

О. Г. СЕРЕДА, О. Г. КОРОЛЬ

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ ТА СИСТЕМ ДО І ПІСЛЯ ЙОГО КОМПЕНСАЦІЇ

Здійснено комп'ютерне моделювання зовнішнього магнітного поля трифазної електроустановки до та після його компенсації. Проведений аналіз процесу комп'ютерного моделювання зовнішнього магнітного поля триполюсного автоматичного вимикача, що дозволило виділити три особливості, пов'язані з вибором напрямку обходу контурів із фазними струмами, з визначенням необхідних умов компенсації поля на великій відстані, а також з розрахунком модуля напруженості в контрольних точках спостереження при дії сумарного зовнішнього магнітного поля контурів електроустановки й джерел, що компенсують. Отримані розрахункові співвідношення, що дозволяють здійснити математичне моделювання зовнішнього магнітного поля контурів зі струмом різної конфігурації, а саме поля окремого контуру зі струмом, поля контурів, що обтікаються трифазним струмом в трифазній системі струмів з нейтральним провідником, у випадку трифазної системи струмів без нейтрального провідника, поля магнітних диполів, а також компенсуючого магнітного поля електромагнітів компенсаторів. Визначено, що при моделюванні зовнішнього магнітного поля розрахунок модуля вектора напруженості магнітного поля в точці спостереження та магнітного моменту контуру із фазним струмом потрібно здійснювати з урахуванням пульсуючих складових компонент, що змінюються в часі за законом синусу та косинусу. Розрахунки підтвердили, що застосування зовнішнього блока електромагнітів компенсаторів для автоматичного вимикача дозволяє в 28 одиниць по осі x та у 70 одиниць по осі z зменшити вплив його зовнішнього магнітного поля на мікропроцесорний блок керування напівпровідниковим розчіплювачем максимального струму й, тим самим, запобігти помилковим спрацьовувань пристроїв релейного захисту та протиаварійної автоматики електротехнічних комплексів та систем низької напруги.

Ключові слова: електроустановка, електромагнітна сумісність, зовнішнє магнітне поле, автоматичний вимикач, електромагніт компенсатор, магнітний диполь.

О. Н. SEREDA, O. H. KOROL

THE EXTERNAL MAGNETIC FIELD MODELING FEATURES OF ELECTRICAL COMPLEXES AND SYSTEMS BEFORE AND AFTER ITS COMPENSATION

Computer simulation of the external magnetic field of a three-phase electrical installation before and after its compensation has been carried out. The analysis of the computer simulation process of the three-pole circuit breaker external magnetic field was carried out, which made it possible to identify three features related to the selection of the direction of bypassing the circuits with phase currents, the determination of the necessary conditions for compensation of the field at a long distance, and also the calculation of the stress modulus in the control observation points under the action of the total external magnetic field of the circuits of the electrical installation and compensating sources. Calculated ratios are obtained that allow mathematical modeling of the external magnetic field of current-carrying circuits of different configurations, namely, the field of a separate current-carrying circuit, the field of circuits flowing around a three-phase current in a three-phase current system with a neutral conductor, in the case of a three-phase current system without a neutral conductor, fields of magnetic dipoles, as well as the compensating magnetic field of compensator electromagnets. It was determined that when modeling the external magnetic field, the calculation of the vector modulus of the magnetic field intensity at the point of observation and the magnetic moment of the circuit with the phase current should be carried out taking into account the pulsating components of the components that change in time according to the law of sine and cosine. Calculations confirmed that the use of an external unit of compensator electromagnets for the circuit breaker allows to reduce the impact of its external magnetic field on the microprocessor control unit of the maximum current semiconductor release by 28 units along the x and y axis and 70 units along the z axis and, thereby, prevent false activations of relay devices protection and emergency automation of low voltage electrotechnical complexes and systems.

Keywords: electrical equipment, electromagnetic compatibility, external magnetic field, circuit breaker, electromagnet compensator, magnetic dipole.

Вступ. Будь-яке електротехнічне устаткування, зокрема електроустановки (ЕУ), при функціонуванні створює в навколишньому просторі змінне зовнішнє магнітне поле (ЗМП), що має негативний вплив на роботу чутливих до нього слабкострумівих мереж обчислювальних комплексів, систем керування, зв'язку та моніторингу, а також на здоров'я обслуговуючого персоналу. В першому випадку виникає проблема забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС), що виявляється в зниженні надійності функціонування електротехнічних комплексів, а саме помилкове відключення ліній електропостачання спричинене помилковим спрацьовуванням релейної апаратури, в зростанні додаткових втрат енергії, пов'язаних з виникненням вихрових струмів, тощо [1–4]. В другому випадку виникає проблема забезпечення екологічної безпеки [5–9].

Останнім часом у різних країнах світу проводяться роботи з вирішення задачі зниження ЗМП ЕУ [10–12]. Провідні електротехнічні компанії переважно обмежуються конструктивними рішеннями з використанням екранування, яке на промисловій частоті є малоефективним. Наприклад, використання екрануючих панелей у шафі низьковольтного розподільного пристрою дозволило компанії Legrand (Франція) знизити рівень ЗМП струмів на частоті мережі майже в 10 разів [13, 14]. В Україні більш перспективним вважається напрямок автоматичної компенсації ЗМП за допомогою параметричних систем автоматичної компенсації (САК) [15–21]. Такі САК забезпечують автоматичне стеження за параметрами, що визначають ЗМП ЕУ, і на їх основі формують поле електромагнітів компенсаторів (ЕК), створене для компенсації ЗМП. Це поле повторює

просторово-часову структуру ЗМП ЕУ, але має у просторі протилежний напрямок. Дослідження у цьому напрямі дозволили суттєво знизити ЗМП при його компенсації на відстані 3–5 габаритних розмірів ЕУ. Наприклад, для автоматичного вимикача (АВ) ефективність компенсації (відношення максимальних величин напруженості ЗМП до і після компенсації) становить близько 70 одиниць [22]. Проте поблизу поверхні ЕУ (0,3–0,5 м), де особливо гостро проявляється проблема компенсації ЗМП, таких високих результатів поки що не отримано. Це пояснюється складною часовою та тривимірною просторовою структурою ЗМП, наслідком чого є складності аналізу вихідного та компенсованого поля при вимірюваннях. У цьому зв'язку представляє інтерес математичне моделювання змінного трифазного ЗМП ЕУ, орієнтоване на отримання показників ефективності його компенсації.

Мета статті. Аналіз особливостей математичного моделювання змінного ЗМП ЕУ до і після його компенсації.

