

Библиографические ссылки

1. Алхимов, А. В. Моделирование турбулентности при пространственном обтекании цилиндра дозвуковым потоком [Текст] / А. В. Алхимов, А. А. Приходько // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. – № 4. – Т. 22. – 2014 – С. 14 – 22.
2. Аржанников, Н. С. Аэродинамика [Текст] / Н. С. Аржанников, В. Н. Мальцев. – М.: Оборонгиз, 1956. – 483с.
3. Белов, И. А. Моделирование турбулентных течений [Текст] / И. А. Белов, С. А. Исаев. – С.-Пб.: Балт. техн. ун-тет, 2001. – 108 с.
4. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование в механике сплошных сред [Текст] / О. М. Белоцерковский.–М.: Физматлит, 1994. – 448 с.
5. Белоцерковский, О. М. Численное моделирование нестационарного периодического течения вязкой жидкости в следе за цилиндром [Текст] / О. М. Белоцерковский. – Ж. вычисл. и мат. физ. – 1984. – Т. 24. – С. 1207–1216.
6. Ван-Дайк, М. Альбом течений жидкости и газа [Текст] / М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986.–184 с.
7. Гарбарук, А. В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений [Текст] / А. В. Гарбарук, М. Х. Стрелец, М. Л. Шур. – С-Пб.: Изд-во Политех. ин-та, 2012. – 88 с.
8. Приходько, О. А. Численное моделирование нестационарных несжимаемых течений на основе уравнений Навье-Стокса в произвольной системе координат [Текст] / О. А. Приходько, Д. А. Редчиц. – Прикл. гидромеханика, 2005. – Т.7(79). – №1. – С. 56–71.
9. Фрост, У. Турбулентность. Принципы и применение [Текст] / У. Фрост, Т. Моулден. – М.: Мир, 1980. – 535 с.
10. Чжен, П. Отрывные течения [Текст] / П. Чжен. – М.: Мир, 1972–1973. – Т. 1–3.
11. Elsbury, S. Integrated rocket Ramjet [Text]/S. Elsbury, N. Randall, C. Sundquist, R. Willis advised by Dr. John Crepeau, Dr. Tao Xing. – Engineering design EXPO2015, University of Idaho, poster presentation.–1 p.
12. Sume, B. Hydrodynamics around cylindrical structure [Text] / B. Sume, J. Fredsoe. – Singapore. World Scientific, 2006. –530 p.

Надійшла до редколегії 02.06.2015

УДК 621.43

О. М. Губа, О. В. Золотько, О. Є. Золотько

Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗНИЖЕННЯ АКУСТИЧНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ ВИСОКОШВИДКІСНОГО РЕАКТИВНОГО СТРУМЕНЯ ДЕТОНАЦІЙНОГО ДВИГУНА

Проведено порівняльний аналіз спектрів шуму турбореактивних і детонаційних двигунів. Виконано експертну оцінку можливих альтернативних способів вирішення проблеми зниження шуму детонаційних двигунів. Методом аналізу ієрархій обґрунтовано вибір ежекторних насадків як раціональних пристроїв для зменшення рівня шуму.

Ключові слова: спектр шуму, детонаційний двигун, аналіз, ієрархія, ежектор, пристрій.

Проведен сравнительный анализ спектров шума турбореактивных и детонационных двигателей. Выполнена экспертная оценка возможных вариантов альтернативных решений проблемы уменьшения шума детонационных двигателей. Методом анализа иерархий обоснован выбор ежекторных насадков в качестве рационального устройства снижения уровня шума.

Ключевые слова: спектр шума, детонационный двигатель, анализ, иерархия, ежектор, устройство.

© О. М. Губа, О. В. Золотько, О. Є. Золотько, 2015

The comparative analysis of a turbojet and a detonation engine noise spectrum is investigated. An expert estimation of an alternative design of a reduction noise device is performed. The ejector as a device for reduction noise level was well grounded by the method of a hierarchy analysis.

Key words: noise spectrum, detonation engine, analysis, hierarchy, ejector, device.

