

УДК 621.3.049.77 : 629.735.051 : 681.323 : 533.6.013 (045)

С.С. Товкач¹, Є.О. Шквар²¹ Національний авіаційний університет «НАУ», Київ, Україна² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

МІКРОЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ЯК ІННОВАЦІЙНИЙ ЗАСІБ УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ ТЕХНІЧНИМИ СИСТЕМАМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ

Розглянуто перспективний метод адаптивного управління пристінною динамікою турбулентних течій з використанням перспективної технології, що ґрунтується на мікроелектромеханічних системах (MEMS). Висвітлені переваги і недоліки відомих пасивних та активних методів управління турбулентним обміном, проаналізовані принципи організації та функціонування MEMS, визначено пріоритети побудови математичних моделей цих систем на основі методу моделювання великих вихорів (LES - Large Eddy Simulation). Залежно від рівня досконалості MEMS системи запропонована подальша реалізація кількох рівнів складності та довершеності стратегій управління.

Ключові слова: мікроелектромеханічні системи (MEMS), адаптивне інтерактивне управління, турбулентна пристінна течія, мікромашинна технологія.

Вступ

Постановка проблеми. Протягом останніх років в світі відбувається активізація розвитку та впровадження одного з провідних напрямків науково-технічного прогресу – інтеграції найсучасніших здобутків в галузі електронних та механічних систем на нанотехнологічній базі, яка призвела до появи нового класу об'єктів комплексної структури з широким діапазоном різноманітних сфер використання – мікроелектромеханічних (MEMS) систем. Запорукою успішного поширення та інтенсивного практичного застосування MEMS в різних високотехнологічних сферах є, перш за все, чисто економічні фактори.

Відомо, що масове виробництво мікросхем надзвичайно дешево. У той же час класичні промислові технології, використовувані при виготовленні традиційних електромеханічних пристроїв, характеризуються різким збільшенням собівартості виробництва в міру зниження лінійних розмірів (і зростання точності виготовлення) деталей механічних систем.

Цим і обумовлені спроби виготовлення як окремих елементів механічної частини, так і всього виробу єдиному технологічному виробничому процесі, що при масовому виробництві значно зменшує собівартість всього електромеханічного блоку. Крім того, кінцевий виріб виходить функціонально повним з мікрометровими розмірами та з мінімальним енергоспоживанням.

Аналіз досліджень. У даний час, увібравши в себе ноу-хау мікроелектроніки, точної механіки і ряду інших специфічних технологій, сформувалася сукупність технологічних процесів, що дозволяють

створювати різні елементи мікроелектромеханічних пристроїв. На цій основі виробляється широкий спектр мініатюрних пристроїв різного застосування з розмірами елементів від декількох мікрометрів до декількох міліметрів.

Такі пристрої з елементами механіки, що включають сенсори, виконавчі елементи та джерела енергії, отримали назву мікроелектромеханічних систем. Області їх застосування охоплюють обчислювальну техніку і телекомунікації, біологію, медицину, хімію, моніторинг навколишнього середовища, автомобілебудування, космічні дослідження, авіаційні технології тощо.

Яскравим прикладом міждисциплінарних досліджень, спрямованих на використання таких пристроїв, є новий науковий напрям, який був вперше задекларований на конференції в Гонконзі (1999 рік), та отримав своє продовження в Берліні (2004 рік) [1, 2].

Цей напрям пов'язаний з застосуванням MEMS в механіці рідини і газу для активного управління зсувною течією, що формується в околі обтічної поверхні – примежовим шаром. Відповідна система управління повинна включати в себе мікродатчики, мікроактуатори (активні механічні елементи) і мікропроцесори (рис. 1).

Метою статті є висвітлення кола питань і проблем, пов'язаних з перспективами та труднощами побудови систем управління турбулентними примежовими шарами на основі MEMS технологій та визначення першочергових задач, які слід вирішити для забезпечення ефективного функціонування цих систем при їх реалізації на швидкісних транспортних засобах і, зокрема, на літальних апаратах різноманітного призначення.

