

УДК 629.7.054

О.Я. КОВАЛЕЦЬ

Національний технічний університет України «КПІ», Україна

МОДУЛЯЦІЯ ПОТУЖНОГО АКУСТИЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ РОТОРНОЮ ДИНАМІЧНОЮ СИРЕНОЮ

Наводяться результати побудови механічної розрахункової моделі роторної динамічної сирени. Обчислюється функція модуляції та аналізуються особливості і структура генеруємого акустичного випромінювання. Окреслюються шляхи створення бажаного усередненого розподілення енергії звукового поля. Чисельний аналіз спектру генеруємого сиреною випромінювання наочно демонструє можливості роторних систем. Вирішується задача оптимізації спектру в плані створення «білого» шуму, як структури, що найбільш повно відповідає натурним умовам. Визначається необхідна кількість та особливості геометричного розподілення радіальних вікон на площині ротора сирени за допомогою залишкового циклічного квадратичного ланцюгового коду.

Ключові слова: роторна сирена, функція модуляції, спектр, вікна ротора, вікна статора, білий шум, оптимізація спектру, залишковий циклічний квадратичний ланцюговий код, число місць на роторі.

Вступ

Постановка проблеми та її зв'язок з науково-технічними задачами. У практиці вивчення властивостей механічних конструкцій, в тому числі бортової апаратури, що працює в умовах акустичного впливу високої інтенсивності та широкого частотного діапазону, вітчизняними та закордонними ученими та інженерами досягнуті значні успіхи. Розроблено методики розрахунку наближених (нескінченних за протяжністю) механічних моделей і деяких типів уточнених (обмежених розмірів) моделей. Однак, ці розрахунки носять орієнтовний характер, з великою часткою випадковості і не можуть явити дійсну картину впливу акустичного випромінювання на матеріал конструкцій та елементи бортової апаратури. Визначальним і остаточним по вірогідності, на теперішній час, залишається все ж таки експериментальне дослідження акустичної витривалості виробів на спеціально обладнаних для цього випробувальних стендах.

При створенні таких стендів, перш за все, вирішується питання вибору джерела акустичного випромінювання - з високим коефіцієнтом корисної дії, простим у налагодженні і експлуатації та, звичайно, з наявною можливістю формування звукового поля бажаного структурного складу і максимального наближеного до натурних умов. Більшості цих вимог, особливо по першому і головному параметру, задовольняють сирени.

Слід зазначити, що дотепер не виконані в достатньому обсязі розрахунки сирен, які були б дове-

дені до інженерних рішень. Не проведений порівняльний аналіз властивостей однороторних і багатороторних конструкцій, не вирішені, являючи практичний інтерес, задачі оптимізації. Нарешті, зовсім не висвітлені в літературі питання впливу на роботу сирени кінематичного та силового збурення з боку місця установки.

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.

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 на частоті 72 Гц до виникнення в матеріалі напружень 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.

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 призводить 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.

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 натурний спектр двигунів, а рівень його становить 150...170 дБ. Суттєвою вадою цього методу стає 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 генеруемого 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 %.

Аналіз останніх досліджень і виділення невирішених задач. Одним з перших генераторів широкосмугового шуму була запропонована в США фон Гірке та ін. багатороторна сирена [1]. Разом з перевагами – можливістю генерувати шум із загальним звуковим тиском до 170 дБ та акустичною потужністю 50 кВт – багатороторні сирени не позбавлені цілого ряду вад, а саме, а ні теоретично, а ні експериментально не визначені оптимальні параметри роторів для отримання заданого спектру, до того ж, має місце цілий ряд складностей у виготовленні, налагодці та експлуатації таких сирен.

Оригінальна конструкція сирени для створення випадкового шуму запропонована співробітниками Саутгемптонського університету [2]. Модуляція повітряного потоку тут здійснюється за допомогою сталльної стрічки з отворами, що розміщені згідно залишковому циклічному квадратичному ланцюговому кодові.

Протягуючи з великою швидкістю стрічку, переривають повітряний потік, внаслідок чого вини-

кають звукові коливання, рівень котрих сягає 165 дБ. До недоліків конструкції можна віднести певну складність експлуатації такої стрічки.

Таким чином, на теперішній час створено достатню кількість стендів для випробування виробів на акустичну міцність. За частотними характеристиками ці установки можуть бути поділені на два класи – дискретні та широкосмугові. До речі, другі, як вже відзначалося, найкращим чином відтворюють натурні умови.

