

О. Г. СЕРЕДА, О. Г. СЕРЕДА, Н. В. КРЮКОВА

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ ЗМІННОГО МАГНІТНОГО МОМЕНТУ СТРУМІВ ТРИФАЗНОГО ЕЛЕКТРОУСТАТКУВАННЯ

Проведений аналіз та огляд відомих параметричних систем автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля електроустаткування. З'ясовано, що відомі параметричні системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля електроустаткування не враховують зміну порядку чергування фаз живлення при зміні рівня зовнішнього магнітного поля, що знижує ефективність компенсації магнітного поля трифазного електроустаткування у 2–3 рази. Удосконалено параметричну систему автоматичної компенсації магнітного моменту синусоїдальних струмів трифазного електроустаткування з датчиком порядку чергування фаз, відмінними ознаками функціонування якої є попереднє визначення порядку чергування фаз в силовому колі трифазного електроустаткування і формування струмів електромагнітів компенсаторів з урахуванням цього порядку, що дозволяє підвищити ефективність компенсації магнітного моменту струмів трифазного електроустаткування та використовувати таку систему в трифазному розподільному пристрої, що містить множину трифазних фідерів. Удосконалено спосіб стендового налаштування параметрів системи автоматичної компенсації магнітного моменту синусоїдальних струмів трифазного електроустаткування з датчиком порядку чергування фаз, що відрізняється від використовуваних раніше тим, що попередньо визначається порядок чергування фаз у силовому колі та формуються струми електромагнітів компенсаторів з урахуванням цього порядку і тільки потім подається живлення по черзі в кожен незалежний контур силового кола електроустаткування, одночасно з чим включається електромагніт компенсатор, орієнтований вздовж обраної осі, вимірюється компонента сумарного магнітного моменту вздовж цієї ж осі і залежно від її величини регулюються за величиною та фазою сигнали струмів компенсації, потім змінюється порядок чергування фаз і решта операцій повторюється. Рекомендовано удосконалити системи автоматичної компенсації магнітного моменту несинусоїдальних струмів трифазного електроустаткування з датчиком порядку чергування фаз з метою забезпечення високої ефективності компенсації магнітного моменту та зовнішнього магнітного поля незалежно від порядку чергування фаз живлення трифазного електроустаткування.

Ключові слова: зовнішнє магнітне поле, електромагнітна сумісність, порядок чергування фаз, електромагніт компенсатор.

О. Н. SEREDA, O. H. SEREDA, N. V. KRUKOVA

INVESTIGATIONS OF THE VARIABLE MAGNETIC MOMENT AUTOMATIC COMPENSATION EFFICIENCY IMPROVING POSSIBILITY OF THREE-PHASE ELECTRICAL EQUIPMENT CURRENTS

An analysis and review of known parametric systems for automatic compensation of electrical equipment the external magnetic field was carried out. It was found that the known parametric electrical equipment automatic compensation systems of the external magnetic field do not take into account the change in the order of alternating power phases when the level of the external magnetic field changes, which reduces the effectiveness of the three-phase electrical equipment magnetic field compensation by two to three times. The parametric system of three-phase electrical equipment sinusoidal currents magnetic moment automatic compensation with the phase alternation order sensor was improved, the distinguishing features of which are the preliminary determination of the phases alternation order in the power circuit of three-phase electrical equipment and the formation electromagnets compensators currents taking into account this order, which allows to increase the efficiency of three-phase electrical equipment currents magnetic moment compensation and use such a system in a three-phase distribution device containing a plurality of three-phase feeders. The system parameters bench adjustment method of the sinusoidal currents magnetic moment automatic compensation of three-phase electrical equipment with the phase alternation order sensor has been improved, which differs from known methods in that the phases order in the power circuit is determined in advance and the currents of the electromagnets compensators are formed taking into account this order and only then the power is supplied in turn, in each independent circuit of the electrical equipment power circuit an electromagnet compensator oriented along the selected axis is simultaneously turned on, the component of the total magnetic moment along the same axis is measured, and depending on its value, the magnitude and phase of the compensation currents signals are adjusted, then the sequence of alternating phases is changed and the rest of the operations are repeated. It is recommended to improve the non-sinusoidal currents magnetic moment system automatic compensation of three-phase electrical equipment with the phases alternating order sensor to ensure high efficiency of the magnetic moment compensation and the external magnetic field regardless of the power supply phases alternating order of three-phase electrical equipment.

Keywords: external magnetic field, electromagnetic compatibility, phases alternating order, electromagnet compensator.

