

УДК 628.517:519.24

А.В. Статкус, О.С. Сергієнко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ АДАПТИВНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ АКУСТИЧНОГО ШУМУ РЕЙКОВОГО ТРАНСПОРТУ

На ґрунті статистичного аналізу реалізації акустичного шуму рейкового (залізничного та метрополітену) транспорту розроблена його модель як ергодичного нормального центрованого локально-стаціонарного випадкового процесу та отримані чисельні оцінки інтервалів локальної стаціонарності. Створена узгоджена з моделлю акустичного шуму імітаційна модель адаптивного компенсатору акустичних перешок, виконані її дослідження та отримані оцінки характеристик придушення шуму. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що розроблена система компенсації реального шуму суттєво зменшує його рівень та може використовуватись для індивідуального захисту пасажирів і персоналу у потягах залізниці та метрополітену.

Ключові слова: шум рейкового транспорту, інтервал кореляції, локально стаціонарний випадковий процес, адаптивна фільтрація, імітаційне моделювання.

Вступ

Шум часто називали чумою двадцятого століття. Проблема надмірного шуму залишається не менш актуальною і сьогодні, оскільки він є потужним стресоутворюючим фактором. Існує думка, що більше 30% всіх захворювань у мешканців сучасних міст пов'язані з тривалим впливом інтенсивного шуму: підвищена стомлюваність та дратівливість, головний біль, підвищений кров'яний тиск, виразка шлунка, погіршення пам'яті, нервово-психічні захворювання, ослаблення слуху та інші. Вплив шуму при керуванні машинами, механізмами та процесами призводить до зниження уваги та реакції, що спричиняє суттєве підвищення вірогідності помилок, аварій та інших надзвичайних ситуацій. За рекомендаціями Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) норма шуму в навколишньому середовищі обмежена значенням 55 дБА. При рівнях шуму понад 80 дБА кожне збільшення його на 1-2 дБА викликає зниження продуктивності праці не менше ніж на 1%. Економічні втрати від підвищеного шуму в розвинених країнах досягають десятків мільярдів доларів на рік [1]. Кошти, що виділяються на всі заходи по боротьбі з шумом, тільки для країн ЄС становили в кінці ХХ ст. 38-40 млрд. євро на рік, або майже 1% ВВП. Це не дивно, якщо врахувати, що, наприклад, вартість встановлення акустичного екрана довжиною в 1 км в середньому перевищує 1 млн. доларів.

Далеко не завжди вдається досягти комфортного рівня шуму 55 дБА. Одним з потужних джерел акустичного шуму антропогенного походження є транспорт взагалі та рейковий транспорт зокрема [2]. Найвищий рівень шуму залежить від багатьох причин та становить: у вагоні приміських та міжміських потягів 55-70 дБА, у вагоні метро 70-90 дБА

[2]. В цих умовах зменшення рівня шуму на сучасному рейковому транспорті є актуальним науково-технічним завданням. Його вирішення може бути досягнуто застосуванням всіх можливих засобів. Важливими факторами зниження рівня шуму є загальна якість та технічний стан рейкового полотна, рухомого складу, та звукоізоляції, а також різноманітні засоби захисту від шуму, а саме пасивні поглиначі й відбивачі шуму та активні компенсатори акустичного шуму [3, 4]. Оптимальним має бути комбінований варіант з активними і пасивними елементами зменшення шуму.

Метою роботи є оцінка можливостей адаптивної компенсації акустичного шуму у вагоні залізничного транспорту та метрополітену для індивідуального захисту від шкідливого впливу надмірного акустичного шуму.

Решта статті організована наступним чином. В першому розділі формулюється постановка завдання дослідження. В другому розділі наведені результати обробки записів акустичного шуму як реалізацій випадкового процесу. В третьому розділі викладається методика та результати визначення часу стаціонарності акустичного транспортного шуму. Якість придушення шуму за допомогою імітаційної моделі адаптивного компенсатору оцінюється в четвертому розділі. На закінчення в п'ятому розділі пропонуються висновки та визначаються напрями подальших досліджень.

