

DOI: 10.18372/2310-5461.70.20938

УДК: 681.5; 004.93

О.С. Мірошніченко,

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-3612-7615>e-mail: oleksandra.miroshnychenko@npp.kai.edu.ua**Ю.В. Хобта,**

«Науково-виробнича компанія Телеоптик», ТОВ

<https://orcid.org/0009-0000-3238-1096>e-mail: Yuriy.Khobta@teleoptic-pra.com.ua**С.І. Мірошніченко,**

«Науково-виробниче об'єднання Телеоптика», ТОВ

<https://orcid.org/0000-0003-4169-3440>e-mail: msi@teleoptic-pra.com.ua**А.М. Миколушко,**

Національний університет «Київський авіаційний інститут»

<https://orcid.org/0000-0002-2767-8255>e-mail: andrii.mykolushko@npp.kai.edu.ua

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОБІЛЬНОГО ТОМОСИНТЕЗУ З ОЦІНКОЮ ЩІЛЬНОСТІ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ

Вступ

Технологія рентгенівського томосинтезу є сучасним напрямом розвитку цифрових рентгенодіагностичних систем та інформаційних технологій медичної візуалізації, що займає проміжне положення між класичною рентгенографією та комп'ютерною томографією [1–4]. На відміну від проекційної рентгенографії, яка формує інтегральне зображення об'єкта по всій його товщині, томосинтез забезпечує формування серії томографічних зрізів за обмеженого кута сканування з подальшою цифровою реконструкцією. Це дозволяє частково усунути ефект накладання анатомічних структур, характерний для проекційних методів, і підвищити контрастність візуалізації патологічних змін, особливо у випадках, коли патологія маскується сусідніми тканинами. Завдяки застосуванню сучасних інформаційних технологій обробки зображень підвищується діагностична чутливість методу, що є критично важливим для раннього виявлення уражень. Водночас, порівняно з комп'ютерною томографією, томосинтез характеризується значно меншим променевим навантаженням та нижчими вимогами до апаратної реалізації, що робить його більш доступним і придатним для широкого застосування. Таким чином, технологія томосинтезу поєднує переваги двох підходів – відносно низьку дозу опромінення та підви-

щену інформативність зображень – і створює передумови для підвищення ефективності рентгенівської діагностики із застосуванням інформаційних технологій без суттєвого збільшення променевого навантаження.

Особливого значення технологія томосинтезу набуває у мобільних рентгенівських комплексах, які є складними інформаційно-технічними системами та застосовуються в умовах обмеженої інфраструктури, зокрема у польових шпиталях, зонах надзвичайних ситуацій та при наданні допомоги постраждалим із бойовими пораненнями. У таких умовах важливими є швидкість отримання результату, автономність системи та можливість роботи без стаціонарної інфраструктури. Мобільні комплекси можуть функціонувати автономно, використовуючи акумуляторні джерела живлення, що істотно розширює можливості їх застосування та дозволяє проводити діагностику безпосередньо на місці події. Разом із тим, енергетичні можливості таких систем є суттєво обмеженими порівняно зі стаціонарними установками, що працюють від потужних мереж живлення, що накладає обмеження на параметри збору первинних даних та їх подальшу обробку.

У цих умовах особливої актуальності набуває задача оптимізації інформаційних процесів формування, передачі та обробки рентгенівських зображень, спрямована на забезпечення максимальної інформативності за мінімально можливого

променевого навантаження відповідно до принципу ALARA (As Low As Reasonably Achievable). Досягнення цього вимагає комплексного підходу, що включає як удосконалення апаратної частини, так і розроблення ефективних алгоритмів цифрової обробки, реконструкції та аналізу зображень.

