

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
Im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2010/

Kraków, listopad 2010

Raport Nr 2047/AP

PRZYSTOSOWYWANIE CYKLOTRONU AIC-144
DO PROTONOWEJ RADIOTERAPII OKA

CZĘŚĆ 6

Wpływ stabilności temperatury cyklotronu AIC-144
na stabilność natężenia wyprowadzanej wiązki protonów

K. Daniel, R. Grzybek, G. Janik, B. Lipka, W. Pyziół, M. Ruszel,
B. Sałach, J. Sulikowski, A. Sroka, R. Tarczoń, L. Włodek

Abstract:

The cyclotron AIC – 144 at the Institute of Nuclear Physics Polish Academy of Sciences (IFJ PAN) in Krakow has been dedicated to the proton therapy of the protons eye tumor. In this application, the essential parameter is the stability of the proton beam current.

The paper describes the relationship between the stability of the proton beam current and temperature of the cooling water supplied to various cyclotron parts which shape the beam. We noticed the dependence on the temperature itself and on the temperature gradient. Generally, better stability of the proton beam current, faster stabilization of the set beam parameters, better reproducibility, as well as less energy consumption are ensured at lower temperatures.

Spis treści

| | |
|--|----|
| 1. Znaczenie stabilizacji temperatury w cyklotronie | 2 |
| 2. Modernizacja układu chłodzenia | 2 |
| 3. Wpływ stabilizacji temperatury na stabilność wiązki protonów | 4 |
| 3.1. Metoda pomiaru stabilności prądu wiązki protonów | 6 |
| 3.2. Praca ze stabilną temperaturą wody chłodzącej | 6 |
| 3.3. Praca przy złej stabilizacji temperatury wody chłodzącej | 9 |
| 3.4. Szczególne przypadki stabilizacji temperatury cyklotronu | 12 |
| 3.5. Podsumowanie | 16 |
| 4. Zamierzenia dążące do poprawy komfortu termicznego cyklotronu. | 17 |
| 5. Literatura | 18 |

1. Znaczenie stabilizacji temperatury w cyklotronie

Cyklotron AIC-144 znajdujący się w Instytucie Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie był przez wiele lat wykorzystywany do produkcji izotopów. Wymagania stawiane stabilności akcelerowanej wiązce jonów były bardzo łagodne, tolerowana była praca z dużymi wahaniami prądu wiązki. Najczęściej konieczne było naświetlenie próbki zadanym ładunkiem jonów (iloczyn prądu wiązki jonów i okresu naświetlania), oraz nie przekraczanie wartości granicznej prądu wiązki mogącej uszkodzić (przegrzać) próbkę.

Sytuacja uległa wyraźnej zmianie podczas przystosowywania cyklotronu do przeprowadzania terapii protonowej oka [1], [2], [3]. Nowe przeznaczenie cyklotronu zaostriło wymagania dotyczące stabilności prądu wyprowadzonej wiązki protonów. Pracownicy Działu Cyklotronowego IFJ PAN określili i krótko opisali [4] parametry wpływające na stabilność wiązki protonów:

- a. pracę źródła jonów
- b. zmienność parametrów sieci zasilającej
- c. zmienność temperatury podstawowych podzespołów cyklotronu
- d. temperaturę czynnika chłodzącego

Niniejszy raport omawia stabilność prądu wiązki protonów, w zależności od zmiennej temperatury podzespołów cyklotronu i czynnika chłodzącego.

2. Modernizacja układu chłodzenia

Cyklotron jest wielkogabarytowym, złożonym urządzeniem, którego podzespoły pobierają znaczną moc (Tab. 1). Podana w tabeli wartość temperatury maksymalnej wody chłodzącej wynosząca 35 °C jest maksymalną temperaturą określoną przez producentów niektórych chłodzonych podzespołów cyklotronu. Okres stabilizacji temperatury poszczególnych podzespołów jest długotrwały i niejednakowy, a zmiana temperatury znaczna

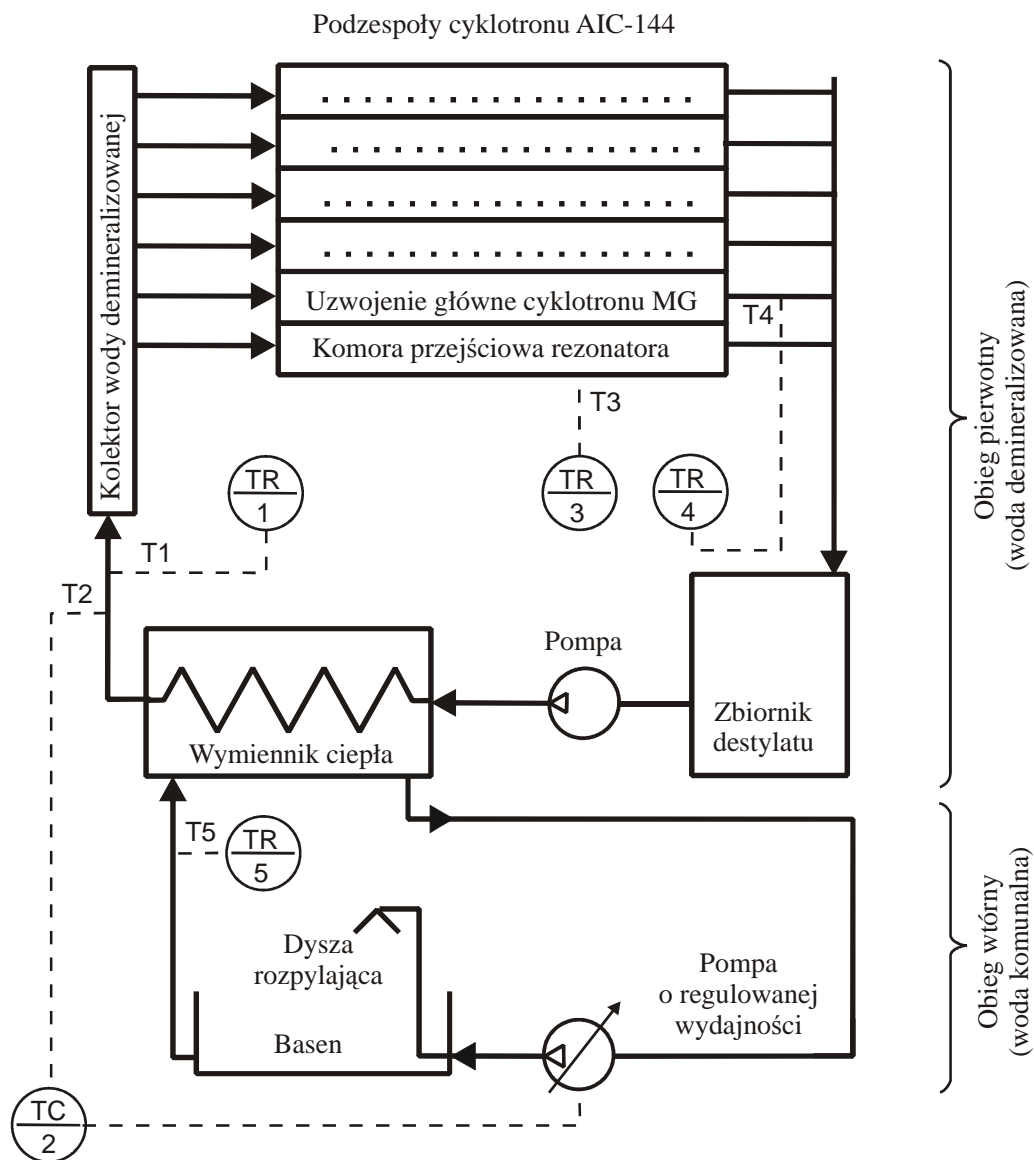
(o około 20 °C). W okresie stabilizacji temperatury, podzespoły i ich części składowe ulegają mikroprzemieszczeniom spowodowanym rozszerzalnością cieplną. Ulega zmianie geometria układu rezonansowego, położenie źródła względem centrum komory akceleracji, geometria złożonych układów służących do wyprowadzenia wiązki protonów na zewnątrz komory akceleracji (deflektory i kanały magnetyczne) oraz wielkość szczeliny w magnesie głównym i tym samym parametry pola magnetycznego [5]. Wszystkie te mikroprzemieszczenia, mają wpływ na pogorszenie stabilności wyprowadzonej wiązki przyśpieszonych protonów, i z tej przyczyny konieczne stało podjęcie czynności zmierzających do skrócenia okresu stabilizacji temperatury podzespołów cyklotronu.

