

## Вакуумная, плазменная и квантовая электроника

УДК 621.397.13

С.В. Денбовецький<sup>1</sup>, д-р техн. наук, О.Л. Капустьянов<sup>2</sup>, С.Р. Михайлов<sup>1</sup>, канд. техн. наук,  
О.В. Лещишин<sup>1</sup>, канд. техн. наук, Н.В. Шинкаренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут",  
пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна.

<sup>2</sup>Samsung Ukraine R&D Center, вул. Льва Толстого, 57, г. Київ, 01032, Україна.

### Моделювання спектрів випромінювання імпульсних рентгенівських трубок

Наведені результати моделювання спектрів гальмівного рентгенівського випромінювання в імпульсних трубках рефлекторного та трансмісійного типу, які враховують конструкцію анодно-катодного вузла, матеріали анода та вихідного вікна, змінювання анодної напруги і анодного струму під час імпульсу рентгенівського випромінювання в трубках з вибуховою емісією, а також кут нахилу траєкторій електронів до поверхні анода. З використанням програми MathCAD, в якій експериментальні залежності коефіцієнтів поглинання матеріалами анода і вихідного вікна від енергії фотонів, вольт-секундні та ампер-секундні характеристики анодної напруги та струму інтерполювалися кубічними та квадратичними сплайнами, а залежність константи Томсона-Віддінгтона від анодної напруги апроксимувалися експонентою, розраховані миттєві та сумарні (за тривалість імпульсу) спектри однопроводного (осьового) напрямку випромінювання і для різних кутів випромінювання, які утворюють панорамне тіньове зображення контрольованих матеріалів або виробів.

Конкретні приклади змодельованих сумарних спектрів наведені для рефлекторних трубок з анодом у вигляді конусної поверхні і катода, утвореного одиночною загостреною з внутрішньої сторони шайбою, а в трубках трансмісійного типу анод має форму плоскої фольги. Бібл. 9, рис. 6.

**Ключові слова:** імпульсні рентгенівські трубки, спектр рентгенівського випромінювання, неруйнівний контроль.

#### Вступ

Системи неруйнівного контролю на основі імпульсних рентгенівських трубок наносекундного діапазону завдяки своїй портативності і можливості обслуговування їх при суттєво спроще-

ному захисті від опромінення отримали розповсюдження в різних галузях науки і промисловості, особливо для мобільного проведення робіт в польових умовах [1,3,4]. Такі системи в даний час вдосконалюються [7,9], є перспективними (особливо для дослідження швидкоплинних динамічних процесів) і потребують поліпшення їх основних параметрів, які в свою чергу визначаються узгодженням спектрів випромінювання рентгенівських апаратів з спектральними характеристиками перетворювачів [1] (з прямим і непрямим перетворенням) рентген-електричний сигнал [2].

Відомі результати з моделювання [1,8] використовують спрощену лінійну апроксимацію часових характеристик анодної напруги та струму в імпульсах, не враховують траєкторій електронів для різних геометричних розмірів анодно-катодного вузла і придатні для розрахунку спектрів осьового напрямку випромінювання. Доцільним є розрахунок миттєвих та сумарних енергетичних спектрів, які враховують напрямок випромінювання і траєкторії електронів для різних типів імпульсних рентгенівських трубок.

#### Основна частина

В імпульсних рефлекторних рентгенівських трубках щільність потоку квантів гальмівного рентгенівського випромінювання, приведеної до одиниці часу,  $n(E,t)$  [1/с·см<sup>2</sup>·кеВ] на віддалі  $R$  [см] від фокуса визначається за формулою [5,6]:

$$n(E,t) = \frac{k_1 i(t) Z [E_A(t) - E]}{R^2 E} \times \exp \left\{ -\frac{\mu_M(E)}{\rho_M C} [E_A^2(t) - E^2] \frac{\cos \beta}{\cos \gamma} - \mu_B(E) H_B \right\} \times \exp[-\mu_O(E) H_O] \quad (1)$$

де коефіцієнт  $k_1 = 1,1 \cdot 10^{12}$  має розмірність [1/А·с·кеВ], енергії рентгенівських квантів  $E$  і

