

**Instytut Fizyki Jądrowej
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków**

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2016

Kraków, Grudzień 2016

Raport 2096/AP

Projekt źródła prądowego, do testów sterowania systemu
produkcji wiązki cyklotronu C230, pod kątem pomiarów energii
metodą TOF

Łukasz Kamiński, Krzysztof Daniel, Michał Duszyc, Konrad Guguła, Grzegorz Janik, Andrzej Koczot, Magdalena Jabłońska, Tomasz Pasiecznik, Łukasz Raczyński, Krzysztof Suder, Mateusz Winiarz, Agnieszka Rogóż – Duda, Renata Kopec

Abstract.

The project involved creation of the control system for the beam production system in order to allow measurements of the proton energy using TOF method. Two conceptual solutions were considered. Triggering system based on the existing power supply was rejected at the stage of testing due to excessive delays present in the system. Therefore new source control system (power supply) was made in order to regulate the BCREU (Beam Control Regulation Electronic Unit). Main features of this system include generating pulses of variable duration, adjusting the time between pulses and creating dedicated control interface. The control system was based on the ATmega328 microcontroller (located on the Arduino Uno board) and the adjusting system was realized using the embedded system based on Linux. Performed tests of the pulsing source revealed limitations of the Beam Control Regulation Electronic Unit (BCREU) which resulted in necessity to set duration of the pulse greater than 25 μ s.

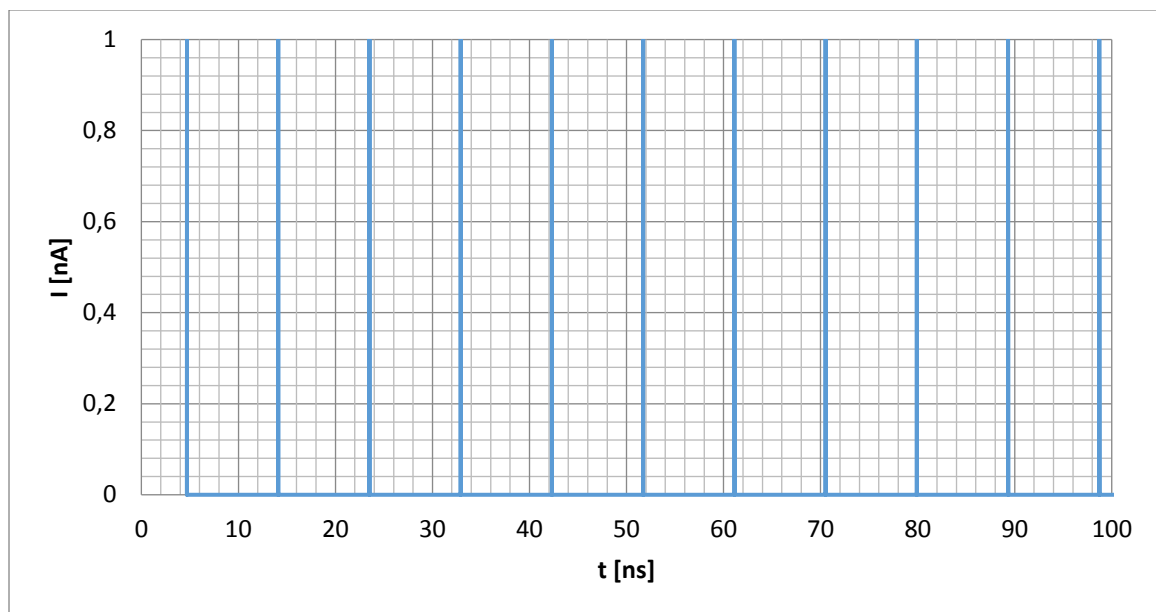
Spis treści

1. Opis systemu regulacji prądu wiązki	3
2. Koncepcja powstania źródła impulsowego	5
3. Projekt źródła prądowego	6
3.1 Założenia projektu	6
3.2 Projekt urządzenia	6
3.3 Testy	9
4. Wnioski	12
5. Bibliografia	13

