = 915$  MHz under atmospheric pressure. The optimization objective was to maximize the absorption of supplied microwave energy by the generated plasma. In optimization we used model of plasma determined in this work.

**Keywords:** tuning characteristics, microwave plasma source, optimization.

## 1. WSTĘP

Jednym z czynników decydujących o przydatności plazmy mikrofalowej w przemyśle jest koszt uzyskiwanego wyładowania mikrofalowego. Sposobem obniżenia tego kosztu jest optymalizacja mikrofalowego generatora plazmy (MGP) w celu maksymalizacji absorpcji dostarczanej energii mikrofal przez generowaną plazmę. Maksymalizacja ta realizowana jest przez odpowiednią konstrukcję

urządzenia oraz stosowanie tzw. układów dopasowujących. Można tego dokonać sposobem eksperymentalnym, który jest kosztowny, lub poprzez modelowanie, którego wyniki muszą jednak zostać zweryfikowane eksperymentalnie.

Maksymalizacja absorpcji energii mikrofal przez generowaną plazmę jest równoważna zminimalizowaniu współczynnika odbicia energii mikrofal w MGP. Współczynnik ten określa się jako stosunek  $P_R/P_I$ , gdzie  $P_I$  jest mocą fali doprowadzanej do wejścia generatora (płaszczyzna 1 – 1', rys. 1), natomiast  $P_R$  jest mocą odbitą od generatora. Zależność  $P_R/P_I$  od  $l_s$  nazywana jest charakterystyką elektrodynamiczną MGP.

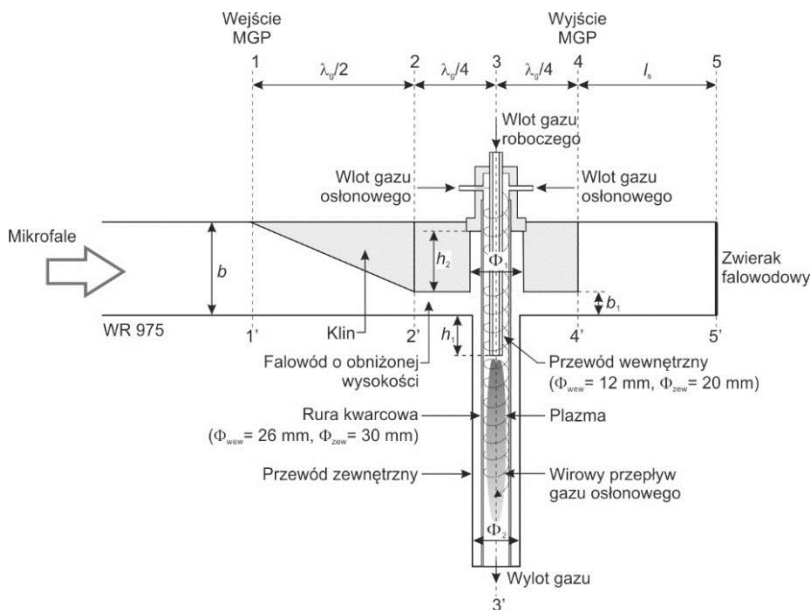
Niniejszy artykuł prezentuje MGP o strukturze współosiowej [Mizeraczyk i in. 2012]. Zmierzone charakterystyki elektrodynamiczne MGP wskazały konieczność optymalizacji prezentowanego źródła plazmy. Optymalizacja MPG polegała na obliczeniu wymiarów elementów konstrukcyjnych generatora, które zapewnią minimalną wartość współczynnika  $P_R/P_I$  w możliwie najszerszym zakresie zmian położenia zwieraka falowodowego  $l_s$ .