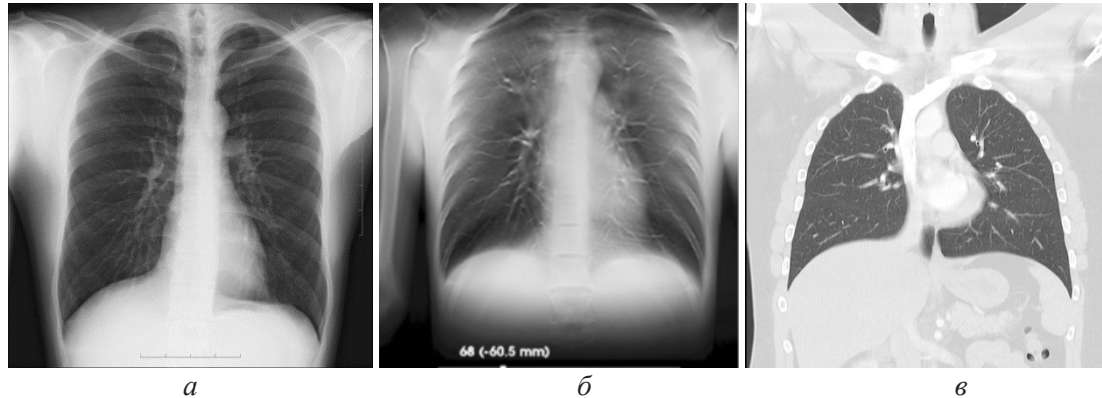


Рис. 1. Рентгенівські зображення грудної клітини:
а – рентгенографія; б – томосинтез; в – комп'ютерна томографія

Однією з ключових проблем мобільних рентгенівських систем є механічна нестабільність, обумовлена їх конструктивними особливостями – малою масою, мобільністю та відсутністю жорсткої фіксації в процесі сканування. У реальних умовах експлуатації це призводить до відхилень траєкторії руху рентгенівського випромінювача та приймача, появи випадкових і систематичних геометричних похибок, що накопичуються під час формування серії проєкцій. Наслідком цього є виникнення артефактів реконструкції, зниження контрасту та просторової локалізації патологій, що негативно впливає на діагностичну ефективність системи [5].

Крім того, сучасні вимоги до медичної діагностики передбачають не лише візуалізацію анатомічних структур, але й можливість кількісної оцінки фізичних параметрів тканин, зокрема щільності кісткової тканини. У комп'ютерній томографії така оцінка реалізується через шкалу Хаунсфілда, однак у томосинтезі, через обмежений кут сканування та варіативність геометрії знімання, пряме визначення щільності є складним завданням, особливо для мобільних систем.

Таким чином, актуальним є розроблення інформаційної технології мобільного рентгенівського томосинтезу, яка забезпечує підвищення ефективності формування зображень за рахунок урахування механічної нестабільності системи та створює передумови для кількісної оцінки щільності кісткової тканини в умовах обмежених енергетичних і геометричних можливостей.

Метою роботи є підвищення ефективності мобільного рентгенівського томосинтезу шляхом урахування механічних похибок позиціонування та розроблення методу оцінки щільності кісткової

тканини на основі калібрування інтенсивності зображення.

На рис. 1 представлені приклади зображень грудної клітини, отриманих методами цифрової рентгенографії, томосинтезу та комп'ютерної томографії, що наочно демонструють відмінності в якості візуалізації та інформативності кожного з підходів.

тканини на основі калібрування інтенсивності зображення.

Постановка проблеми

Ефективність мобільних рентгенівських систем з режимом томосинтезу визначається здатністю забезпечити необхідну якість зображення для достовірного виявлення та розпізнавання патологічних змін за умов обмежених енергетичних ресурсів і змінної геометрії знімання.

У процесі формування томосинтетичних зображень виникає необхідність узгодження двох взаємопов'язаних характеристик якості: співвідношення сигнал/шум первинного потоку рентгенівських квантів та співвідношення сигнал/фон у реконструйованих зображеннях. Зменшення товщини томографічного шару, характерне для томосинтезу, сприяє підвищенню контрастності за рахунок зменшення міжшарового перекриття, однак одночасно призводить до зниження кількості зареєстрованих квантів у вокселі та погіршення співвідношення сигнал/шум. Це обумовлює необхідність пошуку компромісних режимів формування зображення.

Додатковою складністю є те, що в мобільних системах геометрія знімання не є жорстко фіксованою. Відхилення положення рентгенівського випромінювача та приймача від номінальної траєкторії призводять до виникнення похибок позиціонування для кожної проєкції. Накопичення цих похибок у процесі реконструкції спричиняє геометричні спотворення та появу артефактів, що знижують діагностичну інформативність отриманих зображень.

Крім того, важливим завданням є отримання кількісної інформації про щільність кісткової тканини на основі томосинтетичних зображень. Реалізація такого підходу ускладнюється обмеженнями куту сканування та варіаціями геометрії та експозиційних параметрів, що потребує використання спеціальних методів калібрування інтенсивності сигналу.

