

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРУ ГАРМОНІК ПОЛІФУНКЦІОНАЛЬНОГО ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЗАГЛИБЛОГО ТИПУ

Заблудський М.М., к.т.н., доц., Філатов М.А., Квасов В.О., Лупанов А.В.

Донбаський державний технічний університет

Україна, 94204, Луганської обл., Алчевськ, пр. Леніна, 16, ДонДТУ, кафедра "Електричні машини та апарати", тел. (06442) 2-05-64, факс (06442) 2-68-87, E-mail: info@dgmi.edu.ua.

Наведені результати експериментальних досліджень, отримані спектрограми напруги при різних режимах роботи, встановлена природа виникнення вищих гармонік в ПЕМП.

Приведены результаты экспериментальных исследований, получены спектрограммы напряжения при разных режимах работы, установлена природа возникновения высших гармоник в ПЭМП.

ВСТУП

Створення поліфункціональних електромеханічних перетворювачів (ПЕМП) і енергозберігаючих технологій на їх основі базується на ідеї суміщення в одному електромеханічному пристрої одночасно нагрівальних, транспортуючих, змішувальних (турбулентно-формуєчих) функцій, інтеграції теплової енергії і спрямування останньої в зону переробки сировини. При цьому порожнистий феромагнітний ротор охолоджується сировиною, яка переробляється. Складність опису взаємозв'язаних теплових, електромагнітних, гідродинамічних і механічних процесів, необхідність координації потоків енергії, а також наявність нетрадиційних для сучасних асинхронних машин багатомодульної структури і режимів роботи, таких як тривала стоянка під струмом, робота при великих ковзаннях, динамічні режими форсування потребують глибоких теоретичних і експериментальних досліджень.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На відміну від методик проектування традиційних асинхронних машин увесь спектр субгармонік і вищих гармонік використовується в ПЕМП для формування оптимальної корисної теплової і механічної потужності [1, 2]. Визначення гармонічного складу магнітного поля, диференціація або суміщення дії електромагнітних моментів від дії вищих гармонік прямого і зворотнього магнітних полів, уточнені розрахунки теплової потужності при різних режимах роботи ПЕМП та ін. – низка остаточно не вирішених на сьогодні наукових і практичних задач.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В умовах несиметричності джерела живлення та параметрів ротора експериментально визначити спектр гармонік ПЕМП заглибного типу.

ФОРМУВАННЯ ЧАСТОТНОГО СПЕКТРА ГАРМОНІК ПЕМП

Найпоширеніші варіанти конструкцій статорів двигунового модуля (ДМ) і гальмівного модуля (ГМ) ПЕМП наступні:

статорні обмотки ГМ і ДМ покладені в пазах окремих магнітопроводів і виводами підключені до

загальної живильної мережі. При цьому статор ГМ включений у режимі противключення;

статори ДМ і ГМ покладені в загальних пазах. Обмотки взаємоіндуктивно не зв'язані, що досягається вибором відповідних кроків обмоток, обмеженням числа паралельних галузей і способом з'єднання фаз.

Статорні обмотки можуть бути з'єднані як зіркою, так і трикутником. Як правило, ПЕМП мають загальний зовнішній (внутрішній) порожнистий феромагнітний ротор (ПФР).

При підключенні обмотки ДМ до трифазної первинної мережі із частотою f , утвориться обертове $2p_d$ – полюсне поле Φ_d , під дією якого в масивному роторі протікають вихрові струми, створюється асинхронний момент і ротор обертається із частотою $n_n = n_1 (1 - s_d)$, де $n_1 = 60 f_1/p_d$ й s_d – ковзання ДМ. Частота струмів у роторі $-f_{2d} = f_1 s_d$.

