

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków, Poland.

www.ifj.edu.pl/reports/2003.html
Kraków, grudzień 2003

Raport Nr 1934/E

OPTYMALIZACJA PARAMETRÓW
KOMORY PRZEJŚCIOWEJ
UKŁADU REZONANSOWEGO
CYKLOTRONU AIC144

J. Sulikowski, K. Guguła, R. Taraszkiewicz

Kraków, grudzień 2003 r.

Wstęp

W latach 1999-2001 dokonano istotnych modernizacji systemu w.cz. cyklotronu AIC – 144 poprzez :

- przekonstruowanie okablowania zasilacza wysokiego napięcia generatora
- wyeliminowanie symetrycznego układu dwóch trymerów przestrajających układ rezonansowy. Zastąpiono go jednym, niesymetrycznym, zgrubnym trymerem oraz trymerem do precyzyjnego strojenia (wymaga dalszych prac związanych z optymalizacją elektrody strojącej i napędu)
- przekonstruowanie zasilacza tranzystorowego stopnia wstępnego wzmacniacza w.cz. 400 W
- zmiana systemów chłodzenia powietrznego i wodnego szafy stopni mocy generatora
- przebudowa kondensatorów sprzęgających w stopniu mocy generatora w.cz.
- zmiana położenia pętli sprzęgającej feeder z układem rezonansowym cyklotronu
- zbudowanie nowego generatora kluczującego moc w.cz. generatora (zsynchronizowany z siecią)
- zmiana sposobu połączenia blach miedzianych przewodzących prądy w.cz. w układzie rezonansowym cyklotronu
- wprowadzenie układu zwór pionowych w komorach strojonych układu rezonansowego [1]

Wyżej wymienione modernizacje pozwoliły na prace związane z wyprowadzeniem wiązek jonów z cyklotronu przy częstotliwościach w.cz. 20÷26,6 MHz. Jednakże charakter prac z wiązką wymaga uzyskania napięcia w.cz. na duńcu o dużej stabilności. Stąd wynika konieczność wprowadzania dalszych usprawnień urządzenia tak, aby otrzymać napięcie duantu o wymaganej stabilności w szerokim zakresie wyprowadzanych wiązek jonów.

Biorąc pod uwagę powyższe, opracowano program dalszej modernizacji systemu w.cz. cyklotronu AIC-144.

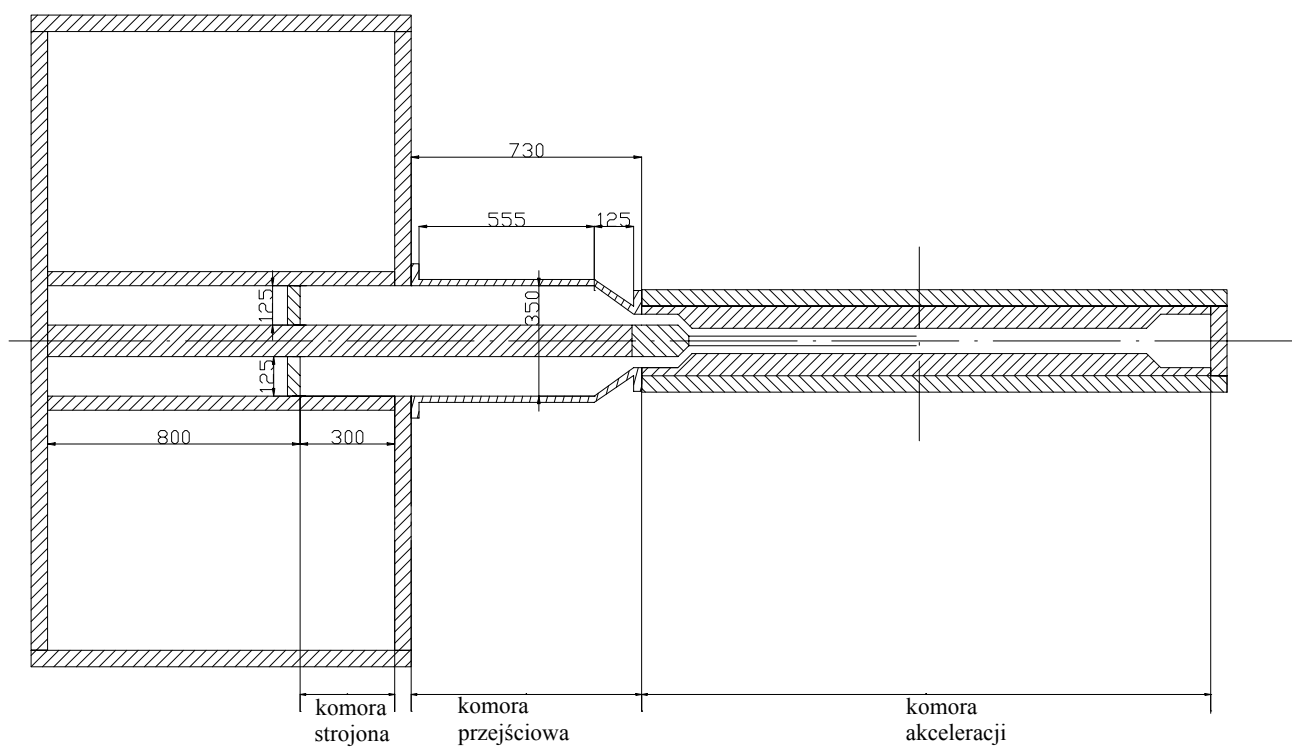
Program jest podzielony na dwie tematycznie związane części:

1. Tor w.cz. generatora mocy:
 - a) syntezer
 - b) stopnie mocy generatora w.cz.
 - c) zasilacz wysokiego napięcia generatora w.cz.
2. Układ rezonansowy cyklotronu.
 - a) modernizacja komory przejściowej
 - b) przygotowanie gniazda w obszarze komory przejściowej celem optymalizacji miejsca wprowadzenia pętli sprzęgającej feeder z układem rezonansowym cyklotronu

W niniejszym opracowaniu zostanie przedstawiony ramowy program modernizacji komory przejściowej układu rezonansowego cyklotronu AIC 144.

Modernizacja komory przejściowej (rys.2) polega na:

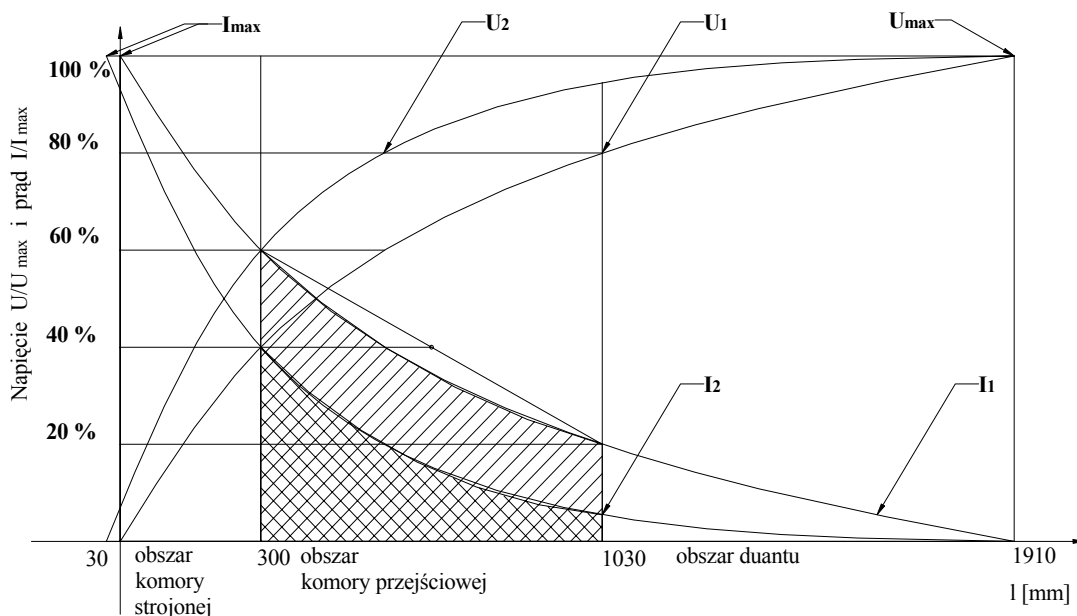
1. Zwiększeniu oporności falowej linii w.cz. w odcinku komory przejściowej poprzez zwiększenie stosunku powierzchni przekroju komory przejściowej do powierzchni przekroju stema, celem zmniejszenia prądu w.cz. w obszarze komory.
2. Powiększeniu do wysokości zwór poziomych powierzchni przekroju okna wyjściowego z komór strojonych w kierunku komory przejściowej celem zlikwidowania skoku impedancji linii w.cz.
3. Wprowadzeniu „płynnej” zmiany wymiarów linii w.cz. celem transformacji impedancji falowej linii.