У вітчизняній літературі перші і, мабуть, найбільш повні відомості з теорії та розрахунку сирен наведені в роботах [3,4]. Вивчена математична модель роторної сирени, вплив геометричних параметрів вікон та відстані між дисками ротора і статора на структуру спектра та інтенсивність звуку.

У подальшому ціла плеяда досліджень за кордоном [5 – 7] та в Україні [8, 9] також були присвячені створенню та опису сирен.

Постановка задачі. 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 широкосмугового шуму високої інтенсивності.** Поряд з цим, розкриємо деякі нюанси роботи сирен, які пов'язані з кінематичним впливом, але не знайшли відображення в сучасних дослідженнях.

Викладення основного матеріалу досліджень з обґрунтуванням отриманих наукових результатів

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 обертаючимися ротором і створює звукові коливання середовища.

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 ω – кутова швидкість обертання ротора в c^{-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.

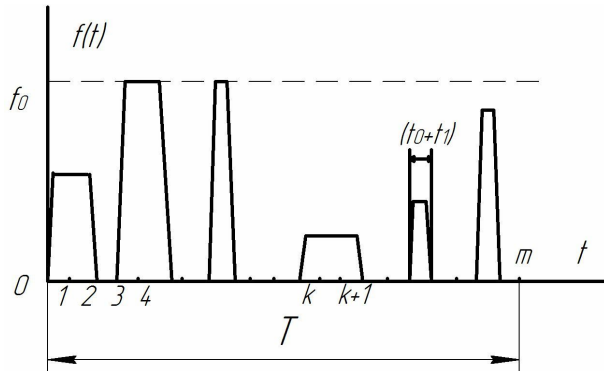


Рис. 1. Функція модуляції однороторної пневматичної сирени

Взагалі 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 комотованої синусоїди, трикутної форми, сполучених дуг парабол та інших, більш складних, конфігурацій.

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

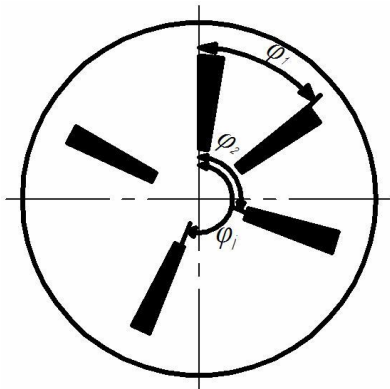


Рис. 2. Взаємне розташування вікон на диску статора

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 усталеності тиску потоку повітря, що нагнітається.

Для забезпечення випадкового характеру розподілу вікон вздовж кола 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.

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

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

з коефіцієнтами

$$\frac{a_0}{2} = f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T};$$

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

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:

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

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

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).

Таким чином, функція модуляції буде мати наступний вигляд:

$$f(t) = \sum_{k=1}^p \lambda_k f_0 \frac{t_0 + t_1}{2T} +$$

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

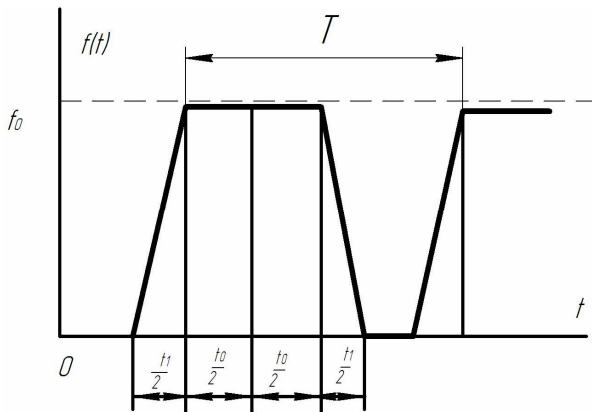


Рис. 3. Функція модуляції однороторної пневматичної сирени

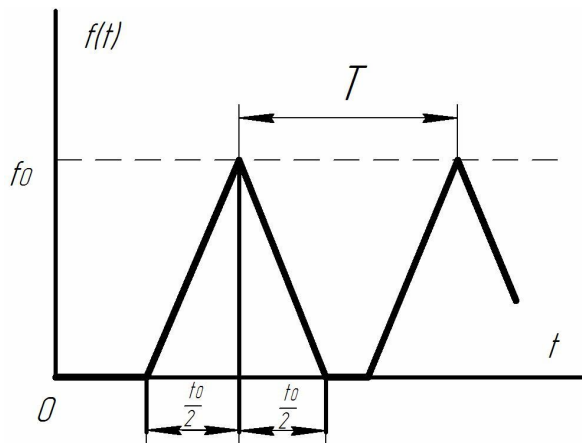


Рис. 4. Функція модуляції однороторної сирени

Формула (2) слушна 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 φ_i (рис. 2), тоді функція модуляції всього потоку повітря, що проходить крізь сирену, буде дорівнювати сумі функцій модуляції всіх вікон.

