YUQORI ANIQLIKDAGI ELEKTROMAGNIT DIAGNOSTIKA USULLARI ORQALI ELEKTR DVIGATELLARINING NOSOZLIKLARINI ERTA ANIQLASH

Djurayev Sherzod Sobirjonovich
Namangan muhandislik-texnologiya instituti
Madaliyev Xushnid Baxromjon o'g'li
Namangan muhandislik-texnologiya instituti

Annotatsiya: Ushbu maqolada elektromagnit diagnostika usullarining elektr dvigatellarining nosozliklarini erta aniqlashdagi ahamiyati ko‘rib chiqiladi. Oqim va kuchlanish signallarini tahlil qilish uchun tezkor Fourier transformatsiyasi (FFT), Veyvlet transformatsiyasi va Hilbert transformatsiyasi kabi zamonaviy signallarni qayta ishlash usullari qo‘llaniladi. Bu usullar yordamida nosozlik spektrlari, amplituda o‘zgarishlari va faza modulyatsiyalari aniqlanib, signalning shovqin nisbati va spektral tahlili baholanadi. Elektr dvigatellarning rotor va stator elementlari nosozliklarini aniqlash uchun matematik modellarning samaradorligi ko‘rsatilgan va amaliyotga tatbiq etish yondashuvlari tahlil qilingan.

Kalit so‘zlar: elektromagnit diagnostika, tezkor Fourier transformatsiyasi, Veyvlet transformatsiyasi, Hilbert transformatsiyasi, elektr dvigatellar, nosozliklarni aniqlash, spektral tahlil, signal qayta ishlash, matematik model.

Kirish. Elektromagnit diagnostika usullarida elektr dvigatellaridan olingan oqim yoki kuchlanish signallari vaqt domenida o'lchanadi. Ushbu signallar nosozliklar paydo bo'lganda o'zlarining spektral tarkibini o'zgartiradi. Fast Fourier Transformatsiyasi (FFT) yordamida vaqt domenidagi signalni chastota domeniga o'tkazish orqali bu o'zgarishlarni aniqlash mumkin.

Diskret fourier transformatsiyasi (DFT)

Vaqt domenidagi diskret signal x[n] uchun Diskret Fourier Transformatsiyasi quyidagicha aniqlanadi:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{n}kn}, \qquad k = 0,1,\dots,N-1$$

Bu yerda:

- X[k] — chastota domenidagi signalning k-chi komponentasi;
- N — signalning uzunligi;
- j — mavhum birlik ($j = \sqrt{-1}$).

Fast fourier transformatsiyasi (FFT)

FFT — bu DFT ni hisoblash uchun samarali algoritm bo'lib, hisoblash murakkabligini $O(N^2)$-dan $O(N\log N)$-ga kamaytiradi. FFT yordamida yuqori tezlikda va aniqlikda spektral tahlil o'tkazish mumkin.

Matematik ifoda:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} (x[n] \cdot \omega[n]) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{n}kn}$$

Bu yerda w[n] — oynalash funksiyasi.

Nosozliklarni aniqlash uchun spektrdagi garmonikalar va yon tarmoqlarning amplituda va fazalari tahlil qilinadi. Masalan, rotor novlari nosozliklari paydo bo'lganda spektrda qo'shimcha garmonikalar hosil bo'ladi, ularning chastotalari quyidagi formula bilan aniqlanadi:

$$f_{fault} = (1 \pm 2S)f_s$$

Bu yerda:

- f_{fault} — nosozlik garmonikasi chastotasi;
- s — sirpanish koeffitsienti;
- f_s — ta'minot chastotasi.

FFT algoritmi DFT ni hisoblashni tezlashtirish uchun ishlatiladi. Asosiy g'oya DFT ning simmetriya va periodiklik xususiyatlaridan foydalanib, hisoblashlarni kamaytirishdan iborat.

DFT ni juft va toq indeksli elementlarga bo'lish mumkin. Dastlabki signal x[n] ni quyidagicha yozamiz:

$$x[n] = \begin{cases} x[2m], & juft\ indexlar\ uchun \\ x[2m+1], & toq\ indexlar\ uchun \end{cases}$$

Bu yerda m=0,1,…,N/2−1.

