

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

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2011/

Kraków, grudzień 2011

Raport Nr 2052/AP

SYMETRYZACJA POLA MAGNETYCZNEGO CYKLOTRONU AIC-144

Krzysztof Daniel, Robert Cieřlik, Ryszard Grzybek, Konrad Guguła,
Grzegorz Janik, Andrzej Koczot, Janusz Mołęda, Tadeusz Norys, Wojciech Pyziół,
Marek Ruszel, Bogusław Sałach, Artur Sroka, Jacek Sulikowski, Ryszard Tarczoń,

Abstract.

The cyclotron AIC-144, currently used in proton radiotherapy of eye melanoma, is located in the Institute of Nuclear Physics in Cracow.

The efficiency of protons deflection of this cyclotron, after elements of pole tip were precisely installed therein in 2006, amounted to 10%. Several months later micromoves of pole tip elements and decline of effectiveness of proton beams deflection were observed. Attempts to restore previous state led to partial success. The efficiency of deflection was still much lower than the one obtained in 2006 and amounted to 3%.

The aim of this paper is to verify the hypothesis about deterioration of magnetic field symmetry in the area of acceleration and to correct the field by introducing micromoves into pole tip elements, under control of magnetic field mapping.

The survey has confirmed significant asymmetry in the magnetic field within the acceleration area. After precise correction of the position of pole tip elements essential symmetry improvement was achieved. The correction was successful and after activating the cyclotron the efficiency of deflection reached 12%.

Spis zawartości:

1. Degradacja pola magnetycznego w komorze akceleracji cyklotronu	2
2. Konstrukcja rdzenia elektromagnesu w cyklotronie AIC-144	3
3. Układ do pomiarów pola magnetycznych	4
4. Symetryzacja pola magnetycznego	7
5. Ocena powtarzalności wyników pomiarów	12
6. Podsumowanie	15
7. Literatura	17

1. Degradacja pola magnetycznego w komorze akceleracji cyklotronu

Cyklotron AIC-144 znajdujący się w Dziale Cyklotronowym Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie, został w ostatnich latach zmodernizowany i przystosowany do protonowej terapii oka [1], [2]. [3]. W lutym 2011 roku zostały wykonane pierwsze zabiegi terapeutyczne.

Nowe przeznaczenie cyklotronu wymaga pracy cyklotronu z wiązką protonów wyprowadzoną na zewnątrz. Do wyprowadzenia wiązki z komory akceleracji służy układ defleksji [4]. Istotna jest przy tym wydajność defleksji tj. stosunek prądu wiązki protonów wyprowadzonej do wewnętrznej wiązki akcelerowanej w obszarze plateau. Niska wydajność defleksji powoduje:

- nadmierną aktywację układu defleksji i komory akceleracji
- częstsze przestoje pracy cyklotronu, przeznaczane na wymianę katody w źródle (typu PIG) [5]
- ograniczenie maksymalnego natężenia prądu wyprowadzonej wiązki protonów

Po wykonaniu we wrześniu 2006 r. precyzyjnej korekty pola magnetycznego, pod kontrolą pomiarów pola magnetycznego w komorze akceleracji [6], wydajność defleksji wynosiła 10%. Parę miesięcy później zaobserwowano mikroprzesunięcia elementów nabiegunnika elektromagnesu i spadek wydajności defleksji. Podjęte próby odtworzenia poprzedniego położenia przesuniętych elementów nabiegunnika oraz ponowna regulacja układu defleksji dały połowiczny skutek. Wydajność defleksji była nadal niższa od osiągniętej w 2006 roku i wynosiła 3%. Przyjęto podejrzenie, że przyczyną niskiej wydajności defleksji jest pogorszenie symetrii pola magnetycznego.

Celem pracy jest zwiększenie wydajności defleksji w cyklotronie AIC-144. Realizacja zadania składa się z trzech etapów:

- weryfikacji podejrzenia o pogorszeniu się symetrii pola magnetycznego w obszarze akceleracji.
- w przypadku potwierdzenia podejrzenia o pogorszeniu się symetrii pola magnetycznego, korekta symetrii przez wykonanie mikroprzesunięć elementów nabiegunnika.
- sprawdzenie osiągniętej wydajności defleksji, po wykonaniu regulacji układu defleksji

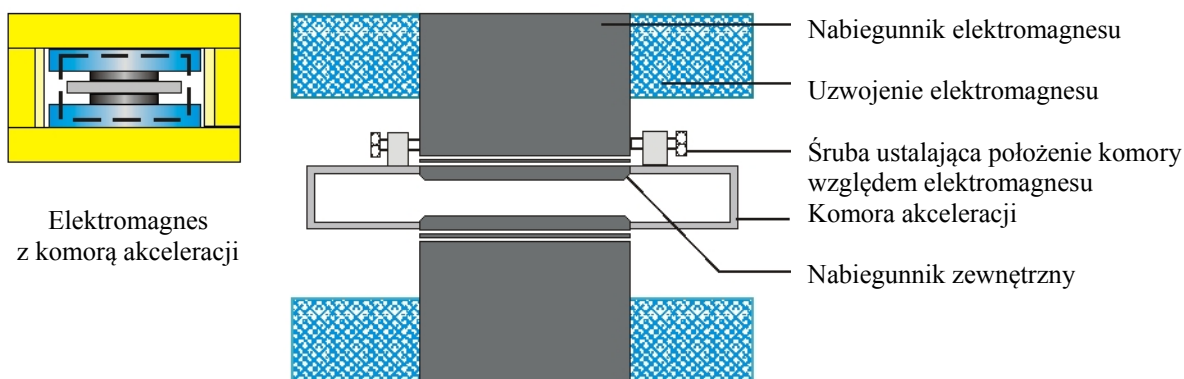
Dodatkowym zadaniem jest wykonanie pomiarów pola izochronicznego przy wyższych wartościach prądu w uzwojeniu głównym niż aktualnie nastawianym. Pomiarzy te mogą być wykorzystane w przyszłości (wg zamierzeń w 2012 roku) do prób akceleracji protonów do większej niż obecnie energii lub zwiększenia wydajności defleksji [7]. Możliwość pracy z wyższymi nastawami prądu pojawiła się po wymianie zasilacza uzwojenia głównego cyklotronu w 2007 roku, na nowy, o większym prądzie maksymalnym.

2. Konstrukcja rdzenia elektromagnesu w cyklotronie AIC-144

Nabiegunniki głównego elektromagnesu cyklotronu nie są całkowicie sztywne. Nabiegunniki zewnętrzne są zamontowane w komorze akceleracji i tworzą z komorą jedną całość. Komora jest unieruchomiona, przez przykręcenie górnej pokrywy komory do górnego nabiegunnika (rys. 1 i 2). Podczas eksploatacji cyklotronu okazało się, że pokrywa komory nie jest wystarczająco sztywna i ulega odkształceniom pod wpływem różnicy ciśnień panujących z obu stron pokrywy (na zewnątrz ciśnienie atmosferyczne, w środku komory próżnia). Ruchy pokrywy komory mogły powodować deformacje elementów łączonych i łączących, i w konsekwencji przesunięcia komory względem nabiegunników elektromagnesu. Szczególnie niekorzystne są poziome ruchy komory, złączonych z komorą nabiegunników zewnętrznych i cewek korekcyjnych: powodują zniekształcenia pola magnetycznego w płaszczyźnie akceleracji.



Rys.1 Budowa środkowej części obwodu magnetycznego. Dla przejrzystości pominięto komorę akceleracji oraz powiększono wielkość szczeliny między poszczególnymi elementami.



Rys 2 Mocowanie komory akceleracji, zintegrowanej z nabiegunnikami wewnętrznymi, do elektromagnesu. Dla przejrzystości pominięto szczegóły oraz powiększono wielkość szczeliny między nabiegunnikami elektromagnesu a komorą.

