

**Michał Sobański, Mieczysław Lubański**

**Mariusz Jasiński, Mirosław Dors**

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

**Jerzy Mizeraczyk**

Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN w Gdańsku

Akademia Morska w Gdyni

## **UKŁAD ZASTĘPCZY I CHARAKTERYSTYKI ELEKTRODYNAMICZNE MIKROFALOWEGO APLIKATORA PLAZMOWEGO TYPU REZONATOR WNĘKOWY (915 MHz)**

*Mikrofalowe aplikatory plazmowe wykorzystuje się m.in. do obróbki gazów, w tym do produkcji wodoru poprzez reforming węglowodorów. W pracy przedstawiono elektryczny schemat zastępczy o stałych skupionych mikrofalowego aplikatora typu rezonator wnękowy, wykonanego z odcinka falowodu prostokątnego WR 975. Omówiony aplikator plazmowy pracuje przy częstotliwości 915 MHz. Wyladowanie mikrofalowe powstaje w tym aplikatorze pod ciśnieniem atmosferycznym. Głównym elementem konstrukcyjnym aplikatora jest falowód o obniżonej wysokości, w którym zamontowano dwie elektrody w postaci zbieżnej rurki i pręta. Dość dobra zgodność wyników obliczeń charakterystyk strojenia z wynikami pomiarów świadczy o tym, że mimo pewnych ograniczeń w stosowaniu schematów zastępczych o stałych skupionych są one przydatne w praktyce.*

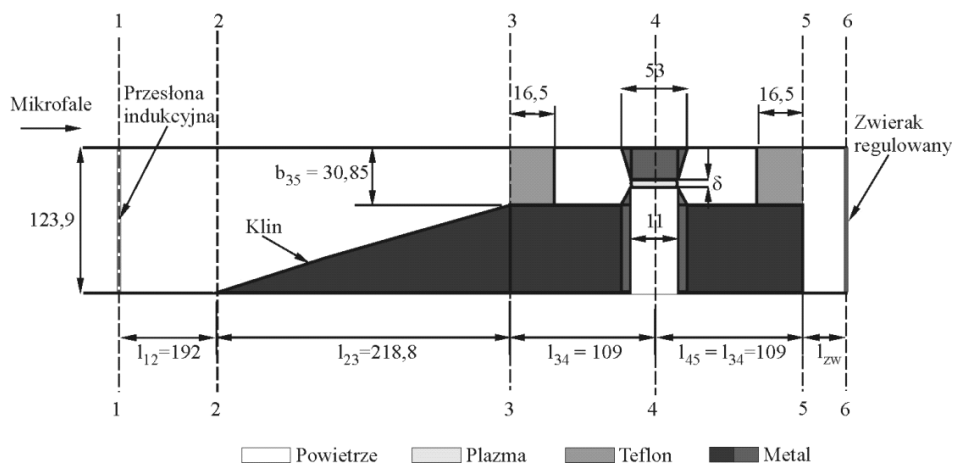
### **WPROWADZENIE**

W artykule przedstawiono elektryczny schemat zastępczy o stałych skupionych mikrofalowego aplikatora plazmowego typu rezonator wnękowy zasilanego falowodem WR 975. Omawiany aplikator, którego konstrukcja powstała na podstawie zgłoszeń patentowych [1, 2] może być stosowany do produkcji wodoru poprzez reforming węglowodorów jak w [4].

Istotnym problemem jest stopień dokładności opisu właściwości elektrycznych układu, składającego się z elementów linii długich przez układ elektryczny o stałych skupionych. Szczególnie krytyczne elementy mikrofalowego aplikatora typu rezonator wnękowy oraz ich odpowiedniki w układzie zastępczym omówiono w dalszej części.

## 1. BUDOWA APLIKATORA PLAZMOWEGO

Na rysunku 1 przedstawiono szkic konstrukcji aplikatora. Składa się on z odcinka falowodu prostokątnego WR 975, którego ścianki wewnętrzne mają wymiary  $a$  i  $b$  odpowiednio 247,7 mm i 123,9 mm. Dla częstotliwości mikrofal 915 MHz długość fali  $\lambda_g$  w omawianym falowodzie wynosi 437,7 mm (dla rodzaju fali  $H_{10}$ ). W falowodzie umieszczony jest półfalowy (o długości  $\lambda_g/2$ ) metalowy odcinek o kształcie klina pełniący rolę bezodbićowego transformatora impedancji. Na końcu klina znajduje się metalowy blok, którego wysokość jest równa wysokości końca klina. Klin i blok wypełniają całkowicie falowód wzdłuż jego szerszej ścianki. W obszarze, gdzie zamontowany jest blok, wysokość falowodu jest równa  $b_{35}$ . W tym obszarze, zwanym dalej falowodem o obniżonej wysokości, zamontowano dwie elektrody w postaci rurki i pręta, między którymi powstaje plazma wyładowania mikrofalowego. W płaszczyźnie 1-1 aplikatora plazmowego umieszczona jest przesłona indukcyjjna, stanowiąca element dopasowujący, a na jego wyjściu załączony jest falowodowy zwierak regulowany, pełniący rolę elementu strojącego.



