

УДК 504.055(477-25)(043.2)

**ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ДЛЯ ЗАДАЧ МОНІТОРИНГУ АКУСТИЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ****В. І. Зацерковний**, д-р техн. наук, **Н. В. Оберемок**, канд. техн. наук, **Бондарь Ю.С.**

Київський національний університет ім. Тараса Шевченка

vitalii.zatsekovnyi@gmail.com**І. В. Шерстюк**

НТУУ «Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського

Розглянуто основні джерела акустичного забруднення навколишнього середовища та територій мешкання населення до яких відносяться транспортна галузь, об'єкти виробничої, соціальної і побутової сфер. Питомий внесок цих джерел в акустичне забруднення варіюється в певних межах для різних міст і населених пунктів, але основним залишається транспорт і частка його постійно збільшується. Через зростання великих міст і агломерацій, розвитку транспорту і промислового виробництва проблема акустичного забруднення постала глобальним чиним. Широке впровадження в промисловість нових інтенсивних технологій, зростання потужності і швидкодійності обладнання, широке використання численних засобів наземного, повітряного та водного транспорту, повсюдне застосування різноманітного електрифікованого побутового обладнання – все це призвело до того, що людина на роботі, в побуті, на відпочинку, при пересуванні постійно піддається багаторазовому шкідливому впливу шуму. Визначено основні питання моніторингу акустичного забруднення навколишнього середовища за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) та методи моделювання цього забруднення. Геоінформаційний моніторинг акустичного забруднення навколишнього середовища та територій мешкання населення пропонується розглядати як складну систему. Розглянута класифікація геоінформаційного моніторингу, обґрунтована структурна схема системи, побудовані карти акустичного навантаження міста. Наведені результати експериментальних досліджень та математичного моделювання рівнів шуму від різних чинників. Виконано адаптацію існуючих методів картографування шуму. Проаналізовано стан акустичного середовища міста на основі створеної двовимірної горизонтальної карти шуму. Запропоновано рекомендації щодо зниження акустичного навантаження в місті на його мешканців.

Ключові слова: геоінформаційні системи (ГІС), шумове (акустичне) забруднення, картографування, моніторинг, методи моделювання.

The main sources of acoustic contamination of an environment and the habitable areas, including the transport industry, the objects of industrial, the social and consumer industries, are considered. Gravity of these sources, during the acoustic contamination, varies widely for the different cities and residential area, however, the transport remains being primary and its shares is increasing continually. Due to the increase of megapolices and agglomeration, the intensive transport expansion and industry, the acoustic contamination problem is becoming global. Mainstreaming of modern high technologies in the industry, an expansion productivity of equipment, the usage of the multiple resources of land, air, railway water transports, common usage of various household electrical appliances-all these are leading to the repetitive contrarious noise, which a human suffers constantly being at work, in everyday life or on holidays. The main aspects of monitoring of enviromental acoustic contamination with the help of GIS and a modelling approach of this pollution. Geoinformation monitoring of acoustic contamination of the environmental and habitable areas are supposed to be considered as a complex system. The classification of geoinformation monitoring is studied, the structural scheme of system is demonstrated, the plots of town acoustic load are compiled, the result of experimental researched and mathematics modeling of noise levels from the different factors. The adaptation of available methods of noise mapping are put into practice. The state of town acoustic conditions on the base of created two-dimensional horisontal noise profile is analysed. The instructions for the recession of town acoustic load on the inhabitants are suggested.

Keywords: geographic information systems (GIS), noise (acoustic) pollution, mapping, monitoring, modeling techniques.

Актуальність теми дослідження

До глобальних проблем сучасної екології (парниковий ефект, руйнування озонового шару, забруднення поверхневих, підземних вод, атмосфери, забруднення радіоактивними відходами, зростання несанкціонованих сміттєзвалищ, знищення тисяч видів рослин і тварин, винищення лісового покриву, стрімке виснаження запасу

корисних копалин, кислотні дощі, потепління клімату тощо) останнім часом додається ще й акустичне забруднення, рівень якого стрімко зростає. Рівень шуму підвищується приблизно на 1 дБА в рік і за останні 10 років зріс у світовому масштабі на 10–12 дБА. При цьому на долю транспорту припадає 60–80 % усіх шумів, що проникають у місця перебування людей. Шумо-

вий фон сучасного міста є недопустимо високим і досяг рівня промислових шумів.

Актуальність проблеми

Сьогодні вже є розуміння того, що акустичне забруднення — одна з найбільш серйозних проблем негативного антропогенного впливу на людину. Понад 30 % жителів великих міст нашої країни живуть в умовах акустичного дискомфорту, параметри якого значно перевищують допустимі норми [1].

На головних магістралях деяких великих міст рівні шумів перевищують 90 дБ і мають тенденцію до посилення щорічно на 0,5 дБ, що спричиняє величезну небезпеку для навколишнього середовища в зоні жвавих транспортних магістралей.