1. Opis systemu regulacji prądu wiązki

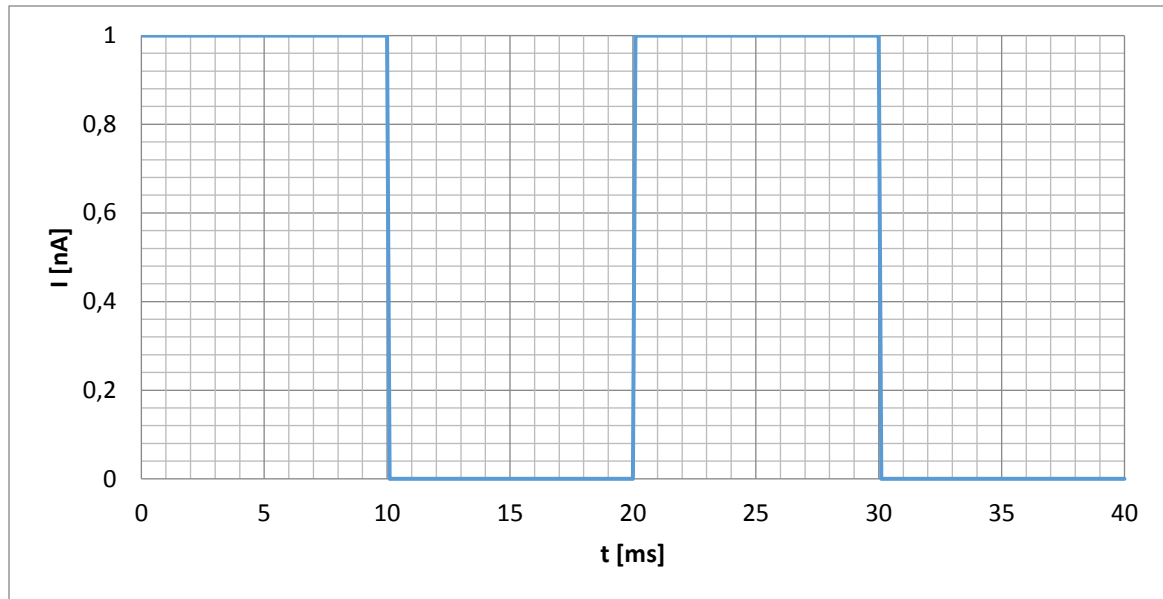
System Proteus 235 pozwala na dostarczenie wiązki o energii od 70 do 230 MeV i natężeniu od 0 do 500nA do pomieszczeń: hali eksperymentu, stanowiska nowotworów oka, pomieszczeń do napromieniania całego ciała gantry 1 i gantry 2.

Wiązka ta może być dostarczana, jako „ciągła” (kwaziciągła) lub „kluczowana”. „Ciągła” oznacza, że wiązka generowana jest w sposób nieprzerwany z częstotliwością wynoszącą 106,35 MHz pracy układu wysokiej częstotliwości i akceleracji wiązki protonowej w cyklotronie(Rysunek 1).



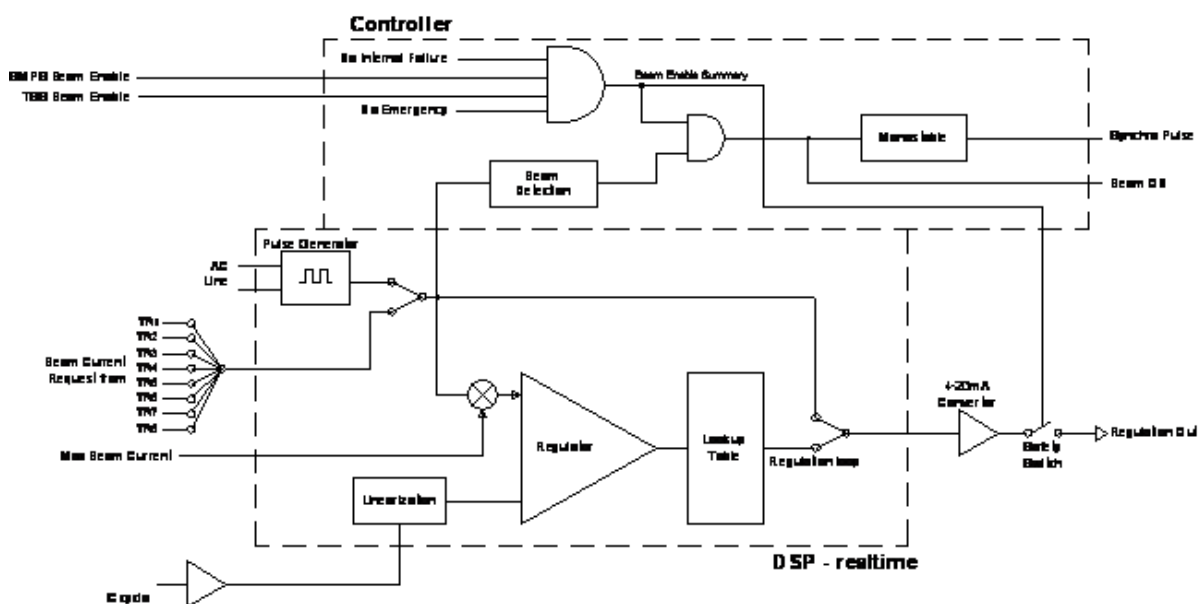
Rysunek 1. Struktura czasowa wiązki kwaziciągłej I [nA] (autor: K.Gugula).

