

УДК 621.317

О. М. Васілевський, к. т. н.

МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ СИЛОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН У РАЗІ ВИПАДКОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Запропоновано методику оцінювання довговічності конструкцій силових електричних машин, що реалізується на основі одночасного використання функцій миттєвої амплітуди та модуля миттєвої частоти. Наведено миттєві характеристики частоти, амплітуди та вибіркової довговічності, які отримані на основі перетворення Гілберта.

Вступ і постановка задачі

Коливальні процеси в силових електричних машинах (ЕМ) спричиняються різними факторами і відповідно до різних причин виникнення відрізняються за своєю фізичною природою і математичними моделями, що, у свою чергу, визначає різні методи дослідження коливальних процесів. Глибина проникнення в сутність динамічних явищ, що проходять під час функціонування силових ЕМ, забезпечує обґрунтовані конструктивні рішення, необхідні експлуатаційні характеристики, надійність та довговічність конструкцій. В той же час, під час експлуатації ЕМ мають місце численні відмови та аварії, що зменшують термін їх експлуатації. Тому розробка методики оцінювання довговічності конструкцій, що дозволяє продовжити термін експлуатації механізмів і конструкцій ЕМ (асинхронних, синхронних, постійного струму), є *актуальною науковою задачею*.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Відомі роботи [1—3] в яких оцінюється ступінь зносу вузлів ЕМ на основі відношень логарифмічних декрементів затухання автокореляційних функцій вібраційного стану на інтервалах сприйняття та зняття навантажень. Також відомо, що вібрація ЕМ характеризується миттєвими значеннями амплітуди та частоти вібраційного сигналу, але одночасне використання інформації про миттєві значення амплітуди і частоти для оцінювання довговічності конструкцій силових ЕМ на основі дискретного перетворення Гілберта є малодослідженими.

З огляду на вищесказане, *метою статті* є створення математичної моделі, яка дозволить реалізувати методику оцінювання довговічності конструкцій силових ЕМ та подання результатів, що підтверджують правильність основних теоретичних тверджень, на яких базується ця методика.

Методика оцінювання довговічності конструкцій силових ЕМ

Під час оцінювання довговічності конструкцій силових ЕМ, що знаходяться під дією випадкових вібраційних навантажень, важливою задачею є схематизація коливальних процесів навантаження [3, 4]. Для ефективного розв'язання цієї задачі пропонується метод, оснований на використанні миттєвої частоти та миттєвої амплітуди випадкового процесу навантаження.

Розглянемо можливість оцінки довговічності конструкцій силових ЕМ в процесі схематизації стаціонарного навантаження на основі використання методів теорії аналітичного сигналу. В загальному випадку для аналітичного сигналу вигляду $X_s(t) = \cos(\Psi(t))$ за допомогою інтегрального перетворення Гілберта можуть бути отримані миттєва амплітуда (огиначаюча) $A(t)$ та миттєва частота $f(t) = \omega(t)/2\pi$. Для найпростішого моногармонічного процесу миттєві амплітуда і частота є постійними величинами. Миттєві значення амплітуди і частоти випадкового процесу, що не мають детермінованих компонент, є статистично взаємно незалежними випадковими функціями часу [5].

Традиційно в задачах довговічності розглядається ціле число замкнутих циклів процесу наван-

таження, $n = ft$, де n — число циклів гармонічного процесу з частотою f і тривалістю t . Ушкодження, що накопичуються поступово і безперервно протягом, навіть, найменшої тривалості кожного циклу можна описати виразом

$$dn = |f(t)| dt, \tag{1}$$

де dn — приріст числа циклів; $|f(t)|$ — модуль миттєвої частоти; dt — приріст тривалості процесу.

Знак модуля для миттєвої частоти означає, що ушкодження з часом можуть тільки збільшуватись (накопичуватись). Вираз для миттєво граничного числа циклів $N(t)$ до появи ушкодження з використанням відомої степеневі апроксимації кривої стомленості можна записати у вигляді [2]

$$N(t) = \frac{\sigma_{-1}^z N_0}{A(t)}, \tag{2}$$

де σ_{-1} — границя витривалості; z — показник нахилу кривої стомленості; N_0 — число циклів, які відповідають границі витривалості.

Щоб оцінити довговічність конструкції, прийемо гіпотезу додавання втомних ушкоджень. Втомне руйнування на частоті та амплітуді, що безперервно змінюються, настає в момент часу $t = T$; тоді інтеграл від миттєвого відносного ушкодження $dn/N(t)$ в межах від 0 до T досягає одиниці:

$\int_0^T \frac{dn}{N(t)} = 1$. Розкриваючи підінтегральний вираз, з урахуванням формул (1) і (2), отримаємо:

$$\sigma_{-1}^{-z} N_0^{-1} \int_0^T A^z(t) |f(t)| dt = 1. \tag{3}$$

Позначивши через $k_{A,f}$ змішаний момент двох випадкових процесів $A^z(t)$ і $|f(t)|$, отримаємо:

$$k_{A,f} = \lim_{T \rightarrow \infty} T^{-1} \int_0^T A^z(t) |f(t)| dt. \tag{4}$$

