

УДК 628.517

Л.М. Цитрицька

Державний університет телекомунікацій, Київ

## ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗУ СИСТЕМИ ЗНИЖЕННЯ ВІБРОАКУСТИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ОПЕРАТОРІВ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

*В статті обґрунтовуються елементи методики синтезу автоматичної системи зниження віброакустичного випромінювання, побудованої на основі активних методів шляхом накладення на початкове віброакустичне поле компенсуючого впливу. Робиться висновок, що для структурної стійкості синтезованої системи необхідно здійснювати управління за показником віброшвидкості.*

**Ключові слова:** методи зниження шуму, віброакустичне поле, авіаційний шум.

### Вступ

**Актуальність теми досліджень.** Одним із актуальних завдань з удосконалення автоматизованих систем управління повітряним рухом є створення належних та сприятливих умов праці на робочих місцях операторів. На сучасному етапі розвитку систем управління з оператором в контурі управління багато досліджень приділяється психологічному, нервовому та емоціональному перевантаженню операторів автоматизованих систем, в тому числі і диспетчерів управління повітряним рухом. Ефективність їх роботи, фізіологічний стан, продуктивність та самопочуття безпосередньо впливають на безпеку польотів повітряних суден. До сукупності чинників, що впливають на ефективність роботи операторів, також відноситься тривала робота в умовах підвищеного рівня акустичних шумів. Такі умови навколишнього середовища приводять до зниження гостроти слуху, зміни кров'яного тиску, послаблення уваги, значного збільшення витрат енергії на виконання інтелектуальної роботи, сприяє виникненню головних болів, розладу нервової системи тощо. Таким чином, зниження рівня шумового забруднення на робочих місцях операторів являється актуальним завданням.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Огляд та дослідження напрямків вирішенню такого завдання показує, що йому присвячено багато наукових та методичних праць Дідковський В.С., Запорожець О.І, Токарев В.І., Квитка В.С., Мельников Б.Н. та інші [1 – 8], рекомендацій всесвітньої організації

охорони здоров'я та інші нормативні документи. Але вплив авіації на навколишнє середовище є наслідком її виробничої діяльності в інтересах функціонування економіки держави.

Одним із заходів боротьби з авіаційними шумовими забрудненнями є діюча система вітчизняних та міжнародних стандартів ІКАО нормування і контролю шуму літаків, що розробляються та знаходяться в експлуатації.

Взагалі до обмеження шуму літаків цивільної авіації існує два підходи. У першому, з урахуванням санітарно-гігієнічних вимог, припустимі рівні шуму встановлюються з умов, за якими несприятливий вплив шуму на людину не виявляється, або виявляється незначно. У другому – використовуються принципи технічного нормування шуму, що дозволяють регламентувати шум літаків на підставі апробованих і технічно досяжних методів зменшення акустичного випромінювання.

**Постановка задачі в загальному вигляді.** У теперішній час разом з традиційними методами зниження шуму та вібрацій використовуються методи зменшення амплітуд вібрацій (звукового тиску) при складанні декількох коливальних або хвильових процесів. Формування відповідних амплітуд і фаз, наприклад, звукового поля, дозволяє отримати сприятливу інтерференцію і ослабити початкове акустичне поле. При активних методах компенсації вібрації і звукового поля створюються необхідні амплітудно-фазові характеристики компенсуючого поля, яке спеціально створюється виконавчим пристроєм. При накладенні компенсуючого поля на по-

чаткове можна отримати ефект ослаблення початкового поля в заданих областях. Найбільш ефективно застосування даного методу зменшення інтенсивності віброакустичних полів в області низьких частот, де традиційні методи важко реалізувати.

Розглянемо декілька можливих напрямків застосувань активних методів зниження віброакустичного навантаження.

Локальна компенсація акустичного поля, що сприймається вухом людини, досягається шляхом застосування динамічних навушників, обладнаних мікрофоном та спеціальним електронним блоком фазообертання початкового сигналу на 180 градусів з амплітудою, що дорівнює амплітуді первинного поля у локальній зоні компенсації. При цьому, ослаблення сигналу, що сприймається вухом досягається в області низьких частот 12 – 17 дБ.

Компенсація плоского звукового поля, відбитого від стін приміщення, досягається шляхом встановлення поблизу поверхні стіни системи «мікрофони – електронні блоки фазообертання» і «посилення сигналу – повторні випромінювачі». На виході повторних випромінювачів створюється звукове поле із заданими амплітудно-фазовими характеристиками таким чином, щоб компенсувати первинне звукове поле.

Таким чином, для реалізації активних методів зниження рівня віброакустичного сигналу необхідно синтезувати автоматичну систему, на яку покладаються функції обробки інформації від сукупності віброакустичних датчиків та вироблення управляючого сигналу на виконавчий пристрій що створює компенсуюче віброакустичне поле.