DFT formulasi:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{n}kn}, \qquad k = 0,1,\dots,N-1$$

Uni juft va toq qismlarga ajratamiz:

$$X[k] = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}2mk} + \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m+1] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}(2m+1)k}$$

Bu tenglamani soddalashtiramiz:

$$X[k] = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N/2}mk} + e^{-j\frac{2\pi}{N}k} \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m+1] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N/2}mk}$$

Bu yerda:

Birinchi yig'indi — juft indeksli elementlarning N/2-nuqtali DFT si:

$$E[k] = \sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N/2}mk}$$

Ikkinchi yig'indi — toq indeksli elementlarning N/2-nuqtali DFT si:

$O[k]=\sum_{m=0}^{\frac{N}{2}-1} x[2m+1] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N/2}mk}$

Shunday qilib, DFT ni quyidagicha yozishimiz mumkin:

$$X[k] = E[k] + e^{-j\frac{2\pi}{N}k} O[k]$$

Bu jarayonni rekursiv ravishda davom ettirib, N/2-nuqtali DFT larni yana ikkiga bo'lamiz. Bu jarayon signal uzunligi N ning darajasi bo'yicha $\log_2 N$ marta amalga oshiriladi.

An'anaviy DFT ning hisoblash murakkabligi $O(N^2)$ bo'lsa, FFT algoritmi hisoblashlarni O(NlogN) ga kamaytiradi. Chunki har bir bosqichda N nuqtali DFT ikkita N/2-nuqtali DFT ga ajratiladi va bu jarayon $\log_2 N$ marta takrorlanadi.

Shunday qilib, FFT algoritmi DFT ni hisoblash uchun rekursiv bo'linish va simmetriya xususiyatlaridan foydalanadi. Bu usul hisoblashlarni sezilarli darajada tezlashtiradi va elektromagnit diagnostika kabi real vaqt tizimlarida signalni tezkor tahlil qilish imkonini beradi.

Elektr dvigatelining sog'lom holatdagi faza oqim signalini vaqt domenida quyidagicha ifodalash mumkin:

$$i(t) = I_m \sin(2\pi f_s t + \phi)$$

Bu yerda:

- I_m — maksimal oqim amplitudasi;
- f_s— ta'minot (asosiy) chastotasi;
- ϕ — bosqich (faza) burchagi.

Elektr dvigatelida nosozliklar paydo bo'lganda, oqim signaliga qo'shimcha garmonikalar va yon tarmoqlar kiradi. Masalan, rotor novlari nosozliklari uchun xarakterli chastotalar quyidagicha ifodalanadi:

$$f_{br} = f_s\left(1 \pm \frac{2S}{P}\right)$$

Bu yerda:

- f_{br} — rotor novlari nosozligiga bog'liq chastotalar;
- s — sirpanish koeffitsienti:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

- P — qutblar soni (yoki rotor novlari soni);
- ns — sinxron tezlik:

$$n_s = \frac{120 f_s}{P}$$

Signalning umumiy ifodasi nosozliklar bilan:

$$i(t) = I_m \sin(2\pi f_s t) + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(2\pi f_{br_k} t + \phi_k)$$

Bu yerda I_k va ϕ_k — nosozlikdan kelib chiqadigan garmonik komponentalarning amplituda va fazalari.

Signalni namunalar olish tezligi f_s ga nisbatan Nyquist teoremasiga muvofiq tanlash kerak:

$$f_s^{sample} \geq 2 f_{max}$$

Bu yerda f_{max} — tahlil qilinayotgan signalning maksimal chastotasi.

Diskret signal:

$$i(t) = i(nT_s) = I_m \sin(2\pi f_s n T_s) + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(2\pi f_{br_k} n T_s + \phi_k)$$

Bu yerda $T_s = \frac{1}{f_s^{sample}}$ — namunalar olish oralig'i.

FFT yordamida chastota domeniga o'tish:

$$I[k] = \sum_{n=0}^{N-1} i[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$$

Bu yerda N — namunalar soni, k — chastota indekslari (k=0,1,…,N−1).

Spektral Tahlil va Nosozliklarni Aniqlash quyidagicha ko'rinishda bo'ladi

$$f_k = \frac{k}{NT_s}$$

FFT natijasida olingan spektrda nosozliklarga mos keladigan chastotalarda amplituda o'zgarishlari kuzatiladi. Nosozlik chastotalarini aniqroq aniqlash uchun spektral tahlilda quyidagi nuqtalar hisobga olinadi:

Spektral rezolyutsiya:

$$\Delta f = \frac{1}{NT_s}$$

Rezolyutsiyani oshirish uchun N ni oshirish yoki T_s ni kamaytirish mumkin.

Spektral oqishlarni kamaytirish uchun oynalash funksiyasi w[n]] qo'llaniladi:

$$i_w[n] = i[n] \cdot \omega[n]$$

Masalan, Hamming oynasi:

$$\omega[n] = 0.54 - 0.46cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right)$$

Nosozlik Chastotalarining Matematik Ifodasi quyidagicha ko'rinishda bo'ladi.

