

Загальні питання

УДК 621.386.2: 681.513.672

М.О. Малахова, С.М. Рева, М.Г. Стервоєдов

Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків

МЕТОД ІНДИВІДУАЛІЗАЦІЇ ТИПОВИХ ЕМІСІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАЧА

Розроблено метод індивідуалізації типових емісійних характеристик рентгенівського випромінювача шляхом їх математичного перетворення з урахуванням емпіричних даних, отриманих при проведенні серії пробних експозицій. Запропонований метод дозволяє проводити калібрування комп'ютеризованої системи управління рентгенівською установкою.

Ключові слова: калібрування, метод, емісійні характеристики, емпіричні дані, індивідуалізація, рентгенівський випромінювач.

Вступ

На сьогоднішній день рентгенографічні методи активно використовуються в якості засобів неруйнівного контролю у виробництві, в процесі експлуатації, під час митного контролю, в криміналістиці і т.д. [1]. Найбільш затребувана рентгенологія в медицині, щорічно в світі збільшується кількість проведених рентгенодіагностичних процедур при постановці або уточненні діагнозу. Такі напрямки як травматологія або онкологія важко собі уявити без даного інструменту. З іншого боку, рентгенологічні дослідження асоціюються в довгостроковій перспективі, як не парадоксально, з такими ризиками для здоров'я людини, як онкозахворювання [2] та не є повністю безпечними для людини. Тому вчені всього світу постійно ведуть роботу над створенням метрик [3], інструментів реєстрації [4] та обліку [5], а також механізмів зниження дози опромінення [6], які отримує пацієнт і медперсонал в процесі роботи рентгенівської техніки. Одним із шляхів зменшення дози іонізуючого випромінювання при застосуванні рентгенодіагностичних методів вважають оптимізацію режимів проведення досліджень та своєчасне усунення виявлених відхилень технічних параметрів від номінальних значень [7].

Регулювання анодного струму рентгенівської трубки є одним з механізмів зміни експозиційної дози рентгенівського знімка в медичних діагностичних апаратах. Величина струму, що протікає через трубку, залежить від рівня напруги, прикладеного до рентгенівської трубки, і емісійної здатності катода, яка визначається температурою його поверхні і для рентгенівських трубок, що використовують катод прямого нагріву, залежить від струму розжарення, що протікає через нитку катода. Залежність анодного струму від струму розжарення представляєть-

ся у вигляді емісійних характеристик трубки, які наводяться в паспорті рентгенівської трубки.

Забезпечити стабілізацію струму, особливо на початкових етапах експозиції, практично неможливо за рахунок застосування систем зворотного зв'язку з причини того, що постійна часу теплових процесів, що відбуваються в катоді, складає десятки мілісекунд. Тому єдиним способом забезпечення заданого значення анодного струму є попередня установка струму розжарення на певному рівні, завдяки чому температура катода і його емісійна здатність досягає необхідної величини.

В сучасних системах управління живленням рентгенівських апаратів емісійні характеристики зберігаються у вигляді таблиць або коефіцієнтів апроксимуючих поліномів. Для забезпечення точності установки анодного струму потрібне попереднє калібрування системи управління живленням, тобто формування індивідуальних таблиць або коефіцієнтів, відповідних конкретному примірнику трубки. Відхилення індивідуальних характеристик від типових обумовлюється наявністю індивідуальних конструктивних особливостей, станом вакууму всередині приладу, якістю поверхні катода і іншими факторами, крім того емісійні характеристики катода змінюються і в процесі експлуатації трубки. Калібрування може бути проведене шляхом безпосереднього і докладного зняття характеристик за рахунок виконання великої кількості експозицій при різних рівнях анодної напруги. Однак такий підхід вимагає створення спеціального технологічного режиму роботи пристрою живлення і великих витрат часу технічного персоналу. Альтернативні методи калібрування рентгенівського випромінювача зазвичай засновані на можливості апроксимації емпірично отриманих даних контрольних експозицій поліномами другого порядку. Наприклад, використовуюва-

ний раніше метод, що апроксимує дані тестових експозицій для мінімального та максимального значення напруги на рентгенівському випромінювачі, та розташовує проміжні криві пропорційно типовим, має низку недоліків. Неможливість отримати експериментальні дані при значеннях струму та напруги близьких до максимальних і як наслідок необхідність екстраполяції досить тривалої ділянки кривої сімейства при максимальній анодній напрузі призводить до того, що отримані таким чином характеристики надмірно розходяться в області великих значень анодного струму та суттєво відрізняються від реальних через велику похибку апроксимації. Метою даної статті є розробка методу індивідуалізації типових емісійних характеристик шляхом математичного перетворення типових емісійних характеристик рентгенівського випромінювача з урахуванням емпіричних даних, отриманих при проведенні кількох пробних експозицій.

