

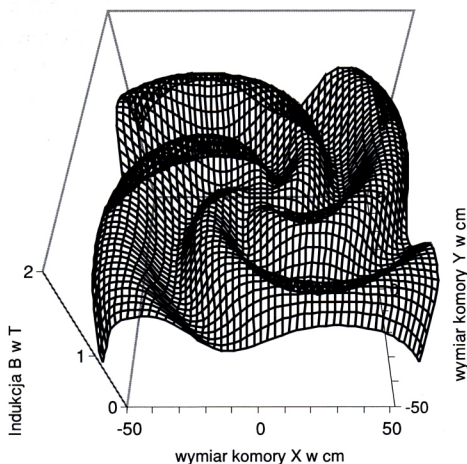
Pomiary pól magnetycznych w cyklotronie izochronicznym AIC-144

Krzysztof Daniel

Prezentujemy sposób wykonania złożonych pomiarów pól magnetycznych wewnątrz komory cyklotronu AIC-144 znajdującego się w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. Szczególny nacisk położono na optymalizację pomiarów, ze względu na ich dużą czasochłonność i związane z tym znaczne koszty.

Cyklotron AIC-144 jest przeznaczony do pracy w wielu dziedzinach, a w szczególności do leczenia ludzi chorych na pewne rodzaje nowotworów, do produkcji izotopów oraz na potrzeby eksperymentalnej fizyki jądrowej. Cyklotron jest przystosowany do przyspieszania lekkich cząstek, np. protonów, deuteronów, alfa do różnych wartości energii [1, 2].

Różnorodność przyspieszanych cząstek i energii jest możliwa dzięki dużej dowolności w formowaniu pola magnetycznego wewnątrz komory cyklotronu, w której następuje akceleracja cząstek. Pole główne jest wytworzone przez prąd płynący przez uzwojenie główne elektromagnesu i uformowane za pomocą żelaznych nabiegowników i spiralnych sektorów oraz prądów płynących przez 20 par cewek ułożonych koncentrycznie na tych sektorach (rys. 1). Dodatkową korektę pola umożliwia 8 par niewielkich niekoncentrycznych cewek, zwanych harmonicznymi i dolinowymi [3].



Rys. 1. Indukcja magnetyczna B wewnątrz komory cyklotronu. Widoczny jest wpływ spiralnych segmentów zamontowanych na nabiegownikach elektromagnesu

Prezentowane opracowanie ogranicza się do przedstawienia pomiarów umożliwiających określenie średniego pola na poszczególnych promieniach wewnątrz komory cyklotronu na podstawie znajomości prądów płynących w uzwojeniu głównym oraz w koncentrycznych cewkach. Znalezienie zależności między prądami cewek a polem magnetycznym w komorze jest niezbędne do znalezienia odwrotnej zależności, tj. takiego doboru prądów cewek, aby otrzymać żądane pole.

Mgr inż. Krzysztof Daniel jest pracownikiem Pracowni Cyklotronowej Instytutu Fizyki Jądrowej w Krakowie.

Układ pomiarowy

Do wykonania pomiarów korzystano z układu pomiarowego z czujnikiem Halla oraz z mechanicznego układu przesuwającego czujnik. Program komputerowy, wykonany przez autora, sterował napędami poruszającymi czujnikiem, pozwalał na bieżąco obserwować wybrane zależności, kontrolował stabilność pola oraz przygotowywał zmierzone wartości do dalszej obróbki.

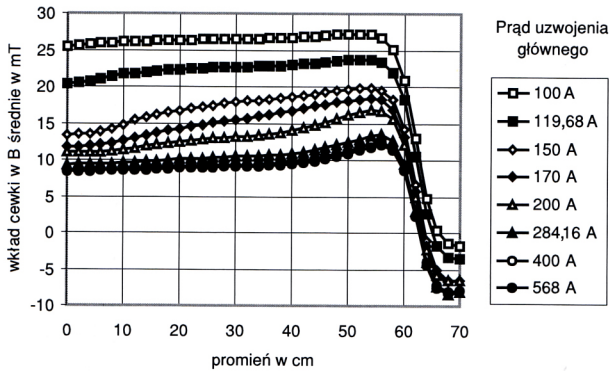
Wykonanie pomiaru pola magnetycznego przy jednej nastawie cewek (nazywane mapą pola) polega na zmierzeniu składowej pionowej indukcji magnetycznej w układzie biegunowym, tzn. po obwodzie na różnych promieniach, ze skokiem równym $2\pi/52$ (ok. 7°). Przy pomiarach pola przyjęto, że wystarczające są pomiary na promieniach od 0 do 70 cm, co 2 cm. Jest to rozsądny kompromis między czasem pomiarów, a ich kompletnością. Wartości pośrednie można z powodzeniem interpolować.