1. Постановка завдання

В статті підлягає дослідженню процес активної компенсації акустичного шуму рейкового транспорту типовими адаптивними фільтрами.

На вході досліджуваних пристроїв діє адитивна суміш шуму та корисного сигналу. У якості шуму

використовуються записи реалізацій акустичного шуму в вагонах рейкового транспорту, а корисним сигналом є фрагменти мовного сигналу та музичних творів. Дослідження виконується шляхом імітаційного моделювання процесу адаптивної компенсації з метою оцінки ступеня придушення шуму та визначення відповідності залишкового рівня акустичного шуму рекомендаціям ВООЗ.

2. Статистичний аналіз акустичного шуму рейкового транспорту

Статистичні властивості перешкоди значною мірою впливають на структуру компенсатора перешкод і потенційну якість компенсації. Тому дослідження можливостей активної компенсації акустичного транспортного шуму слід починати з аналізу властивостей відповідного типу шуму.

Вихідні дані для досліджень отримані всередині вагону метрополітену, а також у приміських електропотягах м. Харкова на висоті 1,2 м від полу в різних точках вагону за допомогою цифрового диктофону з частотою дискретизації 16 кГц та 16-бітним кодуванням при рівномірному квантуванні [5].

Безпосереднім об'єктом статистичного аналізу накопичених реалізацій шуму були одновимірний розподіл миттєвих значень шуму, форма автокореляційної функції (КФ) і числові характеристики випадкового процесу (ВП), такі як математичне сподівання і дисперсія.

Всі записи були поділені на фрагменти тривалістю 0,125 с (2048 відліків) з частковим перекриттям і піддано статистичному аналізу. Для аналізу та апроксимації отриманих даних застосовувалися засоби Statistics та Curve Fitting Tool пакету MATLAB.

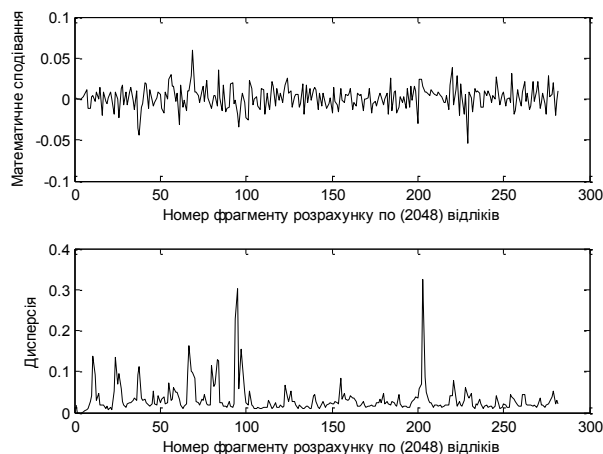


Рис. 1. Часові залежності математичного сподівання та дисперсії акустичного шуму

Встановлено, що шум у вагонах потягів та метро має нормальний закон розподілу

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu_0)^2}{2\sigma_0^2}}, \quad (1)$$

де μ_0 – математичне сподівання, σ_0^2 – дисперсія, ефективні оцінки яких мають вигляд:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2, \quad (3)$$

де N – кількість даних, які треба проаналізувати, x_i – певне значення елемента у послідовності з N елементів.

Приклади математичного сподівання та дисперсії реалізацій шумового процесу як функції часу $\mu = \mu(t)$, $\sigma^2 = \sigma^2(t)$ наведені на рис. 1. Значення цих характеристик розраховувалися по кожному фрагменту реалізації, що відповідає $N = 2048$ відліків в виразах (2) і (3).

Крім статистичних моментів акустичного шуму досліджувалася його автокореляційна функція [5]. КФ випадкового процесу $X(t)$ характеризує міру залежності, або зв'язку двох перерізів процесу $X(t_1)$ і $X(t_1 + \tau)$ [6]. Мірою тривалості кореляційного зв'язку виступає інтервал кореляції $\tau_{кор}$. Він визначає відстань між двома перерізами $X(t_1)$ і $X(t_1 + \tau)$, починаючи з якої можна практично вважати некорельованими випадкові величини $X(t_1)$ і $X(t_1 + \tau)$, $\tau \geq \tau_{кор}$.

