

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
Im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2009/

Kraków, listopad 2009

Raport Nr 2032/AP

PRZYSTOSOWYWANIE CYKLOTRONU AIC-144
DO PROTONOWEJ RADIOTERAPII OKA

CZĘŚĆ 5

Stabilność wiązki protonów w cyklotronie AIC-144:
wybrane parametry, przyczyny i przeciwdziałania niestabilności.

K. Daniel, R. Cieślik, K. Guguła, K. Grzybek, R. Grzybek,
G. Janik, B. Lipka, J. Mołęda, J.T. Norys, W. Pyzioł, M. Ruszel, B. Sałach,
J. Sulikowski, A. Sroka, R. Tarczoń, L. Włodek

Abstract:

The cyclotron AIC – 144 at IFJ PAN in Krakow has been intended to the proton therapy of the eye tumor. The non-standard requirements of the protons beam parameters for therapy, forced screw of the machine to do adaptation and improvement of the cyclotron systems.

The last few years was dedicated to exchange the old systems to the new like: vacuum system, main magnet power supply, RF system, beam line system, beam line powers supplies. That work allowed doing the tests on the proton beam in treatment room. During tests the problems of protons beam stability of current and repeatability of protons beam of parameters has been notice. Two themes have been presented in following article: the stability of the protons beam current in short time period; the repeatability of the protons beam parameters in long time period.

Several factors can affect stability of current of protons beam. The most important are: work of ion source, long time of thermal stabilization of cyclotrons elements, variable of network of power supply.

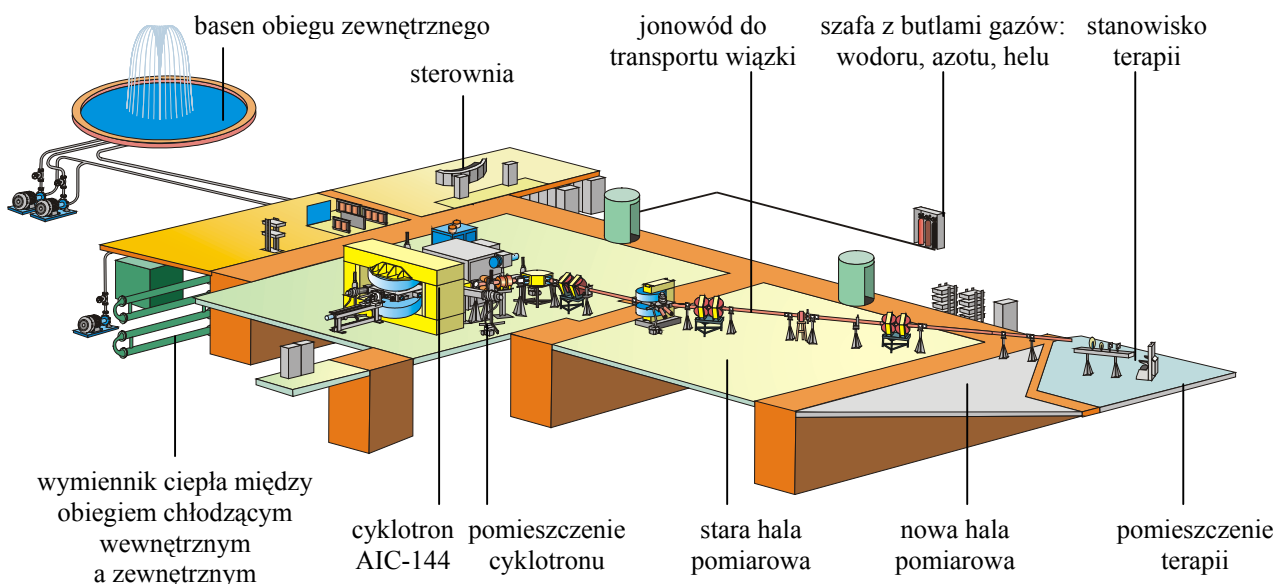
The main reason of repeatability of the protons beam parameters is capability of relocation acceleration chamber with respect to main magnet yoke.

Spis treści:

1. Wstęp	2
2. Stabilność wiązki protonów	4
3. Przyczyny niestabilności wyprowadzonej wiązki protonów	8
3.1. Wpływ stabilności pracy źródła jonów	8
3.2. Wpływ zmienność parametrów sieci zasilającej	8
3.3. Wpływ bezwładności cieplnej	9
4. Powtarzalność parametrów wiązki protonów	11
5. Podsumowanie	13
5.1. Zmiany w organizacji pracy	13
5.2. Zmiany nastaw podzespołów cyklotronu	13
5.3. Modernizacja podzespołów cyklotronu	14
6. Literatura	15

1. Wstęp

W Instytucie Fizyki Jądrowej PAN trwają przygotowania do uruchomienia terapii protonowej oka z wykorzystaniem cyklotronu izochronicznego AIC-144 (rys.1, tab.1) [1], [2], [3]. W roku 2009 cyklotron pracował głównie na potrzeby Pracowni Terapii Protonowej, równocześnie trwały czynności ukierunkowane na polepszenie parametrów akcelerowanej wiązki protonów i zwiększeniu niezawodności pracy cyklotronu.



Rys. 1. Rozmieszczenie najważniejszych podzespołów cyklotronu, transportu wiązki protonów i miejsca terapii w przestrzeni. Pominięto niektóre podzespoły o mniejszych gabarytach.

Zadaniem raportu jest przedstawienie prac Działu Cyklotronowego, zaprezentowanie problemów i postępów w przygotowaniu cyklotronu do terapii, a w szczególności zagadnienia:

- stabilności natężenia wiązki protonów doprowadzanej na stanowisko terapii, rozważane w krótkich okresach czasu (10 min.)
- powtarzalności wybranych parametrów wiązki w dłuższych okresach czasu (dni).

W opracowaniu zaprezentowano ocenę aktualnego stanu, wskazano przyczyny występowania niepożądanych objawów oraz możliwości przeciwdziałania, zrelacjonowano podjęte czynności zaradcze.

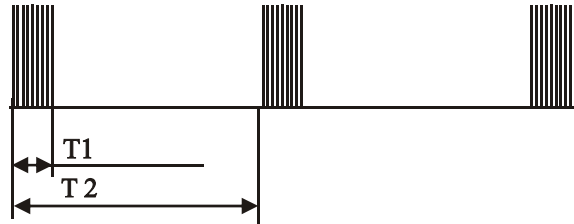
Tabela 1. Wybrane parametry cyklotronu AIC-144 przy pracy na potrzeby terapii

Cząstka przyspieszana	rodzaj cząstki		protony
	energia		60 MeV
	prąd wiązki zewnętrznej		do 100 nA
Magnes główny	średnica nabiegunników		144 cm
	średnie pole magnetyczne		1.8 T
	prąd uzwojenia głównego		577A
	struktura magnetyczna nabiegunników		4 sektory spiralne
	liczba cewek korekcyjnych koncentrycznych		20
	liczba cewek korekcyjnych dolinowych		4
	liczba cewek korekcyjnych harmoniczych		4
System przyspieszania	ilość duantów		1
	częstotliwość generatora wysokiej częstotliwości		27.155 MHz
	robocze napięcie na duancie		60 kV
	rodzaj pracy		impulsowy, do 1.5ms/20ms
System próżni	Pompy próżniowe turbomolekularne		4 sztuki (bez traktu)
Źródło jonów	typ		PIG, poziome
	prąd katody		140 – 200 A
	prąd łuku (katoda – anoda)		do 0.5 A
	napięcie anody		do 200 V
System ekstrakcji	Wymuszenie precesji wiązki na ostatnich orbitach		przy pomocy cewek harmoniczych
	Deflektory elektrostatyczne		3 sztuki, U = 50 kV
	Kanały magnetyczne		3 sztuki, pasywne
Układ chłodzenia	obieg wewnętrzny	czynnik chłodzący	woda demineralizowana
		temperatura wej.	do 35 C
		temperatura wyj.	do 45 C
	obieg zewnętrzny	czynnik chłodzący	woda z sieci wodociągowej
		temperatura wej.	do 32 C
		temperatura wyj.	do 44 C
Moc	zainstalowana		780 kW
	pobierana		Około 500 kW

2. Stabilność wiązki protonów

Stabilność wiązki protonów określano na podstawie pomiarów prądu wiązki w końcowym fragmencie jonowodu, na tarczy z folią rozpraszającą; usytuowanie tarczy jest widoczne na rys. 7. Mierzona wielkość jest częścią natężenia przepływającej wiązki protonów, odkładanej na tarczy, poza z folią rozpraszającą. Prąd ten wynosi od 10 do 20% natężenia całej wiązki.