Konieczność formowania pola magnetycznego przez zmianę prądów w cewkach wymaga znajomości wkładu poszczególnych cewek w wytworzone pole, co umożliwia wykonanie szeregu pomiarów. Potrzebne są pomiary pola magnetycznego, wytworzonego przez uzwojenie główne elektromagnesu oraz pomiary pól wytworzone przez pozostałe dwadzieścia par cewek mierzone przy różnych wartościach prądów w uzwojeniu głównym. Ponieważ rdzeń magnesu będzie pracował zarówno przed jego nasyceniem, jak i w zakresie nasycenia, układ magnetyczny będzie eksploatowany w obszarze swej znacznej nieliniowości i z tego powodu liczba potrzebnych pomiarów pól jest bardzo duża i powinna wynosić około 200 do 400, w zależności od założonej dokładności. Przyjmując czas jednego pełnego pomiaru pola, tzn. wykonania mapy pola (zawierającego ok. 2 tys. punktów pomiarowych) 2 h plus 1 h na przełączenie cewek i stabilizację pola, otrzymujemy wyobrażenie o czasochłonności pracy potrzebnej do pełnego pomiaru pola magnetycznego w komorze cyklotronu. Stąd wynika potrzeba optymalizacji pracy przy pomiarach, selekcji pomiarów oraz zastępowania części pomiarów obliczeniami.

Selekcja pomiaru

Pomiary pola magnetycznego wytworzonego przez uzwojenie główne wykonano w całym zakresie przewidywanej pracy. Ponieważ pole od tego uzwojenia determinuje pole w komorze cyklotronu, wykonano pełne mapy pomiarowe, tj. mapy zawierające pomiary na promieniach od 0 do 70 cm, co 2 cm. Pomiary przeprowadzono

dla prądów w uzwojeniu głównym 90, 100, 110, 120, 135, 150, 170, 200, 225, 250, 285, 300, 350, 400, 450, 500, 535, 568, 600, 614,4 A. Pola od pośrednich prądów można interpolować na poszczególnych promieniach, z wystarczającą dokładnością.



Rys. 2. Wkład cewki korekcyjnej nr 19 w średnie pole magnetyczne przy różnych wartościach prądu w uzwojeniu głównym

Wkład cewek korekcyjnych w wytworzenie pola magnetycznego można określić poprzez wykonanie mapy z włączoną cewką i włączonym odpowiednim prądem I_g w uzwojeniu głównym, a następnie przez odjęcie od tej mapy podobnej mapy, lecz bez włączonej cewki korekcyjnej. Ponieważ cewek korekcyjnych jest 20, a prądów I_g w uzwojeniu głównym istotnie wpływających na wkład cewek kilkanaście, postanowiono ograniczyć pomiary wkładu cewek korekcyjnych do minimum. Zażewano zakres prądów I_g uzwojenia głównego do tych, przy których przewiduje się pracę cyklotronu, tj. 120, 170, 285 i 568 A. Dodatkowo postanowiono poznać wkład cewek korekcyjnych dla prądów z otoczenia przewidywanej pracy, czyli 100, 150, 200 i 400 A (rys. 2). Pomiary wykonano wyłącznie przy prądach w cewkach korekcyjnych +400 A, ze względu na znaczną liniowość wkładu B cewek, w zależności od prądu płynącego przez te cewki w granicach dokładności pomiarów.

