

А. Й. Наконечний, Д. М. Мозола
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра комп’ютеризованих систем автоматики

ОЦІНКА ТЕМПЕРАТУРИ ОБ’ЄКТІВ НА ОСНОВІ ЇХ ШУМОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК З ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯМ СИГНАЛІВ

© Наконечний А. Й., Мозола Д. М., 2019

Наведено результати аналізу існуючих типів шумів, які базуються на різних фізичних джерелах виникнення. Показано, що для оцінювання температури найбільш доцільно використовувати тепловий шум. Для підвищення чутливості і точності оцінки таких шумів від зміни температури пропонується використовувати вейвлет-область перетворення сигналів. Робота вимірювальної системи базується на обробленні сигналів у часо-частотній, вейвлет-області.

Ключові слова: тепловий шум, шумові характеристики, вейвлет перетворення.

The article provides a brief analysis of existing types of noises based on various physical sources of origin. It is shown that thermal noise is most appropriate for temperature estimation. To increase the sensitivity and accuracy of the estimation of such noise from temperature changes, it is proposed to use the wavelet area of signal conversion. The measurement system is based on signals processing in the time-frequency area.

Keywords: thermal noise, noise characteristics, wavelet transform

Вступ

Серед існуючих методів вимірювання температури чільне місце займають методи, які базуються на використанні оцінки шумових параметрів сигналів [4, 7]. Основною особливістю таких методів оцінювання температури є використання ефективних підходів до опрацювання сигналів. З огляду на це в роботі коротко проаналізовано і вибрано такі методи, які б могли якісно виділити шумові параметри сигналів, надалі здійснити їх опрацювання й оцінювання. В переважній більшості шумові складові сигналів розглядаються як завади, з якими потрібно боротися різними способами [1, 2]. Однак у цьому випадку їх використовують як корисний, інформативний сигнал, оцінка якого дозволяє судити про температурний стан об’єктів.

Сьогодні ґрунтовно проаналізовано різні види шумів та проведено їх класифікацію, а саме: теплового, дробового, генераційно-рекомбінаційного, флікер шуму, білого, броунівського та ін. [4]. Найцікавіші для цього випадку типи шумів, які мають найбільшу температурну залежність і лінійний характер зміни.

Мета дослідження

Метою цього дослідження є визначення температурозалежних типів шумів та їх опрацювання з використанням нових сучасних технологій обробки, зокрема, вейвлет-області перетворення шумових сигналів.

Аналіз різних типів шумів

Дробовий шум виникає внаслідок дискретної природи електронів. У випадку пропускання електричного струму виникає неоднорідний потік окремих дискретних електронів, що приводить до виникнення цього шуму.

Оцінюється дробовий шум таким виразом [4]:

$$i_n^2 = 2qif, \quad (1)$$

де q – заряд електрона; i – середня сила струму (включаючи фоновий струм і струм сигналу); f – ширина частотної смуги.

З виразу (1) випливає, що дробовий шум зростає із зростанням струму і ширини частотної смуги. Отже, його інтенсивність не збільшується зі зростанням температури.

Генераційно-рекомбінаційний шум викликаний генерацією та рекомбінацією носіїв струму в напівпровідниках: електронів і дірок, концентрація яких флюктує у напівпровіднику [1]. З іншого боку, такий шум можна розглядати як дробовий, оскільки процеси генерації і рекомбінації можна розглядати як послідовність незалежних випадкових подій. Відомо, що зі збільшенням частоти сигналу амплітуда шуму зменшується до нуля [1], а його рівень не залежить від температури.

Поряд з шумами, що мають широкий рівномірний частотний спектр, у напівпровідникових приладах спостерігається шум, спектр потужності якого обернено пропорційний частоті f . Такого роду шуми належать до *флікер-шумів* (рожевий шум) внаслідок наявності ефекту мерехтіння [3]. Будь-який схемний елемент в електричному колі під впливом напруги джерела постійного струму або сильного сигналу змінного струму може генерувати флікер-шум. Інтенсивним джерелом такого шуму є контактний опір. Шум може виникати у спаяних, кручених або зварних з'єднаннях, і такі сполучення можуть перебувати всередині самих елементів кола. Джерелом шуму типу ефекту мерехтіння в напівпровідникових приладах є безперервні імовірнісні зміни внутрішньої структури – локальної перебудови провідних каналів всередині напівпровідника при проходженні через нього струму. В результаті цього відбувається хаотична модуляція опору, що призводить до флуктуації струму.

