

**RAPORTY IChTJ. SERIA B nr 1/2017**

**OBNIŻENIE ENERGII WIĄZKI ELEKTRONÓW  
W AKCELERATORZE IŁU-6**

**Sylwester Bulka, Zbigniew Zimek**

**© Copyright by Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,  
Warszawa 2017**

**Warszawa 2017**

## **AUTORZY**

Sylwester Bułka, Zbigniew Zimek  
*Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych*

© Copyright by Instytut Chemii i Techniki Jądrowej, Warszawa 2017

## **WYDAWCA**

Instytut Chemii i Techniki Jądrowej  
ul. Dorodna 16, 03-195 Warszawa  
tel. 22 811 06 56, fax: 22 811 15 32, e-mail: [sekdyrn@ichtj.waw.pl](mailto:sekdyrn@ichtj.waw.pl)  
[www.ichtj.waw.pl](http://www.ichtj.waw.pl)

*Raport został wydany w postaci otrzymanej od Autorów*

## **Obniżenie energii wiązki elektronów w akceleratorze IŁU-6**

Akcelerator IŁU-6 charakteryzuje się możliwością zmiany energii przyspieszonych elektronów w przedziale 0,5-2 MeV przy mocy średniej wiązki na poziomie 20 kW. Uruchomiony w 1988 r. akcelerator jest podstawowym urządzeniem instalacji pilotowych działających w Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ). Zgodnie z założeniami instalacje pilotowe są przeznaczone do realizowania tematów badawczych i wdrażania technologii radiacyjnych. Prace eksperymentalne prowadzone przy wykorzystywaniu akceleratora IŁU-6 wraz z szeregiem układów pomocniczych obejmowały różnorodne procesy radiacyjne w fazie gazowej, ciekłej i stałej. Jednocześnie poszczególne technologie radiacyjne, takie jak sieciowanie cienkich folii polimerowych, obróbka powierzchniowa czy powierzchniowa dezynsekcja ziarna, wymagają stosowania energii wiązki elektronów w zakresie 0,15-0,3 MeV. Aby spełnić ten warunek, wprowadzono niezbędne zmiany w konstrukcji akceleratora IŁU-6, umożliwiające rutynowe stosowanie wiązki elektronów na tym poziomie energii. Podstawowym elementem układu odpowiedzialnego za wytworzenie pola elektrycznego przyspieszającego strumień elektronów jest modulator impulsowy, przeznaczony do zasilania generatora pracującego z częstotliwością roboczą 127 MHz. Samowzbudny generator jest zbudowany na bazie triody próżniowej. Generator zasila rezonator, w którym amplituda fali stojącej pola elektrycznego przyspiesza strumień elektronów emitowanych z katody umieszczonej w centralnej części rezonatora. Obniżenie amplitudy impulsu zasilającego generator skutkuje obniżeniem napięcia przyspieszającego elektrony, a tym samym ich energii. Należy podkreślić, że zmian prowadzących do obniżenia minimalnej energii elektronów w akceleratorze IŁU-6 dokonano przy założeniu zachowania wszystkich dotychczasowych charakterystyk akceleratora oraz układów sterowania, sygnalizacji i blokad. W ramach modernizacji zaprojektowano i wykonano półprzewodnikowy układ zasilania impulsowego, umożliwiający obniżenie poziomu amplitudy generowanej energii wysokiej częstotliwości. Przetestowano układ wytwarzający odpowiednio niskie napięcie zasilające generator, niezbędne dla podtrzymania warunków wzbudzenia generatora. Zmodyfikowano także układ działa elektronowego, aby umożliwić efektywną emisję elektronów z katody przy małym natężeniu pola elektrycznego w przestrzeni okołokatodowej. Odwrócono biegunowość napięcia z zewnętrznego źródła zasilania polaryzacji katody. Bardziej skutecznym, ale trudnym do przeprowadzenia, działaniem byłoby przemieszczenie katody wzdłuż osi rezonatora.

Dla potwierdzenia uzyskania założonych parametrów wiązki elektronów w zmodernizowanym akceleratorze IŁU-6 przeprowadzono pomiary z użyciem folii dozymetrycznych B3 i PCV. Ponadto wykonano obliczenia metodą Monte Carlo przy wykorzystaniu programu komputerowego Mode-RTL. Wyniki pomiarów i obliczeń potwierdziły zgodność energii wiązki elektronów z odczytem detektora poziomu napięcia przyspieszającego. Rejestrowany rozrzut parametrów wynika z nieliniowości folii dozymetrycznej B3 przy wyższych poziomach mierzonej dawki bądź nieuwzględnionych w trakcie obliczeń parametrów, takich jak rozrzut energii elektronów czy zakrzywienie folii wyjściowej akceleratora wykonanej z tytanu. Stworzono tym samym warunki do rutynowego wykorzystania akceleratora IŁU-6 do pracy z wiązką elektronów o energii 0,15-0,3 MeV.

## **Reduction of electron beam energy in the ILU-6 accelerator**

The ILU-6 accelerator with ability to accelerate electrons in 0.5-2 MeV energy range and average beam power up to 20 kW was installed in 1988 as the basic device of pilot installations of the Centre for Radiation Research and Technology, Institute of Nuclear Chemistry and Technology (INCT). The primary tasks of installation are focused on investigation and implementation of wide range radiation technologies. The experimental works were performed in the field of radiation processing with the use of ILU-6 accelerator and additional systems enabling irradiation gas, liquid and solid type of product. Simultaneously, individual radiation technologies such as crosslinking of thin polymer foils, surface processing or surface disinfection of grain

require the use of electron beam energy as low as 0.15-0.3 MeV. To fulfill those conditions specific changes in construction of ILU-6 accelerator were introduced, enabling routine applications of electron beam with lowered level of energy. The basic component responsible for electric field formation to accelerate the stream of electrons is the pulse modulator. It is designed as power supply of generator with the working frequency 127 MHz. Self-excited generator was built on the basis of vacuum triode. The generator feeds resonator in which the amplitude of the standing wave of the electric field accelerates the electrons emitted from the cathode located in the central part of the resonator. The lowering of the amplitude of the pulse feeding the generator is the effective way to reduce the electric field amplitude, and hence reduce electron energy level. It should be noticed that implemented changes leading to lowering the minimum energy of accelerating electrons in ILU-6 accelerator do not influence on the arrangement of interlock system related to steering, signaling and blockades. New design of pulse modulator was implemented to provide capability of lowering the level of electric field amplitude and energy of electron beam. The semiconductor arrangement of pulse modulator allows to provide necessary condition for smooth generation of oscillation in resonator. The modification of the electron gun arrangement was also conducted to make possible the effective emission from the cathode even at the small intensity of the electric field in the cathode space. The polarity of the DC power supply of the cathode was reversed. Effective but much more difficult approach is related to dislocation of the cathode inside the resonator.

To confirm the required parameters of electron beam accelerated in the modernized ILU-6, the measurements with utilization of B3 and PCV dosimetric foils were done. In addition computer calculations were made using Monte Carlo method and the Mode-RTL computer program. The results of these measurements and calculations confirmed the agreement of the electron beam energy with the indication of the electrical sensor showing the level of amplitude of accelerating voltage. The recorded spread of measured and calculated parameters can be the consequence of the nonlinearity of B3 dosimetric foil for the higher levels of the measured dose. The calculated results were obtained without taking into consideration the influence of electron energy spread and the influence of exit titanium foil bend. Finally, it should be stated that conditions for routine utilization of ILU-6 accelerator in energy range 0.15-0.3 MeV were created.