Таким чином, задачею даної роботи є розроблення підходу до підвищення ефективності мобільного рентгенівського томосинтезу, який передбачає:

- урахування механічних похибок позиціонування при формуванні серії проєкцій;
- забезпечення узгодження енергетичних та інформаційних характеристик системи;
- розроблення методу оцінки щільності кісткової тканини на основі калібрування інтенсивності зображення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технологія цифрового рентгенівського томосинтезу активно розвивається як ефективна альтернатива класичній рентгенографії та комп'ютерній томографії у задачах візуалізації кісткових структур і органів грудної клітки. У сучасних дослідженнях значна увага приділяється підвищенню якості реконструйованих зображень, зменшенню артефактів та оптимізації дозового навантаження на пацієнта [6].

Одним із ключових напрямів є вдосконалення алгоритмів реконструкції томосинтетичних зображень, зокрема методів ітераційної реконструкції (SART, SIRT), які дозволяють підвищити контрастність і зменшити вплив накладання структур при обмежених кутах сканування. Водночас ефективність таких алгоритмів значною мірою залежить від точності геометричної моделі процесу формування проєкцій [1,5].

У роботах, присвячених мобільним рентгенівським системам, відзначається, що на відміну від стаціонарних комплексів, вони характеризуються підвищеною чутливістю до механічних впливів, зокрема вібрацій, неточностей позиціонування та деформацій конструкції. Це призводить до відхилення реальної траєкторії руху рентгенівського джерела від заданої, що викликає геометричні спотворення та появу артефактів у реконструйованих зображеннях [7]. У більшості існуючих підходів ці фактори або не враховуються, або компенсуються частково за рахунок спрощених моделей руху.

Окремим напрямом досліджень є використання методів калібрування та корекції інтенсивності зображення для отримання кількісної інформації про властивості тканин. У комп'ютерній томографії така задача вирішується за допомогою шкали Хаунсфілда, однак для томосинтезу, через обмежений кут сканування та особливості реконструкції, пряме використання цього підходу є неможливим. Існуючі роботи в цій області здебільшого орієнтовані на відносні оцінки або потребують складних тривимірних реконструкцій [8].

Також у науковій літературі розглядаються питання оптимізації співвідношення сигнал/шум та сигнал/фон у рентгенівських системах, що безпосередньо пов'язано з енергетичними обмеженнями джерела випромінювання та параметрами формування зображення. Особливо актуальною ця задача є для мобільних систем, де обмеження по потужності та експозиції є критичними [1, 4].

Незважаючи на значну кількість досліджень у зазначених напрямках, питання комплексного урахування механічної нестабільності мобільної системи під час формування проєкцій, а також поєднання цього підходу з можливістю кількісної оцінки щільності кісткової тканини в межах єдиної інформаційної технології залишаються недостатньо опрацьованими.

Незважаючи на значну кількість досліджень у зазначених напрямках, питання комплексного урахування механічної нестабільності мобільної системи під час формування проєкцій, а також поєднання цього підходу з можливістю кількісної оцінки щільності кісткової тканини в межах єдиної інформаційної технології залишаються недостатньо опрацьованими.

Виклад основного матеріалу

Якість рентгенівських зображень у мобільних системах з режимом томосинтезу визначається двома взаємопов'язаними характеристиками: співвідношенням сигнал/шум потоку рентгенівських квантів на етапі формування первинних даних та співвідношенням сигнал/фон у реконструйованих зображеннях. Перша характеристика визначає статистичну достовірність реєстрації сигналу, тоді як друга – здатність виявлення патологічних змін на фоні анатомічних структур.

Потік рентгенівських квантів у діагностичних системах підпорядковується пуассонівському розподілу [1]:

$$P(k) = \frac{N^k e^{-N}}{k!},$$

де k – число квантів, N – математичне очікування числа квантів. Для такого процесу співвідношення сигнал/шум визначається як

$$SNR_N = \sqrt{N}.$$

Це означає, що зменшення кількості зареєстрованих квантів безпосередньо призводить до зниження якості зображення, зокрема до зростання шумової складової та втрати дрібних деталей. У мобільних рентгенівських комплексах енергетичні можливості обмежені потужністю джерела випромінювання та допустимими значеннями експозиції, що унеможливує підвищення сигналу за рахунок збільшення дози без порушення вимог

радіаційної безпеки. Тому забезпечення необхідного рівня співвідношення сигнал/шум досягається шляхом оптимізації об'єму вокселя, з урахуванням як його площинних розмірів, так і глибини інтегрування сигналу.