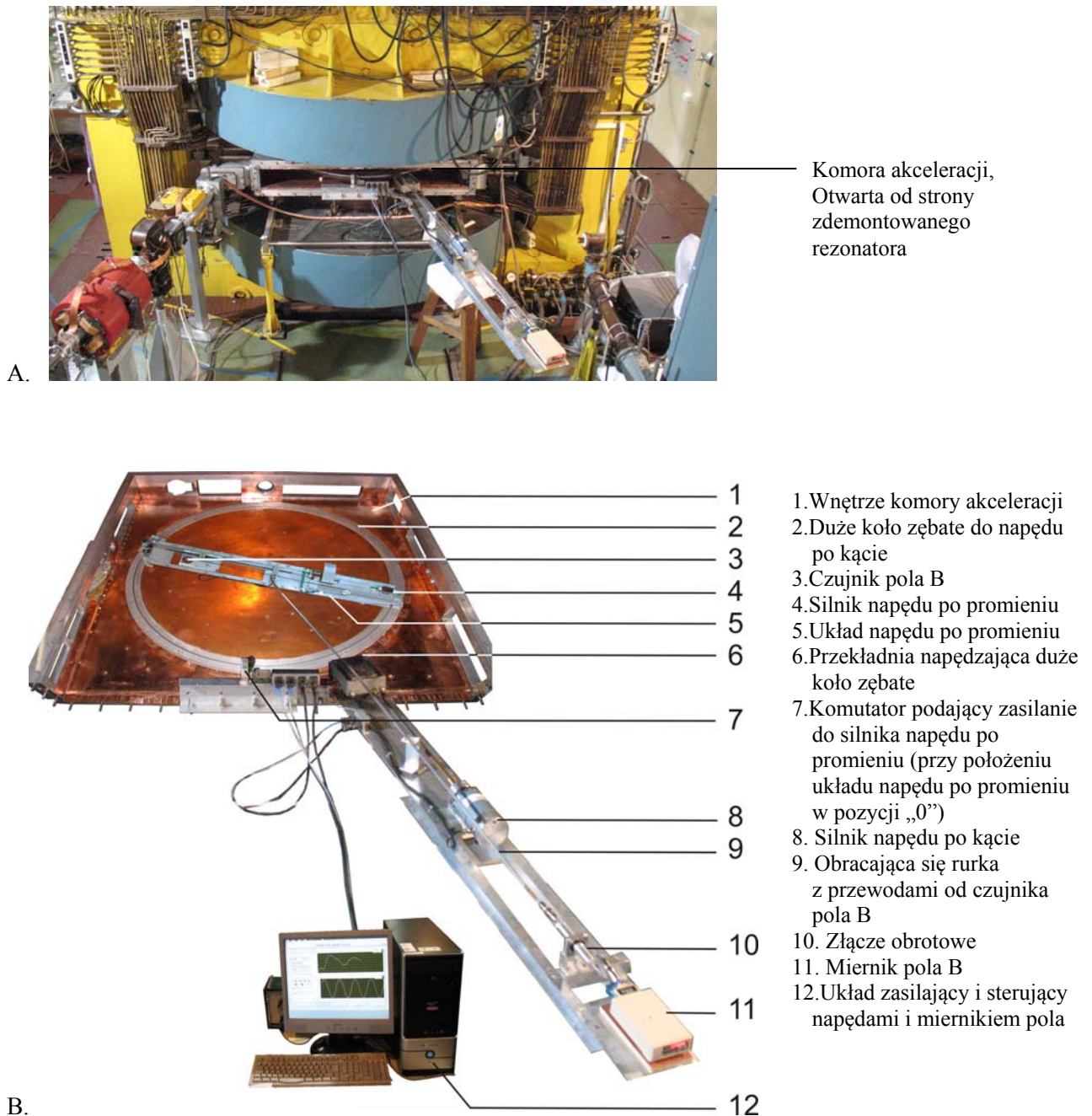
Przyczynami niekontrolowanych przesunięć komory mogły być prace konserwacyjne i remontowe związane z demontażem i montażem ciężkich elementów do komory, siły pojawiające się przy zmianie ciśnienia w komorze, siły dynamiczne przy gwałtownym wyłączeniu prądu w elektromagnesie cyklotronu [8].

3. Układ do pomiarów pola magnetycznego

Na potrzeby pomiarów wykonano układ do pomiarów pola magnetycznego wewnątrz komory akceleracji. Aby zachować spójność nowych wyników z wynikami otrzymanymi w poprzednich pomiarach [6], zachowano bieżący układ współrzędnych i poprzednie wartości przesuwu czujnika po promieniu i po kącie. Wybrane, założone parametry układu:

- pomiar na promieniach: od 0 do 70cm co 2cm (z możliwością zmniejszenia kroku do wielokrotności 0.25cm)
- pomiar po kącie: 52 punkty na obwodzie
- zakres pomiarowy 10000Gs do 22000Gs
- niepewność pomiaru $B \pm 10Gs$
- niepewność pomiaru amplitudy pierwszej harmonicznej $\pm 2Gs$
- rozdzielczość 0.1Gs
- bieżąca wizualizacja pomiarów
- bieżący zapis danych podczas pomiarów
- zapis umożliwiający automatyczną obróbkę wyników
- możliwość sprawdzania stabilności pola B (w czasie poza pomiarami)

Realizowany układ pomiarowy przedstawiono na rys. 3. Przy budowie części mechanicznej wykorzystano elementy napędowe z dawnego układu pomiarowego [6], w tym mechanizm napędu po kącie.

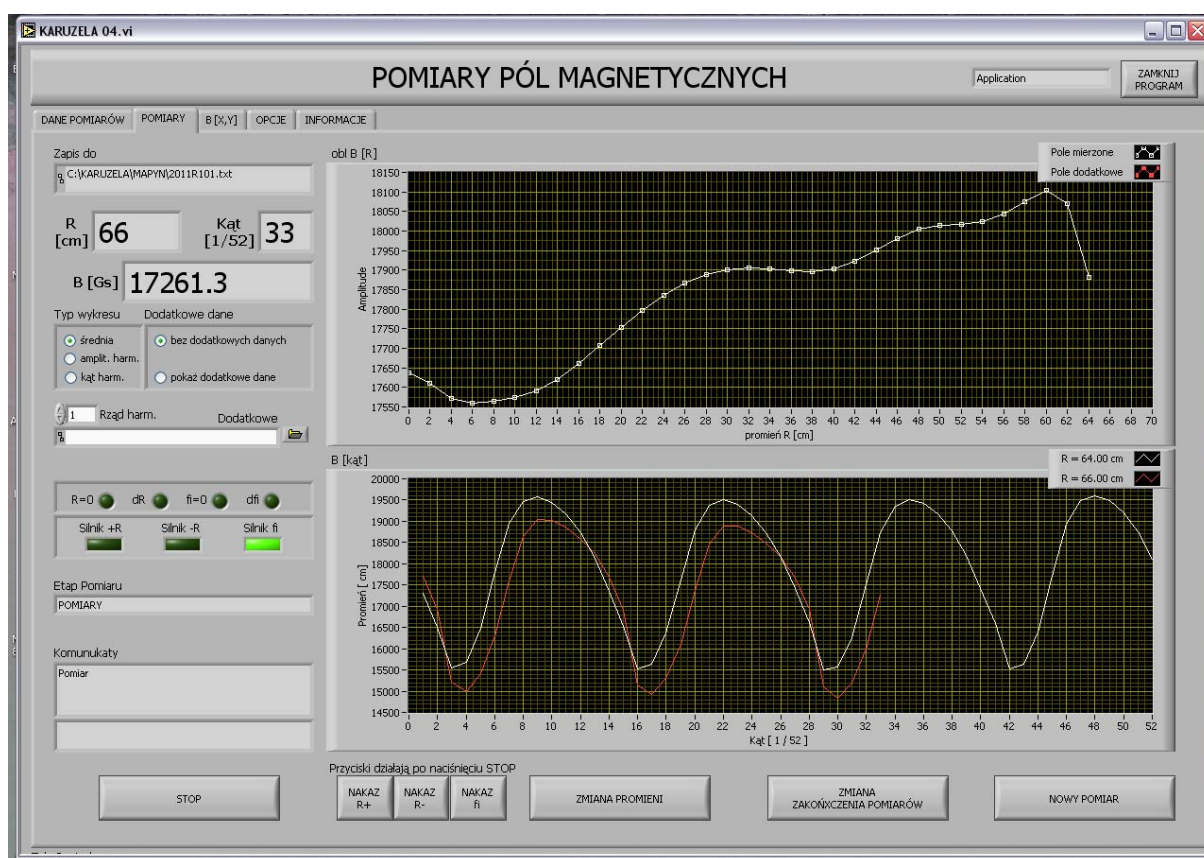


Rys.3 Układ pomiarowy pola magnetycznego w komorze cyklotronu podczas pracy.
 A. Widok zewnętrzny podczas pracy układu pomiarowego.
 B. Mechanizm układu pomiarowego - fotomontaż

Do pomiaru indukcji pola magnetycznego zastosowano miernik DTM-151 firmy Group3 z czujnikiem Halla [9] MPT-141-5s, mierzący z niedokładnością 0.01% wartości wskazanej plus 0.006% zakresu pomiarowego. Błąd pomiaru miernika razem z czujnikiem wynosi $0.01\% \times 22000\text{Gs} + 0.006\% \times 30000\text{Gs} = 4.0\text{Gs}$. Czujnik został zmodyfikowany przez dodanie rzęciowego złącza obrotowego (Mercotac 830) na linii sygnałowej. Modyfikacja wymusiła potrzebę ponownej kalibracji przerobionego czujnika. Ponowne skalowanie czujnika wykazało konieczność zastosowania mnożnika korekcyjnego równego 1,00111 i możliwość wystąpienia dodatkowego błędu $\pm 1.5\text{Gs}$. Kalibrację przeprowadzono wewnątrz komory akceleracji, przy temperaturze rdzenia elektromagnesu wynoszącej 22°C . Temperatura ta jest stabilizowana i równej temperaturze, przy której wykonywano pomiary, oraz jest zbliżona rdzenia podczas pracy cyklotronu.