Вступ. Через безперервний розвиток усіх галузей промисловості актуальною залишається проблема забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) технічних об'єктів (ТО). Під ЕМС розуміють здатність обладнання задовільно функціонувати у власній електромагнітній обстановці без створення неприпустимих електромагнітних завад іншому обладнанню в такій обстановці [1, 2]. Чинником, що впливають на ЕМС ТО, є будь-яке електромагнітне явище (електромагнітна завада), яке може призвести до погіршення функціонування обладнання: зовнішнє магнітне поле (ЗМП) силових контурів зі струмами та намагнічених феромагнітних деталей конструкції електроустаткування (ЕУ), в тому числі розподільних

пристроїв (РП). На відстані більш ніж 3-5 габаритів розподіл напруженості ЗМП характеризується дипольною складовою, пропорційною магнітному моменту (ММ) ЕУ, тому задача зниження рівня ЗМП спрощується до компенсації компонент ММ. Останні експериментальні дослідження змінного ЗМП трифазного ЕУ спрямовані на усунення проблеми ЕМС довели, що напруженість поля залежить не тільки від величини струмів та напруг, а й від порядку чергування їх фаз. Дослідники з різних країн світу отримали незалежні результати, що свідчать про зміну рівня ЗМП при зміні порядку чергування фаз (ПЧФ) джерела живлення у 2–3 рази [3–8]. Отже для усунення

проблеми ЕМС ТО потрібно вирішити задачу зниження ЗМП ЕУ з урахуванням ПЧФ.

Одним з методів високоефективної компенсації ЗМП ЕУ є автоматична компенсація [9-15], яка будується з використанням параметричних систем автоматичної компенсації (САК). Такі САК забезпечують моніторинг основних параметрів ЕУ (струмів силового кола та напруг), їх обробку у реальному масштабі часу за певними алгоритмами, а також формування на основі отриманих параметрів компенсуючого протиполя за допомогою системи електромагнітних компенсаторів (ЕК). Параметричні САК потребують попереднього налаштування параметрів, яке виконується за величинами вимірних компонент напруженості ЗМП і полягає у визначенні коефіцієнтів передачі відповідних підсилювачів для узгодження вихідних (струми ЕК) та вхідних (струми силового кола ЕУ) параметрів САК.

Ефективність компенсації визначається як відношення початкового рівня ЗМП на певній відстані від ЕУ до максимального рівня ЗМП, отриманого після застосування засобів компенсації. Для усунення проблем, пов'язаних із забезпеченням ЕМС ТО та екологічної безпеки ефективність параметричних САК повинна становити 50-300 одиниць [16]. Підвищити ефективність компенсації параметричних САК та спростити процедуру їх налаштування дозволяють мікроелектронні засоби обробки параметрів ЕУ. Такі САК мають ще й менші габарити. Проте, враховуючи постійне зростання потужності електроустановок, необхідна ефективність компенсації ЗМП має сягати майже 1000 одиниць. У зв'язку із цим вважається за доцільне дослідити можливість підвищення ефективності систем автоматичної компенсації ЗМП трифазного ЕУ шляхом врахування ПЧФ джерела живлення.

Мета статті. Підвищення ефективності компенсації змінного ММ струмів трифазного ЕУ шляхом застосування параметричних САК.

Аналіз параметричних систем автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля електроустановки. Відомою параметричною САК, де застосована автоматична компенсація ЗМП ЕУ, є система регулювання за збуренням [17, 18]. Функціональна схема такої САК подана на рис. 1.

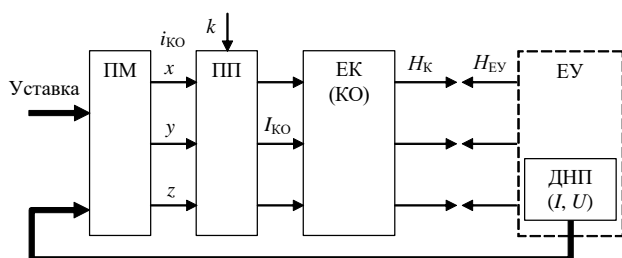


Рисунок 1 – Функціональна схема параметричної САК ЗМП ЕУ

До складу САК (рис. 1) входять наступні складові:

- уставка є необхідною складовою при стендовому налаштуванні САК, яке полягає у підборі

коефіцієнтів, що зв'язують величину струмів компенсації i_{ko} по кожному з каналів із вхідними параметрами струму I та напруги U . Величина уставки зберігається в програмному модулі;

- програмний модуль (ПМ) призначений для формування струмів i_{ko} і регулювання їх величини;

- підсилювач потужності (ПП) з автономним джерелом живлення та трьома каналами регулювання здійснює підсилення за потужністю і регулювання за величиною струмів компенсації відповідно по кожній з трьох просторових компонент ЗМП, а також коефіцієнтів k підсилення струмів компенсації i_{ko} для формування струмів I_{ko} ;

- система електромагнітних компенсаторів (ЕК) з компенсаційними обмотками (КО) створює компоненти поля компенсації в трьох ортогональних просторових напрямках. При протіканні струмів I_{ko} через КО ЕК створюється ЗМП H_k , що компенсує поле $H_{EУ}$;

- електроустановки (ЕУ);

- датчики незалежних параметрів (ДНП), що характеризують ЗМП ЕУ. Як незалежні параметри обираємо струми I і напруги U силового кола ЕУ.