**Метою даної статті** є забезпечення структурної стійкості синтезованої автоматичної системи зниження вібраційного навантаження.

## Основна частина

Дослідження постановки завдання в загальному вигляді дозволяють виявити кілька наукових та методичних проблемних питань:

- який принцип управління (за відхиленням, за збудженням, комбінований) необхідно покласти в основу синтезованої системи?
- аналогову чи цифрову систему треба синтезувати для відповідності сформульованим вимогам?
- наявність зворотного зв'язку в контурі управління, за яким параметром віброакустичного поля будувати зворотній зв'язок?
- за якими алгоритмами здійснювати обробку параметрів первинного віброакустичного поля в цифровій автоматичній системі?
- яка повинна бути структура вищезазначеної системи, щоб забезпечити її структурну стійкість?
- які значення параметрів елементів системи повинні бути для забезпечення параметричної стійкості системи та для виконання вимог за показниками якості перехідних процесів.

Для вирішення даних часткових завдань синтезовані та проаналізовані різні види систем. Функціональна схема системи в режимі ручного керування для зниження вібрації на затиснутій пластині має в своєму складі такі елементи:

Ус – підсилювач із регулюванням коефіцієнта підсилення  $K_{ус}$ ;

ПЗФ – пристрій зсуву фаз із регулюванням  $\varphi_K$ , який доцільно побудувати на основі тиристорно-конденсаторної схеми управління фазою;

ВП – виконавчий вібраційний пристрій зі штоком, прикріпленим до пластини;

ОУ – об'єкт управління – затиснута пластинка;

ВД – вимірювальна система на основі вібродатчика, що встановлено на пластині, та двох інтеграторів, що видають сигнал пропорційний вібропереміщенню  $W(t)$ ;

СІ – система індикації з показником логарифмічного рівня віброприскорення  $L_a$ .

Дана система призначена для компенсації віброакустичного випромінювання пластини за критерієм мінімуму рівня вібрації

$$\min \{L_a = 20 \lg(a/g)\}.$$

Розглянемо особливості управління системою.

Слід зазначити, що на практиці таку систему можна використовувати для компенсації тільки стабільних по амплітуді й частоті вібрацій. Однак, для дослідницьких цілей запропонована система має важливе значення й може застосовуватися для налаштування, електричного узгодження й підбору параметрів функціональних блоків.

Управління системою здійснюється двома регуляторами – коефіцієнтами підсилення  $K_{ус}$  і фази  $\varphi_K$ . Початкове положення регуляторів:

$$K_{ус}=0; \quad \varphi_K=0.$$

Після подачі збуджуючої сили  $F_F$  від ВП із штоком, що живиться від генератора еталонних сигналів, необхідно спостерігати за показником рівня вібрації. Для зниження рівня вібрації необхідно підібрати за рахунок регулювання значення  $K_{ус}$  та  $\varphi_K$ , які приводять в мінімум  $L_a$ . При цьому доцільно керуватися правилом, що засновано на принципі максимуму Л.С. Понтрягина:

1) регулювання проводяться окремо за кожним параметром зі спостереженням значення  $L_a$  у сталому режимі, тобто після завершення перехідного процесу;

2) регулюванням  $K_{ус}$  домогтися  $\min L_a$ , потім приступити до регулювання  $\varphi_K$  також у напрямку зменшення значення  $L_a$ ;

3) виконати кілька ітерацій кроку 2 для досягнення  $\min L_a$ .

Так як залежність  $L_a = f(K_{ус}, \varphi_K)$  має яскраво виражений нелінійний характер, що пояснюється поширенням механічних коливань уздовж пластини, то ця залежність може мати кілька локальних мінімумів.

Для знаходження основного екстремуму треба розрегулювати систему й спробувати тим же методом визначити інший мінімум.

Дослідження доцільно виконувати для різних вхідних величин з урахуванням меж варіювання  $U_F$ ,  $\omega_F$ ,  $x$ . Результати звести в таблиці для подальшого якісного аналізу можливості зниження рівня вібраційного навантаження. На основі функціональної схеми системи можна побудувати структурну схему системи автоматичного управління (САУ). Припущення, що прийняті при побудові:

1) об'єкт управління (пластина) описується коливальною ланкою з передаточною функцією;

2) виконавчий пристрій описується аперіодичною ланкою;

3) ПЗФ описується ланкою із запізнюванням:

$$W_{\text{ПЗФ}}(p) = e^{-p\tau};$$

4) ВД описується ідеальною підсилювальною ланкою:

$$W_{\text{ВД}}(p) = K_{\text{ВД}}.$$

З урахуванням прийнятих допущень синтезована структурна схема автоматичної системи. Для дослідження її стійкості необхідно визначити передавальну функцію замкнутої системи та проаналізувати характеристичний поліном – знаменник замкненої передавальної функції.