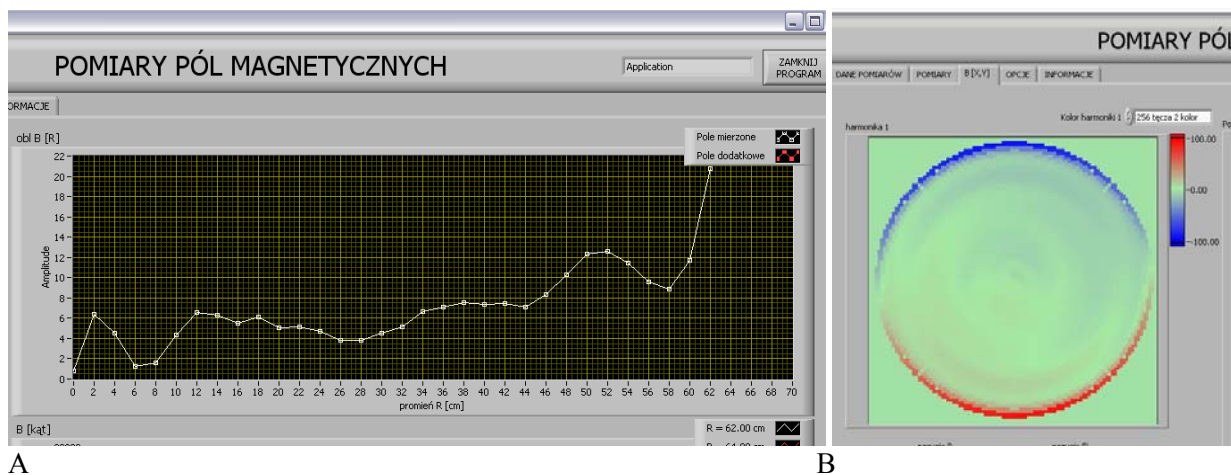
Do sterowania układem pomiarowym zastosowano komputer umieszczony w pomieszczeniu cyklotronu, w miejscu oddalonym około 6 m od komory cyklotronu, tak by zapewnić operatorowi dobry widok na układ pomiarowy i równocześnie pole magnetyczne w miejscu operatora nie przekraczało 3Gs. Komputer komunikował się z układem napędowy za pośrednictwem modułów I/O, a z miernikiem przez moduł komunikacyjny GPIB [10]. [11].

Do sterowania pracą układu pomiarowego, wizualizacji i wstępnej obróbki wyników pomiarów napisano program „Karuzela”. Program powstał w środowisku LabView [12], [13], [14]. Ponieważ przewidywano obsługę pomiarów przez różne osoby, także słabo zorientowane w problematyce przeprowadzanych badań, starano się napisać program przyjazny dla operatora, z czytelnymi komunikatami. Szczególną uwagę poświęcono wizualizacji parametrów [15] mierzonego pola magnetycznego, zwłaszcza możliwości obserwacji pierwszej składowej harmonicznej w funkcji promienia. Szybka diagnostyka mierzonego pola umożliwiła operatorom reagowanie w przypadku pojawienia się błędu podczas pomiaru oraz umożliwia, w wielu przypadkach, znalezienie błędu nastawy pola (rys 4 i 5). Po wykonaniu pomiarów pola układ przesuwa czujnik do miejsca startu pomiarów i wykonuje pomiary kontrolne, w celu sprawdzenia stabilności pola za okres pomiaru.



Rys. 4 Główne okno programu „Karuzela” podczas wykonywania pomiarów. Autorem aplikacji jest Krzysztof Daniel.

Wizualizacja wartości średniej indukcji magnetycznej w funkcji promienia i wykres wartości indukcji mierzonej wzdłuż okręgu o promieniu R.



Rys.5. Fragmenty okien programu KARUZELA podczas wykonywania pomiarów, z bieżącą wizualizacją symetrii pola magnetycznego.

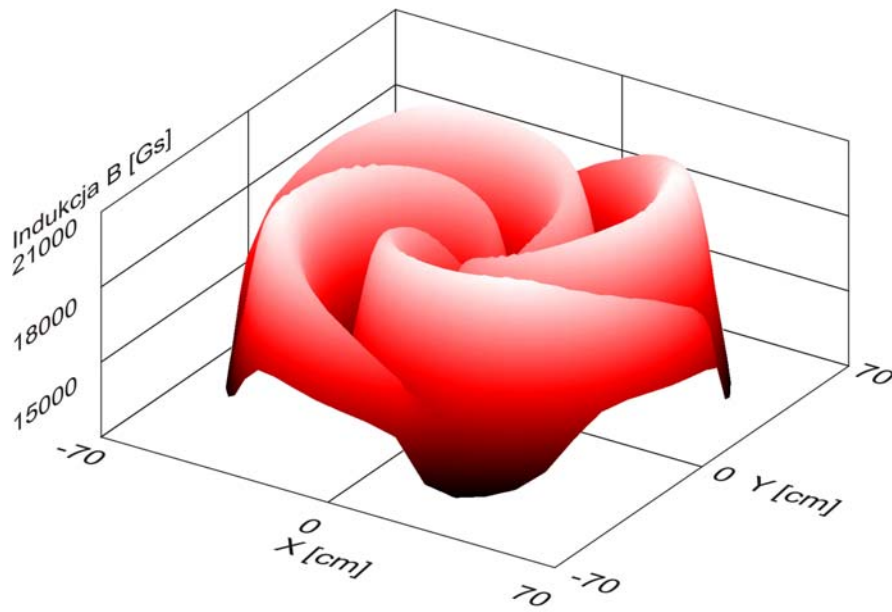
- A. Amplituda pierwszej składowej harmonicznej indukcji magnetycznej w funkcji promienia
 B. Rozkład pierwszej składowej harmonicznej indukcji w płaszczyźnie akceleracji

4. Symetryzacja pola magnetycznego

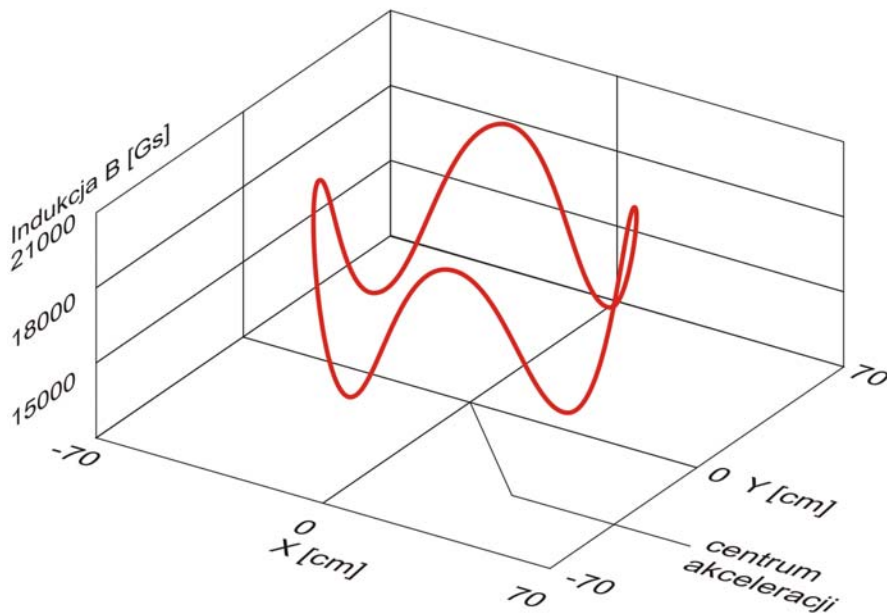
Poprawna akceleracja jonów w cyklotronie wymaga wytworzenia wewnątrz komory akceleracji odpowiedniego pola magnetycznego. Szczególne znaczenie dla analizy akceleracji mają poniższe wielkości:

- Średnia wartość indukcji magnetycznej (B średnie), obliczonej na poszczególnych promieniach R wokół centrum akceleracji (rys. 1 i 6). Od przebiegu B średniego zależy synchronizacja ruchu jonów z częstotliwością zmian napięcia przyspieszającego.
- Amplituda pierwszej składowej harmonicznej indukcji magnetycznej (B_1) obliczonej na poszczególnych promieniach R (rys. 6). Pierwsza składowa harmoniczna jest miernikiem symetrii pola magnetycznego. Symetryczne pole umożliwia ruch jonów po orbitach koncentrycznych względem środka akceleracji. Niesymetryczne pole przesunęło środek orbit w płaszczyźnie akceleracji i może być przyczyną wystąpienia szkodliwego rezonansu jonów.

Porównanie wykonanego 14 września 2011 r. pomiaru 2011R109 z z archiwalnym pomiarem 2006R045 z 25 września 2006 r. (rys. 16 w rozdziale 6) potwierdziło podejrzenie o pogorszeniu się symetrii pola magnetycznego w komorze cyklotronu i spowodowało konieczność podjęcia prac symetryzacji pola.