**Rys. 1.** Szkic konstrukcji aplikatora typu rezonator wnekowy.  
Wymiary podano w milimetrach

**Fig. 1.** Sketch of the Cavity-Resonant-Type Microwave Plasma Applicator.  
Dimensions are given in mm

Przesłonę indukcyjną opisano w rozdziale 2 pracy. Gaz roboczy doprowadzany jest poprzez otwory w węższych ściankach falowodu o obniżonej wysokości.

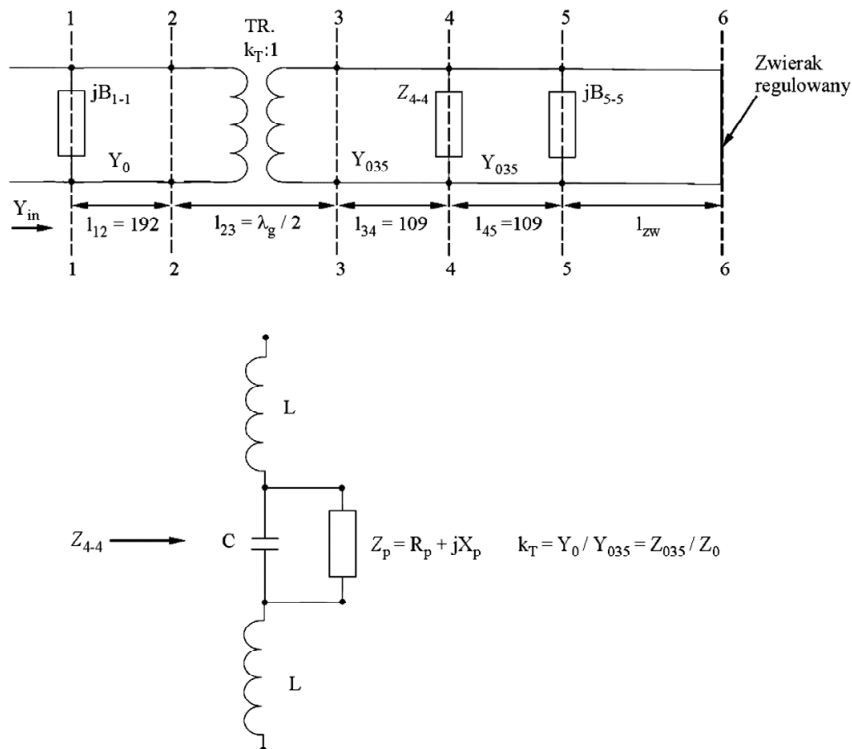
W falowodzie o obniżonej wysokości zamontowana jest wkładka teflonowa, która zapobiega przedostawaniu się gazu roboczego do toru falowodowego. Wkładka dielektryczna powoduje jednak istotne zmiany parametrów elektrycznych odcinka falowodu o obniżonej wysokości i w rezultacie wpływa na właściwości całego mikrofalowego aplikatora plazmowego. W szczególności zmienia się długość fali w falowodzie o obniżonej wysokości oraz admitancja charakterystyczna.

## 2. SCHEMAT ZASTĘPCZY APLIKATORA PLAZMOWEGO

W artykule pojawia się pojęcie admitancji charakterystycznej falowodu. Jest ona rozumiana jako iloraz zastępczego prądu płynącego w ścianach falowodu w kierunku równoległym do toru falowodowego oraz zastępczego napięcia między dwoma umownymi przewodami leżącymi w połowie dłuższych boków falowodu [3].

W omawianym schemacie zastępczym założono, że wkładka dielektryczna całkowicie wypełnia falowód o obniżonej wysokości (brak wydrążenia przedstawionego na rys. 1).

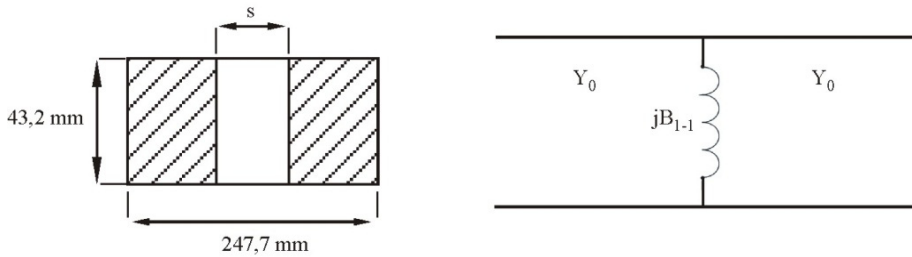
Na rysunku 2 przedstawiono schemat zastępczy omawianego mikrofalowego aplikatora, typu rezonator wnękowy. Płaszczyzna 1-1 jest płaszczyzną wejściową generatora, 2-2 jest płaszczyzną początku klina transformującego impedancję, 3-3 jest płaszczyzną końca tego klina, 4-4 – płaszczyzną osi wyładowania, 5-5 jest płaszczyzną wyjściową aplikatora, a 6-6 jest płaszczyzną zwarcia. Odległość między płaszczyznami 5-5 i 6-6 nazywana jest położeniem regulowanego zwieraka falowodowego ( $l_{zw}$ ).