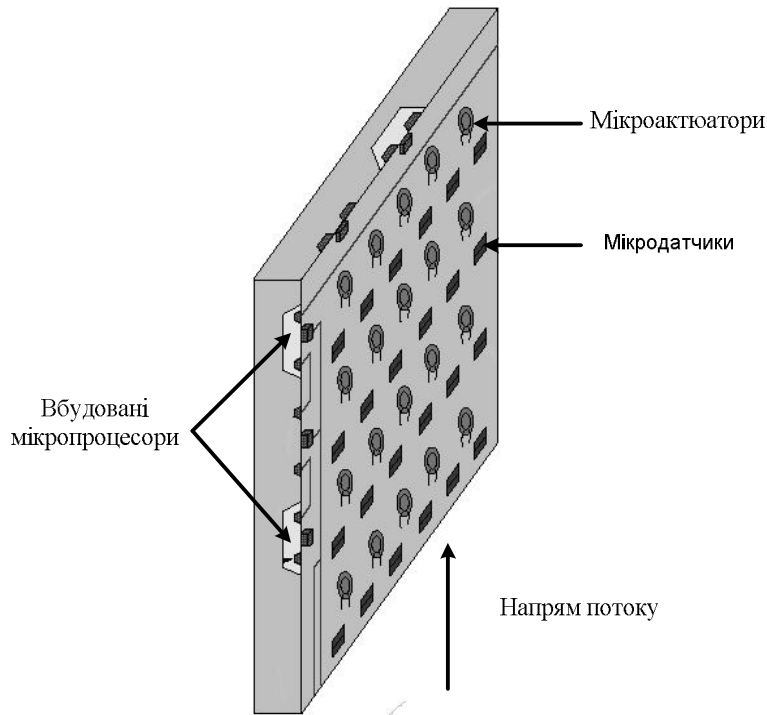


Рис. 1. Структура мікроелектромеханічних систем (MEMS)

Основний розділ

Аналітичний огляд існуючих методів управління турбулентними течіями

Відомі методи управління турбулентними течіями шляхом впливу на ті чи інші їх структурні особливості поділяються на дві категорії: 1) **пасивне управління**, яке не потребує підведення зовнішньої енергії, і 2) **активне управління**, що вимагає додаткової енергії задля своєї реалізації.

Стадії формування методології управління пристінними течіями та сучасний стан цієї сфери наукових досліджень вичерпно висвітлені в оглядах та монографіях наступних авторів: Gad-el-Hak [3 – 5], Корнілов [6], Амфілохійєв [7], Truong [8], Репик, Соседко [9], Козлов, Бабенко та ін. [10 – 15]. Для кожної з технологій управління пристінним турбулентним рухом існує своя область ефективного використання, а також проблеми адаптації до очікуваних умов експлуатації. Тому вкрай нагальною є задача не лише коректного вибору методу управління, а й проведення комплексу заходів для обґрунтованого забезпечення умов його ефективного використання.

Група пасивних методів управління включає: формування рельєфу обтічної поверхні у вигляді мікроборозенок вздовж напрямку обтікання, тобто ріблет; встановлення пристроїв руйнування великомасштабних вихорів турбулентної природи (LEBU – Large Eddy Break-Up devices); подача у потік води малих концентрацій розчинів домішок високомолекулярних полімерів або збагачення водного приповерхового шару мікробульбашками. Пасивне управління здійснюється за рахунок зміни початкових чи

межових умов витікання (режим та штучна генерація завихреності у вхідному перерізі чи впродовж формування течії, характеристики початкової турбулентності потоку). Це досягається модифікацією геометрії пристрою, який формує потік (форма сопла або діафрагми з гострими краївками, сопла складної геометрії: прямокутні, трикутні, еліптичні, кільцеві, пелюсткові, сопла круглого перетину з генераторами поздовжніх вихорів в їх вихідному перерізі) чи геометрії самої обтічної поверхні (передні краї у складеної форми, спеціальні види регулярної шорсткості (мікрорифлення) поверхні, встановлення вихрогенераторів чи LEBU). Пасивне управління дозволяє не тільки змінювати топологію великомасштабних вихрових структур, але при їх модифікації цілеспрямовано впливати на процеси формування та еволюції дрібномасштабної турбулентності, яка відповідає за обумовлену останньою додаткову дисипацію енергії.