Rotor novlari nosozliklari uchun:

$$f_{br} = f_s(1 \pm 2S)$$

Stator o'ramlari nosozliklari uchun:

Stator nosozliklari signalda simmetriyaning buzilishiga olib keladi, bu esa nol ketma-ketlik komponentalarining paydo bo'lishiga sabab bo'ladi. Ushbu komponentalar chastotasi:

$$f_{ss} = f_s$$

Lekin amplitudada notekisliklar paydo bo'ladi.

Podshipnik nosozliklari yuqori chastotali garmonikalar va tranzient hodisalarga olib keladi, ularni aniqlash uchun Veyvlet transformatsiyasi qo'llaniladi.

Shovqinni Hisobga Olish va Signal-Noz-Signal Nisbati (SNR)

Signalga shovqin qo'shilishi:

$$i_{tot}[n] = i[n] + n[n]$$

Bu yerda n[n]— shovqin signali, odatda oq shovqin sifatida model qilinadi:

$$n[n] \sim \mathcal{N}(0, \sigma_n^2)$$

SNR hisoblash:

$$SNR(dB) = 10log_{10}\left(\frac{P_{signal}}{P_{noise}}\right)$$

Bu yerda P_{signal} va P_{noise} — signal va shovqin quvvatlari.

Veyvlet Transformatsiyasi Orqali Tranzient Hodisalarni Aniqlash

Veyvlet transformatsiyasi vaqt-chastota domenida tahlil qilish imkonini beradi.

Diskret Veyvlet Transformatsiyasi (DWT):

$$W_\psi[a,b] = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_{n=0}^{N-1} i[n]\psi^*\left(\frac{n-b}{a}\right)$$

Bu yerda:

• ψ — asosiy veyvlet funksiyasi;

- a — masshtab (chastota) parametri;
- b — siljish (vaqt) parametri;
- ∗ — kompleks qo'shish.

Veyvlet tahlili tranzient va no-statsionar signallarni tahlil qilishda samarali.

Matematik model asosida signalni generatsiya qilish:

Namunaviy signalni yaratish:

$$i_{healthy}[n] = I_m \sin(2\pi f_s n T_s)$$

Nosozlik komponentalarini qo'shish:

$$i_{fault}[n] = i_{healthy}[n] + \sum_k I_k \sin(2\pi f_{br_k} n T_s + \phi_k)$$

Shovqinni qo'shish:

$$i_{total}[n] = i_{fault}[n] + n[n]$$

Simulyatsiya natijalarini tahlil qilish:

- FFT yoki DWT yordamida spektral tahlil o'tkazish.
- Nosozlik chastotalaridagi amplitudalarni o'lchash.
- SNR ni hisoblash va uning tahlil natijalariga ta'sirini o'rganish.

CHASTOTA DOMENIDA FILTRLAR QO'LLASH

Nosozlik chastotalarini aniqlashni osonlashtirish uchun chastota domenida filtrlar qo'llanilishi mumkin.

Band-pass filtr:

$$H(f) = \begin{cases} 1, f_1 \le |f| \le f_2 \\ 0, boshqa\ hollarda \end{cases}$$

Bu yerda f_1 va f_2 — filtr o'tkazish polosining pastki va yuqori chegara chastotalari.

Filtrlashdan keyin signal:

$$I_{filtered}[k] = I[k] \cdot H(f_k)$$

Hilbert transformatsiyasi signalni kompleks domeniga o'tkazib, uning analitik ifodasini olishga imkon beradi. Bu usul signalning amplituda qobig'i (envelope) va tezkor chastotasini (instantaneous frequency) aniqlash uchun qo'llaniladi. Elektr dvigatelining nosozliklari signalning amplituda va faza xususiyatlariga ta'sir qiladi, bu esa Hilbert transformatsiyasi yordamida aniqlanishi mumkin.

ANALITIK SIGNALNI OLISH

Vaqt domenidagi haqiqiy signal x(t) uchun uning analitik signali z(t) quyidagicha aniqlanadi:

$$z(t) = x(t) + j \cdot \hat{x}(t)$$

Bu yerda:

- $\hat{x}(t)$ — x(t) ning Hilbert transformatsiyasi;
- j — mavhum birlik.

Hilbert transformatsiyasi matematik ifodasi:

$$\hat{x}(t) = \mathcal{H}\{x(t)\} = \frac{1}{\pi} P.V. \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau$$

Bu yerda "P.V." — Cauchy principal value (asosiy qiymat).