Tabela 1. Wybrane parametry związane z układem chłodzenia

| | | |
|---|---|--------------------|
| 1 | Moc chłodzonych wodą urządzeń cyklotronu | 372 kW |
| 2 | w tym: | |
| | Uzwojenie magnesu głównego wraz zasilaczem | 227 kW |
| | Uzwojenia cewek korekcyjnych wraz z zasilaczami | 57 kW |
| | Magnes zakrzywiający wyprowadzoną wiązkę protonów wraz z zasilaczem | 26 kW |
| | Układ próżniowy | 12 kW |
| | Generator wysokiej częstotliwości z obciążeniem | 50 kW |
| 3 | Zakres nastaw temperatury wody chłodzącej T2 | 20 - 35 °C |
| 4 | Optymalna temperatura wody chłodzącej T1 | 21 - 22 °C |
| 5 | Różnica temperatur na wymienniku (T1 – T5) | 4 - 5 °C |
| 6 | Pojemność basenu | 500 m ³ |

W celu zapewnienia stabilnej pracy cyklotronu zmodernizowano istniejący układ chłodzenia cyklotronu [6], [7]. Wprowadzono stabilizację temperatury czynnika chłodzącego bezpośrednio podzespoły cyklotronu oraz monitorowanie temperatur w kluczowych miejscach układu (rys. 1, tab. 1). Mierzone i rejestrowane są między innymi:

- T1– Temperatura wody chłodzącej w obwodzie pierwotnym, czyli temperatura czynnika chłodzącego podzespoły cyklotronu. Wielkość ta jest rejestrowana.
- T2 – Temperatura wody chłodzącej w obwodzie pierwotnym. Temperatury T1 i T2 są praktycznie jednakowe. wielkość T2 jest stabilizowana.
- T3 – Temperatura rezonatora – dokładnie jest to temperatura komory przejściowej łączącej główny moduł rezonatora z komorą akceleracji, komora przejściowa jest częścią układu rezonansowego. Wielkość ta jest rejestrowana.
- T4 – Temperatura uzwojenia magnesu głównego – dokładnie jest to temperatura czynnika chłodzącego obwodu pierwotnego po przepłynięciu przez uzwojenie główne cyklotronu. Wielkość ta jest rejestrowana.
- T5 – Temperatura czynnika chłodzącego obwodu wtórnego, w miejscu wejścia do wymiennika ciepła. Podczas pracy układu chłodzenia, temperatura T5 jest zbliżona do temperatury wody w basenie. Wielkość ta jest rejestrowana.



Rys. 1 Zmodernizowany układ chłodzenia cyklotronu. Modernizacja miała charakter oszczędnościowy, polegała na dodaniu układu stabilizacji temperatury (TC) i na wprowadzeniu rejestracji temperatur (TR) w kluczowych miejscach. Na szkicu zaznaczono tylko te urządzenia i elementy pomiarów i automatyki, które są omawiane w raporcie.

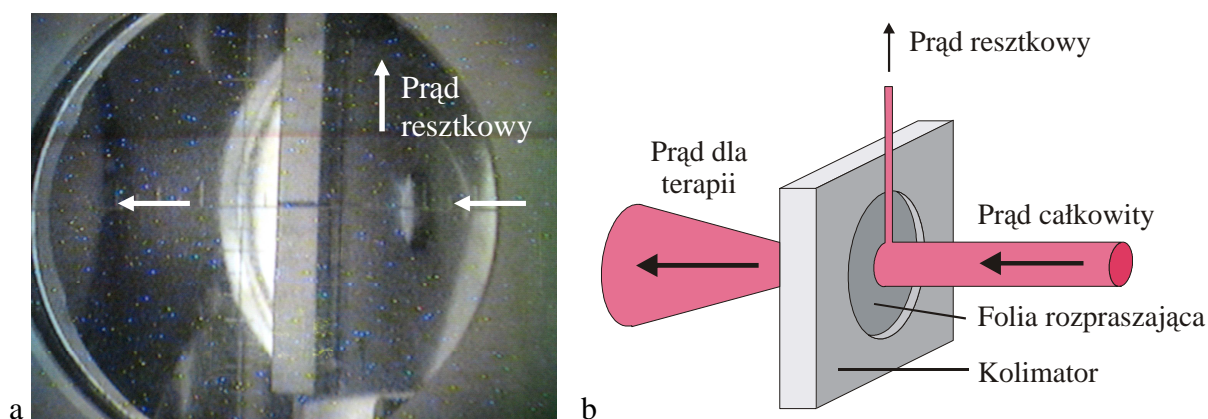
3. Wpływ stabilizacji temperatury na stabilność wiązki protonów

Zmodernizowany układ chłodzenia cyklotronu spełnił stawiane oczekiwania, przez zapewnienie stałej temperatury wody chłodzącej poszczególne podzespoły cyklotronu (T1 na rys. 1). Jednak pełniejszą ocenę pracy układu przeprowadzono dopiero na podstawie wykonanych pomiarów stabilności prądów wiązki protonów podczas pracy cyklotronu na potrzeby terapii. Do rozważań wybrano okresy z charakterystycznymi przypadkami pracy układu chłodzenia i określono stabilność wiązki protonów, akcelerowanej przez cyklotron, podczas pracy w tych okresach.

3.1. Metoda pomiaru stabilności prądu wiązki protonów

Do analizy stabilności wiązki protonów wybrano pomiary wykonane w dniach, w których występowała stabilizacja temperatury: poprawna lub charakteryzująca się interesującą nas nieprawidłowością. Wyboru dokonano z ostatniego okresu czasu przed pisaniem raportu oraz z okresu, kiedy występowały najgorętsze dni. Dni, w których stabilizacja temperatury była nieprawidłowa, zawierały się w dłuższym okresie: od 20 kwietnia do 1 października. Przy wyborze odrzucano dni, w których wyprowadzana wiązka była przeznaczona do innych celów niż terapia, lub ilość ekspozycji wiązki dla terapii była niewielka (poniżej 15). Powodem tej ostatniej selekcji były odpowiednio: niskie wymagania odnośnie stabilności przez innych odbiorców lub zbyt mała statystyka potrzebna do wyciągnięcia wiarygodnych wniosków. Obliczenia przeprowadzono dla wszystkich ekspozycji wiązki dostarczonych na potrzeby terapii w wybranym dniu, jeśli trwały one, co najmniej 30 s. Pominęto także długotrwałe ekspozycje wykorzystywane do wzrokowego sprawdzania geometrii wiązki protonów na tarczach luminescencyjnych.

Oceny stabilności wiązki protonów dokonano na danych otrzymanych z pomiarów prądu resztkowego. Prąd resztkowy jest prądem, jaki zostaje zatrzymany na folii rozpraszającej wraz z kolimatorem (rys. 2). Jest on, z wystarczającą dokładnością, proporcjonalny do prądu wiązki protonów dostarczanej na stanowisko terapii i tym samym jego stabilność jest równa stabilności prądu wiązki protonów dostarczanej dla terapii. Poprawność przyjęcia założenia o proporcjonalności obu prądów, potwierdziły dokonane pomiary w wybranych okresach. Zmiana ilorazu prądu resztkowego i prądu wiązki opuszczającej cyklotron zawierała się w granicach od -0.04 do -0.01 % na min., wobec dryftu prądu wiązki dla terapii wynoszącej kilka lub kilkanaście % na min.



Rys. 2 Folia rozpraszająca z kolimatorem.

a. Widok folii rozpraszającej z kolimatorem podczas przesyłania wiązki protonów. Protony przepływające z prawej strony są przepuszczane przez widoczną, okrągłą folię rozpraszającą na lewą stronę. Autorzy mierzyli prąd resztkowy zatrzymywany przez folię rozpraszającą i widoczny kolimator.

b. Schemat obrazujący przepływ wiązki protonów przez folię rozpraszającą i kolimator oraz zbierania prądu resztkowego za pośrednictwem folii i kolimatora.

Wszystkie pomiary wykonano przy pomocy miernika 6485 firmy Keithley i oprogramowania Miernik [4], [8], [9]. Czas pomiaru wynosił 120 ms, pomiary wykorzystane do kalkulacji były wykonywane i rejestrowane, co okres 4 s.

Jako parametry opisujące stabilność prądu wiązki protonów, przyjęto:

- odchylenie standardowe pomiarów prądu wiązki wyrażone w % wartości średniej prądu (odchylenie st. I/I_{sr})
- zmierzona wartość minimalna prądu wiązki protonów wyrażona w % wartości średniej prądu ($I_{\text{min}}/I_{\text{sr}}$)
- zmierzona wartość maksymalna prądu wiązki protonów wyrażona w % wartości średniej prądu ($I_{\text{max}}/I_{\text{sr}}$)
- trend prądu wiązki protonów wyrażony w % wartości średniej prądu (trend I/I_{sr})

Stabilność wiązki protonów liczono tylko w tych okresach czasu, w których wiązka była odbierana przez obsługę zajmująca się terapią, bez względu na sposób wykorzystania wiązki. W dalszej części raportu, wiązka protonów wysłana na potrzeby terapii, w okresie od jej pojawienia się do zaniku będzie nazywana ekspozycją wiązki protonów lub w skrócie ekspozycją.

Pomijano pierwszy pomiar prądu dla danej ekspozycji, jeśli ten pomiar różnił się znacznie od pozostałych (był mniejszy). Prawdopodobnie pierwszy pomiar mógł być wykonany w trakcie otwierania się mechanicznego zaworu na trasie wiązki protonów lub mógł być błędem pomiarowym przy przełączaniu zakresu miernika.

Pierwsze analizowane pomiary, wykonane w dniu 2010-08-21, opisano dokładniej z podaniem wartości obliczeń. Opis dalszych, w celu zwiększenia przejrzystości raportu, ograniczono do prezentacji graficznej wyników i przedstawieniu wniosków z wykonanych obliczeń.