Боротьба з шумом в центральних районах міст ускладнюється через щільність забудови, через яку неможливі будівництво шумозахисних екранів, розширення магістралей і висадка дерев. А оскільки фізіологічно-біохімічна адаптація до шуму неможлива, то це спричиняє погіршення сну і фізичного стану людей, підвищенню числа захворювань. Сьогодні, за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я близько 2 % всіх смертей у світі спричинено захворюваннями, пов'язаними з надмірним шумом [3]. Незважаючи на це, проблемі акустичного забруднення в Україні приділяється вкрай недостатня увага. Існуючі стандарти щодо акустичного забруднення не мають достатнього сучасного технічного, правового та соціально-економічного обґрунтування. Наведене свідчить про актуальність дослідження.

Актуальною задачею організації ефективного акустичного моніторингу, є впровадження в систему моніторингу геоінформаційних технологій та розробка ефективних заходів щодо зменшення шуму, моделювання процесів поширення звуку на шляху від джерела до об'єкту, розробка різноманітних шумозахисних заходів і засобів.

Висвітлення проблеми в науковій літературі

Проблемам акустичного забруднення присвячені праці Абракітова В. Е., Дмитрука О. Ю., Ковальчука І. П., Самойлюка Е. П., Сторожука В. М., Поспелова П. І., Майера В. В. Проте, визнаючи наукову і практичну цінність розробок названих авторів, треба відзначити, що проблема впровадження геоінформаційних технологій в систему моніторингу акустичного забруднення ще далека від свого завершення і потребує глибокого системного опрацювання необхідності їх застосування.

Виклад основного матеріалу

Шум класифікують: за характером спектра — на широкосмуговий з безперервним спектром шириною більше однієї октави і тональний, в спектрі якого є дискретні тони; за спектральним складом — на низькочастотний (максимум звукової енергії припадає на частоти нижче 400 Гц), середньо-частотний (максимум звукової енергії на частотах від 400 до 1000 Гц) і високочастотний (максимум звукової енергії на частотах вище 1000 Гц); за часовими характеристиками — на постійний (рівень звуку змінюється в часі але більш ніж на 5 дБ) і непостійний. До непостійного шуму відносяться коливний шум, при якому рівень звуку безперервно змінюється у часі; переривчастий шум (рівень звуку залишається постійним протягом інтервалу тривалістю 1 с і більше); імпульсний шум, що складається з одного або декількох звукових сигналів тривалістю менше 1 с [2].

Джерела шуму поділяють на дві великі групи — внутрішні і зовнішні. Внутрішні: інженерне, технологічне, побутове та санітарно-технічне обладнання будівель і споруд. Зовнішні: транспортні засоби (наземні, водні, залізничні, повітряні), промислові та енергетичні підприємства і установи, а також різні джерела шуму всередині кварталів, пов'язані з життєдіяльністю людей [2]. Крім того, всі шуми можна згрупувати в дві групи: природні та штучні. Природні шуми — це приємні шуми прибою, спів птахів, гуркіт грому тощо. Штучні шуми — шуми викликані господарською, технічною і соціально-культурною діяльністю людини і суспільства.

Питома вага кожного з джерел варіюється в певних межах для різних міст і населених пунктів, але основним шумовим забруднювачем навколишнього середовища залишається автомобільний транспорт.

Крім того, широке впровадження в промисловість нових інтенсивних технологій, зростання потужності і швидкохідності обладнання, широке використання численних засобів наземного, повітряного та водного транспорту, повсюдне застосування різноманітного електрифікованого побутового обладнання — все це призводить до того, що людина на роботі, в побуті, на відпочинку, при пересуванні піддається багаторазовому шкідливому впливу шуму.

Шумове (акустичне) забруднення — дратівливий шум антропогенного походження, що порушує життєдіяльність живих організмів і людини.

Шуми спричиняють шкоду здоров'ю; шум викликає зміни в роботі надниркових залоз, гіпофізу, відображається на розвитку пристосувальних та регуляторних реакціях організму.

Дія шуму на людину відображається в широкому діапазоні — від суб'єктивного роздратування до об'єктивних змін у центральній нервовій системі, органах слуху, серцево-судинних та ендокринних системах, травному акті та інших органах. Першим показником шкідливої дії шуму є скарги на роздратованість, переживання, порушення сну. Фізіологічно-біологічна адаптація людини до шуму практично неможлива [4].

Зростання чисельності транспорту, транспортної рухливості населення, індустріалізація міст, підвищення технічного оснащення міського господарства, звукової реклама в різних закладах і установах спричиняє загострення цієї проблеми.

У відкритому просторі звук вільно розповсюджується у всіх напрямках. Швидкість розповсюдження залежить від пружних властивостей матеріального середовища, у якому вони розповсюджуються. Чим більш пружним є середовище, тим більше швидкість розповсюдження звука. В повітрі швидкість розповсюдження звука при температурі 20°C дорівнює 344 м/с. Залежність швидкості звука в повітрі від температури може бути виражена так:

$$C = C_0 \sqrt{\left(1 + \frac{t}{273}\right)},$$

де C_0 — швидкість звука при $t = 0^\circ\text{C}$ становить 333 м/с; t — температура повітря, град С.

Для нормальних температурних умов ($t = 15^\circ\text{C}$) швидкість звука в повітрі дорівнює 340 м/с. У денний час температура понижується з висотою, тому відбувається рефракція звукового променя вгору і, навпаки, ніччю при тихій погоді звукові промені прижимаються до землі.