електронів на аноді  $E_A(t)$  – визначаються в [кВ],  $i(t)$  – анодний струм в [А],  $Z$  – атомний номер матеріалу анода,  $\mu_M(E)$  – коефіцієнт поглинання матеріалу анода в  $[\text{см}^{-1}]$ ,  $H_B$  – товщина матеріалу вихідного вікна в [см],  $\mu_B(E)$  – коефіцієнт поглинання матеріалу вихідного вікна в  $[\text{см}^{-1}]$ ,  $\rho_M$  – густина матеріалу анода в  $[\text{г}/\text{см}^3]$ ,  $\mu_O(E)$  – коефіцієнт поглинання матеріалу, що контролюється, (об'єкта контролю) в  $[\text{см}^{-1}]$ ,  $H_O$  – товщина об'єкта контролю в [см],  $C$  – константа Томсона - Віддінгтона в  $[\text{кВ}^2 \cdot \text{см}^2/\text{г}]$ , кути  $\beta$  і  $\gamma$  визначаються відносно нормалей до поверхні анода відповідно для траєкторій електронів і осевого напрямку випромінювання. Величина  $\gamma = 90 - \alpha$ , де  $\alpha$  – половина кута вершини конусної поверхні анода.

В миттєвому енергетичному спектрі, заданого у формулі (1) множителем  $\exp[-\mu_O(E)H_O]$ , враховується змінювання спектра матеріалом об'єкта контролю. Тому для розрахунку спектра на виході рентгенівської трубки приймемо  $H_O = 0$ .

Табличні значення коефіцієнтів поглинання в залежності від  $E$  доцільно інтерполювати кубічними сплайнами, а залежність константи Томсона-Віддінгтона від анодної напруги апроксимується експоненціальною функцією [6].

Нормовані вольт-секундні та ампер-секундні характеристики типової малогабаритної діодної трубки з вибуховою емісією із розрядним контуром конденсатора наведені в [3]. Для переходу до абсолютних значень характеристик треба задати тривалість імпульсу і максимальну анодну напругу  $U_{\text{Амакс}}$ , а максимальне значення струму розраховувати за формулою  $i_{\text{макс}} = 6.3 \cdot 10^3 (C_p / \ell)^{1/2} U_{\text{Амакс}}^{3/4}$  [А], де коефіцієнт  $6.3 \cdot 10^3$  має розмірність  $[(\text{А} \cdot \text{см})^{1/2} / \text{С}^{1/2} \text{В}^{1/4}]$ ,  $C_p$  – ємність конденсатора, що розряджається через імпульсну трубку у [Ф];  $\ell$  – віддаль між катодом і анодом в [см],  $U_{\text{Амакс}}$  – анодна напруга у [В].

Приклад інтерпольованих квадратичними сплайнами характеристик  $U_A(t)$  та  $i(t)$  для трубки з тривалістю імпульсу  $\tau = 25$  нс,  $U_{\text{Амакс}} = 120$  кВ,  $C_p = 40$  пФ,  $\ell = 0,2$  см показаний на рис.1, на якому ліва шкала ординати відповідає напрузі, а права – струму імпульсної рентгенівської трубки. Струм досягає максимального значення  $i_{\text{макс}} = 573$  А і анодна напруга зменшується до  $U_A = 84$  кВ при  $t = 14,5$  нс.

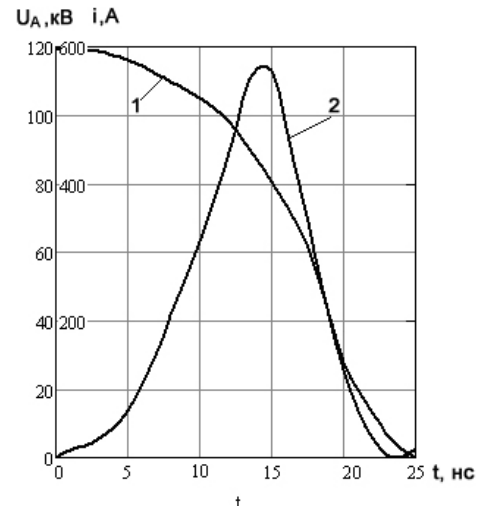


Рис. 1. Графік змінення анодної напруги (1) та анодного струму (2) в рентгенівській трубці

З урахуванням вищезгаданих апроксимацій та інтерполяцій для рефлекторної рентгенівської трубки з лезвійним катодом у вигляді одиночної шайби і анодом у вигляді конуса з кутом при вершині  $2\alpha$  і радіусом заокруглення  $r_0$  в програмі MathCAD за формулою (1) розраховувалися миттєві енергетичні спектри осевого напрямку рентгенівського випромінювання.