**Rys. 2.** Schemat zastępczy mikrofalowego aplikatora plazmowego typu rezonator wnękowy. Długości podano w milimetrach

**Fig. 2.** Equivalent circuit of the Cavity-Resonant-Type Microwave Plasma Applicator. Dimensions are given in mm





**Rys. 3.** Przesłona indukcyjna i jej schemat zastępczy

**Fig. 3.** Inductive iris and its equivalent circuit

Zgodnie z oznaczeniami na rysunku 2,  $Y_0$  jest admitancją charakterystyczną odcinków falowodu standardowego,  $Y_{035}$  – admitancją charakterystyczną odcinka falowodu o obniżonej wysokości,  $B_{1-1}$  – susceptancją przesłony indukcyjnej (rys. 3),  $Z_{4-4}$  jest impedancją obszaru, w którym występuje plazma, a  $B_{5-5}$  jest susceptancją wnoszoną do toru falowodowego przez skok wysokości falowodu (koniec bloku odcinka falowodu o obniżonej wysokości).

Schemat zastępczy umożliwi wyznaczenie admitancji wejściowej  $Y_{in}$  opisywanego aplikatora w zależności od elementów toru falowodowego oraz w szczególności od położenia zwieraka falowodowego  $l_{zw}$ . Jeżeli znana jest znormalizowana admitancja wejściowa:

$$y_{in} = \frac{Y_{in}}{Y_0}, \quad (1)$$

to tak zwana charakterystyka strojenia, czyli zależność znormalizowanego poziomu mocy fali odbitej na wejściu generatora od położenia zwieraka falowodowego obliczana jest z zależności:

$$\frac{P_R}{P_I}(l_{zw}) = \left| \frac{y_{in} - 1}{y_{in} + 1} \right|^2, \quad (2)$$

gdzie:

$P_R$  – moc fali odbitej,

$P_I$  – moc fali padającej na wejściu aplikatora plazmowego w płaszczyźnie 1-1.

Aby obliczyć admitancję wejściową  $Y_{in}$ , należy wyznaczyć admitancję w poszczególnych płaszczyznach toru falowodowego widzianych w kierunku zwieraka regulowanego. W płaszczyźnie 5-5 admitancja zwieraka falowodowego wyraża się następującą zależnością [3]:

$$Y_z = -j Y_0 \operatorname{ctg} \left( \frac{2\pi}{\lambda_g} l_{zw} \right). \quad (3)$$

Całkowita admitancja w tej płaszczyźnie ma postać:

$$Y_5 = j \left[ B_{5-5} - Y_0 \operatorname{ctg} \left( \frac{2\pi}{\lambda_g} l_{zw} \right) \right], \quad (4)$$

gdzie  $B_{5-5}$  jest susceptancją wprowadzoną do toru falowodowego przez skok wysokości falowodu.

Impedancja charakterystyczna falowodu o obniżonej wysokości wypełnionego dielektrykiem wynosi [3]:

$$Z_{035} = \frac{\pi}{2} \frac{b_{35}}{a} 367 \left[ \varepsilon_r \mu_r - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{Y_{035}}, \quad (5)$$

gdzie:

- $a$  i  $b_{35}$  – odpowiednio szerokość i wysokość falowodu o obniżonej wysokości,
- $\varepsilon_r$  i  $\mu_r$  – odpowiednio względna przenikalność elektryczna i względna przenikalność magnetyczna ośrodka wypełniającego falowód o obniżonej wysokości,
- $\lambda$  – długość fali w wolnej przestrzeni.

Długość fali w falowodzie wypełnionym dielektrykiem wynosi [3]:

$$\lambda_{gd} = \lambda \left[ \varepsilon_r \mu_r - \left( \frac{\lambda}{2a} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Przy założeniu, że falowód jest bezstratny, admitancja wejściowa w płaszczyźnie 4-4 wynosi (uwzględniając teorię o transformacji linii długich [3]):

$$Y_4 = \frac{Y_5 + jY_{035} \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{34}}{\lambda_{gd}} \right)}{Y_{035} + jY_5 \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{34}}{\lambda_{gd}} \right)} + Z_{4-4}^{-1}. \quad (7)$$

gdzie  $Z_{4-4}$  jest impedancją w osi wyładowania. W skład tej impedancji wchodzi reaktancje indukcyjne odpowiadające obecności elektrod, reaktancja pojemnościowa odpowiadająca szczelinie między elektrodami oraz impedancja plazmy wyładowania mikrofalowego:

$$Z_p = R_p + jX_p, \quad (8)$$

gdzie:

- $R_p$  – rezystancja plazmy,
- $X_p$  – reaktancja plazmy.