Об'єм вокселя визначається не лише площинною роздільною здатністю, але й глибиною інтегрування сигналу вздовж осі знімання. У рентгенографії глибина вокселя відповідає всій товщині об'єкта, що забезпечує високе значення N_i , відповідно, високе співвідношення сигнал/шум, але супроводжується значним накладанням структур. У томосинтезі глибина шару зменшується, що призводить до зменшення N , однак одночасно зменшується внесок сигналів від сусідніх шарів, що підвищує співвідношення сигнал/фон. Таким чином, між цими характеристиками виникає компроміс.

У мобільних системах цей компроміс реалізується шляхом контрольованого збільшення площинних розмірів вокселя (зниження детальності) при одночасному зменшенні його глибини. Це досягається, зокрема, шляхом агрегування сигналів сусідніх пікселів (бінінгу), що дозволяє збільшити N без зміни дози. У результаті забезпечується стабілізація співвідношення сигнал/шум при збереженні або покращенні співвідношення сигнал/фон. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність формування зображень без суттєвого збільшення променевого навантаження.

Реалізація цього підходу вимагає побудови функціональної структури інформаційної технології, яка поєднає інструментальну частину формування рентгенівських проєкцій та програмні засоби їх обробки. Така структура повинна забезпечувати узгоджену роботу апаратних і програмних компонентів у реальному часі з урахуванням обмежень мобільної системи. У інструментальній частині зменшення глибини шару досягається

шляхом переміщення рентгенівського джерела в межах обмеженого кута сканування, що забезпечує формування серії проєкцій з різних ракурсів. Це створює інформаційну основу для подальшої реконструкції томосинтетичних зрізів. У підсистемі обробки даних здійснюється синхронізація отриманих проєкцій, їх попередня обробка з урахуванням шумових та геометричних факторів, реконструкція зображень, а також подальший аналіз та підготовка результатів для візуалізації і інтерпретації.

Однією з ключових проблем мобільних рентгенівських систем є механічна нестабільність, що призводить до відхилень траєкторії руху джерела від заданої. Для кожної проєкції це викликає похибку позиціонування, яка може бути оцінена як [7]

$$\Delta r(t) = \sqrt{(x_t - x_0)^2 + (y_t - y_0)^2 + (z_t - z_0)^2},$$

де (x_0, y_0, z_0) – еталонне положення, а (x_t, y_t, z_t) – поточне положення.

Для компенсації цих похибок запропоновано підхід, який базується на поєднанні даних інерційних сенсорів та аналізу зображень контрольного маркера. Для кожної проєкції формується індивідуальна матриця геометричного перетворення, що дозволяє адаптувати алгоритм реконструкції до фактичних умов знімання. Це забезпечує зменшення артефактів та підвищення точності відтворення структури об'єкта.

Окрім задачі візуалізації, важливим є визначення щільності кісткової тканини. У комп'ютерній томографії це реалізується через шкалу Хаунсфілда, однак у томосинтезі така пряма залежність відсутня. Тому запропоновано метод відносної оцінки щільності на основі калібрування інтенсивності сигналу. Загальна модель удосконаленої інформаційної мобільної рентгенівської системи з томосинтезом, що забезпечує визначення щільності кістки представлена на рис. 2.

