

## ФЛІКЕР-СКЛАДОВА ІНТЕНСИВНОСТІ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКУ

© Денко П., 2008

**Зроблено спробу застосувати флікер-шум для аналізу організації дорожнього руху на вулицях міста. Створено комп'ютерну модель і проведено аналіз руху транспортних засобів з метою дослідження залежності флікер-шуму від способу організації дорожнього руху.**

**An attempt to use flicker-noise for analysis of traffic organization on the streets of city is made. A computer model is created and the analysis of vehicles motion is conducted with the purpose of investigating the dependence of flicker-noise on the methods of traffic organization.**

### Постановка задачі

Інформаційна насиченість шумових сигналів (шумів) викликає дедалі більшу зацікавленість серед спеціалістів. Це пояснюється не тільки поширеністю шумів в електричних системах, а і тим, що зміна будь-якого параметра реальної системи в часі може бути подана у вигляді випадкових відхилень від номінального значення, тобто у підсумку має вигляд шуму: зміна температури і тиску доквілля, зміна інтенсивності електромагнітних і акустичних сигналів, швидкість хімічних перетворень, інтенсивність руху міського транспорту тощо. Запропоновано навіть метод діагностики еволюції системи за її власними шумами.

Основними параметрами шумового сигналу, аналізуючи які можна отримати інформацію про процеси, що відбуваються у системі, – це спектральна густина флуктуацій  $S(f)$  та автокореляційна функція  $R(\tau)$ . Зокрема, якщо спектральна густина  $S(f)$  є однаковою в усьому діапазоні частот від 0 до  $\infty$  ( $S(f)=const$ ), то в системі не відбувається ніяких кардинальних змін. Тобто система знаходиться у стані термодинамічної рівноваги. У цьому випадку автокореляційна функція дорівнює нулю в усьому часовому інтервалі, окрім  $\Delta\tau=0$ , в якому  $R(\tau)\rightarrow\infty$ . Якщо  $S(f)\neq const$  у всьому частотному діапазоні, то у системі відбуваються зміни, які можна вивчати, аналізуючи  $S(f)$  і  $R(\tau)$ .

**Мета роботи** – проаналізувати інтенсивність руху транспортних засобів, а також перевірити її залежність від способу організації дорожнього руху. Зокрема цікавим є вплив на характер інтенсивності руху автомобілів світлофорів, спосіб їх розташування і режим роботи.

Оскільки кількість транспортних засобів на дорозі за одиницю часу загалом є числом випадковим, отже, інтенсивність руху транспортного потоку має вигляд шумового сигналу.

Метою проведених досліджень був аналіз інтенсивності руху транспортних засобів, на основі якого можна було б виробити критерій такого способу організації руху автомобілів, за якого імовірність «заторів» на дорозі є мінімальною. За критерій мінімальної імовірності заторів було прийнято  $S(f)=const$ , тобто кількість транспортних засобів на дорозі за одиницю часу не залежить від тривалості спостереження.

Оскільки пряме дослідження провести доволі складно, а змінювати режими роботи світлофорів практично неможливо, було створено комп'ютерну модель руху транспортних засобів по прямій дорозі, на якій встановлені пішохідні світлофори.

### Опис моделі

Основною вимогою до моделі була можливість в довільний спосіб розміщувати і задавати параметри та режими роботи світлофорів, таких як: час зеленого світла (рух автомобілів), час червоного світла (рух пішоходів), спосіб синхронізації між світлофорами тощо.

Створена модель дороги – це імітація руху транспортних засобів в одному напрямку. Довжину дороги  $Sf$  можна задавати у метрах довільно.

Швидкість руху кожного транспортного засобу є різною для кожного автомобіля і визначається як сума заданої мінімальної швидкості  $Vc$  на цій дорозі плюс деякий випадковий приріст від 0 до  $\Delta Vc$ . Приріст швидкості має нормальний закон розподілу. Під час руху швидкість автомобіля не змінюється.