Приклад енергетичних спектрів в різні моменти часу для  $R = 30$  см, берилієвого вікна товщиною  $H_B = 0,1$  см, відсутності об'єкта контролю ( $H_O = 0$ ) і  $U_{\text{Амакс}} = 120$  кВ показаний на рис.2. Розрахунки проведені для анода із вольфраму,  $2\alpha = 20^\circ$ ,  $r_0 = 0,5$  мм, і катода, розміщеного на віддалі  $L = 5$  мм відносно заокругленої конусної вершини анода, кутом загострення  $\theta = 12^\circ$  шайби товщиною  $h = 0,2$  мм і віддалю (по радіусу) загостреної кромки катода до анода  $\ell = 0,2$  см. Кути  $\gamma = 90^\circ - \alpha = 80^\circ$ , і  $\beta = 90^\circ - \varphi = 90 - 84,4^\circ = 5,6^\circ$ , де  $\varphi$  – кут нахилу траєкторій електронів до поверхні анода, який несуттєво змінюється при змінюванні анодної напруги [5] і приймається однаковим для спектрів рис.2.

Щоб оцінити вплив плазми, утвореної при вибуховій емісії в трубці та рух плазми в міжелектродному просторі на спектр випромінювання, змінювався кут нахилу траєкторій електронів  $\varphi = 83,6^\circ \pm 3^\circ$  [5] для  $t = 15$  нс. Розрахунки показали, що відхилення спектрів в максимумі не перевищує десятої долі відсотка, тому в подальшому цим змінюванням будемо нехтувати.

Максимальні значення спектрів рис. 2 зміщуються в діапазон менших енергій при збіль-

шенні часу, що пояснюється зменшенням анодної напруги (див. рис.1, крива1).

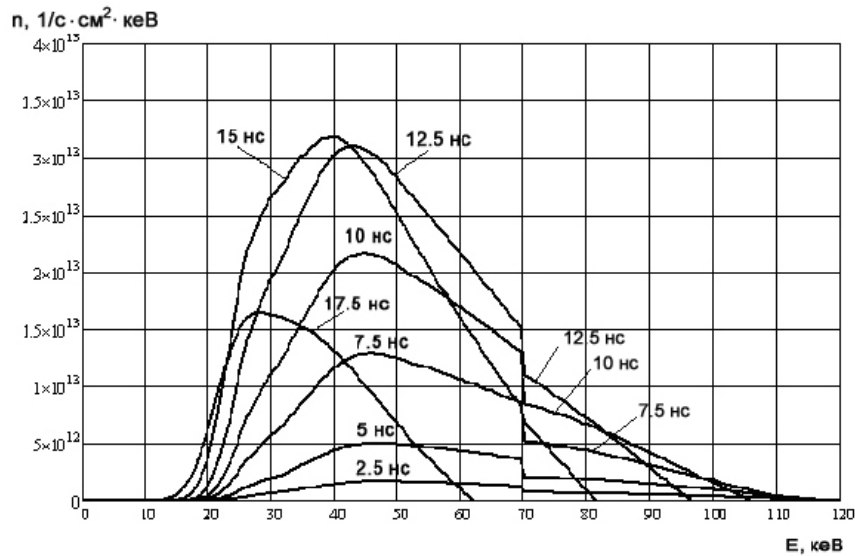


Рис. 2. Графіки миттєвих гальмівних спектрів випромінювання імпульсної рентгенівської трубки

Максимальні значення енергій в спектрах не перевищують відповідні значення енергій електронів на аноді, яка задається напругою  $U_A$ . Розриви в спектрах при енергії близькій до 70 кеВ пояснюються  $K$ -стрибками коефіцієнта поглинання для вольфраму, обумовленими характеристичним поглинанням.

Рентгенівське випромінювання після проходження через об'єкт контролю поглинається рентгенівської плавкої або телевізійним перетворювачем рентген-електричний сигнал з безпосереднім перетворенням або з проміжним перетворенням в оптичне зображення. Якщо прийняти до уваги, що найменший час накопичення випромінювання відбувається в телевізійному перетворювачі, який працює в режимі неперервного зчитування, і дорівнює 40 мс (тривалість кадра для телевізійного мовного стандарту), а тривалість імпульсів рентгенівського випромінювання десятки наносекунд і менше, можемо констатувати, що миттєві спектри випромінювання накопичуються в перетворювачах, тому в подальшому доцільніше розраховувати сумарний спектр, який визначає щільність потоку фотонів рентгенівського випромінювання за час імпульсу. Він визначається інтегруванням за часом

миттєвих спектрів  $N(E) = \int_0^{\tau} n(E, t) dt$  і має розмір-

ність  $[1/\text{см}^2 \text{ кеВ}]$ .