Wszystkie wymienione składowe impedancji  $Z_{4-4}$  (rys. 2) nie są znane. Ponadto impedancja plazmy  $Z_p$  jest wielkością nieliniową. Oznacza to, że jej składowe są funkcją mocy fali absorbowanej w wyładowaniu. Reaktancje indukcyjne odpowiadające obecności elektrod w falowodzie są trudne do oszacowania. Pojemność



szczeliny  $C$  między elektrodami również jest trudna do obliczenia dla częstotliwości mikrofalowej. Jej wartość może być wyznaczona metodą pomiaru przy niskiej częstotliwości przeprowadzonego na modelu eksperymentalnym. Wynik takiego pomiaru należy jednakże traktować jako przybliżony. W porównaniach wyników obliczeń charakterystyki strojenia z wynikami otrzymanymi w pomiarach należy przyjąć wartości omawianych elementów impedancji  $Z_{4-4}$  z pewnego przedziału wartości najbardziej prawdopodobnych. Impedancja w osi wyładowania wynosi:

$$Z_{4-4} = \left[ j\omega C + (R_p + jX_p)^{-1} \right]^{-1} + j\omega 2L, \quad (9)$$

gdzie  $L$  jest indukcyjnością w układzie zastępczym. Wyrażenie  $\omega 2L$  we wzorze (9) jest odpowiadającą jej reaktancją wprowadzaną przez elektrody.

Admitancja wejściowa w płaszczyźnie 3-3 wynosi:

$$Y_3 = \frac{Y_4 + jY_{035} \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{34}}{\lambda_{gd}} \right)}{Y_{035} + jY_4 \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{34}}{\lambda_{gd}} \right)}. \quad (10)$$

Admitancja wejściowa w płaszczyźnie 2-2 wynosi:

$$Y_2 = k_T Y_3. \quad (11)$$

Admitancja wejściowa w płaszczyźnie 1-1 wynosi:

$$Y_{in} = \frac{Y_2 + jY_0 \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{12}}{\lambda_g} \right)}{Y_0 + jY_2 \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{12}}{\lambda_g} \right)} + jB_{1-1}, \quad (12)$$

gdzie

$$B_{1-1} = -Y_0 \frac{\lambda_g}{a} \operatorname{ctg}^2 \left( \frac{\pi s}{2a} \right) \quad (13)$$

jest susceptancją przesłony indukcyjnej. Znormalizowana admitancja wejściowa wynosi zgodnie z (1):

$$y_{in} = \frac{Y_{in}}{Y_0} = \frac{\frac{Y_2}{Y_0} + j \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{12}}{\lambda_g} \right)}{Y_0 + jY_2 \operatorname{tg} \left( 2\pi \frac{l_{12}}{\lambda_g} \right)} - \frac{\lambda_g}{a} \operatorname{ctg}^2 \left( \frac{\pi s}{2a} \right). \quad (14)$$

Aby otrzymać ostateczną formułę pozwalającą obliczyć charakterystykę strojenia, należy do wzoru (2) podstawić  $y_{in}$  z wyrażenia (14). Do otrzymanego w ten sposób wzoru należy podstawić  $Y_2$  z wyrażenia (11), itd.

### 3. ZAŁOŻENIA I DANE DO OBLICZEŃ

Wkładka dielektryczna wykonana jest z teflonu, którego przenikalność elektryczna  $\epsilon_r$  wynosi 2,1. Względna przenikalność magnetyczna  $\mu_r = 1$ . Szerokość  $s$  przesłony indukcyjnej wynosi 111 mm ( $B_{1-1} = -62$  mS) Obliczono też charakterystyki strojenia omawianego aplikatora plazmowego bez przesłony indukcyjnej (dla  $B_{1-1} = 0$ ). Impedancja charakterystyczna  $Z_0$  falowodu WR 975 wynosi 395  $\Omega$ .

Przyjęto kilka wartości reaktancji  $2\omega L$  z przedziału od 0 do 100  $\Omega$ . Wartości rezystancji plazmy  $R_p$  przyjęto z przedziału od 50 do 300  $\Omega$ . Wartości reaktancji plazmy  $X_p$  przyjęto z przedziału od  $-25$  do 25  $\Omega$ . Pojemność  $C$  zmieniano w przedziale od 0 do 20 pF. Susceptancję  $B_{5-5}$  zmieniano w przedziale od 0 do 100 mS.

Obliczone charakterystyki porównano z wynikami eksperymentów. Wartości  $R_p$ ,  $X_p$ ,  $2\omega L$ ,  $C$ ,  $B_{5-5}$  dobierano w taki sposób, aby kształt obliczonej charakterystyki strojenia omawianego generatora plazmy pokrywał się z wynikami porównywanego eksperymentu.

### 4. CHARAKTERYSTYKI STROJENIA

Poniżej zaprezentowano przykładowe wykresy charakterystyk strojenia omawianego aplikatora plazmowego, które zostały obliczone za pomocą formuły omówionej w rozdziale 2. Na wykresy naniesiono wyniki z eksperymentów. Omawiane charakterystyki strojenia przedstawiono jako funkcję położenia zwieraka falowodowego znormalizowanego do długości fali w pustym falowodzie WR 975, czyli  $l_{zw} / \lambda_g$ .