Окрему групу складають пасивні методи управління, в яких обтічна поверхня наділяється властивістю чутливості до характеристик пульсаційного руху турбулентної течії. Цей ефект досягається використанням поверхонь з еластичним покриттям, яке завдяки своїм податним властивостям поглинає енергію турбулентних збурень. В іншому методі, який і є об'єктом розгляду даної роботи, ефект дії на потік досягається утворенням вимушених мікроколивань поверхні з параметрами, адаптованими до пульсаційних властивостей турбулентної течії завдяки застосуванню чутливих до параметрів турбулентного руху мікроелектромеханічних систем (MEMS). Близьким до останнього підходу є актив-

ний метод акустичного впливу певних частот на турбулентну течію, в результаті якого інтенсифікується перенос кількості руху, який зменшує координату точки переходу ламінарної течії в турбулентну, затримує відрив і сприяє повторному приєднанню потоку [3 – 7, 16]. Інтенсифікація пристінного руху, завдяки якій збільшується стійкість потоку до відриву, досягається також штучним вихроутворенням, для чого застосовуються вихрогенератори у вигляді встановлених на обтічній поверхні додаткових елементів різноманітної форми, а також використання різних комбінацій областей відсмоктування – видування вздовж поверхні і схем їх роботи (наприклад, асиметрична або переривчаста за заданим законом) [3 – 7, 16]. Слід зауважити, що деякі з зазначених вище методів все ж потребують додаткових витрат енергії, але вони є надто малими у порівнянні з енергетичними витратами активних методів.

Активне управління має значно ширший у порівнянні з пасивним інструментарій наявних можливостей. До найбільш розповсюджених активних методів управління пристінними течіями відносяться: відсмоктування або вдув через обтічну поверхню у примежовий шар, догичний видув струменя в безпосередній близькості від поверхні (наприклад, при використанні висувної механізації крила чи обдуванні його елементів струменями, що формуються за двигунами), а також охолодження поверхні (у випадку обтікання повітрям) або її нагрівання (при обтіканні водою).

Крім того використовуються акустичні або вібраційні збурення, а також збурення початкової ділянки пристінного шару плоского сопла за допомогою віброуючих стрічков чи видування повітря через пористу поверхню. У ряді випадків для інтенсифікації змішування в струменях застосовуються високоамплітудні періодичні пульсації за допомогою різного роду пульсаторів, які розташовані перед соплом, або коливальних крилець, розташованих за плоским соплом.

Акустичне управління досягається шляхом реалізації слабких періодичних (гармонійних) збурень на поверхнях пристроїв, які формують течію [16]. При відповідному виборі частоти слабких акустичних збурень можна або посилити попарне злиття вихорів в початковій ділянці струменя, або послабити їх спаровування та викликати раннє руйнування когерентних структур, що в кінцевому рахунку дозволяє цілеспрямовано генерувати або послаблювати певні структурні складові турбулентності та збільшувати або зменшувати шум струменя.

Головна перевага акустичного управління турбулентними потоками полягає в достатній ефективності його впливу на когерентні структури при порівняній простоті реалізації: для отримання істотної зміни аеродинамічних, акустичних та інших характеристик турбулентного потоку достатньо тональних збурень дуже малої інтенсивності. Так, при

акустичному збудженні потоку відношення середньоквадратичного значення пульсацій швидкості в звуковій хвилі на зрізі пелюсткового сопла u_s до швидкості витікання u_0 становить

$$u_s/u_0 = 0,001 - 0,02 \text{ (рис. 2).}$$

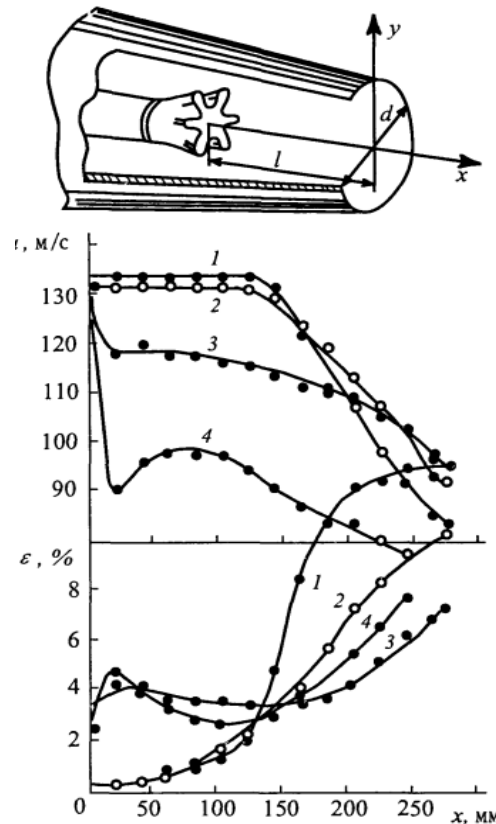


Рис. 2. Залежності u і $\varepsilon = u/u_0$ для круглого і пелюсткового сопел [1, 2]]