При підключенні до первинної мережі статорної обмотки ТМ утвориться $2p_T$ – полюсне поле Φ_T , що наводить у масивному роторі ЕДС із частотою:

$$f_{2T} = \frac{p_T}{60} (n_p \pm n_T) = \left[\frac{p_T}{p_d} (1 - s_d) \pm 1 \right] f_1 = s_T \cdot f_1, \quad (1)$$

Ковзання гальмівного модуля $S_{ГМ}$ визначається за виразом:

$$S_{ГМ} = \frac{p_{ГМ}}{p_{ДМ}} \left[1 - \frac{1}{H} \int_{t_{РСС}}^{t_{СТ}} [M_{ЕМ,Р}(t) - M_C] dt \pm 1 \right], \quad (2)$$

де $t_{РСС}$ – тривалість режиму "стоянка пид струмом"; $(t_{СТ} - t_{РСС})$ – тривалість досягнення швидкості ротора сталої величини, H – інерційна постійна ротора; $M_{ЕМ,Р} = (M_{ЕМ(ДМ)} \pm M_{ЕМ(ГМ)})$ – результуючий електромагнітний момент; $p_{ДМ}$, $p_{ГМ}$ – число пар полюсів відповідно двигунового (ДМ) та гальмівного (ГМ) модулів.

Знак "+" відповідає зустрічному, а "-" – узгодженному обертанню полів Φ_d і Φ_T .

МЕТОДИКА ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Спектральний аналіз – це один з методів обробки сигналів, який дозволяє охарактеризувати частотний склад вимірюваного сигналу. Перетворення Фурьє є

математичною основою, яка пов'язує часовий або просторовий сигнал (або ж деяку модель цього сигналу) з його уявленням в частотній області. Методи статистики грають важливу роль в спектральному аналізі, оскільки сигнали, як правило, мають шумовий або випадковий характер. Якби основні статистичні характеристики сигналу були відомі точно або ж їх можна було б без помилки визначити на кінцевому інтервалі цього сигналу, то спектральний аналіз був би галуззю точної науки. Проте насправді по одному-єдиному відрізку сигналу можна отримати тільки деяку оцінку його спектру. Тому завданням є дослідження вищих гармонік, що дуже актуально з погляду енергозберігаючих технологій, оскільки окрім виявлення несправностей, поліпшення роботи електромеханічного перетворювача і його енергетичних показників, можна поліпшити і гармонійний склад наших електричних мереж.

Дослідження вищих гармонік полягає у виявленні гармонійного спектру і подальший його аналіз. Проаналізувавши, чим викликані ті або інші вищі гармоніки можна регулювати їх склад, як в первинному, так і у вторинному контурах. Нижче наведена схема стенда для дослідження вищих гармонік (рис. 1).

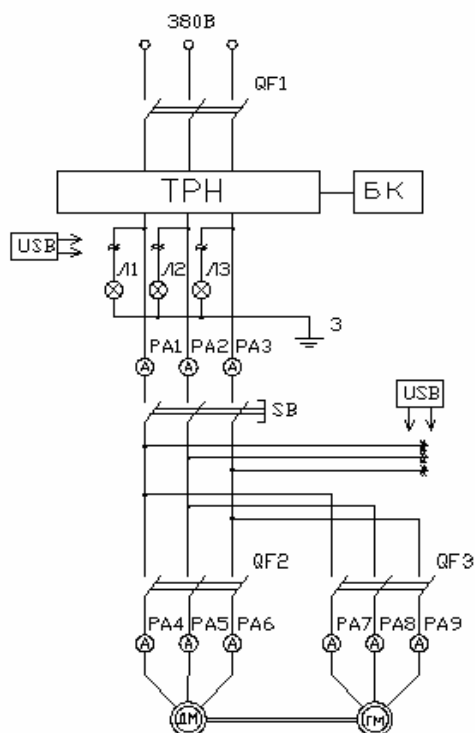


Рис. 1. Схема для дослідження вищих гармонік

В першому випадку використовується аналоговий осцилограф. В цьому випадку необхідно перенести картинку з екрану осцилографа на будь-який носій для подальшого перетворення в цифровий вигляд. Існує маса різних програм для оцифрування, найбільш зручна у використанні є Graph2digit 0.61, яка служить для оцифрування графіків представлених файлами у форматах jpg, bmp або wmf. Програма дозволяє оцифрувати графік із заданим кроком і при необхідності відредагувати отримані результати.