Сумарний спектр для умов формування миттєвих спектрів рис. 2 зображений кривою 2 на рис.3. Криві 1 і 3 рис.3 розраховувалися для анода з кутом конусної поверхні при вершині  $2\alpha = 10^\circ$  і  $2\alpha = 30^\circ$ , миттєві спектри яких розраховувалися за формулою (1) відповідно для величин  $\gamma = 85^\circ$ ,  $\beta = 2,7^\circ$  і  $\gamma = 75^\circ$ ,  $\beta = 7,3^\circ$  [5]. Максимальні значення спектрів зміщуються в діапазон менших енергій і величини спектрів збільшуються при збільшенні кута при вершині конусної поверхні анода (при цьому збільшуються розміри фокуса для однакових величин  $L$ ), що пояснюється зменшенням самопоглинання осевого напрямку рентгенівського випромінювання в матеріалі анода обумовленого зменшенням віддалі між поверхнею анода і точкою виникнення квантів рентгенівського випромінювання, а також залежністю  $\mu_M(E)$ .

Коефіцієнт поглинання  $\mu_M(E)$  залежить не тільки від енергії фотонів, яка визначається  $U_{A\text{макс}}$  і змінюванням анодної напруги під час імпульсу, але й від типу матеріалу анода. Тому сумарні спектри випромінювання суттєво залежать від матеріалу анода і  $U_{A\text{макс}}$ . Приклади спектрів осевого напрямку випромінювання для  $2\alpha = 20^\circ$ , вихідного берилієвого вікна товщиною  $H_B = 0,1 \text{ см}$ , віддалі до фокуса  $R = 30 \text{ см}$  та геометричних розмірів елементів анодно-катодного вузла, які співпадають з відповідними розмірами за якими розраховувалися миттєві

спектри (рис. 2) і сумарний спектр (рис. 3 крива 2) зображені на рис. 4. Спектри рис. 4,а розраховані для  $U_{\text{Амакс}}=120$  кВ і матеріалу анода із вольфраму (W), молібдену (Mo) та міді (Cu), а спектри рис. 4,б для анода із вольфраму і

$U_{\text{Амакс}}=80; 120; 220; 320$  кВ. Розриви в спектрах гальмівного рентгенівського випромінювання обумовлені  $K$ -стрибками коефіцієнта поглинання матеріалу анода (енергії близькі до 20 кеВ і 70 кеВ відповідно для Mo і W).