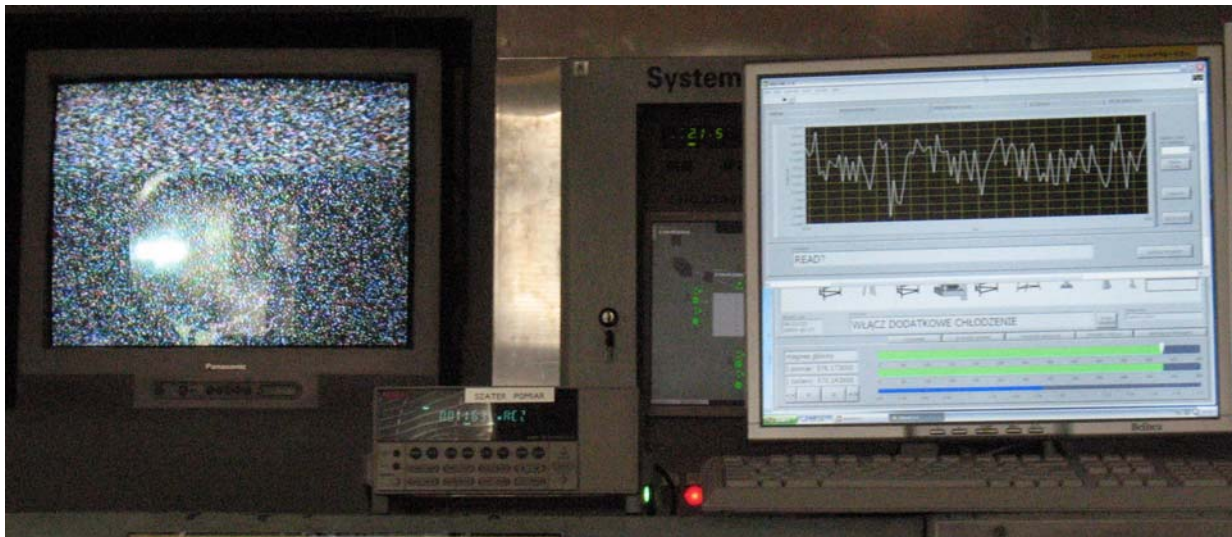
Pomiary wykonano miernikiem 6485 Picoammeter, firmy Keithley, czas pomiaru (okres całkowania przetwornika c/a) nastawiono na 120 ms [5], [20]. Podanie czasu pomiaru jest istotne ze względu na charakter wiązki. Na rys. 2 przedstawiono orientacyjnie przebieg natężenia wiązki protonów w czasie. Czas impulsu T1, podczas którego są akcelerowane protony, wynosi zazwyczaj około 0.6 ms, czas powtarzania impulsu T2 jest równy 20 ms i jest zsynchronizowany z fazą napięcia sieci zasilającej. W czasie T1 protony płyną z częstotliwością f pracy generatora w. cz. wytwarzającego elektryczne pole przyśpieszające, częstotliwość f jest równa 26.155 MHz.



Rys. 2. Orientacyjny przebieg natężenie prądu wiązki protonów w czasie.

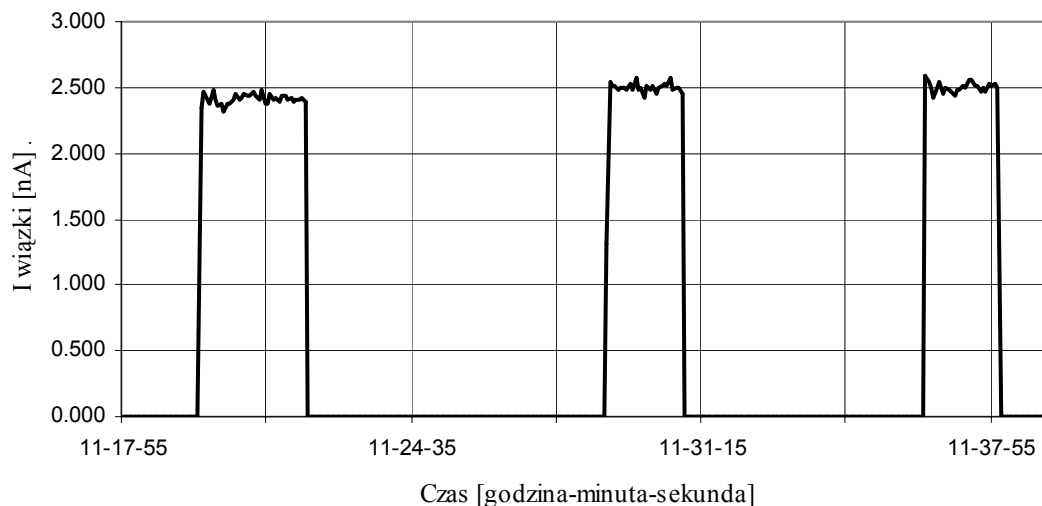
Na szkicu nie zachowano proporcji na osi czasu (T1 względem T2) oraz częstotliwości impulsów w czasie T1.

Praca impulsowa cyklotronu jest spowodowana ograniczonymi możliwościami chłodzenia systemu w. cz. cyklotronu.

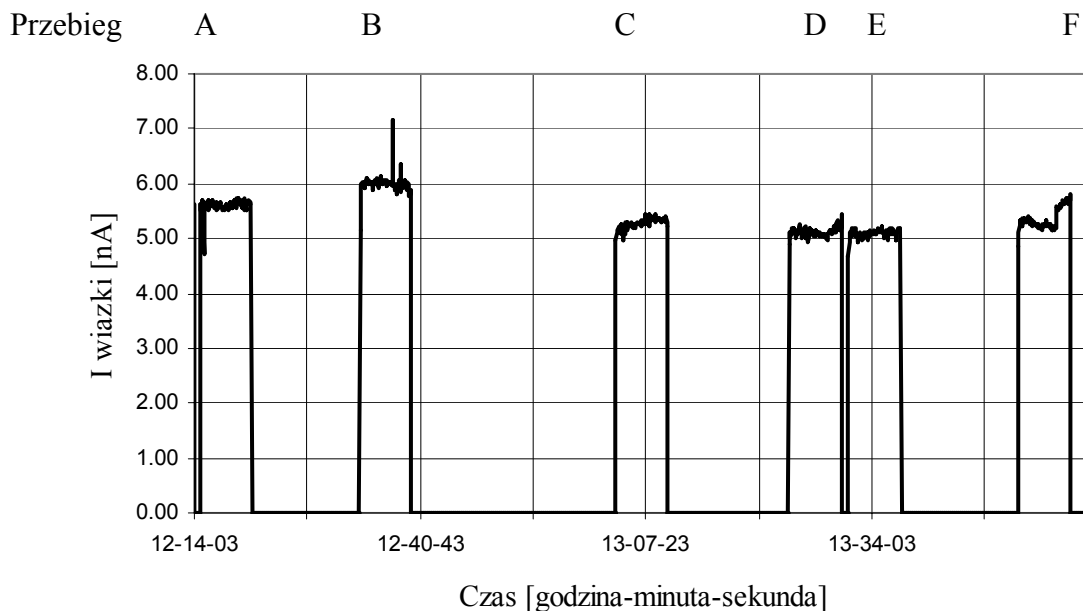


Rys. 3. Pomiar stabilności wiązki protonowej. Na zdjęciu widoczna tarcza C1 z obrazem wiązki, miernik 6485 i program Miernik rejestrujący natężenie wiązki protonów.