## 2. SCHEMAT MIKROFALOWEGO GENERATORA PLAZMY

Schemat omawianego MGP przedstawiono na rysunku 1 [Mizeraczyk i in. 2012]. MGP zbudowany jest na bazie zmodyfikowanego fragmentu falowodu prostokątnego WR 975 z wtrąconym prostopadle odcinkiem linii współosiowej (przewód wewnętrzny i zewnętrzny). Wymiary wewnętrzne (szerokość/wysokość) standardowego falowodu WR 975 wynoszą odpowiednio:  $a = 247,7$  mm i  $b = 123,9$  mm.

Zmodyfikowany falowód MGP składa się z dwóch sekcji (klin, falowód o obniżonej wysokości) o długości  $\lambda_g/2$  każda, gdzie  $\lambda_g = 437,7$  mm jest długością fali o częstotliwości 915 MHz w falowodzie WR 975. Moc mikrofal doprowadzana jest falowodem do płaszczyzny wejściowej MGP (płaszczyzna 1 – 1'). W płaszczyźnie wyjściowej MGP (płaszczyzna 4 – 4') dołączony jest odcinek falowodu, zakończony ruchomym zwierakiem falowodowym (rys. 1).

Gaz do wnętrza MGP można podawać zarówno w sposób wirowy (gaz osłonowy) jak i osiowy (gaz roboczy) [Mizeraczyk i in. 2012]. Wyładowanie mikrofalowe w formie płomienia plazmowego generowane jest wewnątrz rury kwarcowej, znajdującej się centralnie w sekcji falowodu o obniżonej wysokości (płaszczyzna 3 – 3').



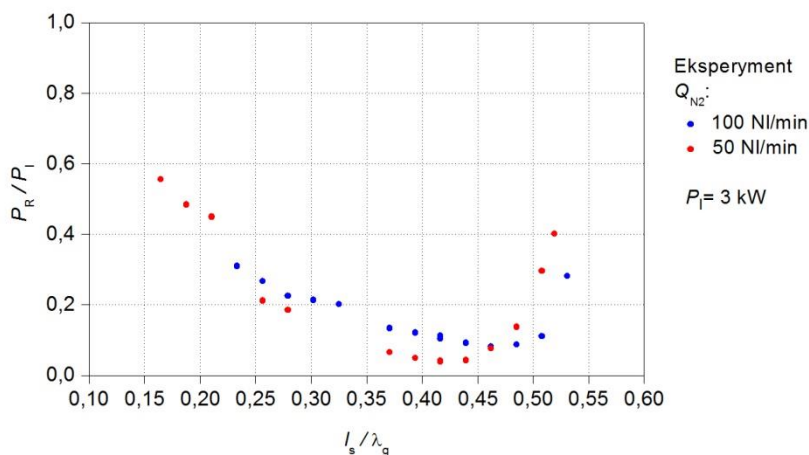
**Rys. 1.** MGP o strukturze współosiowej [Mizeraczyk i in. 2012]

**Fig. 1.** The waveguide-supplied coaxial-line-based nozzleless MPS [Mizeraczyk i in. 2012]

Wymiary konstrukcyjne MGP:

- $a = 247,7$  mm – szerokość standardowego falowodu prostokątnego WR 975;
- $b = 123,9$  mm – wysokość standardowego falowodu prostokątnego WR 975;
- $b_1 = 31$  mm – wysokość falowodu o obniżonej wysokości;
- $h_1 = 40$  mm – odległość końca przewodu wewnętrznego od dna falowodu;
- $h_2 = 106$  mm – wysokość górnego odcinka linii współosiowej;
- $\Phi_1 = 53$  mm – średnica wewnętrzna górnego odcinka linii współosiowej;
- $\Phi_2 = 48$  mm – średnica wewnętrzna dolnego odcinka linii współosiowej.

Dla mocy fali padającej  $P_1 = 3$  kW zmierzono charakterystyki elektrodynamiczne MGP (rys. 2) dla wyładowania mikrofalowego w azocie (gaz roboczy/osłonowy). Objętościowe natężenie przepływu wprowadzanego gazu roboczego  $Q_{N_2}$  wynosiło 50 NI/min i 100 NI/min, a gazu osłonowego 50 NI/min.