Саме ця властивість є актуальною у зв'язку з методом управління на основі MEMS, оскільки демонструє спроможність шляхом порівняно незначних витрат енергії на генерацію акустичних збурень досягти суттєвих змін вихрової структури турбулентної течії. Одночасно зазначимо, що у випадку застосування MEMS можна очікувати значно більшої ефективності та цілеспрямованості впливу на формування турбулентності у порівнянні з акустичним управлінням завдяки можливості реалізації локальної генерації різних за частотою пристінних збурень відповідно до поточного розподілу структурних особливостей турбулентності над обтічною поверхнею.

Ще одним актуальним з позицій розвитку технологій управління на основі MEMS є нова сучасна реалізація старої ідеї – використання вдуву газу чи рідини через пористу поверхню у примежовий шар. Завдяки відтисненню області значних деформацій розподілу швидкості від поверхні внаслідок вдуву через обтічну поверхню досягається ефект суттєвого зменшення опору тертя. Сучасні технології матеріа-

лознавства дозволяють забезпечити проникність поверхні не шляхом формування масиву маленьких отворів, а внаслідок використання пористих матеріалів. Останні дають можливість реалізувати рівномірний вдув через всю проникну ділянку обтічної поверхні з меншою середньою швидкістю, що обумовило модифіковану назву даної технології – мікродув [17]. Мікродув через пористу стінку спроможний зменшити опір поверхневого тертя до 47% [3 – 7, 17], але одночасно він, зменшуючи швидкість течії поблизу поверхні, негативно впливає на стійкість течії до відриву. Тому актуальними в даному напрямку автори вбачають: а) модифікацію технології мікродуву шляхом його реалізації через поздовжні періодично розташовані смужки вздовж поверхні; б) використання комбінування вдуву та відсмоктування, дослідже-

не раніше в [18] для ламінарного режиму; в) при реалізації управління з використанням MEMS технологія мікродуву також потенціально може бути використана в ролі виконавчого механізму (актюатора), що забезпечуватиме цілеспрямований керувальний вплив на турбулентну течію, можливо, шляхом реалізації переривчастої чи нерівномірної локальної зміни параметрів і, зокрема, витрати газу (рідини), що видувається через обтічну поверхню.

Мікроелектромеханічні системи як засіб управління турбулентними течіями, межі ефективного застосування, переваги та недоліки

Мікротехнологія [19, 20] є новітньою областю техніки, яка дозволяє створювати механічні частини і цілі пристрої мікронних розмірів (рис. 1).