Швидкість звука зростає, якщо звук розповсюджується за напрямком вітру, і, навпаки, при розповсюдженні звука проти вітру, швидкість його зменшується порівняно зі швидкістю при нерухомому стані повітря. При цьому також спостерігається рефракція звука. З навітряного боку від джерела звука утворюється зона звукової тіні, а рівень звукового тиску може різко зменшитись на 20–30 дБ. Утворення звукової тіні з навітряного боку є характерним для денних умов. Уночі зона звукової тіні утворюється рідко (з підвітряної сторони). Остання обставина є однією з причин гарної чутності уночі. Звукові хвилі можна екранувати, фокусувати і направляти в певний бік аналогічно світловим променям. Звук характеризується доволі великою довжиною хвилі. Цю обставину необхідно враховувати при проектуванні, наприклад, екранів (рис. 1), оскільки здатність звукових хвиль до дифракції (огинання пе-

решкод) залежить від співвідношення між розміром перешкоди і довжиною хвилі.

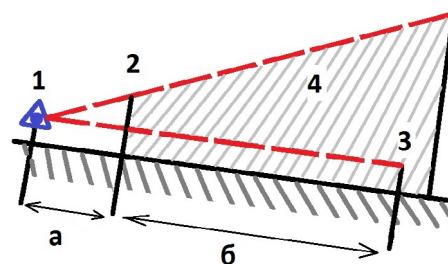


Рис. 1. Схема розповсюдження звука за екраном: 1 — джерело звуку; 2 — екран; 3 — точка спостереження; 4 — зона звукової тіні

Звукова тінь, що утворюється за екраном буде тим більше, чим менше буде довжина звукової хвилі порівняно з розміром перешкоди (рис. 2).

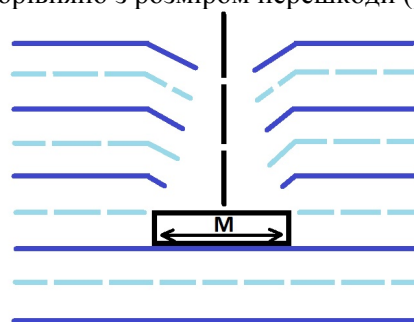


Рис. 2. Схема утворення звукової тіні під час розповсюдження плоских звукових хвиль

Основними внутрішніми джерелами техногенного шуму в будинках різного призначення є технологічне і інженерне обладнання. Головними джерелами зовнішнього техногенного шуму є потоки автомобільного, рейкового, водного, повітряного транспорту, промислові підприємства та їх окремі установки, комунально-складські і транспортні підприємства, трансформаторні і газорозподільні підстанції, центральні теплові пункти, насосні і компресорні станції, будмайданчики, гаражі, автостоянки тощо.

Джерелами зовнішнього біогенного шуму є стадіони, базари, майдани для мітингів, танцмайданчики, відкриті майданчики культурно-масового відпочинку, портмайданчики, дискотеки, зоопарки, тваринницькі ферми тощо.

Акустичний розрахунок повинен містити такі етапи:

- виявлення джерел шуму і визначення їх шумових характеристик;
- визначення і подання джерела шуму як відповідної імітаційної розрахункової моделі (точка, лінія, площина);
- встановлення розрахункових точок в приміщенні або на території, для яких необхідно виконати акустичний розрахунок;
- визначення шляхів поширення шуму від джерела (джерел) до розрахункових точок і зако-

номірностей його поширення за кожним із шляхів (зниження рівня шуму завдяки віддаленню від джерела, затуханню, екрануванню, ізоляції огорожувальними конструкціями, звукопоглинанню або підвищенню рівня шуму за рахунок відбитих звукових хвиль тощо);

– визначення очікуваних рівнів шуму в розрахункових точках;

– визначення допустимих октавних рівнів звукового тиску і рівнів звуку для вибраних розрахункових точок з урахуванням призначення об'єкта, місця його розташування і характеру шуму;

– визначення необхідного зниження октавних рівнів звукового тиску в дБ (або рівнів звуку в дБА) у розрахункових точках;

– розроблення та обґрунтування заходів із забезпечення необхідного зниження рівнів шуму;

– проведення перевірного розрахунку очікуваних рівнів шуму в розрахункових точках з урахуванням розроблених шумозахисних заходів з метою визначення їх достатності [4, 5].

До останнього часу для розв'язання завдання побудови карт шуму переважно використовувались інженерні методики розрахунку [6–8], що передбачали ручну працю фахівця для оцінки впливу шуму.

Сьогодні існує низка програмних комплексів, які дозволяють здійснювати комп'ютерне моделювання примігстральної території і визначити ступінь шумового забруднення (рис. 3).