Теоретичні положення. Основними джерелами ЗМП ЕУ є просторові контури зі струмом, а джерелами ЗМП, що компенсує – електромагніти компенсатори у вигляді обмотки зі струмом і феромагнітного осердя [21, 22]. Феромагнітне осердя складається з двох частин, які утворюють просторову магнітну систему. Змінне магнітне поле, що створюється цими джерелами розглядається в зовнішньому просторі, де присутні струмопровідні контури і намагнічені феромагнітні тіла приймачів чутливих до нього, наприклад, слабкострумові мережі систем керування тощо. У загальному випадку задача розрахунку такого вигляду ЗМП не вирішена, оскільки відсутні вихідні дані о приймачах – додаткових джерелах магнітного поля. Проте при використанні певних припущень задача моделювання такого поля може бути сформульована. У першому наближенні передбачається, що потрібно розрахувати поле у зовнішньому від ЕУ просторі, а саме в середовищі вільному від намагнічених мас. Враховуючи складну просторову конфігурацію струмопроводів ЕУ й магнітних систем ЕК, вважатимемо, що сумарне змінне ЗМП у загальному випадку є неоднорідним і тривимірним. З урахуванням припущень формулюється задача моделювання тривимірного ЗМП, яка не зводиться до двовимірних задач: площинних або вісесиметричних.

Додатково при моделюванні ЗМП приймаємо наступні припущення, що стосуються режимів роботи та геометрії його джерел:

- режими роботи ЕУ та ЕК є сталими;
- струми провідників силового кола та ЕК змінюються за синусоїдальним законом на частоті мережі, що дорівнює 50 Гц;
- струмами зміщення та електромагнітним випромінюванням провідників можна знехтувати внаслідок малої частоти струмів ЕУ;

- провідники силового кола ЕУ з об'ємним розподілом струмів подані у вигляді тонких ліній, що повторюють геометрію осей лінійних ділянок;
- кожен ЕК сприймається як зосереджене (точкове) джерело ЗМП;
- магнітна система ЕК вважається кусково-однорідною в межах кожної ділянки;
- навантаження фаз однакове (струмова симетрія);
- не враховується вплив ефекту близькості на розподіл струму в провідниках.

З урахуванням прийнятих припущень ЗМП розглядається як квазістационарне змінне поле, напруженість якого в довільній точці простору P може бути визначена на основі принципу суперпозиції полів окремих джерел – струмових контурів і зосереджених ЕК. Як основний параметр ЗМП в даній роботі використовується напруженість, яка характеризується просторовим вектором H , напрямком і величиною якого періодично змінюються. Годографом вектора є еліпс, параметри якого можуть бути визначені на основі компонентів двох просторових векторів, часові фази яких відрізняються на чверть періоду [23].

Розрахункові співвідношення. Поле окремого контуру зі струмом може бути визначено підсумовуванням полів його відрізків відповідно до принципу суперпозиції. Для відрізка зі струмом просторові компоненти напруженості магнітного поля в прямокутній системі координат визначаються співвідношеннями [24, 25]:

$$\begin{aligned} H_x &= I_m G [(y_2 - y_1)(z - z_1) - (z_2 - z_1)(y - y_1)]; \\ H_y &= I_m G [(z_2 - z_1)(x - x_1) - (x_2 - x_1)(z - z_1)]; \\ H_z &= I_m G [(x_2 - x_1)(y - y_1) - (y_2 - y_1)(x - x_1)], \end{aligned} \quad (1)$$

де H_x, H_y, H_z – компоненти вектора напруженості ЗМП відрізка контуру зі струмом;

x, y, z – координати точки спостереження, у якій здійснюється розрахунок напруженості ЗМП;

x_1, y_1, z_1 – координати початку відрізка зі струмом;

x_2, y_2, z_2 – координати кінця відрізка зі струмом;

I_m – амплітуда синусоїдального струму в контурі;

G – параметр геометрії:

$$G = \frac{1}{4\pi} \frac{\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2}{r_{p1}^2 r_{p2} (1 - \cos^2 \alpha_1)},$$

де $\cos \alpha_1, \cos \alpha_2$ – косинуси кутів між векторами r_{p1}, r_{p1} і r_{p2}, r_{p2} , відповідно:

$$\cos \alpha_1 = (r_{p1} r_{p1})^{-1} \times [(x_2 - x_1)(x - x_1) + (y_2 - y_1)(y - y_1) + (z_2 - z_1)(z - z_1)];$$

$$\cos \alpha_2 = (r_{p1} r_{p2})^{-1} \times [(x_2 - x_1)(x - x_2) + (y_2 - y_1)(y - y_2) + (z_2 - z_1)(z - z_2)],$$

де r – радіус-вектор точки спостереження;

r_{p1} – довжина вектора, проведеного з початку відрізка (індекс 1) в точку спостереження (індекс p):

$$r_{p1} = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2};$$

r_{p2} – довжина вектора, проведеного з кінця відрізка (індекс 2) в точку спостереження (індекс p):

$$r_{p2} = \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2};$$

r_{21} – довжина вектора, проведеного з початку в кінець відрізка:

$$r_{21} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}.$$

З урахуванням (1) просторові компоненти вектора \mathbf{H}_N напруженості ЗМП, що створюється струмом N -го контуру у просторових напрямках x, y, z , визначаються підсумовуванням напруженостей \mathbf{H}_n полів складових його відрізків [24, 25]:

$$H_{Nu}|_{u=x,y,z} = \sum_{n=1}^N H_{nu}|_{u=x,y,z}, \quad (2)$$

де H_{nu} – просторова компонента напруженості ЗМП, що створюється n -м відрізком N -го контуру зі струмом у просторових напрямках x, y, z , відповідно.

Миттєві значення просторових компонент напруженості ЗМП, що створюється синусоїдальним струмом N -го контуру, дорівнюють:

$$H_{Nu}(t) = H_{Nu} \sin(\omega t - \varphi)|_{u=x,y,z}, \quad (3)$$

де ω – кутова частота змінного струму;

t – час;

φ – початкова фаза струму.

Поле контурів, що обтікаються трифазним струмом розраховується залежно від наявності або відсутності нейтрального провідника.

В трифазній системі струмів з **нейтральним провідником** фазні струми $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ змінюються в часі за синусоїдальним законом з однаковими амплітудами, що дорівнюють $I_a = I_b = I_c = I_m$, й часовим фазним зрушенням, що дорівнює 120° , або $2\pi/3$ рад:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I_m \sin\left(\omega t - \varphi + \frac{2\pi}{3}\right); \\ i_b(t) &= I_m \sin(\omega t - \varphi); \\ i_c(t) &= I_m \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Будемо вважати, що $\varphi = 0$. Тоді за аналогією з (3) миттєві значення складових компонент напруженості ЗМП, що створюється контурами зі струмами $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ в точці спостереження \mathbf{P} дорівнюють:

$$\begin{aligned} H_{Au}(t) &= H_{Au} \sin(\omega t); \\ H_{Bu}(t) &= H_{Bu} \sin(\omega t - 2\pi/3); \\ H_{Cu}(t) &= H_{Cu} \sin(\omega t - 4\pi/3), \end{aligned} \quad (5)$$

де H_{Au}, H_{Bu}, H_{Cu} – максимальні значення компонент векторів $\mathbf{H}_A, \mathbf{H}_B, \mathbf{H}_C$ напруженості ЗМП, що створюється при протіканні струмів $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$ вздовж відповідних контурів.