Rys. 2. Wygląd systemu w.cz. cyklotronu AIC – 144 dla $f = 26,6$ MHz po modyfikacji (proponowany).

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę względnego rozkładu napięcia i prądu w.cz. w stemie układu rezonansowego cyklotronu AIC-144 dla dwóch wariantów:

- 1) komora przejściowa przed modernizacją (rys. 1)
- 2) komora przejściowa po modernizacji (rys. 2)



Rys. 3 Charakterystyka względnego rozkładu napięcia i prądu na stemie układu rezonansowego przed (1) i po (2) modernizacji komory przejściowej.

gdzie: U_1 - napięcie stema i duantu przed modyfikacją
 U_2 - napięcie stema i duantu po modyfikacji
 I_1 - prąd stema i duantu przed modyfikacją
 I_2 - prąd stema i duantu po modyfikacji

Oszacowanie (w uproszczeniu) strat mocy w.cz. w komorach strojonych dla $f = 26,6$ MHz przed modyfikacją wynosi :

$$I_{s1} = \frac{(1 + 0,6) \cdot I_{\max 1}}{2}$$

$$I_{s1} = 0,8 \cdot I_{\max 1}$$

$$P_{s1} = (I_{s1})^2 \cdot R_s$$

$$P_{s1} = (0,8 \cdot I_{\max 1})^2 \cdot R_s$$

$$P_{s1} = 0,64 \cdot I_{\max 1}^2 \cdot R_s$$

gdzie:

P_{s1} – moc strat w.cz. w komorach strojonych przed modernizacją

R_s – zastępcza rezystancja obszaru komór strojonych

I_{s1} – średni prąd w komorach strojonych przed modyfikacją

$I_{\max 1}$ – maksymalny prąd w układzie rezonansowym przed modyfikacją

Oszacowanie (w uproszczeniu) strat mocy w.cz. w komorze przejściowej dla $f = 26,6$ MHz przed modyfikacją wynosi:

$$I_{p1} = \frac{(0,2 + 0,6) \cdot I_{\max 1}}{2}$$

$$I_{p1} = 0,4 \cdot I_{\max 1}$$

$$P_{p1} = (I_{p1})^2 \cdot R_p$$

$$P_{p1} = (0,4 \cdot I_{\max 1})^2 \cdot R_p$$

$$P_{p1} = 0,16 \cdot I_{\max 1}^2 \cdot R_p$$

gdzie:

I_{p1} – średni prąd w komorze przejściowej przed modernizacją

P_{p1} – moc strat w.cz. w komorze przejściowej przed modyfikacją

R_p – zastępcza rezystancja obszaru komory przejściowej

Wyliczenie stosunku mocy strat w komorze przejściowej do mocy strat w komorach strojonych można opisać wzorem:

$$\frac{P_{p1}}{P_{s1}} = \frac{0,16 \cdot I_{\max_1}^2 \cdot R_p}{0,64 \cdot I_{\max_1}^2 \cdot R_s} = \frac{1}{4} \cdot \frac{R_p}{R_s}$$

Zakładając (w uproszczeniu) że: $R_p = R_s$ oraz $P_c = P_{p1} + P_{s1}$

gdzie:

P_c - całkowita moc strat w układzie rezonansowym,
(przy pominięciu strat w obszarze duantu
ze względu na niewielki udział w całkowitej
mocy strat)

otrzymujemy:

$$\frac{P_{p1}}{P_{s1}} = \frac{1}{4}$$

$$P_{p1} = \frac{1}{4} \cdot P_{s1}$$

Jak widać z powyższych rozważań, straty w obszarze komory przejściowej stanowią około 20% strat mocy w układzie rezonansowym cyklotronu (pomijając straty w obszarze duantu i nie uwzględniając skoku impedancji na wyjściu komór strojonych).

Zmniejszenie prądu w obszarze komory przejściowej jest odwrotnie proporcjonalne do wzrostu oporności falowej linii w obszarze komory przejściowej, zaś wzrost oporności falowej jest proporcjonalny do wzrostu odległości stema i komory przejściowej w obszarze największych powierzchni [3].

Odległość ta przed modyfikacją wynosi ok. 35 mm, po modyfikacji winna wynosić ok. 125 mm.

Łatwo zauważyć że:

$$\frac{Z_{p2}}{Z_{p1}} = \frac{125}{35} \approx 3,6$$

$$\frac{I_{p1}}{I_{p2}} \approx 3,6$$

gdzie:

Z_{p1} – impedancja linii w komorze przejściowej przed modyfikacją

Z_{p2} – impedancja linii w komorze przejściowej po modyfikacji

I_p – średni prąd komorze przejściowej przed (p1) i po (p2)
modernizacji

Przyjmując, że zastępcza rezystancja obszaru komór strojonych przed i po modyfikacji będzie taka sama, zmniejszenie mocy strat w komorze pośredniej wyniesie:

$$\frac{P_{p1}}{P_{p2}} = \frac{I_{p1}^2 \cdot R_p}{I_{p2}^2 \cdot R_p} = (3,6)^2 \approx 12,96$$

Stąd można oszacować zmniejszenie strat mocy w komorze pośredniej około 10 razy (t.j. o 90% obecnej mocy). Proponowana modyfikacja pozwoli zmniejszyć straty mocy, w całym układzie w.cz., prawie o całą moc strat w obecnej komorze przejściowej (t.j. o ok.20%).

Dalsze zmniejszenie strat mocy nastąpi po zlikwidowaniu skoków impedancji linii w.cz.:

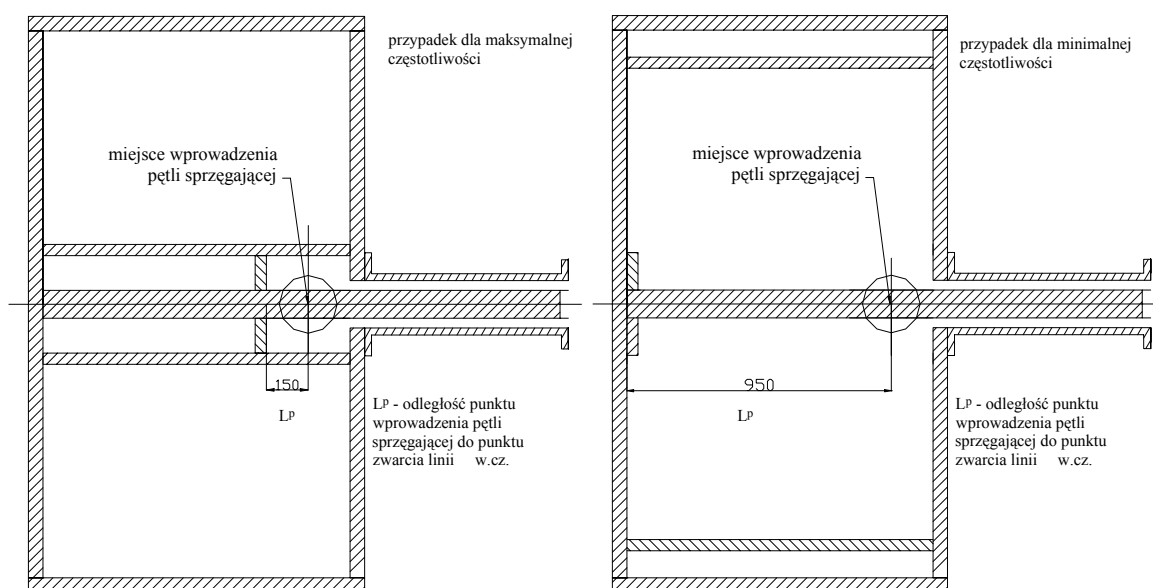
- poprzez powiększenie okna wyjściowego z komór strojonych do punktu położenia zwór poziomych. Pozwoli to na całkowite wyeliminowanie, w tym punkcie, skoku impedancji linii w.cz..
- w wyniku zastosowania „płynnej” zmiany wymiarów linii w.cz. w punkcie styku komory przejściowej i komory akceleracji. Uzyskując w ten sposób transformację impedancji falowej linii można, wyeliminować odbicie energii w.cz. w tym punkcie.