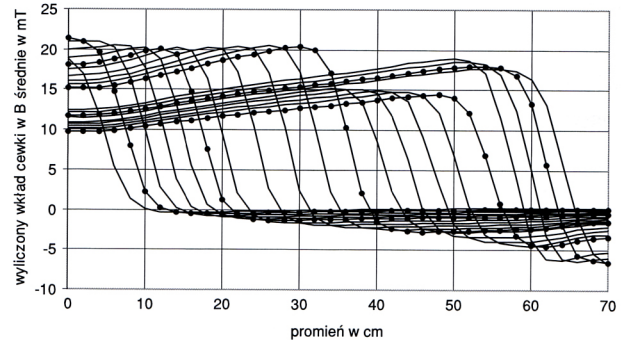
Wykonywanie pomiarów niekompletnych

Pole magnetyczne wytworzone przez prądy płynące przez poszczególne cewki koncentryczne ma specyficzny charakter; w znacznych zakresach promieni wkład jest bardzo gładki, o niewielkim gradiencie (rys. 2 i 3). Taki charakter wkładu pozwala na wykonanie pomiarów na promieniach rozmieszczonych rzadziej niż co 2 cm, a brakujące dane obliczyć.

Po kilku próbach stwierdzono, że wystarczy wykonać pomiary co 2 cm na promieniach, gdzie zmiana gradientu wkładu cewki jest duża, a na pozostałych promieniach co 10 cm. Przy interpolacji wkładu na brakujących promieniach wielomianem trzeciego stopnia błąd nie był większy niż 0,05 mT. Spostrzeżenia te dotyczą pomiarów wkładów cewek w średnie pole magnetyczne przy prądzie w uzwojeniu głównym $I_g = 285$ A i większym. Przy mniejszym prądzie (przy braku nasycenia nabiegunków) pomiary należało wykonać nieco gęściej. Pomiary niekompletne zmniejszały czas pomiaru o 0,5 h do 1 h, przy zachowaniu dużej dokładności pomiarów.

Zastępowanie pomiarów obliczeniami

Dokładnymi pomiarami wkładu cewek koncentrycznych w pole średnie, przez wykonanie czasochłonnych map (kompletnych i niekompletnych) objęto 5 cewek koncentrycznych spośród 20, przy prądach uzwojenia głównego, przy których przewiduje się pracę cyklotronu (120, 170, 285, 568 A). Dla prądów 100, 150, 200, 400 A dokładnymi pomiarami objęto tylko 2 cewki koncentryczne. Dodatkowo zmierzono wpływ 2 cewek, aby oszacować błędy poniższych obliczeń.



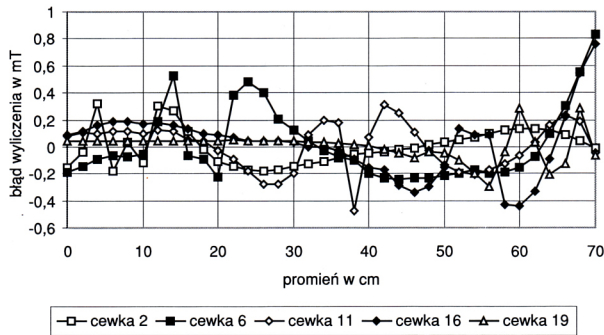
Rys. 3. Obliczony wpływ poszczególnych cewek korekcyjnych na średnie pole B przy prądzie cewki +400 A dla prądu w uzwojeniu głównym 170 A. Przebiegi oznaczone kropkami dotyczą cewek, z którymi dokonano pomiarów dokładnych 1000 – 2000-punktowych

W celu bardziej radykalnego skrócenia czasu pomiarów pozostałych cewek zastosowano pomiary jednopunktowe w środku komory cyklotronu. W ten sposób zmierzono 20 cewek korekcyjnych, przy pełnej gamie prądów w uzwojeniu głównym.

Wkład cewek w wytworzenie pola magnetycznego wyliczono na podstawie empirycznego wzoru (1), słusznego dla wszystkich cewek korekcyjnych, przy jednakowym prądzie w uzwojeniu głównym I_g . Wzór został tak dobrany, aby za pomocą najmniejszej liczby zmiennych parametrów, opisywał wkład cewki (rys. 2 i 3) z zadowalającą dokładnością do 0,3 mT w zakresie promieni od 0 do 66 cm, a na promieniu największego nachylenia – do 0,6 mT. Z kontrolnych pomiarów oszacowano dodatkowy błąd, wynikły z niedokładnego określania stałych b, c i f , na 0,5 mT.