## **SPIS TREŚCI**

<b>1. WPROWADZENIE</b>	<b>7</b>
<b>2. CHARAKTERYSTYKA AKCELERATORA IŁU-6</b>	<b>7</b>
<b>3. OBNIŻENIE ENERGII PRZYŚPIESZONYCH ELEKTRONÓW – ZAKRES DZIAŁAŃ</b>	<b>9</b>
<b>4. WYNIKI EKSPERYMENTÓW I POMIARÓW</b>	<b>13</b>
<b>5. PODSUMOWANIE</b>	<b>17</b>



## 1. WPROWADZENIE

Akcelerator IŁU-6 uruchomiono w 1988 r. jako podstawowe urządzenie instalacji pilotowych działających w Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych Instytutu Chemii i Techniki Jądrowej (IChTJ). Zgodnie z założeniami realizowane tematy badawcze i wdrożeniowe obejmują szeroki zakres prac eksperymentalnych prowadzonych z wykorzystywaniem akceleratora IŁU-6 oraz dodatkowych systemów umożliwiających powadzenie różnorodnych procesów radiacyjnych. Poszczególne instalacje pilotowe, oprócz akceleratora IŁU-6, są wyposażone w niezależne systemy służące do transportu materiałów i obiektów w trakcie obróbki radiacyjnej, w tym: transporter o powierzchni roboczej pojemników do napromieniowania 1 x 2 m, system ciągłej obróbki taśm termokurczliwych, system ciągłej obróbki rur termokurczliwych oraz kabli i przewodów elektrycznych, a także niezależne instalacje, które pozwalają na ciągłą obróbkę radiacyjną strumienia gazów i ośrodków ciekłych. Tematyka prac badawczych i wdrożeniowych obejmuje między innymi takie zagadnienia, jak:

- modyfikacja (sieciovanie) polimerów: folii termokurczliwych, materiałów piankowych, folii opakowaniowych, kabli i przewodów elektrycznych;
- degradacja naturalnej celulozy (słoma);
- oczyszczanie gazów odlotowych z  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  oraz związków organicznych chlorowcopochodnych i wielopierścieniowych;
- modyfikacja materiałów półprzewodnikowych;
- utylizacja ciekłych odpadów przemysłowych.

Akcelerator IŁU-6, zbudowany w Instytucie Fizyki Jądrowej w Nowosybirsku (Rosja), jest wyposażony w konwertyor wiązki elektronów na promieniowanie hamowania X o wydajności konwersji rzędu  $\eta = 1,5\%$  oraz dawce ekspozycyjnej  $D(t) = 1 \text{ kGy/min}$ . Zaprojektowany został na nominalny zakres energii przyspieszanych elektronów 0,5-2 MeV. Wymagania stawiane przez poszczególne technologie radiacyjne, takie jak sieciowanie cienkich folii polimerowych, obróbka powierzchniowa czy powierzchniowa dezynsekcja ziarna, zakładają stosowanie energii wiązki elektronów rzędu 0,15-0,3 MeV. Aby spełnić ten warunek, przystąpiono do wprowadzenia niezbędnych zmian w konstrukcji akceleratora IŁU-6 w celu umożliwienia rutynowego stosowania wiązki elektronów o energii z zakresu 0,2-0,3 MeV.

## 2. CHARAKTERYSTYKA AKCELERATORA IŁU-6

Akcelerator IŁU-6 jest urządzeniem budowanym seryjnie w Instytucie Fizyki Jądrowej od wielu lat. Jego konstrukcja spełnia wymagania technologii radiacyjnych stosowanych w instalacjach badawczych i przemysłowych. Nominalne parametry akceleratora IŁU-6 przedstawiono w tabeli 1.

Charakterystyka czasowa etapów przetwarzania energii elektrycznej pobieranej z sieci zasilającej jest następująca:

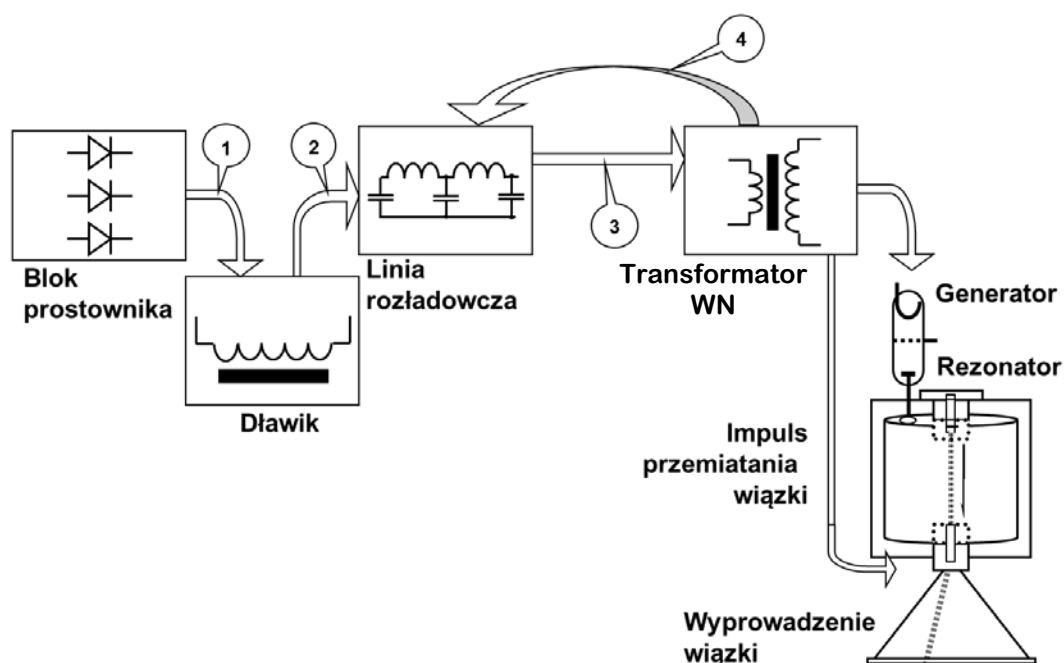
- pobieranie energii z sieci zasilającej AC oraz jej magazynowanie w polu magnetycznym dławika – 12 ms,
- transfer energii do bloku kondensatorów wchodzących w skład linii rozładowczej – 2,5 ms,
- rozładowanie linii na dopasowane obciążenie (akcelerator) – 0,4 ms,
- recyrkulacja energii szczątkowej w linii rozładowczej – 0,4 ms.

Podstawowe elementy składowe układu odpowiedzialnego za wytworzenie pola elektrycznego przyspieszającego strumień elektronów zaprezentowano na rys. 1.

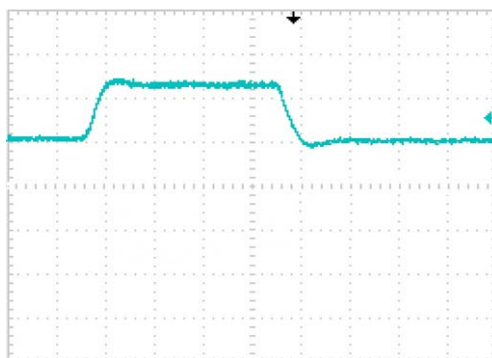
Na rys. 2 pokazano kształt impulsu WN zasilającego generator o częstotliwości roboczej 127 MHz. Samowzбудny generator zbudowany na bazie triody próżniowej zasila rezonator, w którym amplituda fali stojącej pola elektrycznego przyspieszającego strumień elektronów osiąga wielkość

Tabela 1. Nominalne parametry akceleratora elektronów IŁU-6.