Алгоритми	2D/3D	Вид моделі	Приміщення/Відкритий простір	Сфера застосування	Особливості алгоритмів
FEM/BEM (метод кінцевих елементів)	+/-	Сіткова	+/-	Розв'язання будь-яких задач з моделювання звукових хвиль	Експоненційне зростання трудомісткості при збільшенні частоти звука
Radiosity (метод випромінювання)	±/+	Набори майданчиків	+/-	Моделювання енергетичного переносу.	Неоднозначність при розв'язці на майданчик; Ітеративність; складність розрахунку дифракції.
Image source (метод уявних джерел)	+/-	Векторна	+/-	Розрахунок прямих променів і відбиттів	Необхідне ефективне відкидання віртуальних джерел
Forward Ray tracing (пряме трасування променів)	+/+	Векторна; набори майданчиків	+/+	Розрахунок прямих променів, відбиттів і дифракції	Недетерміноване випромінювання променів
Backward Ray tracing (обернене трасування променів)	±/+	Векторна	+/+	Розрахунок дифракції	Неможливість обмеження перевідбиттів
Distributed Ray Tracing (усереднене трасування променів)	±/+	Векторна	+/+	Високоточне геометричне моделювання	Необхідність усереднення результатів
Beam Tracing (трасування пучків)	+/+	Векторна, модель пучків	+/-	Розрахунок прямих променів і відбиттів	Проблеми точності при пошуку перетинів пучків і майданчиків
Обернене трасування на растрі	+/-	Растрова	+/-	Розрахунок тільки прямих променів	Залежність точності від розміру комірки растра
Пряме трасування на векторно-растровій моделі	+/-	Векторно-растрова	+/-	Розрахунок прямих променів і відбиттів	Ітеративність, Необхідність у значній суттєвій попередній обробці

Рис. 3. Алгоритми розрахунку розповсюдження звукових хвиль

Однак, відсутність детальних цифрових моделей місцевості, які б дозволяли здійснювати точне моделювання процесу розповсюдження звуку, перешкоджає впровадженню подібних програмних продуктів у містобудівну діяльність нашої країни. Крім того, висока трудомісткість цих методів потребує відповідного апаратного забезпечення.

У випадках, коли безпосереднє моделювання процесу розповсюдження шуму не є доцільним, може бути використаний підхід, що ґрунтується на використанні статистичних оцінок, які характеризують типові джерела транспортного шуму в містах і особливості розповсюдження звукових хвиль на сельбищній території.

Зростаючі вимоги до ефективності системи моніторингу акустичного забруднення потребують безперервного удосконалення систем інформаційного забезпечення. Як свідчить практика, тільки інформаційні системи інтегровані з ГІС, спроможні ефективно упоратися з поставленим завданням. Геоінформаційні системи здатні забезпечити органи територіального управління засобами для відображення і розуміння того, що знаходиться в одному конкретному або багатьох місцях розташування, надати інструменти моде-

лювання ресурсів, виявлення взаємозв'язків, процесів, залежностей, прикладів, загроз і ризиків. Саме тому ГІС повинні стати ядром автоматизованої системи моніторингу акустичного моніторингу (рис. 5).

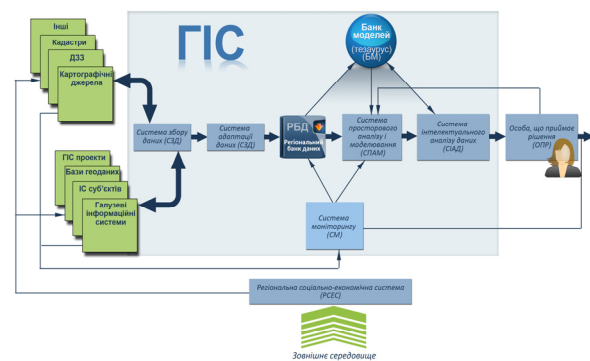


Рис. 5. ГІС як ядро автоматизованої системи акустичного моніторингу

Ефективність застосування ГІС в задачах акустичного моніторингу акустичного забруднення є незаперечною для прийняття оперативних заходів, а також моніторингу і моделювання [9].

Застосування ГІС у системі моніторингу акустичного забруднення забезпечить:

– підвищення ефективності управління територіями на різних рівнях за рахунок широкого використання інформаційних ресурсів просторових даних при прийнятті управлінських рішень і контролі їх виконання;

– сприянню соціально-економічному розвитку певної території через підвищення можливостей інформаційного забезпечення за рахунок надання більш повної, актуальної і достовірної інформації про потенційні об'єкти акустичного забруднення;

– підвищення якості просторових даних, зниження бюджетних витрат на створення бази просторових просторових даних за рахунок виключення дублювання робіт з їх створення;

– надання просторових даних і метаданих споживачам за єдиними правилами.

Здатність ГІС інтегрувати просторові і непросторові дані, разом з функціями аналізу і моделювання процесів, дозволяє використовувати цю технологію як загальну платформу для інтеграції соціально-економічних та екологічних процесів у масштабах усього регіону або певного територіального утворення [9].

ГІС, виходячи з комплексного географічного опису території, виступають, певним надбудовним елементом відносно систем інформаційно-просторового моделювання та їх логічного розвитку. За допомогою ГІС може бути організований ефективний доступ до великих об'ємів інформації про об'єкти, що мають просторову прив'язку. У зв'язку з цим їх структура та інші характерні особливості багато в чому визначаються сформованою системою організаційно-просторової інформації на певній території стосовно вирішення того чи іншого типу задач. Тому в процесі створення ГІС першорядне значення набуває розробка географічних (тематичних) основ інформаційної побудови складних просторово-часових об'єктів, призначених для реалізації цілей системи управління. Однак ГІС, це не інструмент для видачі рішень, а засіб, що допомагає прискорити і підвищити ефективність прийняття рішень. ГІС здатні дати відповіді на запити і функції аналізу просторових даних, наприклад, у розв'язанні таких задач, як вибір оптимальних за певними критеріями місць розташування об'єктів, екранів тощо.