Величини H_{Au}, H_{Bu}, H_{Cu} визначаються аналогічно (2):

$$H_{Ku}|_{K=A,B,C} = \sum_{a=1}^A H_{ku}|_{k=a,b,c}|_{u=x,y,z}, \quad (6)$$

де a, b, c – номер відрізка контуру зі струмом фази A, B, C , відповідно.

Співвідношення (5) та (6) служать для визначення максимального значення H_{max} напруженості вихідного некомпенсованого змінного ЗМП трифазної ЕУ. Для цього скористаємось підходом, застосованим у [24, 25] для визначення максимуму магнітного моменту дипольного джерела. Суть підходу полягає в тім, що вектор змінного магнітного моменту фіксованої частоти може бути поданий на фазовій площині у вигляді вектора, що обертається, рухомий кінець якого описує замкнутий годограф. В цьому випадку система вихідних векторів H_x, H_y, H_z (1), що характеризують поле змінних струмів, перетворюється на систему з двох фіксованих у просторі пульсуючих векторів. Обидва вектори пульсують з фазним зрушенням, що дорівнює 90° , оскільки один з векторів змінюється в часі за законом синусу, а другий – за законом косинуса. Враховуючи, що результуючий вектор напруженості ЗМП максимальної величини знаходиться в площині описаних фіксованих у просторі пульсуючих векторів, розкладання кожного вектора на складові, що прямо і зворотно обертаються, дозволяє визначити максимальне значення H_{max} напруженості ЗМП на основі значень просторових компонент векторів, що пульсують. Максимум поля отримують в результаті операцій геометричних перетворень векторів, що пульсують з фіксованими амплітудами.

Рівняння для однієї просторової компоненти вектора \mathbf{H} напруженості змінного ЗМП отримується підсумовуванням пульсуючих полів та має вигляд:

$$H_u(t) = H_{su} \sin(\omega t) + H_{cu} \cos(\omega t)|_{u=x,y,z}, \quad (7)$$

де H_{su}, H_{cu} – амплітуди синусних й косинусних складових компонент вектора напруженості змінного ЗМП вздовж осі u .

Величини H_{su}, H_{cu} визначаються підсумовуванням миттєвих значень складових компонент (5) напруженості ЗМП, що створюється контурами з відповідними фазними струмами [24, 25]:

$$H_u(t) = H_{Au} \sin(\omega t) + H_{Bu} \sin(\omega t - 2\pi/3) +$$

$$+ H_{Cu} \sin(\omega t - 4\pi/3) = H_{su} \sin(\omega t) + H_{cu} \cos(\omega t). \quad (8)$$

Відтак амплітуди H_{us}, H_{uc} дорівнюють:

$$\begin{aligned} H_{su} &= H_{Au} + H_{Bu} \cos(2\pi/3) + H_{Cu} \cos(4\pi/3); \\ H_{cu} &= -H_{Bu} \sin(2\pi/3) - H_{Cu} \sin(4\pi/3). \end{aligned} \quad (9)$$

Модулі пульсуючих векторів \mathbf{H}_s і \mathbf{H}_c , складових напруженості ЗМП трифазної ЕУ, визначаються геометричним підсумовуванням відповідних компонент:

$$\begin{aligned} H_s &= \sqrt{H_{sx}^2 + H_{sy}^2 + H_{sz}^2}; \\ H_c &= \sqrt{H_{cx}^2 + H_{cy}^2 + H_{cz}^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

Просторовий кут α між векторами \mathbf{H}_s і \mathbf{H}_c визначається співвідношенням:

$$\cos \alpha = \frac{H_{sx}H_{cx} + H_{sy}H_{cy} + H_{sz}H_{cz}}{H_s H_c}. \quad (11)$$

Після розкладання кожного з двох пульсуючих векторів на складові, що прямо і зворотно обертаються, отримуємо співвідношення для H_{max} :

$$\begin{aligned} H_{max} &= 0,5 \left(\sqrt{H_s^2 + 2H_s H_c \sin \alpha + H_c^2} + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{H_s^2 - 2H_s H_c \sin \alpha + H_c^2} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Для наочності на рис. 1 схематично зображена ЕУ та побудовані вектори \mathbf{H}_s і \mathbf{H}_c компонент напруженості H_u (7) у довільній точці простору P . Геометричний центр ЕУ умовно позначений як 0, що є початком системи прямокутних осей. Осі x, y, z спрямовані вздовж конструктивних осей (довжини, ширини й висоти) ЕУ. Пульсація за величиною компонент напруженості H_u відбувається вздовж векторів \mathbf{H}_s і \mathbf{H}_c . Індеси s та c вказують на закони зміни в часі, відповідно, синус та косинус (10). Оскільки вектори \mathbf{H}_s і \mathbf{H}_c є пульсуючими з часовим фазним зрушенням на 90° , то в моменти часу, що дорівнюють $l\pi/2$ ($l = 0, 1, 2, \dots$) один завжди дорівнює нулю. В інші моменти часу величина кута α визначається за формулою (11). Годограф вектора напруженості ЗМП, позначений як $\mathbf{H}(t)$, являє собою еліпс, що окреслює площину загального положення, з центром в точці P (затінена область). Величина H_{max} дорівнює довжині більшої півосі еліпса.

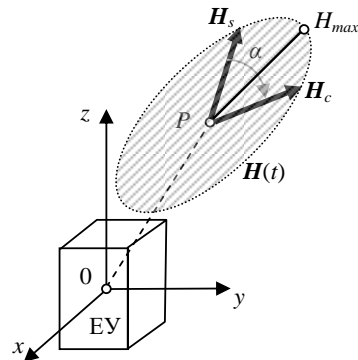


Рисунок 1 – Годограф вектора напруженості ЗМП ЕУ

У випадку трифазної системи струмів **без нейтрального провідника** ЗМП буде утворюватися двома контурами, що обтікаються струмами двох фаз, наприклад, A і C [23], оскільки поле контуру зі струмом фази B дорівнюватиме нулю:

$$H_{Bu}|_{u=x,y,z} = 0. \quad (13)$$

Отже, вирази (9) спрощуються:

$$\begin{aligned} H_{su} &= H_{Au} + H_{cu} \cos(4\pi/3); \\ H_{cu} &= -H_{cu} \sin(4\pi/3). \end{aligned} \quad (14)$$

Поле магнітних диполів. Вирази, що пов'язують напруженість \mathbf{H} та скалярний магнітний потенціал φ_m одного зміщеного точкового джерела (магнітного диполя), відомі [26]:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= -\nabla \varphi_m; \\ \varphi_m &= \frac{M(r-a)}{4\pi|r-a|^3}, \end{aligned} \quad (15)$$

де M – вектор магнітного дипольного моменту;
 r – радіус-вектор точки спостереження P ;
 a – зміщення диполя.