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:

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

Позначивши

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

$$\frac{4mpf_0}{\pi |(\omega t_0 - \pi)|} \sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin\left(\frac{\omega t_0 - \pi}{2m}\right) \times \times \sin\left(\pi \frac{n}{2m}\right) \sin n\varphi_i = C_n, \quad (6)$$

можемо обчислити амплітуди A_n гармонік спектру застосувавши відому рівність Парсеваля:

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

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.

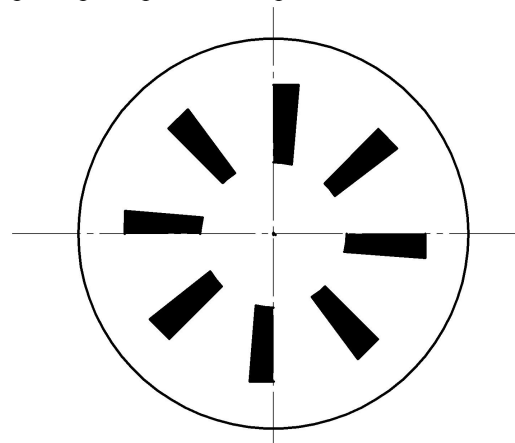


Рис. 5. Статор пневматичної сирени роторного типу

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 циклічного квадратичного ланцюгового коду, це забезпечує випадковий характер розподілу вікон на диску ротора (рис. 6).

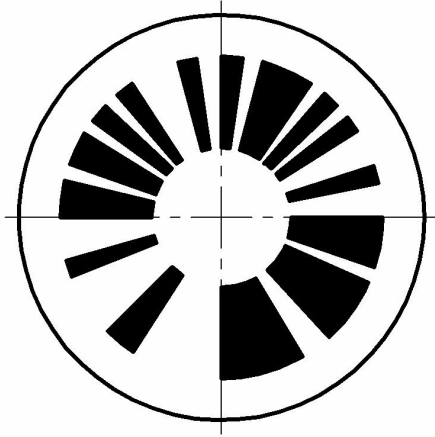


Рис. 6. Ротор пневматичної сирени: $m=59$

Позначимо

$$A_n^0 = \frac{\pi A_n |(m\omega t_0 - \pi)|}{4m\pi f_0}$$

і визначимо спектральний склад генеруемого сиреною шуму для наступних кількісних значень параметрів: $\omega=300 \text{ c}^{-1}$ ($n=3 \cdot 10^3$ об/хв), $\varphi_1=0$, $(t_0+t_1)=1,77401 \cdot 10^{-4}$ с. Розглянемо спочатку найбільш простий випадок, коли $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_p = 1$, тобто коли висота всіх вікон ротора однакова.

Спектр сирени, як показує чисельний аналіз, за числа місць $m=59$ має нерівномірну частотну характеристику з декількома піками (рис. 7). Очевидно, що середня потужність процесу тут розподіляється нерівномірно за частотою. Так, дві полоси спектру - $n = 25...35$ та $n = 50...55$ мають амплітуди у два рази більші за спектральні складові $n = 35...50$ та $n = 55...65$, причому в 3...4 рази більше інших складових спектра. Відносно ж форм з номерами вищими за 95, то вони практично відсутні в спектрі сирени.

Таким чином, використання такої сирени в певній мірі обмежене, бо дає змогу вивчати вплив та досліджувати вироби лише на низьких ($n \leq 70$) формах акустичного випромінювання.

Прийняті механічна і математична моделі однороторної сирени, як видно, підтверджують можливість генерування акустичного збурення обраною конструкцією. Наведені аналітичні співвідношення дають змогу проведення чисельного аналізу амплітуд частотних складових спектру сирени в залежності від заданих значень параметрів конструкції і слугують подальшому якісному і кількісному дослідженню з метою оцінки можливостей сирени для формування акустичного випромінювання бажаного складу.