Основна частина

Для попереднього розрахунку струму розжарювання, який необхідно встановити перед початком експозиції, комп'ютеризованою системою управління рентгенівською установкою використовуються функції зворотні характеристикам, наведеним в паспорті рентгенівського випромінювача, тобто, залежність струму розжарення від величини необхідного анодного струму при певних значеннях анодної напруги U :

$$\forall U_i \in U : \exists f_{U_i}(x), \quad (1)$$

де U_i – певне значення анодної напруги;

U – множина значень анодних напруг, для яких наведені дані у паспорті рентгенівського випромінювача;

y – струм розжарювання (код розжарювання);

x – анодний струм;

$f_{U_i}(x)$ – залежність струму розжарювання y від струму анода x при значенні анодної напруги U_i .

Задане типове сімейство емісійних характеристик рентгенівського випромінювача S можна визначити наступним чином:

$$S = \{y = f_{U_i}(x) \mid x, y > 0; U_i \in U\}. \quad (2)$$

Данні серії попередніх контрольних експозицій відображені у множині емпіричних точок P :

$$D = \{(x, y^*, U_i) \mid U_i \in U\}, \quad (3)$$

де y^* – реальне значення струму розжарювання отримане оператором емпірично при значенні струму аноду x для значення анодної напруги U_i .

Якщо уявити собі, що типові емісійні характеристики рентгенівського випромінювача нанесені на еластичну прозору плівку, закріплену між двома металевими стрижнями, яка шляхом пересування останніх у вертикальному напрямку може рівномір-

но розтягуватися (стискатися), а також переміщатися, то функція перетворення типових емісійних характеристик рентгенівського випромінювача на індивідуалізовані під конкретний екземпляр трубки може бути визначена наступним чином:

$$f'_{U_i}(x) = M(x)f_{U_i}(x) + N(x); \quad (4)$$

$$M(x) = M_1x^2 + M_2x + M_3; \quad (5)$$

$$N(x) = N_1x^2 + N_2x + N_3, \quad (6)$$

де $M(x)$ – коефіцієнт масштабування, представлений поліномом другого порядку;

$N(x)$ – коефіцієнт вертикального переміщення, представлений поліномом другого порядку;

$M_1, M_2, M_3, N_1, N_2, N_3$ – константи.

Коефіцієнт M в цьому випадку представляє собою коефіцієнт розтягування плівки (стиснення, якщо $M < 1$), а коефіцієнт N задає вертикальне переміщення. Використання функції перетворення, в якій залежність коефіцієнтів від аргументу описується поліномами другого порядку, запобігає виникненню таких небажаних ефектів як надмірна деформація, що призводить до порушення монотонності вихідних характеристик тощо.

Застосувавши функцію перетворення (4) до типових емісійних характеристик, отримаємо нове індивідуалізоване сімейство S' :

$$S \xrightarrow{f'} S' = \{y' = f'_{U_i}(x)\}. \quad (7)$$

Для визначення коефіцієнтів функції перетворення (4) з урахуванням виразів (5) та (6) використовується підмножина D_1 з шести точок множини емпіричних даних D . Таким чином, розрахунок коефіцієнтів функції перетворення типових емісійних характеристик рентгенівського випромінювача являє собою розв'язання системи шести рівнянь, де невідомі константи $M_1, M_2, M_3, N_1, N_2, N_3$ були перейменовані на змінні $z_1..z_6$:

$$\begin{cases} y_1^* = (z_1x_1^2 + z_2x_1 + z_3)f(x_1) + z_4x_1^2 + z_5x_1 + z_6; \\ \dots \\ y_6^* = (z_1x_6^2 + z_2x_6 + z_3)f(x_6) + z_4x_6^2 + z_5x_6 + z_6; \\ x_1 \neq x_2 \neq x_3 \neq x_4 \neq x_5 \neq x_6. \end{cases} \quad (8)$$

Єдине рішення системи алгебраїчних рівнянь з шістьма невідомими було отримано за правилом Крамера:

$$z_i = \frac{\Delta_i}{\Delta}, \Delta \neq 0, i = 1..6, \quad (9)$$

де Δ – детермінант вихідної матриці;

Δ_i – детермінант матриці, отриманої з вихідної матриці шляхом заміни i -го стовпця.

