

Технічні науки

УДК 629.7.054

**Карачун Володимир Володимирович**

*доктор технічних наук, професор,  
професор кафедри біотехніки та інженерії  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

**Карачун Владимир Владимирович**

*доктор технических наук, профессор,  
професор кафедры биотехники и инженерии  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

**Karachun Volodymyr**

*Doctor of Technical Science, Professor  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»*

**ФОРМУВАННЯ СТОХАСТИЧНОЇ СТРУКТУРИ АКУСТИЧНОГО  
ВИПРОМІНЮВАННЯ РОТОРНОЮ СИРЕНОЮ  
ФОРМИРОВАНИЕ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ  
АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РОТОРНОЙ СИРЕНОЙ  
FORMATION OF STOCHASTIC STRUCTURE OF ACOUSTIC  
RADIATION SURFACE RADIATION**

***Анотація.** Аналізуються технічні можливості роторної динамічної сирени для створення аеродинамічного шуму звукової частоти на стаціонарному стенді наземних випробувальних комплексів*

***Ключові слова:** роторна динамічна сирена, функція модуляції, аеродинамічний шум, кількість місць.*

***Аннотация.** Анализируются технические возможности роторной*

*динамической сирены для создания аэродинамического шума звуковой частоты на стационарном стенде наземных испытательных комплексов*

**Ключевые слова:** *роторная динамическая сирена, функция модуляции, аэродинамический шум, число мест.*

**Summary.** *Analyzed the technical capabilities of the rotor dynamic siren to create aerodynamic sound frequency noise at a stationary stand of ground-based test complexes*

**Key words:** *rotary dynamic siren, modulation function, aerodynamic noise, number of places.*

Відомо, що акустичне випромінювання інтенсивністю вище 150 дБ, може слугувати причиною явищ втомленості в матеріалі. Розвиток тріщин, звичайно, починається від місць концентрації напружень - у клепальних швах, вирізках і тому подібне спостерігається навіть в центрі панелей [1].

Реакція елементів конструкції на акустичні навантаження, як встановлено, в значній мірі залежить від частотної, просторової та часової характеристик акустичного тиску. Так, при експериментальних дослідженнях фюзеляжу літака ІЛ-18 було з'ясовано, що вплив навантажень, обумовлених роботою повітряних гвинтів, приводить до виникнення в матеріалі напружень на частоті 72 Гц різко вираженого імпульсного характеру. У відповідь на це, в конструкції виникають власні швидкозгасаючі коливання, причому без резонансних проявів, що говорить про значне віддалення вправо по осі частот власних частот елементів [2-3].

Головними особливостями навантаження фюзеляжу в акустичному полі реактивних двигунів і турбулентного прикордонного шару являється широкополосний частотний спектр, випадкового характеру зміни величини акустичного тиску у часі. Це приводить до того, що в тонкостінних елементах конструкції генерується безліч форм коливань, які можуть співпадати з власними. Порівнюючи результати експериментальних

досліджень, можна зробити висновок стосовно того, що найнебезпечнішим, з точки зору виникнення акустичної втоми в матеріалі конструкції і сприяючого цьому просторово-частотного резонансу, є широкосмугове частотне навантаження, що має місце, наприклад, в районі реактивного струменя, при виникненні турбулентності від зриву повітряного потоку і таке інше.

Незважаючи на досягнуті за останні роки успіхи в розробці аналітичних методів оцінки ступеня впливу акустичного випромінювання на матеріал конструкцій, найбільш достовірним і остаточним постає все-таки експериментальне дослідження. У зв'язку з цим, першим і головним питанням постає вибір джерела інтенсивного звукового випромінювання [4-5].

На теперішній час знайшли застосування такі потужні джерела шуму, як повітряні струмені, аеродинамічні труби, реактивні струмені двигунів, повітряні гвинти, гучномовці, сирени.

Спектр шуму реактивних струменів (гарячих і холодних) найбільш повно відтворює натуральний спектр двигунів, а рівень шуму, відтворюваний ними, становить 150...170 дБ. Суттєвою вадою цього методу є низький ККД - близько 1 %.

Аеродинамічні труби сприяють найбільшому наближенню до умов збудження конструкцій від турбулентного прикордонного шару (ККД близько 1...2 %).