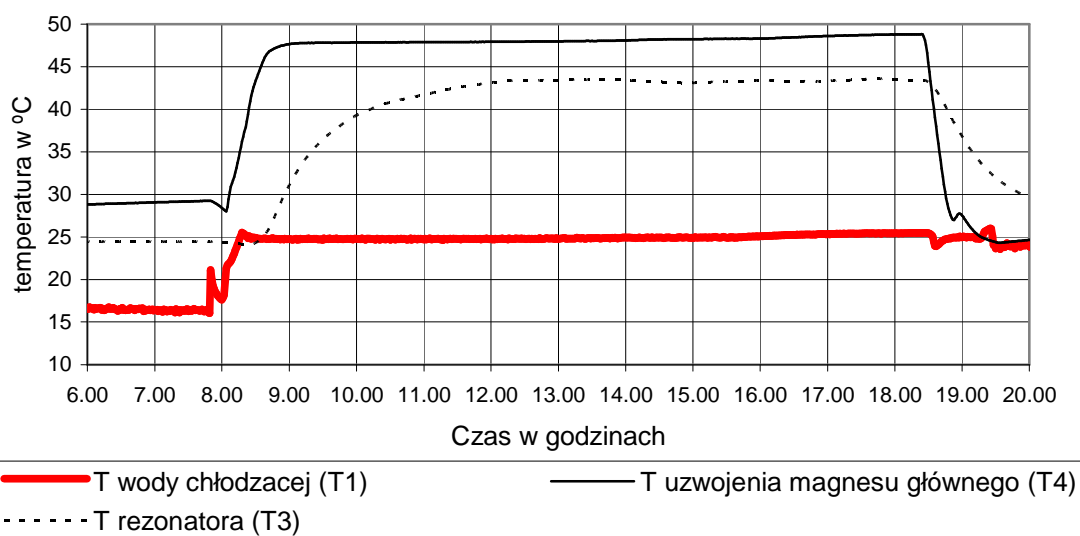
3.2. Praca ze stabilną temperaturą wody chłodzącej

Do obliczeń wybrano pomiary z dnia 21 września 2010 r. Praca cyklotronu w tym dniu była ze stałą temperaturą wody chłodzącej, równą około 25 °C. Na rys. 3 przedstawiono cały okres pracy cyklotronu od godziny 8:30 (prąd magnezu głównego załączono wcześniej, o 8:00) do wyłączenia o 18:25. Widoczne przeregulowania temperatury wody chłodzącej (T1) nie mają żadnego znaczenia, ponieważ okres pracy cyklotronu z wymaganą stabilnością zaczyna się 1 – 2 godziny po załączeniu. Od godziny 16:00 następuje bardzo wolny wzrost temperatury ponad wartość zadaną, i o godzinie 18:30 wynosi on niecałe 0.5 °C, wzrost ten nie ma istotnego wpływu na stabilność wiązki.

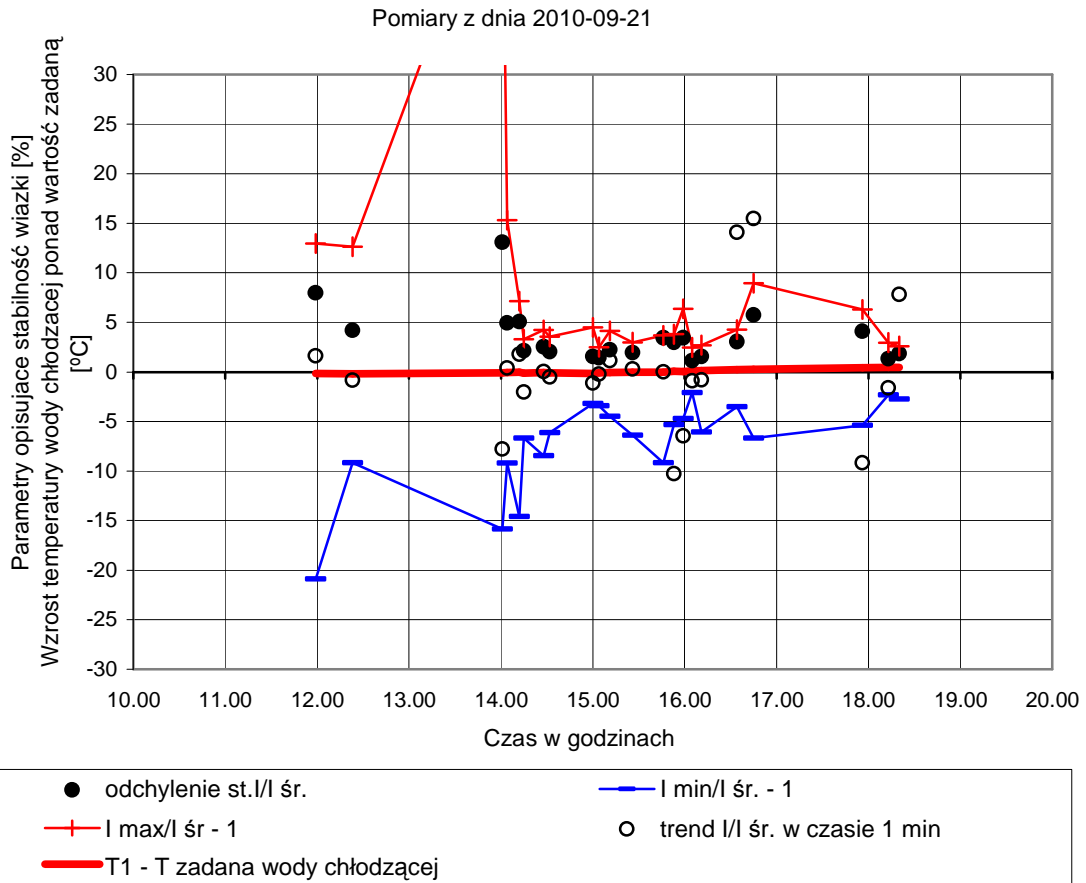
Tabela 2. Stabilność prądu wiązki w impulsach zrealizowanych 2010-09-21

| Początek pomiaru | Okres czasu ekspozycji | I średnie | odchylenie st. I/I śr. | I min/I śr. - 1 | I max/I śr - 1 | trend I/I śr. w 1 min | T1 - T zadane wody chłodzącej | T1 |
|------------------|------------------------|-----------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------------|-------------------------------|-------|
| H:m | s | nA | % | % | % | % | °C | °C |
| 11:59 | 11:59 | 1.94 | 7.96 | -20.88 | 12.96 | 1.62 | -0.15 | 24.85 |
| 12:23 | 12:23 | 3.00 | 4.19 | -9.16 | 12.62 | -0.84 | -0.19 | 24.81 |
| 14:01 | 14:01 | 2.59 | 13.09 | -15.88 | 53.23 | -7.79 | -0.07 | 24.93 |
| 14:04 | 14:04 | 1.99 | 4.93 | -9.21 | 15.32 | 0.41 | -0.06 | 24.94 |
| 14:12 | 14:12 | 3.52 | 5.07 | -14.59 | 7.14 | 1.80 | -0.03 | 24.97 |
| 14:15 | 14:15 | 3.50 | 2.17 | -6.69 | 3.27 | -2.04 | -0.12 | 24.88 |
| 14:28 | 14:28 | 3.32 | 2.54 | -8.46 | 4.22 | 0.04 | -0.05 | 24.95 |
| 14:32 | 14:32 | 3.30 | 2.06 | -6.13 | 3.55 | -0.49 | -0.09 | 24.91 |
| 15:00 | 15:00 | 3.38 | 1.57 | -3.19 | 4.49 | -1.12 | -0.16 | 24.84 |
| 15:04 | 15:04 | 3.30 | 1.45 | -3.40 | 2.51 | -0.21 | -0.08 | 24.92 |
| 15:11 | 15:11 | 4.68 | 2.23 | -4.49 | 4.12 | 1.14 | -0.06 | 24.94 |
| 15:26 | 15:26 | 4.48 | 1.96 | -6.39 | 2.99 | 0.29 | -0.03 | 24.97 |
| 15:46 | 15:46 | 4.24 | 3.43 | -9.16 | 3.68 | 0.01 | -0.02 | 24.98 |
| 15:53 | 15:53 | 4.30 | 3.00 | -5.31 | 3.80 | -10.26 | 0.07 | 25.07 |
| 15:59 | 15:59 | 4.48 | 3.45 | -4.72 | 6.35 | -6.44 | 0.06 | 25.06 |
| 16:05 | 16:05 | 4.41 | 1.16 | -2.09 | 2.49 | -0.89 | 0.1 | 25.1 |
| 16:11 | 16:11 | 4.25 | 1.58 | -6.07 | 2.69 | -0.81 | 0.15 | 25.15 |
| 16:34 | 16:34 | 3.84 | 3.05 | -3.50 | 4.24 | 14.08 | 0.25 | 25.25 |
| 16:45 | 16:45 | 3.33 | 5.75 | -6.68 | 8.95 | 15.48 | 0.29 | 25.29 |
| 17:56 | 17:56 | 3.80 | 4.08 | -5.38 | 6.30 | -9.16 | 0.43 | 25.43 |
| 18:13 | 18:13 | 3.80 | 1.34 | -2.31 | 2.94 | -1.60 | 0.48 | 25.48 |
| 18:20 | 18:20 | 9.22 | 1.87 | -2.74 | 2.60 | 7.82 | 0.46 | 25.46 |