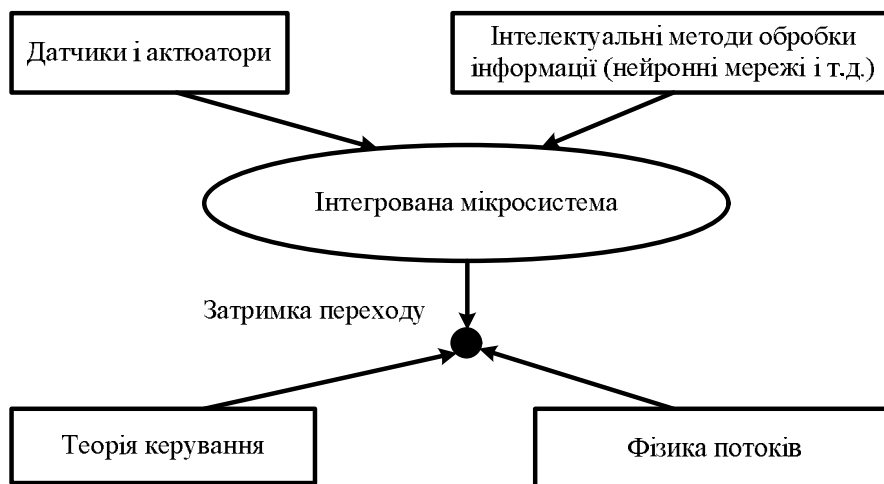


Рис. 3. Інтегрована мікросистема для керування течіями

Для потреб механіки рідини і газу ця технологія дає можливість створювати мікродатчики і виконавчі механізми вкрай малих розмірів (мікроактюатори) для ефективного управління примежовими шарами як шляхом затягування ламінарно-турбулентного переходу, так і здійсненням цілеспрямованого впливу на характеристики турбулентності при розвиненому режимі формування останньої. Маса, теплопровідність та інші інерціальні характеристики компонентів MEMS дуже малі, чим задовольняється основна вимога до датчиків і актюаторів — чутливість та адекватна реакція на зовнішні впливи в діапазоні високих частот. Крім того, на основі MEMS шляхом з'єднання на одній поверхні мікродатчиків, мікроактюаторів і мікропроцесорів разом з використанням відповідних алгоритмів функціонування в режимі реального часу можна створювати інтегровані системи різного рівня ієрархії та складності з метою реалізації ними інтелектуального адаптивного інтерактивного розподіленого управління властивостями турбулентного обтікання (рис. 1, 3). Саме визначення можливостей реалізації на існуючому сьогодні технологі-

чному рівні ідеї створення оздобленої розподіленими елементами MEMS обтічної поверхні, чутливої до турбулентних збурень і здатної до їх адаптивного гальмування, є предметом висвітлених нижче пріоритетів авторів.

Системи із зазначеними вище властивостями можуть бути побудовані на основі датчиків тиску або/та напруження зсуву, які фіксуватимуть локалізацію турбулентних збурень, що виникають в безпосередньому околі обтічної поверхні в результаті втрати течією стійкості в області ламінарно-турбулентного переходу або внаслідок реалізації складного нелінійного процесу енергетичного обміну між різномасштабними стійкими структурами з передбачуваними статистичними властивостями (когерентними структурами) розвиненого турбулентного режиму та набору актюаторів, що формуватимуть відповідну механічну реакцію поверхні на ці збурення з метою їх гальмування.

Залежно від рівня досконалості MEMS системи авторами передбачається в подальшій діяльності реалізувати кілька рівнів складності та довершеності стратегій управління:

1) на основі генерації адаптованого до режиму очікуваного обтікання поверхні закону генерації системи керувальних механічних збурень з заданими властивостями (частотні, амплітудні характеристики з відповідним розподілом у поздовжньому та поперечному напрямках поверхні)

2) неадаптивне активне управління без зворотного зв'язку;

3) на основі реалізації управління за алгоритмами, які враховують інформацію від розподілених датчиків і генерують в режимі реального часу закон формування керувальних механічних впливів – адаптивне активне управління зі зворотнім зв'язком;

4) на основі безперервного аналізу результатів управління з використанням вбудованих нейронних мереж, які реалізують алгоритми розпізнавання образів, різні рівні методології обробки сигналів з використанням нечіткої логіки, спектрального аналізу тощо, а також технології самовдосконалення в процесі функціонування, неухильно покращуючи алгоритм управління та безперервно підлаштовуючи його під особливості течії, яка є об'єктом керування – еволюційне адаптивне активне управління зі зворотнім зв'язком.

Цей підхід відкриває нові горизонти для створення та практичної реалізації принципово нової стратегії інтерактивного управління турбулентними течіями і ставить нові наукові та інженерні завдання щодо розподіленого управління на основі MEMS динамікою взаємодії вихрових структур турбулентного потоку як між собою, так і з осередненою течією та поверхнею в режимі реального часу, дослідження можливостей узгодження та оптимізації функціонування масиву структурних елементів MEMS залежно від властивостей потоку і вивчення явищ реакції турбулентної течії та особливостей генерації та еволюції вихрової структури турбулентності за умов обтікання чутливих до різномасштабних збурень поверхонь різної форми. Лінійні масштаби цих збурень можуть мати як мікронний рівень, так і бути сумірними з поточною товщиною зсувної течії, що, безумовно, суттєво ускладнює дослідження цієї проблематики.

Масив розподілених мікроактуаторів здатний здійснювати відчутний вплив на обтікання поверхні скінчених розмірів, але ефективність цього впливу визначатиметься як задіяним алгоритмом, в якому мусять бути належним чином враховані методологія обробки інформації про поточний стан розподілу збурень, так і ефективністю вироблення на цій основі відповідного масиву керувальних сигналів та механізмів їх механічної реалізації масивом мікроактуаторів.

Теорія гідродинамічної стійкості і експериментальне моделювання в даний час є потужними засобами в дослідженні динаміки рідини і газу. Вони

дозволяють виявити і досліджувати доволі складні явища ламінарно-турбулентного переходу і є основою для найбільш сучасних стратегій управління переходом.