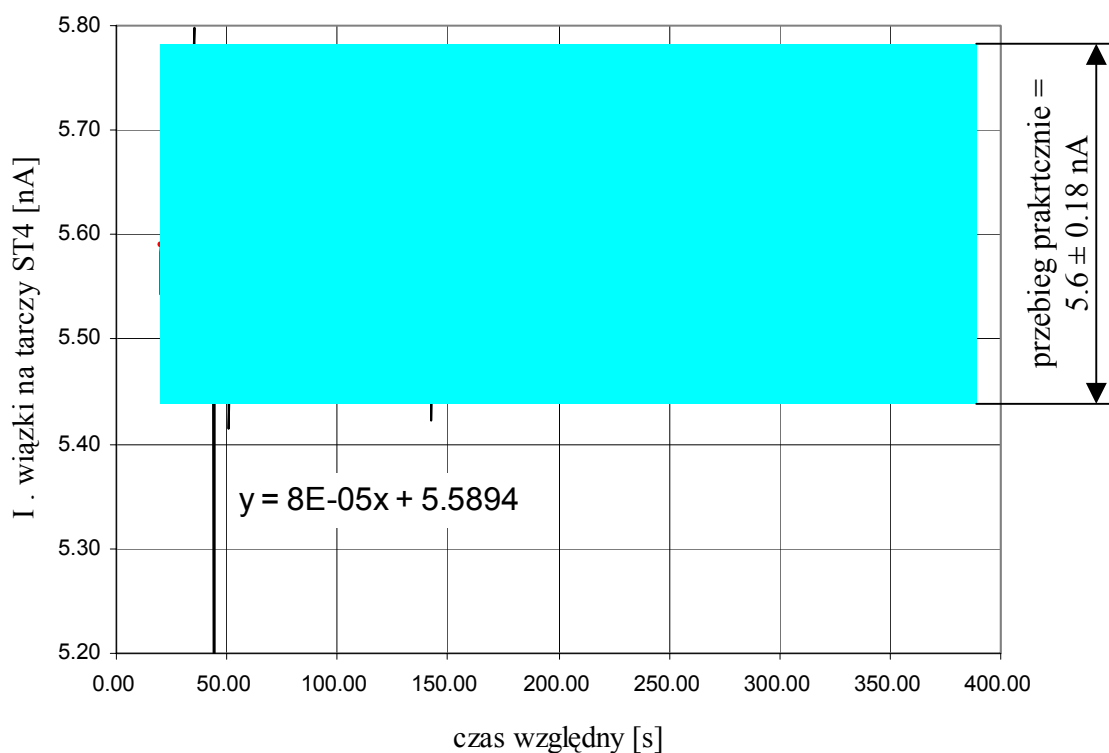
Przykładowe, zmierzone przebiegi prądu wiązki protonów zatrzymywanych na tarczy rozpraszającej pokazano na rysunkach 4 i 5. W tabeli 2 podano podstawowe parametry odnoszące się do stabilności wiązki protonów cyklotronu AIC-144; a w tabeli 3 zebrano podobne dane innych cyklotronów [6], [7].



Rys. 4. Przebiegi prądu wiązki protonów mierzone na folii rozpraszającej (tarczy ST4). Pomiar w dniu 20.10.2009.



Rys. 5. Przebiegi prądu wiązki protonów mierzone na folii rozpraszającej (tarczy ST4). Pomiar w dniu 27.10.2009.



Rys. 6. Fluktuacje natężenia wiązki protonów, wg pomiarów w dniu 27.10.2009, przebieg A wg rys. 5. Linia prostą zaznaczono linię trendu (regresja liniowa) i opisujące je równanie.

Tabela 2. Stabilność wiązki protonów, otrzymanej z cyklotronu AIC-144, dla poszczególnych przebiegów.

data pomiaru		2009-10-27					
przebieg		A	B	C	D	E	F
początek pomiaru	h-m-s	12-14-42	12-33-35	13-03-51	13-24-11	13-31-19	13-51-18
T pomiaru	s	360	356	360	372	367	354
I średnie (I śr)	nA	5.61	6.01	5.28	5.11	5.10	5.35
odchylenie standardowe / I śr	%	1.23	1.79	2.08	1.62	1.44	3.62
wartość min / I śr - 1	%	-16.01	-4.84	-12.72	-14.70	-9.82	-16.61
Wartość max / I śr - 1	%	3.42	19.12	6.88	7.24	3.47	9.92
trend w ciągu 1 minuty	%	0.09	-0.10	0.80	0.23	0.35	1.34
ilość pomiarów	-	716	701	715	737	731	733

Tabela 3. Stabilność wiązek otrzymywanych w wybranych cyklotronach. Podane wartości stabilności wiązki jonów nie są w pełni porównywalne, ze względu na różne warunki pomiaru.

cyklotron	cząstki	stabilność wiązki	czas pomiaru	stabilizacja podzespołów		źródło
TR30 Kanada	p	0.5%	15 m	U w.cz	10^{-4}	[8]
				T wody	$\pm 0.25C$	
TIARA Japonia	Ar, Xe	$\pm 2\%$	40 h	B magnezu gł.	$\pm 5 \cdot 10^{-6}$	[9]
IC100 Rosja	Ar, Xe, Ne, Fe i inne	od $\pm 4\%$ do $\pm 10\%$	długi czas			[10]
	$^{132}\text{Xe}^{23+}$	$\pm 5\%$	1 h			

Elementy w hali cyklotronu:

1. śluza komory cyklotronu
2. magnes korekty poziomej: Mk1
3. tarcza pomiarowa i TV: C1
4. magnes korekty w pionie: Mk2
5. soczewki kwadrupolowe: S1, S2
6. szater z tarczą pomiarową i TV: C2
7. magnes odchylający 70 st.: M1
8. tarcza TV: C3
9. soczewki kwadrupolowe: S3, S4
10. śluza

Elementy w starej hali pomiarowej:

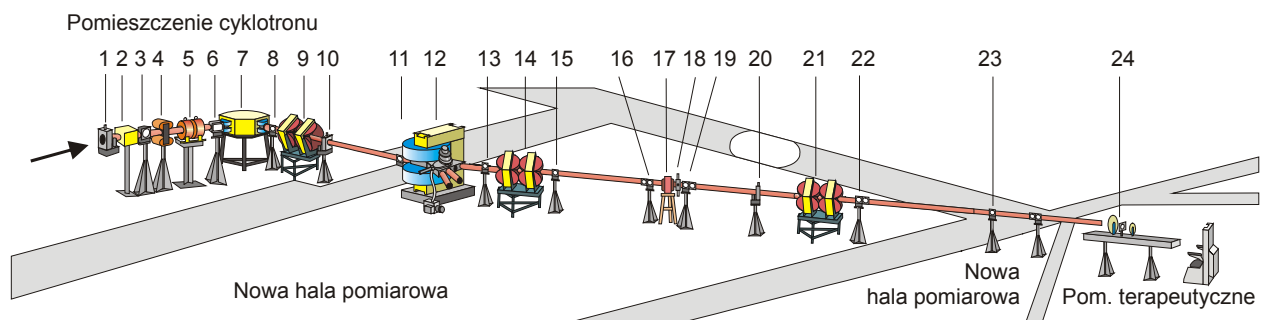
11. tarcza TV: ST1
12. magnes odchylający 12 st.: M2
13. tarcza TV: ST2
14. soczewki kwadrupolowe: S5, S6
15. tarcza TV: ST3
16. tarcza TV: ST3a
17. magnes korekty w pionie: Mk3
18. przesłona z napędem ręcznym
19. śluza z napędem ręcznym
20. szater z napędem ręcznym
21. soczewki kwadrupolowe: S7, S8
22. tarcza z folią rozpraszającą: ST4

Element w nowej hali pomiarowej:

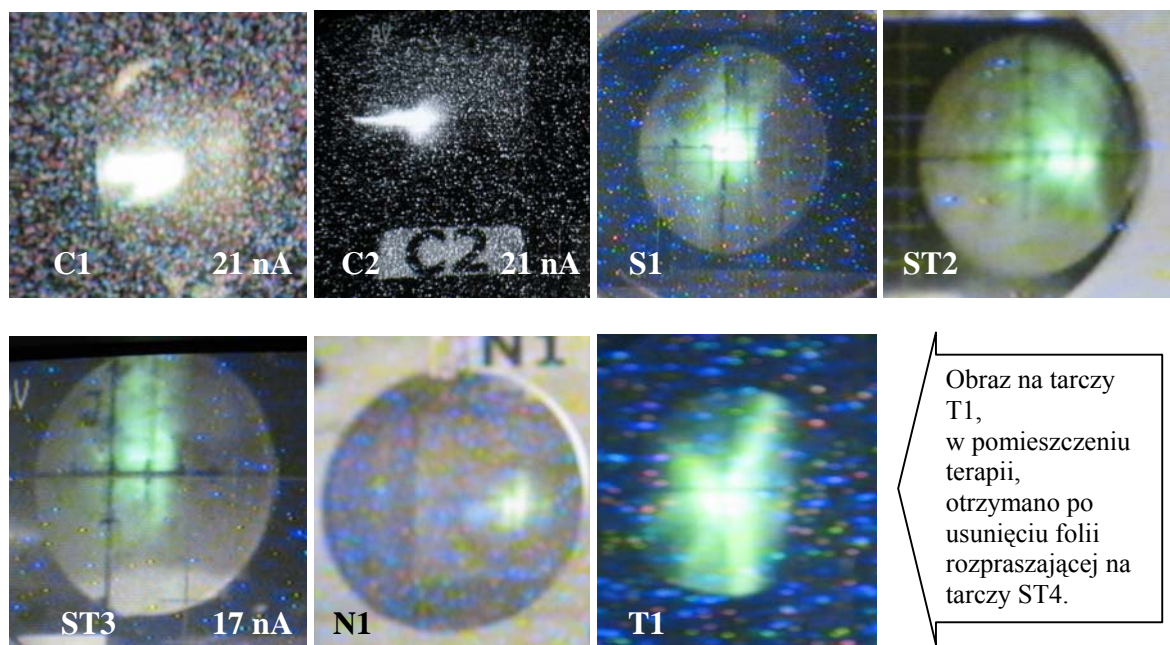
23. tarcza TV: N1

Element w pomieszczeniu terapeutycznym:

24. tarcza TV: T1



Rys. 7. Układ transportu wiązki protonów od cyklotronu AIC-14 na stanowisko terapii. Strzałką z lewej strony zaznaczono miejsce, w którym przyłączony jest cyklotron.



Rys. 8. Obserwacja obrazu wiązki protonów na tarczach luminescencyjnych. Próba wykonana 27.10.2009 roku.

Wszystkie przedstawione w tabeli przebiegi były uznane przez użytkownika wiązki protonów, jako spełniające wymagania terapii protonowej. Stabilność prądu wiązki nie jest jedynym parametrem opisującym wiązkę protonów, istotna jest monoenergetyczność oraz jej rozkład w przestrzeni i w czasie. Konstrukcja cyklotronu oraz filtrujące działanie magnesu odchylającego M2 (rys. 7) gwarantują dostarczanie monoenergetycznej wiązki protonów. Na rys. 8 przedstawiono obrazy wiązki protonów na tarczach luminescencyjnych umieszczonych w kostkach pomiarowych w osi jonowodu transportującego wiązkę na stanowisko terapii (rys. 7) [11].

3. Przyczyny niestabilności wyprowadzonej wiązki protonów

Analiza pracy cyklotronu wskazała, że na stabilność prądu wiązki protonów wpływa głównie:

- praca źródła jonów,
- zmienność parametrów sieci zasilającej,
- duża bezwładność cieplna podstawowych podzespołów cyklotronu,
- temperatura czynnika chłodzącego.

3.1. Wpływ niestabilnej pracy źródła jonów

Koniecznym warunkiem otrzymania wiązki o stabilnym natężeniu jest poprawna praca źródła jonów, wszelkie nieprawidłowości w działaniu źródła skutkują zmniejszeniem wydajności produkcji protonów i w dalszej kolejności spadkiem natężenia wiązki protonów [12], [13].

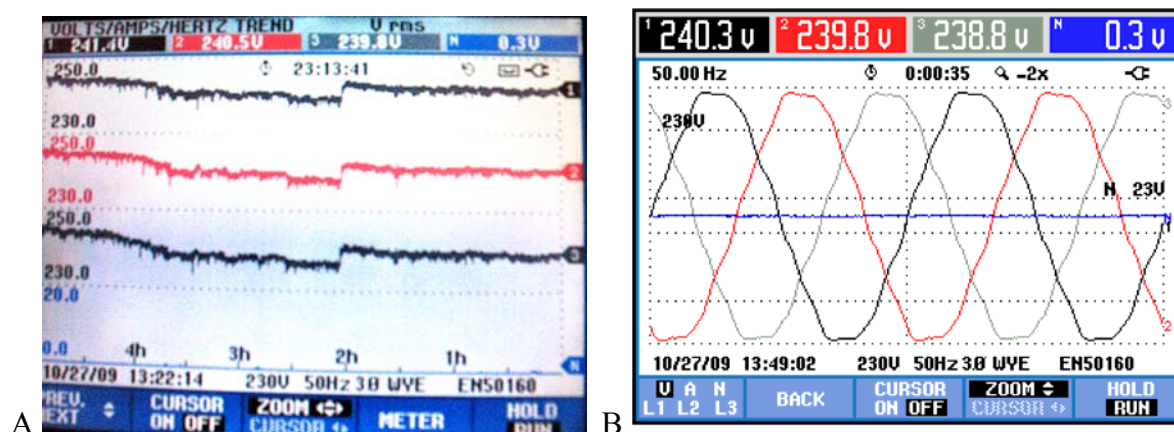
Źródło jest wrażliwe na skład doprowadzanego gazu, wymagany jest wodór o czystości 99.5 %. Szczególnie szkodliwe są zanieczyszczenia parą wodną i tlenem: praca źródła jonów ulga zakłóceniu, następuje też przyspieszone zużycie elementów znajdujących się wewnątrz pod działaniem wysokiej temperatury. Instalacja doprowadzająca gaz musi spełniać wysokie wymagania dotyczących szczelności, tym bardziej, że zapotrzebowanie źródła na gaz wynosi tylko 2 cm³/min wodoru (wg pomiaru pod ciśnieniem atmosferycznym) pod ciśnieniem około 1Pa. Ponadprzeciętnie ostre wymagania dotyczą ostatniego odcinka instalacji pracującego pod próżnią. W roku 2009 wykonano pracę podwyższającą szczelność całej instalacji doprowadzającej gaz do źródła.

