

УДК 624.042.41

Експериментальна оцінка аеродинамічних характеристик ґратчастих опор зв'язку

Пічугін С.Ф., д.т.н., Махінько А.В., к.т.н

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка,
Україна

Анотація. В статті описано серію експериментальних досліджень із оцінки дійсних аеродинамічних характеристик ґратчастих опор зв'язку. Дослідження виконувались за допомогою методів фізичного моделювання (аеродинамічна труба) та імітаційних процедур комп'ютерного експерименту (алгоритми CFD). Показано, що для сучасних опор зв'язку із асиметрично закріпленим антенно-фідерним обладнанням можлива реалізація розрахункових ситуацій, які не передбачені чинними світовими нормами та документами рекомендаційного характеру.

Аннотация. В статье описана серия экспериментальных исследований по оценке действительных аэродинамических характеристик решётчатых опор связи. Исследования выполнялись при помощи методов физического моделирования (аэродинамическая труба) и имитационных процедур компьютерного эксперимента (алгоритмы CFD). Показано, что для современных опор связи с асимметрично закреплённым антенно-фидерным оборудованием возможна реализация расчётных ситуаций, которые не предусмотрены действующими мировыми нормами и документами рекомендационного характера.

Abstract. In this paper series of experimental researches to estimation of aerodynamic characteristics of communication lattice tower and guyed masts are described. Researches were fulfilled by means of physical methods (wind tunnel) and imitative procedures of computer experiment (algorithms CFD). It is shown that for modern communication poles with ancillaries design situations are not provided by world codes and other recommendations.

Ключові слова: аеродинамічні характеристики, методи фізичного моделювання, ґратчасті опори зв'язку.

Вступ. Аеродинамічний розрахунок ґратчастих опор зв'язку пов'язаний із визначенням аеродинамічних сил та моментів, що діють на них. У ряді випадків ця задача може бути вирішена теоретичним шляхом, але теоретична схема явищ в аеродинаміці не завжди точно описує їх, тому експериментальний шлях є більш обґрунтованим і достовірним.

Необхідна експериментальна інформація про аеродинамічні сили та моменти може бути отримана за допомогою методів фізичного (аеродинамічні труби) або математичного (комп'ютерного) моделювання. Перший метод є класичним для будівельної аеродинаміки і саме йому завдячують всі світові стандарти за первинну інформацію про вітрові впливи на будівлі та споруди. Проте результати випробувань в аеродинамічних трубах дуже залежать від «чистоти» дослідних моделей та

можливості відтворення аеродинамічних ефектів в заданому масштабі. Це обумовлює високу вартість таких досліджень, яка додатково посилюється довготривалим періодом підготовчих робіт.

Методи комп'ютерного моделювання менш трудомісткі й дорогі та з властивою їм математичною точністю дотримуються наперед заданої програми експерименту. Однак задачі комп'ютерного обтікання пов'язані із підвищеними вимогами до потужності обчислювальних платформ, зокрема переходом на високопродуктивні багатопроцесорні системи кластерного рівня. Крім цього, особливості «комп'ютерної аеродинаміки» такі, що практично на всіх етапах роботи: при підготовці геометричної моделі, постановці контактних і граничних умов, виконанні дискретизації, налаштуванні параметрів розв'язувальних процедур, відображенні та інтерпретації результатів тощо присутній фактор неоднозначності. Недарма чимала кількість публікацій у своїй назві містить слово «мистецтво» або похідне від нього. Тому комп'ютерні моделі, починаючи з деякого рівня складності, потребують як певного рівня знань у конкретних галузях, так й деякої частки творчості, вміння відчутти грань між допустимою та прийнятною точністю, відокремити проблеми, що породжуються недосконалістю програми, від результатів своєї діяльності. Більшість питань вирішуються за допомогою «об'єктивних» інструментів, але й випадків, коли вимагається експертний, суб'єктивний за характером аналіз, більш ніж достатньо. Доволі часто одним із факторів, який стимулює впровадження розрахункових програм, називають можливість заміни або скорочення фізичних експериментів за рахунок комп'ютерної симуляції. Проте, як показує практика у сфері «машинних» розрахунків, думка щодо універсальності та самодостатності комп'ютерного моделювання є помилковою. Звичайно, суть проблеми не тільки в недосконалості інструментів, але й в людському факторі. Він, в свою чергу, складається із нестачі знань у предметній області, а також із нерозуміння або недорозуміння особливостей реалізації знань у конкретних програмах. Ці складові, навіть при наближенні якості та функціональності програм до ідеалу, непереборні в принципі. Тому експериментальне відпрацювання, яке, до речі, теж не застраховане від потенційних методичних помилок, залишається обов'язковим.

Автори, об'єктивно зацікавлені у всьлякому поширенні методів комп'ютерної аеродинаміки, вважають, що слід раціонально поєднувати фізичні та комп'ютерні методи інженерного аналізу. Саме в такій постановці була виконана серія експериментальних досліджень аеродинамічних характеристик гратчастих опор зв'язку, основні положення й результати якої наводяться нижче.