Являє певний інтерес вивчення роботи сирени з функцією модуляції у формі трикутника (рис. 4). Така форма функції модуляції може мати місце, наприклад, за абсолютного співпадання геометрії вікон ротора і статора.

З іншого боку, у формі трикутника, або його комбінацій, можуть бути виготовлені вікна дисків ротора і статора.

З іншого боку, у формі трикутника, або його комбінацій, можуть бути виготовлені вікна дисків ротора і статора.

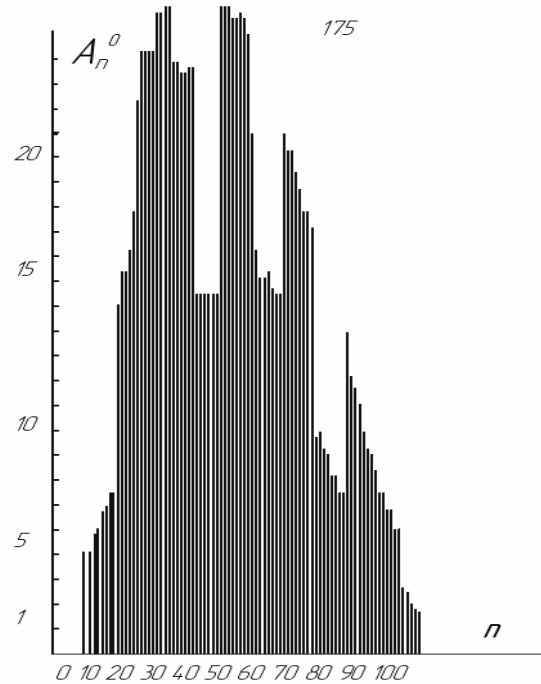


Рис. 7. Спектр сирени за числа місць $m=59$

Сумарна функція модуляції у цьому випадку має вигляд –

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^S \left[\frac{pf_0}{2m} + \frac{2pf_0}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right] \quad (8)$$

Якщо ввести позначення

$$\frac{2pf_0}{\pi} \sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i = B_n ;$$

$$\frac{2pf_0}{\pi} \sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i = C_n ;$$

$$A_n^0 = \frac{\pi A_n}{2pf_0}, \quad (9)$$

тоді, відповідно до рівності Парсеваля, отримуємо формулу для обчислення амплітуд гармонік спектру сирени:

$$A_n = \left[B_n^2 + C_n^2 \right]^{\frac{1}{2}} =$$

$$= \frac{2pf_0}{\pi} \left\{ \left[\sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin^2 \left(\pi \frac{n}{2m} \right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

Якщо кількість місць складає $m = 18$ (рис. 8), в спектрі сирени спостерігаються чітко окреслені три полоси частот – 0...20, 35...55, 75...95, а на ділянках 25...35, 55...75 і 95...100 – провалля. По суті справи, ці форми в спектрі відсутні. Таким чином, ротором сирени з числом місць $m = 18$ зручно користуватися для відтворення очікуємих частотних смуг спектру. Для значень $m=59$, спектр схожий із спектром сирени, в якій функція модуляції має quasi-трапецеїдальну форму (рис. 7). Вони, як видно, практично співпадають.

