

AKCELERATORY ELEKTRONÓW STOSOWANE W TECHNICIE RADIACYJNEJ (niezawodność, aspekty ekonomiczne)

*Accelerators of electrons applied in radiation processing
(reliability, economic aspects)*

Zbigniew Zimek

Streszczenie: Rozwój technologiczny akceleratorów stosowanych w technice radiacyjnej jest dobrze widoczny w dłuższej skali czasowej. Obecnie szczególnie intensywnie kontynuowane są prace mające na celu podniesienie sprawności elektrycznej akceleratorów, obniżenie ich ceny oraz podniesienie niezawodności. W niedalekiej przyszłości możliwy będzie transfer technologii z obszaru akceleratorów badawczych stosowanych w fizyce wysokich energii, co pozwoli na konstrukcję innowacyjnych urządzeń poszerzających znacząco zakres możliwości technicznych i cenowych. Blisko 3000 akceleratorów elektronów znalazło do chwili obecnej zastosowanie w technice radiacyjnej, która wykorzystuje wiązkę elektronów jako narzędzie do inicjowania pożądaných reakcji chemicznych, modyfikacji materiałów, a także wykorzystuje biobójcze działanie promieniowania jonizującego. Ogromne możliwości upowszechnienia technologii radiacyjnych są związane z wykorzystaniem radiacyjnej obróbki produktów żywnościowych oraz zastosowaniem na szeroką skalę wiązki elektronów w instalacjach związanych z ochroną środowiska.

Najliczniejszą grupą akceleratorów elektronów stosowanych w technice radiacyjnej są niskoenergetyczne akceleratory o działaniu bezpośrednim. Szczególną klasą urządzeń są akceleratory rezonansowe, umożliwiające uzyskanie wysokich energii oraz mocy wiązki elektronów. Znaczącym osiągnięciem aplikacyjnym była konstrukcja i instalacja rezonansowego akceleratora typu Rhodotron z mocą wiązki 560 kW i energią elektronów 7 MeV, wyposażonego w konwerty wiązki elektronów na promieniowanie hamowania. Urządzenie tego typu stanowi ekwiwalent źródła gamma o aktywności 4,4 M Ci gamma Co60.

Niezawodność czyli prawdopodobieństwo, że akcelerator może pełnić swoje funkcje w określonym czasie w wyznaczonych warunkach, oraz dostępność czyli czas, w którym akcelerator wypełnia swoje zadania to parametry, które w zastosowaniach przemysłowych nabierają podstawowego znaczenia. Wyroby modyfikowane radiacyjnie muszą spełniać wszystkie kryteria przydatności zgodnie z oczekiwaniami rynku, a jednocześnie technologie radiacyjne muszą wykazać się lepszymi wskaźnikami techniczno-ekonomicznymi w porównaniu do konwencjonalnych technologii aktualnie istniejących. Stąd konieczność optymalizacji decyzji inwestycyjnych głównie z uwagi na wysokość kosztów związanych z zakupem akceleratora i jego eksploatacją. Konieczne jest prowadzenie nieustannych wysiłków dla zwiększenia zrozumienia przydatności technologii radiacyjnych, co może być ważnym czynnikiem wzrostu tego przemysłu. W obecnych warunkach współpraca z przemysłem staje się niezbędnym warunkiem inicjowania i rozwijania badań aplikacyjnych niezbędnych przy opracowaniu nowych technologii radiacyjnych.

Abstract: The development of the accelerator technology applied in the radiation processing is well visible in the longer time scale. The current issues are improvement of the electric efficiency of accelerators, the lowering of their price and elevation of accelerator reliability. The transfer of accelerator technology from the field of high energy physics is quite possible in the near future. It will allow to construct innovative devices and offer significantly better technical capabilities and unit price. Nearly 3000 accelerators of electrons have been applied in radiation processing up to now. The electron beam is used as the tool to initiating desirable chemical reactions, materials modification, and decontamination of the medical products. Huge capabilities to increase implementation of radiation processing may create electron beam utilization for food products decontamination and use on the wide scale the electron beams in processes connected with the protection of the environment.

Low energy direct accelerators are the most numerous group of the electron accelerators applied in the radiation technique. Resonance accelerators are the special class of devices capable to reach high energy and beam power. The considerable achievement is construction and installation of the accelerator Rhodotron type with the beam power of 560 kW and the energy of electrons 7 MeV. The described accelerator was equipped with the X-ray converter. This device comprises a direct equivalent of the gamma source with the activity 4.4 M Ci of Co60.

Reliability that is the probability, that the accelerator can function in the definite time in appointed conditions. Accessibility is the time, in which the accelerator functions properly. Both parameters are becoming important for industrial facilities exploitation. Products modified by radiation have to fulfill all criteria of usefulness according to market expectations. Radiation technologies have to simultaneously be characterized by better technical and economic ratings in comparison with conventional technologies. Hence the necessity of the optimization of investment decisions related to costs connected with the accelerator purchase and exploitation. The efforts are necessary for enlargement of the understanding of the radiation processing usefulness what can be the important factor of this industry growth in future. The co-operation with the industry becomes the indispensable condition of initiating and unrolling applied study related to new radiation technologies development.

Słowa kluczowe: akceleratory elektronów, technika radiacyjna, niezawodność, aspekty ekonomiczne

Keywords: electron accelerators, radiation processing, reliability, economic aspects

Wykorzystanie akceleratorów w technice radiacyjnej

Przyjmuje się, że do chwili obecnej zbudowano ok. 30000 akceleratorów różnego typu przeznaczonych do zastosowań w nauce, medycynie i przemyśle. Z tej liczby ok. 3000 urządzeń znalazło zastosowanie w technice radiacyjnej, która wykorzystuje wiązkę elektronów jako narzędzie do inicjowania pożądanych reakcji chemicznych, modyfikacji materiałów, a także wykorzystuje biobójcze działanie promieniowania jonizującego. Stosunkowo najczęściej stosuje się akceleratorów elektronów do obróbki radiacyjnej materiałów polimerowych oraz sterylizacji radiacyjnej. Ponadto opracowano wiele innych technologii, takich jak modyfikacja przyrządów półprzewodnikowych, zmiany zabarwienia w szkle i kamieniach półszlachetnych, czy wiele technologii odnoszących się do modyfikacji powierzchniowej obejmującej takie procesy jak utwardzanie powłok lakierniczych, szczepienie czy wykorzystanie obróbki radiacyjnej w procesie drukowania (Tabela 1). Ogromne możliwości upowszechniania wykorzystania technologii radiacyjnych odnoszą się do wykorzystania radiacyjnej obróbki produktów żywnościowych czy zastosowania na szeroką skalę wiązki elektronów w procesach związanych z ochroną środowiska (uzdatnianie osadów ściekowych, usuwanie zanieczyszczeń z gazów odlotowych).