Оцінка аеродинамічних характеристик ґратчастих опор зв'язку на основі випробувань в аеродинамічній трубі. В умовах сьогодення лабораторіями будівельної аеродинаміки різних країн для фіксування вітрових впливів використовуються датчики тиску різної конфігурації. Розташовані у конкретних (найбільш характерних) точках моделі, датчики тиску служать локальною характеристикою інтенсивності вітрового впливу на задану споруду. Відповідно, для отримання інформації про результуючі сили та моменти, які безпосередньо фігурують у розрахунках несучої здатності переважної більшості споруд, до первинної інформації із датчиків тиску повинна бути застосована операція інтегрування за поверхнею споруди. Очевидно, що точність такої оцінки прямо пов'язана із кількістю та щільністю розташування датчиків тиску на поверхні моделі. Слід зазначити, що це дорогий і доволі трудомісткий шлях, який у підсумку може не забезпечити потрібної точності обчислень. Крім того, для класу ґратчастих споруд він взагалі не є прийнятним, так як малий розмір їх елементів просто не дозволяє розташувати жодного датчика тиску.

Відповідно до цього найбільш точним і надійним є безпосередній метод виміру сил і моментів за допомогою аеродинамічних ваг. Даний метод, який добре зарекомендував себе в авіаційних лабораторіях, має тільки один недолік. На території України немає ваг, які повною мірою були б зорієнтовані на вирішення проблем будівельної аеродинаміки. Зазначимо, що наявні у деяких навчальних закладах, лабораторіях та підприємствах одиничні екземпляри авіаційних аеродинамічних ваг, наприклад, ваги АВТ-5 [1], важко, якщо взагалі можливо, пристосувати для потреб будівельної аеродинаміки, а методи реєстрації сигналів, які застосовуються в них, не передбачають протоколювання даних у цифровому форматі.

З метою подолання окреслених проблем авторами були сконструйовані електронні аеродинамічні ваги (рис. 1). За кількістю компонентів аеродинамічного впливу на модель, які підлягають виміру, дані ваги можна віднести до трикомпонентних: з їх допомогою вимірюється лобовий опір, підйомна сила та аеродинамічний момент. За конструктивною ознакою, тобто за способом кріплення моделі до вагової системи, ваги є жорсткими, так як модель кріпиться до динамометричних пристроїв за допомогою жорстких стійок.

В основу конструкції аеродинамічних ваг покладений наступний принцип роботи (див. рис. 1). До центральної платформи 10 за допомогою восьми болтів жорстко кріпиться дослідна модель. Кріплення виконуються таким чином, щоб геометричний центр моделі співпадав із центром платформи. У центрі останньої є вертикальний штифт, який без зазору влаштовується у порожнисту циліндричну стійку, забезпечуючи тим самим вільне

обертання платформи навколо вертикальної осі. Поблизу її зовнішнього діаметра розташований тензодатчик 9, який дозволяє кількісно оцінити момент закручення платформи, тобто аеродинамічний момент. Циліндрична стійка, в яку влаштовується штифт із платформою, жорстко з'єднана із рухливою рамкою 3. Рамка за допомогою чотирьох гнучких елементів підвішена до горизонтальної лицьової поверхні ваг і додатково зафіксована розтяжками 5. Накладені таким чином в'язі дозволяють виконувати поступальні переміщення рамки, і відповідно платформи з моделлю, тільки вздовж однієї координатної осі, суміщеної із напрямом вітрового потоку (вісь OX). Пов'язаний із рамкою тензодатчик 8 кількісно фіксує ступінь зміщення останньої і дозволяє оцінити лобовий опір дослідної моделі. Визначення бокової (підйомної) сили виконується за тим же принципом: на рухому рамку 2 накладаються в'язі 4 вздовж вітрового потоку, один кінець яких жорстко з'єднаний з основою 1 ваг, а переміщення, перпендикулярні до напрямку вітрового потоку (вісь OY), оцінюються тензодатчиком 7. Сигнали із усіх трьох тензодатчиків поступають на цифровий комутатор, а потім на персональний комп'ютер, оснащений системою збирання, обробки та відображення інформації¹. Система виконує опитування віддалених датчиків із заданою дискретністю у темпі зміни параметрів, що підлягають контролю (за умовчанням одна секунда) і видає адекватні цифрові сигнали за відповідними каналами. Всі інформаційні потоки мають графічне й табличне представлення в комп'ютері. Результати вимірів видаються у вигляді середніх, середньоквадратичних відхилень, максимальних та мінімальних коефіцієнтів лобового опору, бічної сили та аеродинамічного моменту з фіксуванням орієнтації моделі по відношенню до вітрового потоку. Збереження даних виконується в звичайному текстовому форматі, що дозволяє легко експортувати їх в інші, більш зручні, системи обробки даних.