$$B_{ck}(r, n, 400, I_g) = B_{ck}(0, n, 400, I_g) * w(r) * \left(\frac{b * (d - r) + c * (d - r) * |d - r| + e * (d - r)^2}{a * (d - r)^2 + 1} + f \right) \quad (1)$$

gdzie: r – promień, n – numer cewki (od 1 do 20 od cewki najmniejszej do największej), I_g – prąd uzwojenia głównego, $B_{ck}(r, n, 400, I_g)$ – średnia wartość indukcji magnetycznej B cewki koncentrycznej n , na promieniu r , przy prądzie cewki $I_g = 400$ A, dla prądu I_g , $B_{ck}(0, n, 400, I_g)$ – wartość indukcji magnetycznej B w środku komory cyklotronu, $w(r)$ – funkcja niezależna od numeru cewki, uwzględniająca wpływ nienasycenia nabiegunków, dla cewek pracujących w nasyceniu w $(r) = 1$ (dla $I_g \geq 285$ A), d – stała zależna od średnicy cewki, skorygowana, a, e – stałe niezależne od numeru cewki, b, c, f – stałe monotonicznie zmieniające się w zależności od numeru cewki.



Rys. 4. Różnice między wartościami zmierzonymi, i wyliczonymi ze wzoru 1 dla cewek, z którymi wykonano dokładne pomiary. Prąd cewek wynosi +400 A, $I_g = 170$ A

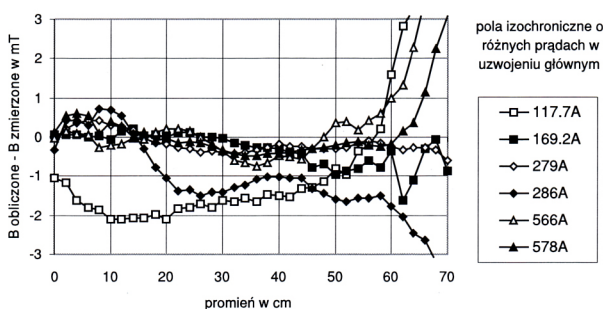
Wyliczanie średnich wartości pola

Znajomość indukcji średniej pola magnetycznego B na poszczególnych promieniach w zależności od prądu w uzwojeniu głównym oraz prądów w cewkach pozwala przewidzieć wypadkowe pole magnetyczne w komorze cyklotronu. Przyjęto liniową zależność wkładów w średnie pole magnetyczne:

Wartość średnia indukcji magnetycznej B liczona po okręgach o promieniu r może być liczona w każdym zakresie wartości prądu uzwojenia głównego z uproszczonego wzoru:

$$B(r) = B_g(r, I_g) + \sum_1^{20} \frac{I_{ck}}{400} * B_{ck}(r, n, 400, I_g) \quad (2)$$

gdzie: $B(r)$ – średnia indukcja sumaryczna na promieniu r , r – promień, I_g – prąd w uzwojeniu głównym, dla którego wykonujemy obliczenia, $B_g(r, I_g)$ – wielomian opisujący indukcję wytworzoną przez uzwojenie główne, n – numer cewki korekcyjnej, I_{ck} – prąd w cewce korekcyjnej, $B_{ck}(r, n, 400, I_g)$ – wkład n -tej cewki, na promieniu r , prąd w cewce = 400 A, przy I_g



Rys. 5. Różnice między B średnimi obliczonymi wg (2) a wartościami zmierzonymi dla tych samych prądów w cewkach.

Dokładność (2) wynika z porównania pól magnetycznych wyliczonych z polami zmierzonymi. Wszystkie pola użyte do porównania na rys. 5 były polami izochronicznymi, tj takimi, przy których cyklotron może pracować.

Wzór (2) uwzględnia nieliniowość pola magnetycznego B w zależności od prądu w uzwojeniu głównym $B_g(I_g, r)$ i zakłada liniowość wkładów pola od prądów w cewkach korekcyjnych. Można zrezygnować z założenia liniowości indukcji B i założyć liniowość amperozwoi od cewek korekcyjnych (A_{ck}) oraz uzwojenia głównego na poszczególnych promieniach – (2) wygląda wtedy:

$$B(r) = B_g(r, I_g + \sum_1^{20} A_{ck}(r, n, I_{ck}, I_g)) \quad (3)$$

gdzie: $A_{ck}(r, n, I_{ck}, I_g)$ jest przeliczonym na amperozwoje wkładem cewki. Błędy przy tak liczonym polu są zbliżone do błędów powstałych przy stosowaniu (2), który wybrano do dalszych obliczeń, ze względu na jego prostszą interpretację i łatwiejsze obliczenia.