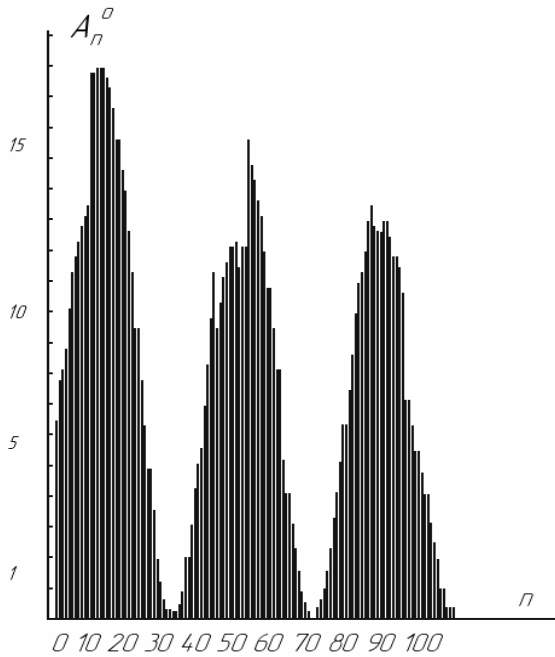


Рис. 8. Спектр сирени з трикутною функцією модуляції за числа місць $m=59$

За умови, що кількість місць $m = 276$, або вище, наприклад, $m = 1528$, спектр сирени має тенденцію до росту амплітуд гармонік із ростом їх номерів (рис. 9). Ця особливість, поряд з білим шумом, являє суттєвий інтерес для практики, бо дозволяє оцінювати акустичну піддатливість елементів конструкції і бортової апаратури, власні частоти яких досить великі. В цьому випадку, сирени з числом місць $m = 59$, наприклад, непридатні зовсім, бо амплітуда гармонік з номерами, вищими за 120, практично дорівнює нулю, і вся енергія акустичного випромінювання концентрується на низьких частотах.

При збільшенні кількості місць m на роторі, характеристика спектру йде більш круто відносно осі частот (рис. 10, пунктирна лінія).

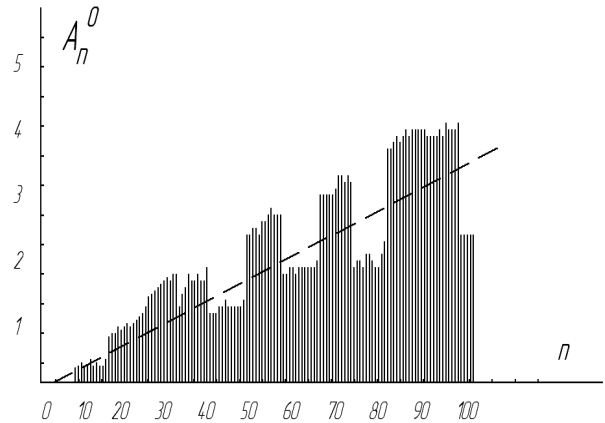


Рис. 9. Спектр сирени з трикутною функцією модуляції та числом місць $m=276$

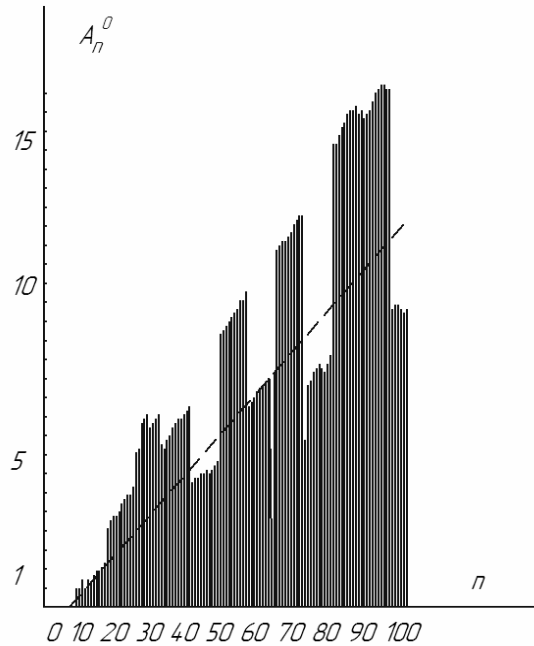


Рис. 10. Спектр роторної сирени з трикутною функцією модуляції та числом місць $m=1528$

Як вже відзначалося, найнебезпечнішим, з точки зору виникнення явища акустичної втомленості в матеріалі, являється широкопугове звукове навантаження. Генеруючи одночасно безліч форм коливань в деталях та вузлах виробів, акустичне випромінювання може стати причиною виникнення небезпечних деформацій внаслідок просторового чи просторово-частотного резонансів. Тому, являє безумовний інтерес вивчення питання створення широкопугового акустичного випромінювання за допомогою однороторної сирени з метою відтворення умов, близьких до експлуатаційних. Для конкретно-

сті, окреслимо ширину смуги частот числом форм, рівним 100, тобто приймемо $n=100$.