Прикладом успішного застосування такої методології є науковий доробок в галузі управління обтіканням проф. В.В. Козлова (ІТПМ, Новосибірськ) та його послідовників [2], проф. В.В. Бабенка (ІГМ, Київ) [13 – 15]. На жаль, цей підхід не може бути визнаний ефективним при вивченні можливостей застосування адаптивного управління для розвинених турбулентних течій через неспроможність виконати коректний перерахунок експериментально здобутих результатів на реальні натурні умови обтікання.

Головною проблемою тут є фактор неусталеності руху вихрових структур турбулентності навіть для стаціонарних умов обтікання і спрямованість механізму адаптивного управління саме на неусталену вихрову динаміку. Властивості вихрових структур турбулентного руху навіть за умови статистичного квазидетермінізму (когерентні структури) характеризуються суттєвим різноманіттям і чутливістю до умов формування течії, отже їх експериментальне вивчення та подальше узагальнення отриманих результатів можливе лише на рівні визначення усереднених статистичних характеристик, тоді як адаптивне управління турбулентністю передбачає безпосереднє формування керувальних впливів як змінну в часі реакцію на динаміку поточного миттєвого розподілу турбулентних збурень поблизу обтічної поверхні. Фактор неусталеності досліджуваної течії має ще один недолік, який полягає у тому, що традиційно застосований в експериментальних дослідженнях принцип обернення руху (нерухома модель обтікається рухомим потоком) для неусталених течій не є строго коректним. Отже будь-які експериментальні дослідження на рівні деталізації моделювання неусталеної динаміки турбулентного руху навіть при моделюванні початкових стадій втрати стійкості пристінної зсувної течії при ламінарно-турбулентному переході, не кажучи вже про властивості турбулентного обміну розвиненої турбулентності, мають суттєві обмеження застосовності. Саме тому автори вважають перспективним проводити дослідження в цій галузі, орієнтуючись на сучасні технології математичного числового відтворення визначальних структурних особливостей неусталеного руху і взаємодії різномасштабних вихроутворень турбулентності руху. Такий метод, як моделювання динаміки великих вихорів (LES - Large Eddy Simulation) [21], незважаючи на його значну вимогливість до обчислювальних ресурсів, виглядає на сьогоднішній день найбільш перспективною основою імітаційного моделювання просторової неусталеної динаміки турбулентної течії, яка дозволяє

відтворювати шляхом числового моделювання з дуже малим кроком за часовою змінною динаміку формування течії в наперед визначеній розрахунковій області, однією з меж якої є обтічна поверхня. Вимогливість метода LES до обчислювальних ресурсів передбачається компенсувати використанням паралельних розгалужених обчислювальних систем, включаючи найсучасніші кластерні системи на основі графічних прискорювачів, а також відповідних паралельних алгоритмів і їх ефективних програмних реалізацій.

Дотепер засоби управління пристінних течій були сконцентровані переважно на методах, які дозволяли впливати з різною мірою ефективності на формування та взаємодію організованих структур в течії без використання ланцюга зворотного зв'язку для детектування і маніпулювання цими структурами течії (всмоктування, дотичне видування, ріблети, і вихрові генератори). У теперішній час підвищується інтерес до розробки технологій адаптивного управління, спрямованих на активне управління вихровими структурами турбулентного руху із застосуванням ланцюга зворотного зв'язку на основі сучасних досягнень мікроелектроніки і, зокрема, мікроелектромеханічних систем.

Мікроелектромеханічні системи мають найсуттєвішу перевагу перед іншими електронними засобами вимірювання інформації та формування виконавчих дій – їх мініатюрні розміри. Крім того, завдяки використанню MEMS можна здійснювати інтерактивне управління в реальному часі фактично випадкових подій і ефективно керувати процесом обтікання шляхом цілеспрямованого впливу на нестационарні збурення турбулентного руху. Зокрема, технологія MEMS пропонує значний потенціал для масштабного за площею поверхні адаптивного контролю когерентних структур турбулентного потоку в примежовому шарі в режимі реального часу. Це може призвести до зменшення опору тертя або сприяти запобіганню передчасного відриву потоку шляхом використання комплексних інформаційно-механічних систем на базі MEMS, які здатні виявляти локальні збурення в примежовому шарі, аналізувати їх та реагувати на їх динаміку через відповідне маніпулювання ними шляхом генерації певних виконавчих дій з чіткою локалізацією на обтічній поверхні.