З виразу (3) отримаємо формулу для оцінки величини довговічності: $T = \sigma_{-1}^z N_0 k_{A,f}$, в яку входить теоретично змішаний момент. У разі заміни теоретичного моменту його оцінкою, отримаємо вибірккову оцінку для величини довговічності в загальному вигляді:

$$\bar{T}(t) = \sigma_{-1}^z N_0 t \left[\int_0^t A^z(t) |f(t)| dt \right]^{-1}. \tag{5}$$

Оскільки у вихідному випадковому процесі відсутні детерміновані компоненти, тобто має місце статистична незалежність миттєвих амплітуди і частоти процесу, то формула для оцінки довговічності значно спрощується:

$$\bar{T}(t) = \sigma_{-1}^z N_0 \left[\overline{A^z(t) |f(t)|} \right]^{-1}. \tag{6}$$

У виразі (6) риска означає вибірккове середнє. Таким чином, щоб отримати оцінку довговічності конструкції за довільних стаціонарних випадкових навантажень, необхідно, окрім характеристик кривої втоми, мати статистичні характеристики функцій миттєвої амплітуди та модуля миттєвої частоти.

Використаємо отримані результати для оцінки довговічності за різних навантажень. В нашому випадку процес зміни навантажень є сумою двох коливань $X(t) = A_1 \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cos(2\pi f_2 t)$. Тоді спряжений за Гілбертом процес набуде вигляду $X_\Gamma(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t)$, а миттєва амплітуда і миттєва частота будуть описуватися формулами

$$A(t) = A_1 \sqrt{1 + k^2 + 2k \cos(2\pi(f_2 - f_1)t)}; \tag{7}$$

$$f(t) = f_1 + \frac{k(f_2 - f_1) [k + \cos(2\pi(f_2 - f_1)t)]}{1 + k^2 + 2k \cos(2\pi(f_2 - f_1)t)}, \tag{8}$$

де $k = A_2/A_1 < 1$, $(f_2 - f_1) > 0$.

В результаті обчислення змішаного моменту цих випадкових функцій за розповсюдженої умови, що $f_2/f_1 < (1 + 1/k(1 - k))$, запишемо вираз для оцінки довговічності:

$$T = \sigma_{-1}^z N_0 \bar{A}_1^{-z} \left\{ \left[f_1 + k^2 (f_2 - f_1) \right] \Sigma_1 + k (f_2 - f_1) \Sigma_2 \right\}^{-1}, \quad (9)$$

$$\text{де } \Sigma_1 = (1 + k^2)^{\frac{z}{2}-1} + \frac{\left(\frac{z}{2}-1\right)\left(\frac{z}{2}-2\right)}{2^2} (1 + k^2)^{\frac{z}{2}-3} (2k)^2 + \dots +$$

$$+ \frac{\left(\frac{z}{2}-1\right)\left(\frac{z}{2}-2\right)\dots\left(\frac{z}{2}-m\right)}{(2 \cdot 4 \dots m)^2} (1 + k^2)^{\frac{z}{2}-m-1} (2k)^m + \dots;$$

$$\Sigma_2 = \frac{\left(\frac{z}{2}-1\right)}{2} (1 + k^2)^{\frac{z}{2}-2} 2k + \dots + \left(\frac{z}{2}-1\right)\left(\frac{z}{2}-2\right)\dots\left(\frac{z}{2}-m\right) +$$

$$+ \frac{\left(\frac{z}{2}-m-1\right)}{[2 \cdot 4 \dots (m-2)]^2 m} (1 + k^2)^{\frac{z}{2}-m} (2k)^{m-1} + \dots, \quad m = 2, 4, \dots$$

Якщо $\left(\frac{z}{2}-1\right)$ ціле, то приведені ряди для сум Σ_1 і Σ_2 кінцеві $\left(m_{\max} \leq \frac{z}{2}-1\right)$; за будь-якого іншого значення $\left(\frac{z}{2}-1\right)$ — ряди нескінченні, але збігаються. Формула (9) дозволяє оцінити не тільки шукану величину довговічності з бігармонічним навантаженням, але і вклад в цю величину кожної гармоніки. В тих рідкісних випадках, коли $f_2/f_1 \geq (1 + 1/k(1 - k))$, вираз для величини довговічності стає ще громіздкішим і тут не наводиться.

Для найрозповсюдженіших нормальних випадкових навантажень миттєва амплітуда буде розподілена за законом Релея [3], і за високого рівня навантажень на конструкції силових ЕМ можна записати вираз для математичного сподівання:

$$\bar{A}^z(t) = \sigma_x^z 2^{\frac{z}{2}} \Gamma\left(1 + \frac{z}{2}\right), \quad (10)$$

де σ_x — СКВ вихідного процесу; $\Gamma(\cdot)$ — гама-функція.