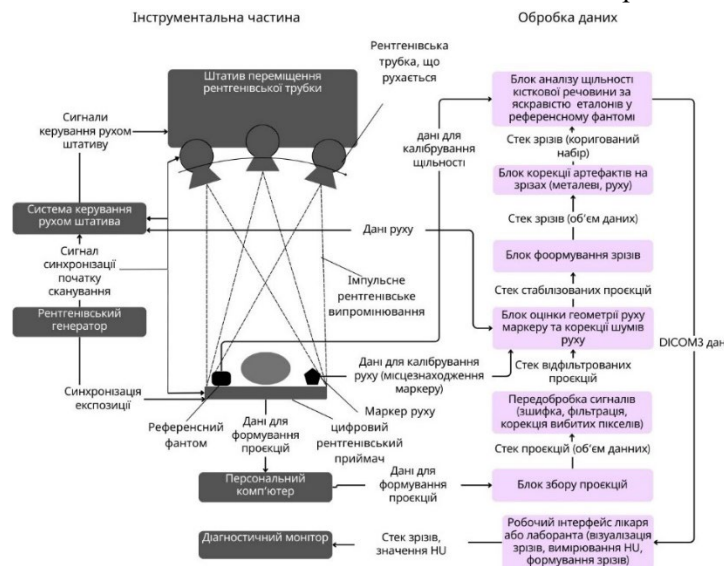


Рис. 2. Структура мобільної рентгенівської системи з томосинтезом, що забезпечує визначення щільності кістки

Оцінка щільності об'єкту ρ_{obj} виконується за виразом:

$$\rho_{obj} = \rho_{ref} \cdot \frac{B_{ref}}{B_{obj}} \cdot k_{corr},$$

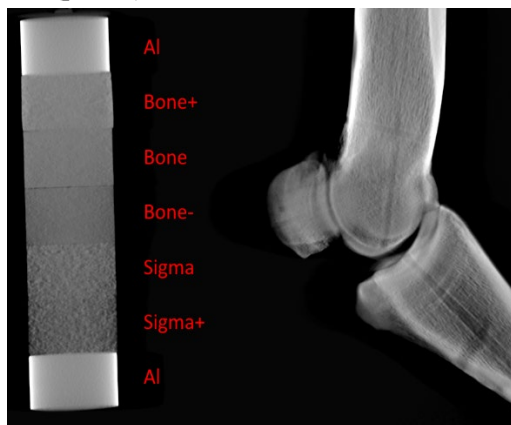
де ρ_{ref} — відома щільність еталонного матеріалу, B_{ref} та B_{obj} — інтенсивності сигналу, k_{corr} — коефіцієнт корекції.

Коефіцієнт k_{corr} визначається на основі калібрувальної залежності

$$B(\rho) = a_0 + a_1\rho + \dots + a_n\rho^n,$$

що враховує нелінійність формування зображення. Запропонований підхід забезпечує можливість відносної кількісної оцінки щільності без використання повноцінної тривимірної реконструкції та дозволяє стандартизувати результати вимірювань. Для реалізації методу калібрування інтенсивності зображення в роботі використано референсний фантом, конструкція якого забезпечує наявність матеріалів із відомими фізичними характеристиками в межах робочого діапазону енергій рентгенівського випромінювання. Зовнішній вигляд фантому та його просторове розміщення у полі зору рентгенівської системи наведено на рис. 3. Фантом розташовується таким чином, щоб його еталонні області потрапляли в кожну проекцію, але не перекривали діагностично значущі зони дослідження.

Характеристики матеріалів, що входять до складу референсного фантому для калібрування щільності EFT, наведені в табл. 1. Підбір матеріалів здійснено з урахуванням їх щільності та коефіцієнтів ослаблення рентгенівського випромінювання при напрузі на аноді трубки 80кВ, які відповідають основним типам біологічних тканин, зокрема м'яким тканинам, кістковій структурі та середовищам із низькою щільністю. Це дозволяє сформувати набір опорних точок для побудови калібрувальної залежності в широкому діапазоні значень (рис. 3).



a



б

Рис. 3. Рентгенівське зображення (а) та зовнішній вигляд (б) фантому

Таблиця 1

Характеристики референсного фантому для калібрування щільності

№	Матеріал	Щільність, г/см ³	Коеф. ослабл. μ (1/см)	Діапазон НУ
1	Поліметилметакрилат (PMMA)	1,19	0,15	~0
2	Алюміній	2,70	0,43	+1000
3	Поліетилен	0,95	0,09	-200
4	Гідроксіапа-тит $\text{Ca}_0(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$	3,16	0,48	+1200
5	Повітряна комірка	0,0013	0,0001	-1000

Для забезпечення кількісної узгодженості результатів томосинтезу з еталонними значеннями комп'ютерної томографії розроблено процедуру калібрування, що базується на використанні референсного фантому з відомими фізичними параметрами. Процедура передбачає послідовне отримання експериментальних даних на системах комп'ютерної томографії та цифрового томосинтезу за однакових умов сканування, що забезпечує коректність подальшого порівняння та мінімізує вплив зовнішніх факторів.