Задача оптимізації спектру за цих припущень, зводиться до аналізу виразу:

$$\frac{\partial A_n}{\partial n} = 0. \quad (11)$$

Вирішення поставленої задачі проілюструємо на прикладі функції модуляції у вигляді прямокутних імпульсів, аналітично представленою виразом:

$$f_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^S \left\{ \frac{f_0}{m} \sum_{k=1}^p / \lambda_k + \frac{2f_0}{\pi} \sum_{k=1}^p / \lambda_k \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \times \right. \\ \left. \times \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \left[\cos n\varphi_i \cos n\omega t + \sin n\varphi_i \sin n\omega t \right] \right\}, \quad (12)$$

звідкіля досить легко визначаються амплітуди складових спектру:

$$A_n = \frac{2f_0}{\pi} \sum_{k=1}^p / \lambda_k \left\{ \left[\sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[\sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

Заміна quasi-трапецеїдальної форми функції модуляції прямокутною, як показали подальші обчислення, не вносить суттєвих розбіжностей в оцінку структури спектра. В той же час, досягається значне спрощення математичного апарату вирішуваної задачі. З іншого боку, для визначення потужності акустичного випромінювання важливим постає не стільки форма функції модуляції, скільки значення максимальної витрати повітря. З урахуванням виразів (12), (13), формула (11) отримує такий вигляд:

$$\frac{\partial A_n}{\partial n} = \pi^{-1} f_0 \sum_{k=1}^p / \lambda_k \left[B_n^2 + C_n^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \times \\ \times \left(2B_n \frac{\partial B_n}{\partial n} + 2C_n \frac{\partial C_n}{\partial n} \right) = \\ = f_0 \sum_{k=1}^p / \lambda_k (2\pi)^{-1} \left\{ \left[\sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \cos n\varphi_i \right]^2 + \right. \\ \left. + \left[\sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \sin\left(\pi \frac{n}{m}\right) \sin n\varphi_i \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \sum_{i=1}^S \sum_{n=1}^{\infty} n^{-2} \sin\left(2\pi \frac{n}{m}\right) \left[\pi \frac{n}{m} - \operatorname{tg}\left(\pi \frac{n}{m}\right) \right]. \quad (14)$$

Тут m – кількість рівних ділянок, на які розбивається коло ротора; $f(t) = \lambda_k f_0$ ($0 \leq \lambda_k \leq 1$, k – номер ділянки) – функція модуляції на тих ділянках, де нанесені вікна; f_0 – висота імпульсу; φ_i – кут, на який зсунуті відносно базової радіальної лінії рівновідда-

лені від центру диска статора вікна; сума $\sum_{k=1}^p / \lambda_k$ має

на увазі, що значення параметру k використовуються не поспіль, а тільки для ділянок з імпульсами; p – кількість одиничних імпульсів за період часу T , тому $1 < p \leq m$.

З формули (14) походить, що рівність нулю настає за умови:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \sin\left(2\pi \frac{n}{m}\right) \left[\pi \frac{n}{m} - \operatorname{tg}\left(\pi \frac{n}{m}\right) \right] = 0. \quad (15)$$

Звідси отримуємо, що $m = 276$.

За числа місць на диску ротора 276, спектр сирени майже білий (рис. 11).

Таким чином, за умови, що $m = 276$, однороторна сирена генерує акустичне випромінювання, яке за структурою наближається до білого шуму. Рівень акустичного тиску, пропорційний величині f_0 і, природно, може бути збільшений або зменшений за рахунок зміни висоти вікна.

Отже, задача оптимізації спектру однороторної сирени в досить широкому діапазоні частот вирішена. Доведено, що гармонічні складові спектру таких сирен пропорційні радіальному розміру вікон ротора, в той же час нечутливі до кількості і взаємного кутового положення вікон на диску статора. Усталеність рівня випромінювання визначається тільки числом місць m .

Реальний спектр сирени при $m = 276$ буде, взагалі кажучи, мати проміжну структуру між двома функціями модуляції – quasi-трапецеїдальною та трикутною. З іншого боку, якщо за статором встановити заслінку (shutter) з визначеною геометрією вікон, тоді можна одержати бажаний спектр відповідно до вирішуваних задач.

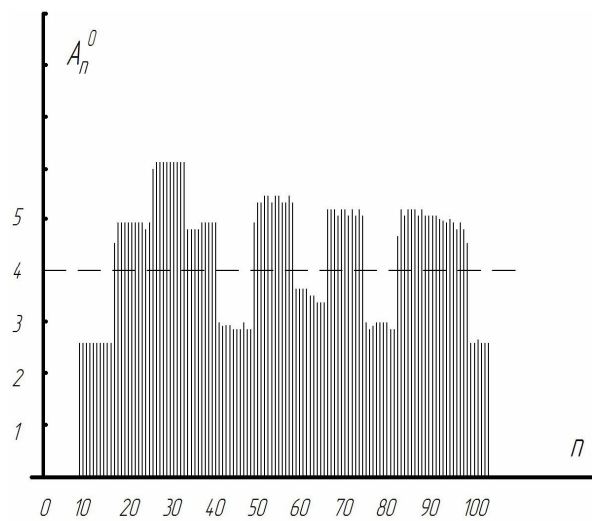


Рис. 11. Диск ротора сирени за числа місць $m=276$ та випадкового розподілення вікон згідно залишкового циклічного ланцюгового коду