У флікер-шуму спектральна щільність зменшується зі зменшенням частоти. З огляду на це його ще називають $1/f$ шумом. Рожевий шум виявляється в серцевих ритмах, у електромагнітному випромінюванні космічних тіл. Дослідження показують, що рівень такого виду шуму практично не залежить від рівня температури.

Характерною особливістю *білого шуму* (постійний шум) є те, що його спектральні складові рівномірно розподілені у всьому діапазоні частот [5]. З огляду на це білий шум використовується для вимірювання частотних характеристик різних лінійних динамічних систем, таких як підсилювачі, електронні фільтри, дискретні системи керування. Інтенсивність такого шуму від зміни температури практично не змінюється.

Реально в природі ідеальний білий шум, тобто з однаковою спектральною потужністю на всіх частотах, не зустрічається, оскільки він би мав нескінченну потужність, однак білим шумом вважають будь-який шум, спектральна щільність якого однакова (або майже однакова) у заданому діапазоні частот.

Низькочастотний *Броунівський (червоний) шум* відтворює броунівський рух [3]. Спектральна густина такого шуму пропорційна до $1/f^2$ (f – частота сигналу), що означає: на низьких частотах шум досягає максимальної енергії, навіть більшої, ніж рожевий шум. Частотна залежність енергії шуму падає: 6 децибел на октаву.

Найзацікавішим в нашому випадку є аналіз *теплового шуму* [4, 7]. Відомо, що електрони у резисторі володіють тепловою енергією і переміщуються в матеріалі випадковим чином, одержуючи в процесі руху зіткнення з атомами кристала. Такі випадкові рухи спричиняють тепловий шум. Флуктуації, які при цьому виникають, можна пояснити як результат дуже великого числа незалежних випадкових “подій”. Явище, що виникає з подій, приводить до виникнення імпульсу струму або напруги на затискачах, а суперпозиція всіх таких імпульсів представляє

флуктуацію теплового шуму [3]. Відповідно до цієї моделі, тепловий шум є прикладом послідовності випадкових імпульсів.

Враховуючи закон збереження енергії, електричну енергію, пов'язану з одиничним імпульсом флуктуаційного струму, можна подати у вигляді [3]:

$$\frac{D\bar{U}^2}{R}t \gg kT, \quad (2)$$

де t – тривалість імпульса флуктуації; k – постійна Больцмана; T – абсолютна температура кола; R – опір кола.

З теорії електричних кіл відомо, що між тривалістю імпульсу Dt і шириною його спектра Df існує таке співвідношення:

$$DtDf \sim 1 \quad (3)$$

Враховуючи вирази (2) і (3), середнє значення квадрата флуктуаційної напруги $D\bar{U}^2$ можна записати у вигляді: $kTRDf$

$$D\bar{U}^2 \sim kTRDf. \quad (4)$$

Аналогічно отримується вираз для середнього значення квадрата флуктуаційного струму:

$$\frac{D\bar{I}^2}{R} \sim kTDf/R. \quad (5)$$

Отже, флуктуації струму в колі тим менші, чим більше значення опору і нижча температура. В процесі аналізу теплових шумів у електричних колах Найквістом було доведено, що значення температури залежатиме від середньоквадратичного значення (СКЗ) шумової напруги сигналу $D\bar{U}^2$, значення опору первинного перетворювача R і ширини частотної смуги Df [4]

$$T = \frac{D\bar{U}^2}{4kDfR}. \quad (6)$$

У цьому випадку похибка вимірювання температури залежатиме від похибки оцінки СКЗ шумової напруги d_U , похибки частотної смуги d_{Df} і похибки первинного перетворювача d_R , тобто

$$dT = d_U + d_{Df} + d_R. \quad (7)$$

Похибка первинного перетворювача, її значення, залежність і складові детально проаналізовано в роботах [4, 5]. Складові похибки обчислення СКЗ напруги та похибки частотної смуги можуть бути суттєво зменшені у випадку використання вейвлет-перетворення для опрацювання сигналів.

Результати дослідження залежності СКЗ напруги теплового шуму від температури в діапазоні температур 0–150 °C наведено на рис. 1.

Оскільки вихідний сигнал давача має низький рівень, то в цьому випадку постає задача суттєвого його підсилення, що, своєю чергою, потребує дослідження та вибору низькошумових підсилювачів напруги.

Проаналізувавши вищенаведені типи шумів, можна стверджувати, що найбільше залежить від температури тепловий шум.

