

УДК 621.19.20

Дослідження рівня власних шумів рентгенівського перетворювача типу "екран – об'єктив – ПЗЗ-матриця"

Шило Д.С., к.т.н., доц. Михайлов С.Р.

У сучасній промисловості для оцінки якості продукції широко застосовуються методи неруйнівного контролю. Одним з найбільш надійних на сьогоднішній день є радіаційний метод з використанням рентгенівського випромінювання.

Недоліки рентгенографії і потреба в високопродуктивних засобах контролю і діагностики стимулювали появу цифрової рентгенографії, засобами якої стало можливо підвищити продуктивність контролю і знизити його вартість. При використанні цифрової рентгенографії випромінювання, що пройшло через контрольований об'єкт, реєструється за допомогою спеціального перетворювача, оцифровується і в реальному часі у вигляді сигналу передається на відеоконтрольний пристрій [1, 2]. Є можливість зберігати окремі кадри і проводити їх цифрову обробку. Така система цифрової рентгенографії, яка дозволяє отримувати рентгенівські зображення в реальному часі, називається *рентготелевізійною системою (РТВС)*.

Системи із рентгенівським перетворювачем типу "екран –

об'єктив –ПЗЗ-матриця", маючи невисоку вартість, забезпечують відносну чутливість контролю і роздільну здатність на рівні з плівковою радіографією. Такий перетворювач має переваги перед іншими типами перетворювачів: простота конструкції, відносно невелика вага, можливість змінювати рентгенівський екран і розмір робочого поля [2].

Одним із найважливіших параметрів РТВС є відносна чутливість контролю, який визначається відношенням мінімального розміру дефекту, що виявляється, до товщини об'єкта контролю. Чутливість РТВС з рентгенівським перетворювачем на основі ПЗЗ-камери визначається ефективністю накопичення заряду і шумами. Умовно шуми поділяють на *детерміновані і флуктуаційні*.

Детерміновані складаються з *комутаційних завад* (наприклад, наводки від імпульсних напруг на електродах матриці) і *структурного шуму* (неоднорідностей параметрів елементів сенсора – темного струму, чутливості тощо).

Флуктуаційні шуми являють собою сукупність шумів переносу, темного струму, фонового заряду

(заряду, який необхідний для ефективного перенесення), шумів вхідного і вихідного пристроїв [3].

Рівень шумів ПЗЗ \bar{N} прийнято оцінювати середньоквадратичним числом шумових електронів, що представляють собою середньоквадратичне відхилення числа носіїв в кожному зарядовому пакеті, що переноситься в ПЗЗ.

Темновий струм виникає внаслідок спонтанної генерації носіїв заряду в напівпровіднику фоточутливого сенсора за відсутності освітлення. Флуктуація цього струму в часі створює шум, що може істотно погіршувати якість зображення в системах з використанням накопичення зображення або в умовах слабкого освітлення ПЗЗ-матриці. Темновий струм при тривалій експозиції обмежує динамічний діапазон системи аж до повної засвітки матриці в рентгенівському перетворювачі РТВС.

Темновий струм сильно залежить від абсолютної температури і його рівень зростає зі збільшенням тривалості експозиції. Вважається, що при зменшенні температури на кожні 7–8 °С він зменшується в два рази. Для глибокого охолодження в астрономічних системах використовують азотні кріостати, в яких матриці охолоджуються до –100 °С. В більш простих системах, до яких відносяться РТВС, використовується термоелектронне охолодження на основі елементів Пельтьє, які можуть забезпечити

перепад температури в 70 °С при подачі напруги 5–6 В. Таким чином температура кристалу при кімнатній зовнішній температурі досягає –40 °С, а темновий струм знижується до ~0,1 електрона на піксель за секунду. Ці елементи Пельтьє настільки компактні, що монтуються в один корпус разом із кристалом ПЗЗ.

В цифрових РТВС на основі ПЗЗ-матриці завдяки високій лінійності її характеристики можна запам'ятовувати темновий сигнал, а потім віднімати його з результуючого сигналу. Такий простий алгоритм називається *корекцією темного струму*.