Wymienione powyżej modyfikacje pozwolą na radykalne zmniejszenie odbicia energii w.cz., a co za tym idzie zmniejszenie strat mocy w.cz. o kolejne 10÷20%.

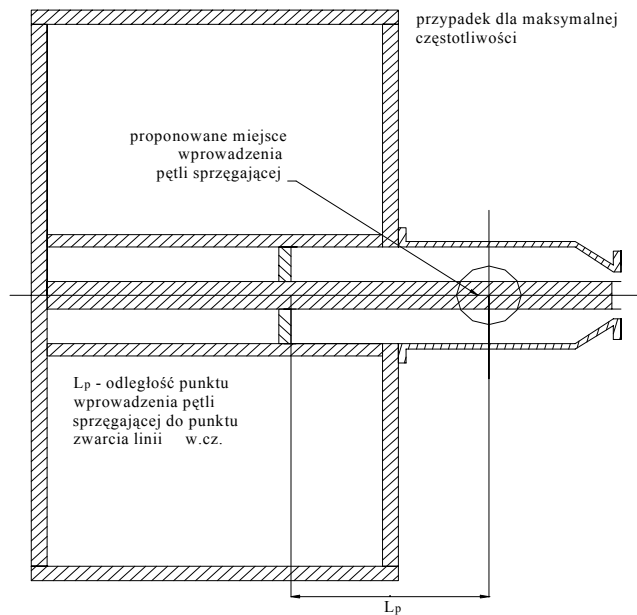
2. Optymalizacja wprowadzenia pętli sprzęgającej

Po skróceniu czynnej długości linii rezonansowej (stema) w górnym zakresie częstotliwości roboczych t.j. powyżej 20 MHz miejsce wprowadzania pętli sprzęgającej ulega pozornemu przesunięciu w kierunku punktu zwarcia linii t.j. w obszar niższych impedancji wejściowych linii.

Powoduje to zmniejszenie impedancji wejściowej układu rezonansowego, „widzianej” przez feeder.



Rys. 4 Wygląd systemu w.cz. dla skrajnych częstotliwości pracy z zaznaczeniem miejsca wprowadzenia pętli sprzęgającej.



Rys. 5 Wygląd systemu w.cz. po proponowanej modyfikacji z zaznaczeniem miejsca proponowanego wprowadzenia pętli sprzęgającej.

Zmniejszenie impedancji wejściowej systemu w.cz. cyklotronu powoduje brak dopasowania impedancji falowej feedera do impedancji wejściowej rezonatora i odbicie mocy w.cz. w kierunku powrotnym do generatora. W rzeczywistości moc odbita wynosi ok. 25÷35% mocy padającej

Poprawa powyższych parametrów spowoduje mniejsze straty energii w.cz. we feederze i stopniu mocy generatora, pozwoli to na kolejne obniżenie mocy w.cz. oddawanej przez generator o 15÷25 %.