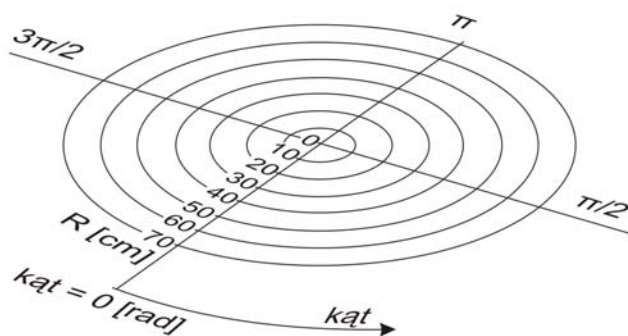


Mapa pola 2011R104
(pole izochroniczne wg
dotychczasowych nastaw
przedstawiona w układzie XYB



Mapa pola 2011R104
Wykres pola B na promieniu
 $R = 50\text{cm}$

Na każdym promieniu są
obliczane, między innymi,
 B średnie (B_{sr}) i amplituda
pierwszej składowej
harmonicznej (B_1)
obliczana po kącie

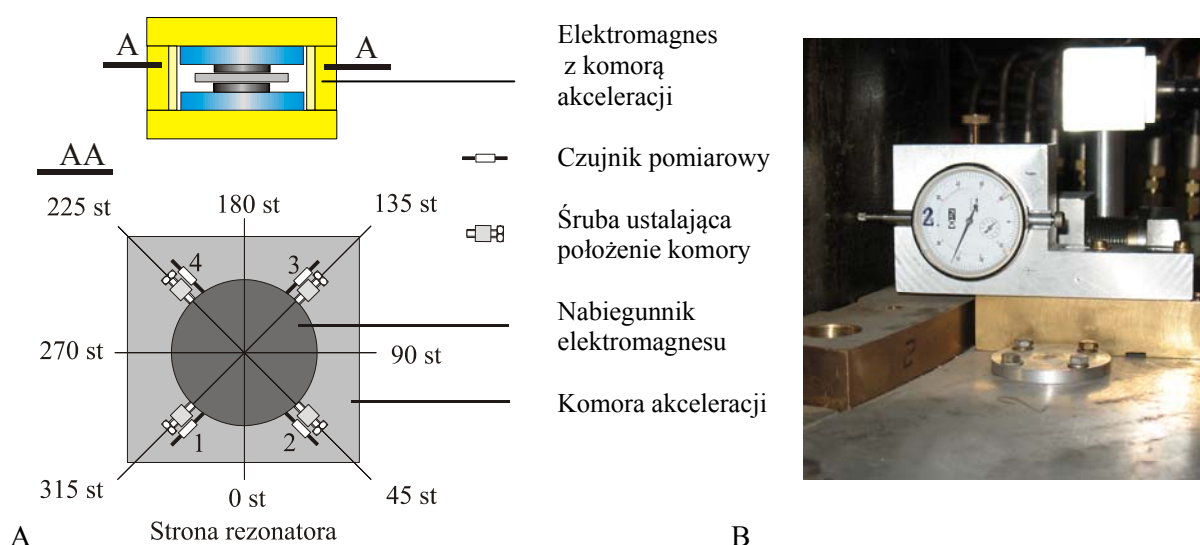


Układ biegunowy, w którym
wykonywane były pomiary

Rys. 6 Widok przestrzenny zmierzonej mapy pola.

Mikroprzesunięcia komory akceleracji (rys. 1 i 2) nie wpływają znacząco na średnie pole magnetyczne, natomiast istotny jest ich wpływ na pierwszą harmoniczną. W celu przeprowadzenia symetryzacji pola magnetycznego, konieczne było skorzystanie z wykonanego pomiaru w początkowym, zastanym usytuowaniu komory, a następnie po wykonanych korekcyjnych przesunięciach komory. Przesunięcia komory wykonywano tak, aby zmniejszyć pierwszą harmoniczną w obszarze akceleracji tj. na promieniach od 0 do 62 cm. Posuw komory wykonano pod kontrolą czujników położenia (rys. 7).

Symetryzacji dokonano przy prądzie w uzwojeniu głównym elektromagnesu równym 570A, z wyłączonymi cewkami korekcyjnymi. Przyjęta do pomiarów wartość prądu jest wykorzystywana przy najważniejszym zakresie pracy cyklotronu: przy akceleracji protonów dla celów terapeutycznych.



Rys 7. A. Widok komory cyklotronu AIC-144 od góry, z zaznaczoną orientacją kierunków. Na rysunku pokazano też czujniki pomiarowe kontrolujące położenie komory względem nabiegunnika elektromagnesu dla kątów równych około 45, 135, 225 i 315 stopni oraz śruby ustalające położenie komory (i wykorzystywane do posuwu komory).

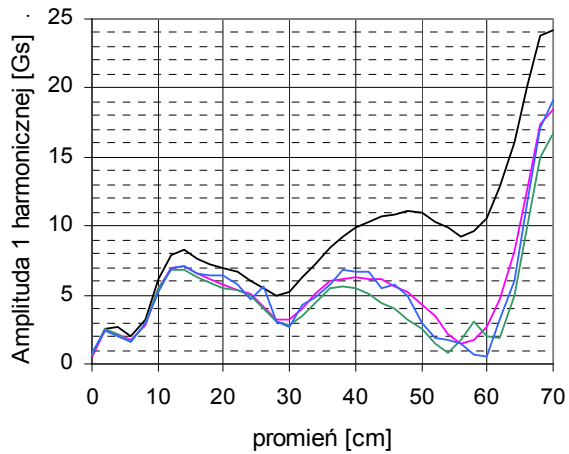
B. Widok czujnika pomiarowego. Z tyłu czujnika widoczny fragment śruby ustalającej położenie komory względem nabiegunnika elektromagnesu.

Rezultaty pomiarów i obliczeń amplitudy pierwszej składowej harmoniczej indukcji, wykonane w trakcie symetryzacji przedstawiono na rys. 8 i 9. Zmierzone pole 2011R120 uznano za optymalne. Wcześniej otrzymane pole 2011R117, mimo mniejszej wartości amplitudy pierwszej harmoniczej, zostało poprawione ze względu na odwrócenie fazy pierwszej harmoniczej w okolicy promienia ekstrakcji $R = 60\text{cm}$, i możliwość wystąpienia niekorzystnej trajektorii jonów o krzyżujących się orbitach (rys. 10).

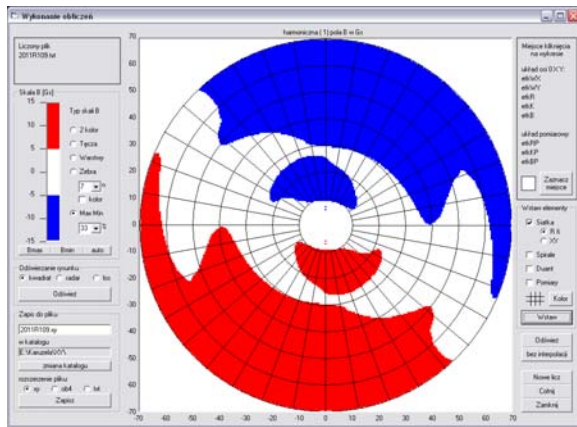
Całkowite przesunięcie komory cyklotronu podczas wykonywania symetryzacji pola magnetycznego w komorze akceleracji, wyniosło 0.46mm w kierunku -5° (kierunek do rezonatora).

Następnym krokiem było sprawdzenie symetrii pola magnetycznego w komorze akceleracji przy różnych nastawach pola izochronicznego. Wyliczone amplitudy pierwszej składowej harmoniczej przedstawiono na rys. 11, mają one, zgodnie z oczekiwaniami, wielkość i rozkład zbliżony do amplitudy pierwszej harmoniczej wytworzonej wyłącznie przez prąd płynący w uzwojeniu głównym elektromagnesu.

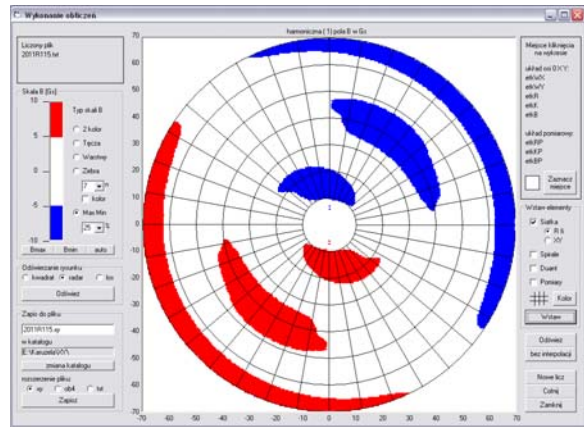
- 2011R109 zastane położenie komory
- 2011R115 po przesuwie o 0.3 mm w kierunku 45° i 0.3 mm w kierunku 315°
- 2011R117 po przesuwie o 0.13 mm w kierunku 315°
- 2011R120 po przesuwie o 0.075 mm w kierunku 135°



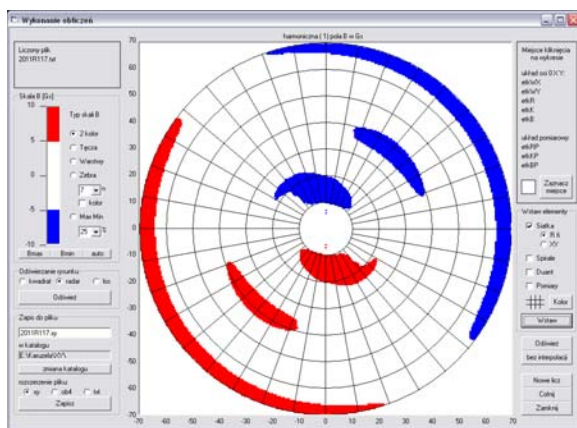
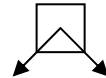
Rys. 8 Amplituda pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej w komorze akceleracji podczas wykonywania symetryzacji pola.