Drugą możliwością jest wiązka „kluczowana” czyli wiązka, która generowana jest okresowo. W systemie sterowania okres ten został zdefiniowany na stały i wynosi on, 20 ms, gdzie wartość wypełnienia wynosi 50%. Oznacza to że wiązka generowana jest przez 10 ms, po czym następuje przerwa 10ms (Rysunek 2).

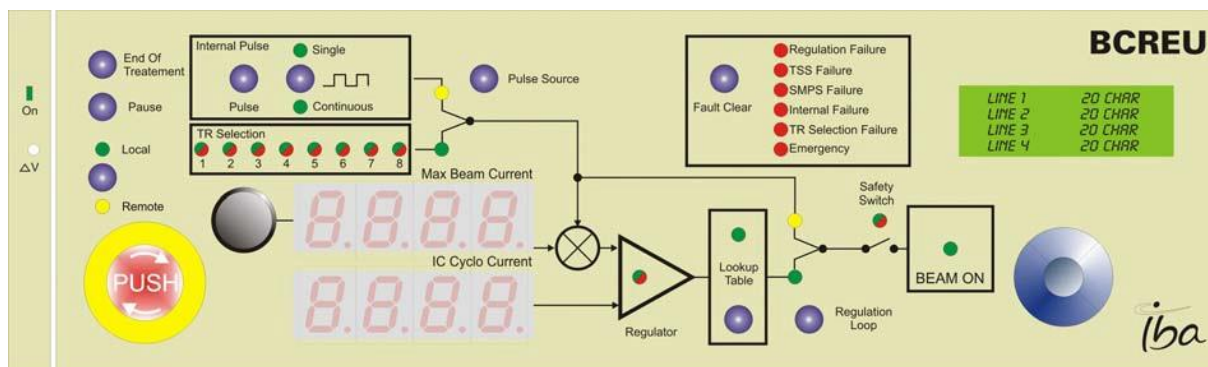


Rysunek 2. Struktura czasowa wiązki "kluczowanej" przez regulator BCREU I [nA] (autor: K.Gugula).

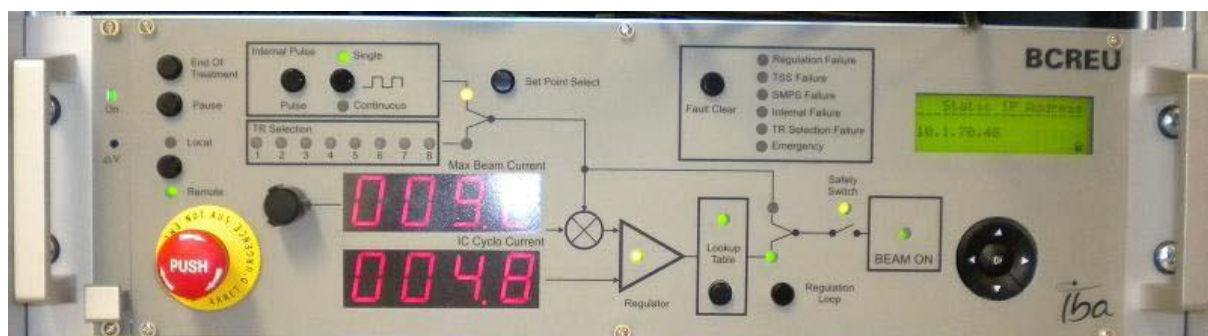
Taki sposób generowania wiązki zapewniany jest przez urządzenie sterowania prądem wiązki (ang. *BCEU – Beam Control Electronic Unit*) odpowiedzialne za regulację wiązki generowanej w cyklotronie (Rysunek 3). BCEU reguluje natężenie wiązki i tryb pracy (ciągła lub kluczowana). Urządzenie to do poprawnej pracy potrzebuje zewnętrznego źródła prądowego o regulowanej wartości w zakresie od 4 do 20 mA. Sygnał ten reguluje prąd wiązki od 0 do maksymalnej, żądanej wiązki przez operatora systemu. Maksymalna wartość prądu wiązki określona jest wartością prądu regulującego z BCEU, prądem łuku żarzenia oraz napięciem na duantach (Rysunek 4 i 5).