Результати оцифрування можна зберегти в текстовий файл або скопіювати в буфер обміну для подальшої обробки, наприклад в Excel. Для проведення спектрального аналізу використовуємо систему комп'ютерної математики MATHCAD, призначену для автоматизації вирішення масових математичних завдань в областях науки і техніки. MATHCAD має вбудовану функцію реалізації чисельного методу - це швидке перетворення Фур'є (ШПФ), що дозволяє істотно спростити процедуру наближеного спектрального аналізу. ШПФ - швидкий алгоритм перенесення відомостей про функцію, задану 2i відліками в тимчасовій області, в частотну область. Якщо мова йде про спектральному аналізі функції $y(t)$, її потрібно задавати дійсними відліками і використовувати функцію $fft(V)$, де V - вектор, елементи якого зберігають відліки функції $y(t)$. Результатом буде також вектор A з комплексними елементами - відліками в частотній області (їх удвічі менше, ніж відліків в тимчасовій області).

В другому випадку використовується цифровий осцилограф, що запам'ятовує, який оснащений алгоритмом ШПФ для проведення аналізу сигналу не тільки в тимчасовій, але і в частотній області. По отриманих спектрограмах проводиться аналіз і висновок про технічний стан ПЕМП.

Для виявлення впливу режимів роботи ПЕМП, комутаційних спотворень тиристорного регулятора напруги (ТРН), несиметрії системи керування ТРН на гармонічний склад, форму та амплітуду значення струмів і напруг ПЕМП проведенні наступні випробування дослідного зразка заглибного ПЕМП потужністю 3 кВт і зняті осцилограми:

- напруги мережі живлення;
- вхідних і вихідних напруг і струмів ТРН при активному навантаженні;
- вхідних і вихідних напруг і струмів при живленні ПЕМП через ТРН у режимі роботи - тривала "стоянка під струмом" ($s = 1$);
- вхідних і вихідних напруг і струмів при живленні ПЕМП через ТРН у режимі обертання ротора ПЕМП;
- реєстрація спектрограми напруги й струмів при живленні від ТРН відповідно активного навантаження ПЕМП.

Отримані осцилограми наведені на рис. 2 – 6.

Аналіз за допомогою швидкого перетворення Фур'є отриманих осцилограм наведено на рис. 7 – 11.

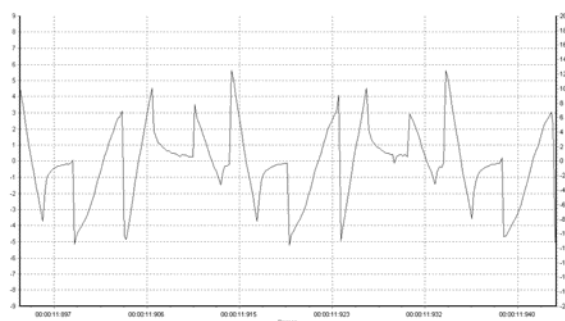


Рис. 2. Лінійна напруга (AB) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

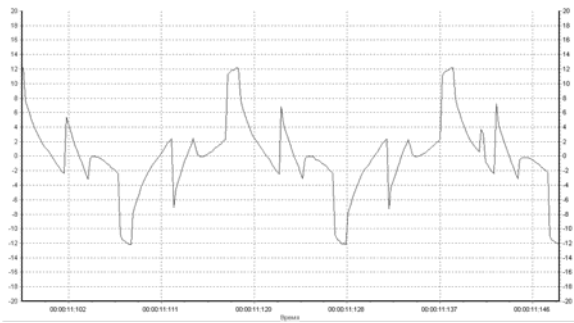


Рис. 3. Лінійна напруга (АС) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