У випадку змінного ЗМП кожен q -й диполь характеризується вектором змінного магнітного моменту $\mathbf{M}_q(t)$ і вектором зміщення \mathbf{a}_q . За аналогією з представленням векторів напруженості (7), вектор $\mathbf{M}_q(t)$ також зручно подати у вигляді двох пульсуючих джерел – синусного та косинусного:

$$\mathbf{M}_q(t) = \mathbf{M}_{qs} \sin(\omega t) + \mathbf{M}_{qc} \cos(\omega t), \quad (16)$$

де $\mathbf{M}_{qs}, \mathbf{M}_{qc}$ – модулі (амплітуди) відповідно синусної та косинусної пульсуючих складових диполів – просторові вектори з компонентами [27]:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{qs} &= M_{qs} (M_{qsx}, M_{qsy}, M_{qsx}); \\ \mathbf{M}_{qc} &= M_{qc} (M_{qcx}, M_{qcy}, M_{qcz}). \end{aligned} \quad (17)$$

З урахуванням (15)-(17) математичний зв'язок компонент вектора напруженості \mathbf{H} та просторових компонент пульсуючих векторів магнітного моменту встановлюється співвідношеннями (18).

У (18) $H_{qs}(H_{qsx}, H_{qsy}, H_{qsx}), H_{qc}(H_{qcx}, H_{qcy}, H_{qcz})$ – синусна й косинусна складові пульсуючих векторів напруженості поля магнітного диполя, що створюється q -м точковим джерелом;

a_{qx}, a_{qy}, a_{qz} – компоненти вектора зміщення q -го джерела.

$$H_{qs} = \begin{pmatrix} H_{qsx} \\ H_{qsy} \\ H_{qsx} \end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi|r-a_q|^{5/2}} \times \begin{pmatrix} 3(x-a_{qx})^2 - r^2 & 3(x-a_{qx})(y-a_{qy}) & 3(x-a_{qx})(z-a_{qz}) \\ 3(y-a_{qy})(x-a_{qx}) & 3(y-a_{qy})^2 - r^2 & 3(y-a_{qy})(z-a_{qz}) \\ 3(z-a_{qz})(x-a_{qx}) & 3(z-a_{qz})(y-a_{qy}) & 3(z-a_{qz})^2 - r^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{qsx} \\ M_{qsy} \\ M_{qsx} \end{pmatrix};$$

$$H_{qc} = \begin{pmatrix} H_{qcx} \\ H_{qcy} \\ H_{qcz} \end{pmatrix} = \frac{1}{4\pi|r-a_q|^{5/2}} \times \begin{pmatrix} 3(x-a_{qx})^2 - r^2 & 3(x-a_{qx})(y-a_{qy}) & 3(x-a_{qx})(z-a_{qz}) \\ 3(y-a_{qy})(x-a_{qx}) & 3(y-a_{qy})^2 - r^2 & 3(y-a_{qy})(z-a_{qz}) \\ 3(z-a_{qz})(x-a_{qx}) & 3(z-a_{qz})(y-a_{qy}) & 3(z-a_{qz})^2 - r^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{qcx} \\ M_{qcy} \\ M_{qcz} \end{pmatrix}, \quad (18)$$

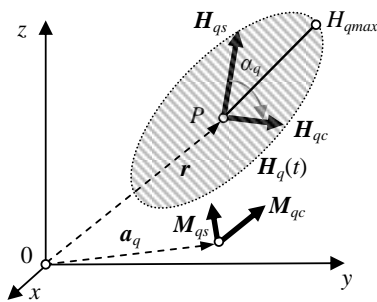


Рисунок 2 – Годограф вектора напруженості ЗМП зміщеного q -го диполя

Максимальне значення напруженості ЗМП поля зміщеного диполя визначається аналогічно (12):

$$H_{Qmax} = 0,5 \left(\sqrt{H_{Qs}^2 + 2H_{Qs}H_{Qc} \sin \alpha_Q + H_{Qc}^2} + \sqrt{H_{Qs}^2 - 2H_{Qs}H_{Qc} \sin \alpha_Q + H_{Qc}^2} \right), \quad (19)$$

де H_{Qmax} – максимальна значення напруженості ЗМП системи Q диполів;

H_{Qs}, H_{Qc} – максимальні величини синусної та косинусної складових поля системи Q диполів;

$$H_{Qs} = \sqrt{\sum_{u=x,y,z} H_{Qsu}^2};$$

$$H_{Qc} = \sqrt{\sum_{u=x,y,z} H_{Qcu}^2};$$

$$H_{Qsu} = \sum_{q=1}^Q H_{qsu} \Big|_{u=x,y,z};$$

$$H_{Qcu} = \sum_{q=1}^Q H_{qcu} \Big|_{u=x,y,z}; \quad (20)$$

α_Q – просторовий кут між напрямками пульсуючих векторів H_{Qs} та H_{Qc} ,

На рис. 2 подано розташування векторів магнітних моментів пульсуючих джерел, вектори напруженості поля цих джерел, годограф вектора напруженості $H_q(t)$ та його максимальна величина H_{qmax} .

$$\cos \alpha_Q = \frac{H_{Qsx}H_{Qcx} + H_{Qsy}H_{Qcy} + H_{Qsz}H_{Qcz}}{H_{Qs}H_{Qc}}. \quad (21)$$

Компенсоване зовнішнє магнітне поле трифазного електроустановлення. Вибір числа та величин магнітних моментів компенсуючих джерел проводиться за умов компенсації поля [24, 25]:

$$\left| \mathbf{H}(p_j) + \mathbf{H}_Q(p_j) \right| \leq \varepsilon;$$

$$p_j \in V, \quad (22)$$

де $H(p_j), H_Q(p_j)$ – напруженості ЗМП ЕУ (7) та системи з Q компенсуючих диполів (19);

ε – потрібний рівень напруженості ЗМП;

p_j – точка спостереження під номером j ;

V – область компенсації поля.

Задача визначення місць розташування компенсуючих диполів може бути вирішена шляхом математичного моделювання. У першому наближенні ця задача зводиться до компенсації дипольної складової ЗМП. Тобто для досить віддалених точок умова (22) забезпечується при мінімальному числі компенсуючих джерел. У випадку змінного ЗМП трифазної системи струмів кількість контурів, а отже і компенсуючих джерел q дорівнює 2, а загальна кількість однокомпонентних компенсуючих диполів Q дорівнює 6 за кількістю співвідношень для компонент синусних H_s і косинусних H_c пульсуючих диполів:

$$\left| H_{sx} + H_{1sx} \right| \leq \varepsilon;$$

$$\left| H_{sy} + H_{1sy} \right| \leq \varepsilon;$$

$$\left| H_{sz} + H_{1sz} \right| \leq \varepsilon;$$

$$\left| H_{cx} + H_{2cx} \right| \leq \varepsilon;$$

$$\left| H_{cy} + H_{2cy} \right| \leq \varepsilon;$$

$$\left| H_{cz} + H_{2cz} \right| \leq \varepsilon. \quad (23)$$

Індекси 1 і 2 у співвідношеннях (23) відносяться до синусних та косинусних пульсуючих диполів. Як видно із співвідношень (23), виконання цих умов можливе, коли знаки поля ЕУ і ЗМП компенсуючих диполів протилежні.

Ліві частини співвідношень (23) являють собою величини компенсованого поля, отриманого у випадку одного дипольного джерела довільного напрямку.