На першому етапі виконується сканування фантому на комп'ютерному томографі при заданих параметрах експозиції. При цьому визначаються значення одиниць Хаунсфілда для повітря, води та кожного з еталонних елементів фантому. Отримані дані формують набір опорних значень, які характеризують залежність коефіцієнта ослаблення рентгенівського випромінювання від типу матеріалу та можуть розглядатися як еталонні для подальшого калібрування.

На другому етапі проводиться сканування того ж самого фантому в режимі томосинтезу з використанням узгоджених параметрів експозиції. Для кожного елемента визначаються значення інтенсивності сигналу (яскравості) на реконструйованих зображеннях, а також значення для повітря, що використовується як рівень нормалізації. Відмінність значень яскравості для симетрично розташованих елементів дозволяє оцінити негомгенність поля опромінення та врахувати її як систематичну поправку, що підвищує точність подальших розрахунків.

Отримані пари значень «інтенсивність томосинтезу – одиниці Хаунсфілда» використовуються для побудови калібрувальної залежності між яскравістю зображення та еталонними значеннями комп'ютерної томографії. Проведені дослідження показали високу достовірність лінійної апроксимації цієї залежності в робочому діапазоні щільностей, що дозволяє застосовувати її для перерахунку значень яскравості томосинтетичних зображень у шкалу, еквівалентну Хаунсфілдам. З метою підвищення стабільності оцінки високощільні еталонні матеріали можуть бути виключені з процедури апроксимації для зменшення їх впливу на результат та підвищення чутливості в діапазоні діагностично значущих значень.

Наступним етапом є перехід від умовних одиниць інтенсивності до фізично інтерпретованих параметрів, зокрема мінеральної щільності кісткової тканини. Для цього використовуються паспортні значення щільності матеріалів фантому, на основі яких формується залежність між яскравістю зображення та щільністю. Отримана калібрувальна характеристика дозволяє визначати щільність досліджуваних ділянок за значенням інтенсивності сигналу в кожній точці зображення, що відкриває можливість переходу від якісної до кількісної оцінки.

Додатково оцінюється варіабельність структури матеріалу, що визначається за статистичними характеристиками сигналу та переводиться у відповідні метричні показники щільності. Це забезпечує можливість аналізу не лише середніх значень, але й неоднорідності структури тканини, що є важливим для оцінки патологічних змін.

Таким чином, запропонована процедура забезпечує узгодження результатів томосинтезу з еталонними значеннями комп'ютерної томографії, підвищує відтворюваність вимірювань та створює основу для кількісного аналізу щільності кісткової тканини. Приклад побудови регресійної залежності для перерахунку значень яскравості томосинтезу в одиниці Хаунсфілда наведено на відповідному графіку (рис. 4).

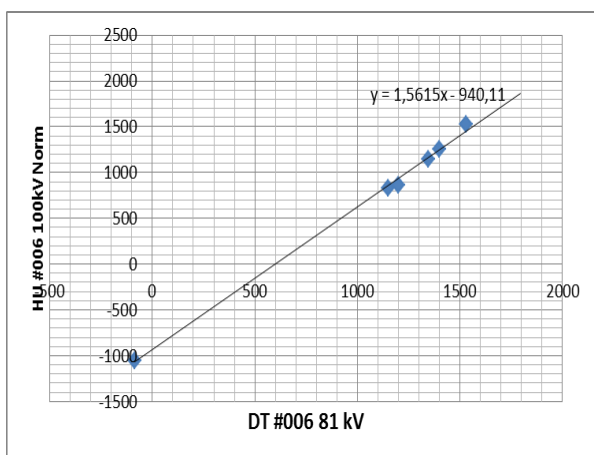


Рис. 4. Регресійна залежність для перерахунку значень яскравості томосинтезу в одиниці Хаунсфілда

Таким чином, запропонований підхід дозволяє перейти від абсолютного вимірювання в одиницях Хаунсфілда, характерного для комп'ютерної томографії, до відносної оцінки щільності за нормованими параметрами фантому. Це забезпечує можливість виявлення ділянок демінералізації кісткової тканини, кількісної оцінки ефективності лікування переломів у динаміці, а також стандартизації результатів між різними апаратами.