Оцінка значень теплового шуму на основі вимірювання його СКЗ напруги є недостатньо вивченою. З огляду на це для подальших досліджень пропонується шумовий метод вимірювання температури, який базується на використанні вейвлет-перетворення інформативних сигналів.

Опрацювання теплових шумових сигналів у вейвлет-області

Методи, в яких використовують вейвлет-перетворення сигналів, забезпечують одночасне представлення сигналів як у частотній, так і в часовій областях [6]. Алгоритми, якими реалізуються

вейвлет-перетворення, відзначаються великою швидкістю та простотою апаратної і програмної реалізації. Багато функцій можна представити за допомогою вейвлет-функцій у компактнішому вигляді. Зокрема, неперіодичні, нестационарні, перервні функції, функції з гострими піками, швидкоплинні функції. Вони зазвичай потребують істотно простіших аналітичних виразів та моделей їх опису. Саме такі властивості роблять вейвлет-перетворення чудовим інструментом в багатьох областях застосування.

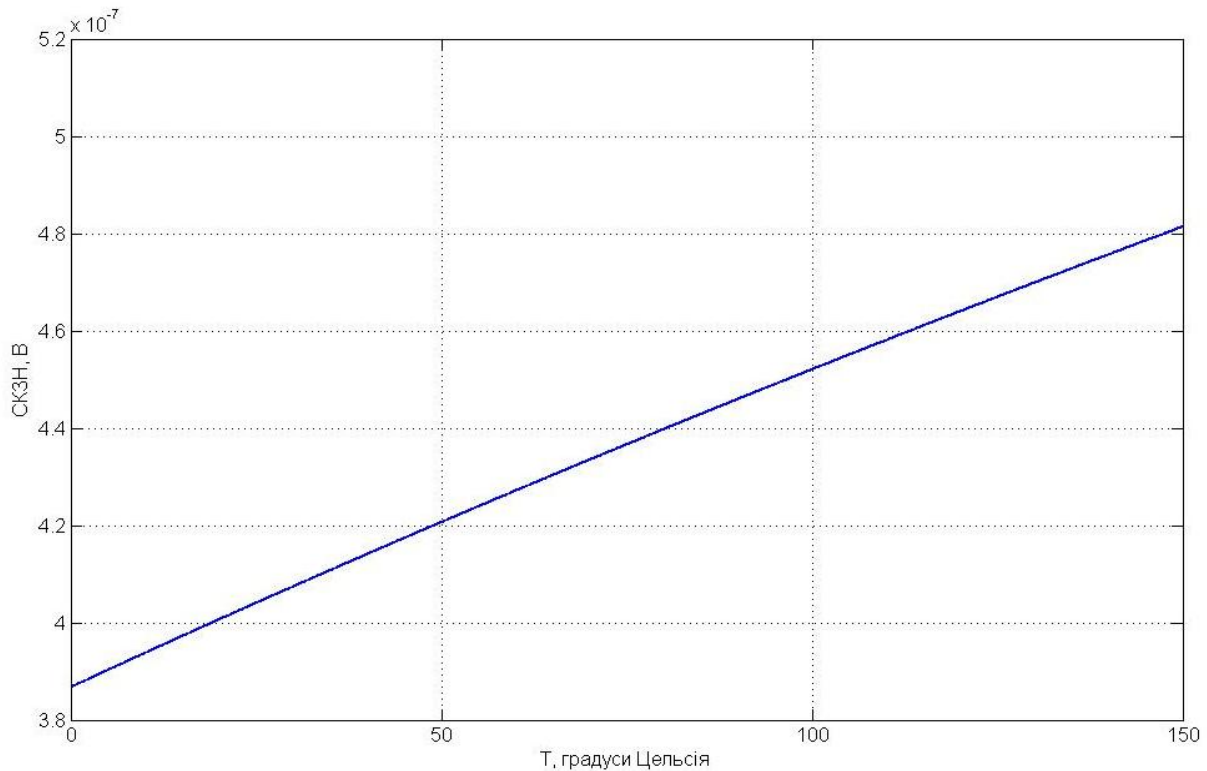


Рис. 1. Залежність СКЗ напруги від температури в діапазоні температур (0–150) $^{\circ}\text{C}$

Важливою особливістю подання сигналів у вейвлет-області є те, що таке представлення сигналів має енергетичний зміст, а отже, зашумлені дані можуть бути легко і швидко відфільтровані відкиданням сигналів низького рівня і при цьому немає необхідності знати апіорну інформацію про сигнал [6]. З іншого боку, коли шумові сигнали мають енергетичний зміст, їх можна ефективно виділити, а їхнє енергетичне наповнення може слугувати, в нашому випадку, оцінкою температури.