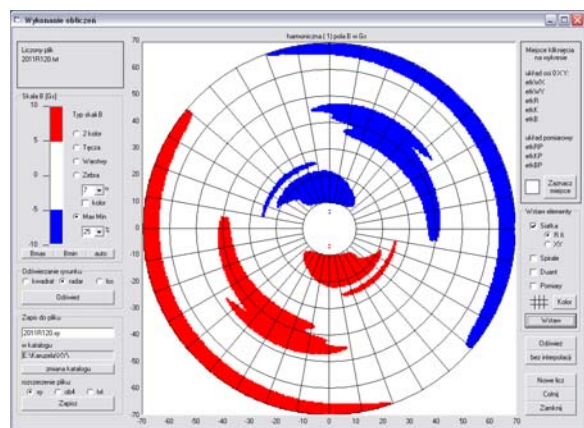
pomiar 2011R109
zastane położenie komory



pomiar 2011R115
przesuw komory o 0.3mm w kierunku 45°
i 0.3mm w kierunku 315°



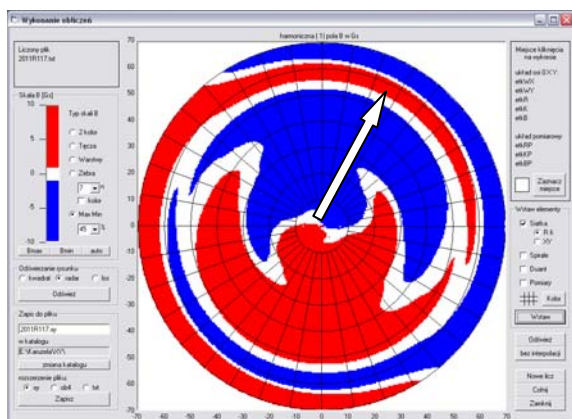
pomiar 2011R117
przesuw o 0.13mm w kierunku 315°



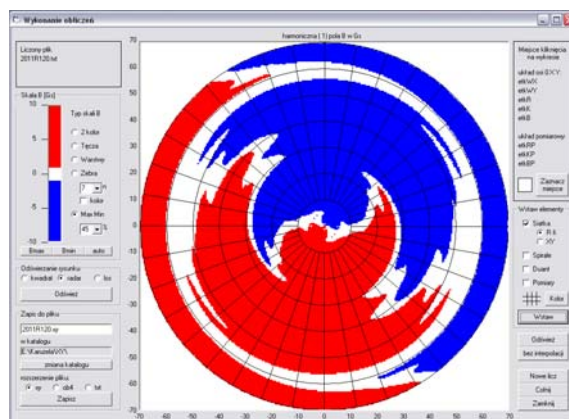
pomiar 2011R120
przesuw o 0.075mm w kierunku 135°



Rys. 9 Wpływ położenia komory akceleracji na wielkość pierwszej harmonicznej, w zależności od usytuowania komory względem elektromagnesu. Wykresy przedstawiają widok z góry wnętrza komory, kolor czerwony wskazuje obszary, w których obliczona wartość pierwszej harmonicznej jest większa od 5Gs, niebieski – obszary, gdzie jest mniejsza od -5Gs.

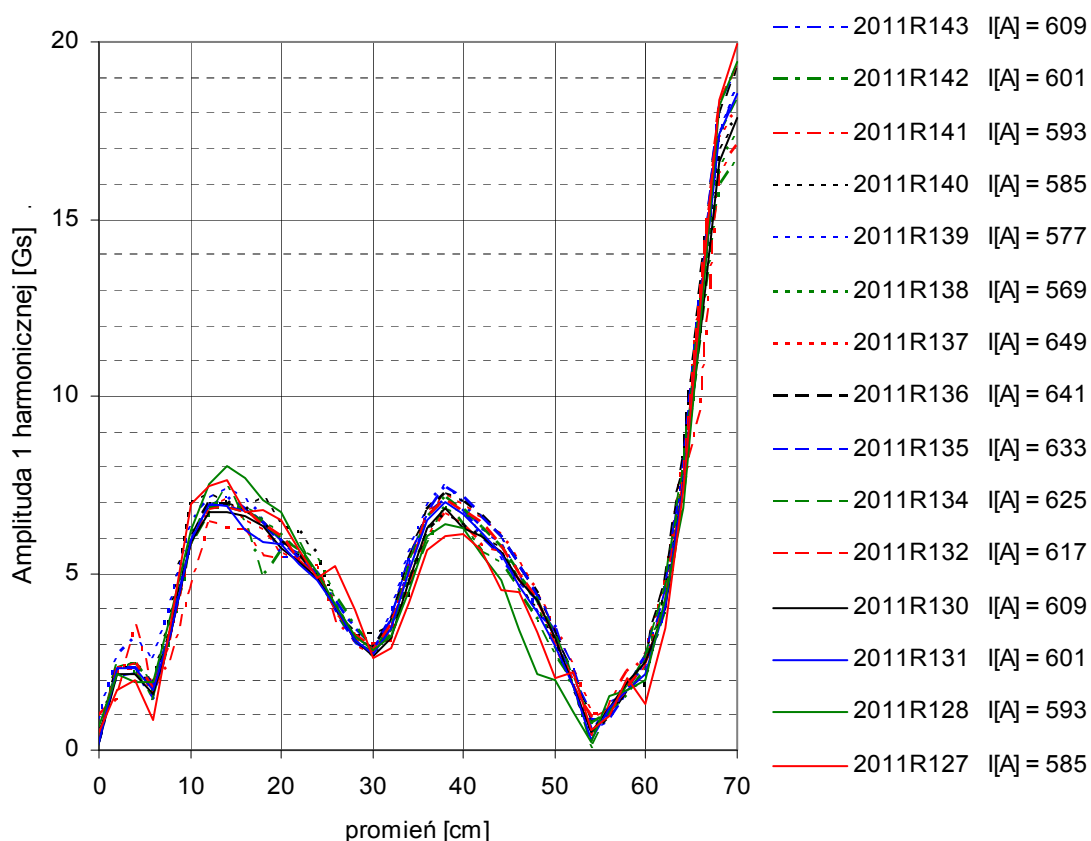


pomiar 2011R117



pomiar 2011R120

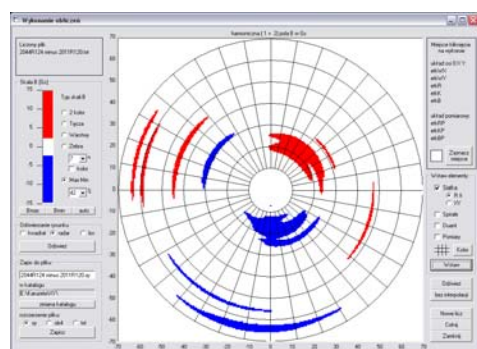
Rys. 10 Porównanie pierwszej harmonicznej pól 2011R117 i 2011R120. Wykresy przedstawiają widok z góry wnętrza komory, kolor czerwony wskazuje obszary, w których obliczona wartość pierwszej harmonicznej jest większa od 1Gs, niebieski obszary gdzie jest mniejsza od -1Gs. Strzałka przy pomiarze 2011R117 wskazuje promień równy około 60cm, na którym widoczna jest zmiana fazy pierwszej harmonicznej w stosunku do promieni krótszych i dłuższych.



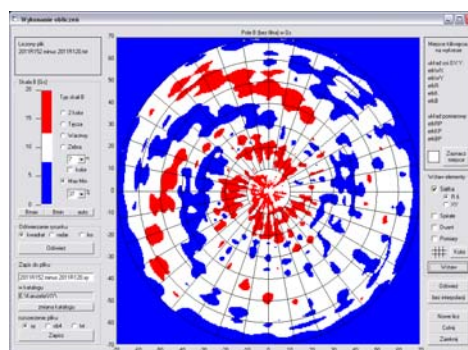
Rys.11 Pierwsze harmoniczne otrzymane po symetryzacji pola, dla różnych pól izochronicznych. Przy każdej nazwie pomiaru podano prąd płynący w uzwojeniu głównym elektromagnesu.

5. Ocena niepewności otrzymanych rezultatów pomiarów

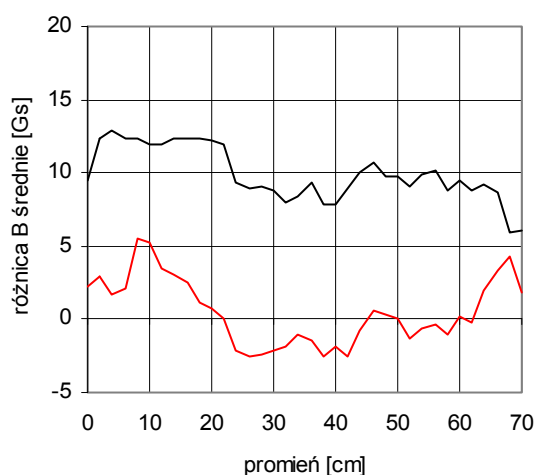
W celu zbadania powtarzalności otrzymanych wyników pomiarów pola magnetycznego, niektóre pomiary wykonano powtórnie. Na rys. 12 przedstawiono wybrane różnice między trzema pomiarami, o identycznych nastawach, a na rys 13 różnice między dwoma pomiarami takiego samego pola izochronicznego. Analiza powtórnych pomiarów pozwoliła na identyfikację niektórych przyczyn niepewności pomiarów i na oszacowanie wielkości niepewności [16], [17], [18].