3.2. Wpływ zmienność parametrów sieci zasilającej

Zauważono wpływ parametrów energetycznej sieci zasilającej podzespoły cyklotronu na stabilność wiązki protonów. W cyklotronie AIC-144 najbardziej wrażliwy na warunki zasilania jest generator wysokiej częstotliwości. Zasilacz posiada niewielką rezerwę mocy. Maksymalna moc, którą dysponuje zasilacz, zależy od parametrów sieci zasilającej, a konkretnie od wartości szczytowej napięcia zasilającego. Na rys. 9 przedstawiono przykładowe przebiegi napięcia w sieci zasilającej, z widocznymi zniekształceniami

przebiegu napięcia, o obniżonej wartości szczytowej. Generator podłączony do takiego źródła zasilania dysponuje mniejszą mocą i wytwarza mniejsze napięcie przyspieszające na duancie, a w dalszej kolejności ulega zmniejszeniu prąd akcelerowanej i wyprowadzonej wiązki protonów.

Przeciwdziałanie wpływom zmian parametrów zasilania na pracę generatora w. cz. polega na utrzymywaniu obciążenia generatora w rezonansie. Wymaga to wzmożonej uwagi obsługi cyklotronu i szybkiej reakcji na rozstrajanie układu rezonansowego.



Rys. 9. Rejestrator napięcia zasilania: A – zmiana wartości skutecznego napięcia w czasie, B - kształt przebiegu napięcia. Rejestrację wykonano 27.10.2007 roku.

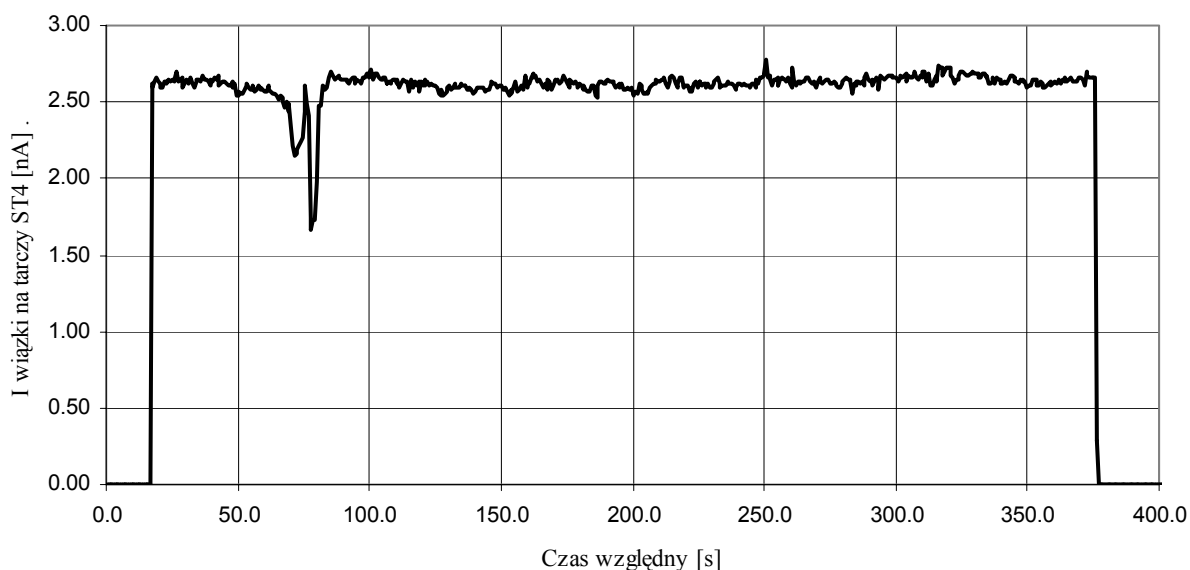
3.3. Wpływ bezwładności cieplnej

Cyklotron AIC-144 najczęściej pracuje na dwie zmiany: od około godziny 9.00 rano do 16.00 – 20.00 po południu, zgodnie z zapotrzebowaniem na wiązkę. Zauważono, że wiązka protonów stabilizuje się po paru godzinach pracy cyklotronu, po tym czasie zbędne jest dostrajanie rezonatora, korekta parametrów źródła jonów i prądu magnesu głównego. Stabilizacja trwa w chłodne dni od 4 do 8 godzin, w upalne dni może być nie osiągalna, ze względu na ciągły przyrost temperatury wody chłodzącej, aż do przekroczenia maksymalnej dopuszczalnej wartości.

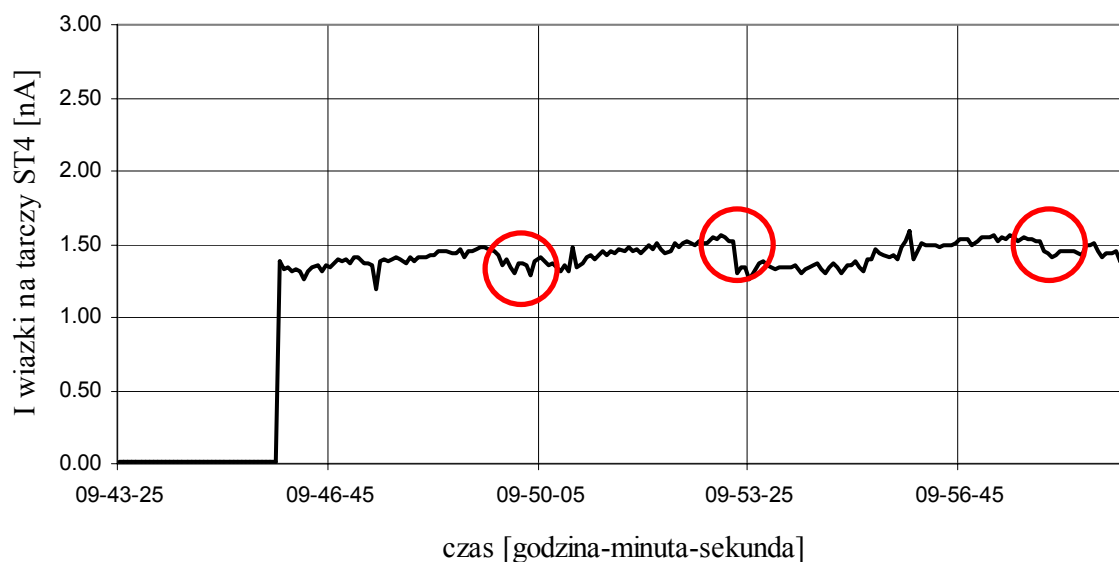
Podczas wzrostu temperatury jarzma magnesu głównego cyklotronu ulega zwiększeniu szczelina powietrzna, w której umieszczona jest komora akceleracji, oraz maleje przenikalność magnetyczna żelaza. Oba zjawiska powodują obniżenie indukcji magnetycznej w komorze i niezbędna staje się korekta prądu w uzwojeniu głównym [9].

Wzrost temperatury poszczególnych podzespołów cyklotronu powoduje też zmianę geometrii elementów układu rezonansowego (rezonator, komora akceleracji, duant) i rozstrojenie układu [14], [15]. Wymagane jest wtedy przeprowadzanie korekty prowadzących do utrzymania pracy generatora wysokiej częstotliwości w rezonansie (rys. 10).