Введемо позначення для компонент та складових скомпенсованого (результуючого) поля і подамо співвідношення (23) у вигляді:

$$\begin{aligned} |H_{psx}| \leq \varepsilon; & \quad |H_{psy}| \leq \varepsilon; & \quad |H_{psz}| \leq \varepsilon; \\ |H_{pcx}| \leq \varepsilon; & \quad |H_{pcy}| \leq \varepsilon; & \quad |H_{pcz}| \leq \varepsilon. \end{aligned} \quad (24)$$

Синусні й косинусні компоненти результуючого поля отримуємо підсумовуванням відповідних складових полів ЕУ і системи компенсуючих диполів:

$$\begin{aligned} H_{psx} &= H_{sx} + \sum_{q=1}^Q H_{qsx}; \\ H_{psy} &= H_{sy} + \sum_{q=1}^Q H_{qsy}; \\ H_{psz} &= H_{sz} + \sum_{q=1}^Q H_{qsz}; \\ H_{pcx} &= H_{cx} + \sum_{q=1}^Q H_{qcx}; \\ H_{pcy} &= H_{cy} + \sum_{q=1}^Q H_{qcy}; \\ H_{pcz} &= H_{cz} + \sum_{q=1}^Q H_{qcz}; \end{aligned} \quad (25)$$

Максимум поля в цьому випадку визначається аналогічно співвідношенню (12):

$$\begin{aligned} H_{p \max} &= 0,5 \left(\sqrt{H_{ps}^2 + 2H_{ps}H_{pc} \sin \alpha_p + H_{pc}^2} + \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{H_{ps}^2 - 2H_{ps}H_{pc} \sin \alpha_p + H_{pc}^2} \right), \end{aligned} \quad (26)$$

де

$$\begin{aligned} H_{ps} &= \sqrt{H_{psx}^2 + H_{psy}^2 + H_{psz}^2}; \\ H_{pc} &= \sqrt{H_{pcx}^2 + H_{pcy}^2 + H_{pcz}^2}; \end{aligned}$$

$$\cos \alpha_p = \frac{H_{psx}H_{pcx} + H_{psy}H_{pcy} + H_{psz}H_{pcz}}{H_{ps}H_{pc}}.$$

При компенсації тільки дипольної складової ЗМП ЕУ за допомогою системи ЕК, умови компенсації можуть бути сформульовані в термінах магнітних моментів [27]. При цьому величини складових компонент пульсуючих векторів магнітних моментів згідно (23) за умови $\varepsilon \rightarrow 0$ виходять наступними:

$$\begin{aligned} \sum_{q=1}^Q \mathbf{M}_{qsx} &= -\mathbf{M}_{sx}; \\ \sum_{q=1}^Q \mathbf{M}_{qsy} &= -\mathbf{M}_{sy}; \\ \sum_{q=1}^Q \mathbf{M}_{qsz} &= -\mathbf{M}_{sz}; \\ \sum_{q=1}^Q \mathbf{M}_{qcx} &= -\mathbf{M}_{cx}; \\ \sum_{q=1}^Q \mathbf{M}_{qcy} &= -\mathbf{M}_{cy}; \\ \sum_{q=1}^Q \mathbf{M}_{qcz} &= -\mathbf{M}_{cz}. \end{aligned} \quad (27)$$

На практиці для спрощення налаштування кількість ЕК прагнуть мінімізувати за рахунок виконання їх однокомпонентними, встановлення їх по одному для кожного контуру ЕУ і живлення їх струмами, пропорційними струмам фаз, наприклад, А і С. В цьому випадку умови компенсації (27) можна записати для кожного q-го ЕК окремо:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{1x} &= -\mathbf{M}_{Ax}; & \mathbf{M}_{2y} &= -\mathbf{M}_{Ay}; & \mathbf{M}_{3z} &= -\mathbf{M}_{Az}; \\ \mathbf{M}_{4x} &= -\mathbf{M}_{Cx}; & \mathbf{M}_{5y} &= -\mathbf{M}_{Cy}; & \mathbf{M}_{6z} &= -\mathbf{M}_{Cz}; \end{aligned} \quad (28)$$

де $\mathbf{M}_{1x}, \dots, \mathbf{M}_{6z}$ – амплітудні значення пульсуючих магнітних моментів ЕК;

$\mathbf{M}_{Ax}, \dots, \mathbf{M}_{Cz}$ – теж для контурів сформованих фазами АВ і СВ ЕУ.

Особливості моделювання скомпенсованого ЗМП. Перша особливість пов'язана з вибором напрямку обходу контурів силового кола. У разі постійного поля співвідношення (1) однозначно визначають знаки компонент H_x, H_y, H_z . При обході проекції контуру проти годинникової стрілки знак відповідної компоненти приймається додатним у разі збігу напрямку струму в контурі з напрямком обходу і від'ємним навпаки. Цього ж правила необхідно дотримуватися і для контурів змінного струму при обчисленні величини компонент H_{Au}, H_{Bu}, H_{Cu} векторів напруженостей H_A, H_B, H_C поля фазних контурів.

Друга особливість пов'язана з вибором знака компонент компенсуючого магнітного моменту. При моделюванні в цьому випадку можна скористатися прийомом, що застосовується на практиці при вимірюванні компонент магнітного моменту (у тому

числі синусної та косинусної складових). При вимірюваннях напруженості ЗМП на великих відстанях від ЕУ значення компонент напруженості ЗМП пропорційні значенням відповідних компонент магнітного моменту. З урахуванням цього при моделюванні знак компоненти компенсуючого магнітного моменту встановлюється протилежним знаку відповідної компоненти напруженості ЗМП ЕУ, визначеної на великих відстанях відповідно до співвідношень (18).

Третя особливість моделювання компенсованого ЗМП полягає в отриманні оцінки придатності чи непридатності обраного варіанта розташування компенсуючих джерел. Виходячи з цього виконання умов компенсації (24) є критерієм придатності обраної системи компенсуючих джерел. Якщо при моделюванні ЗМП шляхом перебору різних варіантів розташування компенсуючих джерел з метою вибору оптимального варіанту умова (24) не виконується, то перевага віддається тому варіанту, у якого величина модуля компенсуючого поля, визначеного у відповідності зі співвідношеннями (26) буде меншою.

Вихідні дані для моделювання. Об'єктом математичного моделювання обраний АВ серії А3700 з блоком компенсації (БК) змінного ЗМП. Схема розташування АВ з БК подана на рис. 3.

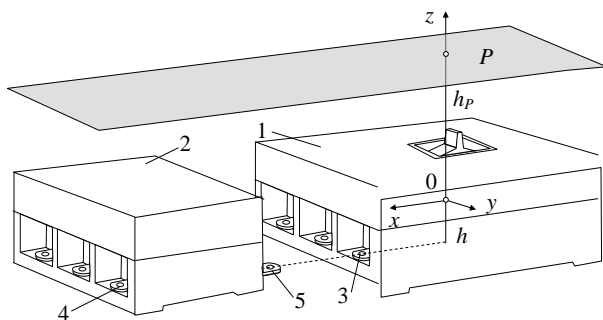


Рисунок 3 – Схематичне зображення АВ з БК

На рис. 3 позначено: 0 – геометричний центр АВ, що є початком прямокутної системи координат x, y, z ; 1 – АВ; 2 – БК; 3 – виводи АВ; 4, 5 – виводи БК для підключення АВ та зовнішнього силового кола; P – площина точок спостереження при моделюванні ЗМП; h, h_p – відстань від початку координат до площини, відповідно, силового кола (струмопроводу) АВ з БК й до площини P .