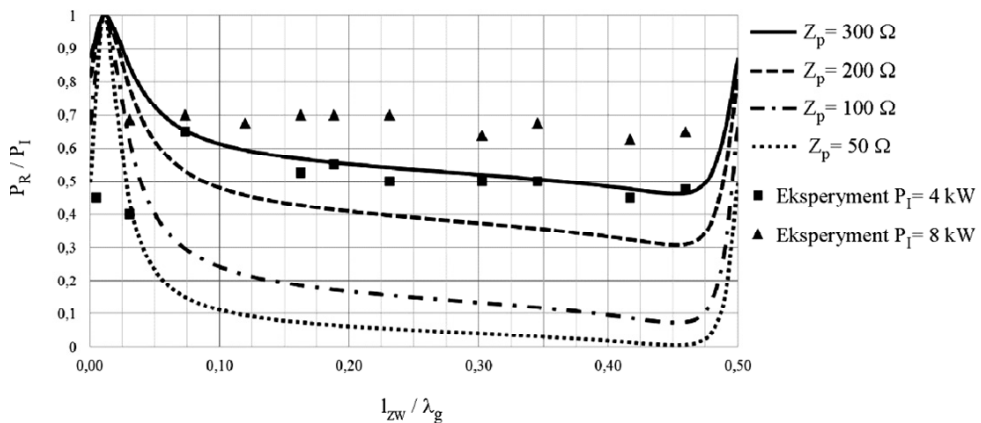
#### 4.1. Charakterystyki strojenia aplikatora plazmowego bez przesłony indukcyjnej

Najpierw obliczono charakterystyki strojenia omawianego aplikatora plazmowego bez przesłony indukcyjnej w płaszczyźnie wejściowej 1-1, które przedstawiono na rysunkach 4–6. Porównywany eksperyment dotyczy przypadku, w którym gazem roboczym jest powietrze, wprowadzane z natężeniem przepływu 200 l na minutę. Odległość między elektrodami  $\delta$  wynosi 4,62 mm. Moc wejściowa mikrofal  $P_I$  wynosi 4 kW oraz 8 kW.

Plazma w eksperymencie zmieniała swoją impedancję  $Z_p$  w zależności od mocy przez nią absorbowanej, która uległa zmianie wraz z położeniem zwieraka falowodowego  $l_{zw}$ . Na wszystkich wykresach naniesiono cztery charakterystyki strojenia dla wybranych  $Z_p$  równych odpowiednio 50, 100, 200 i 300  $\Omega$ .



W pierwszym kroku (rys. 4), przyjęto w obliczeniach, że pojemność  $C$ , reaktancja  $2\omega L$  oraz susceptancja  $B_{5-5}$  są zerowe, czyli nie uwzględniono obecności elektrod oraz skoku wysokości falowodu w płaszczyźnie 5-5 omawianego aplikatora plazmowego. Na rysunku 4 widać, że kształt obliczonych charakterystyk strojenia jest korzystniejszy niż ten wynikający z eksperymentu, ponieważ  $P_R/P_I$  osiąga mniejsze minimum. Widać też jednak, że kształty obliczonej i pomierzonej charakterystyki strojenia cechują się względnie stałym poziomem  $P_R/P_I$  w szerokim zakresie znormalizowanego położenia zwieraka falowodowego  $l_{zw}/\lambda_g$ .



**Rys. 4.** Charakterystyka strojenia omawianego aplikatora plazmowego bez przesłony indukcyjnej ( $B_{1-1} = 0$ ). Przyjęto, że reaktancja  $2\omega L = 0 \Omega$ , pojemność  $C = 0$  pF, susceptancja  $B_{5-5} = 0$  mS,  $\epsilon_r = 2,1$

**Fig. 4.** Tuning characteristics of the Cavity-Resonant-Type Microwave Plasma Applicator without iris ( $B_{1-1} = 0$ ). It is assumed that the reactance  $2\omega L = 0 \Omega$ , the capacitance  $C = 0$  pF, the susceptance  $B_{5-5} = 0$  mS, and the relative permittivity  $\epsilon_r = 2,1$

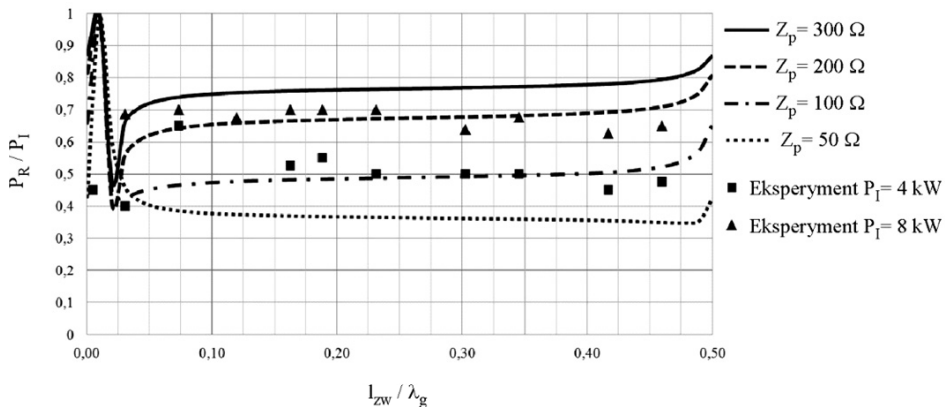
W następnych krokach starano się tak dobierać wartości wyżej wymienionych parametrów, aby kształt obliczonej charakterystyki strojenia zgadzał się z wynikami eksperymentu.