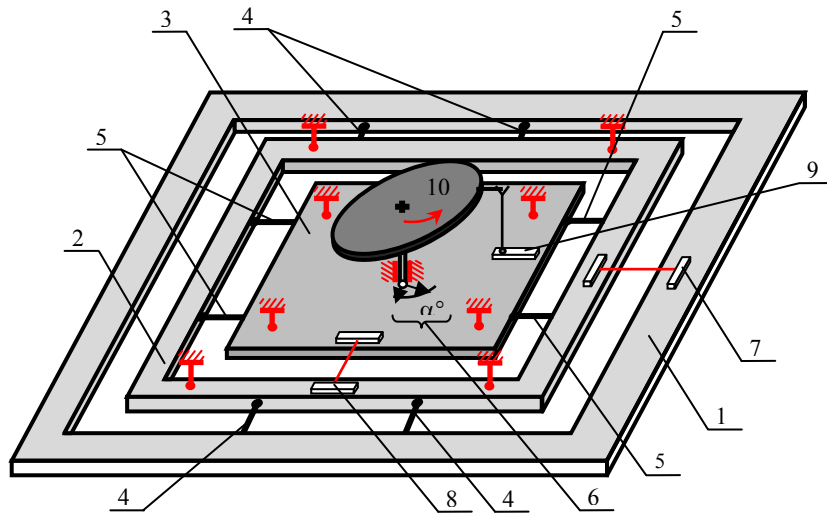
Тестування і тарування аеродинамічних ваг, а також подальший цикл експериментальних досліджень виконувались у метеорологічній аеродинамічній трубі МАТ-1 лабораторії будівельної аеродинаміки ДонНАБА [2 – 4]. Об'єктом експериментальних досліджень в аеродинамічній трубі були десять гратчастих секцій опор зв'язку. Розміри, взаємне розташування, форма перерізів і розміри стрижнів секцій, види вузлових сполучень та кількість стрижнів в одному вузлі обирались виходячи із аналізу конструкцій, які набули найбільшого розповсюдження в якості опор зв'язку. Масштаб моделей становив 1:5: ширина основи 150 мм,

¹Тут і далі мається на увазі система збору та контролю даних лабораторії будівельної аеродинаміки Донбаської національної академії будівництва та архітектури, у якій автори виконували експериментальні випробування.

висота 500 мм. Умовно дослідні секції були поділені на дві групи: А – секції тригранного обрису в плані та В – чотиригранного обрису. До складу кожної групи входили по три секції трубчастого профілю із напіврозкісною, розкісною та перехресною решітками та дві секції із кутникового профілю: для чотиригранних секцій досліджувалась напіврозкісна та перехресна решітки, для тригранних – секцій з поясами із кутників під 60° напіврозкісної решітки із трубчастих елементів та елементів кутникового профілю з полицями під 90° . Секції із трубчастих елементів були виготовлені із неіржавіючої сталі, а з'єднання стрижнів решітки із поясами виконане на аргоновій зварці. Секції кутникового профілю виготовлялись із сталі та алюмінієвого сплаву; приєднання елементів решітки до поясів – на болтах $\varnothing 3$ мм. Для імітації фідерів на гранях просторових секцій використовувались алюмінієві стрижні трубчастого профілю $\varnothing 6$ мм. Для кріплення моделей фідерів до секцій були передбачені тонкі (3 мм) пластикові хомути. Такі розміри фідерів та елементів кріплення забезпечували влаштування на гранях моделей до 19 умовних фідерів.

Під час випробувань моделі секцій жорстко закріплювались на платформі аеродинамічних ваг, верх якої збігався із площиною робочої області аеродинамічної труби. Навколо секцій був влаштований проградуїований диск діаметром 900 мм, на зовнішньому діаметрі якого нанесена шкала із рисками через 15° . Крок градуїування був обумовлений програмою випробувань, відповідно до якої аеродинамічний опір моделей секцій вивчався при кутах атаки із приростами у 15° . За нульовий напрям повітряного потоку приймався напрям, перпендикулярний до однієї із граней секцій. Зміна кутів атаки від 0° до 360° виконувалась шляхом перестановки моделей секцій на потрібний напрям. Швидкість вітрового потоку у всіх дослідженнях приймалась 10 та 15 м/с.

Кожний цикл експериментальної продувки (заданий кут атаки, швидкість вітрового потоку, коефіцієнти суцільності граней) складався з наступних етапів. Запуск вітроколеса із шістдесятисекундною нормалізацією швидкості вітрового потоку. Реєстрація сигналів із трьох тензодатчиків аеродинамічних ваг (лобового опору, бічної сили та крутного моменту) протягом 120 с. Записування результатів виміру в текстовий формат із осередненням у часі аеродинамічних впливів на модель. Представлення даних вимірів у безрозмірному вигляді, коефіцієнтів лобового опору, підйомної сили та моменту. Після цього цикл повторювався для іншого вітрового режиму та кута атаки. Характерні приклади продувки моделей секцій гратчастих опор наведені на рис. 2.