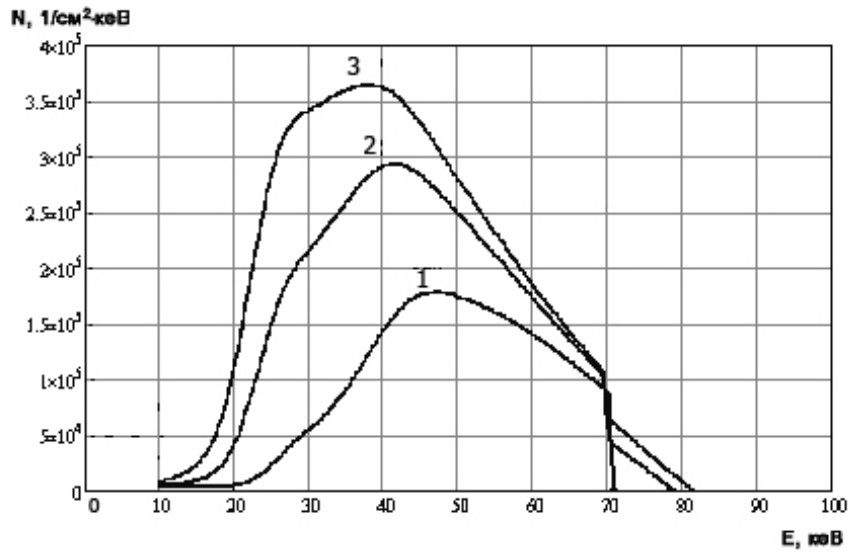
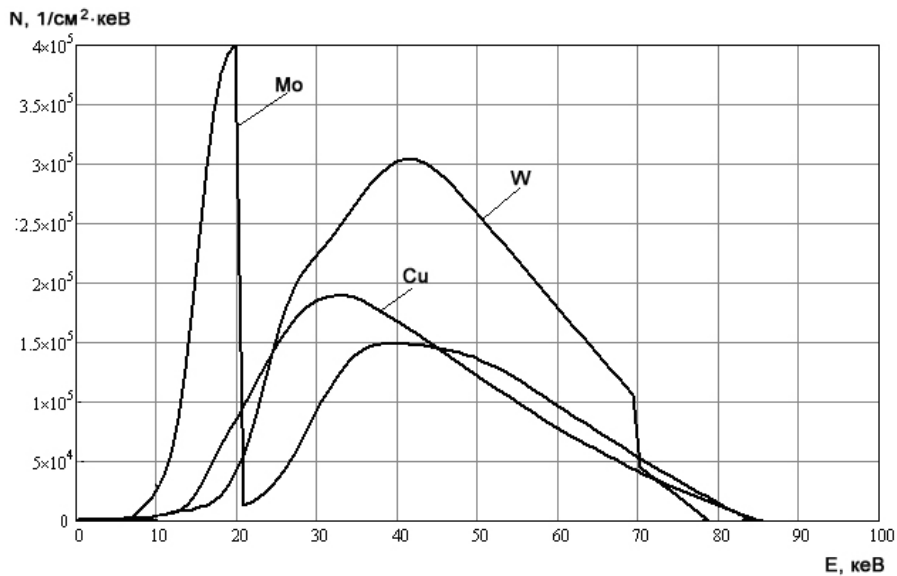
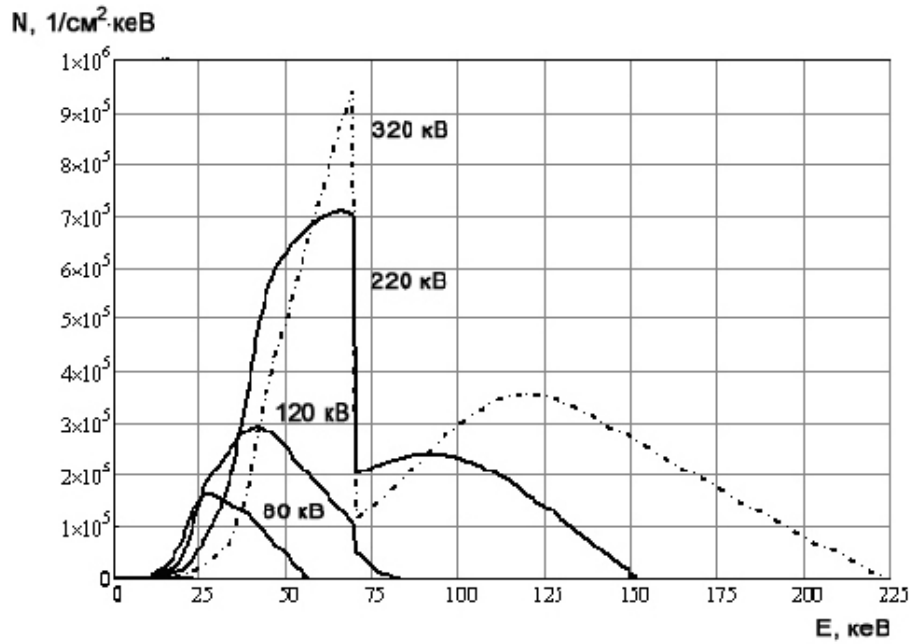


Рис. 3. Графіки сумарних спектрів для  $U_{\text{Амакс}}=120$  кВ і кута конусної поверхні анода при вершині  $2\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$  (відповідно криві 1, 2, 3)



а)



б)

Рис. 4. Графіки сумарних спектрів осьового напрямку випромінювання для різних матеріалів анода (а) і максимальних анодних напруг (б)

В імпульсних рентгенівських трубках з трансмісійним (прострільним) анодом, який має плоску конструкцію (фольга товщиною  $D=0.002 \div 0.01$  см, прикріплена безпосередньо до вихідного вікна) [3,4], траєкторії електронів на аноді близькі до ортогональних ( $\beta \approx 0$ ). Якщо врахувати віддаль, на якій утворюються рентгенівські фотони з енергією  $E$ , тоді віддаль до протилежної площини анода дорівнює  $D - [E_A^2(t) - E^2] / \rho_M C$  і для кута напрямку випромінювання  $\gamma$  миттєві спектри випромінювання із врахуванням позначень формули (1) мають вигляд:

$$n(E,t) = \frac{k_i(t)Z[E_A(t) - E]}{R^2 E} \times \exp\left\{-\frac{\mu_M(E)}{\cos \gamma} \left[D - \frac{E_A^2(t) - E^2}{\rho_M C}\right] - \frac{\mu_B(E)H_B}{\cos \gamma}\right\} \times \exp\left[-\frac{\mu_O(E)H_O}{\cos \gamma}\right] \quad (2)$$

Для осьового напрямку випромінювання трансмісійних трубок (напрямку осі катода, що

має форму циліндра із загостреною кромкою) величина  $\gamma = 0$ .