Obserwuje się także wzrost wydajności źródła jonów przez pierwsze 2 – 3 godziny pracy (rys. 11). Przyczyną tego zjawiska jest powolny wzrost przepływu wodoru i wysycanie się gazem elementów źródła jonów.



Rys. 10. Przebieg pokazujący skutek braku optymalnego zestrojenia rezonatora, spowodowany wzrostem temperatury. Obsługa zareagowała z opóźnieniem i stąd chwilowe zmniejszenie wiązki protonów. Dla porównania z przebiegami podanymi w tabeli 2, wyliczono względną wartość odchylenia standardowego, wynosiła ona 17.1 %. Przebieg zarejestrowano 20.10.2009 o godzinie 12.38.44.



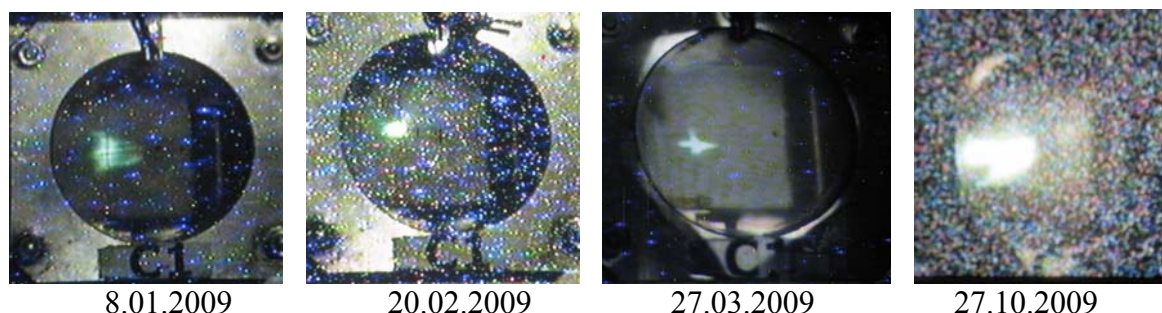
Rys. 11. Wpływ temperatury na wzrost prądu wiązki w początkowym okresie pracy cyklotronu. Widać szybki samoczynny wzrost natężenia wiązki protonów. W czasie wskazanym przez okręgi, obsługa ręcznie zmienia parametry pracy źródła jonów, starając się ustabilizować natężenie wiązki na poziomie około 1.5 nA. Pomiar z dnia 20.10.2009.

Przeciwdziałanie skutkom zmian temperatury cyklotronu jest trudne i kosztowne. Pełną stabilizację mogłaby dać tylko ciągła praca urządzenia. Rozwiązanie takie jest jednak związane z szybszym zużyciem podzespołów i koniecznością ponoszenia znacznych kosztów energii i obsługi, zwiększoną radiacją cyklotronu, utrudnieniami w wykonywaniu konserwacji i napraw. Lepszą alternatywą jest zainstalowanie wydajniejszej instalacji chłodzącej. Można oczekiwać, w tym drugim przypadku, skrócenia czasu dochodzenia do równowagi termicznej oraz możliwości dłuższej pracy cyklotronu w dni z wysoką temperaturą.

4. Powtarzalność parametrów wiązki protonów

Stabilność omawiana wyżej dotyczyła zmian prądu wiązki protonów podczas jednego przebiegu naświetlania (trwającego około 10 min.). Sytuacja niewiele zmienia się w dłuższym okresie czasu, zawartym jednak w jednym dniu pracy, w okresie między załączeniem a wyłączeniem cyklotronu. W tym okresie z reguły wystarczające jest okresowe podregulowanie układu rezonansowego w. cz., wydajności źródła jonów i ewentualnie prądu w uzwojeniu głównym magnesu cyklotronu. Wymienione regulacje mają za zadanie skompensować skutki podnoszenia się temperatury cyklotronu.

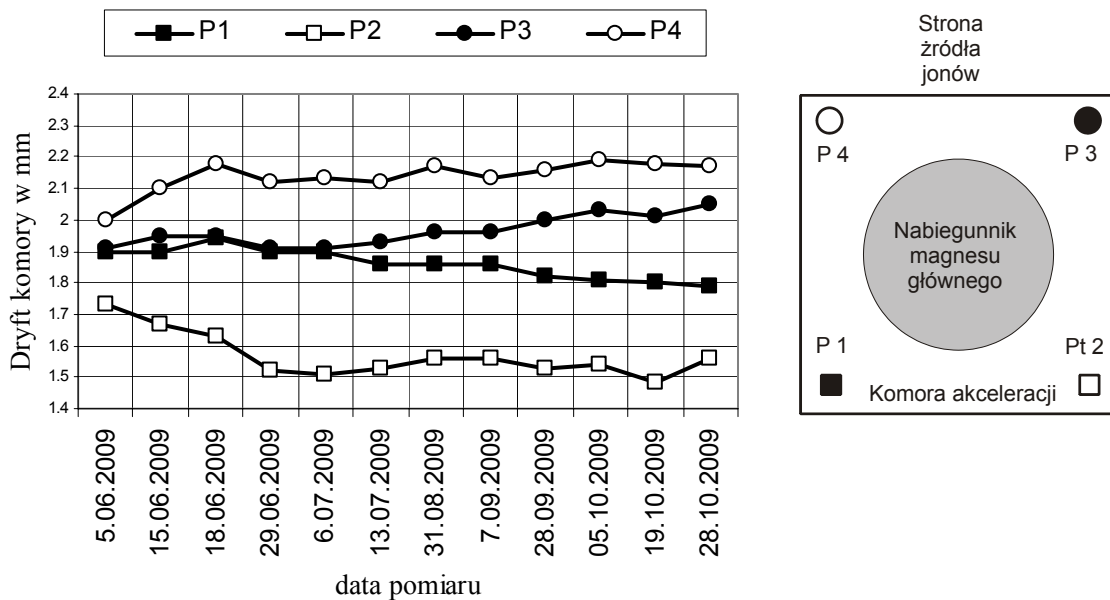
Inaczej przedstawia się stabilność wiązki protonów rozpatrywana w dłuższym, kilkudniowym okresie czasu. W dłuższym okresie, mimo identycznych nastaw we wszystkich podzespołach cyklotronu, możemy otrzymać wiązkę protonów o innych parametrach. Z reguły należy oczekiwać zmniejszonej wartości natężenia wiązki, lub nawet zaniku wiązki. W takich przypadkach konieczne jest wykonanie głębszej korekty, może być niezbędna zmiana usytuowania źródła jonów wewnątrz komory akceleracji, zmiana położenia pullera (soczewka ogniskująca protony bezpośrednio po opuszczeniu przez nie źródła), korekta elementów ekstrakcji wiązki protonów (położenie deflektorów elektrostatycznych i kanałów magnetycznych). Tak głęboka regulacja może doprowadzić do otrzymania wiązki o nieco zmienionych parametrach, dotyczących także energii protonów i kształtu struktury przestrzennej (rys. 12). Po każdej głębszej regulacji niezbędna może być też korekta nastaw elementów transportu wiązki protonów.