Автомобілі в'їжджають на дорогу один за другим через певний час затримки, що дорівнює мінімальному часові затримки  $tz$  плюс деякий випадковий приріст  $\Delta tz$  з нормальним законом розподілу.

Кількість транспортних засобів, що в'їжджають у цей момент часу, дорівнює прийнятій мінімальній кількості  $Km$  плюс випадковий приріст від 0 до  $Km$ , що також має нормальний закон розподілу.

Отже, створена модель дороги, по якій рухаються автомобілі з різною швидкістю  $Vc + \Delta Vc$ , що можуть випереджати один одного. Дорога починається перехрестям зі світлофором, який через фіксовані проміжки часу  $tz + \Delta tz$  пропускає випадкову кількість транспортних засобів  $Km + \Delta Km$ .

Упродовж заданого часу експерименту  $Tv$  через кожну секунду фіксується кількість автомобілів  $a_i$ , які пересікли кінець дороги у цей момент часу. На підставі отриманих даних визначається автокореляційна функція  $R_i$ :

$$R_i = \frac{1}{N \cdot D} \sum_{j=i}^{N-1} (a_j - \bar{a}) \cdot (a_{j-i} - \bar{a}), \quad (1)$$

де  $\bar{a}$  – середнє значення кількості автомобілів;  $N$  – загальна кількість транспортних засобів;  $D$  – дисперсія.

Спектральна густина (енергетичний спектр)  $S(f)$  визначалась за розрахованою кореляційною функцією за формулою

$$S(f)_i = D \cdot \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} R_k \cdot e^{-j \cdot k \cdot i \cdot 2 \cdot \frac{\pi}{N}}. \quad (2)$$

У довільній точці дороги можна встановити світлофор, який затримує автомобілі на заданий інтервал часу  $tn$  (час руху пішоходів) і пропускає їх упродовж визначеного часу  $ta$  (час руху автомобілів). Цей процес є циклічним.

Важливим моментом є можливість моделювати різні режими роботи світлофорів, такі як: хаотичний, синфазний, протифазний. А також створювати ефекти «зеленої хвилі» («червоної хвилі») для автомобілів, що рухаються з рекомендованою (небажаною) швидкістю для цієї дороги.

### Результати моделювання

Моделювання проводилось на дорозі завдовжки  $Sf = 5000$  м (5 км), на яку в середньому в'їжджає від 3 до 15 автомобілів ( $Km = 3$ ;  $\Delta Km = 12$ ) з затримкою від 10 до 40 с ( $tz = 10$ ;  $\Delta tz = 30$ ). Швидкість транспортних засобів лежить в межах від 25 до 90 км/год ( $Vc = 7$ ;  $\Delta Vc = 25$ ).

Упродовж однієї години ( $Tv = 3600$ ) через кожну секунду визначалась кількість автомобілів, що досягли кінця дороги у цей момент часу.

Моделювання було поділене на три етапи: рух транспортних засобів на дорозі без світлофорів, на дорозі з одним світлофором і на дорозі з багатьма (трьома) світлофорами.

За відсутності світлофорів енергетичний спектр руху автомобілів є рівномірним (рис. 1).

Це добре узгоджується з вихідними даними моделювання. Оскільки розподіл швидкості і кількості транспортних засобів є нормальним, то енергетичний спектр має вигляд білого шуму, що підтверджує адекватність створеної моделі.

Наступним кроком експерименту було встановлення одного світлофора на середині дороги. На рис. 2 показано отримані енергетичні спектри за різних співвідношень часів руху пішоходів і автомобілів (12/120; 60/60; 120/12).