Na rysunku 5 przedstawiono obliczone charakterystyki strojenia omawianego aplikatora plazmowego przy założeniu, że obecność elektrod w falowodzie o obniżonej wysokości wprowadza do schematu zastępczego reaktancję  $2\omega L = 24 \Omega$ , a odległość między tymi elektrodami wprowadza do schematu zastępczego pojemność  $C = 5,4$  pF. Widać, że dla tak dobranych parametrów w schemacie zastępczym obliczone poziomy stałego  $P_R/P_I$  zgadzają się z wynikami eksperymentalnymi.

W kolejnym kroku zmieniano wartość parametru  $B_{5-5}$  tak, aby krzywe obliczonych charakterystyk strojenia jeszcze bardziej przybliżyć do wyników pomiarów.

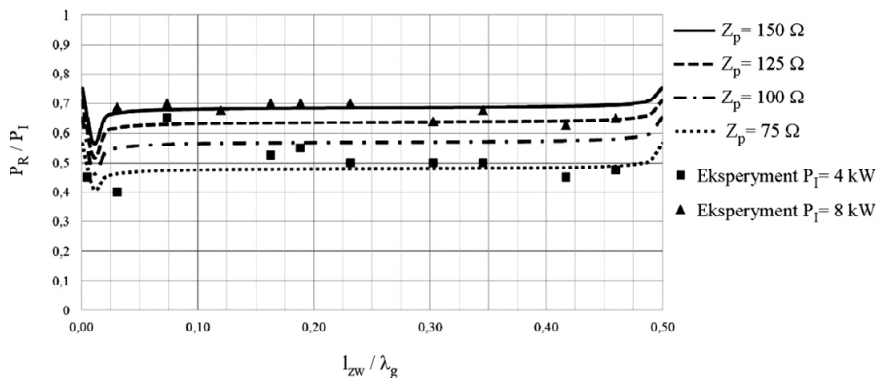
Na rysunku 6 przedstawiono wykres obliczonych charakterystyk strojenia przy założeniu, że susceptancja  $B_{5-5}$  wynosi 35 mS.





**Rys. 5.** Charakterystyka strojenia aplikatora plazmowego bez przesłony indukcyjnej ( $B_{1-1} = 0$ ). Przyjęto, że reaktancja  $2\omega L = 24 \Omega$ , pojemność  $C = 5,4 \text{ pF}$ , susceptancja  $B_{5-5} = 0 \text{ mS}$ ,  $\epsilon_r = 2,1$

**Fig. 5.** Tuning characteristics of the Cavity-Resonant-Type Microwave Plasma Applicator without iris ( $B_{1-1} = 0$ ). It is assumed that the reactance  $2\omega L = 24 \Omega$ , the capacitance  $C = 5,4 \text{ pF}$ , the susceptance  $B_{5-5} = 0 \text{ mS}$ , and the relative permittivity  $\epsilon_r = 2,1$



**Rys. 6.** Charakterystyka strojenia omawianego aplikatora plazmowego bez przesłony indukcyjnej ( $B_{1-1} = 0$ ). Przyjęto, że reaktancja  $2\omega L = 24 \Omega$ , pojemność  $C = 5,4 \text{ pF}$ , susceptancja  $B_{5-5} = 35 \text{ mS}$ ,  $\epsilon_r = 2,1$

**Fig. 6.** Tuning characteristics of the Cavity-Resonant-Type Microwave Plasma Applicator without iris ( $B_{1-1} = 0$ ). It is assumed that the reactance  $2\omega L = 24 \Omega$ , the capacitance  $C = 5,4 \text{ pF}$ , the susceptance  $B_{5-5} = 35 \text{ mS}$ , and the relative permittivity  $\epsilon_r = 2,1$

