живленні чутливого обладнання неналежної (модифікованої) форми напруги втрати в статорі електродвигуна зростають на 15–20%, викликаючи його шум, вібрацію та додаткове теплове навантаження, а отже і подальшу відмову.

Під час експлуатації генераторного обладнання особливого значення набуває складова охорони праці та пожежної безпеки [3, 4]. Варто розуміти, що основними загрозами є електричний струм, перегрів обмоток електроспоживачів, руйнування ізоляції та загроза короткого замикання, токсичність вихлопних газів і пожежонебезпека пального.

Забезпечення якісної синусоїдальної форми напруги та мінімізація вищих гармонік у побутових генераторах забезпечує підвищення енергоефективності, збереження техніки та зменшення аварійності. Результати можуть бути використані для вибору резервного електропостачання як для житлових, так і виробничих (у тому числі аграрних) підприємств.

Список використаних джерел

1. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення (EN 50160:2010, IDT). [Чинний від 2015-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2014. 29 с.
2. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). Х-те вид., перероб. і доп. Київ : Мінпаливенерго України, 2017. 617 с.
3. Про затвердження Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів : наказ Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4 // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0093-98 (дата звернення: 15.09.2026).
4. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні : наказ МВС України від 30.12.2014 № 1417 // База даних «Законодавство України». URL: https://zakon.rada.gov.ua/go/z0252-15 (дата звернення: 16.09.2026).

УДК 621.313.333

ВПЛИВ ТАНГЕНЦІАЛЬНОГО ЗМІЩЕННЯ ДІЛЯНОК РОТОРА НА ГАРМОНІЧНІ ЕЛЕКТРОРУШІЙНІ СИЛИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

Вахоніна Л. В.
Миколаївський національний аграрний університет

Асинхронні двигуни насосів і вентиляторів агропромислових установок працюють за змінного навантаження. Зубчастість магнітопроводів і просторова дискретність обмоток створюють вищі гармоніки магнітного поля, які можуть спричиняти додаткові втрати та нагрівання [1]. Вибір конструкції ротора потребує оцінювання цих складових разом із впливом на основне поле й обертальний момент.

Обґрунтували компенсацію зубцевих складових електрорушійної сили (ЕРС) у секціонованому роторі з проміжними короткозамикальними кільцями. У дослідженні [2] модель тягового двигуна перевірено експериментально; показано залежність гармонічних втрат від геометрії пазів і розташування стрижнів. Робота [3] засвідчує вплив міжстрижневих струмів на характеристики двигуна. Отже, оцінювання зміщення секцій має поєднувати аналіз поля та електричних контурів ротора.

Аналітично оцінити вибірковість компенсації зубцевих гармонік за тангенціального зміщення ділянок ротора та визначити умови застосування цього рішення в агропромислових електроприводах.

Результати досліджень. Виконано аналітичне узагальнення підходу [1]. Власних експериментальних випробувань не проводили. Прийнято однакову активну довжину ділянок, рівні амплітуди відповідних гармонічних ЕРС і відсутність інших відмінностей, крім фазового зсуву. Для двох ділянок відносна амплітуда суми ЕРС становить:

$$\kappa_h = \left| \frac{1 + e^{jh\beta}}{2} \right| = \left| \cos\left(\frac{h\beta}{2} \right) \right| \qquad (1)$$

де h - просторовий порядок гармоніки в механічній кутовій координаті; β - взаємне механічне зміщення ділянок, рад; j - уявна одиниця. Коефіцієнт κ характеризує амплітуду сумарної ЕРС, а не її миттєву проєкцію чи втрати потужності. За $\beta = 0$ він дорівнює одиниці.

Для зубцевої складової провідності за ідеалізованою моделлю [1] $h = kz$, де z - кількість зубців ротора, k - номер складової. Зміщення $\beta = \pi / z$ відповідає половині зубцевого ділення $2\pi / z$. Тоді непарні складові компенсуються, а парні зберігають сумарну амплітуду.

Для чотирьох симетричних ділянок із кутовими положеннями $0,\ \beta_1,\ \beta_2$, $\beta_1 + \beta_2$, де $\beta_1 = \pi / z$, $\beta_2 = \pi / (2z)$, за тих самих припущень одержано:

$$\kappa_{kz} = \left| \cos\left(\frac{k\pi}{2} \right) \cdot \cos\left(\frac{k\pi}{4} \right) \right| \qquad (2)$$

Таблиця 1

Відносна амплітуда суми зубцевих ЕРС

Номер k	Дві ділянки	Чотири ділянки
1	0	0
2	1	0
3	0	0
4	1	1

Джерело: аналітичний розрахунок за формулами (1), (2).

Схема з чотирма ділянками компенсує перші три складові, але не пригнічує складові з k, кратним чотирьом. Тому навіть в ідеалізованому випадку повної компенсації всього зубцевого спектра не досягнуто. Крім того, зміщення однойменних стрижнів дискретної обмотки послаблює її зв'язок з основною гармонікою поля [1]. Цей ефект потрібно враховувати під час оцінювання моменту.

Нульова сумарна ЕРС не доводить відсутності місцевих струмів у короткозамкнених контурах. Проміжні кільця та міжстрижневі зв'язки мають бути відтворені в електричній моделі [3]. Зміна втрат залежить також від опорів контурів, частот гармонік і властивостей магнітопроводу. За значеннями таблиці 1 зміну коефіцієнта корисної дії визначити неможливо.

Для насосних і вентиляційних агропромислових установок доцільно добирати зміщення за спектром найбільш значущих гармонік. Конструкції слід порівнювати за однакової корисної потужності, частоти живлення й умов охолодження, перевіряючи пусковий момент, момент за робочого навантаження, нагрівання та загальні втрати. Наведений розрахунок є етапом відбору конструкції; її ефективність потребує моделювання повного ротора та стендових випробувань.

Висновки. Тангенціальне зміщення ділянок ротора забезпечує вибіркову компенсацію гармонічних ЕРС у прийнятій моделі. Поєднання зміщень на половину й чверть зубцевого ділення компенсує перші три складові, зберігаючи четверту. Для застосування в агропромислових електроприводах необхідно підтвердити зменшення загальних втрат зі збереженням потрібних характеристик обертального моменту. Величину економії електроенергії наведений аналіз не встановлює.

Список використаних джерел

1. Ставинский А. А., Плахтырь О. О., Вахонина Л. В., Пальчиков О. О. Асинхронні двигуни з тангенціальним розміщенням зубцових гармонік магнітного поля. Ч. 1. Добавочные электродвигущие сили и силы. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії. 2017. № 1 (1223). С. 16–21. URL: https://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2017_1_0.pdf.

2. Siddique M. S., Ertan H. B., Alam M. S., Khan M. U. Investigation of Harmonic Losses to Reduce Rotor Copper Loss in Induction Motors for Traction Applications. World Electric Vehicle Journal. 2025. Vol. 16, No. 5. Art. 248. DOI: 10.3390/wevj16050248.

3. Williamson S., Smith A. C. Equivalent circuits for cage induction motors with inter-bar currents. IEE Proceedings: Electric Power Applications. 2002. Vol. 149, No. 3. P. 173–183. DOI: 10.1049/ip-epa:20020161.