Просторово-часовий аналіз дозволяє виявити територіальний розподіл об'єктів географічного простору, їх сталі комбінації, районувати, будувати і прогнозувати оптимальну модель територіальної організації території [10]. Система методів просторово-часового аналізу забезпечує комплексну оцінку статистики, динаміки і прогнозу розвитку акустичного забруднення території у

видячі його просторово-часових моделей, що відображуються на картах.

Карти створюють просторовий образ акустичного забруднення. Як приклад, на рис. 6. наведено забруднення центральної частини м. Києва за даними праці [4].



Рис. 6. Карта забруднення центральної частини м. Києва

Рівні шуму на Хрещатику складають 65–75 децибел, що значно вище за нормативні значення. Зони перевищення шуму вказані на ній помаранчевим і червоним кольором. Джерело таких високих рівнів шуму — дуже інтенсивні транспортні потоки.

Інтеграція ІС управління територіями з ГІТ, експертними системами, використання сучасних прикладних методів геопросторового аналізу дозволяють створити нові підходи в управлінні територіями, забезпечуючи прийняття оптимальних рішень. За допомогою ГІС можна створювати бази даних (БД), що поєднують у собі графічне та атрибутивне подання різномірної інформації і забезпечують можливість просторового аналізу даних і подання його результатів у найбільш прийнятній для користувачів у лаконічній формі (у вигляді графіків, діаграм, таблиць, карт та їх симбіозі тощо).

Наявність доступної для сприйняття і узагальнення інформації дозволяє особі, що сприймає рішення зосередити свої зусилля на пошуку і обмірковуванні доступних різномірних даних, розгляді альтернативних варіантів розв'язку проблеми і обрати найбільш ефективний і економічно доцільний.

Однак, застосування ГІС в задачах моніторингу акустичного забруднення передбачає її оптимізацію для ефективного розв'язання поставлених задач.

Задача оптимізації ГІС належить до числа нетривіальних задач і ґрунтуються на класичних і сучасних математичних методах варіаційного числення, теорії статистичних рішень, теорії ігор, теорії дослідження операцій, теорії інформації, теорії ймовірності, методі Понтрягіна, методі динамічного програмування Беллмана тощо.

На рис. 7 представлений алгоритм для оцінки ефективності і оптимізації ГС. З рисунка видно, що процес розробки загальної теорії ефективності і оптимізації ГС є замкнутим з множиною місцевих зворотних і прямих зв'язків, які виявляються і уточнюються як при розробці теорії, так і в процесі проектування.

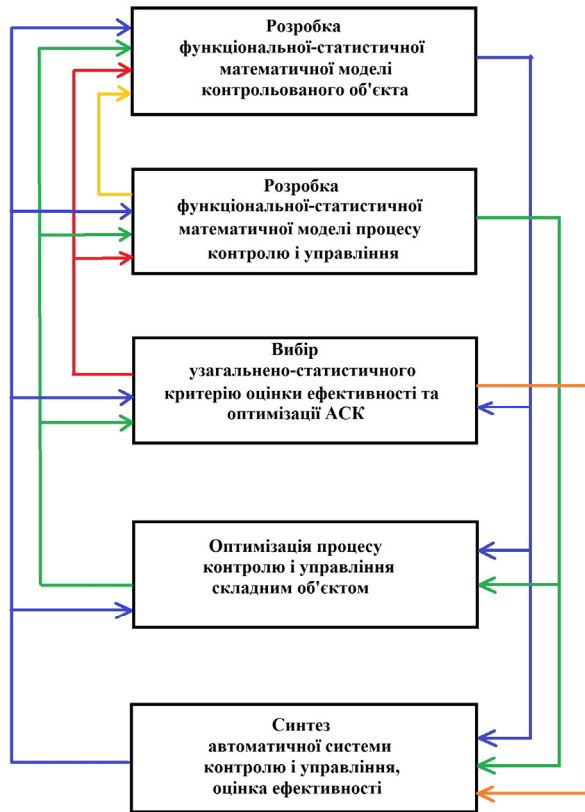


Рис. 7. Алгоритм оцінки ефективності і оптимізації ГС

Складність процесу моніторингу акустичного забруднення зумовлюється головним чином складністю об'єктів моделювання. Для опису функціонування об'єктів моделювання доцільно побудувати математичну модель об'єкта дослідження.

Найбільш повно стан об'єкта дослідження характеризує його математична функціонально-статистична модель.

Під математичною функціонально-статистичною моделлю розуміється система рівнянь, яка описує залежність параметрів об'єкта дослідження, ГС від зовнішніх і внутрішніх впливів при функціонуванні. На основі аналізу цієї моделі виявляється можливим сформулювати основні завдання, які вирішуються ГС при моніторингу об'єкта, а також синтезувати оптимальну структуру ГС.