Висновки та перспективи подальших досліджень

Наведений аналіз дає право щодо висновку відносно варіації спектру і інтенсивності акустичного поля сирени шляхом різноманітного сполучення функцій модуляції - трапецеїдальної, трикутної та інших модифікацій. Крім того, можливі поєднання канонічних форм, наприклад, зірчастої форми. Реалізація цього може здійснюватися за допомогою заслінки, що встановлюється за статором і жорстко з'єднується з корпусом сирени, натомість геометрія вікон може змінюватися за заданим законом згідно сигналам програмного пристрою.

Декілька зауважень щодо доцільності та перспектив використання багатороторних сирен. Перш за все, слід зауважити, що енергоємність багатороторних сирен збільшується пропорційно кількості роторів. Очевидно, що при цьому ускладнюється також конструкція випробувального стенду і процесу наладки.

Стосовно спектру генеруемого шуму, то обчислення на ПЕОМ дають підстави прогнозувати наступне. Двороторна сирена має спектр, який в основному співпадає з випромінюванням однороторної сирени. Разом з тим, суттєво підсилюються форми n , які кратні 2, якщо другий диск обертається з кутовою швидкістю 2ω . Навпаки, підсилюються форми, які кратні 3, якщо другий диск обертається з кутовою швидкістю 3ω . Відповідно, підсилюються форми, кратні 4, якщо другий диск обертається з кутовою швидкістю 4ω .

Таким чином з'ясовано природу виникаючого ефекту. Роторна пневматична сирена знаходиться на рухомій основі, тобто на поверхні Землі, що має кутову швидкість добового обертання (рис. 12):

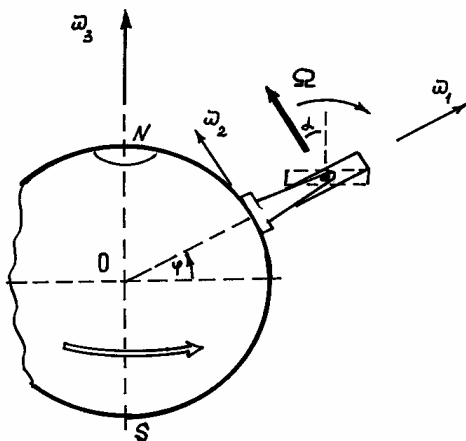


Рис. 12. Зміна просторового положення ротора сирени внаслідок впливу швидкості добового обертання Землі

$$\omega_3 = \frac{2\pi}{24 \cdot 3600} \text{ рад с}^{-1}.$$

Вісь обертання ротора, становить з полуденою лінією кут ψ (кут рискання). Швидко обертаючийся важкий ротор сирени являє собою систему з двома ступенями вільності. Одна реалізується власним обертальним рухом навколо своєї осі геометричної і масової симетрії з кутовою швидкістю $\vec{\Omega}$, інша – поворотом ведучого валу разом з посадженим на нього ротором навколо осі, перпендикулярної до осі вала, на величину, пропорційну радіальному люфту Δ підшипників.

Наявність вертикальної складової ω_1 кутової швидкості добового обертання Землі ($|\omega_1| = \omega_3 \sin \varphi$, де φ – широта місця) призводить до появи гіроскопічного моменту

$$\vec{M}_\Gamma = I\vec{\Omega} \times \vec{\omega}_1,$$

де I – осьовий момент інерції ротора і вала з підшипниками, який намагається встановити ось власного обертання ротора сирени паралельно до вектора $\vec{\omega}_1$ (рис. 12).

Отже, під дією гіроскопічного моменту ротор займе нове положення (пунктирна лінія), відхилене у вертикальній площині на кут α від початкового.

Внаслідок означеного, підшипники ротора будуть відчувати додатковий постійний тиск \vec{N}_Γ . Відповідно до третього закону Нь'ютона, реакція підшипників на цей тиск буде дорівнювати за величиною і протилежною за напрямком гіроскопічному тиску.