Tabela 1. Przemysłowe wykorzystanie akceleratorów elektronów w technice radiacyjnej

Table 1. Industrial application of accelerators of electrons in radiation technology

Modyfikacja polimerów	<ul style="list-style-type: none"> • Kable i przewody elektryczne • Wyroby termokurczliwe • Wytwarzanie opon samochodowych • Pianki polimerowe • Sztuczna skóra • Folie do powlekania i pakowania
Sterylizacja/Dezynsekcja	<ul style="list-style-type: none"> • Sterylizacja wyrobów medycznych • Higienizacja przypraw • Dezynsekcja ziarna
Ochrona środowiska	<ul style="list-style-type: none"> • Oczyszczanie gazów odlotowych • Oczyszczanie wody, ścieków i osadów
Inne	<ul style="list-style-type: none"> • Obróbka powierzchniowa • Półprzewodniki • Kompozyty ceramiczne

Praktyczne wykorzystanie akceleratorów w technologii radiacyjnej datuje się od połowy lat 50. ubiegłego wieku. Od tego czasu nastąpił znaczący rozwój technologii akceleratorowej. Obecnie trwają prace nad budową akceleratorów o mocy wiązki sięgającej MW (zastosowanie do ochrony środowiska) czy też budowa zwartych urządzeń charakteryzujących się niską energią i dużą mocą wiązki przeznaczonej do obróbki powierzchniowej. Jednocześnie kontynuowane są prace mające na celu podniesienie sprawności elektrycznej akceleratorów, obniżenie ich ceny oraz podniesienie niezawodności. Wymienione działania mają w założeniach podnieść efektywność ekonomiczną procesów radiacyjnych.

Jednym z dwóch podstawowych parametrów akceleratorów elektronów wykorzystywanych w technice radiacyjnej to energia elektronów określająca ich zasięg w obrabianym materiale. W pewnym uproszczeniu można przyjąć, że zasięg jest określony wzorem:

Zasięg [g/cm²] = 0,37 (energia elektronów [MeV] – 0,2)

przy jednostronnym napromieniowaniu i założeniu równości dawki na powierzchni produktu i jego spodzie. Zasięg elektronów, a więc energia elektronów jednoznacznie określa gabaryty produktu przy założonej jego gęstości.

Drugi z podstawowych parametrów to moc średnia wiązki elektronów, która wyznacza wydajność procesu przy założonym poziomie dawki. Wydajność procesu określa zależność:

**Wydajność [kg/h] = 3600 (moc wiązki [kW])
(współczynnik wykorzystania wiązki)/(dawka [kGy])**

Dwa wymienione wyżej parametry muszą być uwzględnione przy wyborze typu i możliwości technicznych akceleratora elektronów przeznaczonego do realizacji konkretnej technologii radiacyjnej, gdyż jedynie optymalizacja doboru energii i mocy wiązki umożliwi osiągnięcie korzystnych wskaźników ekonomicznych. Oczywiście lista kryteriów jest znacznie dłuższa gdyż wielkość ceny urządzenia wpływa na poziom kosztów inwestycyjnych, a zużycie energii elektrycznej przekłada się na koszty eksploatacyjne. Wymiary akceleratora mają istotny wpływ na wielkość i zagospodarowanie budynku, a niezawodność akceleratora określa jego dostępność do wykonywania zadań produkcyjnych, a tym samym efekty ekonomiczne. W Tabeli 2 przedstawiono graniczne osiągi techniki akceleratorowej odniesione do urządzeń obecnie wykorzystywanych w procesach radiacyjnych.

Tabela 2. Graniczne osiągi dla akceleratorów elektronów stosowanych w procesach radiacyjnych

Table 2. Boundary values for accelerators of electrons applied in radiation processing

Typ akceleratora Parametr	Bezpośredni DC	UHF 100 - 200 MHz	Liniowy 1,3–9,3 GHz
Prąd średni wiązki	<2 A	<100 mA	<30 mA
Energia elektronów	0,05–5 MeV	0,3–10 MeV	2–10 MeV
Moc wiązki	~500 kW	700 kW	150 kW
Sprawność elektryczna	60 – 80 %	20 – 50 %	10 – 20 %

Akceleratorzy o działaniu bezpośrednim (akceleratorzy transformatorowe)

Najliczniejszą grupą akceleratorów elektronów stosowanych w technice radiacyjnej są akceleratorzy o działaniu bezpośrednim, często nazywane akceleratorami transformatorowymi. Proces przyśpieszania elektronów inicjuje przyłożone do sekcji przyśpieszającej napięcie (różnica potencjałów). Niekiedy napięcie przyśpieszające jest podawane w formie impulsów. Główne różnice między akceleratorami tego typu sprowadzają się do wyboru i konstrukcji zasilacza wysokiego napięcia, oraz mocy wiązki, a także wymiarów strefy wyprzewadzenia wiązki. Stosunkowo liczne są urządzenia dysponujące wiązką elektronów o energii 0,3 MeV oraz szerokością strefy napromieniowania mieszczącą się w przedziale 0,3-3 m. Zwykle akceleratorzy przyśpieszające elektrony w tym zakresie energii wyposażone są w lokalne osłony przed promieniowaniem jonizującym. Daje to możliwość traktowania tych akceleratorów z uwagi na warunki eksploatacji zarówno pod względem formalnym (ochrona radiobiologiczna) jak i faktycznym jak każde inne urządzenie produkcyjne.

Zdecydowanie mniej urządzeń zbudowano na wyższe energie. Stosowanie zbyt wysokich napięć przyśpieszających elektrony (np. 5 MV) wymaga konstrukcji urządzeń o znacznych wymiarach, co przekłada się na konieczność zwiększenia objętości i gabarytów budynku oraz osłon przed promieniowaniem jonizującym. Niekiedy (przy napięciach poniżej 1-1,5 MV) stosuje się połączenie kablowe między zasilaczem WN a sekcją przyśpieszającą. Daje to możliwość ograniczenia gabarytów pomieszczeń gdzie instalowane są akceleratorzy.

W ostatnim okresie niezwykle dynamicznie rozwijają się konstrukcje akceleratorów na bardzo niskie energie poczynając od 80 keV. Przykładem takich rozwiązań są akceleratorzy produkowane przez szwajcarską firmę Ebeam Technologies.