а



б

Рис. 1. Трикомпонентні аеродинамічні ваги: а – кінематична схема; б – фото ваг:
1 – основа ваг; 2 – рухлива рамка 0Y; 3 – рухлива рамка 0X; 4, 5 – розтяжки;
6 – вимірювач кута повороту; 7 – тензодатчик 0Y; 8 – тензодатчик 0X;
9 – тензодатчик 0Z; 10 – платформа

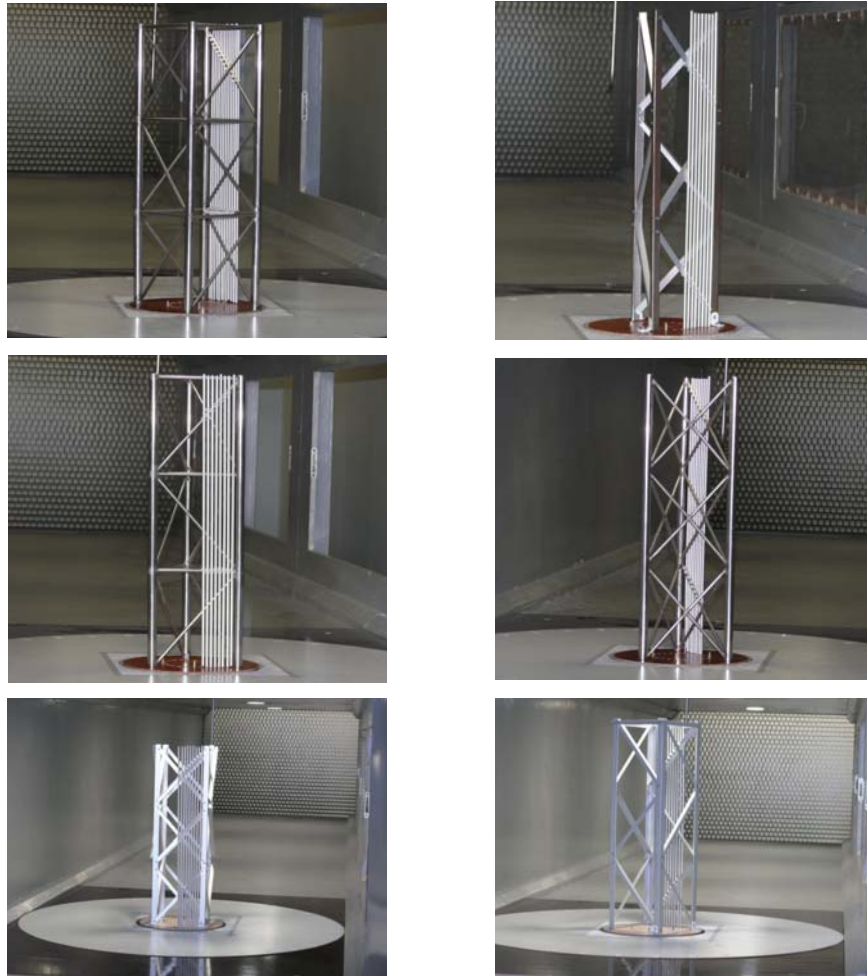


Рис. 2. Приклади дослідних моделей секцій ґратчастих опор зв'язку в аеродинамічній трубі

Моделювання захарашування секцій фідерами антенного обладнання виконувалось при коефіцієнтах суцільності $\varphi_A = 0,1 \div 0,7$ із кроком $\Delta\varphi_A = 0,1$. Екрануванню підлягала спочатку одна, а потім дві грані ґратчастих секцій. Секції без фідерів також підлягали продувці в аеродинамічній трубі з метою верифікації отриманих даних із попередніми експериментальними дослідженнями [5 – 11] – розбіжність у результатах не перевищувала 15 %. Продувка окремої секції при двох швидкісних режимах, 24 кутах атаки та можливих комбінаціях затінення граней моделей фідерами антенного обладнання виконувалась протягом вісімнадцяти годин.

УК результаті виконаних досліджень було виявлено, що фідери антенного обладнання надзвичайно сильно підсилюють не тільки реакцію гратчастих опор вздовж потоку, але й у перпендикулярному напрямі. Так, наприклад, для чотиригранних секцій при коефіцієнті суцільності $\varphi_A = 0,2$ коефіцієнт бічної сили складає приблизно 45 % від коефіцієнта лобового опору, а при $\varphi_A = 0,6$ – 80 %. Для тригранних секцій ці показники ще більші: приблизно 65 % – при $\varphi_A = 0,2$ й 95 % при $\varphi_A = 0,6$. При розташуванні фідерів на двох гранях опор поперечна реакція поступово зменшується і при рівних коефіцієнтах суцільності (залежно від кута атаки вітрового потоку) не перевищує 40 % для чотиригранних секцій та 50 % для тригранних. Слід також зазначити, що ефект закручення секцій відносно вертикальної осі має суттєве значення при односторонньому закріпленні фідерів, коли їх коефіцієнт суцільності φ_A перевищує 0,4. При менших значеннях коефіцієнта φ_A впливом крутних моментів можна знехтувати. Конструктивне вирішення ґраток секцій (розкісна, напіврозкісна, перехресна) має опосередковане значення для узагальненої реакції опор і проявляється тільки при незначних значеннях коефіцієнта суцільності φ_A граней опор.