На рис. 4 наведена схема контурів силового кола АВ з БК з виводами кабелів K зовнішнього силового кола на вході АВ та виході БК. Контури утворені струмопроводами фаз АВ й СВ являють собою трапеції, розташовані в площині струмопроводів силового кола АВ.

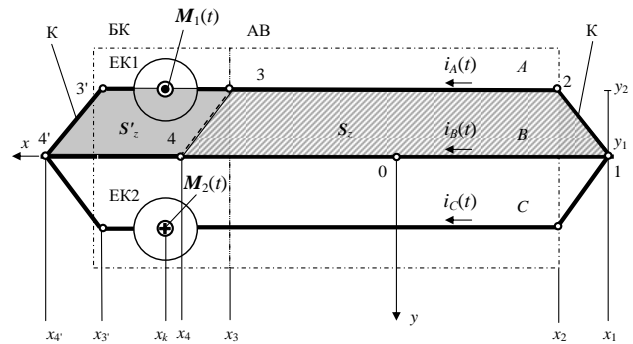


Рисунок 4 – Контури, утворені струмопроводами АВ з БК при моделюванні ЗМП

Напрямок фазних струмів $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$ на схемі рис. 4 загальноприйнятий. У БК розташовані два електромагніти компенсатора ЕК1 та ЕК2, включені в крайні фази А та С. Кожен ЕК виконаний у вигляді циліндричної котушки з феромагнітним осердям (рис. 5) [22] і на рис. 4 поданий у вигляді кіл $M_1(t)$ та $M_2(t)$.

Вектори магнітних моментів ЕК $M_1(t)$ та $M_2(t)$ спрямовані вздовж осі z (рис. 3). Розвилки виводів кабелів на рис. 4 подані у вигляді трикутних контурів, що доповнюють прямокутні контури струмопроводів АВ та БК. Вершини контуру АВ з розвилками кабелю K , що має форму трапеції з площею S_z , до компенсації позначені точками 1, 2, 3, 4, а при компенсації ЗМП, коли до АВ підключений БК (трапеція площею S'_z) – 1', 2', 3', 4'. Координати по осі x точок контурів відзначені індексами відповідно для точок контурів $x_1, x_2, x_3, x_3', x_4, x_4'$ і x_k – для ЕК; по осі y – y_1, y_2 . По осі z всі точки контурів та ЕК мають однакову координату z_1 , а точки площини P – z_p .



Рисунок 5 – Конструкція ЕК

Чисельні значення координат подані у табл. 1. При моделюванні ЗМП мінімальна відстань до точок площини спостереження вибрана відповідно до стандарту [1], що дорівнює 0,3 м.

Таблиця 1 – Координати точок контурів, мм

Варіант	Контур	Точка, j	x_j	y_j	z_j
АВ без БК	АВ	1	-223	0	-110
		2	-123	-50	-110
		3	123	-50	-110
	СВ	1	-223	0	-110
		2	-123	50	-110
		3	123	50	-110

		4	223	0	-110
AB з БК	AB	1	-223	0	-110
		2	-123	-50	-110
		3'	260	-50	-110
		4'	363	0	-110
	CB	1	-223	0	-110
		2	-123	50	-110
		3'	260	50	-110
		4'	363	0	-110

Величини магнітних моментів ЕК визначені за умови повної компенсації складових компонент напруженості ЗМП АВ. Вектори пульсуючих магнітних моментів АВ без та з БК мають по одній компоненті вздовж осі z. Амплітуди компонент магнітних моментів M_{Az} АВ і M'_{Az} АВ з БК визначені за формулами:

$$\begin{aligned} M_{Az} &= I_A S_z; & M_{Cz} &= I_C S_z; \\ M'_{Az} &= I_A S'_z; & M'_{Cz} &= I_C S'_z. \end{aligned} \quad (29)$$

Амплітуди пульсуючих магнітних моментів ЕК1 та ЕК2 з урахуванням (29) дорівнюють, $A \cdot m^2$:

$$M_{Az} = M_{Cz} = 6.92; \quad M'_{Az} = M'_{Cz} = 9.72. \quad (30)$$

Миттєві значення магнітних моментів ЕК1 та ЕК2 з урахуванням першої особливості дорівнюють:

$$\begin{aligned} M_1(t) &= -M_{Az} \sin(\omega t) = -M_{1s} \sin(\omega t); \\ M_2(t) &= M_{Cz} \sin(\omega t - 4\pi/3) = \\ &= M_{2s} \sin(\omega t) + M_{2c} \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (31)$$

З урахуванням (30) та (31) отримані розрахункові значення синусних і косинусних складових пульсуючих магнітних моментів, наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Параметри пульсуючих магнітних моментів ЕК

ЕК	Амплітуди складових, $A \cdot m^2$		Координати точок зміщення, мм		
	M_s	M_c	a_x	a_y	a_z
ЕК1	-9,690	0	193	-50	-110
ЕК2	3,460	5,993	193	50	-110

Результати моделювання. З використанням програмного пакету Maple системи комп'ютерної математики проведений розрахунок максимальних величин напруженості ЗМП на поверхні точок спостереження P (рис. 3) для трьох варіантів джерел ЗМП. На рис. 6 поданий розподіл напруженості H_{max} власного поля АВ, розрахований за співвідношенням (12). На рис. 7 та 8 поданий розподіл синусних H_{Qs} й косинусних H_{Qc} складових напруженості ЗМП, утворених ЕК БК розрахований за співвідношеннями (20). На рис. 9 поданий розподіл максимальної величини H_{pmax} скомпенсованого ЗМП, утвореного

спільно АВ та ЕК і розрахований за співвідношенням (26).

Вочевидь, що застосування зовнішнього блока електромагнітів компенсаторів для автоматичного вимикача дозволяє в 28 одиниць по осі x та у 70 одиниць по осі z зменшити вплив його зовнішнього магнітного поля на мікропроцесорний блок керування напівпровідниковим розчіплювачем максимального струму [22].