Структурну схему шумового методу вимірювання температури на основі вейвлет опрацювання сигналів наведено на рис. 2.

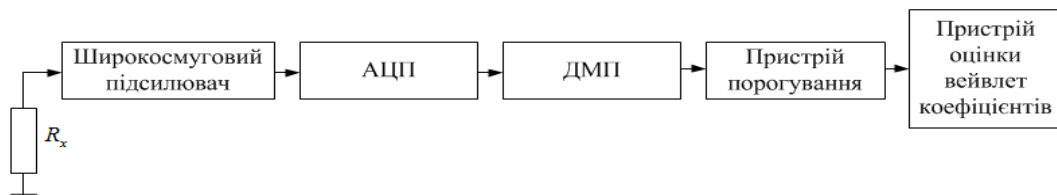


Рис. 2. Структура шумового методу вимірювання температури на основі вейвлет-опрацювання сигналів

Робота схеми передбачає виконання певних операцій. Початково сигнал з первинного перетворювача R_x , який перебуває під впливом температури T , подається на вхід широкопasmового підсилювача напруги. Останній вибирається за умови наявності низьких шумових характеристик. Вихідний сигнал з підсилювача подається на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), де відбувається дискретизація та квантування сигналу. У блоці дискретного малошвиного вейвлет-перетворення (ДМП) здійснюється перетворення над дискретними значеннями вхідного сигналу за допомогою базових та масштабуючих функцій. Цей блок дозволяє реалізувати перехід від часового представлення сигналу до часочастотного. З виходу ДМП вихідний сигнал у вигляді вейвлет-коефіцієнтів усіх рівнів розкладу подається на вхід пристрою порогоування, де відбувається обнулення малозначущих вейвлет коефіцієнтів (рівень порогоування задається користувачем), що, своєю чергою, приводить до збільшення швидкодії опрацювання шумового сигналу і зміни рівня точності оцінки температури. У пристрої оцінювання вейвлет-коефіцієнтів здійснюється сумування вейвлет-коефіцієнтів усіх рівнів розкладу та остаточне сумування протягом фіксованого часу.

Оскільки вейвлет-коефіцієнти мають енергетичний зміст, то зміна температури резистивного перетворювача буде пропорційна до зміни енергії.

Отже, не проводячи оберненого перетворення (з часочастотної області у часову) здійснюється безпосередня оцінка температури об'єкта.

Результати комп'ютерного моделювання

Проведено комп'ютерне моделювання СКЗ напруги теплового шуму з подальшим його обробленням у часочастотній вейвлет-області. Рівень СКЗ напруги теплового шуму відповідав зміні температури від 0 до 150 °С. При опрацюванні сигналу використовувалося дискретне вейвлет-перетворення (чотири рівні розкладу), яке було реалізоване за допомогою поетапного (ліфтингового) алгоритму. В процесі перетворення використані ортогональні базові функції Добеші 6-го порядку (db6) [6]. На рис. 3 наведено вейвлет-коефіцієнти чотирьох рівнів розкладу, які представляють сумарну енергію шумового сигналу.