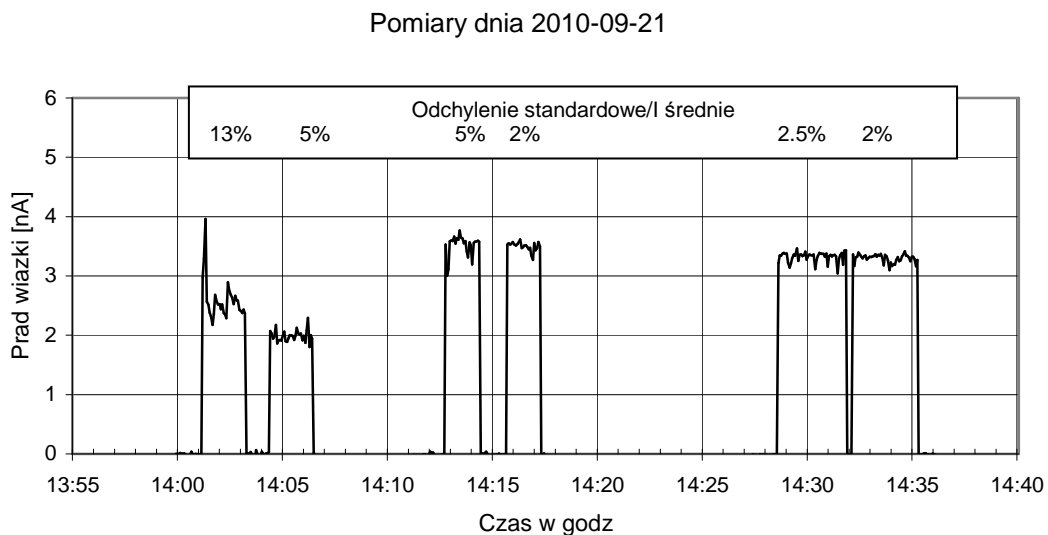
Pomiary dnia 2010-09-21



Rys. 3 Praca układu chłodzenia ze stabilną temperaturą wody chłodzącej.

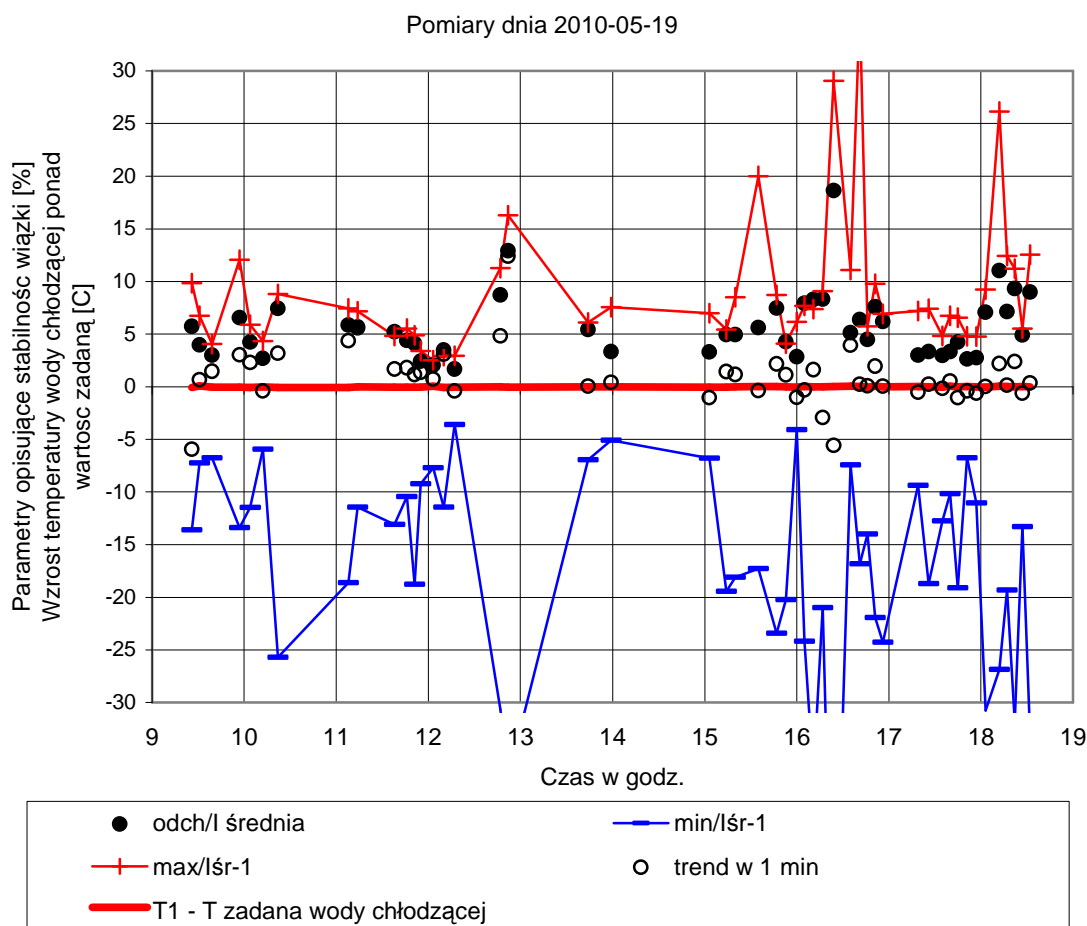


Rys. 4 Praca układu chłodzenia ze stabilną temperaturą wody chłodzącej. Parametry opisujące stabilność ekspozycji wiązki protonów doprowadzonych na stanowisko terapii.



Rys. 5 Praca układu chłodzenia ze stabilną temperaturą wody chłodzącej. Kształt wybranych sześciu ekspozycji prądu wiązki protonów (dostarczonych na stanowisko terapii między 14:00 a 14:35).

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń parametrów stabilności 22 impulsów wiązki protonów, i zobrazowano je graficznie na rys. 4. Dla większości impulsów (18 razy) wyliczone odchylenie standardowe wynosi poniżej 5% wartości średniej i raz przekracza 10%. Rysunek 5 pokazuje kształt kilku przebiegów impulsów wiązki (ekspozycji), w tym impulsu najmniej stabilnego, z parusekundowym przeregulowaniem wynoszącym maksymalnie 53% wartości średniej.



Rys. 6 Praca układu chłodzenia ze stabilną temperaturą wody chłodzącej.

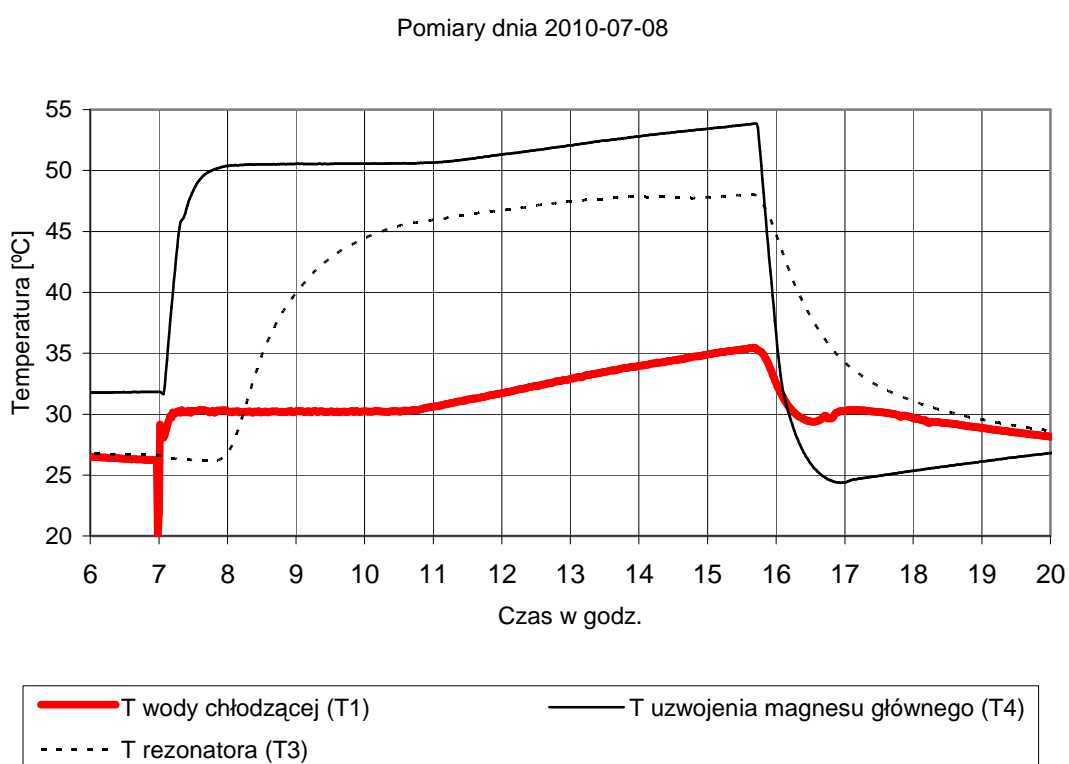
Parametry opisujące stabilność ekspozycji wiązki protonów doprowadzonych na stanowisko terapii.

Podobne stabilności wiązki protonów zaobserwowano w innych dniach, w których temperatura wody chłodzącej była stabilna. Na rysunku 6 pokazano stabilność ekspozycji wiązki protonów zmierzoną 2010-05-19: woda chłodząca (T1) przez cały czas pracy cyklotronu wynosiła 26.7 C. W tym dniu podano dla potrzeb terapii 49 ekspozycji, z tego 25 miało odchylenie standardowe poniżej 5%, a 3 razy powyżej 10% wartości średniej.