Максимальні значення коефіцієнта лобового опору як чотиригранних, так й тригранних опор у випадку розташування фідерів на одній грані секцій спостерігаються при вітрі, перпендикулярному до цієї грані, а при одночасному розташуванні фідерів на двох гранях – при вітрі, спрямованому на пояс секцій, з обох боків яких закріплені фідери. Хоча при прямуванні коефіцієнта φ_A до нуля, положення максимуму лобового опору зміщується у бік кута атаки 45° . Мінімальні значення коефіцієнта лобового опору всіх секцій спостерігаються в ситуаціях, коли вітровий потік є паралельним грані або граням, на яких закріплені фідери обладнання. Коефіцієнти поперечної сили та крутного моменту, незалежно від обрису секцій у плані, реалізують свої максимальні значення при кутах атаки 45° . Нульові значення цих коефіцієнтів, як і слід очікувати, спостерігаються у випадках геометричної симетричності секцій відносно напрямку вітрового потоку.

Оцінка аеродинамічних характеристик ґратчастих опор зв'язку на основі методів комп'ютерного моделювання. Комп'ютерне моделювання вітрових впливів на секції ґратчастих опор виконувалось в середовищі Ansys Workbench, із наступною передачею розрахункової сітки в Ansys CFX. Конструктивне вирішення секцій відповідало дослідним моделям, що використовувались в експериментальних продувках в аеродинамічній трубі. Розмір кінцевоелементної сітки для різних у конструктивному відношенні секцій коливався від 5,5 до 6,4 млн. об'ємних елементів

(тетраедри, призми, піраміди). Для розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, що описують в'язкі турбулентні течії, використовувався метод кінцевого об'єму, чисельна схема високого порядку точності та модель турбулентності SST, що дозволяє моделювати вітрові потоки із розвинутими турбулентними відривами. Комп'ютерне моделювання дозволило відобразити основні особливості відривного турбулентного обтікання ґратчастих секцій і визначити аеродинамічні сили та їх безрозмірні коефіцієнти. В розрахунках також варіювались кут атаки вітрового потоку та коефіцієнти суцільності граней опор, вкритих фідерами антенного обладнання. На рис. 3 показані поля миттєвих швидкостей при обтіканні ґратчастих секцій різного конструктивного вирішення. Співставлення результатів комп'ютерного моделювання із продувками в аеродинамічній трубі показало добру узгодженість між собою.

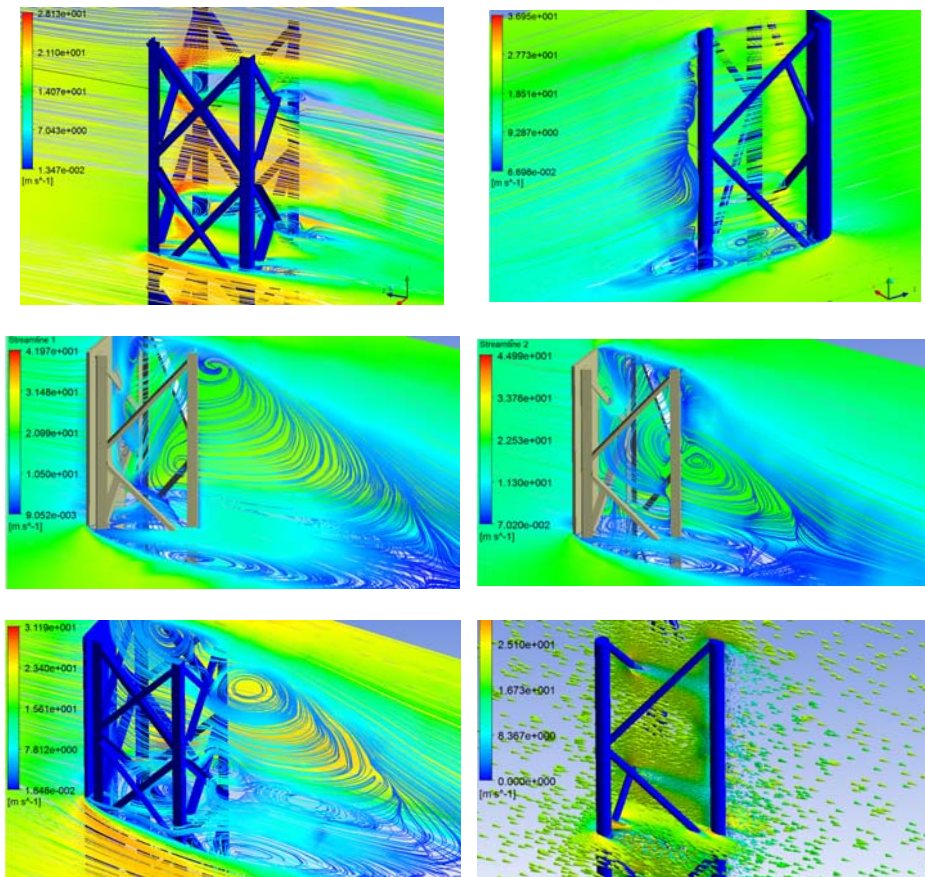


Рис. 3. Комп'ютерне моделювання вітрових впливів на ґратчасті секції опор зв'язку