Нові ідеї для управління турбулентним потоком, засновані на адаптивній маніпуляції пристінними когерентними структурами, потребують для успішності практичної реалізації значного наукового та методологічного опрацювання з метою визначення законів оптимального управління структурними особливостями турбулентної течії, що формується над ділянкою обтічної поверхні, оздобленої пристроями MEMS. Додаткова складність обумов-

лена також і тим, що поблизу таких елементів компонування літака, як крило, гондола і вузли двигунів, лінійні масштаби турбулентних вихрових структур, що формуються поблизу обтічної поверхні, змінюються в межах від десятків до сотень мікрон. Від адаптивного управління турбулентним потоком на основі MEMS можна очікувати зменшення опору тертя до 50% [2, 19].

Для порівняння, технологія поздовжнього мікропрофілювання поверхні (ріблети) спроможна вплинути на процес генерації турбулентності поблизу стінки, чим забезпечує досягнення зменшення опору тертя до 8%. Дослідження, спрямовані на вивчення потенціалу MEMS для управління потоком, розробку стратегій оптимального управління та засобів аналізу інформації, а також виготовлення і застосування датчиків і виконавчих елементів, ведуться як академічними так і промисловими організаціями в США, Європейських країнах (Італія, Німеччина, Данія) та ін. [20]. Отже, вивчення та впровадження цих технологій відкриває значні перспективи інтеграції в структуру досліджень провідних країн світу в напрямку різноманітних технічних застосувань мініатюрних електромеханічних систем та їх впровадження в провідні сфери сучасної техніки з метою забезпечення конкурентоспроможних характеристик.

Висновки

1. На основі існуючих методів управління турбулентними пристінними течіями розглянуто перспективний та гнучкий підхід інтерактивного управління на основі MEMS.

2. Проаналізовано загальні принципи побудови та функціонування MEMS та на цьому підґрунті визначено основні структурні елементи стратегії адаптивного інтерактивного управління структурою турбулентного руху в пристінних течіях на основі MEMS. Для розробки цієї стратегії проаналізовано переваги та недоліки експериментального та теоретичного методів дослідження і визначено пріоритети орієнтації на побудову розрахункових моделей з використанням сучасного методу визначення характеристик турбулентних течій з необхідним рівнем роздільної здатності – моделювання великих вихорів LES. Ураховуючи суттєву вимогливість цього метода до ресурсів обчислювальної техніки визначені пріоритети його паралельної (розгалуженої) реалізації.

3. Для побудови, оптимізації та ефективної реалізації ланцюга зворотного зв'язку в системі адаптивного розподіленого по обтічній поверхні управління передбачається ефективним використання інтелектуальних методів управління, таких як: нейронні мережі, нечітка логіка, нейро-нечітка мережа, вейвлет-нейронна мережа.