Вступ. Детонаційним двигунам притаманні надвисока швидкість вивільнення хімічної енергії і термодинамічна досконалість термодинамічного процесу, яка має низький рівень зростання ентропії та високі темпи роботи циклу (порівняно з найбільш поширеними в авіаційному та ракетному двигунобудуванні циклами Брайтона й Гемфрі). Завдяки своїй високій енергоефективності, простоті й технологічності конструкції детонаційні двигуни в найближчій перспективі розглядають як найбільш прогнозовану й обґрунтовану заміну традиційних авіаційних та ракетно-космічних двигунів. Результати численних експериментальних досліджень підтверджують високі характеристики двигунів детонаційного згорання. Так, протягом 2010 – 2013 рр. фірма «Aerojet Rocketdyne» (США) провела близько 520 успішних вогневих випробувань різноманітних модифікацій двигунів безперервної детонації в щільній камері згорання. Водночас для успішної практичної реалізації концепції переходу до двигунних установок нового типу необхідно вирішити низку принципових науково-технічних проблем. Однією з них є проблема підвищеного рівня шуму детонаційних двигунів.

Мета нашого дослідження полягає у вивченні існуючих методів зниження рівня шуму надзвукового реактивного струменя сучасної авіаційної техніки для оцінки можливості їх застосування в ході використання детонаційних двигунів. Для досягнення цієї мети поставлено такі **завдання**: аналіз джерел шуму двигунних установок, детальне вивчення і зіставлення спектрів шуму реактивного надзвукового струменя та спектра шуму детонаційного двигуна, проведення порівняльного аналізу різних методів зниження шуму із застосуванням методу аналізу ієрархічної структури.

Результати дослідження. Проблема зниження рівня шуму літальних апаратів існує з п'ятдесятих років минулого століття, коли було створено перші реактивні пасажирські літаки. Зі збільшенням кількості авіаційних перевезень зростає рівень негативного екологічного впливу на довкілля. У результаті використання сучасної авіаційної техніки відбувається емісія шкідливих речовин в атмосферне повітря та акустичне його забруднення.

Джерелами акустичного впливу двигунних установок літальних апаратів на природне середовище та людину є компресори, вентилятори, турбіни, камери згорання і вихлопний струмінь двигуна, «внесок» якого в загальний рівень шуму двигуна. Розробка та впровадження двоконтурних турбореактивних двигунів замість одноконтурних дозволили знизити загальний рівень шуму за рахунок удосконалення технічних й акустичних характеристик їх джерел, але вплив високошвидкісного струменя залишився вирішальним.

Відповідно до рішень, прийнятих ІКАО (Міжнародна організація цивільної авіації), у 2013 р. екологічні вимоги до авіаційної техніки стали більш жорсткі із урахуванням норм щодо рівнів шуму для населених пунктів. У сучасних умовах виконання вимог розділу 4 норм ІКАО зі зниження рівня шуму від двигунної установки літального апарата можна забезпечити:

- відсутністю вхідних напрямних лопаток компресорів;
- звукопоглинальними розподільними кільцями;
- оптимізацією кількості лопаток вентилятора і статора;
- зниженням швидкості витoku продуктів згорання;
- використанням акустичних зазорів турбін;
- акустичним облицюванням.

Застосування даних принципів дозволяє дещо знизити рівень акустичного випромінювання, що загалом не сприяє суттєвому поліпшенню екологічної обстановки у зв'язку зі зростанням інтенсивності використання літальних апаратів. Проблема значно загострюється в разі використання перспективних детонаційних двигунів. Для виконання вимог ІКАО необхідне зниження шуму струменя двигуна на величину близько 20 EPNdB. Водночас стосовно економічності польоту пристрій для зниження шуму повинен забезпечувати зменшення акустичного випромінювання не менше ніж на 4 EPNdB на 1% втрати тяги двигуна.

Шум надзвукового струменя – аеродинамічний, він утворюється в результаті взаємодії повітряного потоку із навколишнім середовищем, тобто причиною його появи є рух повітряного потоку. Розрізняють випадки потрапляння у газове середовище, яке знаходиться у спокої відносно сопла (затоплений простір), а також у рухоме середовище, тобто в супутній і зустрічний потоки. Залежно від співвідношення тиску на перерізі сопла до тиску навколишнього середовища виділяють два класи струменів: ізобаричні та неізобаричні, які, у свою чергу, поділяють на перерозширені та недорозширені. Характерною особливістю неізобаричного надзвукового струменя є суттєва нерівномірність газодинамічних параметрів потоку в поздовжньому та поперечному напрямках. Тобто газ має невелику швидкість у радіальному напрямку, що приводить до появи складної течії з областями розширення й стискання й до появи ударних хвиль. При цьому радіальна компонента швидкості газу біля межі струменя може декілька разів змінювати свій напрямок, поки не стане незначною. Така особливість обумовлює те, що на деякій відстані від перерізу сопла межа струменя може формувати послідовність характерних бочкоподібних структур, кількість і геометрія яких залежить від газодинамічних параметрів витікання струменя та геометричних характеристик сопла.