Методика оцінки аеродинамічних характеристик ґратчастих опор зв'язку. Відповідно до циклу експериментальних випробувань була розроблена аналітична методика із визначення аеродинамічних характеристик секцій ґратчастих опор частково вкритих фідерами антенного обладнання. Для чотиригранних опор коефіцієнт лобового опору пропонується знаходити за наступною емпіричною залежністю:

$$C_D(\theta) = \begin{cases} C_{D,21}K_B(\theta) + [C_{D,11}K_A(\theta) - C_{D,21}K_B(\theta)]\cos^2(\theta), & 0 \leq \theta \leq \pi/4, \\ C_{D,21}K_B(\theta) + [C_{D,12}K_C(\theta) - C_{D,21}K_B(\theta)]\cos^2(\theta), & \pi/4 \leq \theta \leq 3\pi/4, \\ C_{D,22}K_D(\theta) + [C_{D,12}K_C(\theta) - C_{D,22}K_D(\theta)]\cos^2(\theta), & 3\pi/4 \leq \theta \leq 5\pi/4, \\ C_{D,22}K_D(\theta) + [C_{D,11}K_A(\theta) - C_{D,22}K_D(\theta)]\cos^2(\theta), & 5\pi/4 \leq \theta \leq 7\pi/4, \end{cases} \quad (1)$$

де $C_{D,11}$, $C_{D,12}$, $C_{D,21}$ та $C_{D,22}$ – константи, які визначаються за формулами:

$$C_{D,11} = C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_A + (C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_C)(1 - \varphi_S - \varphi_A)^2, \quad (2)$$

$$C_{D,12} = C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_C + (C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_A)(1 - \varphi_S - \varphi_C)^2, \quad (3)$$

$$C_{D,21} = C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_B + (C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_D)(1 - \varphi_S - \varphi_B)^2, \quad (4)$$

$$C_{D,22} = C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_D + (C_{D,s} + C_{D,f}\varphi_B)(1 - \varphi_S - \varphi_D)^2, \quad (5)$$

де $C_{D,f}$ – коефіцієнт лобового опору окремого фідера антенного обладнання; φ_A , φ_B , φ_C і φ_D – коефіцієнти суцільності граней опори при врахуванні навітряних площ тільки фідерів антенного обладнання.

Коефіцієнт лобового опору $C_{D,s}$ окремої грані секції без урахування затінення її елементів фідерами антенного обладнання визначається як:

$$C_{D,s} = \text{tg}(a\varphi_s^b), \quad (6)$$

де a та b – безрозмірні коефіцієнти форми кривої аеродинамічного опору.

Рекомендовані значення коефіцієнтів a і b наступні: для ферм, складених із елементів з гострими кроями: $a = 1,1$, $b = 0,70$; для трубчастих ферм у докритичному режимі обтікання: $a = b = 1,1$; для трубчастих ферм у закритичному режимі обтікання: $a = 1,1$, $b = 1,5$. Якщо ферма складена із елементів різного профілю або трубчастих елементів, криза обтікання яких виникає при різних швидкостях вітру, то сумарний лобовий опір слід визначати у вигляді:

$$C_{D,s} = \sum_{i=1}^3 C_{D,s(i)} \varphi_{S,i}, \quad (7)$$

де $C_{D,s(i)}$ – лобовий опір ферми за формулою (6), визначений при коефіцієнті суцільності $\varphi_{S,i}$ (коефіцієнт суцільності $\varphi_{S,i}$ відноситься до елементів одного типу).

Коефіцієнти $K_A(\theta)$, $K_B(\theta)$, $K_C(\theta)$ та $K_D(\theta)$ слід знаходити за виразом:

$$K_\epsilon(\theta) = A_0(\varphi_\epsilon) + A_1(\varphi_\epsilon) \cos^2(A_2 \cdot \theta), \quad (8)$$

де A_0 , A_1 та A_2 – безрозмірні коефіцієнти, зміст яких дається нижче; φ_ϵ – коефіцієнт суцільності грані $\epsilon \equiv A \vee B \vee C \vee D$, визначений із урахуванням навітряних площ як несучих елементів, так й фідерів антенного обладнання.