Джерелами шумів переносу є флуктуації зарядів, які захоплюються пастками. Кількість шумових електронів буде максимальною для пакетів, найбільш віддалених від вихідного регістра.

Для РТВС з перетворювачами на основі якісних телевізійних ПЗЗ-камер, в яких низький темновий струм і неефективність переносу складає доли електрона на десять тисяч переносів, домінуючим джерелом шуму в режимі роботи без накопичення зображення буде вихідний пристрій камери. Такий пристрій зазвичай складається з ємності зчитування, діода, скидаючого транзистора і вихідного підсилювача (типовим варіантом є двох- або трьохкаскадний істоковий повторювач з високим вихідним імпедансом). При надходженні скидаючого імпульсу діод

з'єднується з джерелом опорної напруги, після цього транзистор закривається і діод залишається "плаваючим", тобто його потенціал може змінюватися при надходженні до нього заряду, а це відбувається при наступному такті переносу заряду в регістрі. Ця зміна заряду передається на вихід приладу через підсилювач. Така система ключ – конденсатор (транзистор і плаваюча дифузія) призводить до того, що при кожному його розмиканні початковий потенціал ємності (з якої відбувається зчитування) буде різним, що і створює шум. Такий шум називається *установчим*.

Для боротьби із установчим шумом використовуються метод подвійної корельованої вибірки. Якщо попередньо запам'ятати напругу установчого шуму, то її потім можна легко відняти від результуючого сигналу і тим самим повністю придушити установчий шум.

До шумів підсилюючої електроніки можна віднести тепловий шум, дробовий, флікер-шум [4].

Тепловий (або *джонсонівський*) шум – рівноважний шум, який обумовлений тепловим рухом носіїв заряду в провіднику, в результаті чого на його кінцях виникають флуктуації різниці потенціалів. Середній квадрат напруги цього шуму залежить тільки від активного опору і температури зразка.

Дробовий шум пов'язаний з дискретною природою електричного

заряду і обумовлений тим, що при проходженні струму кількість електронів, які перетинають задану ділянку провідника за заданий інтервал часу, завжди дискретна та постійно змінюється в часі. Якщо рух окремих зарядів незалежний, то середній квадрат флуктуацій струму визначається тільки величиною цього струму.

Флікер-шум, його ще називають надлишковим, має сильну частотну залежність спектральної густини, яка часто має вигляд $1/f^\alpha$, де $\alpha \approx 1$. Цей шум проявляється тільки під час протікання струму через зразок. Причинами виникнення надлишкового шуму є процеси генерації–рекомбінації в напівпровіднику (флуктуації концентрації вільних носіїв заряду призводять до флуктуацій провідності зразка), дефекти провідників, поверхневі шуми, шуми від витоку, флуктуації опорів контактів.

Зазвичай конструкція вихідного підсилювача оптимізується для отримання мінімального значення еквівалентного шумового заряду (який ще називають шумом зчитування) для певних умов використання. Для сучасних приладів на частоті порядку 100 кГц типовим значенням шуму зчитування є 3–6 електронів (при охолодженні матриці). В найкращих приладах для наукового застосування досягається значення 1,5 електрони.

Таким чином, флуктуації темного струму і шум зчитування

є основними джерелами власного шуму рентгенівських перетворювачів на основі ПЗЗ-матриць.

Дослідження РТВС проводилися у співпраці з ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. Система являє собою програмно-апаратний комплекс, який складається з рентгенівського апарата "Екстарвольт-350", перетворювача на основі камери Atik 314L+ із ПЗЗ-матрицею Sony ICX-285AL і рентгенівського екрана з оксисульфїду гадолінію товщиною 200 мкм, а також ЕОМ зі спеціальним програмним забезпеченням для подальшої цифрової обробки зображень. Камера Atik 314L+ призначена для астрономічних спостережень, а тому має (як переконає розробник) низький рівень шумів. Варто зазначити, що виробники камер зазвичай не уточнюють всі механізми виникнення шумів в їхніх продуктах, і, вважаючи їх досить

малими, просто вказують значення еквівалентного шумового заряду. Камера оснащена світлосильним об'єктивом Computar M1214-MP2 з малими спотвореннями.