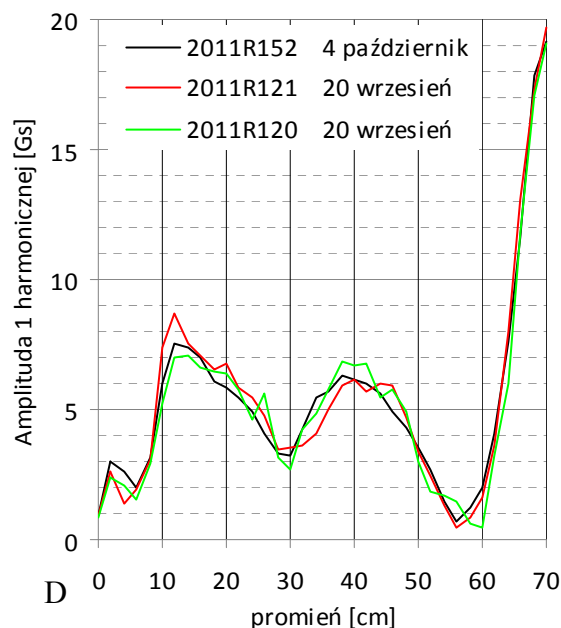
A Różnica 2011R121 – 2011R120
Wykonane tego samego dnia



B Różnica 2011R152 – 2011R120,
Różnica czasu 14 dni



C — 2011R152 - 2011R120 różnica 14 dni
— 2011R121 - 2011R120 ten sam dzień



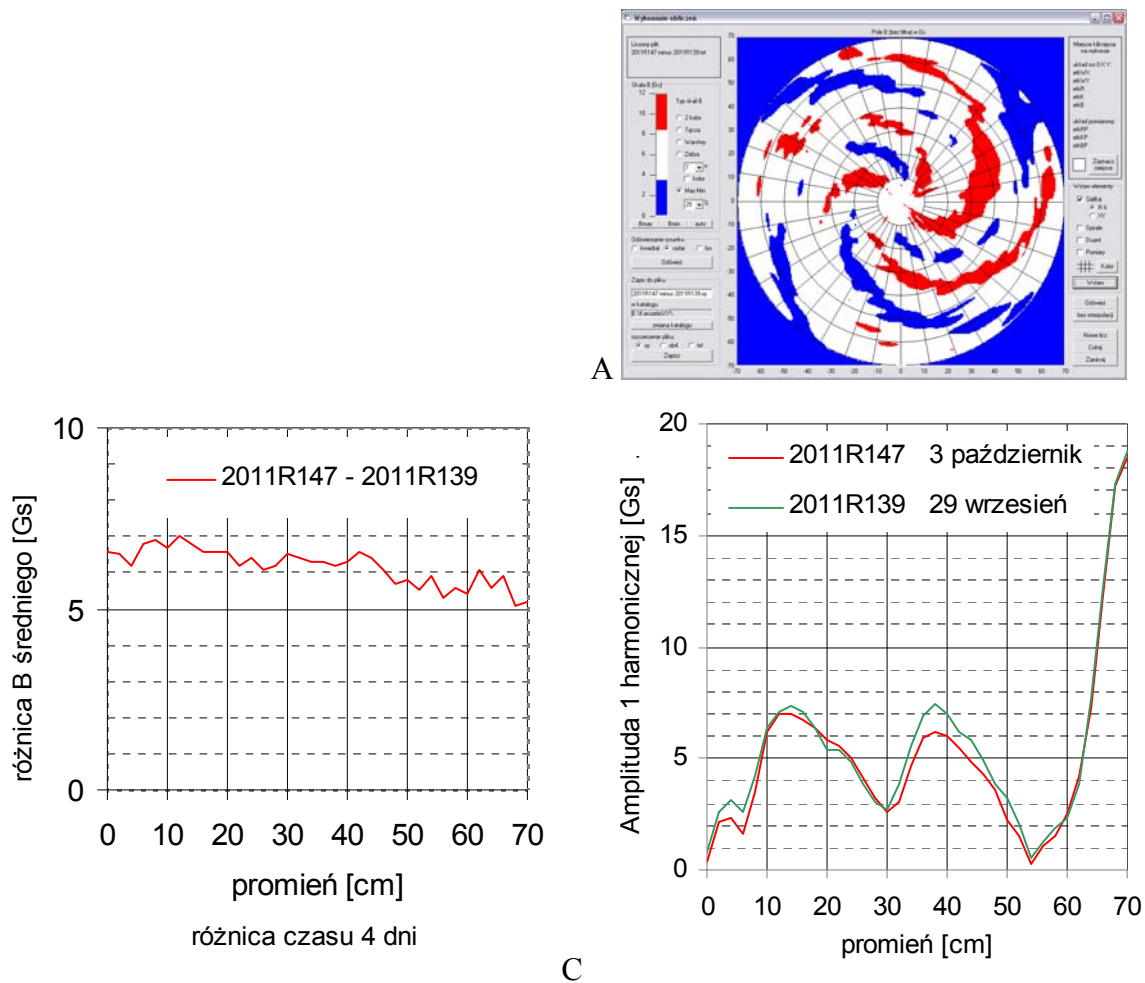
D — 2011R152 4 października
— 2011R121 20 września
— 2011R120 20 września

Rys. 12 Porównanie parami pól wykonanych z identycznymi nastawami: 2011R120, 2011R124 i 2011R152. Wszystkie mapy były polami otrzymanymi przy nastawie prądu w uzwojeniu głównym równym 570A, pozostałe cewki były wyłączone.

A, B Wykresy przedstawiają widok z góry wnętrza komory. Na rys. A kolor czerwony wskazuje obszary, w których różnica indukcji magnetycznej jest większa od 2,5Gs, niebieski obszary gdzie jest mniejsza od -2.5Gs, na rys. B czerwony dla różnicy większej od 10 + 2.5Gs, niebieski dla różnicy mniejszej od 10 - 2.5Gs.

C. Różnice obliczonych średnich wartości indukcji magnetycznej na poszczególnych promieniach, odjemnikiem jest najstarsza mapa.

D. Wartości amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji na poszczególnych promieniach.



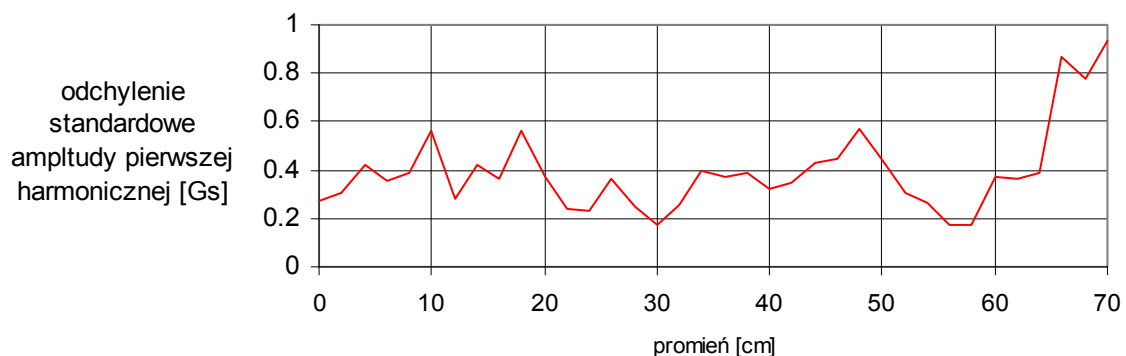
Rys. 13. Porównanie parami pól wykonanych z identycznymi nastawami: 2011R147 i 2011R139. Obie mapy były polami izochronicznymi przy nastawie prądu w uzwojeniu głównym 577A.
 A Wykres przedstawiają widok z góry wnętrza komory. Kolor czerwony wskazuje obszary, w których różnica indukcji magnetycznej jest większa od $6 + 2,5\text{Gs}$, niebieski obszary gdzie jest mniejsza od $6 - 2,5\text{Gs}$.
 B. Różnice średniej wartości indukcji na poszczególnych promieniach, odjemnikiem jest starsza mapa
 C. Wartości amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji na poszczególnych promieniach.