Коефіцієнти A_0 , A_1 та A_2 оцінюються за виразами вигляду:

$$\begin{aligned} A_0(\varphi_\epsilon) &= 1 + \{a_0 + a_1 \exp[-(a_2 \varphi_\epsilon - a_3)^2]\} [0,8 - 0,25C_k]; \\ A_1(\varphi_\epsilon) &= 1 - A_0(\varphi_\epsilon); \\ A_2 &= 2,0, \end{aligned} \quad (9)$$

де a_0 , a_1 , a_2 та a_3 – безрозмірні коефіцієнти, числові значення яких рекомендовано приймати $a_0 = 0,20$, $a_1 = 0,30$, $a_2 = 5,0$ та $a_3 = 2,5$; C_k – частка навітряної площі елементів із гострими краями.

На відміну від коефіцієнта лобового опору, який необхідно враховувати у всіх розрахункових ситуаціях опор зв'язку, коефіцієнти підйомної (бокової) сили C_L та аеродинамічного моменту C_M слід залучати до розгляду лише у тих випадках, коли одна грань опори сильно затінена фідерами антенного обладнання. В першому наближенні можна рекомендувати наступні залежності (при $\varphi_s \leq 0,30$):

$$C_L(\theta) = (\varphi_s + \varphi_\epsilon)^a \sin(2\theta)/b, \quad C_M(\theta) = (\varphi_s + \varphi_\epsilon)^c \sin(2\theta)/d, \quad (10)$$

де a , b , c та d – безрозмірні коефіцієнти: $a = 1,2$, $b = 1,0$, $c = 1,0$ та $d = 3,0$.

Експериментальні дослідження секцій, складених із елементів різного профілю, виявили доволі несуттєву мінливість коефіцієнтів C_L та C_M . Це дозволяє з єдиних позицій вирази (10) застосовувати для секцій чотиригранного обрису незалежно від типу елементів, що їх утворюють.

Для коефіцієнта лобового опору секцій тригранних гратчастих опор пропонується залежність вигляду

$$C_D(\theta) = C_{D,0}(\varphi_S)K_\theta(\theta)(1 - \varphi_A) + \varphi_A[C_{D,0}(\varphi_S)\sin^2(\theta) + (1,2 + \varphi_A)\cos^2(\theta)], \quad (11)$$

де $C_{D,0}(\varphi_S)$ – коефіцієнт лобового опору тригранної гратчастої секції без додаткового обладнання на її гранях при нульовому напрямі вітрі (за нульовий приймається напрям, перпендикулярний одній із граней); $K_\theta(\theta)$ – функція, яка описує залежність коефіцієнта лобового опору гратчастої секції від кута атаки вітрового потоку; φ_A – коефіцієнт суцільності грані гратчастої секції, на якій розташоване додаткове обладнання (при визначенні цього коефіцієнта враховуються навітряні площі тільки додаткового обладнання, навітряні площі елементів секції не враховуються).

Для функції $C_{D,0}(\varphi_S)$ пропонується застосувати описаний вище вираз (6) при наступних значеннях його складових: для елементів із гострими краями $a = 1,1$, $b = 0,5$, для трубчастих елементів $a = 1,2$, $b = 1,0$. Якщо гратчасті секції опори зв'язку утворені елементами різного типу, то сумарний коефіцієнт лобового опору слід визначати як лінійну комбінацію функцій $C_{D,0}(\varphi_S)$, записаних по відношенню до секцій, утворених тільки із елементів з гострими краями та елементів із труб:

$$C_{D,0}(\varphi_S) = \text{tg}(1,1\varphi_S^{0,5})C_k + \text{tg}(1,2\varphi_S)(1 - C_k). \quad (12)$$

Функція $K_\theta(\theta)$, як поправка лобового опору гратчастої секції на кут атаки вітрового потоку, може бути описана формулою (8) з тією різницею, що замість коефіцієнта суцільності φ_e , який відноситься до навітряних площ додаткових елементів, слід використовувати коефіцієнт φ_S , що відноситься до навітряних площ несучих елементів. Значення коефіцієнтів A_0 , A_1 , A_2 слід визначати за формулами:

$$A_0 = 1 - 0,1C_k, \quad A_1 = 0,1C_k, \quad A_2 = 1,5. \quad (13)$$

Для оцінки коефіцієнтів бічної (підйомної) сили та аеродинамічного моменту з достатньою для практики точністю можна застосувати підхід, описаний при дослідженні чотиригранних гратчастих секцій. При цьому значення коефіцієнтів залежності (10) слід залишити без змін. Це буде створювати певний запас при нормуванні вітрових впливів поперек потоку та крученні.