Роботи по дослідженню шумів камери Atik 314L+, які проводилися до цього, були досить поверховими і їх результати не відображали залежність шумів від температури і тривалості накопичення.

Для знаходження шуму зчитування і темного струму була використана методика, описана в [5]. За допомогою розробленої РТВС було отримано темнові кадри (рентгенівський апарат вимкнено, перетворювач знаходився в суцільній темряві) при різній температурі ПЗЗ-матриці, а також набір кадрів з різною тривалістю накопичення. Для камери Atik 314L+ середньоквадратичне відхилення (СКВ) шуму зчитування, заявлене виробником, становить 4 електрони.

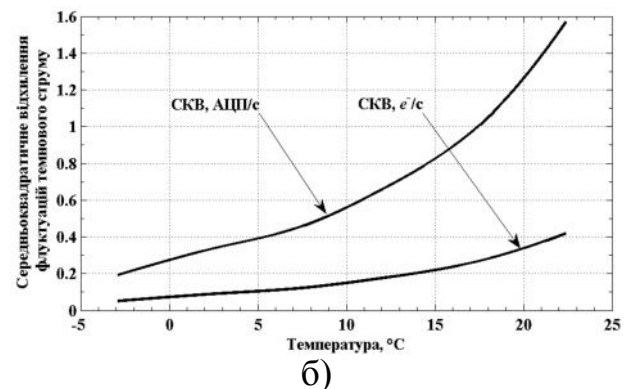
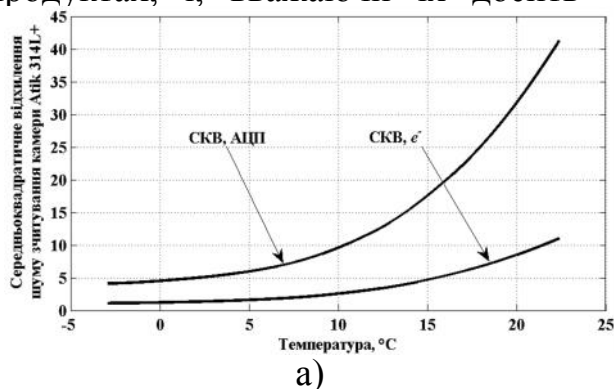


Рис. 1. Залежності від температури: а – шуму зчитування, б – флуктуацій темного струму

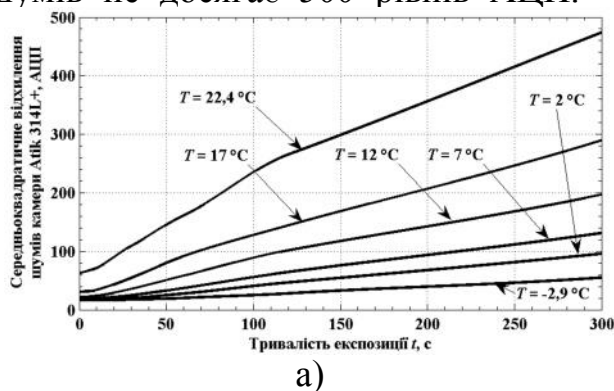
На Рис. 1 приведено залежності СКВ шуму зчитування і флуктуацій темного струму, отримані експериментально.

Не дивлячись на те, що рівень шуму зчитування при кімнатній температурі досягає 10 електронів (Рис. 1, а) (проти 4 електронів,

заявлених виробником), на зображенні даної камери це змінить сигнал менше ніж на 43 рівні АЦП (а у даної камери – 65535 рівнів). Такий низький рівень шуму зчитування не помітно зображенні, якщо над ним не виконувати перетворення контрасту. СКВ флуктуацій темного струму камери при кімнатній температурі складає долю електрона (Рис. 1, б).