Функціонує САК (рис. 1) у такий спосіб:

1. вимірюються струми й напруги в незалежних контурах силового кола ЕУ;

2. формуються сигнали струмів ЕК по кожному з просторових напрямів у функції величин незалежних параметрів (струмів та напруг) ЕУ;

3. вимірюються складові компонент напруженості магнітного поля при одночасному включенні ЕУ і відповідних цим компонентам ЕК;

4. регулюються величини сигналів струмів i_{ko} залежно від вимірних складових компонент напруженості магнітного поля в процесі стендового налаштування САК;

5. підсилюються за потужністю сигнали струмів i_{ko} по кожному з просторових напрямів;

6. живляться сформованими струмами I_{ko} ЕК САК при функціонуванні ЕУ.

Обробку сигналів переважно здійснюють цифровими методами. Параметричні САК можуть виконуватися як для компенсації окремо кожної зі складових ЗМП ЕУ, тоді САК містить один ПП з автономним джерелом живлення та один ЕК, так і для спільної компенсації кількох складових (змінного та постійного ЗМП струмів).

Недоліком описаної параметричної САК є те, що при зміні ПЧФ в силовому колі трифазного ЕУ точність компенсації ЗМП ЕУ знижується. Це пояснюється залежністю від ПЧФ реакції пасивних в магнітному відношенні елементів трифазного ЕУ (рамкових конструкцій РП і шаф напівпровідникових перетворювачів, корпусів електричних машин, електропровідних елементів систем охолодження силових трансформаторів тощо), що призводить до зміни фаз вихрових струмів в них і величини створюваних ними складових ЗМП. Як показують експериментальні дослідження, відмінності величин вимірних компонент магнітного поля при зміні ПЧФ у силових колах сягають двох-трьох разів, що і знижує

точність компенсації магнітного поля трифазного ЕУ при налаштованій на стенді системі компенсації.

Більш ефективною є САК ММ змінного ЗМП струмів частоти мережі РП, що містить множину трифазних фідерів [18, 19]. Така параметрична САК характеризує із заданою точністю РП як джерело ЗМП. Функціональна схема такої САК подана на рис. 2.

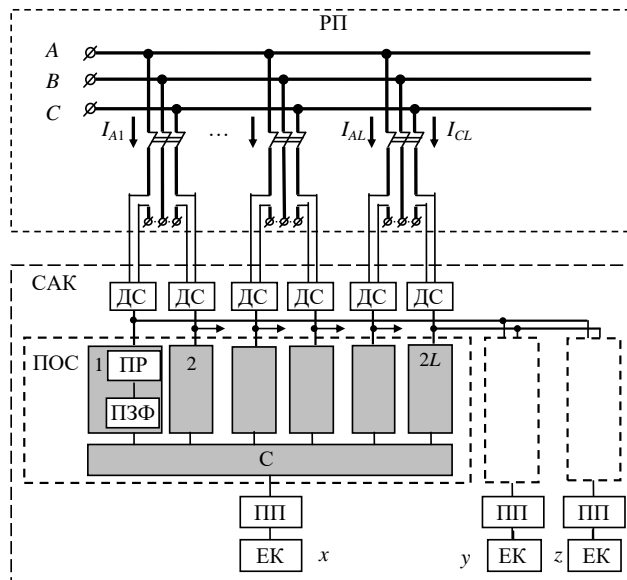


Рисунок 2 – Функціональна схема параметричної САК ММ трифазного РП

До складу САК (рис. 2) входять наступні складові:

- датчики струмів (ДС) увімкнені в дві з трьох фаз (зазвичай крайніх) в кожному фідері;
- однотипні пристрої обробки сигналів (ПОС) отриманих від ДС в кожному з трьох однотипних каналів x , y , z для компенсації ММ в трьох просторових напрямках x , y , z ;
- регульовані підсилювачі (ПР) і пристрої зсуву фази (ПЗФ), що входять до складу ПОС. Кількість ПР дорівнює подвоєному числу фідерів РП ($K = 2L$);
- суматор (С), регульований підсилювач потужності (ПП) і електромагніт компенсатор (ЕК) для кожної з трьох просторових компонент ММ послідовно підключені до ПОС. ЕК мають загальний центр, що збігається з центром шафи РП.

Функціонує САК (рис. 2) у такий спосіб:

1. вимірюються струми двох фаз в кожному фідері;
2. формуються струми ЕК по кожному з просторових напрямів у вигляді лінійних залежностей від величин струмів у фідерах трифазного ЕУ;
3. при стендовому налаштуванні САК попередньо вимірюються складові компонент ММ при одночасно включених РП і ЕК відповідно до виміряних складових ММ;
4. регулюються за величиною та фазою і посилюються за потужністю сигнали струмів компенсації по кожному з просторових напрямів;
5. живляться сформованими струмами обмотки ЕК при функціонуванні РП.

Принцип роботи САК (рис. 2) мало відрізняється від принципу роботи САК (рис. 1). Перевагами САК (рис. 2) є спрощений алгоритм формування струмів компенсації, більша точність компенсації за рахунок зменшення числа регульованих величин в системі компенсації, спрощене налаштування за інших рівних умов, оскільки залежності складових кожної компоненти ММ від струмів фідерів РП носять лінійний характер. Недолік полягає в низькій ефективності компенсації змінного ММ при зміні ПЧФ в силових колах РП.