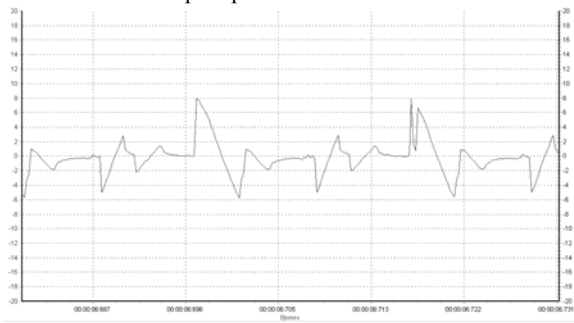


Рис. 4. Лінійна напруга (BC) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

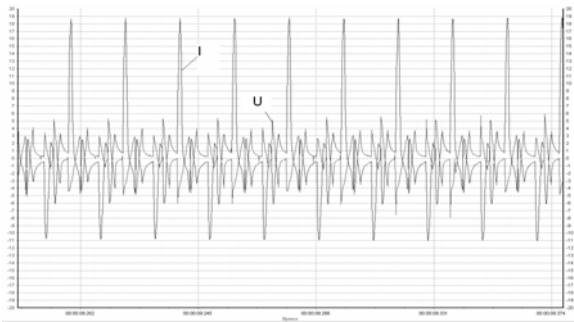


Рис. 5. Лінійна напруга (AB) на виході ТРН при активному навантаженні й струм фази С

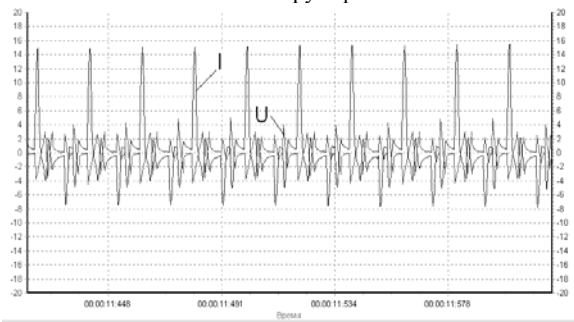


Рис. 6. Лінійна напруга (AB) на виході ТРН у режимі "стоянка під струмом" й струм фази С

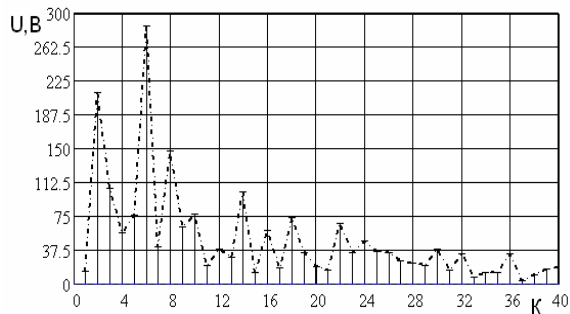


Рис. 7. Гармоніки напруги (AB) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

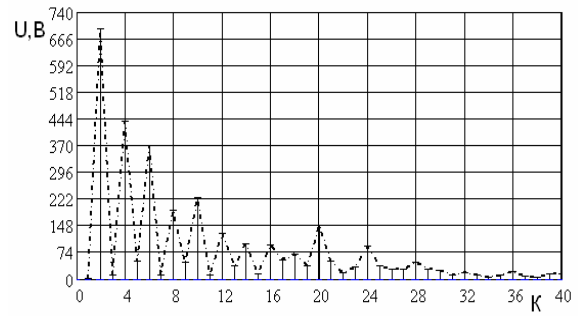


Рис. 8. Гармоніки напруги (АС) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