Stwierdzono obciążenie pomiarów błędami przez wystąpienie:

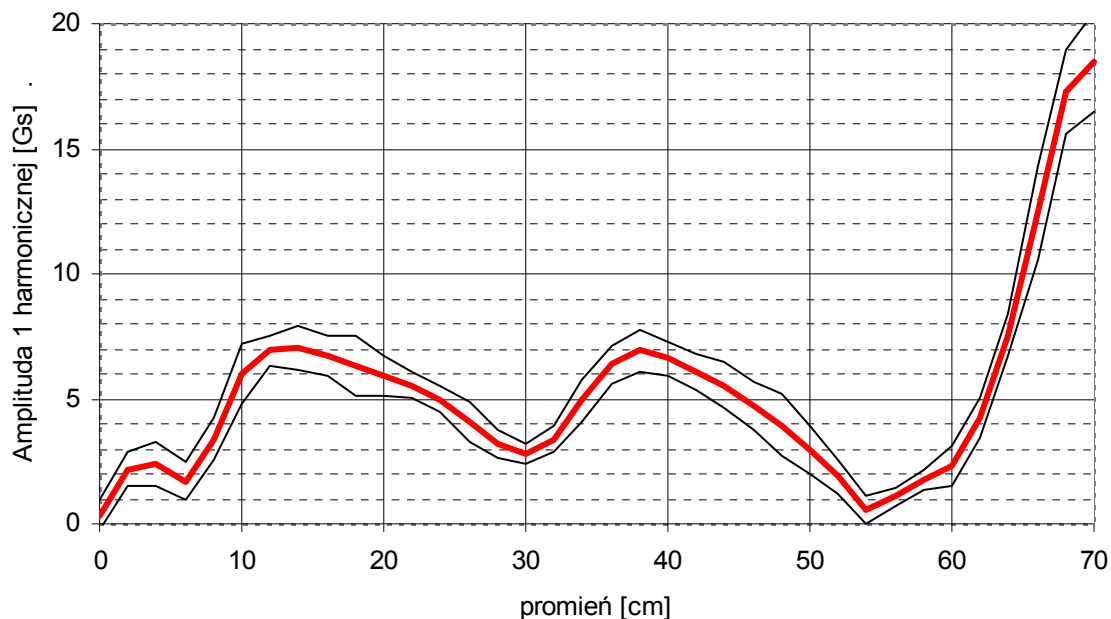
- Błędy pozycjonowania czujnika w poszczególnych punktach pomiarowych. Błąd został zaobserwowany i oszacowany przez porównanie parami zmierzonych pól magnetycznych z identycznymi nastawami (rys. 12 i 13): odchylenie standardowe całej mapy pomiarowej nie przekraczało 3 Gs, natomiast dla punktów pomiarowych usytuowanych na jednym promieniu wynosiło maksymalnie 4 Gs.
- Niestabilności prądu w uzwojeniu głównym i w poszczególnych cewkach korekcyjnych. Zasilacz uzwojenia głównego ma tendencję do niewielkiego dryftu prądu. Zaobserwowano maksymalny dryft wynoszący 0.025A, co skutkuje zmianą pola magnetycznego o około 0.2 Gs. Wpływ od dryftu prądu w pozostałych cewkach na zmianę indukcji w komorze jest jeszcze mniejszy i pomijalny.

- Błędy wskazań miernika razem z czujnikiem pomiarowym. W rozdziale 3 wyliczono wartość błędu na 4.0 Gs.
- Błędy od wprowadzonej poprawki, jak wcześniej podano w rozdziale 3, wynosi on 1.5 Gs.
- Wielkości pozostałości magnetycznej (siły koercji) rdzenia elektromagnesu. Na rys.12C i 13B widać znaczną różnicę wartości B średniego, wynoszącą odpowiednio około 10 i 6 Gs. Duża różnica wartości indukcji, większa od możliwości zmian pola z powodu dryftu prądu płynącego w uzwojeniu głównym i większa od wyliczonej niepewności wskazań miernika, wskazuje na wystąpienie innej przyczyny niż wymienione wcześniej. Źródłem powstania różnicy w wyliczonych wartościach B średniego jest najprawdopodobniej wpływ pozostałości magnetycznej, jeśli nawet nie wyłącznie to w znaczącym stopniu. Wpływ pozostałości magnetycznej rdzenia elektromagnesu na wyniki pomiarów nie jest błędem pomiaru pola, ale obciąża otrzymane wyniki dodatkową i to znaczną niepewnością. To dodatkowe obciążenie wyników można traktować jak błąd, ponieważ ostatecznym celem wykonywania pomiarów nie jest poznanie mapy pola w chwili pomiaru, ale przewidywanie mapy pola w przyszłości, przy identycznych nastawach.

Na niepewność otrzymanych wyliczeń pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej mogą mieć wpływ błędy przypadkowe i te z błędów systematycznych, których wielkość jest zmienna podczas ruchu czujnika pomiarowego po okręgu (przez około 3 min). Wpływ ma składowa przypadkowa niepewności wskazań miernika, błąd powstały od dryftu prądu płynącego w cewkach elektromagnesu. Błędy systematyczne i o powolnej zmianie nie mają wpływu na pierwszą harmoniczną pola. Do oszacowania niepewności wykorzystano metodę statystyczną zastosowaną do wszystkich piętnastu zmierzonych pól izochronicznych i przedstawionych na rys. 11. Wyliczenie niepewności przeprowadzono dla każdego promienia osobno, przy założeniu przedziału ufności równego 95% (współczynnik rozszerzenia dla rozkładu t-Studenta równy 2.14). Wyniki przedstawiono graficznie na rys 14 i 15.



Rys. 14 Odchylenie standardowe pomiarów amplitudy pierwszej harmonicznej dla 15 różnych pól izochronicznych, zmierzonych przy prądzie w uzwojeniu głównym elektromagnesu od 577 do 649 A.



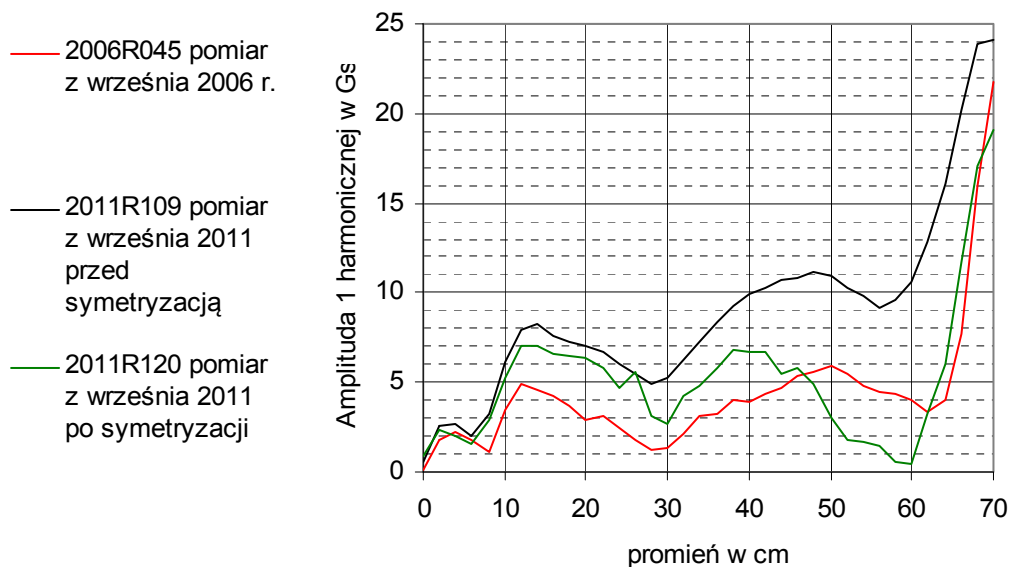
Rys. 15 Wyliczona wartość średnia amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji B1 dla zmierzonych pól izochronicznych z uwzględnieniem niepewności rozszerzonej pomiarów $\pm u(B1)$ dla przedziału ufności 0.95%. Wartość maksymalna niepewności w przedziale promieni od 0 do 64 cm wyniosła ± 1.2 Gs. Przedstawiony wykres obejmuje pola o prądzie w uzwojeniu głównym od 577A do 649 A.

6. Podsumowanie

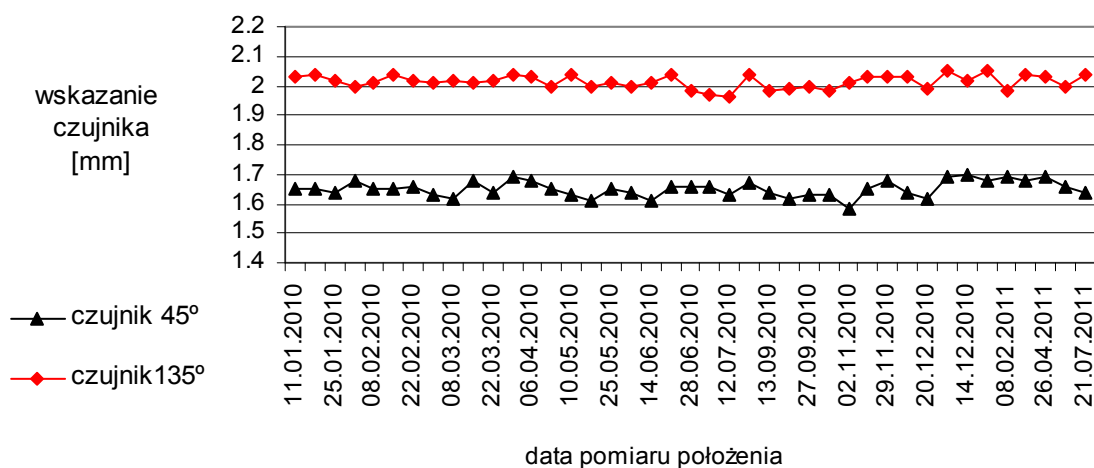
Pomiary przeprowadzone przy początkowej, zastanej pozycji wykazały znaczącą niesymetrię pola magnetycznego w komorze akceleracji. Potwierdzeniu uległo podejrzenie wystąpienia mikroprzesunięć komory akceleracji wraz z elementami nabiegunnika elektromagnesu. Zbudowany i uruchomiony układ pomiarowy pozwolił na wykonanie map pola magnetycznego, ocenę symetrii pola i korekcję pola magnetycznego (rys. 16). Została stworzona możliwość polepszenia wydajności defleksji.