Rysunek 3. Schemat blokowy sterowania prądem wiązki [3].



Rysunek 4. Układ regulujący prąd oraz tryb wiązki – BCREU [3].



Rysunek 5. Układ regulujący prąd oraz tryb wiązki – BCREU [autor zdjęcia: Ł.Kamiński].

2. Koncepcja powstania źródła impulsowego

W wyniku pomiarów parametrów wiązki na potrzeby eksperymentów fizyki zaistniała potrzeba zmierzenia dokładnie energii wiązek protonów metodą inną niż metoda zasięgu w wodzie, która jest wykorzystywana przy teleradioterapii. Jedną z metod pomiaru energii cząstek jest metoda TOF (*Time of flight*) - czasu przelotu. Jednak do uzyskania dobrych rezultatów pomiarowych konieczne jest dostosowanie sposobu regulacji wiązki protonów tak, aby możliwa było rozróżnienie czasowe i właściwa identyfikacja impulsów pomiarowych na detektorach. Do tego celu potrzebne jest możliwie jak najmniejsze natężenie wiązki oraz jej krótkie impulsy dostarczone do stanowiska pomiarowego w hali eksperymentalnej.

Dla uzyskania jak najlepszych efektów w trakcie eksperymentu, niezbędna jest możliwość wygenerowania wiązki o najmniejszym czasie trwania impulsu jaką system będzie w stanie dostarczyć.

3. Projekt źródła prądowego

3.1 Założenia projektu

Stworzenie układu źródła prądowego sterującego BCREU z uwzględnieniem:

- 1) generowania impulsów o zmiennym czasie trwania: 1-1000 μ s,
- 2) regulacji czasu pomiędzy impulsami: 1-1000 ms,
- 3) czytelny i łatwy w obsłudze interfejs sterowania układem źródła (za pomocą aplikacji komputerowej).

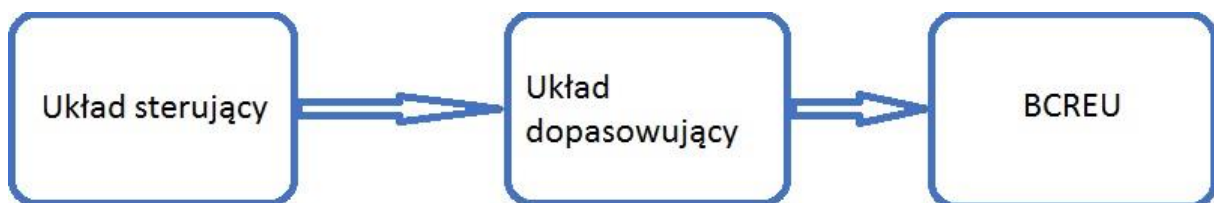
3.2 Projekt urządzenia

Rozważone zostały dwa rozwiązania koncepcyjne:

- 1) stworzenie układu kluczującego do istniejącego źródła prądowego. Układ oparty o mikrokontrolerze generującym impulsy sterujące tranzystorem wykonawczym, który reguluje sygnał prądowy do BCREU. W trakcie projektowania i wstępnych testów okazało się, że układ kluczujący oparty o tranzystory wprowadza stosunkowo duże opóźnienia,
- 2) stworzenie osobnego źródła prądowego o natężeniu prądu 20mA i możliwości regulacji szerokości impulsów wyjściowych od 1 do 1000 μ s, oraz odstępie pomiędzy impulsami od 1 do 1000 ms w oparciu o mikrokontroler ATmega328.

Pierwsze próby zweryfikowały rozwiązanie „pierwsze” z wynikiem negatywnym ze względu na zbyt duże opóźnienia występujące w układzie, które uniemożliwiały osiągnięcie założonych lub zbliżonych parametrów regulacji.