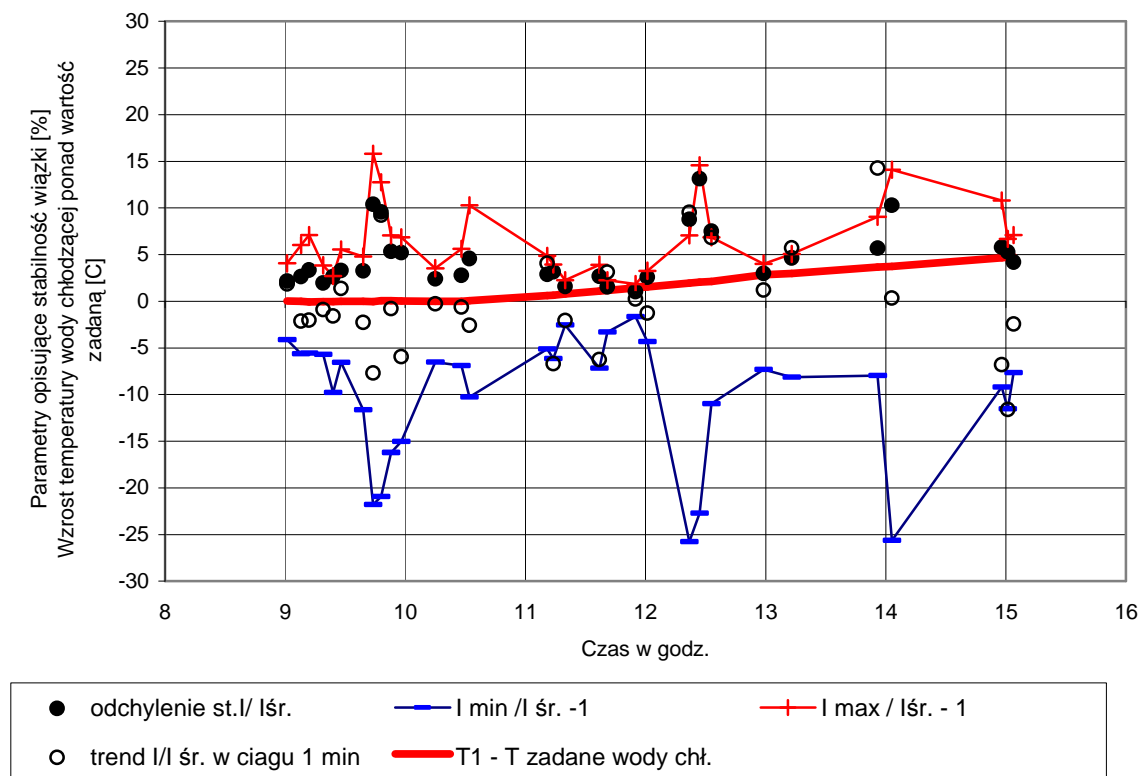
Przedstawione pomiary i przeprowadzone obliczenia pozwalają stwierdzić, że zapewnienie stałej temperatury czynnika chłodzącego pozwala na otrzymanie wiązki protonów o dobrej stabilności. Większość dostarczonych ekspozycji ma odchylenie standardowe poniżej 5% wartości średniej.

3.3. Praca przy złej stabilizacji temperatury wody chłodzącej

Jako przykład pracy cyklotronu przy złej stabilizacji termicznej może posłużyć praca w dniu 2010-07-08. W tym dniu układ chłodzenia nie był w stanie wychładzać wody chłodzącej do zadanej temperatury, nastawionej na około 30.2 °C. Ten stan był spowodowany wysoką temperaturą powietrza na zewnątrz i silną zależnością wydajności układu chłodzenia od warunków atmosferycznych. Na rys. 7 wyraźnie widać niekontrolowany wzrost temperatury po godzinie 11 i tym samym wzrost temperatury T3 i T4. Kilkanaście minut przed godziną 16 woda osiągnęła maksymalną dopuszczalną temperaturę i cyklotron musiał być wyłączony.



Rys. 7 Praca układu chłodzenia przy złej stabilizacji temperatury wody chłodzącej.



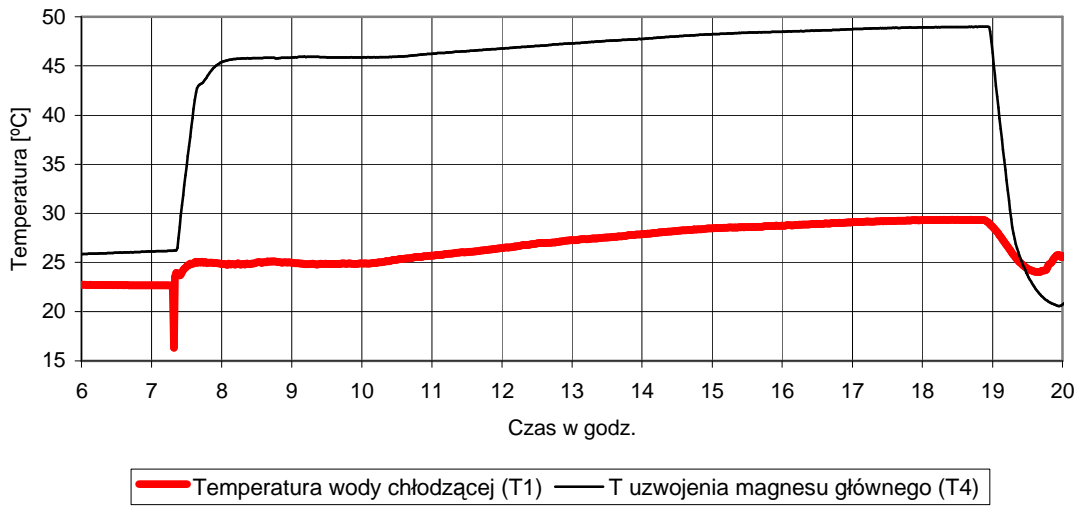
Rys. 8 Praca układu chłodzenia przy złej stabilizacji temperatury wody chłodzącej. Parametry opisujące stabilność ekspozycji wiązki protonów doprowadzonych na stanowisko terapii.

Na rysunku 8 pokazano jak wyglądała stabilność wiązki protonów w tym dniu. Stabilność prądu wiązki protonów uległa gwałtownemu pogorszeniu od godziny 12:10. Różnica półtorej godziny między początkiem wzrostu temperatury T1, a początkiem mniej stabilnej pracy wynika z bezwładności cieplnej rdzenia magnesu i komory akceleracji. W okresie do godziny 12:10 dostarczono 21 ekspozycji na potrzeby terapii, z czego 17 miało odchylenie standardowe poniżej 5% wartości średniej, a po godzinie 12:10 na 10 ekspozycji tylko 3 ekspozycje.

Znaleziono jeszcze jeden podobny przypadek, wystąpił on w dniu 2010-04-27; wyniki pomiarów i obliczeń z tego dnia przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Najbardziej zmienna temperatura elementów cyklotronu wystąpiła pomiędzy godzinami 12 a 17, i w tym okresie pogorszyła się też stabilność wiązki protonów: na 13 dostarczonych ekspozycji tylko 5 miało odchylenie standardowe poniżej 5% wartości średniej, w pozostałych okresach czasu (przed godziną 12 i po 17) 13 ekspozycji miało odchylenie standardowe poniżej 5% wartości średniej na 18 wysłanych.

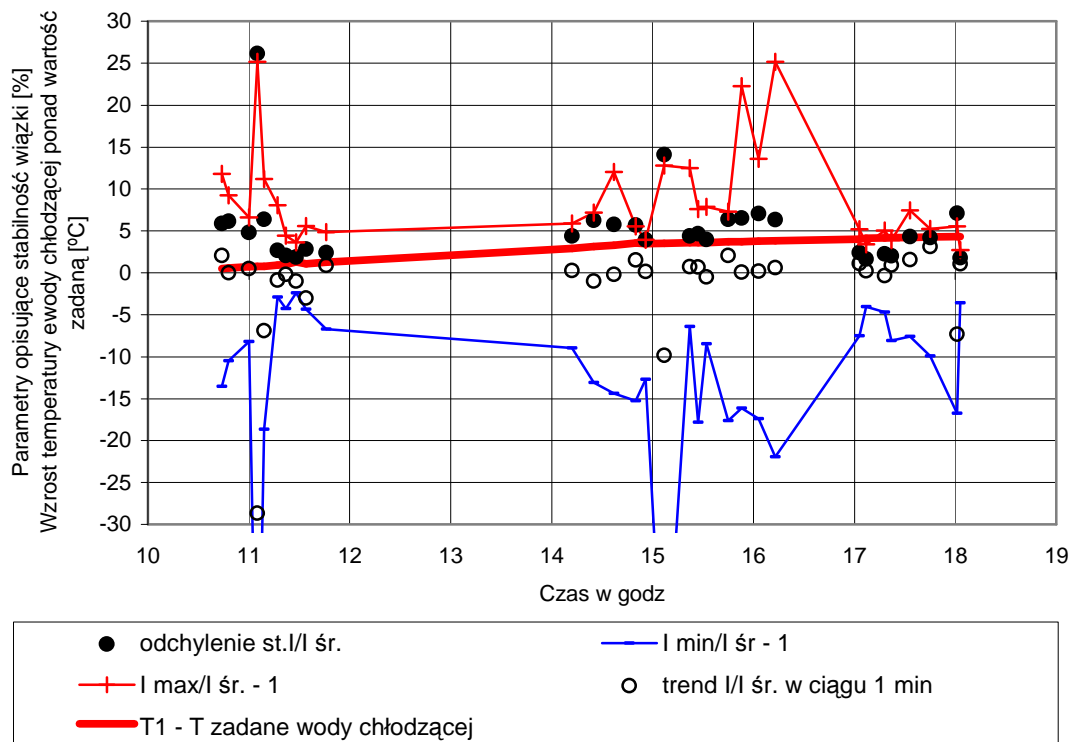
Przedstawione wyniki potwierdzają możliwość otrzymywania stabilnej wiązki protonów przy utrzymaniu stałej temperatury wody chłodzącej i pogorszenie stabilności wiązki w okresach czasu, kiedy temperatury wody ulega zmianie.