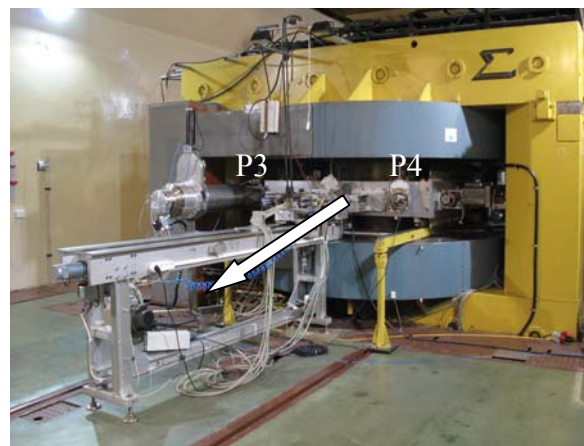
Rys. 12. Obraz wiązki protonów obserwowanych na pierwszej tarczy luminescencyjnej C1, w różnych dniach. Istotny jest kształt wiązki, nie wielkość obrazu.

Główną przyczyną braku pełnej powtarzalności parametrów przyspieszanej wiązki protonów są mikroprzesunięcia komory akceleracji [11]. Komora, wewnątrz której panuje próżnia, jest podczas pracy poddawana bardzo dużym siłom ściskającym, od otaczającego ciśnienia atmosferycznego, a z powodu zamontowania nabiegunków żelaznych do pokryw komory, także siłom rozciągającym od pola magnetycznego. Zmiany wartości jednej lub obu tych sił mogą zakłócić równowagę statyczną i spowodować mikroprzesunięcie lub deformację

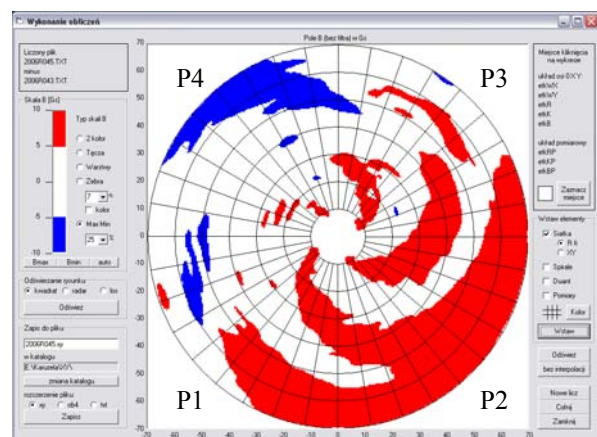
komory. Ponieważ nie da się uniknąć okresowych wyłączeń prądu w uzwojeniu głównym wytwarzającym pole magnetyczne oraz wyłączeń próżni, obsługa śledzi dryft komory (rys. 13). Zaobserwowano powolne przesuwanie się komory w kierunku osi źródła jonów (rys. 14) do około $\frac{1}{4}$ mm. Tak duże przesunięcie ma istotny wpływ na kształt pola magnetycznego (rys. 15), i wymaga korekty układu deflekcji (wyprowadzenia wiązki).



Rys. 13. Dryft komory akceleracji. Na wykresie przedstawiono wskazania czujników mierzących odległość między punktami P1, P2, P3, P4 od nabiegunnika magnesu głównego. Pomiaru wykonano bez próżni i przy wyłączonym polu magnetycznym. W przedstawionym okresie nie korygowano położenia komory.



Rys. 14. Dryft komory akceleracji względem nieruchomego magnesu głównego. Strzałką pokazano przybliżony kierunek mikroprzesunięć komory w czasie od 5.10.2006 roku. Znaki P1, P2 są zgodne z oznaczeniami na rys. 13.



Rys.15. Wpływ przesunięcia komory na pole magnetyczne na podstawie archiwalnych pomiarów 2006R045 i 2006R043. Na wykresie pokazano wzrost indukcji pola magnetycznego wewnątrz komory, po przesunięciu komory o $\frac{1}{4}$ mm w kierunku znaku P4. Zaznaczono miejsca, w których różnica indukcji przekraczała 5 Gs (0.5 mT).

5. Podsumowanie

W raporcie przedstawiono ocenę pracy cyklotronu AIC-144 pod względem jakości wiązki przyśpieszonych protonów. Rozpatrywano głównie stabilność natężenia wiązki w krótkim okresie czasu. Kryterium to wydaje się odpowiednie dla podstawowego zastosowania cyklotronu: do terapii protonowej oka. Należy przypomnieć, iż wiązka wyprodukowana przez cyklotron podlega następnie znaczącej obróbce, i w rezultacie zmienia się jej struktura przestrzenna, traci swą monoenergetyczność, do jej opisu służą inne parametry [4], [16]. Niemniej stabilna wiązka produkowana przez cyklotron jest głównym warunkiem umożliwiającym jej dalszą obróbkę. Stabilność wiązki protonów jest też parametrem, który jest najtrudniejszy do osiągnięcia, wiele przedstawionych czynników zewnętrznych wpływa na jej obniżenie. Drugą cechą wiązki zaznaczoną w raporcie jest powtarzalność jej parametrów w dłuższym, wielodniowym okresie czasu.

Polepszenia wskazanych wyżej parametrów wiązki jest możliwe przez podjęcie przeciwdziałania dotyczącego:

- wypracowania właściwej organizacji pracy
- zmiany nastaw poszczególnych podzespołów cyklotronu
- modernizacji wrażliwych podzespołów.

5.1. Zmiany w organizacji pracy

W celu zminimalizowania mikroprzesunięć komory podjęto środki zaradcze: obsługa cyklotronu ogranicza ilość wyłączeń pola magnetycznego tylko do prac remontowych i niektórych konserwacyjnych (np. przegląd źródła jonów).

Wyłączanie cyklotronu w przypadku, gdy przewidziana jest praca w następnym dniu, nie obejmuje wyłączenia prądu w uzwojeniu głównym magnesu: prąd zostaje tylko zmniejszony z wartości 577A do 80A. Takie zmniejszenie obniża pobór mocy z 203 kW do 3.9 kW, przy spadku indukcji wewnątrz komory akceleracji z około 1.8 T do 0.8 T. Pozostawione pole magnetyczne, choć zmniejszone, nie dopuszcza do deformacji i przesuwu komory. W tych przypadkach wewnątrz cyklotronu, w tym komora, jest pod działaniem próżni.

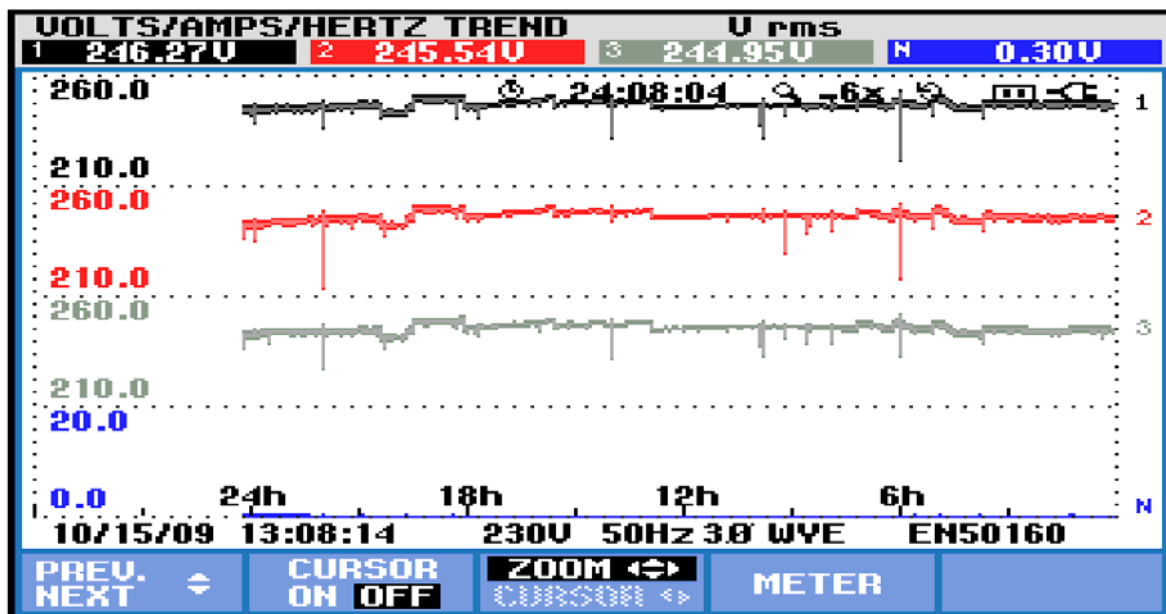
Istotnym ułatwieniem przy obsłudze cyklotronu jest program rejestrujący przebieg natężenia wiązki protonów (rys. 2). Widok rejestratora umożliwia szybszą reakcję na zauważone odstępstwa od oczekiwanego kształtu przebiegu natężenia. Aplikacja została napisana w graficznym środowisku programistycznym LabView, wersja 8.0, pod kontrolą systemu operacyjnego Windows XP [17], [18].