Стає зрозумілим, що існування та якість результатів перетворення залежить від стратегії підготовки та вибору емпіричних даних для розрахунку. Численні експерименти показали, що найкращі результати виходять в тому випадку, якщо в процесі

розрахунку досить точно визначена «кривизна» перетворення і коефіцієнти масштабування на початку і кінці області розташування емісійних характеристик. Такі результати виходять, якщо в якості розрахункових точок вибрати чотири точки, рівномірно розподілені на одній з кривих, наприклад, на верхній кривій сімейства (емісійна характеристика з мінімальним значенням анодної напруги). Це дозволяє, найбільш точно визначити «кривизну» деформації координатної площини. Останні дві точки слід максимально рознести по краях нижньої кривої (емісійна характеристика з максимальним значенням анодної напруги) для визначення коефіцієнтів масштабування. Так як експериментальна точка, розташована по правому краю нижньої кривої часто не може бути отримана через перевищення максимально допустимої потужності, вона може бути замінена точкою на іншій кривій сімейства. Тому в якості останньої розрахункової ми вибираємо точку з максимальним значенням струму анода на тій кривій, для якої експозиційна потужність не буде перевищувати максимально допустиму.

ВИСНОВКИ

Розроблено метод індивідуалізації типових емісійних характеристик рентгенівського випромінювання шляхом математичного перетворення останніх з урахуванням експериментальних даних серії контрольних експозицій. Запропонований метод було покладено в основу нової моделі вимірювання емісійних характеристик рентгенівського випромінювача, що дало змогу проводити оцінку якості отриманих результатів з урахуванням міжнародних вимог [8] у концепції невизначеностей.

Використання оцінки стандартної невизначеності вимірювання у якості критерію оптимізації за рахунок варіації підмножини експериментальних точок, що використовується для розрахунку коефі-

цієнтів функції перетворення типових емісійних характеристик, дало можливість значно підвищити точність процедури калібрування комп'ютеризованої системи управління рентгенівською установкою.

Список літератури

1. Sanjeevareddy Kolkoori, Norma Wrobel, Uwe Zscherpel, Uwe Ewert, A new X-ray backscatter imaging technique for non-destructive testing of aerospace materials // *NDT & E International*. – March 2015. – Vol. 70. – Pp. 41-52.
2. Kevin D. Hill, Andrew J. Einstein, New approaches to reduce radiation exposure // *Trends in Cardiovascular Medicine*. – January 2016. – Vol. 26. – Issue 1. – Pp. 55-65.
3. Richard L. Morin, J. Anthony Seibert, John M. Boone, Radiation Dose and Safety: Informatics Standards and Tools // *Journal of the American College of Radiology*. – Dec. 2014. – Vol. 11. – Issue 12, Part B. – Pp. 1286-1297.
4. Baptista Neto A.T., Faria L.O. Construction and calibration of a multipurpose instrument to simultaneously measure dose, voltage and half-value layer in X-ray emission equipment // *Radiation Measurements*. – Dec. 2014. – Vol. 71. – Pp. 178-182.
5. Rehani M.M. Looking into future: challenges in radiation protection in medicine [Text] / M.M. Rehani // *Radiat Prot Dosimetry*. – 2015 Jul. – Vol. 165(1-4). – Pp. 3-6.
6. Thomas R. Nelson, Practical Strategies to Reduce Pediatric CT Radiation Dose // *Journal of the American College of Radiology*. – March 2014. – Vol. 11. – Issue 3. – Pp. 292-299.
7. Стадник Л.Л. Оценка доз пациентов в рентгенографии и их оптимизация путем установления национальных диагностических рекомендованных уровней [Текст] / Л.Л. Стадник, О.Ю. Шалепа, О.В. Носик // *Радиационная гигиена*. – 2014. – Т. 7. – № 4. – С. 84-88.
8. Малецкая О.Е. Калибровка сит: оценка погрешности и неопределенности измерений / О.Е. Малецкая, М.В. Москаленко // *Системи обробки інформації*. – 2013. – Вип. 3 (110). – С. 75-79.

Надійшла до редколегії 5.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук проф. С.В. Литовченко, Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна, Харків.

МЕТОД ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ ТИПОВЫХ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

М.О. Малахова, С.Н. Рева, Н.Г. Стервоядов

Разработан метод индивидуализации типовых эмиссионных характеристик рентгеновского излучателя путем их математического преобразования с учетом эмпирических данных, полученных при проведении серии пробных экспозиций. Предложенный метод позволяет проводить калибровку компьютеризированной системы управления рентгеновской установкой.

Ключевые слова: калибровка, метод, эмиссионные характеристики, эмпирические данные, индивидуализация, рентгеновский излучатель.

METHOD OF TYPICAL X-RAY EMITTER EMISSION CHARACTERISTICS INDIVIDUALIZATION

M. Malakhova, S. Reva, M. Styervoyedov

A method for individualizing the typical emission characteristics of X-ray emitter by means of their mathematical transformation taking into account the empirical data obtained during a series of trial exposures has been developed. The proposed method allows calibration of a computerized X-ray control system.

Keywords: calibration, method, emission characteristics, empirical data, individualization, X-ray radiator.