Таким чином, поєднання оптимізації енергетичних параметрів, компенсації механічних похибок та калібрування інтенсивності дозволяє підвищити ефективність мобільного рентгенівського томосинтезу та розширити його функціональні можливості.

Висновки

У роботі розглянуто підходи до підвищення ефективності мобільного рентгенівського томосинтезу в умовах обмежених енергетичних ресурсів та механічної нестабільності системи.

Показано, що якість томосинтетичних зображень визначається узгодженням співвідношення сигнал/шум первинного потоку рентгенівських квантів та співвідношення сигнал/фон у реконструйованих зображеннях. Обґрунтовано доцільність використання компромісного підходу, який полягає у зменшенні глибини томографічного шару при одночасному контрольованому зниженні просторової детальності в площині зображення, що дозволяє підвищити контраст патологій без збільшення променевого навантаження.

Запропоновано підхід до урахування механічних і геометричних похибок мобільної системи, який базується на визначенні фактичної траєкторії руху рентгенівського джерела за допомогою контрольного маркера та сенсорних даних. Реалізація цього підходу забезпечує адаптацію алгоритмів реконструкції до реальних умов знімання та дозволяє зменшити вплив артефактів, пов'язаних із нестабільністю позиціонування.

Розроблено метод оцінки щільності кісткової тканини на основі калібрування інтенсивності зображення із використанням референсного фантому. Метод дозволяє виконувати відносну кількісну оцінку щільності без застосування повноцінної тривимірної реконструкції та забезпечує можливість стандартизації результатів у мобільних умовах.

Отримані результати свідчать, що поєднання компенсації механічних похибок із методами узгодження енергетичних та інформаційних характеристик дозволяє суттєво підвищити якість реконструйованих зображень і розширити функціональні можливості мобільних рентгенівських систем з режимом томосинтезу. Запропоновані підходи можуть бути використані при розробленні мобільних діагностичних комплексів, орієнтованих на застосування у польових умовах.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Bushberg J. T., Seibert J. A., Leidholdt E. M., Boone J. M. The Essential Physics of Medical Imaging. 3rd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2012. 1040 p.
- [2] Miroshnychenko O., Miroshnychenko S., Nevgasymyi A., Khobta Y., Panteyev R., Radko D. The Concept of a Mobile X-Ray System with Tomosynthesis // 2024 IEEE 42nd International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). Kyiv, 2024. P. 452–455. <https://doi.org/10.1109/ELNANO63394.2024.10756837>
- [3] Miroshnychenko O., Miroshnychenko S., Khobta Y., Nevgasymyi A. Assessment of Compliance Digital X-ray Tomosynthesis Images of Chest with the Requirements for the Tomographic Images Quality // 2022 IEEE 41st International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO). 2022. P. 401–404. <https://doi.org/10.1109/ELNANO54667.2022.9927068>
- [4] Dobbins J. T., Godfrey D. J. Digital X-ray tomosynthesis: current state of the art and clinical potential. *Physics in Medicine and Biology*. 2003. Vol. 48. P. R65–R106.
- [5] Gange C., Ku J., Gosangi B., Liu J., Maolinbay M. Next-generation digital chest tomosynthesis. *Journal of Clinical Imaging Science*. 2024. Vol. 14. P. 22. https://doi.org/10.25259/JCIS_4_2024
- [6] Brunnquell C. L. et al. A comparison of radiography, X-ray tomosynthesis, and CT for intraorbital metallic foreign body screening. *Journal of the American College of Radiology*. 2024. Vol. 22, No. 3. P. 386–394. <https://doi.org/10.1016/j.jacr.2024.12.002>
- [7] Kalender W. A. Computed Tomography: Fundamentals, System Technology, Image Quality, Applications. 3rd ed. Erlangen: Publicis, 2011. 376 p.
- [8] Kak A. C., Slaney M. Principles of Computerized Tomographic Imaging. SIAM, 2001. 327 p.

