

## ФІЗИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИСКОРЮВАЛЬНОЇ СЕКЦІЇ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОГО ЛІНІЙНОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ

**В.Ф. Жигло, К.Ю. Крамаренко, В.А. Кушнір, В.В. Митроченко, Л.І. Селіванов**  
**Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків, Україна**  
**E-mail: mitvic@kipt.kharkov.ua**

Аналіз ринку застосування промислового опромінення з використанням лінійних прискорювачів електронів показав, що розробка порівняно малогабаритного прискорювача з енергією пучка до 1 МеВ, середньою потужністю пучка до 80 кВт і ККД від мережі не менше 50% є актуальною. Проведено фізичне обґрунтування прискорюючої структури такого потужного прискорювача електронів, показано, що спеціально вибрана конфігурація бі-періодичної резонансної структури забезпечить необхідні параметри прискорювача при НВЧ-живленні від промислового магнетрона з частотою 915 МГц і безперервною потужністю 100 кВт.

### ВСТУП

В останні десятиліття радіаційна обробка використовується в різних галузях промисловості як для підвищення фізичних і хімічних властивостей матеріалів, так і для скорочення шкідливих домішок, таких як патогенні або токсичні побічні продукти. У всьому світі в комерційній експлуатації знаходиться більше ніж 1400 потужних промислових прискорювачів електронного пучка [1]. Разом з тим, 5/6 ринку застосування опромінення в промисловості займають технології, які відносяться до трьох основних класів [1]:

- виготовлення дротів, кабелів, труб;
- затвердіння поверхні фарб і лаків;
- виготовлення термозбіжних плівок.

Енергія електронів на виході прискорювача залежить від його застосування. Для стерилізації різного роду продукції – до 10 МеВ, для опромінення дротів і кабелів – до 1,5 МеВ, для опромінення термозбіжної плівки – 0,3...0,8 МеВ, а для затвердіння поверхні – 0,08...0,3 МеВ. Таким чином, основну частку ринку займають прискорювачі з енергією пучка до 1,5 МеВ. Ключовими величинами при промислому використанні прискорювачів є середня потужність пучка та електрична ефективність установок, тобто ефективність перетворення підведеної електричної потужності в потужність пучка. Параметри основних видів прискорювачів, які поділяються за способом прискорення електронного пучка, приведені в Табл. 1.

**Таблиця 1**

*Параметри основних видів прискорювачів*

Параметри	Прискорювачі постійного струму прямої дії	Високочастотні прискорювачі 100...200 МГц	Лінійні мікрохвильові прискорювачі 1,3...9,3 ГГц
Середній струм пучка, А	<1,5	<0,100	<0,100
Діапазон енергій, МеВ	0,05...5	0,3...10	2...10
Середня потужність, кВт	~500	700	50
Середня потужність у майбутньому, МВт	1	1	0,100
Електрична ефективність, %	60...80	20...50	10...20

Треба зазначити, що прискорювальна система кожного виду, з наведених вище прискорювачів, має свої характерні розміри. Як правило, прискорювачі прямої дії мають значні розміри, які визначаються розмірами високовольтних трансформаторів і випрямлячів, довжиною ізолятора прискорювальної трубки. Наприклад, прискорювач ЕЛВ-8 з енергією 1 МеВ і потужністю пучка 400 кВт має наступний характерний розмір для цього виду прискорювачів: діаметр посудини, заповненої елегазом, – 1,6 м, при її довжині 3,8 м [2].

Високочастотні прискорювачі з частотою поля 100...200 МГц мають менший розмір і не потребують використання елегазу для забезпечення електричної міцності. Разом з тим, характерний діаметр резонаторів цих прискорювачів є не меншим ніж 1 м [3].

Лінійні мікрохвильові прискорювачі забезпечують порівняно малі розміри прискорювальної системи, але мають малий ККД через використання в них мікрохвильових джерел з низьким ККД.

Ми звертаємо увагу на розмір прискорювачів через те, що вони вимагають радіаційного захисту. Звичайно, основного захисту вимагає те місце, де електронний пучок взаємодіє з опромінюваною продукцією, але прискорювач, так чи інакше, з'єднується з тим місцем. Таким чином, чим більші розміри прискорювача при однакових параметрах пучка, тим більша ціна капітального будівництва.

Як зазначалося раніше, низький ККД мікрохвильових прискорювачів визначається використанням у них мікрохвильових джерел з низьким ККД, а саме імпульсних клістронів. На початку розвитку мікрохвильових прискорювачів у них застосовувались магнетрони, які мають значно більший ККД. Але через

проблеми зі стабільністю частоти і короткий термін служби вони поступилися клістронам.