Усунути виявлені в результаті аналізу відомих способів компенсації ЗМП ЕУ, реалізованих у вигляді параметричних САК ММ (рис. 1, 2), недоліки і суттєво підвищити ефективність компенсації ММ РП дозволяють САК удосконалені шляхом додавання датчику чергування фаз зі сторони джерела живлення.

Удосконалена параметрична система автоматичної компенсації магнітного моменту трифазного розподільного пристрою. Функціональна схема удосконаленої параметричної САК ММ трифазного РП, струми силового кола якого синусоїдальні, подана на рис. 3.

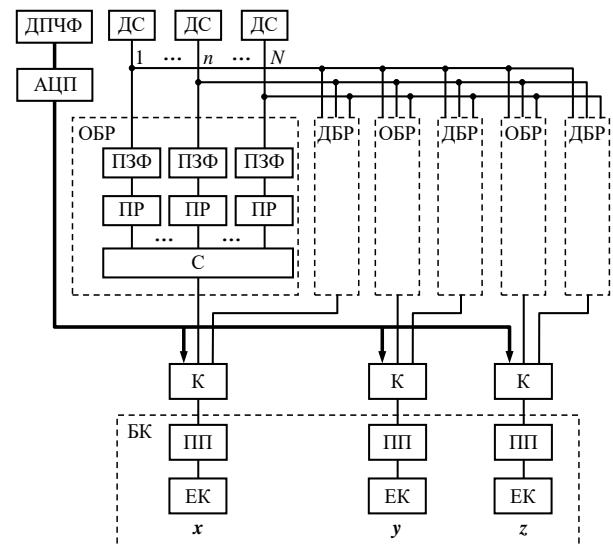


Рисунок 3 – Функціональна схема удосконаленої параметричної САК ММ синусоїдальних струмів трифазного РП з датчиком ПЧФ

До складу САК (рис. 3) входять наступні складові: датчики струмів (ДС); основний блок регулювання (ОБР); пристрій зсуву фази (ПЗФ); підсилювач (ПР) з регульованим коефіцієнтом передачі; суматор (С); блок компенсації (БК); підсилювач потужності (ПП); електромагніт компенсатор (ЕК); додатковий блок регулювання (ДБР); датчик порядку чергування фаз (ДПЧФ); аналого-цифровий перетворювач (АЦП); керований комутатор каналів (К); x , y , z – канали регулювання.

Датчики струмів ДС кількістю N увімкнені поодиноці в N незалежних контурів силового кола РП. Три блоки основних регуляторів ОБР виконані однотипними. Кожен ОБР містить N вхідних кіл з послідовно увімкненими пристроями зсуву фази ПЗФ та підсилювачами ПР з регульованим коефіцієнтом

передачі, а також загальний суматор С з N входами. До N входів ОБР приєднані N відповідних виходів датчиків ДС. Вихідні сигнали ПР надходять до N входів суматора С. Блок компенсації БК має три канали x, y, z , в кожному з яких містяться послідовно з'єднані підсилювач потужності ПП та електромагніт компенсатор ЕК, що містить циліндричну обмотку [20], вісь якої орієнтована у відповідному x, y, z просторовому напрямі. Вхід кожного каналу x, y, z призначений для підключення до виходу одного з суматорів С. Три додаткові блоки регуляторів ДБР конструктивно виконані однаковими з блоками ОБР. Входи ДБР та ОБР функціонують паралельно. Виходи суматорів С кожної пари, що складається з блоків ОБР та ДБР підключені поодиноці до різних входів керованого комутатора К, а вихід останнього з'єднаний зі входом підсилювача потужності ПП відповідного каналу x, y, z блоку БК. Додаткові входи трьох комутаторів К об'єднані і під'єднані до датчика порядку чергування фаз ДПЧФ через аналого-цифровий перетворювач АЦП.

В удосконаленій САК ММ синусоїдальних струмів трифазного РП з датчиком ПЧФ (рис. 3) на виході датчиків ДС формуються сигнали, пропорційні струмам незалежних контурів силового кола РП. Регулятор здійснює формування сигналів струмів компенсації у вигляді лінійної залежності:

$$\dot{I}_{c(x,y,z)} = \sum_{n=1}^N \frac{I_n}{P} \cdot \alpha_{cn(x,y,z)} \cdot e^{-j\varphi_{cn(x,y,z)}}, \quad (1)$$

де \dot{I}_c – комплексна величина сигналу струму для живлення обмотки електромагніта компенсатора в одному з напрямів x, y, z , визначена з урахуванням ПЧФ (індекс «с» приймає значення 1 або 2 відповідно для прямого або зворотного ПЧФ);

I_n – амплітуда струму n -го незалежного контуру силового кола РП;

p – коефіцієнт передачі датчика струму;

α_{cn} – коефіцієнт пропорційності, визначений як відношення струму, що протікає в n -му контуру силового кола РП при певному ПЧФ, і струму живлення ЕК, орієнтованого вздовж осі x, y , або z ;

φ_{cn} – зсув фази складової сигналу струму в ЕК, орієнтованого вздовж осі x, y , або z , відносно початку відліку фази на періоді повторення електромагнітних процесів в силовому колі змінного струму, визначений з урахуванням ПЧФ;

j – уявна одиниця.