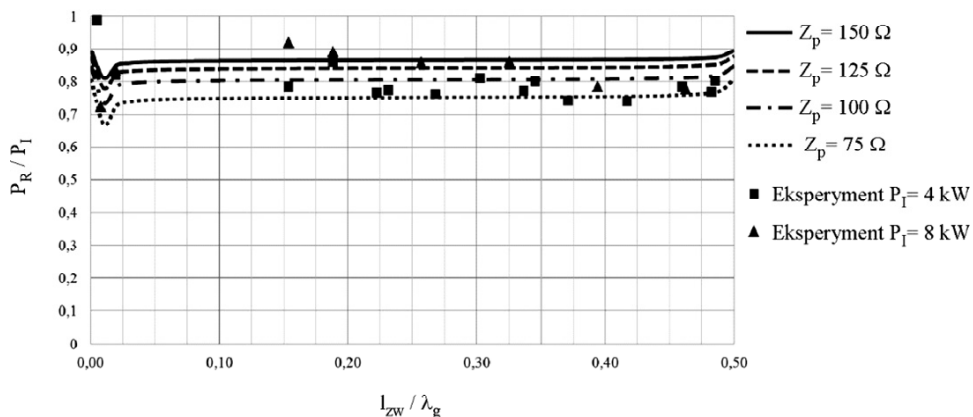
Na rysunku 6 widać, że każda z czterech naniesionych charakterystyk dla różnych impedancji plazmy  $Z_p$  przecina co najmniej jeden punkt pomiarowy. To oznacza, że omawiany tu schemat zastępczy dla założonych wartości  $C$ ,  $2\omega L$ ,  $B_{5-5}$ ,  $\epsilon_r$ , wynikających z geometrii i właściwości elektrycznych aplikatora, nigdy nie może być rozpatrywany jako jedna funkcja  $P_R/P_I(l_{zw}/\lambda_g)$ , lecz zestaw funkcji  $P_R/P_I(Z_p, l_{zw}/\lambda_g)$ , dla różnych impedancji plazmy  $Z_p$ . Wynika to z faktu, że impedancja plazmy jest parametrem nieliniowym i zależy od zaabsorbowanej mocy mikrofalowej.

W pracy nie zaprezentowano wykresów charakterystyk strojenia dla niezerowych reaktancji plazmy  $X_p$ . Wyniki obliczeń pokazały jednak, że w zakresie zmian wartości  $X_p$  od  $-25$  do  $25 \Omega$  kształt charakterystyki strojenia omawianego aplikatora plazmowego nie uległ znacznej zmianie.

#### 4.2. Charakterystyki strojenia mikrofalowego aplikatora plazmowego z przesłoną indukcyjną

Poniżej przedstawiono obliczone charakterystyki strojenia omawianego aplikatora plazmowego, w którym zamontowano przesłonę indukcyjną w płaszczyźnie 1-1. Wyniki obliczeń porównano z wynikami eksperymentu. Poza obecnością przesłony warunki porównywanego eksperymentu były takie same jak przedstawione w podrozdziale 4.1.

Na rysunku 7 widać, że wprowadzenie przesłony indukcyjnej spowodowało pogorszenie kształtu charakterystyki strojenia, ponieważ poziom względnie stałego stosunku  $P_R/P_I$  w szerokim zakresie  $l_{zw}/\lambda_g$  zwiększył się.



**Rys. 7.** Charakterystyka strojenia aplikatora plazmowego z przesłoną indukcyjną ( $B_{1-1} = -64$  mS). Przyjęto, że reaktancja  $2\omega L = 24 \Omega$ , pojemność  $C = 5,4$  pF, susceptancja  $B_{5-5} = 35$  mS,  $\epsilon_r = 2,1$

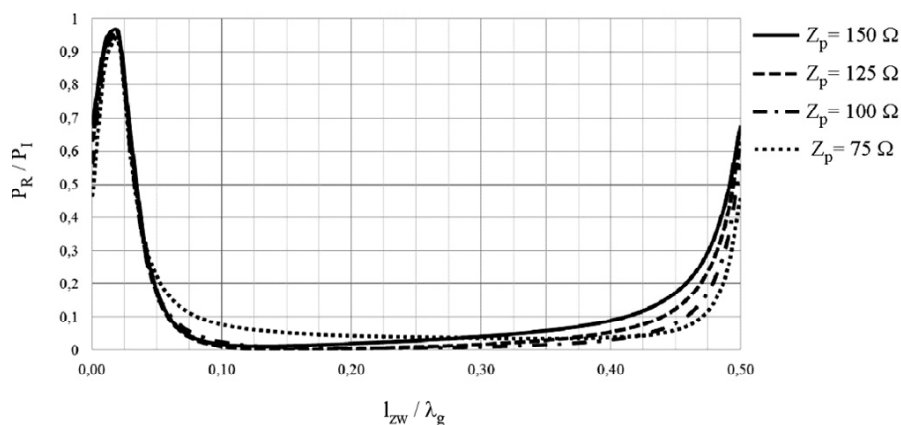
**Fig. 7.** Tuning characteristics of the Cavity-Resonant-Type Microwave Plasma Applicator without iris ( $B_{1-1} = -64$  mS). It is assumed that the reactance  $2\omega L = 24 \Omega$ , the capacitance  $C = 5,4$  pF, the susceptance  $B_{5-5} = 35$  mS, and the relative permittivity  $\epsilon_r = 2,1$

Widać również, że wprowadzanie do schematu zastępczego susceptancji  $B_{1-1}$  równej  $-64$  mS (dla  $s = 111$  mm) powoduje przybliżenie kształtu obliczonej charakterystyki strojenia do tej uzyskanej drogą eksperymentalną. To potwierdza słuszność omawianego w tej pracy schematu zastępczego.