Na fot. 1 przedstawiono konstrukcję takiego właśnie urządzenia. Podstawowe elementy wchodzące w skład akceleratora to zasilacz WN, pulpit sterowania, głowica wyprowadzająca wiązkę elektronów oraz wymiennik ciepła. Urządzenia tego typu dysponują wiązką w przedziale energii elektronów 80 – 300 keV. Zgodnie ze specyfikacją nierównomierność wyprowadzenia wiązki jest lepsza od $\pm 10\%$. Szczególną konstrukcją charakteryzuje się głowica służąca do wyprowadzenia wiązki elektronów. Jest to dioda z liniową katodą hermetycznie zaspawana w metalowym pojemniku wyposażonym w folię wyjściową z tytanu o grubości 10 μm . Gwarantowany czas pracy takiej sekcji przyspieszającej wynosi 8000 h. Istnieje możliwość regeneracji układu poprzez wymianę okna i węża katody przez producenta akceleratora.



Fot. 1. Akcelerator elektronów produkowany przez firmę ebeam Technologies ze Szwajcarii. Na rysunku od lewej widoczny jest zasilacz WN, pulpit sterowania, głowica przyspieszająca elektrony z oknem wyjściowym, wymiennik ciepła

Phot.1. Accelerator of electrons produced by ebeam Technologies, company from Switzerland (from the left side of the picture: HV feeder, the control unit, electrons accelerating head with the exit window, the heat exchanger)

Na fot. 2 przedstawiono sekcję przyspieszającą oraz wyprowadzenie wiązki w akceleratorze zbudowanym przez firmę Crosslinking AB. Podstawowe parametry tego urządzenia są następujące:

- napięcie przyspieszające 75 - 250 kV
- prąd wiązki 0 - 2000 mA
- strefa wyprowadzenia wiązki 400 - 3000 mm
- wydajność 14000 kGy m/min
- nierównomierność wiązki < 10 %
- brak zewnętrznego chłodzenia folii wyjściowej.



Fot. 2. Akcelerator przyspieszający elektrony w zakresie 75-250 kV wytwarzany przez firmę Crosslinking AG

Phot. 2. Accelerator with accelerating voltage range 75-250 kV, produced by Crosslinking AG company

Wyższe energie oraz wysokie moce wiązki są niezbędne w urządzeniach stosowanych w instalacjach działających na rzecz ochrony środowiska. Na fot. 3 przedstawiono widok urządzeń wyjściowych akceleratora ELV 12 produkcji rosyjskiej, pracującego w instalacji przeznaczonej do oczyszczania ścieków przemysłowych o wydajności 10 000 m³ na dobę. Energia elektronów w akceleratorze

ELV 12 wynosi 1 MeV, a moc wiązki 400 kW. Dla wyprowadzenia pełnej mocy wiązki wykorzystano trzy niezależne urządzenia wyjściowe. W obudowie ciśnieniowej akceleratora umieszczono obok działa elektronowego i sekcji przyspieszającej transformator WN z sekcjonowanym uzwojeniem wtórnym wyposażonym w układ prostowniczy.



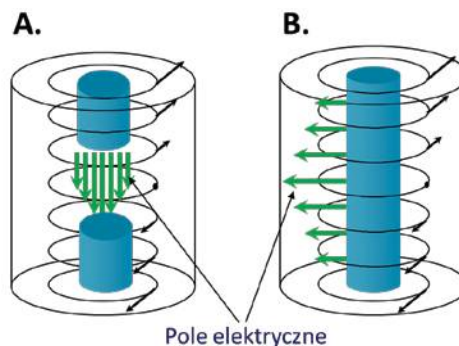
Fot. 3. Widok urządzeń wyjściowych akceleratora ELV 12 pracującego w instalacji do oczyszczania ścieków przemysłowych

Phot. 3. View of the exit devices of the accelerator ELV 12 applied in facility for industrial waste treatment

Obok urządzeń stacjonarnych niekiedy w charakterze instalacji pilotowych wykorzystuje się akceleratory umieszczone na przewoźnych kontenerach. Z uwagi na konieczność stosowania osłon przed promieniowaniem jonizującym energia elektronów w takich urządzeniach nie przekracza 0,7 MeV, a moc wiązki 20 kW. W ostatnim okresie instalacje takie wykorzystywano w pracach nad oczyszczaniem ścieków, usuwaniem zanieczyszczeń z fazy gazowej oraz dezynsekcji ziarna. Pomyślna ocena techniczna i ekonomiczna tych procesów może w istotny sposób przyczynić się do upowszechnienia techniki radiacyjnej w ochronie środowiska i rolnictwie.

Akceleratory rezonansowe

Szczególną klasą urządzeń są akceleratory rezonansowe wykorzystujące jeden a niekiedy kilka rezonatorów. Akceleratory tego typu można podzielić na urządzenia, w których wiązka elektronów jest przyspieszana jedno lub wielokrotnie. Łatwo zauważyć, że większa liczba rezonatorów lub wielokrotne przejście przez strefę przyspieszania stosuje się dla zwiększenia energii elektronów. Na rys. 1 przedstawiono schematycznie konfigurację rezonatorów pracujących w układzie jedno (A) i wieloprzelotowym (B).



Rys. 1. Konstrukcja rezonatora przyspieszającego wiązkę elektronów: A – z jednym przejściem wiązki przez strefę przyspieszania (akceleratory typu ILU); B – z wieloma przejściami przez strefę przyspieszania (akceleratory typu Rhodotron)

Fig. 1. Construction of accelerating electron beam resonator: A – resonator with one electron beam passage through accelerating zone (ILU type accelerators); B - resonator with several passages through accelerating zone (Rhodotron type accelerators)

Akceleratory typu ILU budowane są w Rosji od lat 70. ubiegłego wieku. W Tabeli 3 przedstawiono podstawowe parametry akceleratorów tego typu, które znalazły szerokie zastosowanie w technice radiacyjnej. Źródłem energii fali elektromagnetycznej przyspieszającej wiązkę elektronów są generatory zbudowane na trójfazowej próżniowej pracującej z częstotliwością 127 MHz. W Polsce pracują aktualnie trzy urządzenia tego typu. Na rys. 5 przedstawiono widok hali technologicznej i sterowni akceleratora ILU-10 zainstalowanego w firmie Radpol z Człuchowa, produkującej w skali masowej rury i mufy termokurczliwe modyfikowane radiacyjnie. Akceleratory typu ILU z uwagi na ich prostą konstrukcję, sprawność elektryczną na poziomie 25-32 %, oraz elastyczność w doborze parametrów znalazły zastosowanie w instalacjach przemysłowych. Dla zwiększenia energii przyspieszonych elektronów zwiększono do liczby rezonatorów w akceleratorach ILU 12 i 14.