5.2. Zmiany nastaw podzespołów cyklotronu

W celu zwiększenia odporności procesu akceleracji od zmian temperatury obwodu magnetycznego w 2009 roku zmieniono kształt pola magnetycznego na pole bardziej zbliżone do idealnego pola izochronicznego. Nowe pole umożliwia przyśpieszenie i wyprowadzenie wiązki protonów, z nieco gorszym współczynnikiem wyprowadzenia, natomiast posiada znacznie większą tolerancję na poziom indukcji B. Obecnie tolerancja prądu w uzwojeniu głównym wynosi około 0.5A (co daje różnicę 0.37 mT w centrum komory akceleracji) wobec poprzedniej tolerancji 0.2 A (0.15 mT). Nowe pole zostało wyliczone i przetestowane przez Igora Kiyana ze Zjednoczonego Instytutu Nuklearnego w Dubna w Rosji [19].

W tym roku zmieniono także parametry pracy regulatora źródła jonów (typu PIG) w kierunku podwyższenia sztywności prądu płynącego między katodą i anodą źródła i pośrednio zmniejszenia wahań natężenia produkowanych protonów. Parametry regulatora dobrano eksperymentalnie.

Niebezpieczne dla pracy cyklotronu jest występowanie nieprzewidywalnych, krótkotrwałych, skokowych spadków napięcia w sieci zasilającej (rys. 16). Poziom spadków napięcia i czas ich trwania spowodowały parokrotnie wyłączenie zasilacza magnesów uzwojenia głównego. Aby ograniczyć ryzyko niekontrolowanego wyłączenia zasilacza, zwiększono tolerancję zasilacza na krótkotrwałe zaniki napięcia i zaniki przepływu wody chłodzącej w uzwojeniu głównym i w samym zasilaczu.



Rys. 16. Rejestracja napięć w sieci zasilającej w dniu 15.10.2009. Widoczne niekorzystne dla cyklotronu, skokowe obniżanie się napięć.

5.3. Modernizacyjne podzespołów cyklotronu

W omawianym 2009 roku nie wykonano modernizacji inwestycyjnych podzespołów cyklotronu. Sprecyzowano tylko przedsięwzięcia niezbędne dla zwiększenia stabilności i powtarzalności parametrów wiązki protonów:

- zbudowanie układów stabilizujących temperaturę magnesu głównego cyklotronu, układu rezonansowego (w tym układ wyjściowy generatora, rezonator, nabiegunniki w komorze akceleracji) i źródła jonów
- wykonanie instalacji wody lodowej systemu chłodzenia, umożliwiającej stabilną pracę cyklotronu także przy wysokiej temperaturze powietrza na zewnątrz
- przebudowa rezonatora cyklotronu
- przebudowa rozdzielni energii elektrycznej zasilającej cyklotron.

6. Literatura

1. P. Olko: Projekt Narodowego Centrum Radioterapii Hadronowej. Seminarium Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej, Akademia Górniczo Hutnicza. Kraków 29 luty 2008
2. E. Bakewicz i inni: AIC-144 cyclotron: present status. Warszawa 2003. Nukleonika 48:2, 117-121
3. J. Swakoń, P. Olko: Stanowisko do radioterapii protonowej nowotworów oka w IFJ PAN, Materiały Konferencyjne z IX Sympozjum: Modelowanie i Pomiary w Medycynie, 10-14 maj 2009, Krynica 2009
4. M. Stabrowski: Cyfrowe przyrządy pomiarowe. Państwowe przyrządy pomiarowe. Warszawa 2002
5. J. Piotrowski: Podstawy miernictwa. Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 2002
6. A. Chwaleba, M. Poniński, A. Siedlecki: Metrologia elektryczna. WNT 2009
7. J. Barzykowski, A. Domańska, M. Kujawińska i inni: Współczesna metrologia. Wydawnictwo Naukowo Techniczne. Warszawa 2007
8. V. Sabaiduc, J. Burbee, D. Du, K. Erdman i inni: High Current Operation of the ACSI TR30 Cyclotron. Cyclotrons and Their Applications 2007, Eighteenth International Conference. Giardini-Naxos, Sicily, Italy
9. S. Okumura: Magnetic Field Stabilization by Temperature Control of an Azimuthally Varying Field Cyclotron Magnet, Review of Scientific Instruments, vol.76, no.3, 2005
10. B. Gikal, S. Dmitriev, G. Gulbekian i inni: Cyclotron Based Complex IC-100 for Scientific and Applied Research. Eighteenth International Conference. Giardini-Naxos, Sicily, Italy

11. K. Daniel, R. Cieřlik, K. Guguła i inni: Przystosowywanie cyklotronu AIC-144 do protonowej terapii oka. Część 4. Poprawa jakości próżni w komorze cyklotronu, usprawnienie systemu sterowania wiązki, zmniejszenie obciążeń zmęczeniowych komory akceleracji. Raport Nr 2023/AP, IFJ PAN. Kraków 2008
12. J. Sulikowski G. Konrad, K. Daniel i inni: Wpływ zawartości gazów resztkowych na parametry pracy cyklotronu AIC-144, Elektronika - Konstrukcje, Technologie, Zastosowania nr 1, 2009-1
13. M. Schippers, D. Anicic, R. Dölling, i inni: Beam Intensity Stability of a 250 MeV SC cyclotron Equipped with an Internal Cold-Cathode Ion Source. Eighteenth International Conference. Giardini-Naxos, Sicily, Italy
14. S.M. Wei1, T.J. Zhang, B. Ji1, J.S. Xing i inni: Thermal analysis of rf cavity for cyciae-100. Cyclotrons and Their Applications 2007, Eighteenth International Conference. Giardini-Naxos, Sicily, Italy
15. L. Stingelin, M. Bopp, H. Fitze, P.S.I. Villigen: Development of the new 50MHz resonators for the PSI injektor II cyclotron. Cyclotrons and Their Applications 2007, Eighteenth International Conference. Giardini-Naxos, Sicily, Italy
16. T. Horwacik, J. Swakoń, L. Stolarczyk i inni: Radiation exposure at the proton eye therapy facility at IFJ in Krakow, 2008 NSS-MIC Dresden, 19-25 October 2008
17. W. Nawrocki: Rozproszone systemy pomiarowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2006
18. M. Chruściel: LabVIEW w praktyce. Wydawnictwo btc. Legionowo 2008
19. A. Amirkhanov, G.A. Karamyshev, I.N. Kiyan i inni: Simulation of the Required Operation Modes and Analysis of Their Stability for Multipurpose Isochronous Cyclotrons. Physics of Particles and Nuclei Letters. 2009 Vol 6.