Список літератури

1. Алексин В.А. Математические модели турбулентных течений / В.А. Алексин. – МГИУ, 2007. – 52 с.
2. Козлов В.В. Мэмс-технология в аэродинамике / В.В. Козлов // «Наука в Сибири» ИТПМ. – 2001. – С 27-31.
3. Гад-эль-Хак М. Управление отрывом пограничного слоя. Обзор / М. Гад-эль-Хак, Д.М. Бушнелл // Современное машиностроение: серия А. – 1991. – № 7. – С. 2-35.
4. Gad-el-Hak M. Modern developments in flow control / M. Gad-el-Hak // Applied Mechanics Reviews. – 1996. – Vol. 49. – P. 365-379.
5. Gad-el-Hak M. Flow Control: Passive, Active, and Reactive Flow Management / M. Gad-el-Hak // Cambridge University Press. – 2000. – 421 p.
6. Корнилов В.И. Проблемы снижения турбулентного трения активными и пассивными методами (обзор) / В.И. Корнилов // Теплофизика и аэромеханика. – 2005. – № 2. – С. 183-208.
7. Современное состояние теории управления пограничным слоем / В.Б. Амфилохиев, Л.С. Артюшков, Б.А. Барбанель и др. – СПб.: Малахит, 2000. – 414 с.
8. Truong V.T. Drag Reduction Technologies / V.T. Truong // DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory 506 Lorimer St Fishermans Bend Vic 3207 Australia AR-011-925. – 2001. – 121 p.
9. Реник Е.У. Управление уровнем турбулентности потока / Е.У. Реник, Ю.П. Соседко. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2002. – 244 с.
10. Козлов Л. Ф. Формирование турбулентности в сдвиговых течениях / Л.Ф. Козлов, А.И. Цыганюк, В.В. Бабенко и др. – К.: Наук. думка, 1985. – 284 с.
11. Козлов Л. Ф. Экспериментальные исследования пограничного слоя / Л.Ф. Козлов, В.В. Бабенко. – К.: Наук. думка, 1978. – 184 с.
12. Экспериментальное исследование взаимодействия пограничного слоя с инжектируемой полуограниченной струей / Л.Ф. Козлов, В.В. Бабенко, В.И. Коробов, В.П. Иванов // Гидромеханика. – 1983. – № 47. – С. 28-34.
13. Бабенко В. В. Гидробионические принципы снижения сопротивления / В.В. Бабенко // Прикладная гидромеханика. – 2000. – Т. 2(74), № 2. – С. 3-17.
14. Бабенко В.В. Экспериментальное исследование комбинированного метода снижения сопротивления / В.В. Бабенко, В.В. Мороз, Е.А. Шквар // Вісник Донецького університету: сер. А Природничі науки. – Донецьк: Дон-НУ. – 2002. – С. 227-231.
15. Бабенко В.В. Пограничный слой на эластичных пластинах / В.В. Бабенко, М.В. Канарский, В.И. Коробов. – К.: Наук. думка, 1993. – 264 с.
16. Коллинз Ф.Г. Применение акустических методов и пилообразных выемок на передней кромке для управления пограничным слоем на поверхности крыла / Ф.Г. Коллинз // Ракетная техника и космонавтика. – 1981. – Т. 19, № 3. – С. 3-5.
17. Kornilov V.I. Current state and prospects of researches on the control of turbulent boundary layer by air blowing / V.I. Kornilov // Progress in Aerospace Sciences. – 2015. – № 76. – P. 1-23.
18. Sutura S.P. Laminar boundary layer control by combined blowing and suction in the presence of roughness: Proc. of AIAA 4th Propulsion Joint Specialist Conference (Cleveland, OHIO, June 10-14, 1968) / S.P. Sutura, G.F. Anderson // AIAA Paper №68 – P. 641.
19. Warsop Clyde. Active Flow Control Using MEMS / Cl. Warsop. – BAE SYSTEMS Advanced Technology Centre, 2003 – P. 2.1-2.4.
20. Wang Xin, Kanapka Joe, Ye Wenjing, Aluru Naraya R. Algorithms in FastStokes and its Application to Micro-machined Device Simulation / Xin Wang, Joe Kanapka, Wenjing Ye, Naraya R Aluru. – IEEE Transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems. – 2006. – VOL.25, NO. 2. – P. 248-257.
21. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений / К.Н. Волков, В.Н. Емельянов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 368 с.

Надійшла до редколегії 12.02.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Калкаманов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МИКРОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ КАК ИННОВАЦИОННОЕ СРЕДСТВО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

С.С. Товкач, Е.А. Шквар

Рассмотрен перспективный метод адаптивного управления пристеночной динамикой турбулентных течений с использованием перспективной технологии, основанной на микроэлектромеханических системах (MEMS). Освещены преимущества и недостатки пассивных и активных методов управления турбулентным обменом, проанализированы принципы организации и функционирования MEMS, определены приоритеты построения математических моделей этих систем на основе метода моделирования крупных вихрей (LES – Large Eddy Simulation). В зависимости от степени развития MEMS системы предложена дальнейшая реализация нескольких уровней сложности и совершенства стратегий управления.

Ключевые слова: микроэлектромеханические системы (MEMS), адаптивное интерактивное управление, турбулентное пристеночное течение, микромашина технология.

MICROELECTRONIC SYSTEMS AS INNOVATIVE CONTROL TOOL OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS AND THEIR APPLICATION PROSPECTS

S.S. Tovkach, Ye.O. Shkvar

The perspective method of adaptive control by near-wall dynamics of turbulent flows using the micro-electromechanical systems (MEMS) technology is considered. The advantages and disadvantages of passive and active control methods of turbulent exchange are reflected. The principles of organization and operation of MEMS have been analyzed, the priorities of mathematical models development of these systems on the base of the Large Eddy Simulation (LES) method have been determined. Depending on the level of MEMS system evolution the further implementation of several levels of complexity and of control strategies perfection are proposed.

Keywords: microelectromechanical systems (MEMS), interactive adaptive control, turbulent near-wall flow, micro-machine technology.