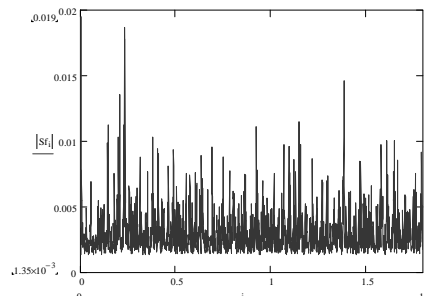


Рис. 1. Енергетичний спектр на дорозі без світлофорів

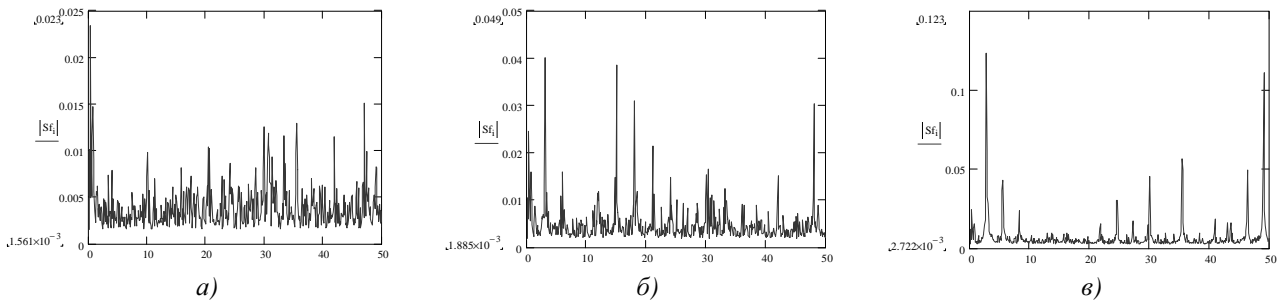


Рис. 2. Енергетичні спектри на дорозі з одним світлофором за різного співвідношення  $tn/ta$ : а –  $tn/ta = 12/120$ ; б –  $tn/ta = 60/60$ ; в –  $tn/ta = 120/12$

Насамперед слід відмітити зростання рівня спектральних складових в області низьких частот на усіх енергетичних спектрах, яке прийнято називати флікер-складовою спектра.

При цьому, чим менше співвідношення  $tn/ta$ , тим менший рівень спектральних складових, а спектри більше наближаються до спектра білого шуму (зростання спектральних складових зміщується в область нижчих частот і іде крутіше), внаслідок чого імовірність виникнення заторів є меншою.

При наближенні світлофора до фінішу ( $Sc=4750$ ;  $tn/ta = 12/120$ ) рівень спектральних складових незначно зростає за загального збереження форми спектра (рис. 3).

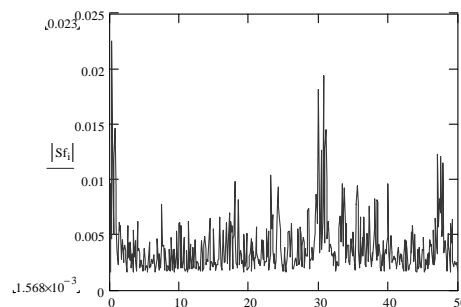


Рис. 3. Енергетичний спектр на дорозі з одним світлофором, що розташований біля фінішу

Встановлення трьох світлофорів створює велику кількість можливих варіантів їх сумісної роботи. На рис. 4 зображені енергетичні спектри за наявності трьох рівномірно розміщених на дорозі світлофорів за співвідношення  $tn/ta$ , що дорівнює  $12/120$  і  $120/12$ .

За малого значення співвідношення  $tn/ta$  спектр (рис. 4, а) має різке зростання в області низьких частот і за формою наближається до спектра з одним світлофором. За співвідношення  $tn/ta = 10$  значно зростає рівень спектральних складових, а підйом спектра починається з вищих частот (рис. 4, б).