Аналіз характеристичного полінома (знаменника в передаточній функції) показує, що коефіцієнт при  $p^1$  дорівнює нулю.

Отже, система є структурно нестійкою.

Для того, щоб система була структурно стійкою необхідно тільки одна інтегруюча ланка ( $1/p$ ) у ланцюзі зворотного зв'язку. Тобто керування необхідно здійснювати тільки за сигналом віброшвидкості.

Для підбору параметрів системи з метою електричного узгодження функціональних блоків необхідно визначити експериментальним шляхом:

амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) вібропереміщення виконавчого пристрою збуджуючої сили  $F_F$ ;

амплітудно-частотну характеристику віброприскорення штока виконавчого пристрою збуджуючої сили  $F_F$ ;

фазо-частотну характеристику (ФЧХ) вібропереміщення виконавчого пристрою (зсув фаз, який обумовлений запізнюванням переміщення пружного дифузора та штока):

$$\phi_w(\omega) = \phi_{\text{штока}}(\omega) - \phi_0,$$

де  $\phi_{\text{штока}}(\omega)$  – фаза гармонійного коливання штока виконавчого пристрою залежно від частоти  $\omega$ ;

$\phi_0$  – фаза живлючої напруги, що дорівнює, як правило, нулю;

АЧХ і ФЧХ для виконавчого пристрою компенсуючої сили:

$$A_{\text{вк}}(\omega), A_{\text{ак}}(\omega), \phi_{\text{вк}}(\omega).$$

Характеристики вібродатчика доцільно використати ті, що заявлені виробником і викладені в Технічному описі.

На основі зазначених характеристик, їх виду, можливості опису аналітичними залежностями, приймається рішення про вибір однієї зі стратегій побудови системи автоматичного управління:

1) побудова системи автоматичного управління з аналоговою обробкою сигналу – автоматичного регулятора амплітуди й фази компенсуючого сигналу;

2) побудова системи автоматичного управління із цифровою обробкою сигналу й автоматичним підбором параметрів  $U_K$  та  $\phi_K$  чисельними методами за рахунок алгоритмів, реалізованих в ПЕОМ.

До переваг першої стратегії відносяться:

- висока швидкодія системи, що дозволяє з мінімальним значенням часу перехідного процесу реагувати на зміну віброакустичного сигналу;

- невеликі габарити регулятора, що дозволяє виготовити його на одній електронній платі.

Однак недоліки більш суттєві:

- складність схемної реалізації спеціалізованого аналогового обчислювача, що враховує всі характеристики об'єкта управління, виконавчого пристрою та вимірювальної системи (так як АЧХ і ФЧХ мають нелінійний вигляд, то даний факт ще більше ускладнює реалізацію схеми);

- невисока точність регулятора, обумовлена шумами й перешкодами, а також зміною параметрів напівпровідникових елементів;

- складність реалізації методів оптимальної фільтрації та ідентифікації для синтезу адаптивного регулятора;

- внаслідок високих частот і малих амплітуд вібраційного сигналу викликає великий сумнів щодо стійкості функціонування автоматичного регулятора. Разом з тим, підвищення запасу стійкості схемними методами приведе до підвищеної нечутливості, збільшенню коефіцієнта астатизму, зростанню статичної помилки регулювання та, як наслідок, до погіршення якості компенсації вібраційного сигналу.

Зазначених недоліків, в основному, позбавлені САУ із цифровою обробкою сигналу, побудовані на основі ПЕОМ. Однак, таким системам теж властиві такі недоліки:

- відносно невисока швидкодія, що обумовлено обробкою сигналу в ПЕОМ чисельними методами і тривалими операціями аналого-цифрових і цифро-аналогових перетворень;

- програмна складність реалізації методів оптимальної фільтрації та ідентифікації при реалізації оптимального управління в самонастроюваних САУ.

Зазначені недоліки також можуть привести до нестабільної роботи системи в перехідному процесі. Однак, аналіз переваг і недоліків показав доцільність побудови цифрової системи автоматичного управління. До одних із головних переваг цих систем варто віднести універсальність цифрових САУ – можливість перенастроювання за допомогою програмних методів для різних об'єктів управління при компенсації віброакустичного сигналу.

### Висновки

Таким чином, проведені дослідження дали такі результати:

1) запропонована система автоматичного управління з аналоговою обробкою сигналу є регулятором з ручним керуванням, що дозволяє досліджувати якісну картину компенсації віброакустичного сигналу на затиснутій пластині.