Література

1. *Habbarд H.H. Vibration Induced by Acoustic Waves / H.H. Habbarд, S.C. Houbolt // Shock and Vibration Haudbook, Ed. by Harries C.M. and Grede Ch.E. 1961. – P. 321-332.*
2. *The some aspects of flaight safety in conditions penetrate acoustic radiation/ V.N. Koshljakov, V.V. Karachun, V.N. Mel'nick et al. // The World Congr. "Aviation in the XXI-st Century". – Kiev (Ukraine), 2003. – P. 2.37-2.40.*
3. *Карачун В.В. О погрешности курсоуказания ракет-носителей / В.В. Карачун., Е.Р. Потапова, В.Н. Мельник // Космічна наука і технологія, 1999. – Т. 5. – № 4. – С. 70-74.*
4. *Mel'nick V.N. Some aspects of the gyroscopic stabilization in acoustic fields / V.N. Mel'nick, V.V. Karachun // Int. Appl. Mech. – 2002. – 38, No. 1. – P. 74 - 80.*
5. *Karachun V.V. About the influence of acoustic influences to the equipment of space apparatus complex / V.V. Karachun // Proc. of Fourth Ukraine-Russia-China Symp. on Space Science and Technology. – Ukraine, 1996. – P. 720.*

6. Гузь А.Н. Методы расчета оболочек. Т.5. Теория нестационарной аэрогидроупругости оболочек / А.Н. Гузь, В.Д. Кубенко. – К.: Наук. думка, 1982. – 400 с.

7. Clarkson B.L. Design and operations of acoustical fatigue test facilities. Techniques and equipment for environmental testing / B.L. Clarkson // SEF Sympos. Manchester, 6-th Sept. 1965, London. – P. 153-162.

8. Карачун В.В. Волновые задачи поплавокowego гироскопа / В.В. Карачун, Я.Ф. Каюк, В.Н. Мельник; Нац. техн. ун-т Украины «КПИ». – К.: ВИПОЛ, 2007. – С. 217-228.

9. Матохнюк Л.Е. Экспериментальное исследование напряжений в пластинах под воздействием акустических нагрузжений / Л.Е. Матохнюк, А.Ю. Капитален // Проблемы прочности. – 1972. – № 1. – С. 59-62.

Надійшла до редакції 28.09.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.В. Карачун, Національний технічний університет України «КПИ», Київ, Україна.

МОДУЛЯЦИЯ МОЩНОГО АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РОТОРНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИРЕНОЙ

О.Я. Ковалец

Приводятся результаты построения механической расчетной модели роторной динамической сирены. Вычисляется функция модуляции, анализируются особенности и структура генерируемого акустического излучения. Очерчиваются пути создания желаемого усредненного распределения энергии звукового поля. Численный анализ спектра генерируемого сиреной излучения наглядно демонстрирует возможности роторных систем. Решается задача оптимизации спектра в плане создания «белого» шума, как структуры, которая наиболее полно отвечает натурным условиям. Определяется необходимое количество и особенности геометрического распределения радиальных окон на плоскости ротора сирены с помощью остаточного циклического квадратичного цепного кода.

Ключевые слова: роторная сирена, функция модуляции, спектр, окна ротора, окна статора, белый шум, оптимизация спектра, остаточный циклический квадратичный цепной код, число мест на роторе.

MODULATION OF POWERFUL ACOUSTIC RADIATION BY ROTOR DYNAMIC SIREN

O. Ya. Kovalets

Results over of construction of mechanical calculation model of rotor dynamic siren are brought. The function of modulation is calculated, features and structure of the generated acoustic radiation are analysed. The ways of creation of the desired approximated distributing of energy of the voice field are outlined. The numerical analysis of spectrum of the radiation generated a siren demonstrates possibilities of the rotor systems evidently. The task of optimization of spectrum decides in the plan of creation of «white» noise, as a structure which answers model terms most full. The necessary amount and features of the geometrical distributing of radial windows is determined on the plane of rotor of siren by a remaining cyclic quadratic chain kod.

Keywords: rotor siren, function of modulation, spectrum, windows of rotor, windows of stator, white noise, optimization of spectrum, remaining cyclic quadratic chain code, number of places on a rotor.

Ковалець Ольга Яківна – аспірант Національний технічний університет України «КПИ», Київ, Україна, e-mail: O.Ya@i.ua.