Сформовані струмові сигнали у вигляді (1) підсилюються за величиною у p разів у підсилювачі ПП в кожному каналі і подаються до обмоток ЕК.

Налаштування параметрів САК з урахуванням ПЧФ. При стендовому налаштуванні САК спочатку визначається ПЧФ. Далі по черзі подається живлення в кожен незалежний контур силового кола РП. Одночасно вмикається ЕК, орієнтований вздовж однієї обраної осі x, y , або z . Вимірюється компонента сумарного ММ вздовж обраної осі і залежно від її величини регулюються за величиною і фазою сигнали

струмів (1). Потім змінюється ПЧФ і решта операцій повторюється. Налаштування струмів (1) здійснюється виходячи з умови забезпечення відповідним ЕК компенсації кожної складової компоненти ММ РП, що створена при протіканні струму в n -му незалежному контуру силового кола РП:

$$\dot{M}_{cn(x,y,z)} + \dot{M}'_{cn(x,y,z)} = 0, \quad (2)$$

де $\dot{M}_{cn}, \dot{M}'_{cn}$ – комплексні величини компонент ММ в одному з напрямів x, y, z , що створюються РП і ЕК для обраного порядку чергування фаз.

Компоненту ММ \dot{M}_{cn} (2), що створюється струмом n -го незалежного контуру силового кола РП з урахуванням ПЧФ може бути представлено у вигляді наступних еквівалентних виразів:

$$\begin{aligned} \dot{M}_{cn(x,y,z)} &= (\dot{M}_{cn(x,y,z)})_{PP} + (\dot{M}_{cn(x,y,z)})_P = \\ &= \dot{I}_n \cdot S_{cn(x,y,z)} \cdot \left(1 + \sum_{q=1}^Q \frac{\dot{I}_{cnq}}{\dot{I}_n} \cdot \frac{S_{cq(x,y,z)}}{S_{cn(x,y,z)}} \right) = \\ &= I_n \cdot S_{cn(x,y,z)} \cdot \left(1 + \sum_{q=1}^Q \left| \frac{\omega L_{cq}}{Z_{cq}} \right| \cdot \frac{S_{cq(x,y,z)}}{S_{cn(x,y,z)}} e^{-j(\pi/2 + \varphi_{cq})} \right) = \\ &= I_n \cdot m_{cn(x,y,z)} \cdot e^{-j\varphi_{cn(x,y,z)}}, \end{aligned} \quad (3)$$

де $(\dot{M}_{cn})_{PP}, (\dot{M}_{cn})_P$ – складові ММ, що створюються силовим колом РП (індекс PP) і рамковою конструкцією (індекс P);

\dot{I}_n – комплексна амплітуда струму n -го незалежного контуру силового кола РП;

Q – число контурів рамкової конструкції РП;

S_{cn} – проекція вектора площини q -го контуру рамкової конструкції РП при обраному порядку чергування фаз, визначена в напрямі, перпендикулярному обраної осі x, y , або z ;

\dot{I}_{cnq} – комплексна амплітуда струму в q -му контурі рамкової конструкції, що наводиться струмом n -го контуру силового кола при обраному ПЧФ;

S_{cq} – проекція вектора площини q -го контуру рамкової конструкції РП при обраному ПЧФ, визначена в напрямі, перпендикулярному обраної осі x, y , або z ;

ω – кругова частота струмів силового кола;

L_{cq} – індуктивність q -го контуру рамкової конструкції при обраному ПЧФ;

Z_{cq}, φ_{cq} – повний опір і фаза навантаження q -го контуру рамкової конструкції при обраному ПЧФ;

m_{cn} – питомий ММ, що створюється n -м незалежним контуром силового кола при протіканні одиничного струму.

Магнітний момент ЕК \dot{M}'_{cni} (2) може бути поданий у вигляді:

$$\dot{M}'_{cn(x,y,z)} = (I_n \cdot \alpha_{cn(x,y,z)} \cdot w_{(x,y,z)} \cdot S_{(x,y,z)}) \cdot e^{-j\varphi'_{cn(x,y,z)}} =$$

$$= I_n \cdot m'_{cn(x,y,z)} \cdot e^{-j\varphi'_{cn(x,y,z)}}. \quad (4)$$

де w – число витків обмотки ЕК, вісь якої орієнтована вздовж осі x , y , або z ;

S – площа витка обмотки ЕК, орієнтованої перпендикулярно осі x , y , або z ;

φ_{cn} – фаза струму в обмотці ЕК, орієнтованої вздовж осі x , y , або z ;

m'_{cn} – питомий ММ, що створюється ЕК.