Природа акустичного випромінювання високошвидкісного струменя пов'язана із наявністю у його зсувних шарах численних турбулентних вихрів різного масштабу, які взаємодіють із структурою струменя та генерують акустичне випромінювання в навколишнє середовище.

Вивчення особливостей спектрів шуму турбулентного потоку [1] виявило залежність його складників від напрямку акустичного випромінювання. Спектр шуму струменя в разі зміни кута α суттєво змінюється (Рис. 1): за збільшення величини α поступово зростають рівні низькочастотних складників шуму в результаті зростаючого впливу конвективного підсилення звуку. Крім зазначеного ефекту конвекції зі зростанням частоти звуку значно підсилюється інший ефект відхилення звуку від осі, пов'язаний із наявністю градієнтів швидкості й температури потоку. При цьому відбувається аналогічне зростання частки низькочастотних складників у спектрі. Найбільш суттєва зміна спектрів шуму відбувається за великих значень кута спостереження $\alpha = 45 - 90^\circ$.



Рис. 1. Характерна діаграма направленості спектра шуму надзвукової хвилі [1]

У шумі надзвукового струменя виділяють три базові складники: шум турбулентного змішування, ширококутовий ударно-хвильовий шум і дискретний тон (інтенсивний звук на одній частоті). Нижче наведено зображення типового шуму надзвукового недорозширеного струменя, виміряного під кутом 60° [7] (Рис. 2).

Особливості оформлення цих складників можна описати таким чином. Ударно-хвильовий шум можна виявити тільки за наявності бочкоподібної газодинамічної структури потоку. Потужність його випромінювання пов'язана з кінетичною енергією струменя і не залежить від температури. Такий шум переважає в напрямку проти течії струменя, його спектр може містити кілька піків. У разі збільшення кута спостереження область ударно-хвильового шуму зміщується в напрямку високих частот.



Рис. 2. Типовий шум надзвукового струменя [2]

Дискретний тон безпосередньо пов'язаний із ударно-хвильовим шумом струменя. Головна відмінність у механізмі формування цього складника шуму полягає в наявності явища зворотного акустичного зв'язку. Його можна пояснити тим, що ударно-хвильовий шум, випромінюваний біля меж газодинамічних бочок, рухаючись у напрямку, протилежному течії струменя, впливає на тонкий шар змішування біля сопла. Це зумовлює підсилення збурень у даній автоколивної системі, у ній розвиваються коливання на певній частоті, що обумовлює збільшення амплітуди пульсацій, тобто генерування коливань дискретного тону в спектрі шуму надзвукового неізобаричного струменя.

Слід зауважити, що визначення дискретного тону в спектрі шуму суттєво залежить від методики проведення акустичних досліджень. У разі використання захисного ковпачка на мембрані мікрофона дискретні тони згладжуються (Рис. 3), хоча в його спектрі наявні всі вказані вище складники.

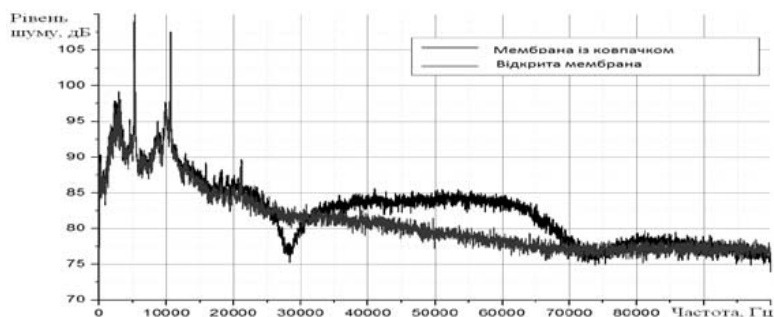


Рис. 3. Вплив використання захисного ковпачка мікрофона на форму спектра шуму надзвукового струменя [3]

Нижче зображено реальний спектр шуму детонаційного двигуна, отриманий у [8] (Рис. 4). Оскільки вихідний струмінь детонаційного двигуна також надзвуковий, його спектр має бути наближеним до спектра шуму струменя турбореактивного двигуна.