2) даний регулятор має порівняно просту схему реалізацію й дозволяє досліджувати параметри виконавчих пристроїв при різних положеннях вібродатчика на пластині.

3) одержані АЧХ і ФЧХ виконавчих пристроїв можна використати при синтезі самонастроюваної САУ.

4) дослідження стійкості запропонованої системи показали, що при реалізації негативного зворотного зв'язку по вібропереміщенню, система буде структурно-нестійкою. Зроблено висновок про регулювання тільки по віброшвидкості.

5) порівняльний аналіз переваг та недоліків аналогових і цифрових систем автоматичного управління показав, що аналогові адаптивні регулятори характеризуються істотною складністю апаратної реалізації та можливою нестійкістю функціонування. Підвищення запасу стійкості приводить до погіршення якості компенсування вібрації, що, в остаточному підсумку, демонструє обмеженість застосування таких САУ.

6) зроблено висновок про доцільність синтезу цифрової САУ, яка може мати властивості оптимального управління та високу точність регулювання.

### Список літератури

1. Liu B. Sound transmission through curved aircraft panels with stringer and ring frame attachment / B. Liu, L. Feng, A. Nilsson // *Journal of sound and vibration*. – 2007. – 300. – P. 949-973.
2. Soedel W. *Vibration of shells and plates* / W. Soedel. – Marcel Dekker, Inc., 2004. – 553 p.
3. Барабаш О.В. Рекомендації щодо створення адаптивної системи планування розподілу повітряного простору / О.В. Барабаш, Д.М. Обідін, Р.В. Хращевський // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – К.: ЦНДІ НіУ, 2012. – Вып. 3(23). – С. 13 – 17.
4. Барабаш О.В. Модель баз знань інтелектуальної системи управління високошвидкісного рухомого об'єкта на основі її верифікації / О.В. Барабаш, Д.М. Обідін, А.П. Мусієнко // *Системи обробки інформації : збірник наукових праць*. – Х.: ХУПС, 2014. – № 5 (121). – С. 3 – 6.
5. Пекуровський Г.В. Налаштування параметрів ПД-регулятора при синтезі адаптивної системи автоматичного управління активною компенсацією вібрації / Г.В. Пекуровський, О.В. Барабаш // *Системи озброєння і військова техніка : науковий журнал* – Х.: ХУПС, 2013. – №4(32). – С. 139 – 142.
6. Пекуровський Г.В. Експериментальна лінеаризація адаптивної системи автоматичного управління активною компенсацією вібрації / Г.В. Пекуровський, О.В. Барабаш // *Системи озброєння і військова техніка : науковий журнал* – Х.: ХУПС, 2013. – № 1 (33). – С. 112 – 114.
7. Барабаш О.В. Експериментальний синтез адаптивної системи активної компенсації вібрації на основі використання ПД-регулятора / О.В. Барабаш, Г.В. Пекуровський // *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета и Северо-восточного научно-исследовательского центра Транспортной академии Украины*. – Х.: ХНАДУ, 2012. – Вып. 59. – С. 168 – 173.
8. Пекуровський Г.В. Обґрунтування математичної апарату ідентифікації моделі об'єкта управління на основі експериментальної верифікації адаптивних засобів зниження віброакустичного навантаження на авіаційних панелях / Г.В. Пекуровський, О.В. Барабаш // *Системи управління, навігації та зв'язку*. – К.: ЦНДІ НіУ, 2012. – Вып. 2(22). – С. 93 – 96.

Надійшла до редколегії 18.09.2014

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Ю.В. Кравченко, Державний університет телекомунікацій, Київ.

### ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРНОГО СИНТЕЗА СИСТЕМЫ СНИЖЕНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ НА ОПЕРАТОРОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Л.Н. Цитрицкая

*В данной статье обосновываются элементы методики синтеза автоматической системы снижения виброакустического излучения, которая построена на основе активных методов путем наложения на исходное виброакустическое поле компенсирующего воздействия. Делается вывод, что для структурной устойчивости синтезированной системы необходимо осуществлять управление по показателю виброскорости.*

**Ключевые слова:** методы снижения шума, виброакустический поле, авиационный шум.

### FEATURES STRUCTURAL SYNTHESIS OF REDUCING VIBROACOUSTIC OPERATOR FATIGUE COMPLEX SYSTEMS

L.N. Tsitritskaya

*In this article the elements of the synthesis procedure of automatic reduction system vibro-acoustic radiation, which is based on active methods by applying the original vibroacoustic field compensating effects. It is concluded that the structural stability of the synthesized system must be controlled in terms of vibration.*

**Ke words:** methods to reduce noise, vibroacoustic field, aircraft noise.