Приклади розрахованих сумарних спектрів осьового напрямку випромінювання показані на рис. 5 для товщини вольфрамового анода  $D=0.002$  см (криві 1, 2) і  $D=0.01$  см (криві 3,4) при анодних напругах  $U_{Амакс}=150$  кВ (криві 1,3) і  $U_{Амакс}=120$  кВ (криві 2,4). Миттєві спектри розраховувалися за формулою (2) для яких інтерполювані вольт-секундні та ампер-секундні характеристики, а також залежності коефіцієнтів поглинання від енергії і апроксимована залежність константи Томсона - Віддінгтона від анодної напруги приймалися такими ж, як і для рефлексорних трубок. Вихідне вікно із берилію приймалося в формулі (2) товщиною  $H_B=0,1$  см.

Зменшення спектрів рентгенівського випромінювання і зміщення їх максимумів в діапазон більших енергій із збільшенням товщини анода пояснюється тими ж причинами, що і для рефлексорних трубок – збільшенням самопоглинання в матеріалі анода і залежностями коефіцієнтів поглинання матеріалів анода і вихідного вікна від енергії фотонів.

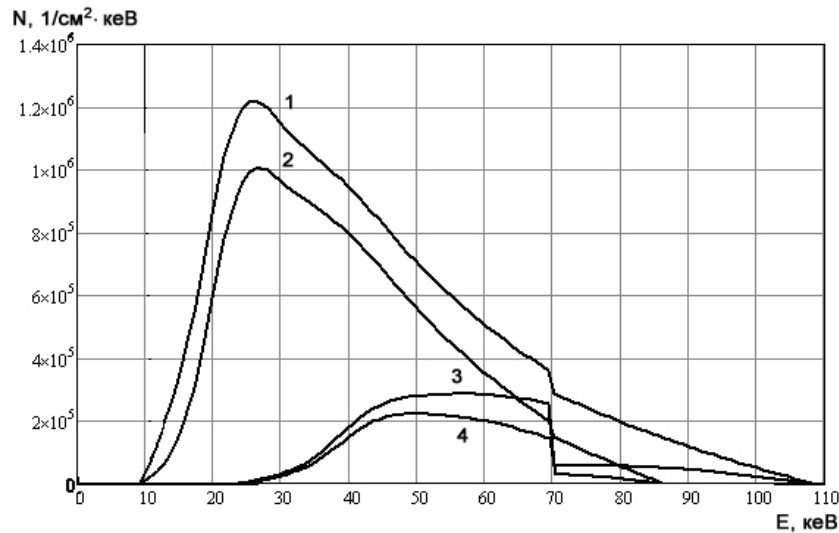


Рис. 5. Графіки сумарних спектрів рентгенівських трубок з прострільним анодом із вольфраму товщиною  $D=0.002$  см (криві 1,2) і  $D=0.01$  см (криві 3,4) для  $U_{\text{Амакс}}=150$  кВ (криві 1,3) і  $U_{\text{Амакс}}=120$  кВ (криві 2,4)

Панорамне тіньове рентгенівське зображення контрольованих матеріалів утворюється рентгенівськими променями, які випромінюються під різними кутами  $\gamma$  (див. формулу (2)). Якщо  $\gamma = \pm 90^\circ$ , утворене гальмівне випромінювання повністю поглинається матеріалом анода (напрямки випромінювання проходять в матеріалі анода і не виходять за його межі на віддалі

практично повного поглинання) і воно найменше поглинається для ортогонального до поверхні анода напрямку випромінювання ( $\gamma = 0$ ).

Сумарні спектри для різних кутів  $\pm\gamma$  і величин  $D = 0.002$  см (W),  $H_B = 0,1$  см (Be),  $U_{\text{Амакс}} = 120$  кВ. зображені на рис. 6. Вони зменшуються від максимальних величин до нуля.

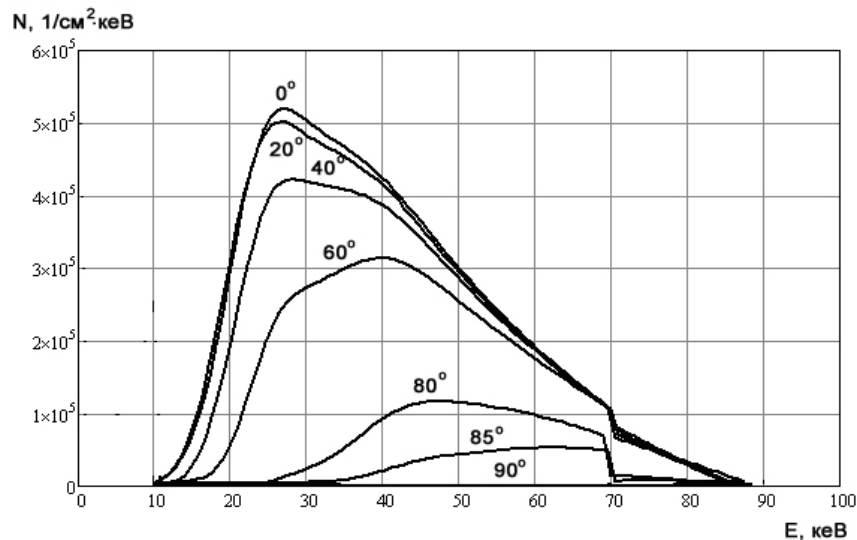


Рис. 6. Графіки сумарних спектрів випромінювання трубок з прострільним анодом ( $D=0.002$  см,  $U_{\text{Амакс}}=120$  кВ) для різних кутів напрямку випромінювання