Tabela 3. Akceleratory rezonansowe typu ILU

Table 3. ILU type resonator accelerators

Typ akceleratora	ILU-6	ILU-8*	ILU-10	ILU-12**	ILU-14**
Energia elektronów	0,5-2,5 MeV	0,8-1 MeV	4-5 MeV	5 MeV	7,5 - 10 MeV
Moc wiązki	20 kW	20 kW	50 kW	100/300 kW	100 kW

*osłona lokalna 76t

**systemy z kilkoma rezonatorami



Fot. 4. Widok hali technologicznej i sterowni akceleratora ILU-10 w firmie Radpol z Człuchowa produkującej w skali masowej rury i mufy termokurczliwe modyfikowane radiacyjnie

Phot. 4. View of the technological hall and control room of ILU-10 accelerator in Radpol, company from Człuchów, producing thermoshrinkable radiation-modified tubes and sleeve joints on a massive scale

Koncepcja wielokrotnych przejść wiązki elektronów w procesie przyspieszenia przez pojedynczy rezonator w celu zwiększenia energii elektronów została opracowana we Francji, ale rozwinięta i z sukcesem wdrożona przez firmę IBA z Belgii w połowie lat 80. ubiegłego wieku. W chwili obecnej wchodzi do praktycznego użytku druga generacja tych akceleratorów. Charakteryzuje się ona zwiększoną sprawnością elektryczną przy niższej mocy średniej wiązki oraz większą elastycznością w eksploatacji m.in. poprzez możliwość jednoczesnej pracy dwóch niezależnych linii technologicznych wykorzystujących wiązkę elektronów i strumień promieniowania hamowania. Ponadto osiągnięto większą niezawodność oraz unifikację urządzeń i części zamiennych. Szczególną zaletą jest modułowa konstrukcja akceleratora pozwalająca na sukcesywną rozbudowę akceleratora w celu zwiększenia mocy średniej wiązki. Widok ogólny akceleratora typu Rhodotron przedstawia fot. 5. Źródłem energii fali elektromagnetycznej jest tetroda mocy pracująca na częstotliwości 107 MHz. W części górnej rezonatora są zamontowane elementy układu generacyjnego, a po obwodzie są zainstalowane elektromagnesy odchylające

wiązkę elektronów. Warto zaznaczyć, że akcelerator typu Rhodotron TT1000 jest w stanie przyspieszać elektrony do energii 5 i 7 MeV z maksymalnym prądem wiązki rzędu 100 mA. Akcelerator tego typu uruchomiono po raz pierwszy w warunkach pracy ciągłej z prądem wiązki 93 mA i energii przyspieszonych elektronów 7 MeV w lutym 2003 r.

Tabela 4. Podstawowe parametry akceleratorów typu Rhodotron drugiej generacji

Table 4. Basic parameters of 2nd generation Rhodotron type accelerators

Typ akceleratora	TT100	TT200	TT300	TT1000
Energia elektronów	10 MeV	10 MeV	10 MeV	7 MeV
Moc wiązki (nom.)	40 kW	100 kW	245 kW	560 kW
Zakres zmian mocy wiązki	-	35-100 kW	50-245 kW	100-560 kW
Prąd wiązki (nom.)	4 mA	10 mA	35 mA	80 mA



Fot. 5. Widok ogólny akceleratora typu Rhodotron. W części górnej zamontowane są elementy układu generacyjnego, po obwodzie rezonatora są zainstalowane elektromagnesy odchylające wiązkę elektronów

Phot. 5. General view of the Rhodotron type accelerator. The HF generator elements are installed in the upper part, the bending electromagnets are installed around resonator



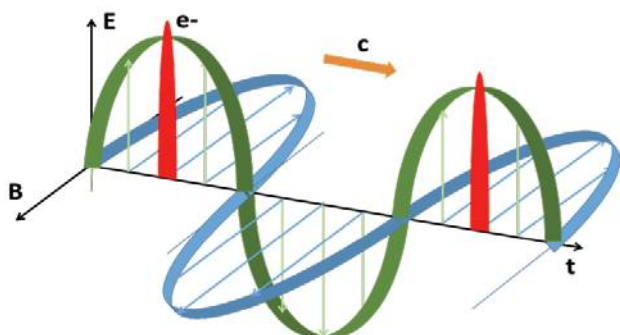
Fot. 6. Makietka instalacji radiacyjnej wykorzystującej akcelerator typu Rhodotron pracujący w reżymie promieniowania hamowania, pracująca w firmie Leoni, Szwajcaria

Phot. 6. Model of radiation processing facility equipped with the Rhodotron type accelerator operated in the of X-ray regime, located at Leoni, company from Switzerland

W Tabeli 4 przedstawiono podstawowe parametry akceleratorów typu Rhodotron o zróżnicowanych możliwościach technologicznych. Znacznym osiągnięciem aplikacyjnym była konstrukcja i instalacja akceleratora typu Rhodotron z mocą wiązki 560 kW i energii elektronów 7 MeV, wyposażonego w konwerter wiązka elektronów/promieniowanie hamowania. Urządzenie tego typu stanowi ekwiwalent źródła gamma o aktywności 4,4 MCi gamma Co60. Konstrukcja urządzeń technologicznych zapewnia możliwość wykorzystania do bieżącej produkcji wymiennie instalację akceleratorową lub instalację wyposażoną w źródła gamma. Jednocześnie należy zaznaczyć, że eksploatacja instalacji akceleratorowej pracującej w reżymie emisji promieniowania hamowania jest tańsza od analogicznej pod względem wydajności instalacji gamma. Decydują o tym porównane koszty energii elektrycznej oraz koszty sukcesywnego uzupełniania źródeł gamma. Wydajność instalacji akceleratorowej pracującej w reżymie promieniowania hamowania z mocą wiązki 560 kW przy energii 7 MeV w trakcie 8000 h/rok wynosi 124,000 m³ dla produktu o gęstości 0,15 g/cm³ i dawce 25 kGy. Warto zaznaczyć, że w obliczeniach uwzględniono ubytek 9 % czasu na przeprowadzenie prac konserwacyjnych i serwisowych. W porównaniu ze źródłem gamma zredukowano: czas obróbki, rozrzut dawki, efekty emisji ozonu wywołujące utlenianie produktu oraz uzyskano znacznie lepsze warunki do prowadzenia procesu sieciowania radiacyjnego. Na fot. 6 przedstawiono widok makiety instalacji radiacyjnej wykorzystującej akcelerator typu Rhodotron pracujący w reżymie promieniowania hamowania z przystosowanym do tego celu systemem transportu obiektów poddanych obróbce radiacyjnej.