Гучномовці (ККД 5...20 %) мають широкий частотний діапазон - до 2000 Гц, хоча рівень звукового тиску не перевищує 150 дБ в невеликих камерах. У ревербераційних камерах, до речі, вони можуть самі руйнуватися від генеруємого ними шуму.

Найбільше поширення серед інших типів джерел шуму отримали сирени. Сирени дозволяють генерувати звуковий тиск 160...180 дБ з частотним діапазоном від 50 Гц до 5000 Гц. При цьому коефіцієнт

корисної дії в них найвищий і становить 4...40 %.

Одним з перших джерел широкополосного шуму була запропонована в США фон Гирке багатороторна сирена. Поряд з перевагою - можливістю генерувати шум із загальним звуковим тиском до 170 дБ і акустичною потужністю 50 кВт - багатороторні сирени мають ряд недоліків. Ні теоретично, а ні експериментально, не з'ясовані оптимальні параметри роторів для одержання заданого спектру, є також суттєві складності у виготовленні, налагодженні та експлуатації таких сирен [6].

Оригінальна конструкція сирени для створення випадкового шуму запропонована співробітниками Саутгемптонського університету. Модуляція повітряного потоку тут здійснюється за допомогою сталеві стрічки з отворами, що розташовані згідно залишковому циклічному квадратичному ланцюговому коду. Простягаючи з великою швидкістю стрічку, переривають повітряний потік, внаслідок чого виникають звукові коливання, рівень яких досягає 165 дБ. До недоліків конструкції можна віднести певну складність експлуатації сталеві стрічки.

Таким чином, на цей час створена достатня кількість стендів для випробування виробів на акустичну міцність. По частотному принципу вони можуть бути поділені на два класи - дискретні та широкополосні. Причому, другі, як вже відзначалося, найкращим чином відтворюють натурні умови.

У вітчизняній літературі перші і, очевидно, досить вичерпні відомості по теорії і розрахунку сирен наведені в роботах М.І. Карновського, Л.Є. Матохнюка. Побудовано математичну модель роторної сирени, досліджено вплив геометричних параметрів вікон і відстані між дисками ротора і статора на структуру спектра та інтенсивність генеруемого звуку.

У більш пізній час, цілий ряд досліджень за кордоном та в Україні, також були присвячені створенню і опису роботи сирен.

У зв'язку з бурхливим розвитком потужних рушійних установок, особливо в ракетобудуванні, знову гостро постало питання дослідження елементів конструкції та бортової апаратури на акустичну стійкість, особливо при інтенсивності випромінювання 150 дБ і вище. На жаль, виявилось, що потужних генераторів звуку є лічена кількість, а питання теорії, розрахунку і проектування пневматичних роторних сирен для створення широкополосного акустичного впливу високої інтенсивності або розкриті частково, або мають істотні недоліки.

З огляду на сказане, сформулюємо деякі аспекти основ теорії, розрахунку та проектування сирен широкополосного шуму високої інтенсивності. Поряд з цим, розкриємо деякі нюанси роботи сирен, які пов'язані з кінематичним впливом, але не знайшли відображення в сучасних дослідженнях.

Роботу однороторної сирени проілюструємо на прикладі відомої її технічної реалізації. Механічна модель являє собою два співвісних диски з радіальними вікнами, один з яких - ротор - рухомий, інший - статор - нерухомий і жорстко кріпиться до корпусу сирени. Струмінь повітря під тиском надходить у камеру сирени, а потім, проходячи через вікна статора, переривається обертаючимся ротором і створює звукові коливання середовища [7].

Приймаючи розміри дисків малими, в порівнянні з довжиною хвилі, вважаємо акустичний процес підпорядкованим лінійним диференціальним рівнянням.

За обраної геометрії вікон, функція модуляції повітряного потоку  $f(t)$  буде практично повторювати геометрію вікон ротора і, тому, може бути представлена у вигляді періодичної, quasi-трапецеїдальної функції з періодом  $T=2\pi/\omega$  (рис.1). Тут  $\omega$  – кутова швидкість обертання ротора в  $\text{с}^{-1}$ . Тривалість одиничного імпульсу  $(t_0+t_1)$  визначається рівністю  $(t_0+t_1)=T/m$ , а  $m$  – число рівних ділянок, на які розбивається коло ротора. Таким чином,

тривалість одиничного імпульсу буде визначати мінімальний розмір вікна ротора.