Parametr	Wartość
Typ struktury przyspieszającej	Rezonator w.cz. (127 MHz)
Zakres energii	0,5-2 MeV
Moc wiązki	do 20 kW
Prąd wiązki średniej	do 20 mA
Tryb pracy	Impulsowy, $T_{imp} = 400 \mu s$ (const.)
Częstotliwość impulsowania	2, 3, 5, 10, 15, 25, 50 Hz
Prąd wiązki w impulsie	do 0,7 A
Energia impulsu	do 400 J
Szerokość przemiatania	do 80 cm



Rys. 1. Tor przetwarzania energii elektrycznej w akceleratorze IŁU-6.



Rys. 2. Kształt impulsu WN zasilającego generator o częstotliwości roboczej 127 MHz. Skala amplitudy na oscylografie – 10 V/dz. Skala czasowa przebiegu – 0,1 ms/dz.

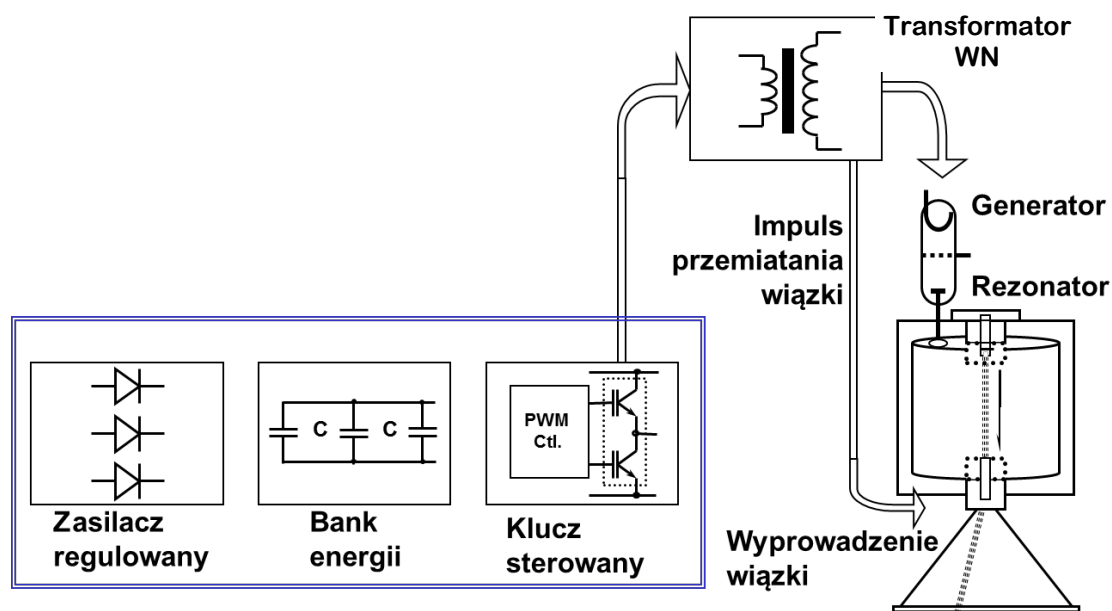


rzędu 2 MV. Obniżenie amplitudy impulsu zasilającego generator skutkuje obniżeniem napięcia przyspieszającego elektrony, a tym samym ich energii.

### 3. OBNIŻENIE ENERGII PRZYŚPIESZONYCH ELEKTRONÓW – ZAKRES DZIAŁAŃ

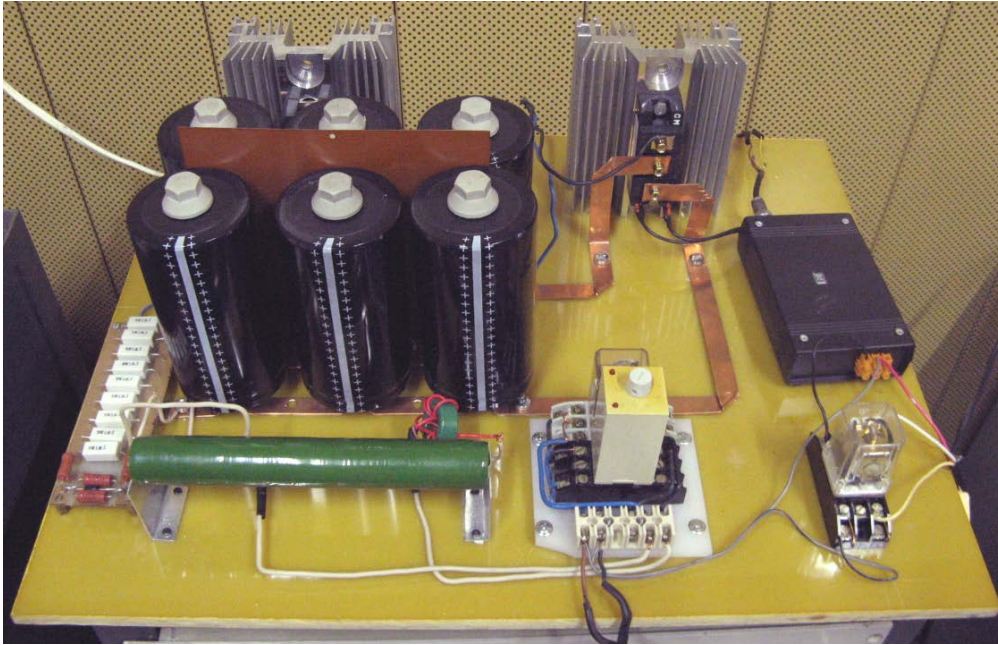
Zmian prowadzących do obniżenia minimalnej energii przyspieszania elektronów w akceleratorze IŁU-6 dokonano przy założeniu zachowania wszystkich dotychczasowych charakterystyk akceleratora oraz układu sterowania, sygnalizacji i blokad. Wprowadzone dodatkowo uzupełnienia i modyfikacje w blokach funkcjonalnych i zintegrowanych układów automatyki i bezpieczeństwa zapewniają bezpieczną i stabilną pracę urządzenia przy obniżonej energii elektronów. Akcelerator IŁU-6 w warunkach nominalnych jest eksploatowany przy energii elektronów zmienianej w zakresie 0,5-2 MeV. Obniżenie energii do poziomu 0,15-0,3 MeV wymagało zaprojektowania i wprowadzenia następujących modyfikacji:

- Zaprojektowano i wykonano układ zasilania impulsowego, umożliwiający obniżenie poziomu generowanej energii w.cz. Zastosowano układ wytwarzający odpowiednio niskie napięcie zasilające generator, przy zachowaniu dotychczasowego poziomu napięcia wzbudzenia wstępnego rezonatora.
- Zmodyfikowano układ działa elektronowego w celu umożliwienia efektywnej emisji z katody przy małym natężeniu pola elektrycznego w przestrzeni okołokatodowej. Odwrócono biegunowość polaryzacji katody poprzez zewnętrzne, dodatkowe źródło. Skutecznym, ale trudnym do przeprowadzenia, działaniem byłoby przemieszczenie katody bliżej powierzchni czołowej wzdłuż osi rezonatora w.cz.
- Zmodyfikowano układ przemiatacia wiązki w celu uzyskania żądanej szerokości i liniowości przemiatacia, dobrano przekładnię impulsowego transformatora prądu przemiatacia oraz zoptymalizowano parametry ogniskowania i centrowania wiązki elektronów.