Akceleratory liniowe

Liniowe akceleratory elektronów wykorzystujące w procesie przyspieszania energię mikrofalową są najczęściej wykorzystywane w procesie sterylizacji radiacyjnej. Technologia wykorzystująca energię mikrofalową umożliwia uzyskiwanie wysokich energii przyspieszonych elektronów. Ponad 6000 akceleratorów tego typu zbudowano dla potrzeb medycyny nuklearnej. Na rys. 2 przedstawiono zasadę przyspieszania elektronów przy wykorzystaniu składowej elektrycznej fali elektromagnetycznej poruszającej się synchronicznie ze zgóstkami elektronów w sekcji przyspieszającej w postaci falowodu z przesłonami. Podobne efekty można uzyskać przy wykorzystaniu fali stojącej i poruszającej się wiązce elektronu przy wykorzystaniu nieco odmiennej konstrukcji sekcji przyspieszającej.

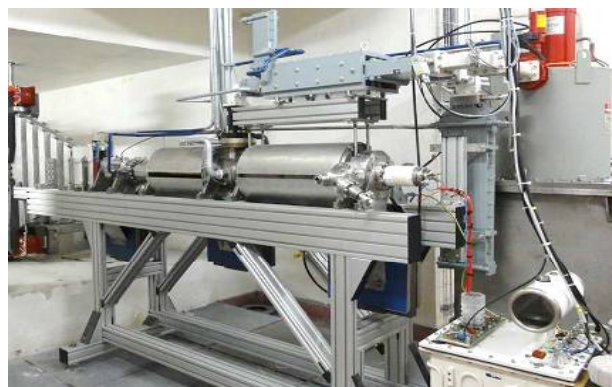


Rys. 2. Zasada przyspieszania elektronów składową elektryczną fali elektromagnetycznej poruszających się synchronicznie w liniowym akceleratorze z falą bieżącą

Fig. 2. Principle of accelerating the electrons in traveling wave mode by electric component of the electromagnetic wave

Na fot. 7 przedstawiono widok ogólny liniowego akceleratora elektronów z falą bieżącą zbudowany przez firmę CoRAD z Rosji. Podstawowe parametry tej instalacji radiacyjnej są następujące:

- umieszczony poziomo akcelerator został przystosowany do współpracy z jednoszynowym transporterem,
- możliwość dwustronnego napromieniowania w jednym przejściu przez strefę napromieniowania,
- osłona przed promieniowaniem składa się z bloków z betonu o łącznej objętości 360 m³,
- całkowita powierzchnia zabudowy ~240 m²,
- modulator klustronu oraz działa elektronowego wykonane na elementach półprzewodnikowych,
- zapotrzebowanie na energię elektryczną <75 kW,
- możliwość zmiany energii elektronów, prądu wiązki oraz długości przemiatania,
- wydajność dla dawki 20-30 kGy, 55 opakowań/h (40 x 40 x 60 cm³, 19 kg).



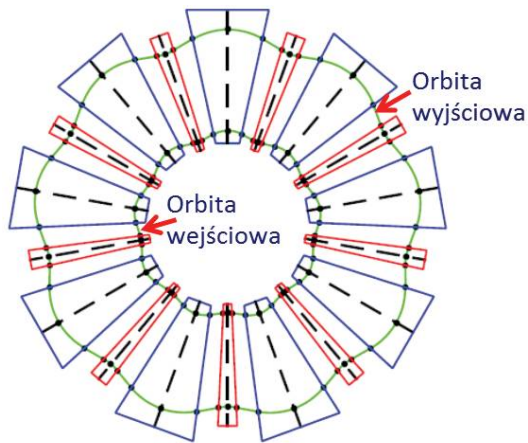
Fot. 8. Widok ogólny liniowego akceleratora elektronów z falą bieżącą zbudowany przez firmę CoRAD z Rosji

Phot. 8. General view of linear accelerator of electrons operated in traveling wave mode, constructed by CoRAD company from Russia

Nowe konstrukcje akceleratorów

Podstawowe konstrukcje akceleratorów elektronów stosowane w technice radiacyjnej (akceleratory o działaniu bezpośrednim, rezonansowe oraz liniowe) są sukcesywnie usprawniane w trakcie ostatnich kilku dekad w oparciu o nowe możliwości jakie oferuje rozwój techniki w tym techniki akceleratorowej. Jednocześnie w ostatnim okresie obserwuje się tendencje do praktycznego wykorzystania osiągnięć techniki akceleratorowej stosowanej do chwili obecnej wyłącznie w urządzeniach badawczych w zakresie fizyki jądrowej. Do takich unikalnych rozwiązań zaliczyć należy cykliczny akcelerator elektronów w skrócie nazywany FFAG (**F**ixed-**F**ield **A**lternating **G**radient), pracujący z falą ciągłą o energii elektronów, mocy wiązki oraz gabarytów przystosowanych do wymagań stawianych przez technikę radiacyjną.

Charakterystyczną cechą akceleratorów eFFAG jest wykorzystanie stałego pola magnetycznego (podobnie jak w cyklotronie), stosowanie wydzielonych segmentów magnesu, oraz wykorzystanie dynamiki elektronów podobnie jak w synchrotronie. Na rys. 10 przedstawiono schemat funkcjonalny akceleratora eFFAG z zaznaczeniem orbit iniekcji i ekstrakcji wiązki elektronów oraz zarys elementów magnesu.