З урахуванням виразів (3) й (4) визначаються величини коефіцієнтів α_{cni} і зсувів фаз φ_{cn} сигналів струмів в обмотках ЕК, при яких забезпечується повна компенсація (2) магнітного моменту РП:

$$\alpha_{cni} = \frac{m_{cn(x,y,z)}}{m'_{cn(x,y,z)}},$$

$$\varphi_{cn(x,y,z)} = -\varphi'_{cn(x,y,z)}. \quad (5)$$

При роботі РП датчиком ДПЧФ визначається ПЧФ (рис. 3), АЦП формуються сигнали керування комутаторами К. Залежно від наявного ПЧФ комутатор К здійснює автоматичний вибір варіанту підключення основних ОБР або додаткових ДБР блоків регулювання до підсиловачів ІПП в каналах блоку БК.

Як видно зі співвідношень (3) і (4), величини ММ РП й САК пропорційні струмам контурів силового кола. Тому при налаштованих параметрах (5) забезпечується автоматична компенсація ММ РП при всіх можливих поєднаннях незалежних контурів силового кола, що утворюються при комутації фідерів залежно від встановлюваного режиму роботи РП.

Відтак, удосконалена параметрична САК ММ синусоїдальних струмів трифазного РП з датчиком ПЧФ дозволяє підвищити ефективність компенсації ММ РП за рахунок того, що попередньо визначають ПЧФ в силовому колі і формують струми ЕК не тільки при прямому, але і зворотному ПЧФ, і забезпечується точний вибір параметрів регуляторів при стендовому налаштуванні ЕК та автоматичне стеження за струмами незалежних контурів силового кола при роботі РП.

Висновки. Проведений аналіз відомих систем автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля електроустаткування довів, що відомі параметричні системи автоматичної компенсації зовнішнього магнітного поля розподільних пристроїв не враховують зміну рівня зовнішнього магнітного поля при зміні порядку чергування фаз джерела живлення.

Експериментальні результати свідчать про те, що відмінності величин вимірних компонент магнітного поля при зміні порядку фаз силового кола сягають трьох разів, що і знижує ефективність компенсації магнітного поля трифазного електроустаткування при стендовому налаштуванні систем компенсації.

В запропонованій удосконаленій параметричній системі автоматичної компенсації магнітного моменту синусоїдальних струмів трифазного устаткування з датчиком порядку чергування фаз, що може бути використана, зокрема, в розподільних пристроях, що містять множину трифазних фідерів, автоматична

компенсація здійснюється за допомогою електромагнітів компенсаторів, орієнтованих вздовж трьох ортогональних просторових осей устаткування. При цьому сформовані регулятором струми електромагнітів компенсаторів мають лінійну залежність від величини струмів незалежних контурів силового кола устаткування.

Відмінними ознаками функціонування запропонованої системи автоматичної компенсації є попереднє визначення порядку чергування фаз в силових колах трифазного електроустаткування і формування струмів електромагнітів компенсаторів з урахуванням визначеного порядку чергування фаз.

Удосконалений спосіб стендового налаштування параметрів системи автоматичної компенсації магнітного моменту синусоїдальних струмів трифазного електроустаткування з датчиком порядку чергування фаз відрізняється від відомих способів тим, що попередньо визначається порядок фаз у силовому колі та формуються струми електромагнітів компенсаторів з урахуванням цього порядку і тільки потім подається живлення по черзі в кожен незалежний контур силового кола устаткування та електромагніт компенсатор, орієнтований уздовж вибраної осі. При цьому вимірюється компонента сумарного магнітного моменту вздовж цієї ж осі і залежно від її величини регулюються за величиною і фазою сигнали струмів компенсації.

Рекомендується провести удосконалення системи автоматичної компенсації магнітного моменту несинусоїдальних струмів трифазного устаткування шляхом додавання датчика порядку чергування фаз з метою забезпечення високої ефективності компенсації магнітного моменту та зовнішнього магнітного поля незалежно від порядку чергування фаз джерела живлення трифазного електроустаткування.

Список літератури

1. IEC 61000-4-8:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-8: Testing and measurement techniques – Power frequency magnetic field immunity test. Official edition. 2009. 66 p.
2. Про затвердження Технічного регламенту з електромагнітної сумісності обладнання : Постанова Каб. Міністрів України від 16.12.2015 р. № 1077 : станом на 17 листоп. 2022 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-#Text> (дата звернення: 08.06.2023).
3. Лупиков В. С., Крюкова Н. В., Гетьман А. В., Рудас Ю. Д., Ерисов А. В., Івлева Л. Ф. Экспериментальное подтверждение магнитофазного эффекта для трехфазного электрооборудования. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика.* 2008. № 40. С. 84–94.
4. Клименко Б. В., Лупиков В. С., Вырвец С. В., Крюкова Н. В., Гелярвская О. А. Анализ магнитного момента трехфазных цепей. *Електротехніка і електромеханіка.* 2002. № 1. С. 28–36.
5. Крюкова Н. В., Гелярвская О. А., Даныко В. Г., Лупиков В. С., Середа А. Г. Методика определения магнитного момента рамочной конструкции электротехнического устройства. *Електротехніка і електромеханіка.* 2005. № 2. С. 81–86.
6. Bavastro D., Canova A., Freschi F., Giaccone L., Manca M. Magnetic field mitigation at power frequency: design principles and case studies. *IEEE Transactions on Industry Applications.* 2015. Vol. 51, no. 3. P. 2009–2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2369813>.
7. Du Y., Chen M. Low-frequency magnetic shielding against unbalanced currents. *2015 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)*, Hangzhou, China, 4–7