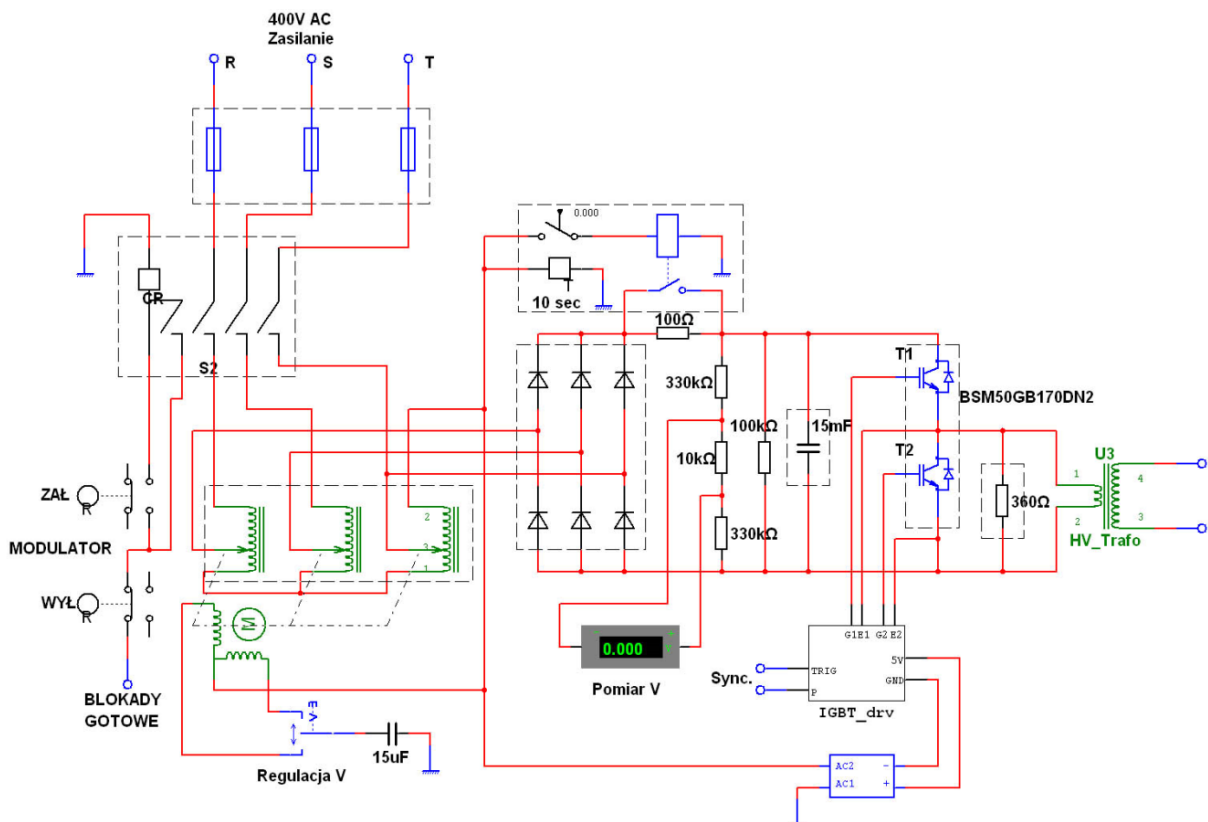
Rys. 3. Schemat blokowy toru formowania impulsów wyposażony w modulator umożliwiający uzyskanie obniżonej energii elektronów w akceleratorze IŁU-6.

Modulator dla niskich napięć zasilania generatora, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 3, składa się z następujących bloków: regulowanego zasilacza pracującego z siecią trójfazową, banku energii w postaci kondensatorów o znacznej pojemności oraz klucza sterowanego



Rys. 4. Płyta główna modulatora impulsowego przeznaczonego do pracy z obniżoną energią elektronów.

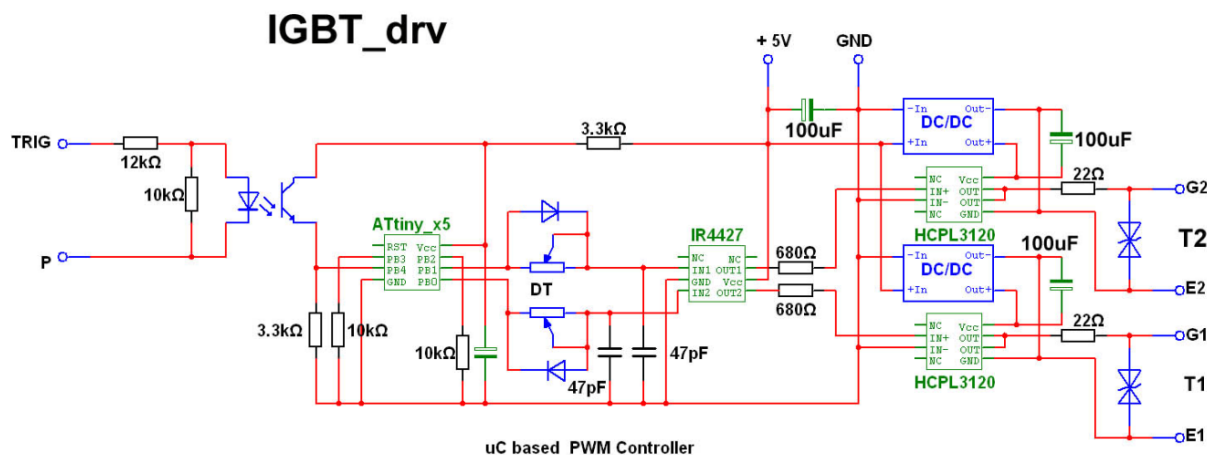
jako elementu wykonawczego. Na rys. 4 zaprezentowano płytę główną modulatora z zainstalowanymi podstawowymi elementami układu. Schemat ideowy modulatora impulsowego pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Schemat ideowy nowego modulatora zintegrowanego z istniejącymi systemami automatyki i bezpieczeństwa akceleratora.

Jako klucza tranzystorowego użyto typowego przemysłowego modułu dwu tranzystorów zintegrowanych w jednej obudowie, stosowanych w konstrukcjach falowników. Tranzystor T1

wysterowany sygnałem impulsowym z bloku IGBT\_drv dołącza wejście transformatora WN do napięcia ok. 420 V na 400  $\mu$ s, natomiast tranzystor T2 zwiera transformator WN po zakończeniu zasadniczego impulsu w celu wygaszenia ewentualnych niekontrolowanych oscylacji, jakie mogą wystąpić na indukcyjności rozproszonej transformatora. Jednostka mikroprocesorowa w bloku IGBT\_drv wypracowuje pożądaną sekwencję impulsów sterujących tranzystory, a ponadto zabezpiecza cały układ przed niekontrolowanymi włączeniami w przypadku pojawienia się zakłóceń na linii sterującej „Sync” z głównego bloku synchronizacji akceleratora. Schemat ideowy układu przeznaczonego do sterowania kluczem tranzystorowym w modulatorze impulsowym zaprezentowano na rys. 6.

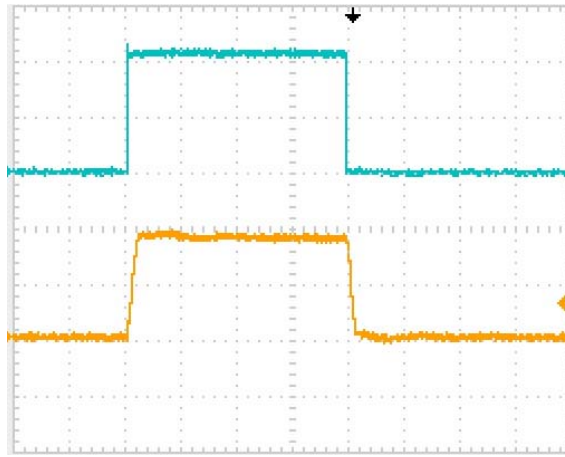


Rys. 6. Schemat ideowy układu przeznaczonego do sterowania kluczem tranzystorowym w modulatorze impulsowym.