Останнім часом значний прогрес було досягнуто в покращенні параметрів магнетронів для промислових установок мікрохвильового нагріву. Наприклад, термін служби безперервних 100 кВт магнетронів на 915 МГц досягає 8000...12000 годин [4]. З іншого боку, в зв'язку з пошуком ефективних джерел потужності для живлення надпровідних резонаторів Міжнародного колайдера були проведені інтенсивні дослідження зі стабілізації частоти магнетронів [5]. Було показано, зокрема і в [6], що з застосуванням інжекційної стабілізації (захвату) частоти магнетрона при зворотному зв'язку, який впливає на струм магнетрона, можна досягти достатньої стабільності як для живлення надпровідних резонаторів, так і мідних резонаторів прискорювачів.

В зв'язку з цим ми вирішили розробити мікрохвильовий прискорювач електронів на базі промислового магнетрона з частотою 915 МГц і середньою потужністю 100 кВт.

### ВИБІР ПРИСКОРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

При виборі прискорювальної системи ми приймали до уваги малу потужність джерела живлення з точки зору створення прискорювального поля і велику його величину з точки зору теплових втрат у резонансній системі. З огляду на це ми вибрали за основу резонансну систему на базі компенсованої структури на стоячій хвилі з омега-подібними основними резонаторами і циліндричними резонаторами зв'язку на осі системи. Зв'язок резонаторів між собою здійснюється через щілини в сусідніх стінках резонаторів. Основні розміри резонаторів вибиралися за даними, приведеними в [7]. Період  $D$  основної частини секції вибирався виходячи з того, що максимальна енергія пучка буде дорівнювати 1 МеВ, що відповідає відносній фазовій швидкості  $\beta = 0,94$ . Таким чином,  $D = \beta\lambda / 2 = 154$  мм, де  $\lambda$  – довжина хвилі у вакуумі на частоті 915 МГц. Довжина резонаторів зв'язку була вибрана рівною 8 мм, а мінімальна товщина стінки основного резонатора – 12 мм, щоб в ній, при необхідності, була можливість прокладки каналів охолодження.

Вибір конфігурації прискорювальної системи відбувався ітеративним методом на основі даних моделювання динаміки частинок за допомогою програми PARMELA. Моделювання властивостей резонаторів, необхідних для цього, проводилися за допомогою програми SUPERFISH. Для цього використовувалася спрощена модель без резонаторів і щілин зв'язку.

На Рис. 1 показано розподіл електричного поля в резонаторі основної частини з  $\beta = 0,94$ . Шунтовий опір резонатора без врахування фактора прольоту дорівнює 80 МОм/м. Для створення розрахункового середнього поля на осі структури 1 МВ/м у резонаторі необхідно розсіяти 1,95 кВт НВЧ-потужності. Максимальний приріст енергії частинки при цьому дорівнює 136 кеВ.

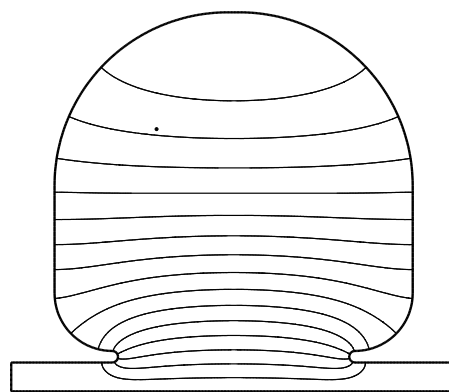


Рис. 1. Резонатор з  $\beta = 0,94$

Є практичним, якщо високовольтна напруга джерела електронів дорівнює високовольтній напрузі джерела НВЧ-живлення, особливо для випадку прискорювача безперервної дії. Для нашого випадку вона дорівнює 20 кВ. Для того, щоб ефективно захватити частинки з такою енергією в прискорення прийшлося застосувати кілька резонаторів з меншою фазовою швидкістю хвилі. Ми застосували три з половиною резонатора з  $\beta = 0,56$ .