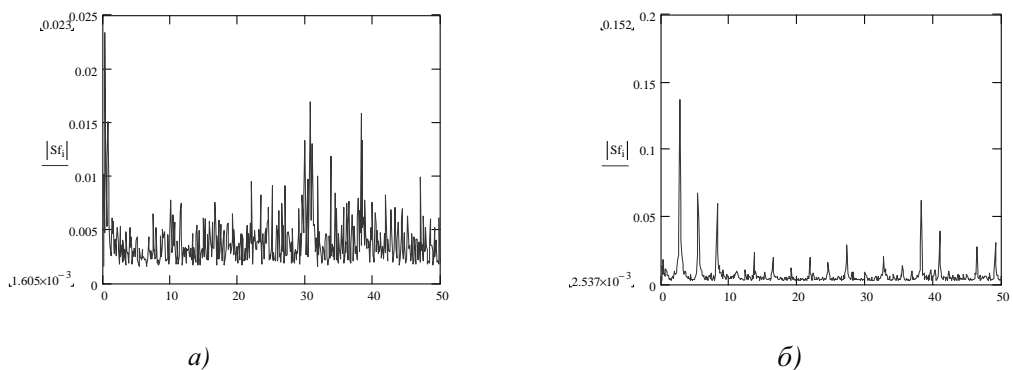


Рис. 4. Енергетичні спектри на дорозі з трьома світлофорами за різного співвідношення  $tn/ta$ :  
 а –  $tn/ta = 12/120$ ; б –  $tn/ta = 120/12$

На рис. 5 зображені енергетичні спектри за співвідношення часу руху пішоходів до часу руху автомобілів, що дорівнює один одному ( $tn/ta = 1/1$ ) за синфазного (рис. 5, а) і протифазного (рис. 5, б) режиму роботи світлофорів.

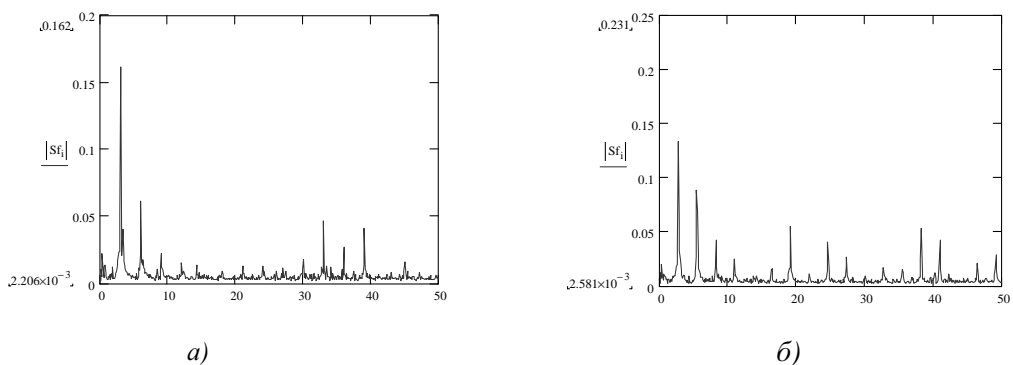


Рис. 5. Енергетичні спектри на дорозі з трьома світлофорами за різного способу їх синхронізації: а –  $tn/ta = 60/60$  синфазно; б –  $tn/ta = 60/60$  протифазно