Rozwiązanie „drugie” możliwe było w realizacji dzięki parametrom zastosowanego mikrokontrolera i pozwoliło osiągnąć zbliżone do zamierzonych czasy sterowania wiązką. Rysunek 6 przedstawia schemat blokowy zastosowanego układu regulacji.



Rysunek 6. Schemat blokowy zmodyfikowanego układu regulacji źródła prądowego [autor: Ł.Kamiński].

Jako „serce” układu sterującego zastosowano płytę *Arduino Uno* zawierającą układ ATmega328 wraz z elementami peryferyjnymi pozwalającymi na programowanie i pracę układu. Układ dopasowujący określa dopasowanie rezystancyjne obciążenia do wyjścia kontrolera ATmega – tak by uzyskać 20 mA wartości prądu regulującego. Do wejścia cyfrowego (D10) został podłączony przełącznik bi-stabilny umożliwiający załączenie i wyłączenie sygnału wyjściowego. Układ ten podpięty został do systemu wbudowanego przez portu USB co umożliwiło interakcję z użytkownikiem i możliwość zadawania parametrów pracy (Rysunek 7 i 8).

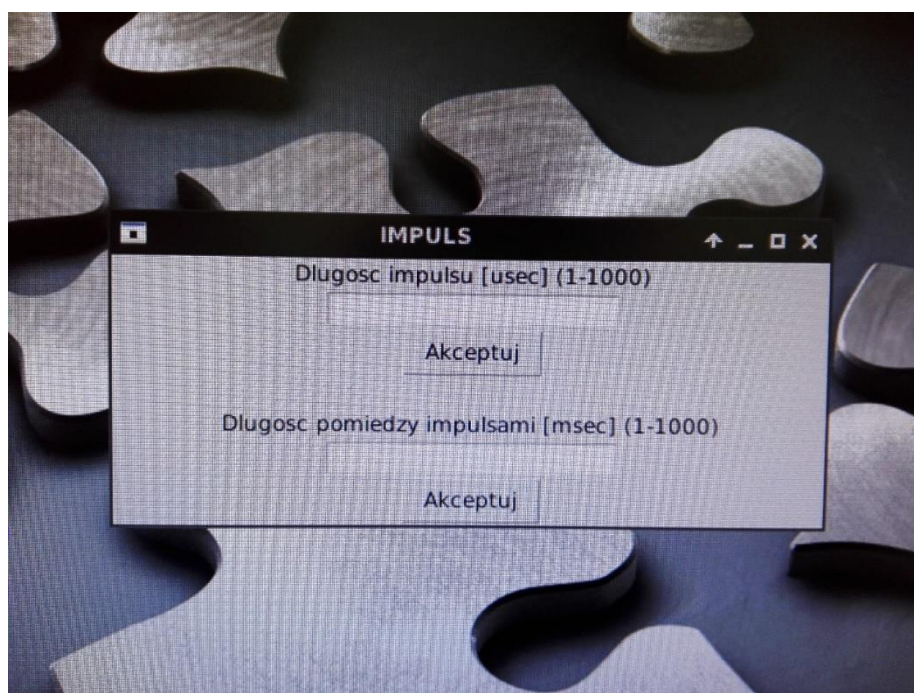
W kolejnym etapie stworzono interfejs sterujący układem w oparciu o aplikację uruchamianą na systemie wbudowanym (Rysunek 9).



Rysunek 7. Układ regulacji umieszczony w obudowie zastępczej [autor: Ł.Kamiński].



Rysunek 8. System wbudowany z systemem operacyjnym Linux [autor: Ł.Kamiński].



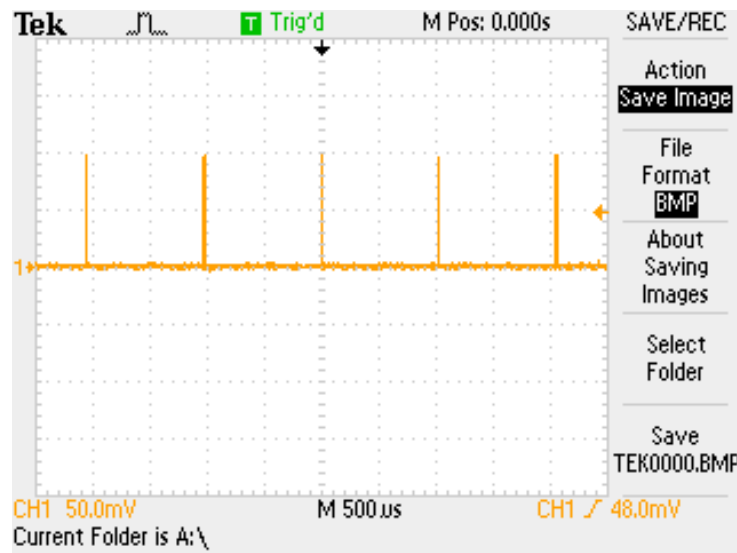
Rysunek 9. Interfejs użytkownika jako aplikacja pisana w języku Python [autor: Ł.Kamiński].