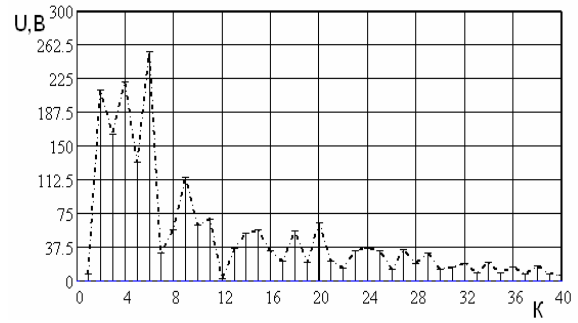


Рис. 9. Гармоніки напруги (BC) на виході ТРН при обертанні ротора ПЕМП

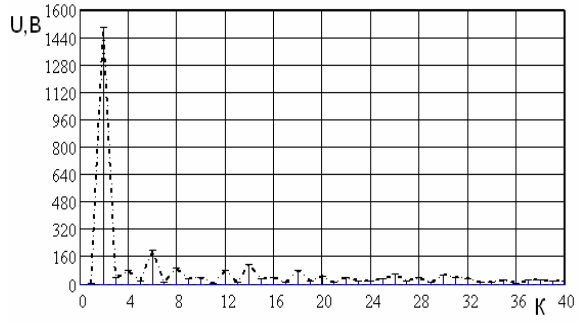


Рис. 10. Гармоніки напруги (AB) на виході ТРН при активному навантаженні

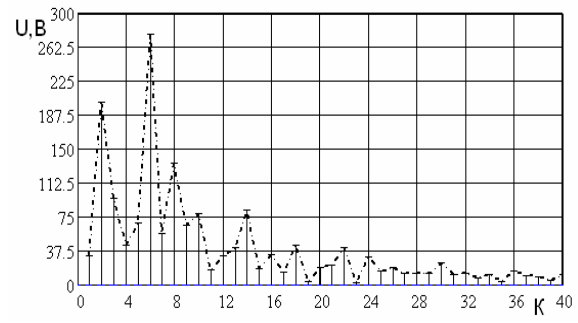


Рис. 11. Гармоніки напруги (AB) на виході ТРН у режимі "стоянка під струмом"

ОЦІНКА РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Гармонічний склад напруги промислової мережі живлення при випробуваннях повинні відповідати стандарту ГОСТ 13109-97 щодо якості електроенергії, а саме:

– коефіцієнт несиметрії зворотної послідовності

$$K_{24} = \frac{U_{3В}}{U_{пр}} \cdot 100 \%, \text{ не перевищував } 2 \%;$$

– відхилення напруги прямої послідовності $U_{пр}$ від

номінального значення $\delta U = \frac{U_{\text{пр}} - U_{\text{н}}}{U_{\text{пр}}} \cdot 100\%$ не перевищує $\pm 5\%$;

– зсув по фазі між векторами $U_{\text{пр}}$ і $U_{\text{зв}}$ для фази А ($\Delta\psi = \psi_{\text{зв}} - \psi_{\text{пр}}$) не перевищував 40° .

Підключення ТРН для регулювання напруги живлення ПЕМП суттєво змінило гармонічний склад як напруги, так струмів. Крім того виявлена несиметрія системи керування ТРН.

Незалежно від аналізованої напруги (фазної або лінійної) при несиметрії системи керування ТРН комунікаційні спотворення містять гармоніки непарних порядків. При цьому поряд із зміною амплітуд канонічних складових до $= 1,5,7,9\dots$ Частотний спектр комунікаційних спотворень доповнюється гармоніками з номерами кратними трьом. Величина їхніх амплітуд залежить від коефіцієнта несиметрії й фази зворотної послідовності.

У результати впливу несиметрії керування виникають парні гармоніки до $= 2,8,14\dots$ і до $= 4,10,16$.

Несиметрія змінює не тільки гармонічний склад вихідної напруги, алі й надає суттєвий вплив на вхідне коло ТРН. При живленні від ТРН лише активного навантаження гармонічний склад напруги й струмів містить канонічний ряд гармонік $k = 1,5,7\dots$ Поряд з цими гармоніками присутні гармоніки, кратні 3-м. Величина парних гармонік суттєво незначна.