Для створення розрахункового поля 1 МВ/м у цілому резонаторі з  $\beta = 0,56$  теж треба розсіяти приблизно 2 кВт (1,875 кВт) НВЧ-потужності. Максимальний приріст енергії частинки при цьому дорівнює 102 кеВ. Таким чином, була вибрана наступна конфігурація резонаторної системи прискорювача на енергію 1 МеВ: половинка резонатора з  $\beta = 0,56$ , три резонатора з  $\beta = 0,56$ , шість резонаторів з  $\beta = 0,94$ . Розподіл поля на осі такої структури приведено на Рис. 2. Оцінки показують, що для створення поля в такій системі потрібно 20 кВт НВЧ-потужності, ще 15% цієї потужності втратиться в щілинах і резонаторах зв'язку [8]. Таким чином, 77% потужності джерела НВЧ-живлення або 77 кВт можуть бути передані в пучок.

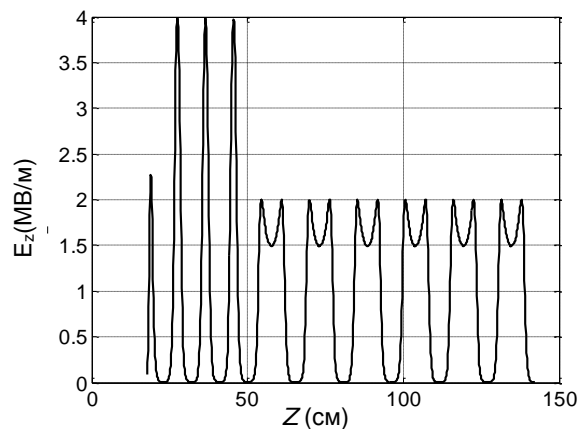


Рис. 2. Розподіл електричного поля вздовж секції

Через низький темп прискорення багато частинок пучка втрачаються в процесі прискорення. Для зменшення кількості таких частинок було застосовано два підходи. По перше, ближче до вихідного кінця прискорювальної структури для фокусування пучка було розміщено магнітну лінзу у вигляді витків зі струмом, намотаних ззовні структури. По друге, було застосовано клістронне групування пучка

на виході джерела електронів. Величина енергетичного розкиду, який отримують частинки пучка, дорівнює  $\pm 5$  кеВ. Величина дрейфу дорівнює 155 мм або  $1,7\beta\lambda$ . Для забезпечення транспортування пучка від джерела електронів до входу в секцію застосовується магнітна лінза. Розподіл сумарного поля двох магнітних лінз показано на Рис. 3.

Нижче приведено результати моделювання динаміки пучка в прискорювальній системі з вибраною конфігурацією в режимі заданого поля.

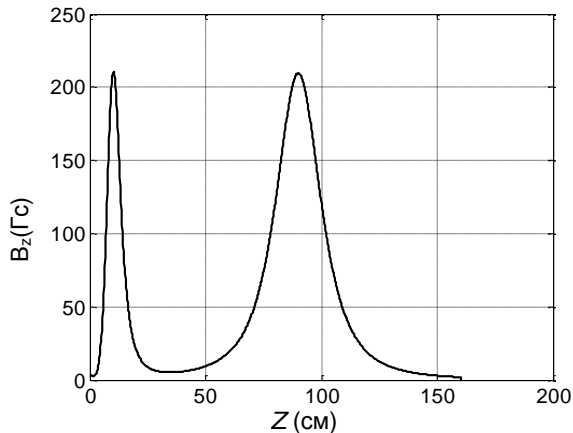


Рис. 3. Розподіл магнітного поля вздовж секції

Згустки мають добре сформоване ядро в районі максимальної енергії. Повздовжня динаміка пучка вибиралась таким чином, щоб отримати значне групування частинок в повздовжньому напрямі при помірному енергетичному розкиді. Це забезпечує зменшення частинок в хвості розподілу. Демонстрацією цього може слугувати форма енергетичного спектру частинок, показаного на Рис. 4. Підрахунки показали, що 95% процентів частинок попадають в інтервал енергій 216 кеВ, починаючи з її максимальної величини.

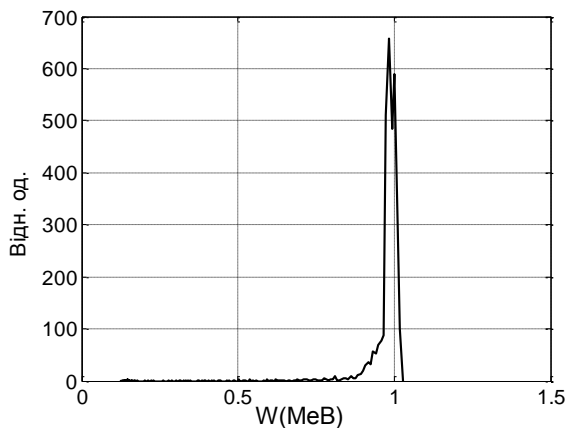


Рис. 4. Енергетичний спектр частинок на виході прискорювача

Аналіз динаміки частинок показав, що основне формування згустка проходить у передній частині прискорювача, приблизно на відстані 30 см від анода джерела електронів. Це відбувається не тільки завдяки повздовжньому руху частинок, але і через втрати частинок у поперечному напрямку. Аналіз показав, що основні втрати частинок відбуваються в першому цілому резонаторі, якому відповідають повздовжні координати від 23 до 32 см, де середня енергія всіх частинок ще низька. Середня енергія