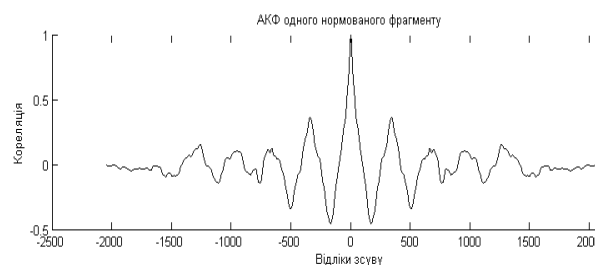


Рис. 2. Нормована КФ шуму у приміському електропотязі

Приклад КФ акустичного шуму наведений на рис. 2. Як свідчить графік, КФ досліджуваного шуму осцилює, тому аналіз інтервалу кореляції зводиться до співвідношення [6]

$$\tau_{кор} = \frac{1}{F_d} \sum_{k=0}^N |R_H(\tau_k)|, \quad (4)$$

де F_d – частота дискретизації, N – максимальна відстань між перерізами, $R_H(\tau)$ – нормована КФ.

Встановлено, що для шуму у вагоні приміського потягу $\tau_{кор} = 2 \dots 15$ мс (в середньому приблизно 4 мс), а для шуму у вагоні метро $\tau_{кор} = 3 \dots 15$ мс (в середньому приблизно 6 мс).

3. Оцінка часу стаціонарності шуму

Разом з КФ, математичним сподіванням та дисперсією випадкового процесу ступінь його стаціонарності має пріоритетне значення для класифікації шуму та суттєво впливає на синтез систем його обробки. Основною числовою мірою нестаціонарності процесу є інтервал локальної стаціонарності, що визначає час, протягом якого процес може вважатися стаціонарним.

Якісний аналіз інтервалу локальної стаціонарності базується на залежностях

$$\mu = \mu(t), \sigma^2 = \sigma^2(t).$$

Як видно з рис. 1, математичне сподівання (верхній графік) змінюється з плином часу доволі різко, але величина розбіжності сусідніх фрагментів змінюється, майже завжди, не більш ніж на 20% від максимального значення. Тому можна вважати, що локальна стаціонарність математичного сподівання зберігається протягом від одиниць до десятка секунд. Часова залежність дисперсії має більшу варіацію. В місцях, де відбувається перетин стику рейок, дисперсія має сплески.

Питання кількісної оцінки інтервалу локальної стаціонарності нестаціонарного випадкового процесу (НВП) неодноразово розглядалися у літературі [7-9]. В статті Юшина [10] запропоновано метод оптимального оцінювання інтервалу осереднення статистичних характеристик НВП за єдиною реалізацією на основі критерію мінімуму середнього квадрату похибки. Можна показати, що тривалість цього інтервалу співпадає з тривалістю інтервалу локальної стаціонарності процесу. В методі [10] вважається відомим аналітичний вигляд низки моментних функцій – середньої КФ процесу, середньої КФ квадрату процесу, КФ математичного сподівання та КФ дисперсії. За зауваженням Юшина для нормального процесу з експоненційною КФ грубі оцінки всіх цих характеристик, як правило, легко досяжні. Однак у будь-якому випадку застосування методу Юшина ускладнюється великим обсягом обчислень, а неекспоненційний вигляд КФ акустичного шуму створює додаткову перешкоду для цього. Тому в даній статті розроблено оригінальну методику оцінки інтервалу локальної стаціонарності НВП за єдиною реалізацією. Вона не гарантує оптимальності оцінок, але суттєво простіша за метод [10] та менш вимоглива до відомостей про процес. Методика ґрунтується на оцінці КФ і інтервалу кореляції для кожного фрагменту НВП в межах реалізації, розрахунку середнього інтервалу кореляції для всієї реалізації та визначенні міри попарної близькості центральних частин КФ фрагментів в межах цього середнього інтервалу кореляції та полягає в наступному:

1) розраховується КФ $R_k(\tau)$ кожного k -го фрагменту реалізації НВП;

2) оцінюється інтервал кореляції $\tau_{кор k}$ для кожного k -го фрагменту згідно (4);

3) будується залежність $\tau_{кор}$ по усіх фрагментах. Критерієм інтервалу локальної стаціонарності (критерієм №1) τ_{c1} може бути зміна інтервалу кореляції для пари фрагментів *на відстані інтервалу локальної стаціонарності* на величину, що перевищує встановлений пороговий рівень, скажімо 0,1(10%);

4) визначається середній інтервал кореляції по всій реалізації $\bar{\tau}_{кор}$;

5) для КФ кожного k -го фрагменту виділяється центральна частина $\tilde{R}_k(\tau)$, відповідна $\bar{\tau}_{кор}$, тобто при $|\tau| \leq \bar{\tau}_{кор}$. Ця область зрушень містить істотно корельовані відліки фрагменту реалізації. За її межами поведінкою КФ можна знехотувати та апроксимувати КФ величиною 0;

6) розраховується коефіцієнт кореляції ρ_{kl} цих суттєвих (тобто центральних) частин КФ усіх фрагментів k і l як міра попарної близькості $\tilde{R}_k(\tau)$ та $\tilde{R}_l(\tau)$ цих фрагментів. Співпадаючі індекси $k = l$ дають коефіцієнт кореляції $\rho_{kk} = 1$, по мірі віддалення фрагментів один від одного ρ_{kl} знижується. Оцінюється ρ_{kl} для кожного фрагмента і його найближчих сусідів. Критерієм інтервалу локальної стаціонарності (критерієм №2) τ_{c2} може бути зниження ρ_{kl} для пари фрагментів *на відстані інтервалу локальної стаціонарності* нижче встановленого порогового рівня, скажімо 0,9;

7) остаточна оцінка часу стаціонарності τ_c обирається як мінімальна з двох зазначених вище оцінок τ_{c1} і τ_{c2} :

$$\tau_c = \min \{ \tau_{c1}, \tau_{c2} \}. \quad (5)$$

З використанням наведеної методики визначено, що час стаціонарності шуму τ_c в вагоні залізничного транспорту складає біля декількох секунд, а у вагоні метрополітену – до секунди. Крім того, визначено, що шум у вагоні потягу залізниці та метро має дещо різні форми КФ фрагментів, але обидві осцилюють та згасають до нуля зі збільшенням часу зсуву. Це свідчить про ергодичність досліджуваних процесів, тобто робить коректними наведені вище оцінки та висновки, що одержані по єдиній реалізації шуму [6-10].

Найбільш вірогідною причиною розбіжностей ступеня стаціонарності шуму цих двох типів може бути розбіжність динамічних режимів руху потягів залізниці та метро. Дільниці між станціями метро дуже короткі. Середній час руху між ними складає до двох хвилин. За цей час потяг має набрати швидкість,

подолати відстань між станціями та загальмувати до зупинки. Це призводить до того, що більшу частину перегону потяг метро рухається з позитивним або негативним прискоренням, внаслідок чого шум швидко змінюється, а його спектр набуває все нових частотних складових, тобто шум стає суттєво нестационарним процесом. На відміну від метро потяг залізниці основну частину перегону між станціями пересувається рівномірно або з притаманним інерційному руху повільним гальмуванням, ділянки прискорення звичайно короткочасні, а типові значення прискорення менші за прискорення потягів метро. Саме тому інтервал стаціонарності шуму у залізничному потязі в декілька разів більше, ніж у метро.