Aplikacja sterująca umożliwia niezależne ustalenie czasu trwania impulsu w żądanym zakresie od 1 do 1000 μ s oraz interwału pomiędzy impulsami w zakresie od 1 do 1000 ms.

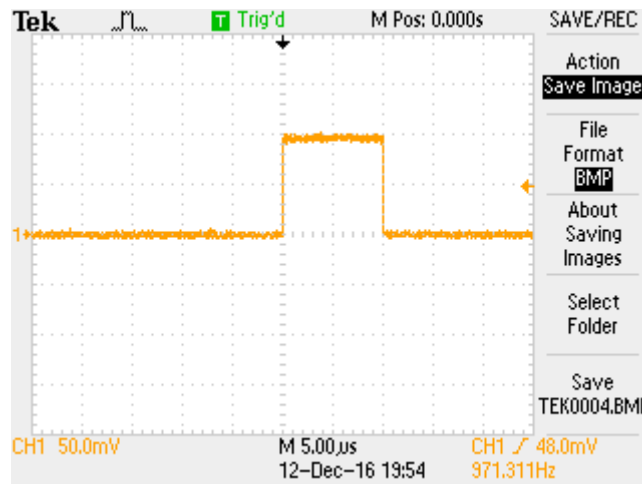
3.3 Testy

Testy uruchomieniowe wykazały ograniczenie systemu objawiające się minimalnym czasem trwania impulsu nie krótszych niż 5 μs . Jest to wartość opóźnienia w układzie, która należy uwzględnić, jako dodatek do założonego czasu trwania impulsu.

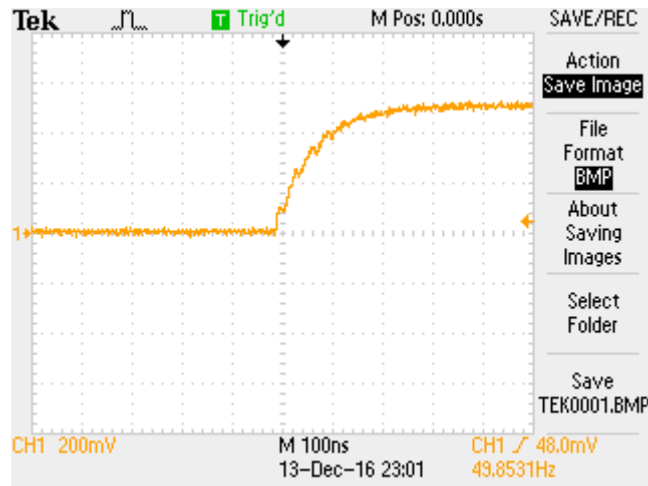
Sam układ BCREU wymaga natomiast, co najmniej 25 μs czasu trwania impulsu, aby możliwe było zaobserwowanie wiązki (Rysunek 10 – 13).



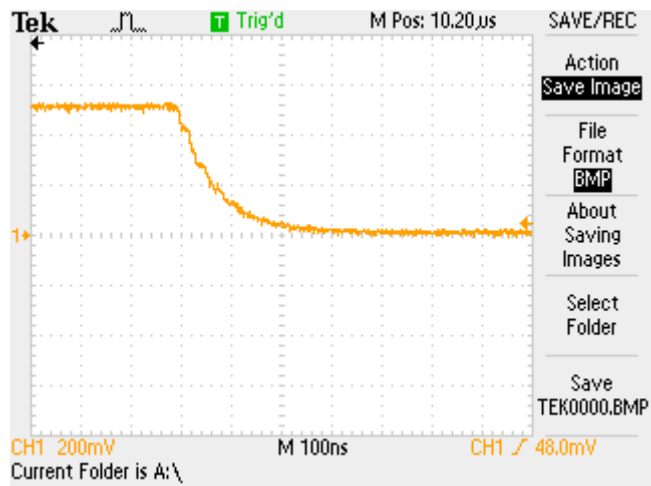
Rysunek 10. Wykres sygnału sterującego z układu źródła (5 μs impuls, 1 ms odstęp) [autor: L.Kamiński].