частинок, що втрачаються в цьому резонаторі, дорівнює 16 кеВ при середній потужності 270 Вт (Рис. 5). Порівняно з НВЧ-потужністю, яка витрачається на створення поля, ця потужність не дуже велика. Наступний пік потужності втрат частинок приходить на другий резонатор з  $\beta = 0,94$ . Хоча кількість втрачених частинок там менша, але їх енергія вища.

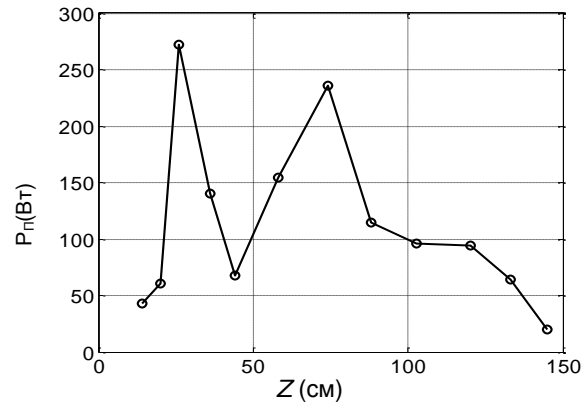


Рис. 5. Розподіл потужності, яка виноситься частинками на стінки структури

Пучок добре сформований в поперечній площині і має щільне ядро, яке займає незначну частину каналу для прольоту частинок. Це можна бачити на Рис. 6. Разом з тим, зменшувати діаметр цього каналу не слід, бо 99% частинок пучка мають максимальний розмір 1,4 см, що є не набагато меншим, ніж діаметр каналу 2 см.

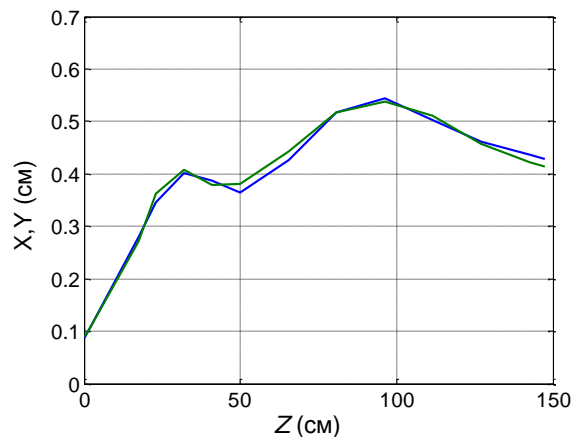


Рис. 6. Поперечні розміри пучка (70% частинок) вздовж прискорювача

В Табл. 2 зведені параметри прискорювальної системи і параметри пучка.

Таблиця 2

Параметри прискорювальної системи і параметри пучка

Загальна кількість прискорювальних резонаторів	10
Кількість резонаторів з $\beta = 0,23$ (враховуючи вивал поля)	1
Кількість резонаторів з $\beta = 0,56$	3
Кількість резонаторів з $\beta = 0,94$	6
Шунтовий опір резонатора з $\beta = 0,23$ , МОм/м	22
Шунтовий опір резонатора з $\beta = 0,56$ , МОм/м	48

Шунтовий опір резонатора з $\beta = 0,94$ , МОм/м	80
Загальна довжина прискорювальної системи, відрахована від аноду гармати, см	142,4
Радіус каналу для прольоту пучка, см	1
Потужність НВЧ-живлення, кВт	100
Струм пучка на виході джерела електронів, мА	120
Струм пучка на виході прискорювача, мА	80
Початкова енергія частинок, кеВ	20
Нормалізований середньоквадратичний поперечний емітанс $1\sigma_{x,y}$ , мм·мрад	6,6
Середньоквадратичний поперечний розмір $4\sigma_{x,y}$ , мм	8
Інтервал фаз, в який попадають 70% частинок $\Delta\phi$ , град.	16
Відносний інтервал енергій, в який попадають 70% частинок, $\Delta W/W$ , %	3,6
Максимальна енергія частинок, $W_{max}$ , МеВ	1,02
Середня енергія пучка, $W_{av}$ , МеВ	0,96
Енергія частинок в максимумі спектра, МеВ	0,98
Поперечний розмір, в який попадає 70% частинок, мм	4,3