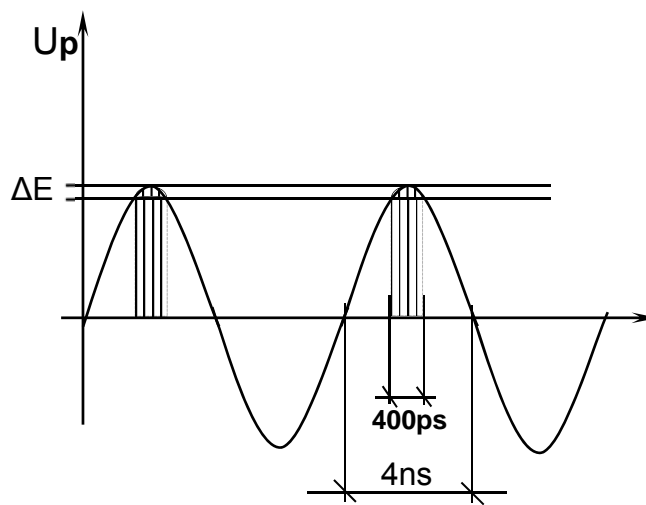
Źródłem elektronów w akceleratorze IŁU-6 jest pośrednio żarzona katoda, wykonana z sześcioborku lantanu (LaB6), pracująca w układzie diody. Napięciem zasilania tak skonfigurowanego działa elektronowego jest składowa elektryczna fali stojącej w rezonatorze pobudzany z generatora częstotliwości roboczej (127 MHz). Napięcie to jednocześnie jest wykorzystywane do przyśpieszania wiązki elektronów. Na rys. 7 zaprezentowano kształt impulsu zasilającego samowzbudny generator w.cz., zbudowany na bazie triody GI-50. Na rys. 8 przedstawiono schematycznie proces formowania zgęstków emitowanych z katody. Umożliwienie efektywnej emisji elektronów z katody przy małym natężeniu pola elektrycznego w przestrzeni okołokatodowej, w układzie stosowanym do obniżenia energii elektronów, wymagało modyfikacji układu działa elektronowego. Dla osiągnięcia odpowiednio dużej emisji odwrócono biegunowość polaryzacji katody poprzez zewnętrzne, dodatkowe źródło, co ilustruje rys. 9.

Akcelerator IŁU-6 jest wyposażony w układ przemiatania wiązki. Na rys. 10 zaprezentowano zasadę działania układu z elektromagnesem przemiatania. Cechą charakterystyczną układu jest przemiatanie wiązki w trakcie trwania impulsu przyśpieszonych elektronów. Do formowania impulsu prądowego w układzie elektromagnesu wykorzystywany jest impuls odpowiadający kształtem impulsowi wysokiego napięcia zasilającego lampę generacyjną. Wraz ze zmianą amplitudy tego impulsu przy zmianie energii przyśpieszonych elektronów zmienia się automatycznie amplituda prądu przemiatającego wiązkę elektronów. Pokazane na rys. 11 oscylogramy dotyczą kolejno impulsu prądowego przemiatania wiązki, impulsu prądu wiązki mierzonego za pomocą cylindra Faradaya oraz impulsu ilustrującego symetryczny rozkład wiązki w obszarze jej przemiatania. Ten ostatni impuls jest rejestrowany przez dwie elektrody wykonane z aluminium, zainstalowane na stałe na krańcach folii wyjściowej akceleratora. W przypadku pojawienia się asymetrii tego impulsu istnieje możliwość korekty położenia wiązki.

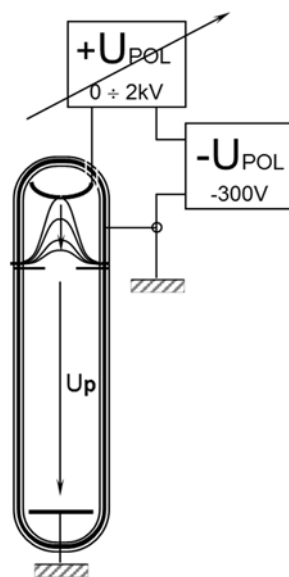
Istotnym zagadnieniem przy obniżeniu energii wiązki elektronów poniżej wartości nominalnych jest dopasowanie natężenia pola elektromagnesu przemiatania do zwiększonej podatności wiązki elektronów na odchylenie przy obniżonej energii elektronów. Wymagało to określenia nowych parametrów składowej centrującej prądu przemiatania, a także optymalizacji



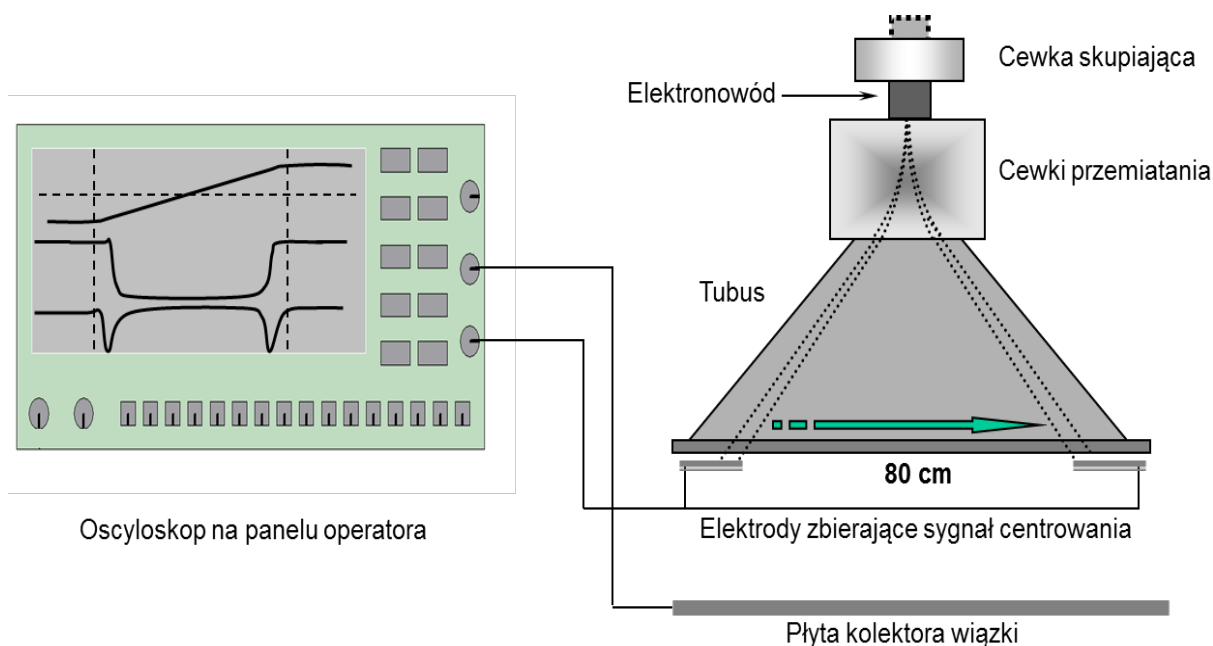
Rys. 7. Przebieg sygnału sterującego (przebieg górny, 20 V/dz) oraz kształt napięcia zasilającego generator (przebieg dolny, 2 V/dz). Skala czasowa przebiegów – 0,1 ms/dz.



Rys. 8. Formowanie zgęstków elektronów emitowanych z katody, a przyspieszanych składową elektryczną fali stojącej w rezonatorze.