Для початкового процесу у вигляді суми двох статистично незалежних стаціонарних вузькосмугових нормальних центрових процесів $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ з різними центральними частотами f_1 і f_2 математичне сподівання миттєвої амплітуди сумарного процесу буде визначатися з виразу (10), в якому $\sigma_x^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$ — дисперсія сумарного процесу; σ_1^2 , σ_2^2 — дисперсія відповідно одного та іншого вузькосмугового процесу. Використовуючи формули (6) і (10), отримаємо вираз для довговічності конструкції силових ЕМ:

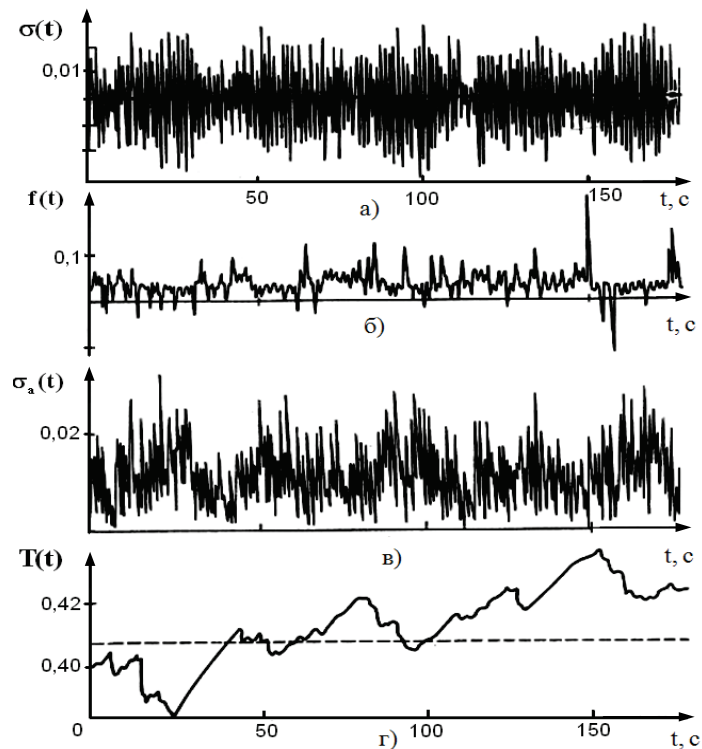
$$T = \sigma_{-1}^z N_0 \left[\sigma_1^2 f_1^2 + \sigma_2^2 f_2^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \left(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 \right)^{\frac{1-z}{2}} 2^{-\frac{z}{2}} \Gamma\left(1 + \frac{z}{2}\right). \quad (11)$$

З формули (11) видно, що довговічність залежить від співвідношення дисперсій і центральних частот вузькосмугових коливальних процесів. Характеристика випадкового процесу вихідного вібронавантаження у разі дії реального широкосмугового процесу на акселерометри [6] зображена на рис. а).

Отримані за допомогою дискретного перетворення Гілберта відповідні випадкові процеси миттєвої частоти (рис. б) і миттєвої амплітуди (рис. в), а також вибіркової довговічності за формулою (11) для $z = 3$ дозволяють оцінити середню довговічність конструкції силової ЕМ у відносних одиницях, що склала 0,416 (рис. г), а також СКВ довговічності, яке дорівнює 0,1.

Висновки

Розроблено математичну модель для оцінки довговічності механізмів і конструкцій силових ЕМ, яка лежить в основі методики оцінювання довговічності конструкцій силових ЕМ у разі дії стаціонарного випадкового вібраційного навантаження. Запропонована методика вибіркової оцінки довговічності конструкцій ЕМ за стаціонарних випадкових навантажень заснована на врахуванні миттєвих характеристик ушкоджень. Вона дозволяє отримати кількісну оцінку впливу частотних складових на величину довговічності, виключення яких зі спектра сигналу може значно збільшити термін служби конструкцій силових ЕМ.



Реалізація випадкового процесу вібронавантажень:

- а) — вихідний процес; б) — миттєва частота;
в) — миттєва амплітуда; г) — вибірка довговічність

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Поджаренко В. О. Діагностика технічного стану електромеханічних систем за логарифмічним декрементом затухання / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. — Донецьк : ДонНТУ. — 2005. — № 88. — С. 138 — 144.
2. Васілевський О. М. Інформаційно-вимірювальна система оцінювання віброметричних параметрів роторних систем / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, О. Г. Ігнатенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. — Донецьк. — 2006. — № 107. — С. 154 — 158.
3. Рагульскис К. М. Кибернетическая диагностика механических систем по виброакустическим признакам / К. М. Рагульскис. — Каунас : Каун. политех. ин-т, 1982. — 121 с.
4. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. Т. 5. Измерения и испытания ; под ред. Генкина М. Д. — М. : Машиностроение, 1981. — 496 с.
5. Васілевський О. М. Система вимірювального контролю параметрів взаємоз'язаних роторних машин : моног. / О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2007. — 156 с. — ISBN 978-966-641-213-6.
6. Васілевський О. М. Інформаційно-вимірювальна система для автоматичного контролю несинхронності обертання та вібродіагностики електромеханічних систем / О. М. Васілевський // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. — Донецк : Норд Компьютер, 2005. — № 1. — С. 29 — 32.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Надійшла до редакції 18.02.10
Рекомендована до друку 6.04.10

Васілевський Олександр Миколайович — доцент кафедри метрології та промислової автоматики.

Вінницький національний технічний університет