4. Імітаційне моделювання компенсації акустичного шуму

За даними попередніх розділів статті акустичний шум в вагонах рейкового транспорту можна вважати *ергодичним нормальним центрованим локально-стаціонарним випадковим процесом* з певними інтервалами локальної стаціонарності. З метою дослідження можливості та оцінки якості активної компенсації акустичного шуму розглянутого типу створена імітаційна модель адаптивного компенсатора акустичних перешкод (ІМ) (рис. 3). Вона

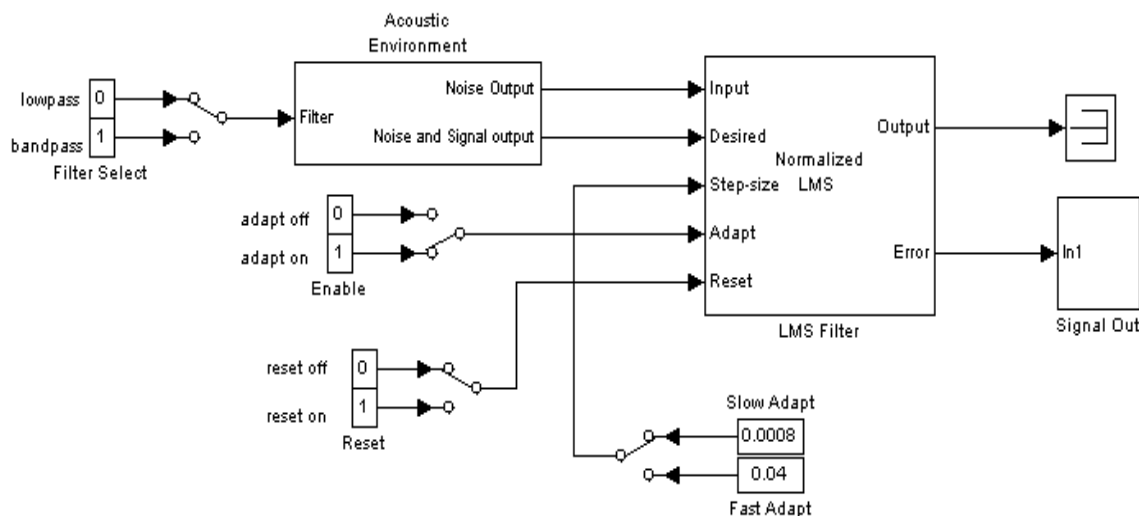


Рис. 3. Імітаційна модель адаптивного компенсатора акустичних перешкод у пакеті MATLAB

Урахування миттєвої потужності вхідного впливу теоретично забезпечує кращу збіжність алгоритму (7) порівняно з (6) при обробці нестационарних за рівнем даних, що є принциповим у випадку акустичного шуму, що досліджений у розділах 2, 3 даної статті. Окремо на рис. 4 зображена функціональна схема підсистеми вхідних впливів ІМ (блок *Acoustic Environment* на рис. 3). Відповідно до неї на перший вхід компенсатору порційно, по 2048 відліків подавався шум, а на другий вхід – адитивна суміш цього ж шуму з корисним сигналом при різному співвідношенні сигнал-шум (ССШ).

побудована в середовищі SIMULINK пакету MATLAB [11, 12] на основі відомих рішень теорії активної компенсації перешкод [3] з використанням адаптивного фільтру, що функціонує відповідно до методу найменших квадратів (МНК). В моделі досліджувалися два варіанти МНК-фільтру (блок *LMS Filter* на рис. 3) – простий та нормований. В алгоритмі простого МНК передбачається оновлення коефіцієнтів фільтру згідно з рівнянням

$$w(n) = w(n-1) + \eta \varepsilon(n) [u(n)]^*, \quad (6)$$

де n – поточний індекс часу, $u(n)$ – вектор вхідних даних на кроці n , $w(n)$ – вектор вагових оцінок фільтру, η – розмір кроку адаптації, $\varepsilon(n)$ – оцінка похибки на кроці n , а символ «*» означає комплексне спряження.