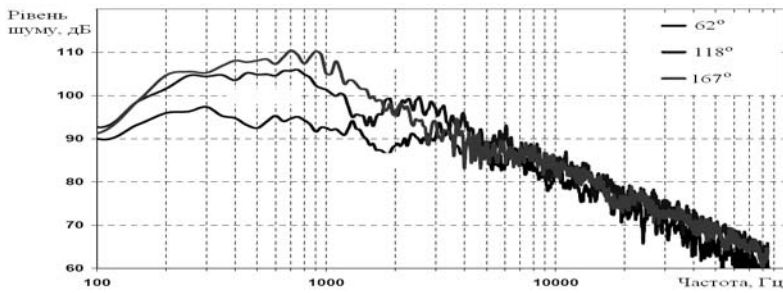


Рис. 4. Спектр шуму детонаційного двигуна [4]

Як бачимо (Рис. 4), спектр шуму детонаційного двигуна за своїми характеристиками і спектрам аналогічний наведеному вище спектру шуму надзвукового реактивного струменя: у ньому також можна виділити зони турбулентного змішування та ударно-хвильову зону. Що стосується дискретного тону, то він менш виразний у зв'язку з використанням під час проведення експерименту мікрофона, захищеного ковпачком зі звукопоглинального матеріалу. Можна також побачити залежність спектра шуму від кута спостереження: шум має направлений характер, але в разі збільшення кута спостереження його максимум зміщується у височастотну область. Еквівалентний рівень шуму надзвукового реактивного струменя складає 95 – 97 дБА, а вихідний струмінь детонаційного двигуна створює шум 97 – 112 дБА. Таким чином, проаналізувавши спектри шуму турбореактивного та детонаційного двигунів, можна зробити висновок про їх подібність, а отже, для останніх можна оптимізувати вживання загальних заходів зі зменшення рівня шуму.

Усі існуючі методи та засоби зниження акустичного випромінювання струменя з урахуванням природи генерації звуку та способів його поширення можна розділити на такі:

1. Зниження градієнта середньої швидкості, у результаті чого зменшується частка зсувного шуму струменя.
2. Відбиття та екранування шуму струменя в потрібних напрямках.
3. Зміна ударно-хвильової структури струменя за рахунок перебудови структури стрибків ущільнення в потоці.
4. Керування розвитком турбулентності в шарі змішування струменя зумовлює зміну частотного балансу енергії акустичного випромінювання струменя.
5. Взаємне знешкодження акустичних хвиль у разі їх підсумовування із протифазними.

До сучасних напрямків зниження рівня шуму двигунів можна віднести використання газових екранів, багатотрубчастих насадків, розсікачів основного потоку, вихорогенераторів (табів і шевронів), вдування мікроструменів, використання ежекторів різних типів. Проаналізуємо їх основні особливості.

Метод використання газового екрана [3] заснований на обдуванні високошвидкісного струменя повільним кільцевим потоком. При цьому відбувається зниження рівня турбулентності та поперечний градієнт швидкості. Кільцевий потік під час зниження шуму виконує функцію перепони на шляху поширення звуку. Ефект зниження рівня шуму посилюється в разі підвищення температури струменя, його товщини й різниці акустичних імпедансів струменя та навколишнього середовища. Результати експериментальних досліджень показали, що зниження шуму струменя у випадку застосування газового екрана сягає 20 дБ на високих частотах. Слід зазначити, що даний метод малоефективний у боротьбі із шумом у детонаційних двигунах, оскільки суттєво не впливає на низькочастотні складники спектра шуму.

У разі встановлення на переріз сопла багатотрубчастих насадків вихідний струмінь розділяється, що при водить до зниження загальної акустичної потужності потоку, зменшення кількості низькочастотних і підвищення кількості високочастотних складників у спектрі шуму. Аналогічного ефекту можна досягти, використовуючи секторне сопло, із розсікачами – плоскими перфорованими пластинами, установлюваними на центральному тілі [5].