Загалом кажучи, форма функції модуляції може бути трохи іншою і визначається в кожному конкретному випадку експериментально, тому що тут, крім іншого, неабияку роль відіграють і параметри компресорної системи. Так, наприклад, функція модуляції може мати вигляд комматованої синусоїди, трикутної форми, сполучених дуг парабол та інших, більш складних, конфігурацій.

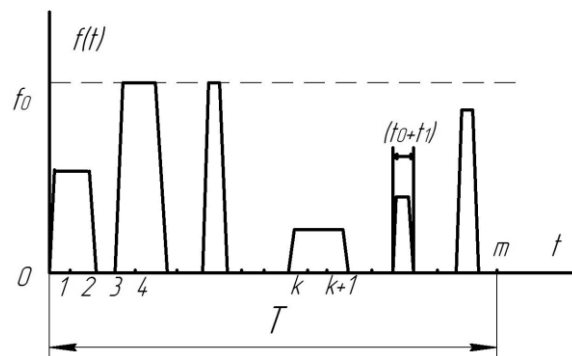


Рис. 1. Функція модуляції однороторної пневматичної сирени

Щоб одержати необхідну форму функції модуляції необхідно забезпечити тиск у струмені, що набігає, не менш 2...3 атм., тому що подальший приріст рівня тиску не чинить вирішального впливу на швидкість повітря у вихлопному струмені, що визначає, в основному, звукову потужність (рис.2).

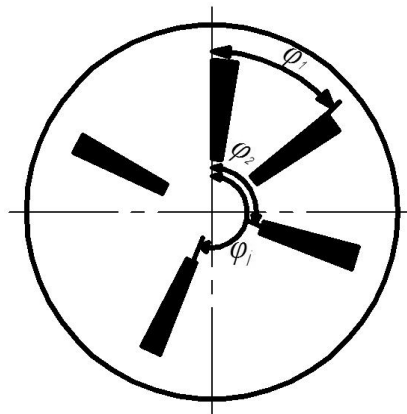


Рис. 2. Взаємне розташування вікон на диску статора

З іншого боку, при роботі сирени можлива одночасна витрата

повітря через кілька вікон, що відобразиться на величині рівня акустичного випромінювання. Тому, слід забезпечити, наприклад, подвійний або потрійний запас потужності компресора, щоб досягти необхідної сталості тиску потоку середовища, що нагнітається.

Щоб забезпечити випадковий характер розподілу вікон по колу диска ротора, вони наносяться по залишковому циклічному квадратичному ланцюговому коду, внаслідок чого, на деяких ділянках вікна можуть перебувати поруч, а на інших відсутні зовсім. На тих ділянках, де вікна нанесені, значення функції модуляції визначається таким виразом  $f(t)=\lambda_k f_0$  ( $0 \leq \lambda_k \leq 1$ ,  $k$  - номер ділянки), там, де вікна відсутні - функція модуляції дорівнює нулю [8].

Припустимо для простоти, що функція модуляції  $f(t)$  є парною і періодичною, тобто  $f(t)=f(t+T)$ . У цьому випадку вона може бути представлена у вигляді розкладання в тригонометричний ряд

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) \quad (1)$$

з коефіцієнтами

$$\frac{a_0}{2} = f_0 \cdot \frac{t_0 + t_1}{2T}; \quad a_n = f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \cdot \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \cdot \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}},$$

де  $n$  – номер гармоніки;  $f_0$  – висота імпульсу;  $\pi = 3,14$ .

Не розглядаючи ті ділянки, де функція модуляції дорівнює нулю, тобто  $f(t)=0$  і, просумовуючи по ділянках з імпульсами, одержимо –

$$\frac{a_0}{2} = \sum_{k=1}^{\infty} \lambda_k \cdot f_0 \cdot \frac{t_0 + t_1}{2T};$$

$$a_n = \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \cdot \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \cdot \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}},$$

де  $p$  – число одиничних імпульсів протягом періоду  $T$ , тому  $1 < p \leq m$ ; сума

$\sum_{k=1}^P /$  означає, що значення параметра  $k$  беруться не підряд, а тільки для ділянок з імпульсами, тобто  $f(t)=\lambda_k f_0$ ;  $t_1$  – час формування фронту імпульсу (рис. 3, рис. 4).