Rys. 3. Schemat funkcjonalny akceleratora typu eFFAG. Orbita wejściowa dla energii iniekcji elektronów 50 keV. Orbita wyjściowa elektronów dla energii 9 MeV (promień <math>< 50\text{ cm}</math>)

Fig. 3. Functional diagram of the eFFAG type accelerator. Entrance orbit for electrons with energy 50 keV. Exit orbit of electrons for energy 9 MeV (radius <math>< 50\text{ cm}</math>)

Zgodnie z założeniami podstawowe parametry tego typu urządzenia pozwolą na budowę zwartego akceleratora o średnicy rzędu 1 m, energii elektronów na poziomie 9 MeV, przy prądzie wiązki 1-2 mA i mocy średniej wiązki na poziomie 140 kW. Konstrukcja taka wykorzystuje magnesy stałe (bez potrzeby zasilania energią elektryczną) oraz inne tanie elementy składowe (generator fali ciągłej bez potrzeby budowy impulsowego modulatora). Pracując z falą ciągłą parametry układu przyspieszającego będą następujące:

- pojedynczy rezonator pracujący z amplitudą napięcia przyspieszającego rzędu 100-200 keV,
- 45-90 cykli akceleracyjnych,
- wypełnienie 1ns/10 ns ~10%,
- ładunek przestrzenny do ~10⁹ elektronów/zgęstek
- rezonator o częstotliwości 100 MHz (10 ns okres).

Inną równie innowacyjną konstrukcją jest akcelerator dla potrzeb techniki radiacyjnej wykorzystujący nadprzewodzącą strukturę przyspieszającą elektrony. Sekcja przyspieszająca tego typu charakteryzuje się 10⁶ razy mniejszą powierzchnią opornością, co przekłada się na znikome straty mocy w.c.z. i podnosi sprawność urządzenia. Jednocześnie wyższa dobroć struktury oznacza mniejsze zapotrzebowanie na energię chłodzenia struktury, a moc w.c.z. prawie w całości jest przekazywana wiązce elektronów. W tych warunkach istnieje możliwość pracy ciągłej (cw – continuous wave) przy gradiencie przyspieszenia rzędu 10 MeV/m. Duża apertura przekłada się na duży prąd wiązki i daje w efekcie dużą moc wiązki. Kompaktowa struktura z dziewięcioma rezonatorami nadprzewodzącymi i przemysłowym układem chłodzenia z helem o mocy 5 W @ 4 K (cryo-cooler) charakteryzuje się według założeń następującymi parametrami:

- częstotliwość pracy: 1,3 GHz,
- energia elektronów: 10 MeV
- moc wiązki: 50 kW
- moc źródła w.c.z.: 60 kW (sprawność magnetronu 80%)
- blok helowy: 6 kW
- wymiennik ciepła: 4 kW
- sprawność elektryczna: ~ 71%

Firma Niowave Inc. z U.S.A. zbudowała już nadprzewodzący, kompaktowy, dużej mocy, akcelerator elektronów w zakresie energii 0,5-40 MeV i mocy wiązki 100 kW. Zastosowano strukturę przyspieszającą z trzema rezonatorami nadprzewodzącymi, pracującą na częstotliwości 350 MHz.

Czas trwania zgęstka elektronów ≈ 5 ps. Prąd średni wiązki do 2,5 mA, a napięcie na dziale elektronów 100 kV. Przewiduje się, że akceleratorzy tego typu będą wykorzystywane w procesie transmutacji do produkcji izotopów medycznych.

Niezawodność i dostępność akceleratorów

Niezawodność (reliability), także w odniesieniu do akceleratorów, to prawdopodobieństwo, że system może pełnić swoje funkcje w określonym czasie w wyznaczonych warunkach. Wysoka niezawodność jest wymagana gdy naprawa jest trudna lub czasochłonna. Mniejsza niezawodność może być do zaakceptowania, jeśli usterka jest usuwana szybko, a koszty prac serwisowych niewielkie.

Dostępność (availability) to czas, w którym system wypełnia swoje zadania. Wysoki stopień dostępności jest niezbędny, gdy wymagane jest zachowanie ciągłości pracy. Po określeniu przyczyn częstych awarii można podjąć działania zapobiegawcze, ale uzyskane rezultaty wymagają zaangażowania odpowiedniego personelu, czasu oraz pokrycia kosztów tych działań. Przyczyną ograniczonej niezawodności i dostępności są zróżnicowane. Do najczęstszych przyczyn zwiększonej awaryjności należą:

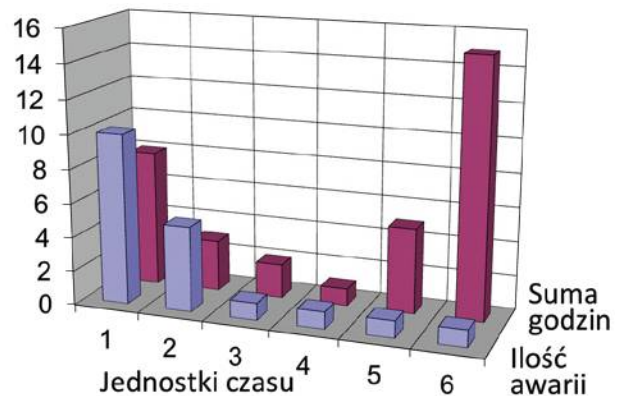
- prototypowa konstrukcja akceleratora i ograniczone doświadczenie w eksploatacji,
- parametry akceleratora bliskie maksymalnych w urządzeniach danego typu,
- stosowanie elementów o ograniczonej żywotności (np. Magnetron),
- trudności w dostawach części zamiennych (ograniczony dostęp),
- niska niezawodność akceleratora (niewłaściwy projekt, złe serwisowanie i konserwacja).

Dla efektywnej oceny jakości pracy akceleratorów stosuje się określone wskaźniki, do których należą: średni czas międzyawaryjny (MTBF – mean time between failure), średni czas trwania awarii (MDT – mean down time), średni czas naprawy (MTTR – mean time to repair). Na podstawie znajomości tych wskaźników łatwo oszacować następujące parametry:

$$\text{Dostępność} = \text{MTBF} / (\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

$$\text{Częstość awarii} = \text{MDT} / \text{MTTR}$$

Na rys. 11 przedstawiono typową zależność między częstością występowania awarii, a czasem ich trwania. Z reguły obserwujemy wiele awarii stosunkowo łatwych do usunięcia w krótkim czasie, oraz pojedyncze uszkodzenia, których usunięcie jest kłopotliwe i zabiera dużo czasu.



Rys. 4. Typowa zależność między częstością występowania awarii a czasem ich trwania

Phot. 4. Typical dependence between the frequency of the occurrence of the breakdown and the down time of accelerator

Do ważnych zagadnień związanych z niezawodnością akceleratorów zaliczyć należy: skomplikowaną obsługę urządzenia, brak właściwego współdziałania z ekipą prowadzącą prace serwisowe, brak odpowiednich szkoleń i ograniczone fundusze na ich prowadzenie, ograniczony czas na prowadzenie prac konserwacyjnych i usuwania awarii, tańsze elementy, które mogą być bardziej zawodne, brak dodatkowych systemów poprawiających niezawodność, nieodpowiednia jakość podczas uruchamiania i testowania akceleratora, brak wyspecjalizowanej ekipy serwisowej oraz brak świadomości konsekwencji zawodności urządzeń. Kompleksowa poprawa niezawodności akceleratorów powinna obejmować stosowanie wysokiej jakości elementów i podzespołów, wysoką jakość prac projektowych oraz właściwe warunki eksploatacji, konserwacji i serwisowania urządzeń.