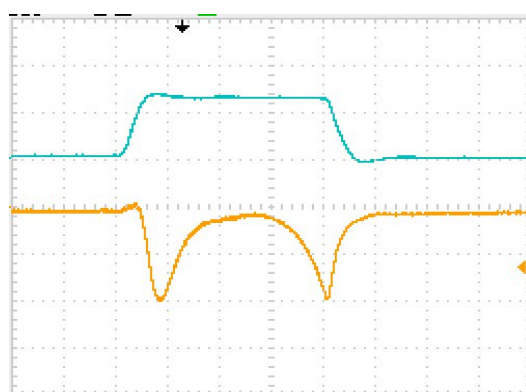


Rys. 9. Emisja elektronów w warunkach niskiego poziomu pola elektrycznego przyspieszającego elektrony – schemat zastępczy układu emisji elektronów.



Rys. 10. Wyprowadzenie wiązki elektronowej z akceleratora.

prądu cewki skupiającej w celu minimalizacji strat transmisji wiązki. Na rys. 11 przedstawiono oscylogramy impulsu napięcia oraz sygnał odpowiadający centrowaniu wiązki po wprowadzeniu niezbędnych korekt.



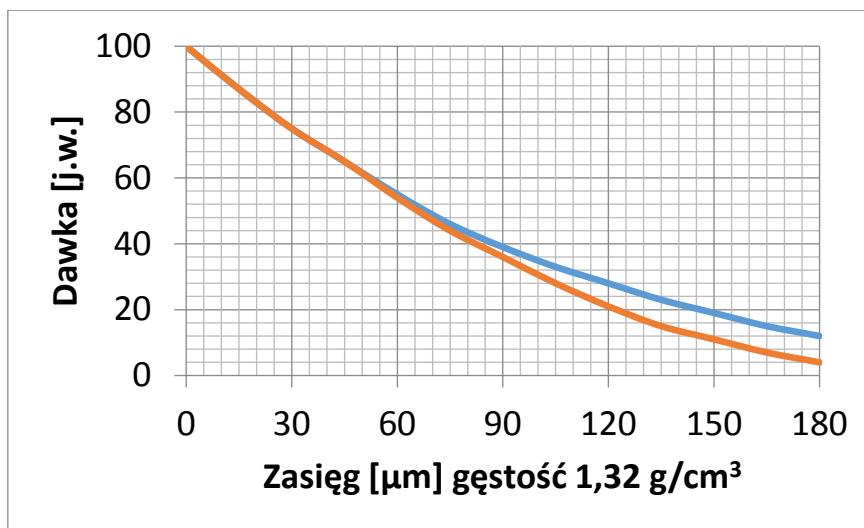
Rys. 11. Testowe sygnały elektryczne z poprawnie pracującego układu przemiatania: impuls napięcia zasilającego generator (przebieg górny, 10 V/dz), sygnał prądowy ilustrujący symetrię układu przemiatania (przebieg dolny, 0,1 V/dz). Skala czasowa – 0,1 ms/dz.

#### 4. WYNIKI EKSPERYMENTÓW I POMIARÓW

Akcelerator IŁU-6 jest wyposażony w układ detekcyjny, który pozwala określić z dużą dokładnością amplitudę napięcia przyspieszającego elektrony. Układ ten funkcjonuje również przy obniżonym napięciu przyspieszającym na poziomie 150-300 kV, które uzyskano poprzez uruchomienie oddzielnego modulatora impulsowego (rys. 4). W celu potwierdzenia otrzymanych wyników przeprowadzono pomiary eksperymentalne rozkładu dawki głębinowej wykorzystując dozymetry foliowe z B3 i PCV, a także obliczono rozkład dawki głębinowej metodą Monte Carlo przy użyciu programu Mode-RTL. Pozwoliło to na określenie charakterystyki wiązki elektronów przy obniżonej energii oraz na oszacowanie błędu związanego z zastosowaniem określonej metody. Na rys. 12 przedstawiono wyniki pomiarów z zastosowaniem dozymetru B3

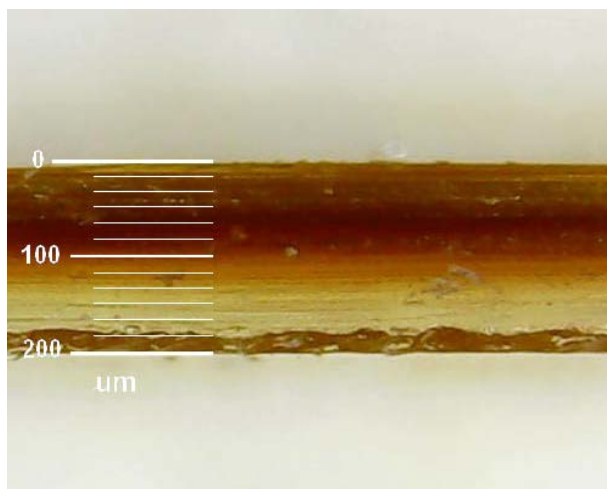


wykonanych po wprowadzeniu zmian oraz wyniki obliczeń przy użyciu programu Mode-RTL. Pomiary i obliczenia wykonano przy amplitudzie impulsu napięcia przyspieszającego elektrony na poziomie 320 kV. Pomiary przeprowadzono w układzie z oknem wyjściowym z folii tytanowej o grubości 50  $\mu\text{m}$  oraz z dodatkową folią tytanową o tej samej grubości (łączna grubość folii tytanowych wynosiła 100  $\mu\text{m}$ ). Do pomiarów zastosowano folię dozymetryczną B3. Wyniki dla serii pomiarów i obliczeń znormalizowano pod względem wartości odpowiadającej powierzchni folii. Odległość między oknem wyjściowym akceleratora a powierzchnią dozymetru wynosiła dla obu przypadków 5 cm. Przyjęto gęstość folii na poziomie 1,32  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Uzyskano zadowalającą zgodność między danymi eksperymentalnymi a wynikami obliczeń. Obserwowana różnica w zasięgu jest wynikiem szeregu czynników, takich jak nieliniowość dozymetru B3 przy zbyt dużych dawkach, nieuwzględnienie w obliczeniach wpływu krzywizny tytanowej folii wyjściowej akceleratora oraz rozrzutu energetycznego wiązki.

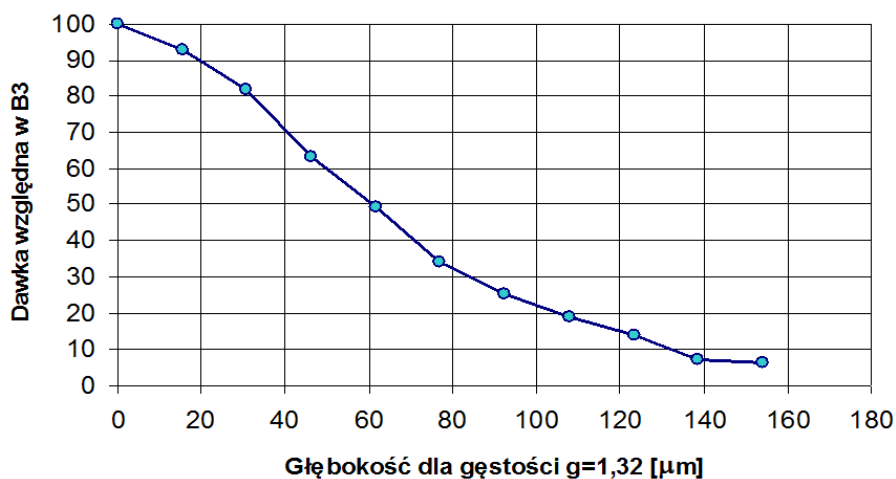


Rys. 12. Krzywa rozkładu dawki głębiny dla energii elektronów  $E_p = 320 \text{ keV}$  przy zastosowaniu dodatkowej folii tytanowej (łączna grubość tytanu – 100  $\mu\text{m}$ ) – wyniki eksperymentalne z pomiarów dozymetrem B3 (krzywa górna), wyniki obliczeń metodą Monte Carlo (krzywa dolna).