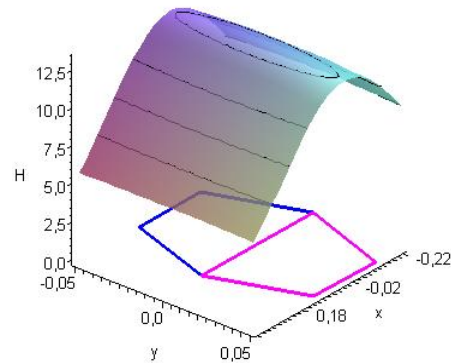


Рисунок 6 – Поверхня розподілу модуля вектора напруженості власного поля АВ, побудована на площині точок спостереження P (x, y – м, H – $A \cdot m^2$)

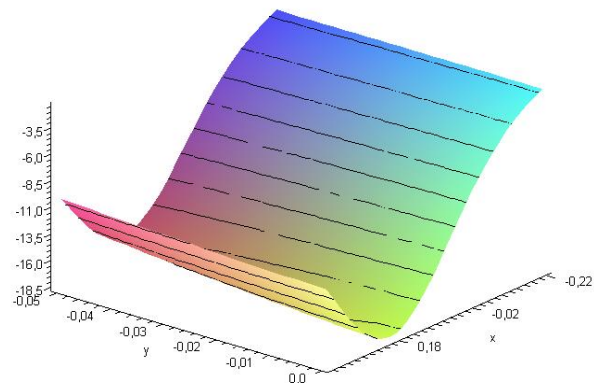


Рисунок 7 – Поверхня розподілу синусних H_{Qs} складових напруженості ЗМП, утворених ЕК БК

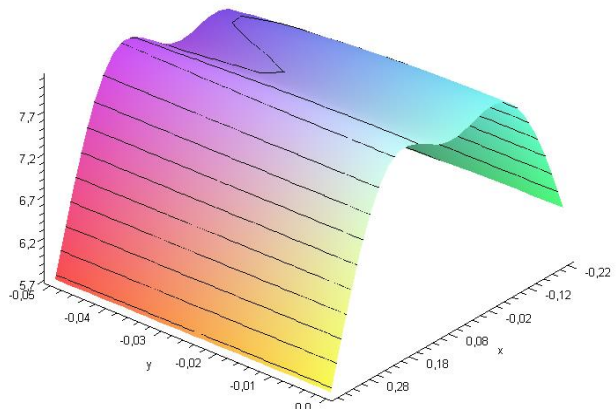


Рисунок 8 – Поверхня розподілу косинусних H_{Qc} складових напруженості ЗМП, утворених ЕК БК

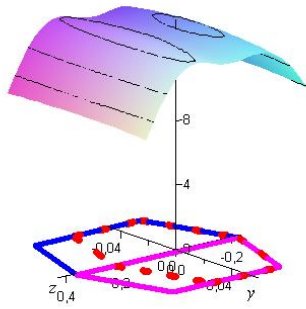


Рисунок 9 – Верхня розподілу максимальної величини H_{max} скомпенсованого ЗМП

Висновки. Проведений аналіз процесу комп'ютерного моделювання ЗМП триполюсного АВ дозволив виділити три особливості, пов'язані з вибором напрямку обходу контурів із фазними струмами, з визначенням необхідних умов компенсації ЗМП на великій відстані, а також з розрахунком модуля напруженості в контрольних точках спостереження при дії сумарного зовнішнього магнітного поля контурів електроустановки й джерел, що компенсують.

Отримані розрахункові співвідношення, що дозволяють здійснити математичне моделювання зовнішнього магнітного поля контурів зі струмом різної конфігурації, а саме поля окремого контуру зі струмом, поля контурів, що обтікаються трифазним струмом в трифазній системі струмів з нейтральним провідником, у випадку трифазної системи струмів без нейтрального провідника, поля магнітних диполів, а також компенсуючого магнітного поля електромагнітів компенсаторів.

Визначено, що при моделюванні ЗМП ЕУ розрахунок модуля вектора напруженості магнітного поля в точці спостереження та магнітного моменту контуру із фазним струмом потрібно здійснювати з урахуванням пульсуючих складових компонент, що змінюється в часі за законом синусу та косинусу.

Розрахунки підтвердили, що застосування зовнішнього блока електромагнітів компенсаторів для автоматичного вимикача дозволяє в 28 одиниць по осі x та y 70 одиниць по осі z зменшити вплив його зовнішнього магнітного поля на мікропроцесорний блок керування напівпровідниковим розчіплювачем максимального струму й, тим самим, запобігти помилкових спрацьовувань пристроїв релейного захисту та протиаварійної автоматки електротехнічних комплексів та систем низької напруги.

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 підтвердження відповідності електромагнітної сумісності: Наказ Держ. ком. України з питань техн. регулювання та спожив. політики від 31.12.2003 р. № 283: станом на 20 листоп. 2009 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0578-04#Text> (дата звернення: 12.05.2022).
3. Король Е. Г., Пантелія М. Г. Требования по электромагнитной совместимости технических средств на объектах

4. Shadare A. E., Sadiku M. N. O., Musa S. M. Electromagnetic compatibility issues in critical smart grid infrastructure. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*. 2017. Vol. 6, no. 4. P. 63–70. URL: <https://doi.org/10.1109/memc.0.8272283>.
5. Черный А. П., Никифоров В. В., Родькин Д. И., Ноженко В. Ю. Современное состояние исследований влияния электромагнитных излучений на организм человека. *Інженерні та освітні технології в електротехнічних і комп'ютерних системах*. 2013. 2 (2). С. 112–124.
6. Carpenter D. O. Human disease resulting from exposure to electromagnetic fields. *Reviews on Environmental Health*. 2013. Vol. 28, no. 4. URL: <https://doi.org/10.1515/reveh-2013-0016>.
7. Wang Z., Fei Y., Liu H. et al. Effects of electromagnetic fields exposure on plasma hormonal and inflammatory pathway biomarkers in male workers of a power plant. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. 2015. Vol. 89, no. 1. P. 33–42. URL: <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1049-7>.
8. Про затвердження державних санітарних правил та норм (ДСН 239-96): Наказ МОЗ України від 01.08.1996 р. № 239: станом на 22 січ. 2021 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96#Text> (дата звернення: 12.05.2022).
9. Про затвердження Державних санітарних норм та правил при роботі з джерелами електромагнітних полів (ДСНІП 3.3.6.096-2002): Наказ МОЗ України від 18.12.2002 р. № 476. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text> (дата звернення: 12.05.2022).
10. 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. URL: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2369813>.
11. 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. URL: <https://doi.org/10.1109/ceem.2015.7368690>.
12. 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. URL: <https://doi.org/10.1109/elconrus51938.2021.9396694>.
13. Мировой специалист по электрическим и информационным системам зданий: каталог Legrand 2013/2014. URL: https://legrand.ru/upload/upfails/obshcatalog/DC184_Legrand_Cat-RU-2013.pdf (дата звернення: 12.05.2022).
14. Floor and perimeter systems: Legrand product technical guide. URL: <https://storage.electrika.com/flips/0600-floor-perimeter-systems-17/files/assets/common/downloads/publication.pdf> (дата звернення: 12.05.2022).
15. Розов В. Ю., Пиллогина О. Ю., Добродеев П. Н., Гетьман А. В., Волохов С. А., Лупиков В. С. Введение в демагнетизацию технических объектов. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2006. № 4. С. 55–59.
16. Rozov V. Y., Grinchenko V. S., Yerisov A. V., Dobrodeyev P. N. Efficient shielding of three-phase cable line magnetic field by passive loop under limited thermal effect on power cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2019. No. 6. P. 50–54. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.6.07>.
17. Rozov V. Y., Kundius K. D., Pelevin D. Y. Active shielding of external magnetic field of built-in transformer substations. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2020. No. 3. P. 24–30. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.04>.
18. Kuznetsov B., Voloshko A., Bovdui 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. URL: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248887>.