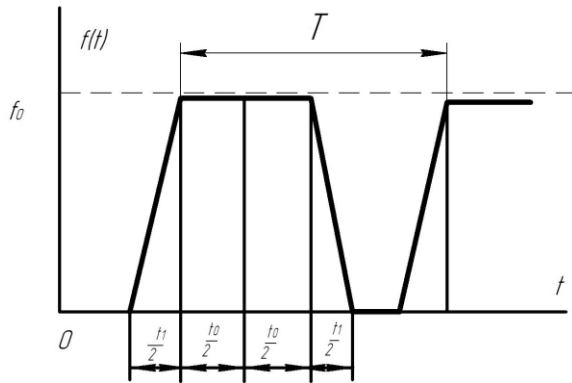


Рис.3. Функція модуляції однороторної пневматичної сирени

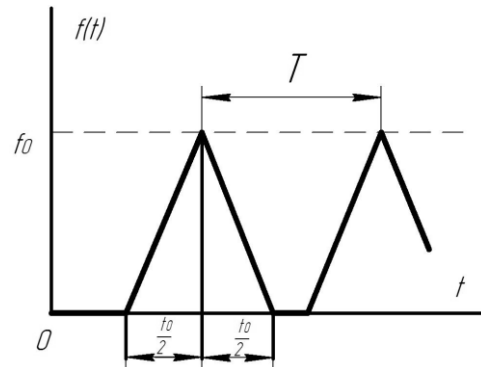


Рис. 4. Функція модуляції однороторної сирени

Таким чином, функція модуляції буде мати наступний вигляд –

$$f(t) = \sum_{k=1}^P \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^P 2\lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{T} \cdot \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 - t_1}{2T}} \cdot \frac{\sin\left(\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}\right)}{\pi n \frac{t_0 + t_1}{2T}} \cdot \cos n\omega t \quad (2)$$

Формула (2) слухна для випадку, коли на статорі є тільки одне вікно. Якщо на статорі буде нанесено  $s$  вікон однакового розміру, рівновіддалених від центру диска статора і зсунених відносно базової лінії на кут  $\varphi_i$  (рис. 2), тоді функція модуляції всього потоку повітря, що проходить крізь сирену, буде дорівнювати сумі функцій модуляції всіх вікон [9].

З урахуванням зазначеного, формула (1) перетвориться до виду:

$$f(t - t_i) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega(t - t_i), \quad (3)$$

де  $t_i = \varphi_i / \omega$ .

Таким чином, сумарна функція модуляції, за умови (3), буде визначатися таким виразом:



$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega(t - t_i) \right], \quad (4)$$

де  $s$  - кількість вікон.

В остаточному вигляді функція модуляції може бути наведена наступним чином –

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^s \left\{ \frac{pf_0}{2m} + \frac{4mpf_0}{\pi(m\omega t_0 - \pi)} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \cdot \sin\left(n \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m}\right) \sin\left(\pi \frac{n}{2m}\right) n\omega(t - t_i) \right\}. \quad (5)$$

Позначивши

$$\frac{4mpf_0}{\pi(m\omega t_0 - \pi)} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin\left(\frac{m\omega t_0 - \pi}{2m}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{n}{2m}\right) \cos n\varphi_i = B_n; \quad (6)$$

$$\frac{4mpf_0}{\pi(m\omega t_0 - \pi)} \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin\left(\frac{m\omega t_0 - \pi}{2m}\right) \cdot \sin\left(\pi \frac{n}{2m}\right) \sin n\varphi_i = C_n,$$

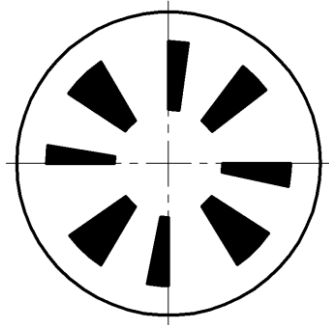
можемо обчислити амплітуди  $A_n$  гармонік спектру застосувавши відому рівність Парсеваля:

$$A_n = [B_n^2 + C_n^2]^{\frac{1}{2}} = \frac{4mpf_0}{\pi(m\omega t_0 - \pi)} \left\{ \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin\left(n \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m}\right) \sin\left(\pi \frac{n}{2m}\right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \left[ \sum_{i=1}^s \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin\left(n \frac{m\omega t_0 - \pi}{2m}\right) \sin\left(\pi \frac{n}{2m}\right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