Було проаналізовано загальний рівень шумів, що вносяться камерою. На Рис. 2 приведено СКВ шумів в залежності від тривалості накопичення і температури.

При кімнатній температурі і тривалості накопичення 300 с СКВ шумів не досягає 500 рівнів АЦП.



Такий низький рівень шумів є необхідною вимогою до камер для астрономічних спостережень.

На основі результатів, отриманих в ході експериментальних досліджень камери рентгенівського перетворювача РТВС, у програмі MATLAB була створена структура, яка являється результатом двомірної інтерполяції даних. Звертаючись до цієї структури, як до функції температури і тривалості накопичення отримуємо значення СКВ рівня шумів камери Atik 314L+ (Рис. 3).

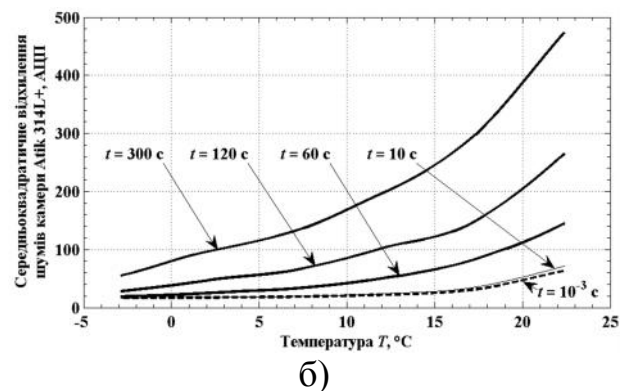


Рис. 2. Залежність рівня шумів камери: а – від тривалості накопичення, б – від температури

Надалі цей результат можна використовувати для моделювання РТВС з власною шумовою складовою перетворювача на основі даної камери.

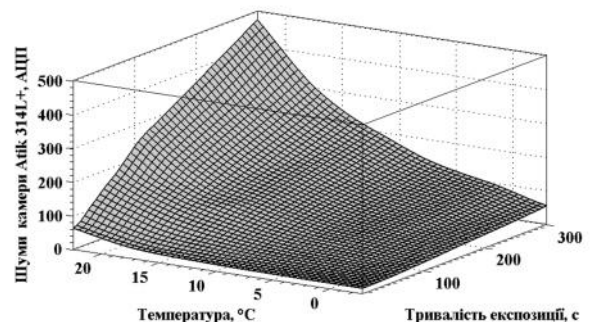


Рис. 3. Рівень шумів камери, двомірна інтерполяція результатів

Висновки

Проведено експериментальні дослідження рівня власних шумів перетворювача рентгенотелевізійної системи типу "екран – об'єктив – ПЗЗ-матриця" на основі камери Atik 314L+, яка призначена для астрономічних спостережень.

Отримані залежності рівня шуму зчитування і флуктуацій темного струму від температури ПЗЗ-матриці. З проведених експериментальних досліджень видно, що шум зчитування, заявлений виробником, відповідає температурі сенсора $T \approx 15^\circ\text{C}$.

Результати досліджень описані у вигляді структури в MATLAB, що дає можливість використовувати їх при моделюванні рентгенотелевізійних систем з даною камерою.

Література

1. Усачев Е.Ю., Валиков В.В., Точинский Е.Г. и др. Комплекс цифровой радиографии для ревизии сварных соединений

действующих трубопроводов, Контроль. Диагностика – 2014, №6, – С. 60-64.

2. Троицкий В.А., Михайлов С.Р., Пастовенский Р.О., Шило Д.С. Современные системы радиационного неразрушающего контроля, Техническая диагностика и неразрушающий контроль – 2015, №1, – С. 23-35.
3. Горбачёв А.А., Коротаев В.В., Ярышев С.Н. Твердотельные фотопреобразователи и камеры на их основе, НИУ ИТМО – 2013, – 98 с.
4. Лебедев А.И. Физика полупроводниковых приборов – ФИЗМАТЛИТ – 2008, – 488 с.
5. Craig Stark. Signal to Noise: Understanding it, measuring it, and improving it. Part 1 – Cloudy Nights – 2009, – 13 p.