Rysunek 11. Wykres impulsu sterującego (10 μs) [autor: L.Kamiński].



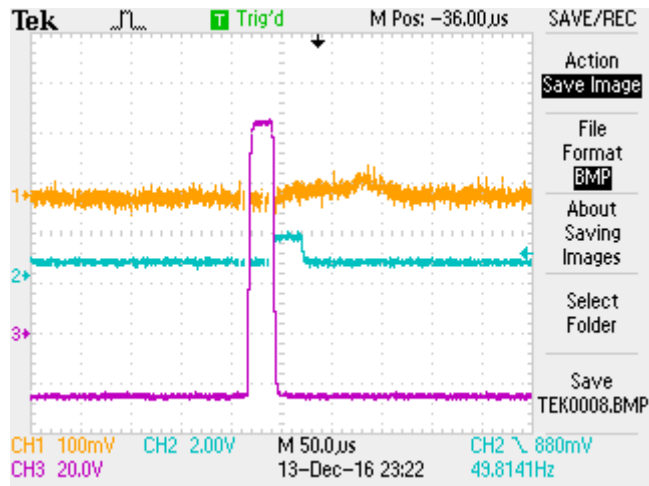
Rysunek 12. Wykres sygnału sterującego - czas narastania impulsu [autor: Ł.Kamiński].



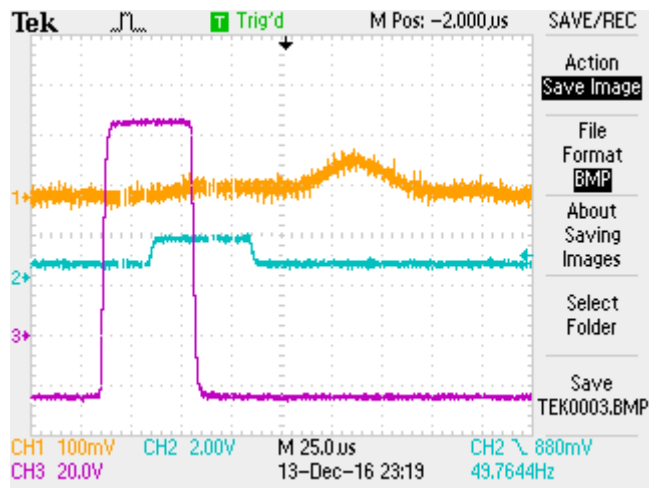
Rysunek 13. Wykres sygnału sterującego – czas opadania impulsu [autor: Ł.Kamiński].

Poniżej zamieszczone są wykresy przedstawiające przebiegi sygnałów (Rysunek 14 – 18):

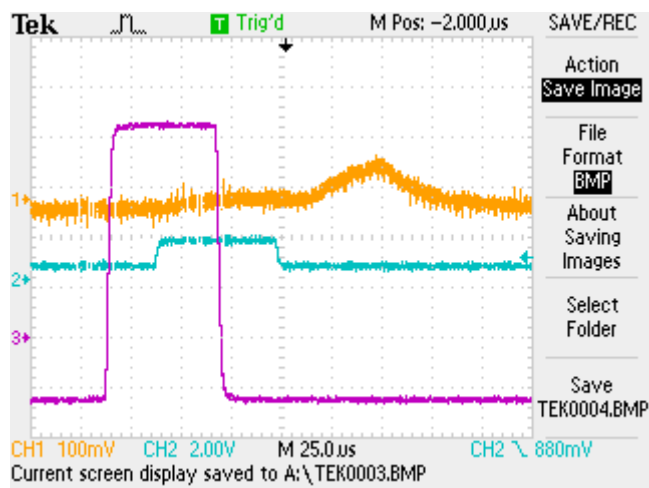
1. Żółty – sygnał z komory jonizacyjnej IC.
2. Niebieski – sygnał sterujący z BCREU.
3. Fioletowy – sygnał sterujący ze źródła prądowego.