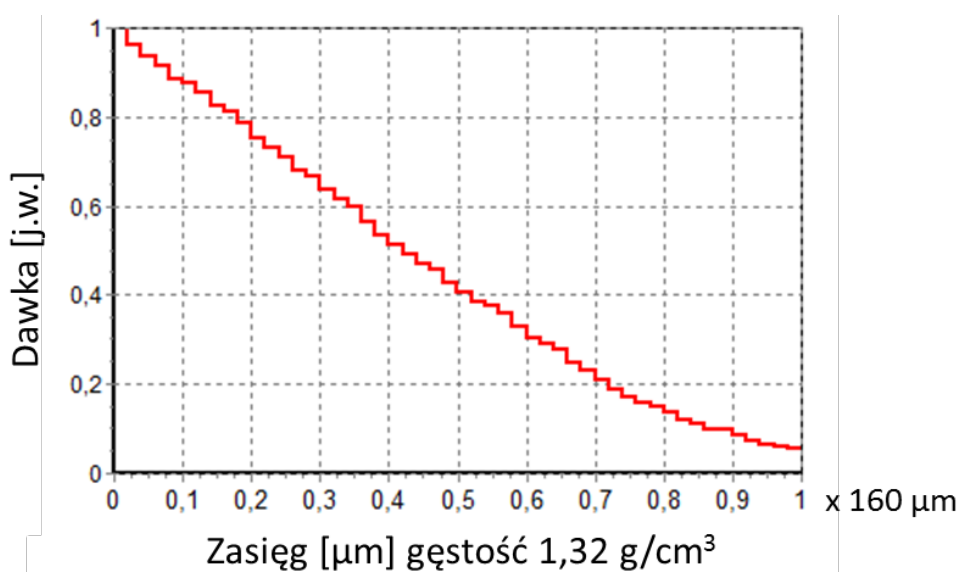
Na rys. 13 przedstawiono obraz mikroskopowy przekroju folii dozymetrycznej PCV napromieniowanej przy energii początkowej 320 keV w geometrii z folią tytanową o grubości 50  $\mu\text{m}$  (okno wyjściowe akceleratora). Jak łatwo zauważyć, zasięg elektronów jest mniejszy niż grubości folii, która wynosiła 190  $\mu\text{m}$ .



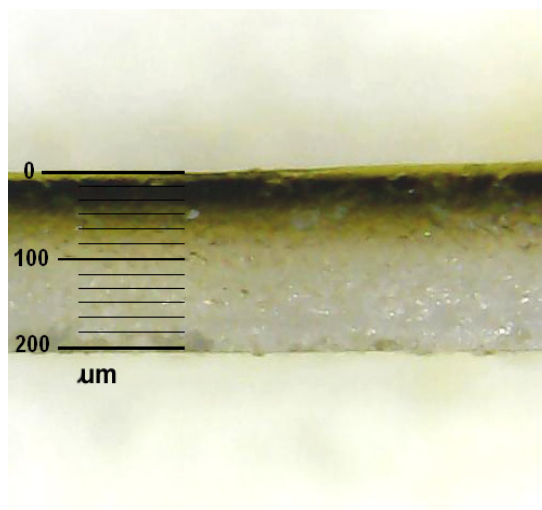
Rys. 13. Obraz mikroskopowy przekroju folii dozymetrycznej PCV napromieniowanej przy energii początkowej 320 keV.



Rys. 14. Krzywa rozkładu dawki głębiny dla energii elektronów  $E_p = 200$  keV – wyniki pomiarów dawki przeprowadzonych z wykorzystaniem folii B3.



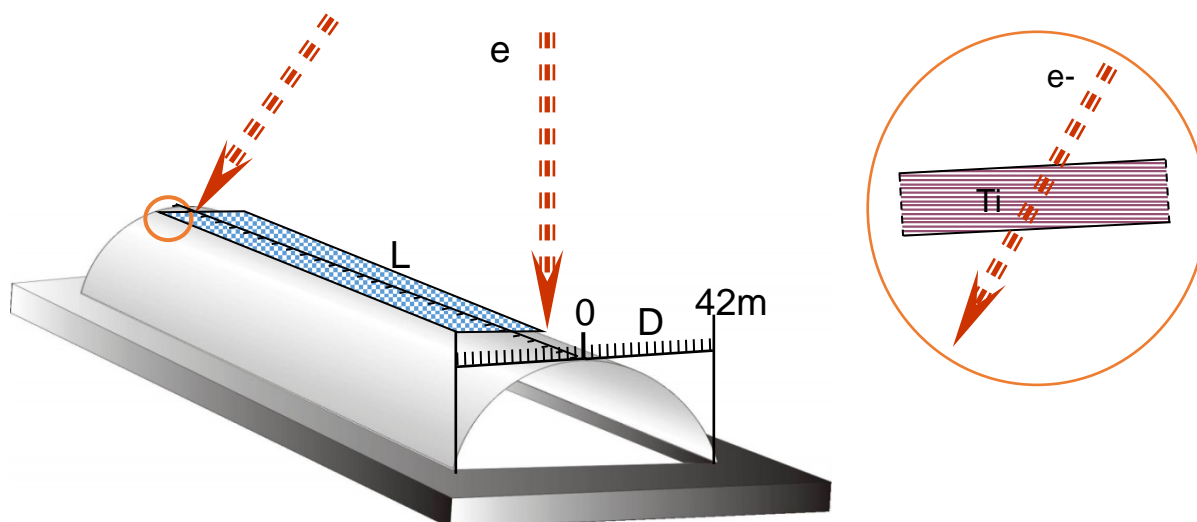
Rys. 15. Krzywa rozkładu dawki głębiny dla energii elektronów  $E_p = 200$  keV – wyniki obliczeń metodą Monte Carlo).



Rys. 16. Obraz mikroskopowy przekroju folii dozymetrycznej PCV napromieniowanej przy energii początkowej 200 keV (gęstość PCV – ok.  $1,32$  g/cm<sup>3</sup>).