- November 2015. P. 299–303. DOI: <https://doi.org/10.1109/ceem.2015.7368690>.
8. Mankov P. N., Melnikov A. A., Popov M. G., Novikov A. V., Bessolitsin A. V. Ensuring electromagnetic compatibility of control and measuring cables in case of phase-shielded conductor-induced interference in non-stationary modes. *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 26–29 January 2021. P. 1269–1274. DOI: <https://doi.org/10.1109/elconrus51938.2021.9396694>.
 9. Розов В. Ю., Пилогина О. Ю., Добродеев П. Н., Гетьман А. В., Волохов С. А. Введение в демагнетизацию технических объектов. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2006. № 4. С. 55–59.
 10. Розов В. Ю., Гринченко В. С., Ерисов А. В., Добродеев П. Н. Эффективное контурное экранирование магнитного поля трехфазных кабельных линий при ограниченном тепловом воздействии на силовые кабели. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 6. С. 50–54. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.6.07>.
 11. Розов В. Ю., Кундиус Е. Д., Пелевин Д. Е. Активное экранирование внешнего магнитного поля трансформаторных подстанций, встроенных в жилые дома. *Електротехніка і електромеханіка*. 2020. № 3. С. 24–30. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.04>.
 12. Kuznetsov B., Voloshko A., Bovdii I., Vinichenko E., Kobilyanskiy B., Nikitina T. High voltage power line magnetic field reduction by active shielding means with single compensating coil. *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, 15–17 November 2017. P. 196–199. DOI: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248887>.
 13. Kuznetsov B. I., Nikitina T. B., Bovdii I. V. The effectiveness of active shielding of magnetic field with circular space-time characteristic and with different shielding coils spatial positions. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. No. 3. P. 15–23. DOI: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.03>.
 14. Kuznetsov B., Bovdii I., Nikitina T. Shielding coils design for magnetic field active shielding based on space-time characteristics. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 25–29 February 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235383>.
 15. Король Е. Г., Лупиков В. С., Серда А. Г., Рудас Ю. Д. Компенсация вектора переменного магнитного момента электрооборудования с помощью электромагнита с составным ферромагнитным сердечником. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 4. С. 20–25.
 16. Розов В. Ю. Анализ эффективности параметрических систем автоматической компенсации внешнего магнитного поля энергонасыщенных объектов. *Технічна електродинаміка*. 2002. № 2. С. 3–10.
 17. Розов В. Ю. Внешние магнитные поля силового электрооборудования и методы их уменьшения. Киев, 1995. 42 с. (Препринт. НАН Украины. Институт электродинамики ; 772).
 18. Розов В. Ю., Ассуиров Д. А. Автоматическое управление внешним магнитным полем технических объектов. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 1. С. 11–18.
 19. Розов В. Ю., Ерисов А. В., Лупиков В. С. Особенности снижения внешних магнитных полей распределительных устройств и полупроводниковых преобразователей. Киев, 1996. 47 с. (Препринт. НАН Украины. Институт электродинамики ; 791).
 20. Серда О. Г., Король О. Г. Особливості моделювання зовнішнього магнітного поля електротехнічних комплексів та систем до і після його компенсації. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2022. № 2 (5). С. 79–89. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.02.01>.
 2. Ukraine, Cabinet of Ministers of Ukraine. (2015, Dec. 16). *Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine no. 1077, Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlementu z elektromahnitnoi sumisnosti obladnannia [On Approval of the Technical Regulations on Electromagnetic Compatibility of Equipment]*. Accessed: Jun. 8, 2023. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2015-n#Text>. (in Ukrainian)
 3. V. S. Lupikov, N. V. Kriukova, A. V. Getman, Iu. D. Rudas, A. V. Erisov, and L. F. Ivleva, “Eksperimentalnoe podtverzhenie magnitofaznogo efekta dlia trekhfaznogo elektrooborudovaniia [Experimental confirmation of the magnetophase effect for three-phase electrical equipment],” *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 40, p. 84–94, 2008. (in Russian)
 4. B. V. Klimenko, V. S. Lupikov, S. V. Vyrovets, N. V. Kriukova, and O. A. Geliarovskaia, “Analiz magnitnogo momenta trekhfaznykh tsepei [Magnetic moment analysis of three-phase circuits],” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 1, p. 28–36, 2002. (in Russian)
 5. N. V. Kriukova, O. A. Geliarovskaia, V. G. Danko, V. S. Lupikov, and A. G. Sereda, “Metodika opredeleniia magnitnogo momenta ramochnoi konstruktzii elektrotekhnicheskogo ustroistva [Methodology for determining the magnetic moment of the frame structure of an electrical device],” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 2, p. 81–86, 2005. (in Russian)
 6. D. Bavastro, A. Canova, F. Freschi, L. Giaccone, and M. Manca, “Magnetic field mitigation at power frequency: Design principles and case studies,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51, no. 3, p. 2009–2016, May 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2369813>.
 7. Y. Du and M. Chen, “Low-frequency magnetic shielding against unbalanced currents,” in *2015 7th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics (CEEM)*, Hangzhou, China, Nov. 4–7, 2015. pp. 299–303. doi: <https://doi.org/10.1109/ceem.2015.7368690>.
 8. P. N. Mankov, A. A. Melnikov, M. G. Popov, A. V. Novikov, and A. V. Bessolitsin, “Ensuring electromagnetic compatibility of control and measuring cables in case of phase-shielded conductor-induced interference in non-stationary modes,” in *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, Jan. 26–29, 2021. pp. 1269–1274. doi: <https://doi.org/10.1109/elconrus51938.2021.9396694>.
 9. V. I. Rozov, O. I. Piliugina, P. N. Dobrodeev, A. V. Getman, S. A. Volokhov, and V. S. Lupikov, “Vvedenie v demagnetizatsiiu tekhnicheskikh obiektov [Introduction to the demagnetization of technical objects],” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 4, p. 55–59, 2006. (in Russian)
 10. V. Y. Rozov, V. S. Grinchenko, A. V. Yerisov, and P. N. Dobrodeev, “Efficient shielding of three-phase cable line magnetic field by passive loop under limited thermal effect on power cables,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 6, p. 50–54, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.6.07>.
 11. V. Y. Rozov, K. D. Kundius, and D. Y. Pelevin, “Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, p. 24–30, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.04>.
 12. B. Kuznetsov, A. Voloshko, I. Bovdii, E. Vinichenko, B. Kobilyanskiy, and T. Nikitina, “High voltage power line magnetic field reduction by active shielding means with single compensating coil,” in *2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Nov. 15–17, 2017. p. 196–199, doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248887>.
 13. B. I. Kuznetsov, T. B. Nikitina, and I. V. Bovdii, “The effectiveness of active shielding of magnetic field with circular space-time characteristic and with different shielding coils spatial positions,” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 3, p. 15–23, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.03>.
 14. B. Kuznetsov, I. Bovdii, and T. Nikitina, “Shielding coils design for magnetic field active shielding based on space-time characteristics,” in *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, Feb. 25–29, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235383>.