### 4.3. Charakterystyki strojenia mikrofalowego aplikatora plazmowego dla innej wysokości falowodu o obniżonej wysokości

Omawiany mikrofalowy aplikator plazmowy, typu rezonator wnekowy, wymaga optymalizacji jego wymiarów w celu poprawienia kształtu charakterystyki strojenia, tzn. uzyskania możliwie najniższego poziomu  $P_R/P_I$  w możliwie najszerszym zakresie znormalizowanego położenia zwieraka falowodowego  $l_{zw}/\lambda_g$ .

Na rysunku 8 przedstawiono przykładową obliczoną charakterystykę strojenia omawianego aplikatora dla wysokości falowodu o obniżonej wysokości  $b_{35} = 50$  mm.



**Rys. 8.** Charakterystyka strojenia aplikatora plazmowego bez przesłony indukcyjnej ( $B_{1-1} = 0$  mS). Przyjęto, że reaktancja  $2\omega L = 24 \Omega$ , pojemność  $C = 1$  pF, susceptancja  $B_{5-5} = 2,4$  mS,  $\epsilon_r = 2,1$ ,  $b_{35} = 50$  mm

**Fig. 8.** Tuning characteristics of the Cavity-Resonant-Type Microwave Plasma Applicator without iris ( $B_{1-1} = 0$  mS). It is assumed that the reactance  $2\omega L = 24 \Omega$ , the capacitance  $C = 1$  pF, the susceptance  $B_{5-5} = 2,4$  mS, the relative permittivity  $\epsilon_r = 2,1$ , and the height  $b_{35} = 50$  mm

Zmiana wysokości  $b_{35}$  pociąga za sobą konieczność zmiany wartości susceptancji  $B_{5-5}$ , reprezentującej skok wysokości falowodu w płaszczyźnie 5-5. Ponadto zwiększenie wysokości  $b_{35}$  stwarza możliwość zwiększania odstępów między elektrodami, czyli zmniejszenia pojemności  $C$  w schemacie zastępczym (poniżej przyjęto  $C = 1$  pF).

Istnieje możliwość poprawy kształtu charakterystyki strojenia omawianego aplikatora plazmowego poprzez zmianę jego wymiarów. Należy jednak zaznaczyć, że zmiana wysokości  $b_{35}$  nie gwarantuje uzyskania takiej samej charakterystyki strojenia jak na rysunku 8. Dane wprowadzone do schematu zastępczego, takie jak  $C$ ,  $2\omega L$ ,  $B_{5-5}$ , zostały dobrane arbitralnie.

## PODSUMOWANIE

Obliczone na podstawie przedstawionego schematu zastępczego charakterystyki strojenia omawianego aplikatora w przybliżeniu przypominają charakterystykę strojenia aplikatora wykorzystywanego w laboratorium. Przesłone indukcyjną stosowano w podobnym do omawianego w artykule aplikatorze plazmowym pracującym przy częstotliwości 2,45 GHz, gdzie poprawiła ona znacznie kształt charakterystyk strojenia. Wyniki obliczeń potwierdzają, że wprowadzenie przesłony indukcyjnej o szerokości  $s = 111$  mm do omawianego aplikatora pogarsza jego sprawność energetyczną, tzn. powoduje zwiększenie poziomu  $P_R/P_I$  w szerokim zakresie  $l_{zw}/\lambda_g$ .

Opracowany schemat zastępczy omawianego tu aplikatora może pomóc w usprawnieniu aplikatora stosowanego w laboratorium. Schemat ten nie jest jednak wiernym modelem matematycznym tego aplikatora, ponieważ pozostaje problem niedoskonałości opisu jego właściwości elektrycznych za pomocą elementów skupionych.

## LITERATURA

1. Bayliss K.H., *Plasma generator with field-enhancing electrodes*, patent amerykański nr US 5418430, 1995.
2. Gillespie R.F., Hall S.I., Raybone D., Winterbottom F., *Plasma gas processing*, patent amerykański nr US 6126779, 2000.
3. Suski R., Litwin. M., *Technika mikrofalowa*, WNT, Warszawa 1972.
4. Williamson W.S., Vajo J.J., *Fuel reforming apparatus for producing a carbon-monoxide free reformed fuel gas comprising hydrogen*, patent nr US 2004/118046, 2004.

## EQUIVALENT CIRCUIT AND ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF MICROWAVE CAVITY-RESONANT-TYPE PLASMA APPLICATOR

### Summary

*We present equivalent circuit of existing cavity-resonant type microwave plasma applicator. The applicator can be used for conversion of hydrocarbons into hydrogen. It operates at atmospheric pressure and frequency of 915 MHz. There are two electrodes mounted in reduced height waveguide. Between the electrodes the electric field is enhanced. One of essential characteristics of any microwave plasma applicator is power transfer from the feeding line to the plasma. It can be expressed as ratio  $P_R/P_I$ , where  $P_I$  and  $P_R$  are the power of the incident and reflected waves, respectively. Tuning characteristics of the microwave applicator is a dependence of  $P_R/P_I$  on the position of the movable short normalized to the wavelength. The equivalent circuit includes formulas which allow to calculate tuning characteristics of discussed cavity-resonant-type microwave applicator. The calculated tuning characteristics are very similar to those obtained from an experiment.*