При побудові математичної функціонально-статистичної моделі моніторингу акустичного забруднення необхідно враховувати те, що вона

включає в себе різноманітні класи і види систем. Ці системи можуть бути автономними і неавтономними, замкнутими і розімкнутими, стаціонарними і нестаціонарними, безперервними і дискретними. Тому доцільно використовувати загальний математичний апарат, який при відповідних змінах може бути поширений на різноманітні часткові випадки.

Крім того, при побудові математичної функціонально-статистичної моделі об'єкта ураховуються основні параметри критеріїв, за якими виконується оптимізація характеристик процесу контролю. До таких параметрів відносять:

- час перебігання процесу в цілому і його складових;
- імовірність безвідмовної роботи і ймовірності виконання завдання різними системами, що входять до об'єкта дослідження і систему моніторингу;
- точність роботи різних систем, їх вага, об'єм, вартість, споживана енергія та інші важливі показники.

Збурений стан об'єкта дослідження при моніторингу і управлінні можна описати системою рівнянь, яка є в загальному випадку математичною функціональною моделлю [10].

$$\sum_p^m M_{lp}(t, \tau, d/dt, Q)x_p = F_l(t, \tau, X, Z);$$

$$l = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

де $X\{x_1, \dots, x_m\}$ — вектор випадкових функцій часу, який характеризує вихідні параметри об'єкта дослідження; $Z\{\zeta_1, \dots, \zeta_k\}$ — вектор випадкових функцій часу, який характеризує зовнішні і внутрішні збурення і керуючі впливи; F_l — нелінійна функція; $M_{lp}(t, \tau, d/dt, Q)$ — багаточлен відносно операторів диференціювання d/dt зі змінним у часі вектором коефіцієнтів $Q\{q_1, \dots, q_n\}$; t — поточне значення часу; τ — момент часу, до якого ведеться дослідження об'єкта.

У процесі моніторингу стан будь-якої динамічної системи, яка перебуває під впливом керуючих сигналів і збурень, визначається вихідними параметрами, певним чином пов'язаними з впливами на систему через відповідний системі рівнянь (1) вектор-оператор динамічної системи, заданий або сукупністю математичних операцій $A_{lp}(t, \tau, X, Z, Q)$, або сукупністю лінійних чи нелінійних диференціальних рівнянь:

$$\frac{dx_i}{dt} = F_{0i}(t, \tau, X, Z) \quad i = 1, 2, \dots, m'; \quad (2)$$

$$\xi_j = \sum_{i=1}^{k'} \xi_{ij}^0(t, \tau, X) \bar{\xi}_i,$$

де ξ_{ij}^0 — не випадкові координатні функції; $\bar{\xi}_i$ — випадкові коефіцієнти; F_{0i} — не випадкова нелінійна функція.

Кожній групі номінальних умов при $t = \tau_0$, $\xi_{01}, \dots, \xi_{0k}$ з номінальної області G_0 і початкових умов $x_{01}, \dots, x_{0m'}$ відповідає свій розв'язок системи рівнянь (2):

$$x_{i0} = \varphi_{i0}(\tau_0, \tau, x_{01}, \dots, x_{0m'}, \bar{\xi}_{01}, \dots, \bar{\xi}_{0k'}). \quad (3)$$

Кожній групі реальних умов у моменти часу $t = \tau_1, x'_{01}, \dots, x'_{0m'}, \zeta_1, \dots, \zeta_k$ $t = \tau_1$, реальній області G_1 відповідає реальне рішення системи рівнянь (1)

$$x_i = \varphi_i(x'_{01}, \dots, x'_{0m'}, \bar{\xi}_1, \dots, \bar{\xi}_{k'}, \tau_1, \tau) \quad (4)$$

Система рівнянь (2) як за числом нелінійних операторів, так і за числом вихідних параметрів може розпадатися на m окремих рівнянь.

Для простоти будемо вважати, що кількість вихідних параметрів дорівнює кількості операторів, хоча, взагалі їх може бути більше. Для i -го параметра система рівнянь (1) вироджується в рівняння

$$M_{ip}(t, \tau, d/dt, q, \dots, q_n)x_p = F_i(t, \tau, x_i, \zeta_1, \dots, \zeta_k). \quad (5)$$

Розгляд рівняння збуреного стану об'єкта дозволяє виконати функціональний аналіз стану об'єкта, синтез системи контролю і оцінку її ефективності. Однак більш повною характеристикою статичного і динамічного стану об'єкта є ймовірнісний опис за допомогою законів розподілу ймовірностей параметрів елементів вхідних впливів, вихідних параметрів і векторів-операторів. Оскільки ймовірності раптових відмов визначаються за відомими формулами теорії надійності, то основна увага звертається на визначення ймовірності появи поступових відмов.

Для визначення ймовірності поступових відмов можуть бути використані три математичні моделі:

- математична модель, заснована на методі інтегрування диференціальних рівнянь;
- математична модель, заснована на методі Монте-Карло;
- математична модель, заснована на методі квазілінійних збурень.

Під методом інтегрування диференціальних рівнянь розуміється метод прямого обчислення багатовимірних щільностей ймовірностей вихідних параметрів об'єкта дослідження за допомогою інтегрування змінних, які є математично вираженими щільностями ймовірності.