Pomiary dnia 2010-04-27



Rys. 9 Praca układu chłodzenia przy złej stabilizacji temperatury wody chłodzącej. Temperatuzy kluczowych elementów.

Pomiary 2010-04-27

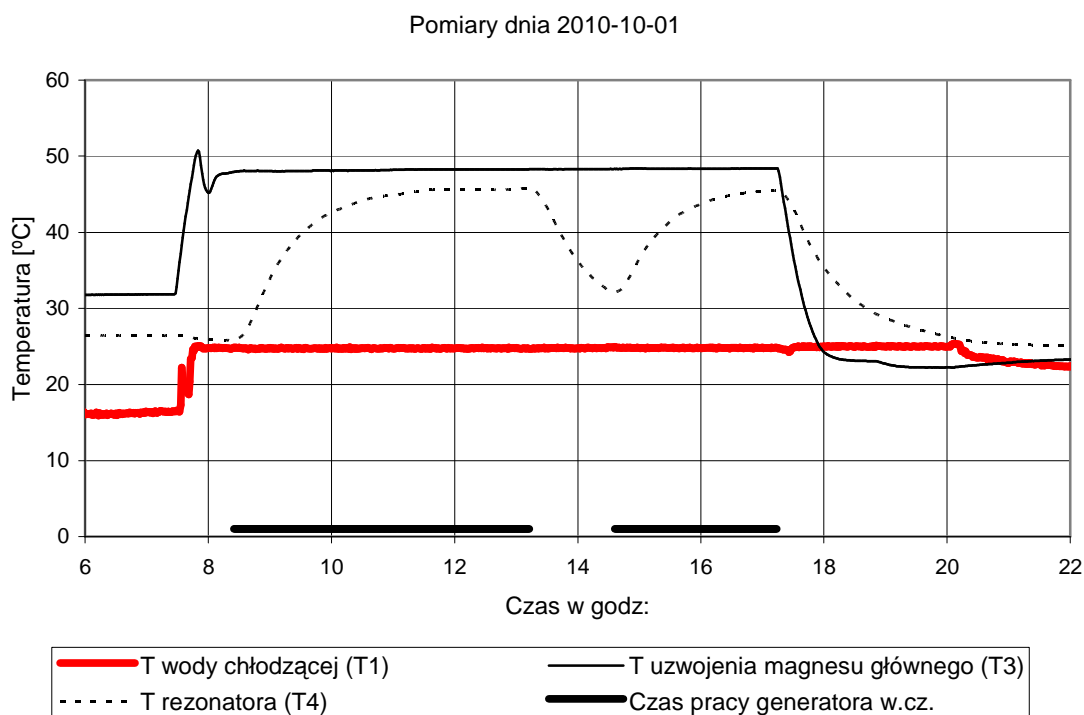


Rys. 10 Praca układu chłodzenia przy złej stabilizacji temperatury wody chłodzącej. Parametry opisujące stabilność ekspozycji wiązki protonów doprowadzonych na stanowisko terapii.

3.4. Szczególne przypadki stabilizacji temperatury cyklotronu

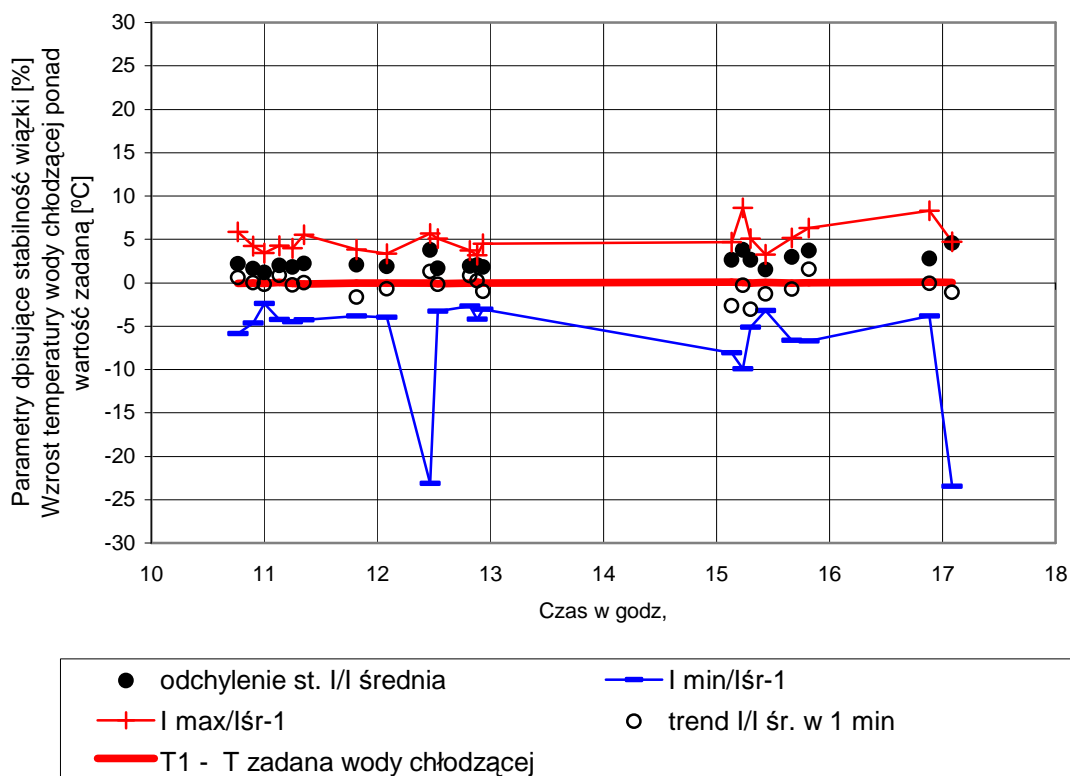
Rozpatrzono trzy szczególne przypadki pracy układu chłodzenia i przeanalizowano jak wpływają one na stabilność wiązki protonów kierowanej na stanowisko terapii. Są to: praca z chwilowym odłączeniem obciążenia generatora wysokiej częstotliwości (w.cz.), ze zmniejszonym poborem mocy o około 25 kW, praca z chwilowym wyłączeniem zasilacza magnesu głównego o mocy ponad 200 kW i praca ze stabilizacją temperatury, ustawionej na bardzo wysoką wartość zadaną.

Pierwszy przypadek wydarzył się, między innymi, dnia 2010-10-01. Podczas pracy miało miejsce wyłączenie generatora w.cz. między godzinami 12:32, a 14:36, wyłączenie było zamierzone, wobec przewidywanej przerwy w zapotrzebowaniu na wiązkę protonów. Rysunki 11 i 12 przedstawiają ten przypadek, widać na nich brak istotnej zmiany stabilności wiązki w okresie następującym po ponownym włączeniu generatora. W tym dniu dostarczono 21 ekspozycji (13 przed wyłączeniem i 8 po ponownym załączeniu), wszystkie miały odchylenie standardowe poniżej 5% wartości średniej.



Rys. 11 Praca układu chłodzenia z chwilowym wyłączeniem generatora w.cz.

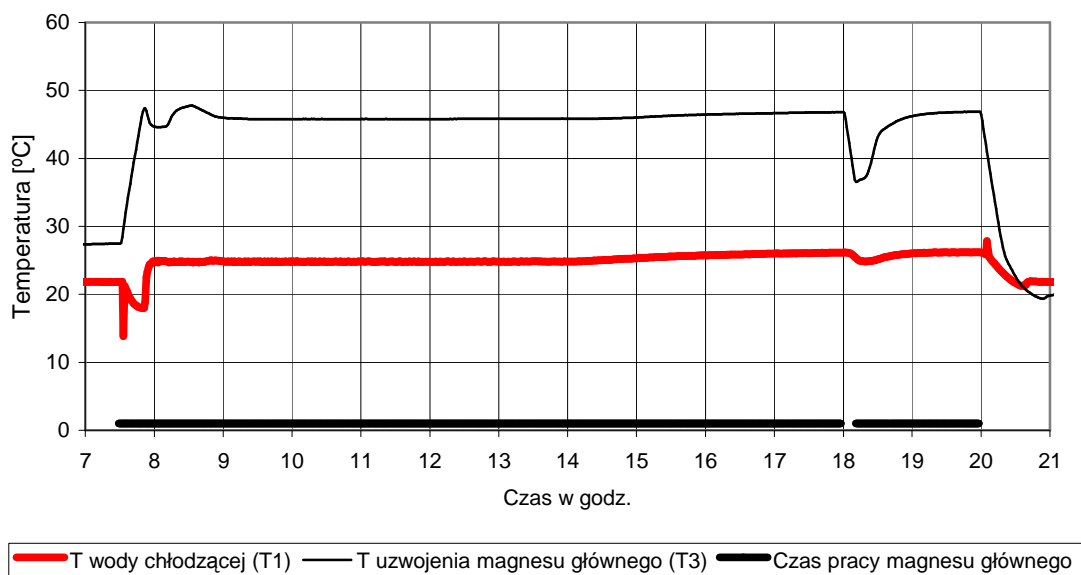
Pomiar dnia 2010-10-01



Rys. 12 Praca układu chłodzenia z chwilowym wyłączeniem generatora w.cz. Parametry opisujące stabilność ekspozycji wiązki protonów doprowadzonych na stanowisko terapii.