### ВИСНОВКИ

Проведений аналіз показав можливість створення прискорювача електронів з енергією біля 1 МеВ і середньою потужністю більше, ніж 75 кВт. Виходячи з ККД магнетрона (80%), очікуваного електронного ККД секції (77%) і типового ККД джерела живлення магнетрона (90%), можна очікувати ККД прискорювача від мережі не менше, ніж 50%. Відносно малі габарити прискорювальної системи прискорювача дозволяє використовувати локальний захист від радіоактивного випромінювання, зменшуючи кошти на капітальне будівництво. Відсутність важкого, за виключенням радіаційного захис-

ту, і великогабаритного обладнання в пропонуваному прискорювачі дозволяє його використання в мобільному виконанні. Прискорювач може бути використаний при виготовленні кабелів, дротів, пластикових труб і термозбіжних плівок, що займає до 50% ринку застосування радіаційної обробки в промисловості. Оцінки показують, що затрати на заміну магнетрона незначні, у порівнянні з затратами на електроенергію, яку буде використовувати прискорювач.

### БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Industrial Radiation Processing with Electron Beams and X-rays// <http://www.cirms.org/>
2. Ускорителі електронів серії ЕЛВ // [http://www.inp.nsk.su/~tararysh/accel/elv\\_r.html](http://www.inp.nsk.su/~tararysh/accel/elv_r.html)
3. Ускорителі електронів серії ІЛЮ// [http://www.inp.nsk.su/~tararysh/accel/ilu\\_r.html](http://www.inp.nsk.su/~tararysh/accel/ilu_r.html)
4. Meredith Roger J. *Engineers' Handbook of Industrial Microwave Heating*. London: Institution of Electrical Engineers. 1998, p. 276.
5. A.C. Dexter, G. Burt, R.G. Carter, et al. First demonstration and performance of an injection locked continuous wave magnetron to phase control a superconducting cavity // *Physical review special topics - accelerators and beams*. 2011, 14, 032001.
6. Imran Tahir, Amos Dexter, and Richard Carter. Noise Performance of Frequency and Phase-Locked CW Magnetrons Operated as Current-Controlled Oscillators // *IEEE transactions on electron devices*. September 2005, v. 52, № 9, p. 2096-2103.
7. О.А. Вальднер, Н.П. Собенин, Б.В. Зверев, И.С. Щедрин. *Справочник по диафрагмированным волноводам*. М.: "Атомиздат". 1977, 376 с.
8. Wangler Thomas P. *RF Linear Accelerators*. Wiley-VCH, 2008, 466 p.

Стаття надійшла в редакцію 09.10.2017

### PHYSICAL GROUND OF ACCELERATING SECTION FOR INDUSTRIAL CONTINUOUS WAVE ELECTRON LINAC

*V.Ph. Zhiglo, K.Yu. Kramarenko, V.A. Kushnir, V.V. Mytrochenko, L.I. Selivanov*

The analysis of a market for industrial irradiation processing with electron linear accelerators has shown that the development of a relatively compact electron accelerator with an energy beam about 1 MeV, beam power up to 80 kW and the total efficiency at least of 50% is important. A physical ground of an accelerating structure for such powerful electron linac has shown that specially selected configuration of the bi-periodic resonant structure provide the necessary parameters at the RF power supply with the 915 MHz industrial microwave magnetron at a continuous power of 100 kW.

### ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ УСКОРИТЕЛЬНОЙ СЕКЦИИ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОНОВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

*В.Ф. Жигло, Е.Ю. Крамаренко, В.А. Кушнир, В.В. Митроченко, Л.И. Селиванов*

Анализ рынка применения промышленного облучения с использованием линейных ускорителей электронов показал, что разработка сравнительно компактного ускорителя с энергией пучка до 1 МэВ, средней мощностью пучка до 80 кВт и КПД от сети не менее 50% является актуальной. Проведено физическое обоснование ускоряющей структуры такого мощного ускорителя электронов, показано, что специально выбранная конфигурация би-периодической резонансной структуры обеспечит необходимые параметры ускорителя при СВЧ-питании от промышленного магнетрона с частотой 915 МГц и непрерывной мощностью 100 кВт.