W Tabeli 5 przedstawiono dane dotyczące czasu pracy wybranych podzespołów stosowanych w akceleratorach przemysłowych. Warto zauważyć, że gwarantowany czas pracy jest z założenia mniejszy od faktycznej żywotności danego elementu. Istotnym czynnikiem wpływającym na czas przydatności danego podzespołu są warunki jego eksploatacji określone na etapie projektowania. Czas pracy folii tytanowej wydłuża się znacząco jeśli moc wiązki akceleratora jest stosunkowo niska, a energia elektronów wysoka. Przy znacznych mocach wiązki i niskich energiach bardziej uzasadniona jest wymiana okna wyjściowego po określonym czasie np. 2000 h niż usuwanie awarii po uszkodzeniu folii i awaryjnym utracie próżni. Charakterystycznym faktem jest znacząco dłuższy czas przydatności klustronu od zbliżonego parametrami technicznymi magnetronu, co jest związane z konstrukcją tych urządzeń mikrofalowych. W przypadku lamp próżniowych częstą przyczyną wymiany jest utrata własności emisyjnych, co może przełożyć się na znaczące obniżenie prądu wiązki lub energii przyspieszonych elektronów.

Tabela 5. Czas pracy wybranych podzespołów stosowanych w akceleratorach przemysłowych

Table 5. Operation time of selected components used in industrial accelerators

Rodzaj podzespołu	Gwarancja	Czas pracy
Klustron TH-2158	4000 h	5000-10000 h
Magnetron MI-470	2000 h	2000-2500
Trioda mocy GI-50A	1500 h	7000 h
Tetroda impulsowa GMI-42B	2500 h	8000-10000 h
Tyatron TGI-5000/50	750 h	10000 h
Katoda działa elektronowego	-	3000-15000 h
Folia tytanowa	2000 h	2000-5000 h
Pompa jonowa (próżniowa)	-	40000 h

Niezawodność eksploatacji akceleratorów ma bezpośrednio przełożenie na efekty ekonomiczne i organizacyjne instalacji radiacyjnej. Do niedawna kwestie niezawodności nie były traktowane priorytetowo przy projektowaniu i budowie akceleratorów stosowanych w obróbce radiacyjnej. Dla kontrastu niezawodność akceleratorów stosowanych w medycynie, fizyce wysokiej energii, a szczególnie niezawodność akceleratorów przeznaczonych do współpracy z reaktorami ADS (Accelerator Driven System) była i jest jednym z kluczowych zagadnień przy konstrukcji tych urządzeń. Poprawa niezawodności akceleratorów stosowanych w technice radiacyjnej wymaga odpowiedniego projektu i dobrej jakości elementów składowych o przedłużonym czasie działania, co niestety przekłada się na istotne powiększenie kosztów budowy takich akceleratorów nawet 30-50 %.

Aspekty ekonomiczne

Wyroby modyfikowane radiacyjnie muszą spełniać wszystkie kryteria przydatności zgodnie z oczekiwaniami rynku, a jednocześnie technologie radiacyjne muszą wykazać się lepszymi wskaźnikami techniczno-ekonomicznymi w porównaniu do konwencjonalnych technologii aktualnie istniejących. Stąd konieczność optymalizacji decyzji inwestycyjnych głównie z uwagi na wysokość kosztów związanych z zakupem akceleratora. Mimo, że zbudowano wiele odmiennych konstrukcji akceleratorowych o szerokiej gamie możliwości technicznych, to jedynie kilka z tych urządzeń może umożliwić sukces przy wdrożeniu określonej technologii radiacyjnej, zapewniających optymalne dopasowanie możliwości technicznych akceleratora z wymaganiami stawianymi przez obróbkę radiacyjną danego wyrobu. Optymalizacja decyzji inwestycyjnych przy wdrażaniu techniki radiacyjnej obejmują następujące zagadnienia:

- finansowe (koszty inwestycyjne, eksploatacyjne, kapitałowe ...),
- techniczne (energia elektronów, moc wiązki, niezawodność, zużycie energii elektrycznej ...),
- organizacyjne (ilość zmian, prace pomocnicze, serwisowanie ...),
- technologiczne (charakterystyka produktu, wykorzystanie wiązki elektronów, ...),
- ocena maksymalnej akceptowalnej dawki/kosztu usługi.

Źródła ograniczenia efektywności inwestycji akceleratorowej to: niepełne wykorzystanie wiązki elektronów, wybór między co można w danej sytuacji organizacyjnej, a tym co jest aktualnie możliwe, ograniczone zasoby finansowe, brak możliwości spełnienia wymogów zapewnienia jakości, ograniczona elastyczność instalacji z uwagi na przyjętą technologię, ograniczona elastyczność instalacji z uwagi na warunki eksploatacji. Ograniczenia wynikające z wyboru odnoszą się do podejmowanych decyzji określających wydajność vs ilość zmian, elastyczność vs efektywność, koszty inwestycyjne vs koszty eksploatacyjne, optymalizacja kosztów vs optymalizacja parametrów technicznych, koszty przewidywane a koszty rzeczywiste.

Analiza kosztów instalacji radiacyjnej obejmuje koszty kapitałowe (inwestycyjne) oraz koszty eksploatacyjne. W skład kosztów kapitałowych wchodzi:

- koszty bezpośrednie (przygotowanie stanowiska jak np. prace rozbiórkowe, konstrukcja budynku, ściany osłono-we, fundamenty, instalacje i urządzenia elektryczne (np. transformator), instalacje rurowe, sanitarne, sprzężone powietrze, wyposażenie i armatura budynku, wyposażenie technologiczne ...)
 - koszty pośrednie (zarządzanie projektem, prace projektowe, pozwolenia i obowiązkowe testy, instalacja, uruchomienie i walidacja, rezerwa ...)
- Do kosztów eksploatacyjnych zaliczane są:
- koszty zmienne (robocizna - obsługa, nadzór, elektryczność, woda, sprzężone powietrze, inne, materiały, części zamienne, serwis nieplanowany, koszt składowania i przetwarzania odpadów...)
 - koszty stałe (koszty administracyjne z narzutami, ubezpieczenie, amortyzacja, kredyt, wymagane opłaty licencyjne, serwis planowany, wymagane testy i pomiary kalibracyjne, opłaty gruntowe, podatki...)