Зменшення спектрів випромінювання і переміщення їх максимальних значень в діапазон більших енергій із збільшенням кута  $\pm\gamma$  обумовлено збільшенням самопоглинання в матеріалі анода (збільшується віддаль між поверхнею

анода і точкою утворення рентгенівського випромінювання в матеріалі анода) і зменшенням коефіцієнта поглинання випромінювання матеріалом анода із збільшенням енергії  $E$ .

## Висновки

Для імпульсних рентгенівських трубок рефлексорного та трансмісійного типу запропоновані математичні моделі дають можливість розрахувати миттєві та сумарні спектри рентгенівського випромінювання з врахуванням траєкторій електронів, конструкції анодно-катодного вузла, матеріалу анода і вихідного вікна, тривалості імпульсу, змінювання анодної напруги та анодного струму під час імпульсу.

Введений сумарний спектр випромінювання, який задає розподіл за енергіями щільності рентгенівських фотонів, що випромінюються за час одного імпульсу, накопичується після проходження контрольованого об'єкту в перетворювачі рентген-електричний сигнал, формує вихідний сигнал, суттєво спрощує проектування імпульсних систем і задає необхідну тривалість експозиції випромінювання для відомої чутливості перетворювача.

Дослідження спектральних характеристик випромінювання за допомогою числових методів, прийнятих в моделях інтерполяцій часових характеристик і залежностей коефіцієнтів поглинання матеріалів від енергії доцільно використати як для аналізу існуючих так і для проектування нових імпульсних рентгенівських трубок і систем.

## Список використаних джерел

1. *Белый Н.Г., Бухенский В.Н., Михайлов С.Р., Слободян Н.В., Шило Д.С.* Относительная чувствительность рентгенотелевизионных систем на основе импульсных рентгеновских аппаратов. – Техническая диагностика

и неразрушающий контроль. № 1. 2013. С. 39 – 43.

2. *Борисов А. А.* О двух технологиях построения цифровых приемников рентгеновских изображений./ Борисов А. А., Вейп Ю. А., Мазуров А. И. – Медицинская техника. 2006. № 5. С. 7-10.
3. *Вавилов С.П.* Импульсное рентгеновское излучение в дефектоскопии. / Вавилов С.П., Горбунов В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 80 с.
4. *Иванов С. А.* Рентгеновские трубки технического назначения. / Иванов С. А., Щукин Г. А. Л.: - Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1989. – 200 с.
5. *Капустьянов О.Л., Шинкаренко Н.В.* Траектории электронов в импульсных рентгенівських трубках// *Електроніка і зв'язь*. 2012. №6. С.14–18.
6. *Михайлов С.Р.* Моделирование теневого рентгеновского изображения контролируемого объекта в рентгеноскопических системах неразрушающего контроля // *Электроника и связь*. 2002. №16. С.59–70.
7. Рентгеноаппараты “Арина”, “Шмель”, фирмы “СКБ Спецтехника”, 2012, //defektoskop.ru/\_meds/?part=oborudovanie.
8. *Denbnovetsky S.V., Slobodyan N.V.* Simulation of radiation characteristics of pulse X-ray devices for non-destructive testing the semiconductor materials // *Semiconductor Physics. Quantum Electronics and Optoelectronics*. 2006. 9, №1. p. 68-72.
9. [http:// www.goldenengineering.com](http://www.goldenengineering.com)

Поступила в редакцию 20 декабря 2013 г.

УДК 621.397.13

**С.В. Денбновецький<sup>1</sup>**, д-р техн. наук, **А.Л. Капустьянов<sup>2</sup>**, **С.Р. Михайлов<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **А.В. Лецишин<sup>1</sup>**, канд. техн. наук, **Н.В. Шинкаренко<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”, пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина.

<sup>2</sup>Samsung Ukraine R&D Center, вул. Льва Толстого, 57, г. Киев, 01032, Украина.