**Rys. 2.** Zmierzone charakterystyki elektrodynamiczne MGP

**Fig. 2.** The measured tuning characteristics of the MPS

Wzrost natężenia przepływu gazu roboczego spowodował obniżenie efektywności absorpcji energii mikrofal przez generowaną plazmę oraz zawężenie obszaru stabilnej generacji wyładowania. Mając na uwadze przyszłościowe zastosowanie w przemyśle, gdzie urządzenie dedykowane jest do konwersji gazu o dużym natężeniu przepływu (kilkaset litrów na minutę), powyższa obserwacja wskazała na konieczność jego optymalizacji.

### 3. PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA ANALIZY NUMERYCZNEJ

W pracy do obliczenia charakterystyki elektrodynamicznej MGP przyjęto metodę Nowakowskiej i in. [Miotk i in. 2014; Nowakowska i in. 2011; Nowakowska, Jasiński, Mizeraczyk 2009; 2010]. W metodzie tej kluczowe jest przyjęcie kształtu generowanej plazmy, przestrzennego rozkładu koncentracji elektronów oraz wartości przenikalności elektrycznej plazmy  $\epsilon_p$ . Punktem wyjścia do optymalizacji MGP była charakterystyka zmierzona dla wyładowania mikrofalowego przy  $Q_{N_2} = 100 \text{ NI/min}$ .

Zgodnie z obserwacjami w czasie eksperymentu przyjęto, że plazma ma kształt walca o średnicy  $d = 20 \text{ mm}$  i wysokości  $h = 160 \text{ mm}$  oraz że plazma jest jednorodna, tzn. koncentracja elektronów w każdym punkcie walca jest taka sama. Ponadto założono, że względna przenikalność elektryczna plazmy  $\epsilon_p$  opisana jest wzorem Lorentza [Miotk i in. 2014; Nowakowska i in. 2009, Nowakowska, Jasiński, Mizeraczyk 2010, 2011]:

$$\varepsilon_p = 1 - n / (1 - js), \quad (1)$$

gdzie:

$n$  – koncentracja elektronów  $n_e$  unormowana względem koncentracji krytycznej

$$n_c = 1,04 \times 10^{16} \text{ m}^{-3} [2, 4-6],$$

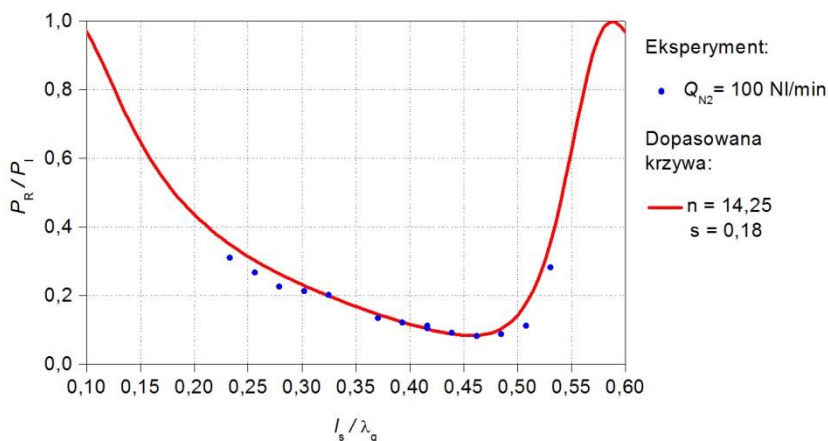
$s$  – unormowana częstość zderzeń elektronów  $\nu$  względem częstości pola  $\omega = 2\pi f$ ,

$$j = (-1)^{1/2},$$

$j$  – jednostka urojona  $j = (-1)^{1/2}$ .