Основний шумозаглушувальний ефект у випадку використання вихорогенератора пов'язують із утворенням поздовжніх вихорів, які впливають на структуру течії в шарі змішування струменя [9]. Найбільш відомим видом вихорогенератора є таб – невеликий виступ усередині сопла, розташований на його перерізі [10]. У результаті проведення експериментів із використанням табів у вигляді пилкоподібних насадків на соплі виявлено зниження рівня шуму на величину 5–20 дБ та заглушення дискретного тону шуму струменя. Модифікацією табів (процес їх доробки становить 40 років) стали шеврони – таби, які мали меншу відстань між окремими виступами по периметру сопла і були менш заглиблені у вихідний потік. Особливістю їх впливу на акустичні характеристики струменя є зниження рівня шуму на низьких частотах і збільшення на високих, що обумовлює зміщення максимумів спектра шуму в низькочастотну область. За результатами досліджень щодо впливу 54 різновидів шевронів на шум вихідного струменя і на величину втрати тяги двигуна встановлено, що в найкращих конфігураціях шевронів відбулося зменшення рівня шуму на ~ 3 дБ за втрат тяги приблизно 0,06 %. Слід зазначити, що оптимізація кількості шевронів дозволяє знизити низькочастотний шум без підвищення низькочастотного (від 4 до 6 дБ у разі використання на серійних двигунах Boeing – 787).

Сучасний метод боротьби з шумом – керування процесами змішування у струмені – вдвуг мікроструменів в основний потік (джерела мікроструменів розташовані по периметру сопла). Численні дослідження [4] показали можливість зниження загального рівня шуму на 1,5 – 3 дБ, низькочастотних складників – на 5 дБ і заглушення дискретного тону.

Для покращення інтенсифікації процесу турбулентного перемішування струменя використовують ежекторні насадки. Дослідження довели, що використання насадків з ежектором довжиною від 1,4 до 3 діаметра ежектора здатне знизити рівень шуму від 15 до 25 дБ. В умовах польоту такий глушник забезпечує зниження шуму на 8 дБ у разі втрат тяги не більше 4 %.

Слід зазначити, що здійснити якісний порівняльний аналіз указаних методів зниження шуму високошвидкісного реактивного струменя достатньо складно через відсутність однакових критеріїв шумозаглушення для кожного з методів: зниження загального рівня шуму струменя, зменшення рівня шуму низькочастотних складників, ефективні методи зниження дискретного тону. У літературі не завжди наведено дані про величину втрати тяги двигуна. Тому для вибору раціонального методу зниження шуму детонаційного двигуна доцільне застосування методу аналізу ієрархій, який передбачає декомпозицію проблеми та побудову домінантної ієрархічної структури у вигляді перевернутого дерева з основою біля вершини (Рис. 5).

Вершиною ієрархії є головна мета – розробка пристрою для зменшення рівня шуму. На нижчому рівні ієрархічної структури сформульовані критерії, за якими проводять експертну оцінку можливих альтернативних способів вирішення проблеми. Причому кожен елемент другого рівня є метою для всіх елементів третього (найнижчого) рівня. На цьому рівні розглядають різноманітні потенційні способи досягнення головної мети. У результаті здійснення розрахунків прийнято таку шкалу оцінювання (табл. 1).

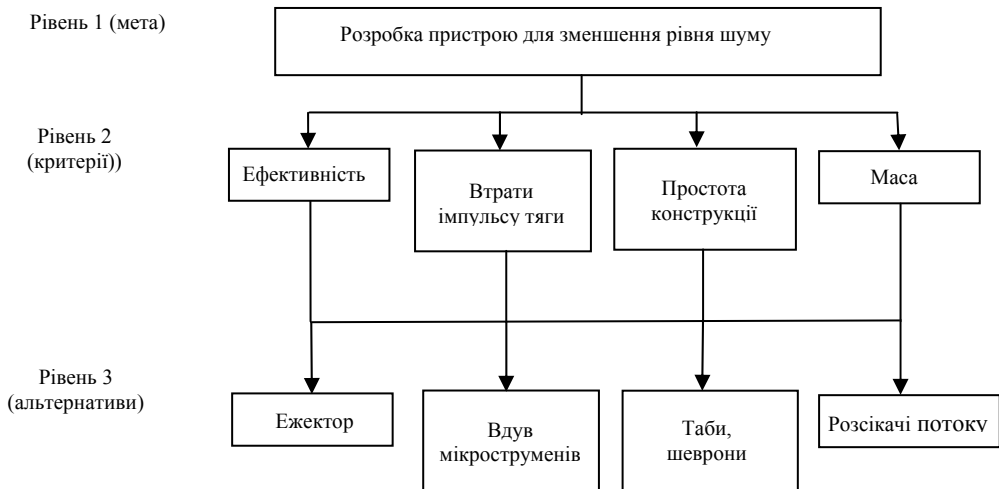


Рис. 5. Декомпозиція проблеми в ієрархію [5]