References

1. *Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-8: Testing and Measurement Techniques - Power Frequency Magnetic Field Immunity Test*, IEC 61000-4-8:2009, International Electrotechnical Commission, 2009.

15. E. G. Korol, V. S. Lupikov, A. G. Sereda, and I. D. Rudas, "Kompensatsiia vektora peremennogo magnitnogo momenta elektrooborudovaniia s pomoshchiu elektromagnita s sostavnym ferromagnitnym serdechnikom [Compensation of the alternating magnetic moment vector of electrical equipment by means of an electromagnet with a composite ferromagnetic core]," *Technical Electrodynamics*, no. 4, p. 20–25, 2011. (in Russian)
16. V. I. Rozov, "Analiz effektivnosti parametriceskikh sistem avtomaticheskoi kompensatsii vneshnego magnitnogo polia energonasyshchennykh obiektov [Performance analysis of parametric systems for automatic compensation of the external magnetic field of energy-saturated objects]," *Technical Electrodynamics*, no. 2, p. 3–10, 2002. (in Russian)
17. V. I. Rozov, *Vneshnie Magnitnye Polia Silovogo Elektrooborudovaniia I Metody Ikh Umensheniia [External Magnetic Fields of Power Equipment and Methods of Reducing Them]*. Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Electrodynamics, 1995. (in Russian)
18. V. I. Rozov and D. A. Assuirov, "Avtomaticheskoe upravlenie vneshnim magnitnym polem tekhnicheskikh obiektov [Automatic control of the external magnetic field of technical objects]," *Technical Electrodynamics*, no. 1, p. 11–18, 2011. (in Russian)
19. V. I. Rozov, A. V. Yerisov, and V. S. Lupikov, *Osobennosti Snizheniia Vneshnikh Magnitnykh Polei Raspredelitelnykh Ustroistv I Poluprovodnikovyykh Preobrazovatelei [Special Features for Reducing External Magnetic Fields of Switchgear and Semiconductor Converters]*. Kyiv: National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Electrodynamics, 1996. (in Russian)
20. O. Sereda and O. Korol, "The external magnetic field modeling features of electrical complexes and systems before and after its compensation," *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2 (5), pp. 79–89, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2022.02.01>. (in Ukrainian)

Hadziuua (received) 26.06.2023

Відомості про автора (-ів) / About the Author (-s)

Серєда Олександр Григорійович (Oleksandr Sereda) – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; e-mail: o.g.sereda@gmail.com, oleksandr.sereda@khpі.edu.ua.

Серєда Олена Геннадіївна (Olena Sereda) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри електричних апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4658-9554>; e-mail: olena.korol@khpі.edu.ua.

Крюкова Наталія Валеріївна (Nataliya Kruykova) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри загальної електротехніки; м. Харків, Україна; e-mail: nataliia.kriukova@khpі.edu.ua.