Метод Монте-Карло полягає в багаторазовому виборі випадкової величини параметрів системи з наступним визначенням закону розподілу вихідних параметрів об'єкта дослідження.

Метод квазілінійних збурень полягає у поданні вихідних параметрів у вигляді ряду Тейлора з наступним визначенням закону розподілу ймовірностей вихідних параметрів.

Для визначення диференціального закону системи випадкових вихідних параметрів $x_1(t), \dots, x_{m'}(t)$ можна скористатися методикою, описаною в праці [10].

Якщо припустити, що отримані рішення (3), відомий диференціальний закон розподілу ймовірностей

$$f_0(x_1(t), \dots, x_{m'}(t), \bar{\xi}_{01}, \dots, \bar{\xi}_{0k'}, \tau_0, \tau)$$

системи випадкових величин $x_{01}, \dots, x_{0m'}, \zeta_{01}, \dots, \zeta_{0k'}$, функція F_{0i} має кусково-безперервні часткові похідні за координатами x_i , рішення системи рівнянь (2) φ_i мають другі часткові похідні за x_i і t і, крім того, рішення мають перші похідні за ζ_i , то диференціальний закон розподілу системи випадкових величин $x_1, \dots, x_{m'}$, визначається рівністю [11, 12]

$$f(x_1, \dots, x_{m'}, t, \tau) =$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \dots (k') \dots \int_{-\infty}^{\infty} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau \right\} d\bar{\xi}_1, \dots, d\bar{\xi}_{k'}.$$

Якщо врахувати границі змін величин $\bar{\xi}_1, \dots, \bar{\xi}_{k'}$, то рівняння (5) можна переписати у такому вигляді:

$$f(x_1, \dots, x_{m'}, t, \tau) =$$

$$= \int_{-\bar{\xi}_{1\min}}^{\bar{\xi}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\xi}_{1\min}}^{\bar{\xi}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau \right\} d\bar{\xi}_1, \dots, d\bar{\xi}_{k'},$$

де $\eta_j = \varphi_j[\tau_0, \tau, \varphi_\gamma(\tau, \tau_0, x_\sigma, \zeta_\nu), \zeta_\nu]$ при індексах j, γ, σ , що пробігають значення $1, 2, \dots, m$, а ν пробігає значення $1, 2, \dots, k'$.

Для визначення закону розподілу перехідної функції об'єкта дослідження необхідно на його вхід продати стрибкоподібні впливи і визначити закон

$$f(h_1, \dots, h_{m'}, t, \tau) =$$

$$= \int_{-\bar{\xi}_{1\min}}^{\bar{\xi}_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\bar{\xi}_{1\min}}^{\bar{\xi}_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau \right\} d\bar{\xi}_1, \dots, d\bar{\xi}_{k'}.$$

Для визначення диференціального m' -вимірного закону розподілу імпульсних функцій можна скористатися якобіаном перетворення $I(f_h \rightarrow f_w)$ з урахуванням того, що

$$w(t, \tau, X, Z, Q) = h'(t, \tau, X, Z, Q).$$

Диференціальний закон розподілу передаточної функції амплітудних і фазочастотних характеристик визначаються при гармонійних впливах на об'єкт.

Тоді отримуємо закон розподілу передаточної функції об'єкта:

$$f(W_1, \dots, W_{m'}, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}$$

закон розподілу амплітудно-частотної характеристики об'єкта:

$$f(A_1, \dots, A_{m'}, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}$$

закон розподілу фазочастотної характеристики об'єкта:

$$f(\varphi_1, \dots, \varphi_{m'}, t, \tau) = \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} \dots (k') \dots \int_{-\zeta_{1\min}}^{\zeta_{1\max}} f_0 \exp \left\{ - \int_{\tau_0}^t \sum_{j=1}^{m'} \frac{\partial F_{0j}}{\partial \eta_j} d\tau' \right\} d\bar{\zeta}_1, \dots, d\bar{\zeta}_{k'}$$

Таким чином, теоретично виявляється можливим достатньо точно визначити m' -вимірні диференціальні закони розподілу вихідних параметром і векторів-операторів. Однак виконати інтегрування у явному виді можна тільки тоді, коли щільність імовірності є простою аналітичною функцією випадкових параметрів. Зі зростанням кількості параметрів і складності аналітичних функцій застосування методу викликає істотні математичні труднощі.

Для складних об'єктів з нелінійностями при ймовірнісному аналізі, для практичних задач іноді достатньо оцінювати тільки перші два моменти вихідних параметрів: математичне очікування і кореляційну функцію або дисперсію. Ці моменти дозволяють повністю визначити закон розподілу ймовірностей, який приблизно можна вважати нормальним.