Późniejsze próby akceleracji wiązki w polu magnetycznym, kształtowanym przez prądy wyliczone z podanych wzorów, wykazały zadowalającą dokładność wzorów.

Podsumowanie

Zastosowanie pomiarów niepełnych oraz obliczeń pozwoliło na 3-krotne skrócenie czasu pomiarów, przy zachowaniu wystarczającej dokładności wyników. Pozwoliło także zaoszczędzić energię elektryczną do zasilania cewek podczas pomiarów (moc samego zasilacza cewki uzwojenia głównego wynosi 300 kW).

Wyniki wykonanych pomiarów przesłano do Zjednoczonego Instytutu Badań Jądrowych w Dubnej w Rosji, gdzie na ich podstawie dokonano niezależnych obliczeń pól magnetycznych. Wykonane w Dubnej wyliczenia, za pomocą programu POISCR, również pozwalają obliczać pole magnetyczne na podstawie znajomości prądów w cewkach, obciążone są jednak większym błędem [4, 5]. Wyliczenia w ZIBJ wymagają dochodzenia do żądanych pól wewnątrz cyklotronu metodą kolejnych przybliżeń, weryfikowanych na każdym kroku przez wykonanie pomiarów. Tą metodą dobrano prądy do wytworzenia 6 różnych pól izochronicznych dla cyklotronu AIC-144 [6].

Wyliczenia przedstawione w niniejszej pracy, pozwalają w znacznej mierze zrezygnować z pomiarów kontrolnych. Jest to istotne, gdyż prace związane z przygotowaniem do pomiarów wiążą się z czasochłonnym demontażem wielu elementów cyklotronu. Ponadto przedstawione pomiary obejmują praktycznie cały zakres prądów we wszystkich cewkach, a więc możliwa jest też nastawa pól magnetycznych w cyklotronie na nieprzewidziane wcześniej zakresy pracy.

Bibliografia

1. Scharf W.: Akceleratory cząstek naładowanych. Zastosowanie w nauce i technice. Warszawa 1989. PWN.
2. Schwabe J.: Izochroniczny cyklotron AIC-144. Podstawowe parametry i możliwości zastosowania. Kraków 1990 Instytut Fizyki Jądrowej.
3. Worózców S. B. i in.: Formiowanie magnitnego polja izochronnego ciklotrona AIC – 144 s ispolzowaniem harmoniczjeskic obmotok. Dubna 2000 Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych.
4. Worózców S. B. i in.: Kompiutiernoje modielowanie magnitnego polja izochronnego ciklotrona AIC-144.. Dubna 2000 Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych.
5. Worózców S. B. i in.: Magnitnyie polja korriektiruszczic obmotok izochronnego ciklotrona AIC-144. Dubna 2000 Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych.
6. Worózców S. B. i in.: Formiowanie raboczic magnitnych poliej izochronnego ciklotrona AIC-144. Dubna 2000 Zjednoczony Instytut Badań Jądrowych.

Streszczenia artykułów naukowych

Pomiary pól magnetycznych w cyklotronie izochronicznym AIC- 144, Krzysztof Daniel — s. 28

Przedstawiono sposób wykonania złożonych pomiarów pól magnetycznych wewnątrz komory cyklotronu AIC-144 znajdującego się w Instytucie Fizyki Jądrowej w Krakowie. Szczególny nacisk położono na optymalizację pomiarów, ze względu na ich dużą czasochłonność i związane z tym znaczne koszty.

Magnetic fields measurements in the AIC-144 isochronous cyclotron, Krzysztof Daniel — p. 28

There are presented the method how to realize the complex measurements of magnetic fields in the AIC-144 cyclotron chamber, situated in the Nuclear Physics Institute in Cracow. The special emphasis is laid on measurements optimization, due to their time-consuming and high costs.