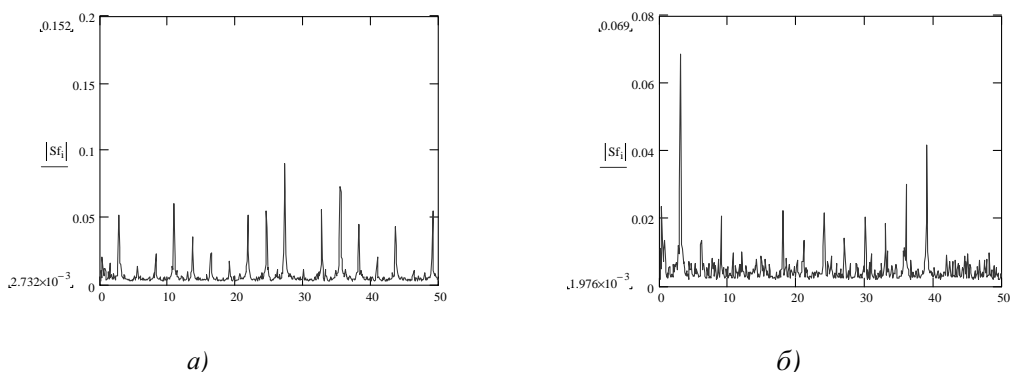


Рис. 6. Енергетичні спектри на дорозі з трьома світлофорами за різного способу їх синхронізації: а – «зелена хвиля»; б – «червона хвиля»

Обидва режими мають значний підйом в області низьких частот з сумірним рівнем спектральних складових. Однак в протифазному режимі крутизна спектра менша (зростання рівня енергетичних складових в області НЧ відбувається швидше).

Цікавим режимом роботи світлофорів є режим «зеленої хвилі» для автомобілів, що рухаються з рекомендованою для цієї дороги швидкістю. Такий режим можна отримати, узгодивши роботу світлофорів між собою так, щоб момент включення зеленого світла дорівнював  $t_3 = L/Vc$  (де  $L$  – відстань між світлофорами;  $Vc$  – рекомендована для цієї дороги швидкість).

На рис. 6 зображено енергетичні спектри, що відповідають режиму «зеленої хвилі» (рис. 6, а) і «червоної хвилі» (рис. 6, б).

Створення режиму «зеленої хвилі» робить спектр рівномірним (наближається до спектра білого шуму) з піками в усьому діапазоні частот (рис. 6, а). Їх виникнення спричиняють транспортні засоби, що рухаються зі швидкістю відмінною від рекомендованої.

Для режиму «червоної хвилі» також характерні піки в усьому діапазоні частот, однак існує значний підйом рівня спектральних складових в області низьких частот (рис. 6, б). Отримані піки є наслідком руху автомобілів, що пересуваються з рекомендованою швидкістю, яких є більшість.

### Висновок

Досліджено різні способи організації дорожнього руху (різні способи узгодження роботи світлофорів). Було встановлено вплив способу організації дорожнього руху на флікер-складову енергетичного спектра інтенсивності руху транспортного потоку. Причому виявлено, що чим гірше узгоджена між собою робота світлофорів (чим гірша організація дорожнього руху), тим нерівномірніший спектр ( $S(f) \neq const$ ) зі значними піками в області низьких частот. Критерієм мінімальної імовірності заторів на дорозі може бути рівномірність інтенсивності руху автомобілів (див. рис. 1).

Однією з характеристик якості організації дорожнього руху може бути крутизна отриманого спектра в області НЧ. Наявність пологого підйому рівня спектральних складових в низькочастотній області свідчить про погану узгодженість світлофорів на досліджуваній ділянці дороги.

Отримані результати досліджень вказують на те, що оптимальним способом роботи світлофорів для рівномірного і плавного руху транспортних засобів є режим «зеленої хвилі». Про це свідчить отриманий спектр (рис. 6, а), форма якого наближається до спектра білого шуму ( $S(f) \rightarrow const$ ). Цей режим майже не впливає на автомобілі, що рухаються з рекомендованою (дозволеною) швидкістю, і змушує змінити швидкість тих автомобілів, що не дотримуються вимог дорожнього руху. Тобто кількість транспортних засобів, що рухаються з рекомендованою швидкістю, на дорозі в одиницю часу не залежить від тривалості спостереження.

1. Стадник Б., Колодій З., Денко П. Інформаційна сутність флікер-шуму // *Miesiecznik naukowo-techniczny „Pomiary automatyka kontrola”*. – 2006. – № 12. – С. 53–55. 2. Колодій З., Стадник Б., Бардила Т., Саноцький Ю., Колодій А. Флуктуації та їх комп’ютерне моделювання // *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Вимірювальна техніка та метрологія»*. – 2005. – Вип. 65. – С.11–19.