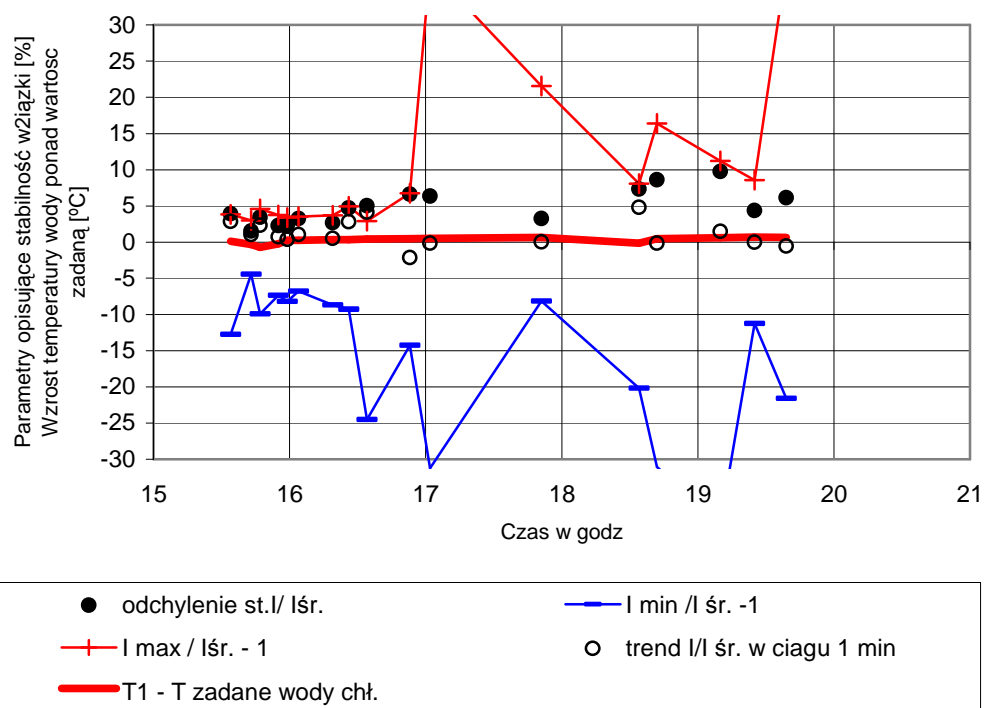
W dniu 2010-04-20, około godziny 18 nastąpiło awaryjne wyłączenie zasilacza magnesu głównego, a kilkanaście minut później ponowne załączenie i przywrócenie nastawy prądu. Zdarzenie to pozwoliło na obserwację wpływu chwilowego wyłączenia zasilacza magnesu głównego na temperaturę kluczowych elementów (rys. 13) i stabilność prądu wiązki protonów (rys. 14). Stwierdzono wyraźne pogorszenie stabilności prądu wiązki protonów w impulsie dostarczonym na stanowisko terapii: przed wyłączeniem zasilacza 9 na 12 ekspozycji miało odchylenie standardowe poniżej 5% wartości średniej, po ponownym załączeniu zasilacza tylko 1 na 5 ekspozycji.

Pomiary dnia 2010-04-20



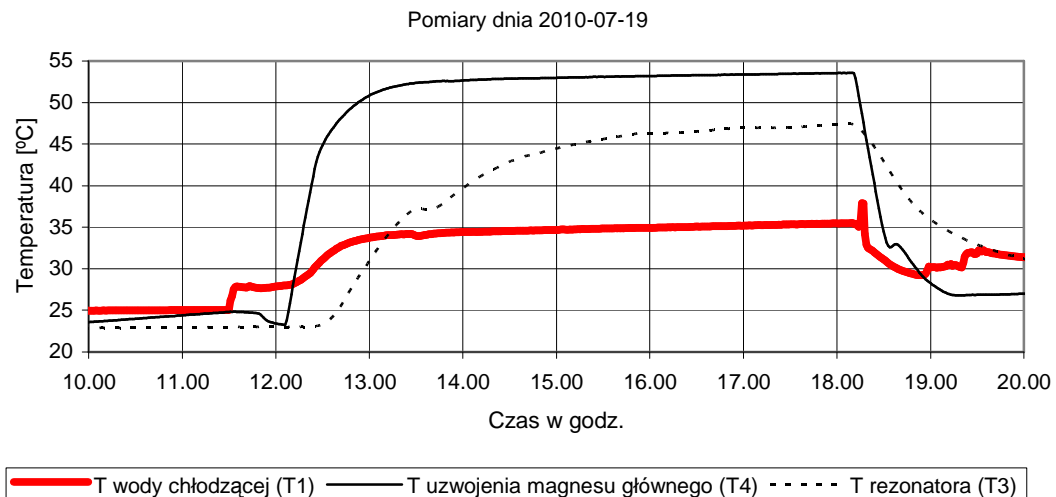
Rys. 13 Praca układu chłodzenia z chwilowym wyłączeniem zasilacza magnesu głównego.

Pomiary dnia 2010-04-20

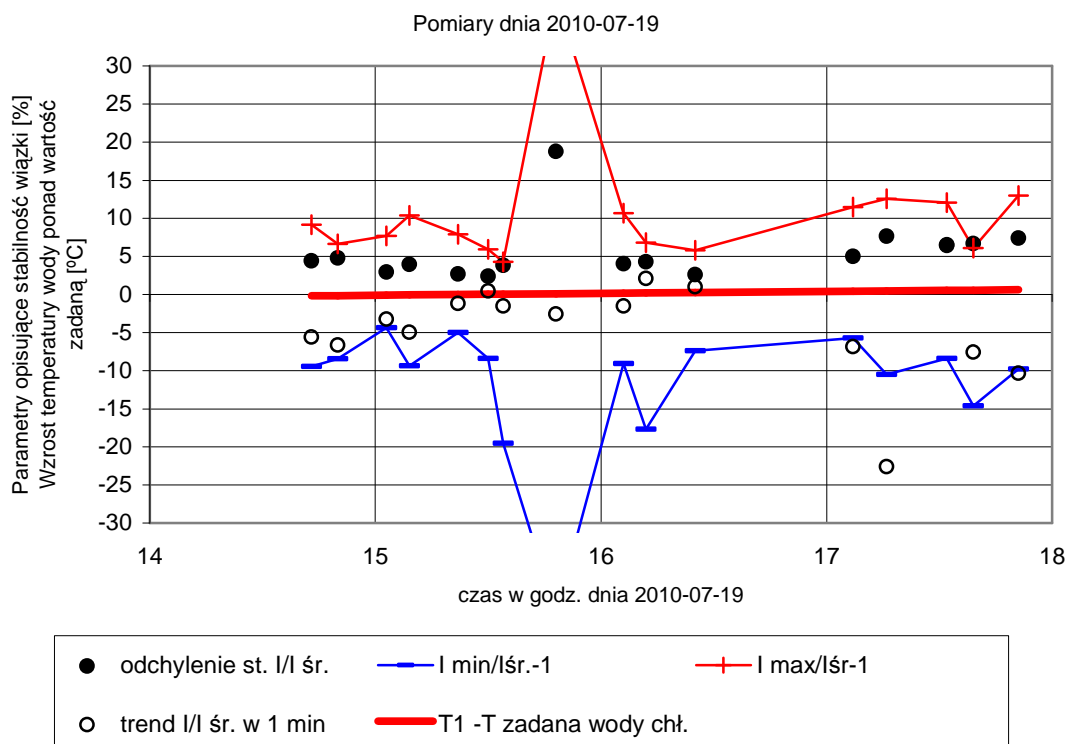


Rys. 14 Praca układu chłodzenia z chwilowym zasilacza magnesu głównego. Parametry opisujące stabilność ekspozycji wiązki protonów doprowadzonych na stanowisko terapii.

Na zakończenie przeglądu zbadano stabilność wiązki protonów przy pracy z ustabilizowaną temperaturą czynnika chłodzącego, ale na maksymalnym dopuszczalnym poziomie. Taka praca odbyła się w dniu 2010-07-19, temperatura wody T1 do chłodzenia cyklotronu i podłączonych zasilaczy wynosiła około 35 C. Pomiary i obliczenia przedstawiono na rys. 15 i 16. W tym dniu zrealizowano dla terapii 16 ekspozycji, z tego 11 miało odchylenie standardowe poniżej 5% wartości średniej. Tak przedstawione wyniki nie potwierdzają subiektywnego odczucia operatorów cyklotronu, iż ze wzrostem temperatury wody chłodzącej znacząco pogarsza się stabilność wiązki protonów.



Rys. 15 Praca układu chłodzenia ze stabilizacją temperatury na wysokim poziomie..



Rys. 16 Praca układu chłodzenia ze stabilizacją temperatury na wysokim poziomie. Parametry opisujące stabilność ekspozycji wiązki protonów doprowadzonych na stanowisko terapii.