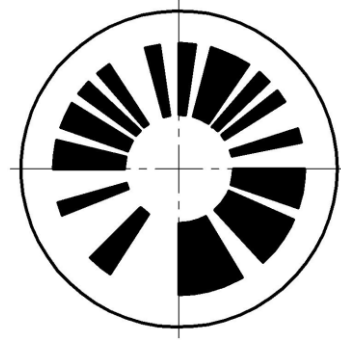
Визначимо спектр однороторної сирени за умови, що на статорі рівномірно, через  $\pi/4$  рад нанесені 8 однакових радіальних вікон, розміри котрих співпадають з найменшим вікном ротора по ширині та найбільшим – по висоті (рис. 5). Число місць  $m$  на роторі оберемо рівним, наприклад, 59 [10].

Коло диска ротора розіб'ємо на 59 рівних частин (число місць  $m=59$ ). В проміжку чисел 0...59 обчислюємо квадрати простих чисел, після чого визначаємо залишки від ділення їх на  $m$ . Відповідно до залишкового квадратичного цепного коду, це забезпечує випадковий характер

розподілу вікон на диску ротора. Виконавши зазначені дії, доходимо висновку, що вікна на диску ротора знаходяться на інтервалах - 1, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 27, 28, 28, 35, 36, 41, 45, 46, 48, 49, 51, 53 і 57 (рис. 6). Отже, кількість вікон на роторі дорівнює 15 [11, 12].



*Рис. 5. Статор пневматичної сирени роторного типу*



*Рис. 6. Ротор пневматичної сирени:  $m=59$*

### **Література**

1. Lighthill, M.J. On sound generated aerodynamically [Текст] / M.J.Lighthill. – London: Part I, General theory, Proc. Soc., 221 A, 1951. – P. 564-587.
2. Lighthill, M.J. On sound generated aerodynamically [Текст] / M.J.Lighthill. – London: Part II, Turbulence as a source of sound, Proc. Roy. Soc., A 222, 1954. – P. 1-32.
3. Beicher, P.M. Use of a high intensity siren in fatigue testing of structure subjected to acoustical forcing [Текст] / P.M.Beicher // Proc. 52nd meeting of Acoustical Society of America. Los Angeles, Calif. N 15, 1956.
4. Kistler, A.L., The fluctuating pressure field in a supersonic turbulent boundary layer [Текст] / A.L. Kistler, W.S. Chen// Jet Propulsion Laboratory Technical Report, № 32, 1962. – 277 p.
5. Parks, P.C. A "Random" Siren Using Cicle Chain Codes [Текст] / P.C. Parks, C.A. Mercer // Reports 5 Congres Iternational D'Acoustique, 1965, vol. 54. – P. 1072-1076.

6. Allen, С.Н., A powerful high frequency siren [Текст] / С.Н. Allen, J.A. Rudneck // JASA. 1947. - 19, № 5. – P. 874 – 879.
7. Карачун, В.В. Некоторые вопросы расчета сирен [Текст] / В.В. Карачун // Пробл. прочности. - 1990. - № 6. – С. 123 – 124.
8. Карачун, В.В. Волновые задачи поплавкового гироскопа [Текст] / В.В. Карачун, Я.Ф. Каюк, В.Н. Мельник. – К.: «Корнейчук». – 2007. – 228 с., ил.
9. Патент 32273А Україна, G10K7/02. Спосіб збудження звукових коливань за допомогою динамічної сирени [Текст] / В.В. Карачун, М.С. Тривайло, О.В. Петрик, Н.В. Гнатейко. – 99020598. – Заявл. 02.02.99.; опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7-11. – 1 с.
10. Патент 33211А Україна, G10K7/02. Динамічна сирена [Текст] / В.В. Карачун, М.С. Тривайло, О.В. Петрик, Н.В. Гнатейко. – 99010272; - Заявл. 19.01.1999; опубл. 15.02.2001. – Бюл. № 1. – 1с.
11. Мельник В.Н. Особенности циклического нагружения оболочек / Авиационно-космическая техника и технология, - 2007. № 8(44). - С.56-59.
12. Mel’nick, V., Karachun, V. The emergence of resonance within acoustic fields of the float gyroscope suspension / EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. ISSN: 17293774. Volume: 1. Issue: 7. Pages: 39-44. Year: 2016-01-01. EID: 2-s2.0-84960858488. Scopus ID: 84960858488. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.59892.