Моделювання вітрових впливів на антенне обладнання. Разом із моделюванням вітрових впливів на секції опор зв'язку були виконані комп'ютерні розрахунки аеродинамічних характеристик найбільш розповсюджених типів антен мобільного зв'язку. Моделювання виконувалось як на окремо розташовані антени (див. таблицю), так й групи антен (див. рис. 4). Зокрема, для коефіцієнта лобового опору антен запропонована емпірична залежність

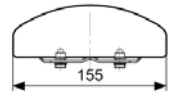
$$C_{D,\lambda} = C_{D,a} k_{\lambda}, \quad (14)$$

де $C_{D,a}$ – коефіцієнт лобового опору антени за таблицею 1; k_{λ} – коефіцієнт відносного подовження, який залежить від відношення висоти антени L до її ширини W :

$$k_{\lambda} = 0,01L/W + 0,6. \quad (15)$$

Таблиця

Коефіцієнти лобового опору найбільш розповсюджених типів антен мобільного зв'язку

Переріз антени	C_D	Переріз антени	C_D	Переріз антени	C_D
	1,1		1,3		1,4
	1,8		1,8		1,9

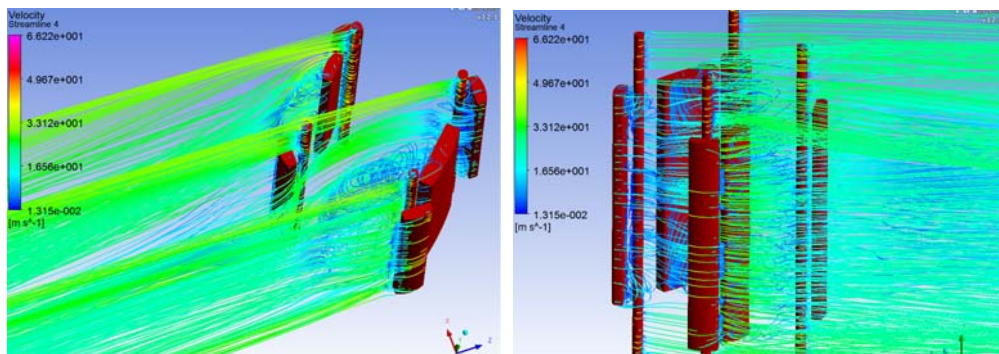


Рис. 4. Комп'ютерне моделювання вітрових впливів на антенне обладнання

Висновки

Виконані масштабні експериментальні випробування моделей ґратчастих опор зв'язку із різними коефіцієнтами суцільності плоских граней при варіюванні кута атаки вітрового потоку. Випробування виконані в лабораторії будівельної аеродинаміки ДонНАБА. За матеріалами експериментальних досліджень розроблена теоретична модель із визначення повного спектра аеродинамічних характеристик опор зв'язку (коефіцієнта лобового опору, бокової сили і крутного моменту). Модель враховує довільне розташування фідерів антенного обладнання на гранях ґратчастих опор і може застосовуватись до просторових секцій опор, виконаних із елементів з гострими краями, трубчастих елементів та секцій змішаного типу. Результати розрахунків показують, що асиметричне кріплення фідерів антенного обладнання може надзвичайно сильно підсилювати не тільки реакцію опор за напрямом вітрового потоку, але й провокувати появу поперечних коливань із великою амплітудою та моменту.

Література

- [1] Соляник П.Н. Экспериментальная аэродинамика / П.Н. Соляник, М.Л. Сургаило, В.В. Чмовж. – Харьков : ХАИ, 2007. – 95 с.
- [2] Аэродинамика электросетевых конструкций [Горохов Е.В., Казакевич М.И., Шапавалов С.Н., Назим Я.В.]; под ред. Е.В. Горохова, М.И. Казакевича. – Донецк, 2000. – 336 с.
- [3] Горохов Е.В. Экспериментальное определение результирующих аэродинамических характеристик моделей зданий и сооружений / Е.В. Горохов, С.Ф. Пичугин, А.В. Махінько, Я.В. Назим // Металлические конструкции : междунар. науч. журн. – 2011. – Т.17. – № 2. – С. 85–95.
- [4] Горохов Е.В. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения / Е.В. Горохов, С.Г. Кузнецов. – Донецк : Норд-Пресс, 2009. – 168 с.
- [5] Махінько А.В. Ймовірнісний розрахунок баштових опор зв'язку / А.В. Махінько. – Полтава, 2012 – 407 с.
- [6] Махінько А.В. Два погляди на сучасну аеродинаміку опор зв'язку / А.В. Махінько // Зб. наук. пр. – Полтава : ПолтНТУ, 2012. – Вип. 2(24). – С. 72–76. – (Серія «Галузеве машинобудування, будівництво»).
- [7] Березин М.А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций / М.А. Березин, В.В. Катюшин. – Новосибирск : Олденполиграфия, 2003. – 130 с.
- [8] Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г.А. Савицкий. – М.: Изд-во лит. по стр-ву, 1972. – 111 с.

- [9] Соколов А.Г. Опоры линий передач (расчёт и конструирование) / А.Г. Соколов // Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам. – М., 1961. – 171 с.
- [10] Brian W. Smith. Communication Structures / W. Smith Brian // Published by Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd. –ASCE Press, 2007. – 338 p.
- [11] Harris R.I. The Structure of Strong Wind / R.I. Harris, D.M. Deaves // Wind Engineering in the Eighties :Proceedings of the CIRIA Conference, 12-13 November 1980. – London. – 1981.

Надійшла до редколегії 03.06.2012 р.