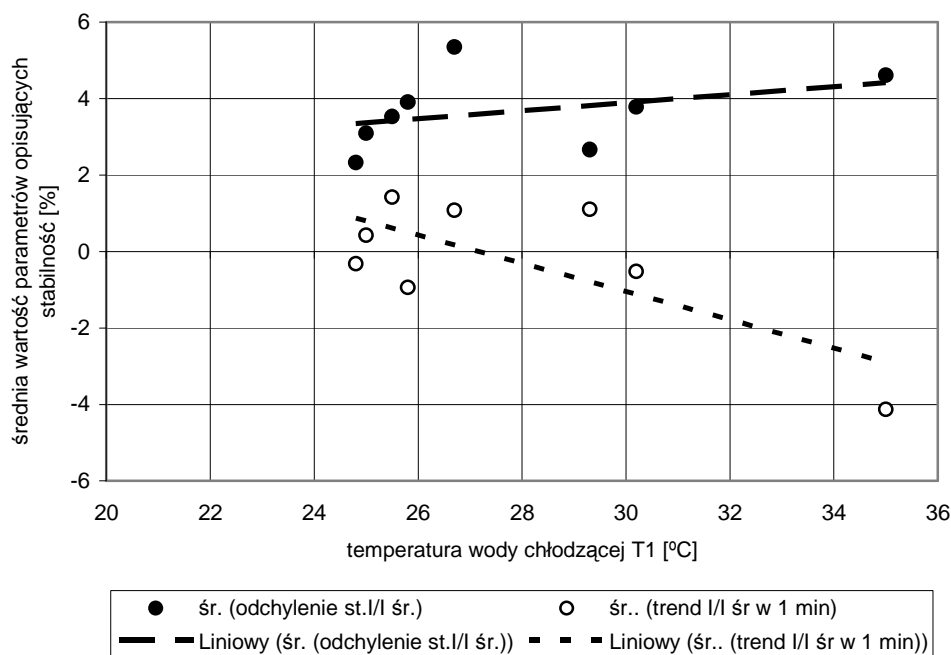
3.5. Podsumowanie

Przeprowadzono przegląd stabilności wiązek protonów dostarczonych na stanowisko terapii w 7 dniach, poddano analizie stabilności w sumie 187 ekspozycji wiązki trwających od 32 s do 16 min (przy czym dominują okresy 2 i 4 min). Powyższy przegląd pozwala na wyciągnięcie poniższych wniosków i spostrzeżeń:

- A. Zapewnienie stałej temperatury jest konieczne dla osiągnięcia stabilnych wiązek protonów. W takich przypadkach, co najmniej połowa ekspozycji charakteryzuje się odchyleniem standardowym nie przekraczającym 5% wartości średniej. Warunkiem jest stała temperatura wody chłodzącej T1 o gradiencie do 0.3 °C/h.
- B. Zwiększenie gradientu temperatury T1 do 0.6 °C/h lub więcej, znacząco wpływa na pogorszenie stabilności wyprowadzonej wiązki protonów. Większość ekspozycji miała wtedy odchylenie standardowe ponad 5% wartości średniej. Nie badano wpływu gradientu ujemnego, gdyż w normalnej praktyce taka sytuacja nie powinna się wydarzyć.
- C. Nagła zmiana mocy odbieranej przez układ chłodzący o 25 kW (zmniejszenie na okres 2 godzin) nie wpływa na zmianę temperatury T1 i tym samym na stabilność wiązki protonów. Natomiast zmniejszenie mocy o około 200 kW, trwające przez kilkanaście minut, spowodowało spadek temperatury T1 o 1.4 °C i pogorszenie stabilności wiązki protonów, co najmniej przez okres 1.5 godz.
- D. Aby sprawdzić, czy istnieje zależność między temperaturą wody chłodzącej, a stabilnością wiązki, zebrano w tabeli 3 wyniki kalkulacji stabilności, wytworzone podczas pracy cyklotronu ze stałą temperaturą T1. Wyniki przedstawiono też w postaci graficznej na rys. 17. Zaobserwowano na rysunku zależność stabilności wiązki od temperatury wody chłodzącej. Nie układanie się wyliczonych wartości na jednej, monotonicznej linii świadczy o istnieniu innych czynników, równie silnie wpływających na stabilność wiązki protonów, np. stabilność parametrów zasilającej sieci energetycznej.

Tabela 3. Okresy ze stabilną wartością temperatury wody chłodzącej. Przy wyliczaniu średniej wartości odchylenia standardowego prądu wiązki do wartości średniej, pominięto z każdego okresu po jednym impulsie ze skrajną maksymalną wartością odchylenia standardowego do wartości średniej.

| lp | T wody chłodzącej T1 [°C] | Rozważany okres pracy ze stałą temperaturą T1 | Średnia wartość odchylen st. I/I śr. dla ekspozycji w danym okresie [%] | Średnia wartość trendów I/I śr. w 1 min. dla ekspozycji danym okresie [%] |
|----|---------------------------|---|---|---|
| 1 | 24.8 | 2010-10-01 | 2.33 | -0.32 |
| 2 | 25 | 2010-09-21 | 3.09 | 0.42 |
| 3 | 25.5 | 2010-04-20 do godz. 18 | 3.53 | 1.42 |
| 4 | 25.8 | 2010-04-27 do godz. 12 | 3.9 | -0.94 |
| 5 | 26.7 | 2010-05-19 | 5.35 | 1.08 |
| 6 | 29.3 | 2010-04-27 po 17:00 | 2.66 | 1.1 |
| 7 | 30.2 | 2010-07-08 do godz. 11 | 3.78 | -0.52 |
| 8 | 35 | 2010-07-19 | 4.61 | -4.13 |



Rys. 17 Parametry opisujące stabilność wiązki protonów wiązki liczona w różnych okresach pracy cyklotronu z ustaloną temperaturą wody chłodzącej T1. Linią przerywaną pokazano linie trendów.

4. Zamierzenia dążące do poprawy komfortu termicznego cyklotronu.

Zamontowany układ stabilizacji temperatury wody chłodzącej cyklotron zmniejszył okres czasu potrzebny do ustabilizowania się temperatury kluczowych elementów cyklotronu od chwili załączenia cyklotronu, i tym samym umożliwił szybsze osiągnięcie wiązki protonów o dobrych parametrach, wyeliminował konieczność ręcznej regulacji temperatury, która była nieuchronnie połączona z pojawieniem się gradientu temperatury T1 i związanym z tym pogorszeniem jakości wiązki.

Praca ze stabilizacją temperatury uwypukliła także poważny mankament istniejącego układu chłodzenia, jakim jest jego niedostateczna wydolność w ciepłe i gorące dni. Mała wydajność układu, zaprojektowana dla innego cyklotronu o mocy pobieranej równej około połowy mocy cyklotronu AIC-144, zmusza obsługę do pracy z wysoką temperaturą wody chłodzącej, zbliżającej się do maksymalnej wartości 35 C. Praca z tą temperaturą:

- Powoduje gorszą jakość wiązki protonów, co było wykazane wcześniej.
- Powoduje przegrzewanie się źródła jonów.
- Zwiększa ryzyko awarii. Szczególnie zagrożone są urządzenia, do których woda chłodząca jest doprowadzona giętkimi węzami.
- Pogarsza powtarzalność parametrów wiązki protonów. Jest to związane z koniecznością pracy przy różnych z nastawach, zależnych od temperatury wody chłodzącej.
- Wydłuża okres czasu potrzebny na ustabilizowanie temperatury elementów cyklotronu.

W gorące dni, np. 2010-07-20, temperatura T1 osiągnęła wartość maksymalną, równą 35 °C już o godzinie 11:40. Aby przeciwdziałać powyższemu, niekorzystnym zjawiskom, konieczna jest wymiana istniejącej instalacji chłodzącej na instalację wody lodowej [10]. Zastosowanie wody lodowej winno, w różnym stopniu, zmniejszyć wyszczególnione wyżej niedogodności. Dodatkowym dobrodziejstwem byłaby większa dyspozycyjność cyklotronu do pracy oraz bezpośredni aspekt ekonomiczny. I tak, we wspomnianym dniu 2010-07-20, najbardziej energochłonne elementy załączono o 6:20, regulacja i stabilizacja wiązki trwała do 9:50 i dopiero wtedy możliwe było przesłanie wiązki na potrzeby terapii, by za niecałe dwie godziny osiągnąć temperaturę kwalifikującą cyklotron do wyłączenia, to wszystko spowodowało wysokie zużycie energii przeliczone na jednostkę czasu pracy odbiorcy akcelerowanej wiązki protonów. Dodatkowe obniżenie kosztów eksploatacji cyklotronu może nastąpić po montażu instalacji odzysku ciepła z układu chłodzenia [11].

5. 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. 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
5. Okumura S.: Magnetic Field Stabilization by Temperature Control of an Azimuthally Varying Field Cyclotron Magnet, *Review of Scientific Instruments*, vol.76, no.3, 2005
6. Zalewski W.: Systemy i urządzenia chłodnicze. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2008
7. Ullrich H-J.: Technika chłodnicza. Poradnik. I.P.P.U. MASTA część 1 (1998), część 2 (1999)
8. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A.: Metrologia elektryczna. WNT, Warszawa 2007
9. Tumański S.: Technika pomiarowa. Wydawnictwo Naukowo Techniczne. Warszawa 2007

10. Recknagel H., Sprenger E., Schramek E-R.: Kompendium wiedzy. Ogrzewnictwo klimatyzacja ciepła woda chłodnictwo. OMNI SCALA Wrocław 2008
11. Staniszewski D., Targański W.: Odzysk ciepła w instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych. IPPU MASTA, Gdańsk 2007