Підключення ПЕМП до ТРН і робота його в режимі тривалої стоянки під струмом супроводжується значним посиленням парних гармонік, особливо 8-ї.

Значно посилилась 5-та гармоніка та зменшилась 7-ма гармоніка. Сьома гармоніка при $S=1$ створює позитивний момент й діє узгоджено з основною гармонікою, але коли ротор почне обертання відносна швидкість поля сьомої гармоніки і ротора почне зменшуватись. Момент від дії цієї гармоніки також буде зменшуватись і при швидкості ротора $n = n_1/7$ ($S = 6/7$) сьома гармоніка буде нерухома по відношенню до ротора й створює нульовий момент ($M_7 = 0$). Далі сьома гармоніка при підвищеній швидкості ротора буде створювати гальмівний момент.

Посилення п'ятої гармоніки, яка створює в режимі $0 < S \leq 1$ лише гальмівний момент, оскільки обертається у зворотному порядку по відношенню до основної. Для режиму стоянки під струмом спостерігається своєрідне компенсування дій п'ятої й сьомої гармоніки за електромагнітними моментами цих гармонік, але позитивно впливає на отримання теплової енергії.

Наявність гармонік кратних трьом викликає появу струмів нульової послідовності.

Обмотку ПЕМП виконано з цілим числом пазів на полюс і фазу, тому поява субгармонік (більш нижчих порядків, ніж основна) викликана лише роботою тиристорів.

Криві струмів й напруг несиметричні відносно часової вісі (абсцис), тому містять парні гармоніки.

Поява парних гармонік викликана перш за всі насиченням магнітної системи ПЕМП у режимі стоянки під струмом і статичним ексцентриситетом. У цьому ж режимі несиметрія напруги викликає підвищені локальні перегріву, що у свою чергу обумовлює параметричну несиметрію, у тому числі в масивному роторі. Це спричиняє створення прямих і зворотних магнітних полів, кожне з яких необхідно аналізувати й використовувати при формуванні результуючого електромагнітного моменту й граючої потужності.

У режимі обертання ротора ПЕМП спостерігається значне посилення сьомої гармоніки й зменшення парних та вищих гармонік у порівнянні з режимом стоянки під струмом. Тобто обертання ротора в якійсь мірі компенсує параметричну несиметрію ПЕМП.

ВИСНОВКИ

1. Підключення ТРН для регулювання напруги живлення ПЕМП суттєво змінило гармонічний склад як напруги, так струмів.

2. Посилення п'ятої гармоніки, яка створює в режимі $0 < S \leq 1$ лише гальмівний момент, оскільки обертається у зворотному порядку по відношенню до основної. Для режиму стоянки під струмом спостерігається своєрідне компенсування дій п'ятої й сьомої гармоніки за електромагнітними моментами цих гармонік, але позитивно впливає на отримання теплової енергії.

3. У режимі обертання ротора ПЕМП спостерігається значне посилення сьомої гармоніки й зменшення парних та вищих гармонік у порівнянні з режимом стоянки під струмом. Тобто обертання ротора в якійсь мірі компенсує параметричну несиметрію ПЕМП.

4. Подальші дослідження повинні бути зосередженні на визначенні взаємного впливу гальмівного та двигунового модулів ПЕМП в контурах статорів при їх живленні від одного джерела, а також на дослідженнях сигналів потужностей.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Заблодский Н.Н. Полифункциональные электро-механические преобразователи технологического назначения: Монография / Н.Н. Заблодский. – Алчевск: Дон ГТУ, 2008. – 259 с.
- [2] Заблодский Н.Н., Филатов М.А., Гринь Г.М. и др. Динамика и гармонический состав токов полифункциональных электро-механических преобразователей энергии // Сб. научн. тр. Донбасского государственного техн. ун-та. – Алчевск: Дон ГТУ, 2007, - Вып.24. – С. 370-383
- [3] Дьяконов В. Mathcad 2001: учебный курс. – СПб.: Питер, 2001. – 624 с.: ил.

Надійшла 15.09.2008