Koszt zakupu akceleratora jest zależnym w pierwszym rzędzie od rodzaju konstrukcji, mocy wiązki a także polityki cenowej producenta. Można przyjąć, że szacunkowe koszty 1 W mocy wiązki w akceleratorach o odmiennej konstrukcji są następujące:

- akceleratory transformatorowe 3 – 30 \$/W (niskie i średnie energie elektronów)
- akceleratory rezonansowe 20 – 50 \$/W (średnie i wysokie energie elektronów)
- akceleratory liniowe w.c.z. 50 – 150 \$/W (średnie i wysokie energie elektronów)

Szacunkowe koszty kapitałowe dla instalacji radiacyjnej odniesione do ceny zakupu akceleratora elektronów są następujące:

- osłony biologiczne i wentylacja 15%
- budynek z armaturą 30%
- wyposażenie technologiczne 20%
- system kontroli procesu 5%
- projekt techniczny i zezwolenia 10%
- instalacja i walidacja 10-20%
- amortyzacja (10 lat) 10%
- koszt prac serwisowych (stałe/zmienne) 3-5%

Można w przybliżeniu przyjąć, że zależność między kosztem zakupu akceleratora K_z a kosztem inwestycyjnym instalacji radiacyjnej K_i jest określony zależnością:

$$K_i \approx 2,2 K_z$$

Istotnym parametrem ekonomicznym wpływającym na wielkość stałych kosztów eksploatacyjnych jest roczny koszt amortyzacji określony zależnością:

$$K_a = K_i \{i / [1 - (1 + i)^{-n}]\}$$

gdzie:

- K_i – koszt inwestycyjny,
- i – oprocentowanie kapitału [%],
- n – okres przydatności instalacji [lata].

Jeśli przyjmiemy wielkość oprocentowania kapitału na poziomie $i = 8\%$, to przyjmując okres przydatności instalacji rzędu $n = 15$ lat wielkość raty amortyzacji w skali roku wyniesie 11,7% kosztów inwestycyjnych. Przyjmując analogicznie wartości $i = 8\%$ oraz $n = 5$ lat rata amortyzacji wzrośnie do 25%. Pełna amortyzacja poniesionych kosztów inwestycyjnych zależy od szeregu czynników przedstawionych w Tabeli 6. Istotny wpływ na okres zwrotu kosztów inwestycyjnych instalacji radiacyjnej wyposażonej w akcelerator elektronów mają terminowość ukończenia inwestycji, zaniżona cena usługi, większy lub mniejszy czas pracy z wiązką w stosunku do wielkości zakładanej w projekcie, mniejsza od zakładanej wydajność procesu.

Tabela 6. Czynniki wpływające na okres zwrotu kosztów inwestycyjnych instalacji radiacyjnej wyposażonej w akcelerator elektronów

Table 6. Factors having an impact on payback period with regard to radiation installation equipped with an accelerator of electrons

Scenariusz	Opis	Okres zwrotu w latach
Zakładany	Zgodnie z planem	5
Niska cena usługi	-20 %	8
Zwiększony czas pracy	4800 h/rok	4
Zmniejszony czas pracy	3200 h/rok	7
Niska wydajność	-20 %	6
Wyższy koszt inwestycyjny	+10 %	6
Opóźnione uruchomienie	miesiące	6

Podsumowanie

Rozwój technologii akceleratorów stosowanych w technice radiacyjnej jest dobrze widoczny w dłuższej skali czasowej. Obecnie szczególnie intensywnie kontynuowane są prace mające na celu podniesienie sprawności elektrycznej akceleratorów, obniżenie ich ceny oraz podniesienie niezawodności. W niedalekiej przyszłości możliwy transfer technologii z obszaru akceleratorów badawczych stosowanych w fizyce wysokich energii pozwalający na konstrukcję innowacyjnych urządzeń poszerzających znacząco ofertę i zakres możliwości technicznych i cenowych. Należy zaznaczyć, że podstawowe kryteria decydujące o przydatności danej konstrukcji akceleratora w technice radiacyjnej obok energii elektronów i mocy średniej wiązki są: cena, sprawność elektryczna, gabaryty.

Koszty inwestycyjne, koszty eksploatacyjne oraz niezawodność instalacji mają pierwszoplanowe znaczenie dla działań zorientowanych na wypracowanie zysku. Nie akcelerator jako urządzenie ale optymalne parametry wiązki elektronów przystosowane do charakterystyki produktu warunkują sukces przy wdrażaniu określonej technologii radiacyjnej. Innymi słowy instalacja radiacyjna musi spełniać wymagania stawiane przez daną technologię. Inwestorzy są zainteresowani w obniżenie kosztów, dlatego nowe technologie zwiększające dochody z inwestycji są zawsze poszukiwane. Jednak nowe technologie przed upowszechnieniem muszą być sprawdzone w warunkach przemysłowych i szeroko akceptowane. W związku z tym praktyczne wprowadzenie nowych technologii akceleratorowych wymaga wielu lat i rezeźnienia rynku. Oceniając dotychczasowy rozwój techniki radiacyjnej należy zauważyć, że:

- parametry wiązki elektronów stosowane w akceleratorach przemysłowych pozwalają na prowadzenie procesu obróbki radiacyjnej dla większości aktualnie modyfikowanych radiacyjnie produktów,
- obszarem głównego wzrostu zastosowań technologii radiacyjnej w przyszłości będzie wykorzystanie akceleratorów do ochrony środowiska (oczyszczenie wody, ścieków, gazów odlotowych),
- dostępność różnorodnych akceleratorów elektronów w szerokim zakresie energii (40 keV – 10 MeV) daje pomyślne perspektywy wzrostu przemysłowych zastosowań.

Konieczne jest prowadzenie nieustannych wysiłków dla zwiększenia zrozumienia przydatności technologii radiacyjnych, co może być ważnym czynnikiem wzrostu tego przemysłu. W obecnych warunkach współpraca z przemysłem staje się niezbędnym warunkiem inicjowania i rozwijania badań aplikacyjnych niezbędnych przy opracowaniu nowych technologii radiacyjnych.

dr inż. Zbigniew Zimek,
Centrum Badań i Technologii Radiacyjnych,
Instytut Chemii i Techniki Jądrowej,
Warszawa