W przyjętej metodzie kluczowymi wielkościami decydującymi o kształcie relacji  $P_R/P_I (l_s/\lambda_g)$  są parametry  $n$  i  $s$ , których wartości nie są znane. Dopasowanie obliczonej charakterystyki do zmierzonych punktów eksperymentalnych pozwoliło na wyznaczenie wartości szukanych parametrów. Dla rozważanego przypadku wyładowania najlepszą zgodność uzyskano dla  $n = 14,25$  i  $s = 0,18$  (rys. 3).

Wyznaczenie parametrów  $n$  i  $s$  dało możliwość estymacji koncentracji elektronów  $n_e$  oraz częstości zderzeń elektronów  $\nu$  w generowanej plazmie (zob. wzór 1). W rozważanym przypadku ( $Q_{N_2} = 100 \text{ NI/min}$ ,  $P_I = 3 \text{ kW}$ ) oszacowana koncentracja elektronów  $n_e$  wyniosła około  $1,5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , a częstość zderzeń elektronów  $\nu$  wyniosła około  $1 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ .



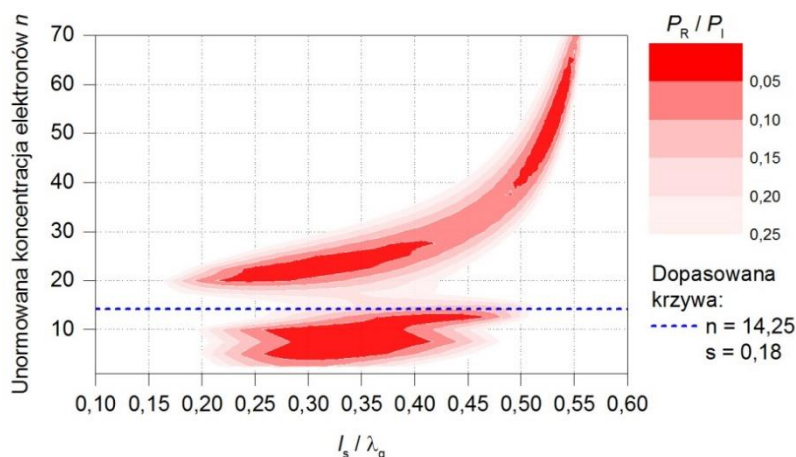
**Rys. 3.** Porównanie zmierzonej i obliczonej charakterystyki elektrodynamicznej MGP

**Fig. 3.** Comparison of measured and calculated tuning characteristics of the MPS

#### 4. OPTIMALIZACJA TRANSFERU ENERGII MIKROFAL W MGP

Dla przyjętego modelu plazmy na rysunku 4 zaprezentowano obliczoną charakterystykę elektrodynamiczną MGP w postaci dwuwymiarowej mapy konturowej, tzw. mapy stabilnego obszaru generacji plazmy. Mapa ta przedstawia obliczoną

relację  $P_R/P_I$  w postaci funkcji dwóch zmiennych: znormalizowanego położenia zwieraka falowodowego  $l_s/\lambda_g$  oraz unormowanej koncentracji elektronów  $n$ . Charakterystyka elektrodynamiczna przyjmuje wartości z zakresu od 0 do 1. W niniejszej pracy skoncentrowano się na zakresie wartości  $P_R/P_I$  od 0 do 0,25, aby skupić uwagę na obszarach najefektywniejszej absorpcji energii mikrofal przez generowaną plazmę.



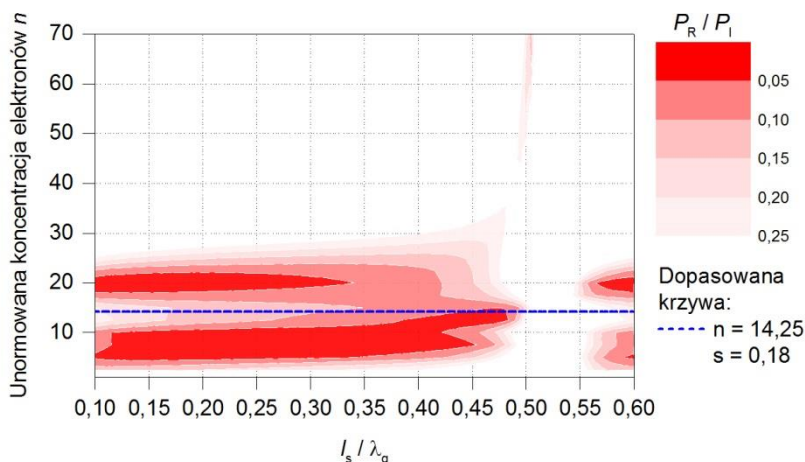
**Rys. 4.** Mapa stabilnego obszaru generacji plazmy – MGP przed optymalizacją