Система диференціальних рівнянь збуреного стану об'єкта в узагальненій формі подається у вигляді [10]:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho} \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) x_\rho = F_l(X, Z, t, \tau) + \varphi_l(Z_l); \\ Z_l = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l \zeta_j; l=1, \dots, m \end{cases} \quad (6)$$

де a_i^l, c_j^l — постійні коефіцієнти; $X \{x_1, \dots, x_m\}$ — вектор випадкових функцій параметра t , який визначає рух об'єкта; $Z \{\zeta_1, \dots, \zeta_k\}$ — вектор збурень, який є випадковою функцією параметра t ; F_l — нелінійні функції, які припускають лінеаризацію відносно певного режиму руху об'єкта в межах робочих діапазонів величин або функцій; φ_l — нелінійні функції, які не припускають звичайної лінеаризації; $M_{l\rho}$ — поліноми відносно

оператора диференціювання зі змінними у часі коефіцієнтами; S_l — кількість параметрів, які визначають поведінку об'єкта; N_l — кількість діючих збурень.

Після відповідних перетворень утворюється лінійна система рівнянь для визначення математичного очікування випадкових функцій:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho} \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) m_{x\rho} = F_l(t, \tau, m_x, m_l) + K_0^l m_l; \\ m_l = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l m_{x_i} + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l m_{\zeta_j} \end{cases} \quad (7)$$

і система рівнянь для визначення випадкових складових функцій:

$$\begin{cases} \sum_{\rho=1}^m M_{l\rho} \left(t, \tau, \frac{d}{dt}, Q \right) x_\rho^0 = \sum_{\mu=1}^m \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{x_\mu}} \right]_0 x_\mu^0 + \sum_{j=1}^{N_l} \left[\frac{\partial F_l}{\partial m_{\zeta_j}} \right]_0 \zeta_j^0 + K_1^l z_l^0; \\ z_l^0 = \sum_{i=1}^{S_l} a_i^l x_i^0 + \sum_{j=1}^{N_l} c_j^l \zeta_j^0, \end{cases} \quad (8)$$

де K_0^l і K_1^l — статистичні коефіцієнти посилення [10].

Проінтегрувавши системи рівнянь (7) і (8), наприклад методом послідовних наближень, визначимо математичне очікування, кореляційні функції і дисперсії вихідних параметрів.

Цей метод наближеного розв'язку застосовується тоді, коли метод гармонійної лінеаризації не дає бажаних результатів.

Система диференціальних рівнянь збуреного стану об'єкта подається у формі (6). Оскільки методика лінеаризації нелінійних систем зі змущеними коливаннями аналогічна методиці лінеаризації нелінійних систем, які працюють в автоколивальному режимі, то можна обмежитись викладенням методу лінеаризації систем з автоколиваннями.

Висновки

Застосування ГІТ у разі прийняття управлінських рішень в задачах моніторингу акустичного забруднення, залежно від застосування, за оцінками фахівців дозволяє заощадити від 1 до 10 % бюджетних коштів [9].

Через зростання акустичного забруднення у великих містах відбувається розробка ефективних заходів щодо боротьби зі шкідливою дією шуму, що базується на рішенні проблеми моделювання процесів поширення звуку на шляху від джерела до об'єкту, та надає можливість проектувати різноманітні шумозахисні заходи й засоби саме на стадії проектування об'єкта, тобто коли він ще не існує в природі.

Обґрунтовано необхідність оптимізації ГІС для геоінформаційного картографування акустичного забруднення, яка буде використовуватись для

подальшого обґрунтування прийняття ефективних управлінських рішень щодо зменшення цього забруднення.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Апостолюк С. О.* Промислова екологія: навч. пос. / С. О. Апостолюк, В. С. Джигирей, І. А. Соколовський та ін.; під ред. С. О. Апостолюк. — 2-е вид. — К.: Знання, 2012. — 456 с.
2. *Иванов Н. И.* Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом: учебник / Н. И. Иванов. — М.: Университетская книга, Логос, 2008. — 424 с.
3. *Електронний ресурс:* http://www.nbu.gov.ua/old_jrn/Soc_Gum/NZTNPU/geogr/2009_2/5/001Petlin.pdf
4. *Самойлюк Е. П.* Борьба с шумом в градостроительстве. Киев, «Будивельник», 1975, 128 с.
5. *Абракітов В. Е.* Картографування шумового режиму центральної частини міста Києва: монографія / В. Е. Абракітов. — Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. — Х.: ХНАМГ, 2012. — 230 с.
6. *ДБН В.1.1-31:2013.* Захист територій, будинків і споруд від шуму. — К.: Мінрегіон України. 85 с.
7. *Закон України «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення»*
8. *Борьба с шумом в городах: Совм. сов.-фр. изд.* / В. Н. Белоусов, Б. Г. Прутков, А. П. Шицкова и др. — М.: Стройиздат, 1987. — 248 с.
9. *Зацерковний В. І.* ГІС і бази даних / В. І. Зацерковний, В. Г. Бурачек, О. О. Железняк, А. О. Терещенко. — Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2014. — 492 с.
10. *Казаков И. Е.* Статистическая динамика нелинейных автоматических систем / И. Е. Казаков, Б. Г. Доступов. — Физматгиз, 1962. — 332 с.
11. *Спирина М. С.* Теория вероятностей и математическая статистика / М. С. Спирина, П. А. Спирин. — М.: Академия, 2011. — 352 с.
12. *Андерсон Т.* Введение и многомерный статистический анализ / Т. Андерсон. — Физматгиз, 1963.

Стаття надійшла до редакції 25.10.2016