**Мірошніченко О. С., Хобта Ю. В., Мірошніченко С. І., Миколушко А. М.
ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОБІЛЬНОГО ТОМОСИНТЕЗУ З ОЦІНКОЮ
ЩІЛЬНОСТІ КІСТКОВОЇ ТКАНИНИ**

У статті розглянуто підходи до підвищення ефективності мобільного рентгенівського томосинтезу в умовах обмежених енергетичних ресурсів та механічної нестабільності системи. Показано, що мобільні рентгенівські комплекси, на відміну від стаціонарних, характеризуються зниженими значеннями потужності джерела випромінювання та обмеженим діапазоном експозицій, що ускладнює забезпечення необхідної якості зображень і вимагає оптимізації процесів формування та обробки даних відповідно до принципу ALARA. Проаналізовано взаємозв'язок між співвідношенням сигнал/шум первинного потоку рентгенівських квантів та співвідношенням сигнал/фон у реконструйованих зображеннях. Показано, що зменшення глибини томографічного шару, характерне для томосинтезу, дозволяє знизити вплив накладання анатомічних структур і підвищити контраст патологій, однак одночасно призводить до зменшення кількості зареєстрованих квантів у вокселі. Обґрунтовано компромісний підхід, що передбачає контрольоване зниження просторової детальності в площині зображення для стабілізації співвідношення сигнал/шум без збільшення променевого навантаження. Запропоновано метод урахування механічних і геометричних похибок мобільної системи, який базується на визначенні фактичної траєкторії руху рентгенівського джерела з використанням контрольного маркера та інерційних сенсорів. Це дозволяє формувати індивідуальні геометричні параметри для кожної проєкції та адаптувати алгоритми реконструкції до реальних умов знімання, що зменшує рівень артефактів і підвищує якість зображень. Розроблено метод оцінки щільності кісткової тканини на основі калібрування інтенсивності томосинтетичних зображень із використанням референсного фантому. Метод забезпечує можливість відносної кількісної оцінки щільності без застосування повноцінної тривимірної реконструкції та дозволяє стандартизувати результати між різними дослідженнями. Показано, що поєднання запропонованих підходів забезпечує підвищення ефективності мобільного рентгенівського томосинтезу, покращення якості реконструйованих зображень та розширення функціональних можливостей системи в умовах практичного застосування.

Ключові слова: мобільний рентгенівський томосинтез; інформаційні технології; обробка медичних зображень; реконструкція зображень; оцінка щільності кісткової тканини; калібрування; співвідношення сигнал/шум.

Miroshnychenko O., Khobta Y., Miroshnychenko S., Mykolushko O.
**INFORMATION TECHNOLOGY OF MOBILE TOMOSYNTHESIS WITH BONE
DENSITY ASSESSMENT**

The paper considers approaches to improving the efficiency of mobile X-ray tomosynthesis under conditions of limited energy resources and mechanical instability of the system. It is shown that, compared to stationary systems, mobile X-ray complexes operate with significantly lower source power and restricted exposure parameters, which complicates the achievement of high image quality and requires optimization of acquisition and processing procedures in accordance with the ALARA principle. The relationship between the signal-to-noise ratio of the primary X-ray quantum flux and the signal-to-background ratio in reconstructed images is analyzed. It is demonstrated that reducing the tomographic layer thickness, inherent to tomosynthesis, decreases the effect of anatomical structure superposition and increases image contrast. However, this also leads to a reduction in the number of detected quanta per voxel, resulting in a lower signal-to-noise ratio. A compromise approach is substantiated, involving controlled reduction of spatial resolution in the image plane to stabilize the signal-to-noise ratio without increasing radiation dose. A method for compensating mechanical and geometric errors of a mobile system is proposed. The method is based on determining the actual trajectory of the X-ray source using a reference marker and inertial sensor data. This allows the formation of individual geometric parameters for each projection and enables adaptation of reconstruction algorithms to real acquisition conditions, reducing artifacts and improving image quality. In addition, a method for bone density estimation based on intensity calibration using a reference phantom is developed. The proposed approach enables relative quantitative assessment without requiring full 3D reconstruction and provides consistency of measurements across different studies. The results demonstrate that the integration of the proposed methods improves image quality and enhances the functional capabilities of mobile X-ray tomosynthesis systems in practical applications.

Keywords: mobile X-ray tomosynthesis; information technology; medical image processing; image reconstruction; bone density assessment; calibration; signal-to-noise ratio.

Дата першого надходження: 09.04.2026 р.

Дата прийняття до друку: 13.05.2026 р.

Дата публікації: 28.05.2026 р.