**Fig. 4.** Area of stable plasma generation – MPS before optimization

Linia przerywaną na rysunku 4 zaznaczono wartość unormowanej koncentracji elektronów  $n$  przyjętego modelu plazmy. Proces optymalizacji MGP polega na szukaniu takich wymiarów konstrukcyjnych urządzenia, które na wykreślonej mapie zapewnią minimalną wartość współczynnika  $P_R/P_I$  w otoczeniu unormowanej koncentracji elektronów  $n$  przyjętego modelu plazmy. W praktyce proces ten sprowadza się do wykreślania mapy stabilnego obszaru generacji plazmy dla każdorazowej zmiany konstrukcji urządzenia, a następnie porównania ciągu uzyskanych map i analizy ich zmiany wywołanych modyfikacją danego elementu.

W artykule przeanalizowano wpływ następujących wymiarów konstrukcyjnych na efektywność pracy MGP:  $b_1$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $\Phi_1$  oraz  $\Phi_2$  (rys. 1). Ponadto postanowiono zastąpić falowód o obniżonej wysokości grzbietem o szerokości  $a_1$ . W optymalizacji konstrukcji MGP posłużono się modulem RF programu *Comsol Multiphysics* [COMSOL Multiphysics® Modeling Software].

Przeprowadzona analiza numeryczna doprowadziła do znacznego zwiększenia obszaru minimalnych wartości współczynnika  $P_R/P_I$  w otoczeniu unormowanej koncentracji elektronów  $n$  przyjętego modelu plazmy (rys. 5). Uzyskana nowa mapa stabilnego obszaru generacji plazmy sugeruje istotną poprawę efektywności oraz stabilności pracy urządzenia.



**Rys. 5.** Mapa stabilnego obszaru generacji plazmy – MGP po optymalizacji

**Fig. 5.** Area of stable plasma generation – MPS after optimization

Wyznaczone w analizie zoptymalizowane wymiary konstrukcyjne MGP zamieszczono w tabeli 1. Przeprowadzone obliczenia wskazały, że odległość  $h_1$  nie powinna ulec zmianie, natomiast średnice wewnętrzne górnego  $\Phi_1$  i dolnego odcinka  $\Phi_2$  linii współosiowej powinny być równe i wynosić 52 mm.

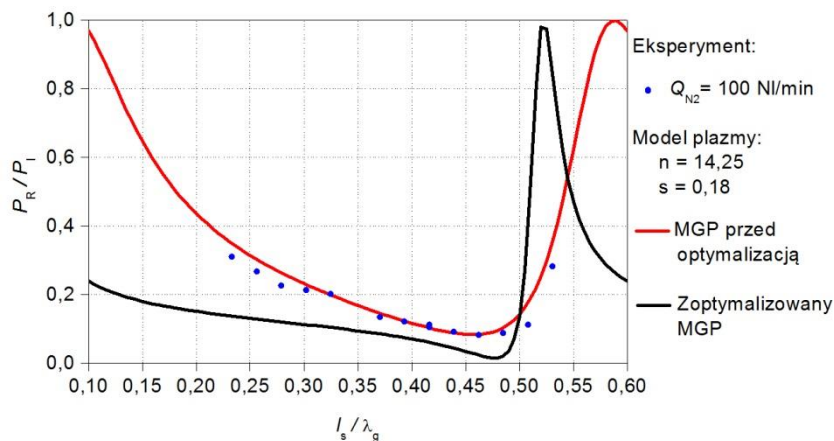
**Tabela 1.** Zoptymalizowane wymiary konstrukcyjne MGP