На відміну від простого МНК у нормованому МНК (*Normalized LMS*) при оновленні коефіцієнтів фільтру враховується миттєва потужність сигналу:

$$w(n) = w(n-1) + \eta \varepsilon(n) \frac{[u(n)]^*}{\alpha + [u(n)]^* T u(n)}, \quad (7)$$

де α – константа, що вводиться з метою подолання потенційної цифрової нестійкості коефіцієнтів фільтрації, а символ T означає транспонування вектору.

За результатами моделювання встановлено, що оцінки простого МНК фактично не збігаються, тобто такий адаптивний фільтр неспроможний до компенсації акустичного шуму в вагонах рейкового транспорту.

На рис. 5 наведений приклад компенсації шуму у вагоні метро нормованим МНК. З графіків випливає, що відношення діючого шуму до залишкового становить 15...20 разів (12...13 дБ), що свідчить про *впевнене придушення компенсатором такої нестационарної перешкоди, якою є шум рейкового транспорту.*

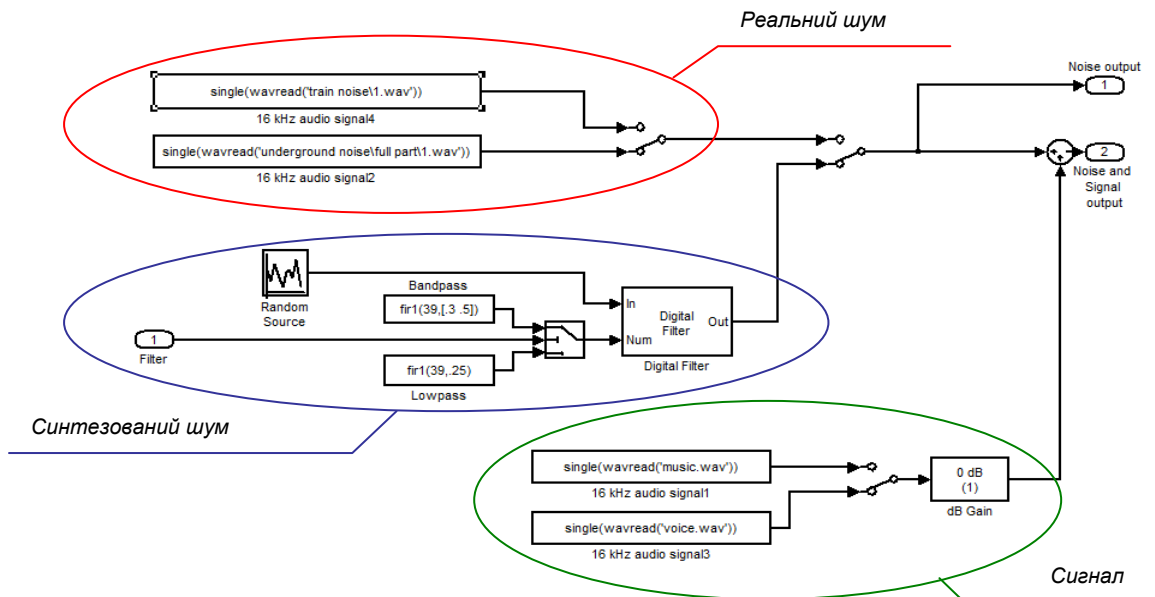


Рис. 4. Підсистема вхідних впливів імітаційної моделі адаптивного компенсатора акустичних перешкод (блок Acoustic Environment на рис. 3)