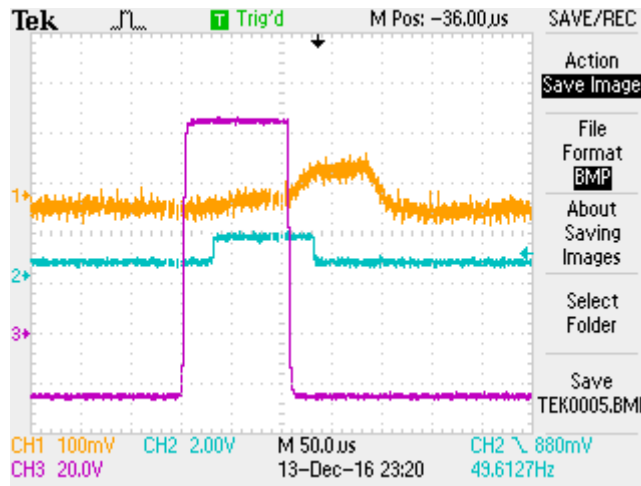
Rysunek 14. Impuls sterujący 30 μs [autor: Ł.Kamiński].



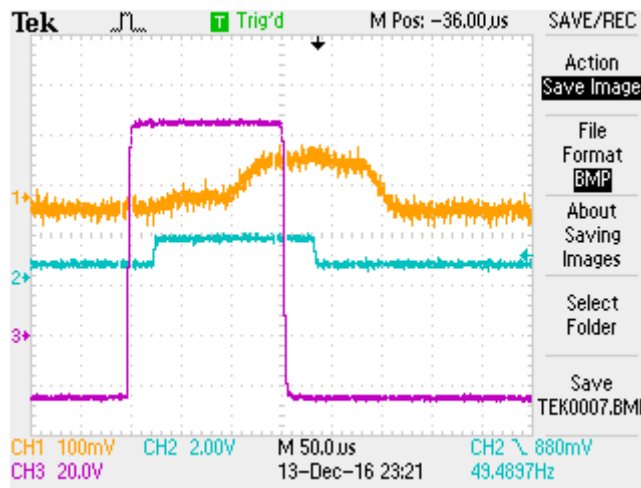
Rysunek 15. Impuls sterujący 40 μs [autor: Ł.Kamiński].



Rysunek 16. Impuls sterujący 50 μs [autor: Ł.Kamiński].



Rysunek 17. Impuls sterujący 100 µs [autor: Ł.Kamiński].



Rysunek 18. Impuls sterujący 150 µs [autor: Ł.Kamiński].

4. Wnioski

Na podstawie dokonanych pomiarów możemy zaobserwować:

1. system potrzebuje impulsu sterującego nie krótszego niż 25 µs,
2. odpowiedź układu BCREU w stosunku do pojawiającego się sygnału sterującego wynosi około 25 µs,
3. Sygnał wiązki na komorze jonizacyjnej pojawia się około 100 µs po pojawieniu się sygnału sterującego.

Przygotowany układ należałoby przetestować bezpośrednio na detektorach pomiarowych, aby zobaczyć faktyczny stan regulacji. Należy pamiętać, że do detekcji prądu wiązki protonów została użyta komora jonizacyjna ICcyclo podłączona do regulatora BCREU (część

systemu produkcji i regulacji wiązki protonów systemu terapii, Proteus 235), która posiada dużą pojemność własną, a sam regulator wnosi duże opóźnienie sygnału zwrotnego.

Stwierdzono, że układ będzie wystarczająco szybko reagował i w przyszłości będzie możliwe zbudowanie stanowiska do pomiaru energii wiązki protonów metodą czasu przelotu w oparciu o powyższy układ oraz układ regulacji wiązki systemu terapii Proteus 235.

5. Bibliografia

- [1] M. Kisieliński, J. Wojtkowska . "The proton beam energy measurement by a time-of-flight method". NUKLEONIKA 2007;52(1):3–5
- [2] S.G. Lee, Y.-S. Cho, H.S. Kim, and H.-J. Kwon, "Measurements of the Beam Energy and Beam Profile of 100 MeV Proton Linac at KOMAC", in Proc. 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16), Busan, Korea, May 2016, paper MOPMB056, pp. 217-219, ISBN: 978-3-95450-147-2
- [3] IBA. System terapii protonowej. Podręcznik konserwacji dla Instytutu Fizyki Jądrowej. Tom 1. Opis systemu. IBA Particle Therapy 2012
- [4] www.arduino.cc
- [5] G. Halfacree, E. Upton. "Raspberry Pi. Przewodnik użytkownika". Helion. 2013