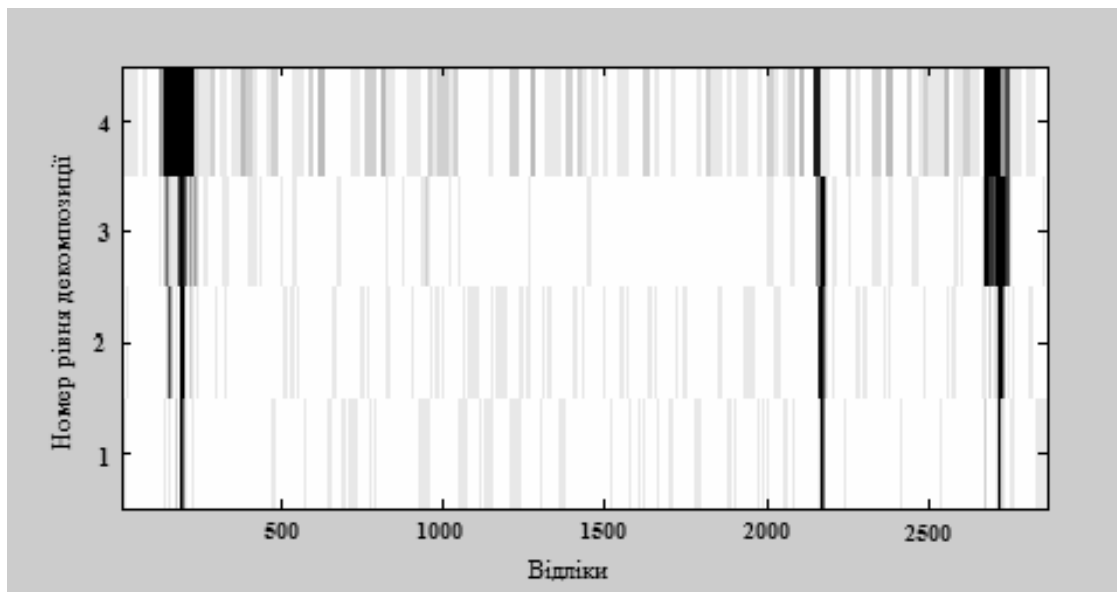


Рис. 3. Вейвлет-шкалограма 4-х рівнів розкладу шумового сигналу з використанням базових функцій Добеші 6-го порядку

Висновки

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки.

Оскільки СКЗ напруги теплового шуму рівномірно розподілене у широкій смузі частот, то ефективним апаратом для аналізу такого шуму є вейвлет-перетворення.

Вейвлет-перетворення, на відміну від перетворення Фур'є, дає можливість працювати зі сигналами низького рівня і так, дозволяє якісно виділяти шумові сигнали.

Оскільки вейвлет-коефіцієнти мають енергетичний зміст, то зміна температури резистивного перетворювача пропорційна зміні енергії. Похибка вимірювання температури при цьому не перевищує $0,5^{\circ}\text{C}$.

Оцінюють температуру об'єкта безпосередньо у вейвлет-області без необхідності використовувати обернене перетворення.

Список використаної літератури

1. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах / пер. с англ. М.: Мир, 1986. 400 с.
2. Ван дер Зил Альдерт. Шумы при измерениях / пер. с англ.; под. ред. А. К. Нарышкина. М.: Мир, 1979. 293 с.
3. Ван дер Зил Альдерт. Флуктуации в радиотехнике и физике / пер. с англ. под ред. Л. С. Гуткина. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1958. 296 с.
4. Микитин І. П. Вимірювання температури шумовими методами. Теорія і практика: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» // Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2009. 42 с.
5. Микитин І. П. Засоби та методика дослідження шумових сигналів І. П. Микитин, Б. І. Стадник // Вимірювальна техніка та метрологія. 2008. № 68. С. 14–20.
6. Наконечний А. Й. Цифрова обробка сигналів: навч. посібник / А. Й. Наконечний, Р. А. Наконечний, В. А. Павлюш. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2010. 368 с.
7. Саватаев А. В. Шумовая термометрия / А. В. Саватаев – Л.: Энергоатомиздат, 1987. 132 с.

References

1. Bukynhem M. Shumy v elektronnykh priborakh i sistemakh / Per. s anhl. M.: Mir, 1986. 400 s.
2. Van der Zil Aldert. Shumy pri izmerenyakh / Per. s anhl. pod. red. A. K. Naryshkina. M.: Mir, 1979. 293 s.
3. Van der Zil Aldert. Fluktuatsii v radiotekhnike i fizike / Per. s anhl. pod red. L. S. Hutkina. Moskva ; Leninhgrad: Hosenerhoizdat, 1958. – 296 s.
4. Mykytyn, I. P. Vymiriuvannia temperatury shumovymy metodamy. Teoriia i praktyka: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: spets. 05.11.04 «Prylady ta metody vymiriuvannia teplovykh velychyn». Natsionalnyi universytet «Lvivska politekhnikha». Lviv, 2009.– 42 s.
5. Mykytyn I. P. Zasoby ta metodyka doslidzhennia shumovykh syhnaliv I. P. Mykytyn, B. I. Stadnyk // Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia. 2008. № 68. S. 14-20.
6. Nakonechnyi A. I. Tsyfrova obrobka syhnaliv: navch. posibnyk /Nakonechnyi A. I. Nakonechnyi R. A., Pavlysh V. A. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekh-niky, 2010. 368 s.
7. Savatayev A. V. Shumovaia termometriya / A. V. Savatayev. L.: Enerhoa-tomizdat. Lenynhr. Otd., 1987. 132 s.