Należy zaznaczyć, że z końcem 2009 roku zmodernizowano sposób mocowania komory akceleracji do nabiegunnika elektromagnesu, w celu wyeliminowania mikroprzesunięć komory. Od początku 2010 roku przesunięcia komory nie przekroczyły ± 0.05 mm (rys. 17), można zatem mieć nadzieje na rozwiązywanie problemów wynikających ze szkodliwych mikroprzesunięć.

Pierwsze uruchomienie cyklotronu, po przeprowadzonej symetryzacji, wykazało zwiększenie wydajność defleksji do około 12% oraz wzrost energii akcelerowanych protonów. Pomiar wykonany 24 listopada 2011 roku na stanowisku terapeutycznym, przez Samodzielną Pracownię Radioterapii Protonowej, dowiódł wzrostu zasięgu protonów w wodzie z 28.3 mm do 29.4 mm. Wstępna ocena energii protonów przyspieszonych przez cyklotron, wykazuje wartości w granicach od 60.3 do 60.8 MeV i jest większa od energii osiąganą przed symetryzacją o około 1.5 do 2 MeV.

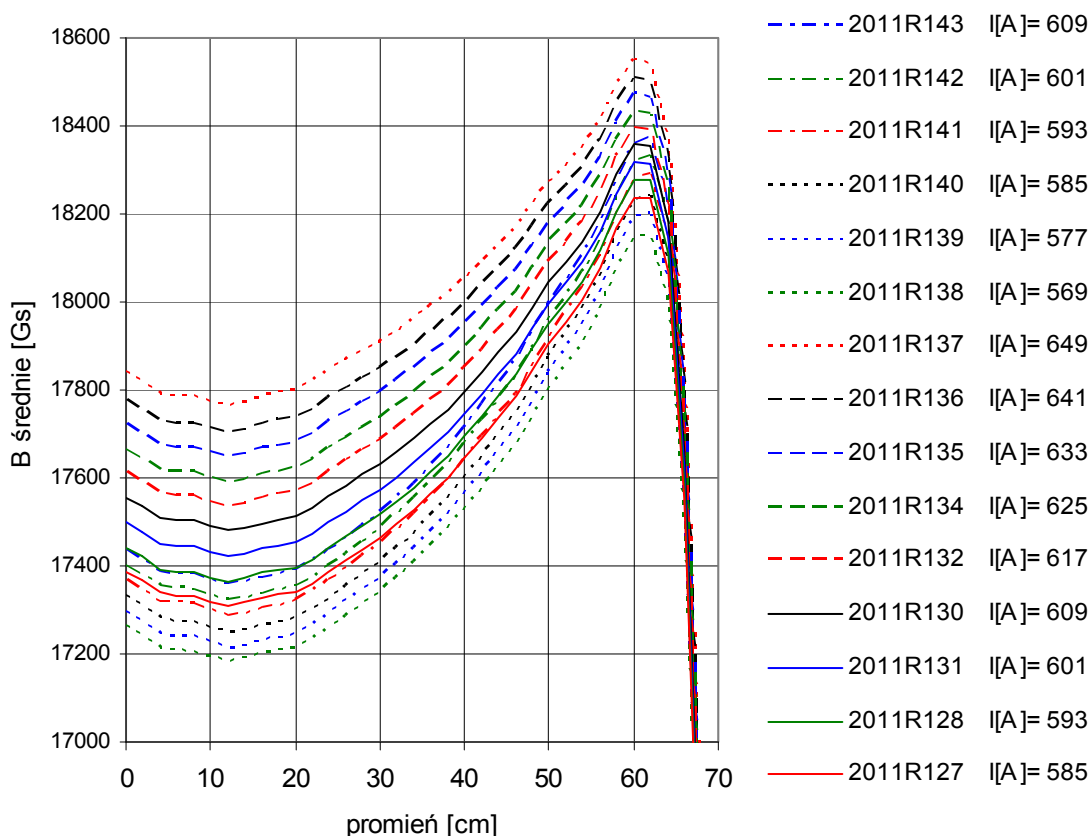


Rys.16 Zmiana pierwszej składowej harmonicznej indukcji magnetycznej w komorze akceleracji w okresie od 2006 do 2011 roku.



Rys. 17 Odnotowane mikropzesunięcia komory w okresie od początku 2010 roku do chwili rozpoczęcia symetryzacji pola. Oznaczenia czujników jak na rys. 7

Dodatkowo zmierzono pola izochroniczne o większej wartościach indukcji magnetycznej. Stworzona baza pomiarowa może być wykorzystana w przyszłości do dalszego polepszenie wydajności defleksji i ewentualnie, do zwiększenia energii przyspieszanych protonów (rys. 18).



Rys. 18 Średnia wartość indukcji magnetycznej na poszczególnych promieniach dla zmierzonych pól izochronicznych. Przy każdej nazwie pomiaru podano prąd płynący w uzwojeniu głównym elektromagnesu. Rozszerzona niepewność pomiarów w przedziale ufności 95% wynosi maksymalnie $\pm 9,6$ Gs. Uwzględniono błędy niedokładności miernika, błędy wprowadzonej poprawki i niepewność od pozycji czujnika, pominięto wpływ pozostałości magnetycznej.

Zbudowany na potrzeby symetryzacji pola magnetycznego prosty i tani układ pomiarowy, umożliwiał wyliczanie amplitudy pierwszej harmonicznej indukcji magnetycznej z niepewnością rozszerzoną $\pm 1,2$ Gs, a wartości średniej $\pm 9,6$ Gs. Otrzymana niepewność pomiaru jest zgodna z założeniem i była w pełni wystarczająca do zrealizowania postawionego zadania. Interesujące jest jednak porównanie z innymi, podobnymi układami pomiarowymi [19], [20], [21]. Układy te są znacznie bardziej złożone i charakteryzujące się dużą dokładnością pomiarów, najczęściej podawany jest błąd pomiaru indukcji wynoszący ± 2 Gs.

7. Literatura

1. Olko P: Projekt Narodowego Centrum Radioterapii Hadronowej. Seminarium Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademia Górniczo Hutnicza. Kraków 29 luty 2008

2. Swakoń J, Olko P: 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
3. Michalec B, Swakoń J, Sowa U i inni: Proton radiotherapy facility for ocular tumors at the IFJ PAN in Kraków Poland. Applied Radiation and Isotopes vol. 68, 2010, 738-742
4. Scharf W: Akceleratory biomedyczne. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 1994.
5. Bakewicz E, H, Doruch H i in.: Nowe źródło jonów cyklotronu AIC-144 do. Raport IFJ nr 1952/AP. Kraków 2004.
6. Daniel K, Bochenek-Dobrowolski R, Doruch H i in.: Przystosowanie cyklotronu AIC-144 do zastosowań medycznych Część 2. Korekta pola magnetycznego, modernizacja traktu wiązki. Raport IFJ PAN nr 1991/AP. Kraków 2006.
7. Daniel K, Bochenek-Dobrowolski R, Guguła K i in.: Przystosowywanie cyklotronu AIC-144 do protonowej terapii oka Część 3. Maksymalizacja energii protonów, rewitalizacja generatora w. cz. Raport IFJ PAN nr 2006/AP. Kraków 2007.
8. Daniel K, Cieślik R, Guguła K i inni: Przystosowywanie cyklotronu AIC-144 do protonowej radioterapii oka. Część 5. Stabilność wiązki w cyklotronie AIC-144: wybrane parametry, przyczyny i przeciwdziałanie niestabilności. Raport Nr 2032/AP. IFJ PAN. Kraków 2009 S.
9. Derlecki S.: Metrologia elektryczna i elektroniczna. Politechnika Łódzka. Łódź 2010
10. Nawrocki W: Rozproszone systemy pomiarowe. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności. Warszawa 2006.
11. Winiecki W, Nowak J, Stanik S: Graficzne zintegrowane środowiska programowania. Wydawnictwo MIKOM. Warszawa 2001.
12. Świsulski D: Komputerowa technika pomiarowa. Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabView. Agencja Wydawnicza PAK-u. Warszawa 2005.
13. Tłaczała W: Środowisko LabVIEW w eksperymencie wspomaganym komputerowo. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 2002
14. Chruściel M.: LabVIEW w praktyce. Wydawnictwo btc. Legionowo 2008.
15. Spolsky J. Projektowanie interfejsu użytkownika. Poradnik za programistów. Wydawnictwo MIKOM. Warszawa 2001
16. Dusza J, Gorłat G, Leśniewski A. Podstawy miernictwa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2007.
17. Arendalski J. Niepewność pomiarów. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 2006.
18. Cysewska-Sobusiak A: Podstawy metrologii i inżynierii pomiarowej. Wydawnictwo politechniki Poznańskiej. Poznań 2010.
19. Paradis Y, Vandeplassche D i in.: The magnetic field mapping system for the IBA C70 Cyclotron. 18th Eighteenth International on Conference Cyclotrons and Their Applications. Catania 2007.

20. Mallik C, Pal G, Sarbajit i in: Magnetic field mapping of Kolkata superconducting Cyclotron. 18th Eighteenth International on Conference Cyclotrons and Their Applications. Catania 2007.
21. Park K H, Jung Y G i in.: Precision field mapping system for cyclotron magnet. 9th European Particle accelerator conference. Lucerne 2004