## Моделирование спектров излучения импульсных рентгеновских

*Приведены результаты моделирования спектров тормозного рентгеновского излучения в импульсных трубках рефлекторного и трансмиссионного типа, которые учитывают конструкцию анодно-катодного узла, материалы анода и выпускного окна, изменения анодного напряжения и анодного тока в течение длительности импульса в трубках с взрывной эмиссией, а также угол наклона траекторий электронов к поверхности анода. С использованием программы MathCAD, в которой экспериментальные зависимости коэффициентов поглощения материала анода и выпускного окна от энергии фотонов, вольт-секундные и ампер-секундные характеристики анодного напряжения и тока интерполировались кубическими и квадратичными сплай-*

нами, а зависимость константы Томсона-Виддингтона от анодного напряжения аппроксимировались экспонентой. Рассчитаны мгновенные и суммарные (за длительность импульса) спектры однонаправленного (осевого) направления излучения и для разных углов излучения, которые образуют панорамное теневое изображение контролируемых материалов или изделий.

Конкретные примеры смоделированных суммарных спектров приведены для рефлекторных трубок с анодом в виде конусной поверхности и катода, образованного одиночной заостренной с внутренней стороны шайбой, а в трубках трансмиссионного типа анод имеет форму плоской фольги. Библ. 9, рис.6.

**Ключевые слова:** импульсные рентгеновские трубки, спектр рентгеновского излучения, неразрушающий контроль.

UDC 621.397.13

**S.V. Denbnovetskiy<sup>1</sup>**, Dr.Sc., **O.L. Kapustyanov<sup>2</sup>**, **S.R. Mihaylov<sup>1</sup>**, Ph.D., **O.V. Leschishin<sup>1</sup>**, Ph.D., **N.V. Shinkarenko<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",  
Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

<sup>2</sup>Samsung Ukraine R & D Center, Lev Tolstoy St., 57, Kyiv, 01032, Ukraine.

## Modeling the emission spectra of pulsed X-ray tubes

*The results of modeling the spectra of X-ray braking radiation of pulsed tubes of reflex and transmission type have been shown. They consider the design of anode-cathode unit, material of anode and outlet window, changing of the anode voltage and anode current during the pulse in tubes with explosive emission and also angle between trajectories of electrons and anode surface. Using MathCAD software there were calculated instant and total (per pulse) spectra of single directional (axial) radiation and radiation for different angles, that form a panorama shadow image of controlled materials or products. The experimental dependence of the absorption of the anode material and the outlet window and the photon energy, volt-second and ampere-second characteristics of anode voltage and current were interpolated by cubic and quadratic splines. The dependence of Thomson-Viddington constants and anode voltage was exponential approximated.*

*Specific examples of simulated total spectra of reflex tubes were shown with an anode as conical surface and the cathode formed by a solitary sharp washer on the inside, and transmission type anode tubes is shaped like a flat foil. Reference 9, figures 6.*

**Keywords:** pulsed X-ray tubes, spectrum of X-radiation, nondestructive testing.

### References

1. Belyiy N.G., Buhenskiy V.N., Mihaylov S.R., Slobodyan N.V., Shilo D.S. (2013), "Otnositelnaya chuvstvitelnost rentgenotelevizionnykh sistem na osnove impulsnykh rentgenovskikh apparatov". *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushiy control*. No 1. pp. 39 – 43. (Rus.)
2. Borisov A. A., Veyr Yu. A., Mazurov A. I. (2006), "About two technologies of construction of digital X-ray imaging detectors". *Meditsinskaya tekhnika*. No 5. pp.7-10. (Rus.)
3. Vavilov S.P., Gorbunov V.I. (1985), "Pulsed X-rays in radiography". M.: Energoatomizdat, P. 80. (Rus.)
4. Ivanov S. A., Schukin G. A. (1989), "X-ray tubes for industrial use." AL.: Energoatomizdat. Leningrad., P. 200. (Rus.)
5. Kapustyanov O.L., Shinkarenko N.V. (2012), "The trajectories of electrons in a pulsed X-ray tubes". *Elektronika i svyaz*. No 6. pp. 14–18. (Ukr.)
6. Mihaylov S.R. (2002), "Simulation of X-ray shadow image of the controlled object in fluoroscopic systems, nondestructive testing", *Elektronika i svyaz*. No 16. pp. 59–70. (Rus.)
7. Rentgenoaparaty "Arina", "Shmel", 2012, //defektoskop.ru/\_meds //Part=oborudovanie. (Rus.)
8. Denbnovetskiy S.V., Slobodyan N.V. (2006), "Simulation of radiation characteristics of pulse X-ray devices for non-destructive testing the semiconductor materials". *Semiconductor Physics. Quantum Electronics and Optoelectronics*. 9, No 1. p. 68-72.
9. <http://www.goldenengineering.com>