Таблиця 1

Шкала відносної вагомості

Інтенсивність відносної значущості	Зміст
1	Однакова значущість
3	Помірна перевага однієї альтернативи над іншою
5	Суттєва перевага
7	Значна перевага
9	Надзвичайна перевага
2, 4, 6, 8	Проміжні рішення між двома «сусідніми» рішеннями
Обернена величина	Якщо порівняння двох альтернатив здійснюють за допомогою одного з чисел від 1 до 9, то оцінка порівняння другої альтернативи з першою має обернену величину, тобто від 1 до 1/9

Відповідно до цієї шкали критерії другого та третього рівнів було попарно порівняно між собою (табл. 2–3) із визначенням відповідних векторів пріоритетів.

Таблиця 2

Матриця парних порівнянь і вектор пріоритетів для другого рівня ієрархії

Пристрій для зменшення рівня шуму	Ефективність	Втрати імпульсу тяги	Простота конструкції	Маса	Вектор пріоритетів
Ефективність	1	2	3	2	0,424
Втрати імпульсу тяги	0,5	1	2	2	0,271
Простота конструкції	0,33	0,5	1	1	0,145
Маса	0,5	0,5	1	1	0,161

Методику розрахунку векторів пріоритетів докладно викладено в [6], вона передбачає визначення геометричного середнього й нормалізацію компонентів власних векторів. Загальні результати синтезу пріоритетів наведено в табл. 4. Проаналізувавши дані табл. 4, можна з'ясувати, що максимальне значення глобального пріоритету отримали ежекторні шумоглушники.

Таким чином, використання ежекторних соплових насадків потенційно здатне зменшити акустичне навантаження до допустимого рівня. У техніці широко використовують циліндричні ежектори й ежектори, площа поперечного перерізу яких змінна. Циліндричні ежектори розміщують співвісно до камери двигуна,

або на певній відстані від неї. Тип ежектора, який може забезпечити максимальне заглушення шуму, та спосіб його розташування відносно камери визначають робоча частота пульсацій детонаційного двигуна, геометрія камери й соплови насадків, ступінь заповнення камери паливною сумішшю, коефіцієнт масового співвідношення компонентів палива та ін. Використання ежекторів дозволяє усунути пікові закиди тиску, особливо потужні на звукових частотах. У результаті чого відбувається утворення широкосмугового спектра акустичного випромінювання, зміщеного в ультразвукову область. Слід зазначити, що вживання заходів зі зниження рівня акустичного випромінювання суттєво не погіршує характеристики двигуна, а в деяких випадках навіть покращує їх.

Таблиця 3

Матриця парних порівнянь та вектори пріоритетів для третього рівня ієрархії

Ефективність (зниження рівня шуму)	Ежектор	Вдув мікроструменів	Таби, шеврони	Розсікачі потоку	Вектор пріоритетів
Ежектор	1	2	3	4	0,467
Вдув мікроструменів	0,5	1	2	3	0,278
Таби, шеврони	0,33	0,5	1	2	0,160
Розсікачі потоку	0,25	0,33	0,5	1	0,095
Втрати імпульсу тяги	Ежектор	Вдув мікроструменів	Таби, шеврони	Розсікачі потоку	Вектор пріоритетів
Ежектор	1	4	5	5	0,586
Вдув мікроструменів	0,25	1	3	3	0,227
Таби, шеврони	0,2	0,33	1	1	0,094
Розсікачі потоку	0,2	0,33	1	1	0,094
Простота конструкції	Ежектор	Вдув мікроструменів	Таби, шеврони	Розсікачі потоку	Вектор пріоритетів
Ежектор	1	5	0,5	0,33	0,194
Вдув мікроструменів	0,2	1	0,25	0,2	0,064
Таби, шеврони	2	4	1	2	0,406
Розсікачі потоку	0,53	5	0,5	1	0,336
Маса	Ежектор	Вдув мікроструменів	Таби, шеврони	Розсікачі потоку	Вектор пріоритетів
Ежектор	1	0,2	0,125	0,142	0,041
Вдув мікроструменів	5	1	0,2	0,25	0,118
Таби, шеврони	8	5	1	3	0,290
Розсікачі потоку	7	4	0,33	1	0,290