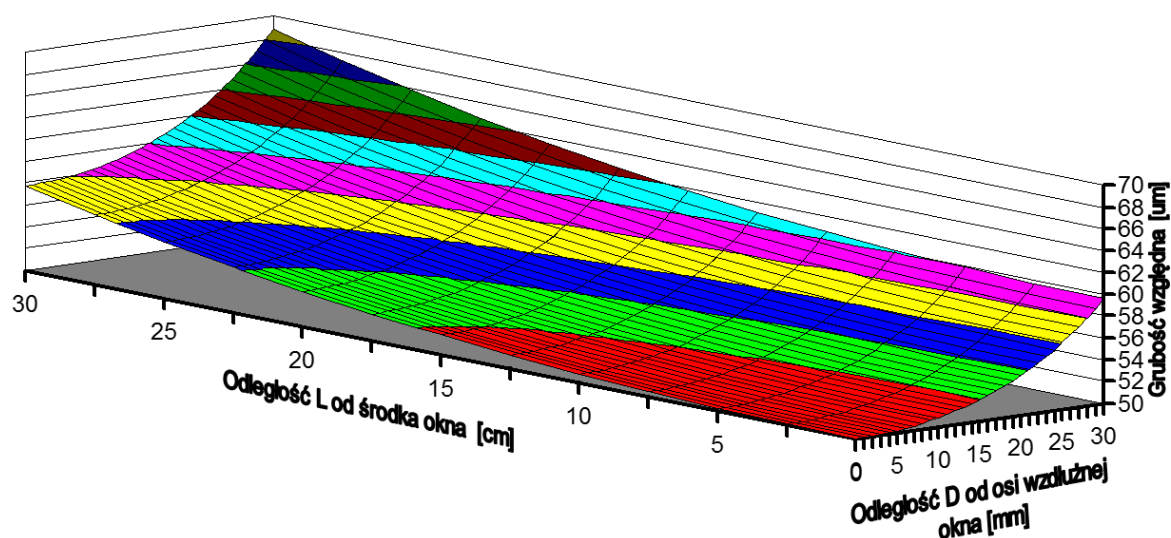
Pomiary eksperymentalne i obliczenia powtórzone przy amplitudzie napięcia zasilającego 200 keV (rys. 14 i 15). Uzyskano zadowalającą zgodność między danymi eksperymentalnymi a wynikami obliczeń. Należy zaznaczyć, że zniżenie poziomu dawki przy pomiarach eksperymentalnych bezpośrednio w pobliżu powierzchni (rys. 14) jest prawdopodobnie spowodowane nieliniowością odczytu z folii B3 przy zbyt dużych dawkach.

Na rys. 16 przedstawiono obraz mikroskopowy przekroju folii dozymetrycznej PCV napromieniowanej przy energii początkowej 200 keV w geometrii z folią tytanową o grubości 50  $\mu\text{m}$  (okno wyjściowe akceleratora). Jak łatwo zauważyć, zasięg elektronów jest zdecydowanie mniejszy od grubości folii rzędu 200  $\mu\text{m}$ .



Rys. 17. Wpływ rozkładu geometrycznego folii wyjściowej na wypadkową gęstość ośrodka nad powierzchnią obiektu poddawanego obróbce radiacyjnej.

Dokładniejsza analiza rozkładu dawki głębiny wymaga uwzględnienia wpływu zakrzywienia folii wyjściowej akceleratora oraz zmiany nachylenia przemiętanego strumienia elektronów obserwowanego na krańcach folii wyjściowej (rys. 17). Takie ukształtowanie folii wyjściowej w akceleratorze IŁU-6 zastosowano z uwagi na poprawę własności mechanicznych cienkiej folii tytanowej, dzielącej obszar wysokiej próżni od obszaru ciśnienia atmosferycznego, i związanego z tym rozkładu sił w materiale folii. Zastosowanie liniowego przemiękania



Rys. 18. Dodatkowe osłabienie energii elektronów na skutek względnego przyrostu grubości folii tytanowej wynikające z geometrii wiązka-okno.



w obszarze wyprowadzenia wiązki powoduje efekt wydłużenia drogi strumienia elektronów, szczególnie wyraźny na skrajach obszaru, w którym jest przemiatana wiązka elektronów. Podobny efekt, spowodowany zakrzywieniem folii tytanowej w przekroju poprzecznym, uzyskuje się dla tej części strumienia elektronów, która znajduje się na skrajach poprzecznego przekroju wiązki. Na rys. 18 przedstawiono wykres ilustrujący dodatkowe osłabienie energii elektronów na skutek względnego przyrostu grubości folii tytanowej wynikające z geometrii wiązka-okno. Jak łatwo zauważyć, wielkość względnego przyrostu grubości folii w krańcowych przypadkach przy nałożeniu się obu efektów (przemiatanie i zakrzywienie folii) może przekraczać o ponad 100% grubość folii tytanowej w oknie wyjściowym akceleratora.

## 5. PODSUMOWANIE

Wymogiem stawianym przez radiacyjną technologię sieciowania cienkich folii polimerowych, obróbkę powierzchniową czy powierzchniową dezynsekcję ziarna jest stosowanie energii wiązki elektronów mniejszej niż 0,3 MeV. Aby spełnić ten warunek, przystąpiono do wprowadzenia niezbędnych zmian w konstrukcji akceleratora ILU-6, a w szczególności zaprojektowano i wykonano modulator impulsowy, który umożliwia rutynowe stosowanie wiązki elektronów o energiach 0,15-0,3 MeV. Zmiany standardowej konfiguracji akceleratora ILU-6 niezbędne dla pracy urządzenia przy obniżonej energii wiązki elektronów ilustruje tabela 2.

Tabela 2. Zmiany w konfiguracji akceleratora ILU-6 niezbędne dla pracy urządzenia przy obniżonej energii wiązki elektronów.

Układ	Czynność
Modulator impulsowy (standardowy)	Odłączenie złączy silnopiędowych
Modulator impulsowy (nowy)	Przyłączenie złączy silnopiędowych
Sterowanie standardowego modulatora impulsowego	Blokada możliwości załączenia
Polaryzacja działa elektronowego	Załączenie dodatkowego zasilania w obwodzie katody
Impulsy wyzwajające	Podawane równolegle na oba modulatory
Układ blokad i zabezpieczeń	Funkcjonują identycznie dla obu modulatorów
Układ blokad i zabezpieczeń	Sygnalizacja gotowości do pracy
Modulator impulsowy (nowy)	Załączenie zasilania
Przemiatanie	Korekta szerokości przemiatania

Dla potwierdzenia uzyskania wymaganych parametrów wiązki elektronów przeprowadzono pomiary przy wykorzystaniu folii dozymetrycznych B3 i PCV. Ponadto wykonano obliczenia metodą Monte Carlo przy użyciu programu komputerowego Mode-RTL. Wyniki pomiarów i obliczeń potwierdziły zgodność energii wiązki elektronów z odczytem detektora poziomu napięcia przyspieszającego. Rejestrowany rozrzut parametrów wynika z nieliniowości folii dozymetrycznej B3 przy wyższych poziomach mierzonej dawki, a także nieuwzględnienia w trakcie obliczeń takich parametrów, jak rozrzut energii elektronów czy zakrzywienie folii wyjściowej akceleratora wykonanej z tytanu.

Tabela 3. Aktualnie wartości parametrów akceleratora IŁU-6 po wprowadzeniu opisanych modyfikacji.

Parametr	Wartość
Zakres energii	150-300 keV
Moc wiązki	do 0.5 kW
Prąd wiązki średni	do 1 mA
Moc dawki	ok. 1kGy/s
Tryb pracy	Impulsowy, $T_{imp} = 400 \mu s$ (const.)
Częstotliwość impulsowania	2, 3, 5, 10, 15, 25, 50 Hz
Prąd wiązki w impulsie	do 50 mA
Szerokość przemieszczenia	do 50 cm

W tabeli 3 przedstawiono aktualne wartości parametrów akceleratora IŁU-6 po wprowadzeniu opisanych modyfikacji modulatora impulsowego. Czas przygotowania akceleratora IŁU-6 w reżymie niskich energii nie przekracza 30 min. Niezbędne przełączenia w układzie modulatora impulsowego muszą zostać wykonane przy wyłączonych obwodach zasilania. Jednocześnie należy podkreślić, że w wyniku podłączenia zmodyfikowanego modulatora impulsowego nie zostały naruszone żadne obwody blokad i sygnalizacji, które zapewniają bezpieczną eksploatację akceleratora. Uruchomienie modulatora impulsowego (nominalnego lub zmodyfikowanego) jest możliwe jedynie po spełnieniu warunków BHP określonych przez istniejący w akceleratorze IŁU-6 układ sterowania i blokad.