Dokładne miejsce wprowadzenia pętli należy określić eksperymentalnie, stąd konieczność przygotowania gniazda (lub dwóch gniazd) w obszarze komory przejściowej dla wprowadzenia pętli sprzęgającej, po uwzględnieniu rozmiarów gardzieli pompy dyfuzyjnej. Zadanie to mogłoby być zrealizowane w trakcie modernizacji komory.

Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższe rozważania, oraz korzyści wynikające z proponowanych rozwiązań, należy spodziewać się sumarycznego zmniejszenia zapotrzebowania na moc w.cz. przez układ rezonansowy cyklotronu AIC-144 o ok. 25÷35 %, tj. osiągnięcie parametrów: $f = 26,6 \text{ MHz}$, $U_d = 50 \text{ kV}$, przy mocy generatora w.cz. rzędu 70÷90 kW.

Obniżenie zapotrzebowania na moc w.cz. do poziomu 70%÷80% mocy maksymalnej generatora w.cz. (wynoszącej 120 kW) oraz przeprowadzenie gruntownej przebudowy zasilacza anodowego wraz z modernizacją lampowych stopni mocy generatora pozwoli w przyszłości wprowadzić układy stabilizacji systemu w.cz. (napięcia duantu, zestrojenia układu rezonansowego).

Wymienione powyżej modernizacje, przeprowadzone kompleksowo, pozwolą na osiągnięcie stanu stabilnej pracy systemu w.cz. cyklotronu AIC-144 oraz realizowanie zadań postawionych na wstępie. W wyniku przeprowadzonych modyfikacji [1] oraz proponowanej obecnie, zostanie zredukowana moc w.cz. konieczna do wzbudzenia układu rezonansowego cyklotronu AIC-144 z 200 kW do 70÷90 kW, a więc blisko 3-krotnie.

Zostanie również zredukowany pobór energii elektrycznej przez generator w.cz. z ok. 300 kW do ok. 150 kW. Dotyczy to maksymalnych częstotliwości pracy t.j. ok. 26 MHz oraz tzw. wypełnienia impulsu w.cz. równego 100% (DF=1). Oznacza to wyraźne zmniejszenie poboru energii elektrycznej, a więc także zmniejszenie kosztów eksploatacji cyklotronu.

W marcu 1999 roku mgr inż. Marek Tałach we współpracy z LJAR w ZIBJ-Dubna wykonał opracowanie wewnętrzne pt. „Ocena możliwości wzbudzenia duantu cyklotronu AIC-144 do napięcia 50 kV przy częstotliwości 27 MHz przy użyciu generatora „Krakowiak” o mocy 120 kW”[4]. W opracowaniu przedstawił on sposób rozwiązania omawianego zagadnienia, jednakże zakres modyfikacji proponowanych dziś przez autorów niniejszego raportu obejmuje ten problem w szerszym aspekcie. Jest częścią rozwiązania systemowego dla układu rezonansowego w.cz. cyklotronu AIC-144 celem umożliwienia pracy w górnym zakresie częstotliwości roboczych t.j. $16 \div 26,6$ MHz.

Należy zaznaczyć, że wytworzenie i doprowadzenie do stanowiska naświetlań pacjentów wiązki protonów, o energii 60 MeV przy częstotliwości 26,6 MHz, jest sprawą kluczową dla prac planowanych w Centrum Terapii Hadronowej przy IFJ w Krakowie.

Literatura

- [1] K. Guguła, J. Sulikowski, R. Taraszkiewicz, *Modernizacja układu rezonansowego cyklotronu AIC – 144*, Raport IFJ Nr **1916/E** z 2002
- [2] J. A. Schwabe, *AIC-144, automatic isochronous cyklotron main parameters, status*, Nukleonika **42**, No. 3, 727 (1997)
- [3] A. H. Piekara, *Elektryczność i magnetyzm*, wyd. PWN-Warszawa, 1970
- [4] M. Tałach, *Ocena możliwości wzbudzenia duantu cyklotronu AIC – 144 do napięcia 50 kV przy częstotliwości 27 MHz przy użyciu generatora „Krakowiak” o mocy 120 kW*, opracowanie wewnętrzne IFJ, marzec 1999