**Table 1.** Optimized dimensions of MPS

Wymiary MGP przed optymalizacją	Wymiary MGP po optymalizacji
$b_1 = 31$ mm	$b_1 = 35$ mm,
$h_1 = 40$ mm	$h_1 = 40$ mm
$h_2 = 106$ mm	$h_2 = b - b_1 = 88,9$ mm
$\Phi_1 = 53$ mm	$\Phi_1 = \Phi_2 = 52$ mm
$\Phi_2 = 48$ mm	
$a_1 = a = 247,7$ mm	$a_1 = 0,7a = 173,4$ mm

Wykorzystując model zoptymalizowanego MGP dla modelu plazmy mikrofalowej przy  $Q_{N_2} = 100$  NI/min, obliczono nową charakterystykę pracy urządzenia (rys. 6). Uzyskaną zależność  $P_R/P_I$  ( $l_s/\lambda_g$ ) zestawiono z charakterystyką przed optymalizacją. Prezentowana nowa charakterystyka elektrodynamiczna pokazuje znaczący spadek wartości współczynnika odbicia energii mikrofal  $P_R/P_I$ . Należy

pamiętać jednak, że wynik przeprowadzonych obliczeń musi ostatecznie zostać potwierdzony eksperymentalnie.



**Rys. 6.** Charakterystyka elektrodynamiczna zoptymalizowanego MGP

**Fig. 6.** Tuning characteristics of optimized MPS

## 5. PODSUMOWANIE

Celem przeprowadzonej optymalizacyjnej analizy numerycznej była maksymalizacja absorpcji dostarczanej energii mikrofal przez generowaną plazmę. W obliczeniach wykorzystano wyznaczony w pracy model plazmy. Wykazano, że zoptymalizowanie konstrukcji MGP w sposób znaczący może poprawić efektywność oraz stabilność pracy urządzenia.

Ponadto przyjęty proces optymalizacji można zastosować w celu uzyskania poprawy efektywności transferu mocy mikrofal nie tylko dla rozpatrywanego przypadku generowanej plazmy, ale również w celu zminimalizowania wartości współczynnika  $P_R/P_I$  dla wyładowań mikrofalowych w innych gazach (np. w powietrzu, dwutlenku węgla, metanie) oraz w urządzeniach o innej konstrukcji.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/11/N/ST8/00802.



## LITERATURA

COMSOL Multiphysics® Modeling Software, <http://www.comsol.com>.

Miotk, R., Sobański, M., Jasiński, M., Mizeraczyk, J., 2014, *Charakterystyka strojenia mikrofalowego generatora plazmy do produkcji wodoru z paliw ciekłych*, „Elektronika”, 11, s. 128–129.

Mizeraczyk, J., Jasiński, M., Nowakowska, H., Dors, M., 2012, *Studies of atmospheric-pressure microwave plasmas used for gas processing*, „Nukleonika”, 57(2), pp. 241–247.

Nowakowska, H., Jasiński, M., Dębicki, P., Mizeraczyk, J., 2011, *Numerical analysis and optimization of power coupling efficiency in waveguide-based microwave plasma source*, IEEE Trans. Plasma Sci., 39(10), pp. 1935–1942.

Nowakowska, H., Jasiński, M., Mizeraczyk, J., 2009, *Electromagnetic field distributions in waveguide-based axial-type microwave plasma source*, Eur. Phys. J. D, 54, pp. 511–518.

Nowakowska, H., Jasiński, M., Mizeraczyk, J., 2010, *Optymalizacja transferu energii w mikrofalowym generatorze plazmy zasilanym falowodowo*, „Przegląd Elektrotechniczny”, 86(7), s. 84–86.