Таблиця 4

Загальні результати синтезу

	Ефективність (0,424)	Втрати імпульсу тяги (0,271)	Простота конструкції (0,145)	Маса (0,161)	Глобальний пріоритет
Ежектор	0,467	0,586	0,194	0,041	0,391
Вдув мікроструменів	0,278	0,227	0,064	0,118	0,207
Таби, шеврони	0,160	0,094	0,406	0,290	0,199
Розсікачі потоку	0,095	0,094	0,336	0,290	0,161

Бібліографічні посилання

1. Кузнецов, В. М. Основы теории шума турбулентных струй [Текст] / В. М. Кузнецов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 240 с.
2. Губанов, Д. А. Экспериментальное исследование влияния вихрегенераторов и подвода жидкости на шум высокоскоростных струй [Текст] / Д. А. Губанов, Н. П. Киселев, В. И. Запрягаев // Учен. зап. ЦАГИ. – 2012. – Т. 43, № 4. – С. 57–68.

3. **Мунин, А. Г.** Авиационная акустика: шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов [Текст] / А. Г. Мунин, В. Ф. Самохин, Р. А. Шипов. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
4. **Запрыгаев, В. И.** Структура течения сверхзвуковой недорасширенной струи с вдувом микроструй [Текст] / В. И. Запрыгаев, Д. А. Губанов, Н. П. Киселев // Вестн. НГУ. Сер.: Физика. – 2013. – Т. 8, № 1. – С. 44–55.
5. Пат. МПК F02K1/34 (2006.01), F01N1/24 :. – Российская Федерация. Шумоглушащее устройство [Текст] / Кочетов О. С. – № РФ 23031512007; опубл. 20.07.2007. – 54 с.
6. **Саати, Т.** Аналитическое планирование. Организация систем [Текст] / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
7. **Seiner, J. M.** Advances in high speed jet aeroacoustics [Text] / J. M. Seiner // AIAA Paper. – 1984. – P. 2275.
8. **Glaser, A.** Experimental Investigation into the Off-Design Performance of a Pulse Detonation Engine [Text] / A. Glaser, D. Allgood, E. Gutmark // AIAA Paper 2004-1208, Jan. 2004.
9. **Запрыгаев, В. И.** Flow structure at an initial section of supersonic underexpanded jet in the presence of microjet vortex generators [Text] / V. I. Zaprygaev, N. P. Kiselev, D. A. Gubanov // Proc. of XV Intern. Conf. Methods of Aerophysical Research ICMAR. – 2010. – Vol. 1. – P. 249–250.
10. **Reeder, M. F.** The impact of tab location relative to the nozzle exit on jet distortion [Text] / M. F. Reeder, K. B. Zaman // AIAA J. – 1996. – Vol. 34. – P. 197–199.

Надійшла до редколегії 31.05.2015

УДК 519.24.681

И. И. Деревянко

Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара

ОСНОВЫ ТЕОРИИ АДАПТИВНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ ВЫБОРОК ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрен алгоритм адаптивной фильтрации нестационарных стохастических выборок измерений. Представлены структурная схема адаптивной фильтрации, блок-схема разработанной компьютерной программы и результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: адаптивная фильтрация, модель измерений, структурная схема, оценка параметров, стохастический тренд.

Розглянуто алгоритм адаптивної фільтрації нестационарних стохастичних вибірок вимірювань. Подано структурну схему адаптивної фільтрації, блок-схему розробленої комп'ютерної програми і результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: адаптивна фільтрація, модель вимірювань, структурна схема, оцінка параметрів, стохастичний тренд.

We review the algorithm of adaptive filtering of non-stationary stochastic sampling measurements. The block diagram of an adaptive filter, a block diagram of developed computer programs and results of numerical experiments are presented.

Key words: adaptive filtering, measurement model, block diagram, parameter estimation, stochastic trend.

Введение. Информация о состоянии нестационарных объектов неразрушающего контроля и технической диагностики содержится в измерениях их параметров, стохастические закономерности которых неизвестны, измерения искажены