Analitik signalning amplituda qobig'i va fazasi quyidagicha aniqlanadi:

Amplituda qobig'i (instantaneous amplitude):

$$A(t) = |z(t)| = \sqrt{x(t)^2 + \hat{x}(t)^2}$$

Tezkor faza (instantaneous phase):

$$\phi(t) = arctan\left(\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}\right)$$

Tezkor chastota (instantaneous frequency):

$$f_{inst}(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt}$$

Signal Modeli va Nosozliklarni Kiritish

Elektr dvigatelining namunaviy holatidagi oqim signali:

$$i_{healthy}(t) = I_m \sin(2\pi f_s t)$$

Nosozliklar signalga qo'shimcha garmonikalar, amplituda modulyatsiyasi va shovqinlar kiritadi.

Umumiy signal modeli:

$$x(t) = [I_m + \Delta I(t)] \sin\big(2\pi f_s t + \Delta\phi(t)\big) + n(t)$$

Bu yerda:

- ΔI(t) — amplitudaning vaqt bo'yicha o'zgarishi (nosozlikdan kelib chiqadigan);
- Δϕ(t) — fazaning vaqt bo'yicha o'zgarishi;
- n(t) — shovqin signali.

Amplituda modulyatsiyasi (AM) komponentasi:

$$\Delta \mathrm{I(t)} = I_a \sin(2\pi f_m t)$$

Faza modulyatsiyasi (FM) komponentasi:

$$\Delta\phi(t) = \phi_a \sin(2\pi f_m t)$$

Hilbert transformatsiyasi yordamida elektr dvigatelining signalidan amplituda va fazaviy o'zgarishlarni aniqlash mumkin. Bu o'zgarishlar dvigatel nosozliklarining mavjudligiga ishora qiladi. Matematik modellarning yaratilishi va amaliy simulyatsiyalar nosozliklarni aniqlash jarayonini optimallashtirishga yordam beradi.

XULOSA

Maqolada elektr dvigatellarining elektromagnit diagnostika usullaridan foydalangan holda nosozliklarini aniqlash imkoniyatlari o'rganilgan. Tezkor Fourier transformatsiyasi (FFT), Veyvlet transformatsiyasi va Hilbert transformatsiyasi kabi zamonaviy signallarni qayta ishlash usullari yordamida nosozlik spektrlari, amplituda o'zgarishlari va faza modulyatsiyalari samarali aniqlanishi ko'rsatildi. Mazkur usullar elektr dvigatellarining rotor va stator elementlaridagi nosozliklarni erta bosqichda aniqlash imkonini berib, diagnostika aniqligini oshiradi. Matematik modellarning amaliy simulyatsiyalar bilan qo‘llanishi diagnostika jarayonini optimallashtirish va real vaqt rejimida kuzatish tizimlarini takomillashtirishga xizmat qiladi. Tadqiqot natijalari nosozliklarni aniqlash aniqligini oshirish va dvigatellar ishlashining ishonchliligini ta'minlash uchun muhim asos yaratadi.

Foydalangan adabiyotlar

1. Лебедев, А. А., & Зайцев, Е. И. (2018). Диагностика электромеханических систем в эксплуатации [Diagnostics of Electromechanical Systems in Operation]. Электроника и Связь.
2. Иванов, С. П. (2019). Термодинамический мониторинг и диагностика электродвигателей [Thermodynamic Monitoring and Diagnostics of Electric Motors]. Техника и Электротехника.
3. Кузнецов, А. В., & Смирнов, Д. Н. (2016). Мониторинг и диагностика электроприводов в промышлизености [Monitoring and Diagnostics of Electric Drives in Industry]. Энергетика и Автоматизация.
4. Соловьев, М. Н. (2017). Эффективные методы диагностики электродвигателей на основе виброанализа [Effective Methods of Diagnostics of Electric Motors Based on Vibration Analysis]. Промышленная Диагностика.
5. Гусев, А. П., & Козлов, С. В. (2018). Диагностика и обслуживание электромеханических систем [Diagnostics and Maintenance of Electromechanical Systems]. Электротехника и Электроэнергетика.
6. Кодиров Д.Т. Алгоритмы устойчивого многошагового оценивания состояния нелинейных стохастических систем // Международный научно-технический журнал «Химическая технология. Контроль и управление». Ташкент, ТашГТУ. №5, 2017. -С.66-71.
7. Тошпулатов, К. (2023). МЕНЕДЖМЕНТ: ПРИРОДА И СТРУКТУРА ОРГАНИЗАЦИЙ, И РОЛЬ ОРГУПРАВЛЕНЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ. *Новости образования: исследование в XXI веке*, *1*(11), 279-282.