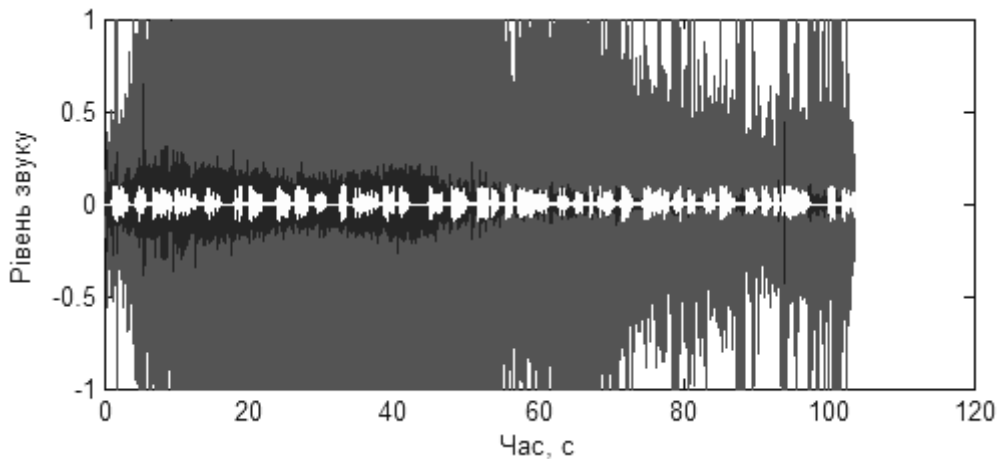


Рис. 5. Ілюстрація процесу адаптивної компенсації акустичного шуму метрополітену. кольором зображено: сірий – діючий шум, чорний – компенсований (залишковий) шум, білий – корисний сигнал (голос)

Створена модель забезпечує розбірливість мовного сигналу (дозволяє зрозуміти суть розмови або зміст пісні) на фоні шуму метро при ССШ $-15 \dots -12$ дБ, на фоні шуму залізничного потягу при ССШ $-23 \dots -20$ дБ. Додатково з метою співставлення ефективності придушення шуму розробленою моделлю у якості адитивного фону досліджувався синтезований стаціонарний шум. В цьому випадку порівняно з фактичним акустичним шумом рейкового транспорту ступінь придушення зростає, і розбірливість мовного сигналу забезпечується при ССШ $-27 \dots -24$ дБ [13]. В цілому результати моделювання узгоджуються з теорією адаптивної фільтрації [3], відповідно до якої ступінь придушення шуму прямо пропорційний ступеню його стаціонарності.

Висновки

Стаття присвячена актуальній темі боротьби з шумами в такому акустично забрудненому середовищі як рейковий транспорт, оскільки типові рівні його шуму суттєво перевищують рекомендований ВООЗ рівень 55 дБА. Одержані в статті основні результати полягають в наступному:

1. Шляхом статистичного аналізу записів акустичного шуму відповідного походження створена його модель як ергодичного нормального центрального локально-стаціонарного випадкового процесу.

2. Запропонована методика оцінки інтервалу локальної стаціонарності випадкового процесу та отримані чисельні оцінки цієї характеристики шуму в рухомому складі рейкового транспорту.

3. На цьому ґрунті створена імітаційна модель адаптивного компенсатору акустичних перешкод, узгоджена з типом шуму, що підлягає компенсації, та виконані її дослідження.

4. Результати моделювання узгоджуються з теорією адаптивної фільтрації.

5. За результатами імітаційного моделювання встановлено, що система адаптивної компенсації перешкод на основі нормованого МНК гарантовано зменшує рівень реального шуму з 55-70 дБА до 40-55 дБА у вагонах залізничних потягів та з 70-90 дБА до 58-78 дБА у вагонах метрополітену, що в більшості випадків відповідає вимогам ВООЗ або наближається до них.

Таким чином, доведена технічна можливість створення ефективного компенсатора акустичного шуму у вагоні метрополітену та залізничного транспорту як засобу індивідуального захисту від шуму.

В якості наступного етапу досліджень планується створення та натурне тестування функціонального прототипу запропонованого в статті компенсатора на платформі цифрового сигнального процесору, а також аналіз варіантів безпосереднього застосування таких пристроїв для індивідуального захисту пасажирів та персоналу від шуму в рухомих складі рейкового транспорту.

Список літератури

1. Иванов Н.И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н.И. Иванов. – М.: Университетская книга, Логос, 2008. – 424 с.
2. Основы акустической экологии: Навчальний посібник / В.С. Дідковський та ін.; за ред. В.С. Дідковського. – Кіровоград: поліграфічно-видавничий центр ТОВ «Імекс ЛТД», 2002. – 520 с.

3. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов / Б. Уидроу, С.Д. Стирнз. – М.: Радио и связь, 1989. – 440 с.
4. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко. – СПб, Питер, 2002. – 608 с.
5. Статкус А.В. Исследование статистических свойств акустического шума железнодорожного транспорта / А.В. Статкус, А.С. Сергиенко // Проблемы информатики и моделирования. Тезисы одиннадцатой международной научно-технической конференции. Секция «Молоді вчені». – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – С.73.
6. Романенко А.Ф., Сергеев Г.А. Вопросы прикладного анализа случайных процессов / А.Ф. Романенко, Г.А. Сергеев. – М.: Сов. радио, 1968. – 256 с.
7. Пугачев Б.С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления / Б.С. Пугачев. – М.: Физматгиз, 1962. – 883 с.
8. Синицын Б.С. Автоматические регуляторы и их применение / Б.С. Смирнов. – Новосибирск: РИО, 1964.
9. Лифшиц Н.А. Вероятностный анализ систем автоматического управления (в 2-х тт.) / Н.А. Лифшиц, В.Н. Пугачев – М.: Сов. радио, 1963. – Т.1 – 896 с., т. 2 – 484 с.
10. Юшин В.И. Оптимальные интервалы осреднения при измерении статистических характеристик нестационарного процесса по одной реализации / В.И. Юшин // Автометрия. – 1966. – №3. – С. 113-120.
11. Гультияев А. Визуальное моделирование в среде Matlab: Учебный курс. - Питер, 2000. – 432 с.
12. Дьяконов В.П. Matlab 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения. – М.: Солон-Пресс, 2005. – 560 с.
13. Статкус А.В. Исследование активной компенсации акустического шума железнодорожного транспорта / А.В. Статкус, А.С. Сергиенко // Проблемы информатики и моделирования. Тезисы одиннадцатой международной научно-технической конференции. Секция «Молоді вчені». – Х.: НТУ «ХПИ», 2011. – С.74.

Надійшла до редколегії 5.10.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.М. Порошин, Національний технічний університет «ХПИ», Харків.

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ АДАПТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ АКУСТИЧЕСКОГО ШУМА РЕЛЬСОВОГО ТРАНСПОРТА

А.В. Статкус, А.С. Сергиенко

На основании статистического анализа реализаций акустического шума рельсового (пригородного железнодорожного и метрополитена) транспорта разработана его модель как эргодического нормального центрированного локально-стационарного случайного процесса и получены числовые оценки интервалов локальной стационарности. Создана согласованная с моделью акустического шума имитационная модель адаптивного компенсатора акустических помех, выполнены её исследования и получены оценки характеристик подавления шума. По результатам имитационного моделирования установлено, что разработанная система активной компенсации реального шума существенно уменьшает его уровень и может использоваться для индивидуальной защиты пассажиров и персонала в поездах железной дороги и метрополитена.

Ключевые слова: шум рельсового транспорта, интервал корреляции, локально стационарный случайный процесс, адаптивная фильтрация, имитационное моделирование.

ANALYSIS OF ADAPTIVE CANCELLATION PERFORMANCE FOR RAIL TRANSPORT ACOUSTIC NOISE

A.V. Statkus, A.S. Sergienko

On the basis of statistical analysis of acoustic noise realizations recorded in rail (railway and subway) transport the noise model was elaborated as normal ergodic centred locally stationary random process. The numerical estimates of local stationary intervals were obtained. The simulation model for adaptive noise canceller was proposed which is consistent with the noise model. The noise cancellation simulation was held resulted in the estimates of the noise cancellation performance. It is found that the system developed cancels the noise effectively and can be used for personal protection of passengers and staff in railway and subway trains.

Keywords: rail transport noise, correlation interval, locally stationary random process, adaptive filtering, simulation.