19. 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. URL: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.03>.
20. 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. P. 21–24. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235383>.
21. Король Е. Г., Луников В. С., Серета 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.
22. Король Е. Г., Луников В. С., Серета А. Г., Рудас Ю. Д. Экспериментальные исследования блока компенсации переменного магнитного поля для автоматического выключателя. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика*. 2011. № 4. С. 20–28.
23. Луников В. С., Крюкова Н. В., Гелярская О. А. и др. Анализ магнитного момента токов трехфазного источника поля. *Электротехника и Электромеханика*. 2006. № 4. С. 47–51.
24. Король Е. Г. Оценка максимального магнитного поля автоматических выключателей. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика*. 2010. № 29. С. 25–34.
25. Гелярская О. А., Луников В. С., Варшамова И. С. и др. Моделирование компенсированного магнитного поля автоматического выключателя. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика*. 2011. № 48. С. 14–22.
26. Измайлов С. В. Курс электродинамики. Учебник для физико-математических факультетов педагогических институтов. Москва : Государственное учебно-педагогическое издательство министерства просвещения РСФСР, 1962. 439 с.
27. Гелярская О. А., Луников В. С. Анализ методов расчета магнитного поля пространственного контура с током. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Проблемы усовершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика*. 2010. № 29. С. 9–17.
- Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 63–70, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/memc.0.8272283>.
5. O. Chorniy, V. Nykyforov, D. Rodkin, and V. Nozhenko, “Modern situation of the investigation of electromagnetic radiations on human’s organism,” *Engineering and Educational Technologies (EETECES)*, 2 (2), pp. 112–124, 2013. (in Russian)
6. D. O. Carpenter, “Human disease resulting from exposure to electromagnetic fields,” *Reviews on Environmental Health*, vol. 28, no. 4, Jan. 2013, doi: <https://doi.org/10.1515/reveh-2013-0016>.
7. Z. Wang et al., “Effects of electromagnetic fields exposure on plasma hormonal and inflammatory pathway biomarkers in male workers of a power plant,” *International Archives of Occupational and Environmental Health*, vol. 89, no. 1, pp. 33–42, Mar. 2015, doi: <https://doi.org/10.1007/s00420-015-1049-7>.
8. Ukraine, Ministry of Healthcare of Ukraine. (1996, Aug. 1). *Nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy [Order of the Ministry of Healthcare of Ukraine] no. 239, Pro zatverdzhennia derzhavnykh sanitarnykh pravyl ta norm (DSNiP 239-96) [Approval of the State Sanitary Rules and Norms (DSNiP 239-96)]*. Accessed: May 12, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0488-96#Text> (in Ukrainian)
9. Ukraine, Ministry of Healthcare of Ukraine. (2002, Dec. 18). *Nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy [Order of the Ministry of Health of Ukraine] no. 476, Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl pry roboti z dzherelamy elektromahnitnykh poliv (DSNiP 3.3.6.096-2002) [Approval of the State Sanitary Norms and Rules for Work with Sources of Electromagnetic Fields (DSNiP 3.3.6.096-2002)]*. Accessed: May 12, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0203-03#Text> (in Ukrainian)
10. 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, pp. 2009–2016, May. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/tia.2014.2369813>
11. 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>.
12. 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 (EIConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, Jan. 26–29, 2021. pp. 1269–1274. doi: <https://doi.org/10.1109/elconrus51938.2021.9396694>.
13. “Mirovoi spetsialist po elektricheskim i informatsionnym sistemam zdaniy : Katalog Legrand 2013/2014 [The global specialist for electrical and building information systems : Legrand Catalogue 2013/2014].” https://legrand.ru/upload/upfails/obshcatalog/DC184_Legrand_Cat-RU-2013.pdf (accessed May 12, 2022). (in Russian)
14. “Floor and perimeter systems: Legrand product technical guide.” <https://storage.electrika.com/flips/0600-floor-perimeter-systems-17/files/assets/common/downloads/publication.pdf> (accessed May 12, 2022).
15. V. Y. Rozov, O. Y. Piliugina, P. N. Dobrodeev, A. V. Get'man, S. A. Volokhov, and V. S. Lupikov, “Vvedenie v demagnetizatsiiu tekhnicheskikh ob'ektov [Introduction to demagnetization of technical objects],” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 4, pp. 55–59, 2006. ()
16. 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, pp. 50–54, Dec. 2019, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2019.6.07>.
17. 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, pp. 24–30, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.04>.
18. B. Kuznetsov, A. Voloshko, I. Bovdii, E. Vinichenko, B. Kobilyanskiy, and T. Nikitina, “High voltage power line

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.
2. Ukraine, Derzhavnyi komitet Ukrainy z pytan tekhnichnoho rehuliuвання ta spozhyvchoi polityky [State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy]. (2003, Dec. 31). *Nakaz Derzhavnoho komitetu Ukrainy z pytan tekhnichnoho rehuliuвання ta spozhyvchoi polityky [Order of the State Committee of Ukraine for Technical Regulation and Consumer Policy] no. 283, Pro zatverdzhennia Tekhnichnoho rehlamentu z pidtverdzhennia vidpovidnosti elektromahnitnoi sumisnosti [On approval of the technical regulation on conformity assessment for electromagnetic compatibility]*. Accessed: May 12, 2022. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0578-04#Text>. (in Ukrainian)
3. O. Korol and M. Panteliat, “Trebovaniia po elektromahnitnoi sovместимости tekhnicheskikh sredstv na ob'ektakh elektroenergetiki i promyshlennosti [Electromagnetic compatibility requirements for technical facilities in the electricity sector and industry],” *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 15 (988), pp. 35–60, 2013. (in Russian)
4. A. E. Shadare, M. N. O. Sadiku, and S. M. Musa, “Electromagnetic compatibility issues in critical smart grid infrastructure,” *IEEE*

- 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. pp. 196–199, doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248887>.
19. 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, pp. 15–23, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2020.3.03>.
 20. 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. pp. 21–24, doi: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235383>.
 21. E. P. Korol, V. S. Lupikov, A. H. Sereda, and Y. D. Rudas, “Kompensatsiia vektora peremennogo magnitnogo momenta elektrooborudovaniia s pomoshchiu elektromagnita s sostavnym ferromagnitnym serdechnikom [Compensation of magnetic moment vector in electrical equipment by an electromagnet with a composite ferromagnetic core],” *Technical Electrodynamics*, no. 4, pp. 20–25, 2011. (in Russian)
 22. E. H. Korol, V. S. Lupikov, A. H. Sereda, and Y. D. Rudas, “Eksperimentalnye issledovaniia bloka kompensatsii peremennogo magnitnogo polia dlia avtomaticheskogo vykliuchatelia [Experimental researches of the block for compensation of the alternating magnetic field in an automatic switch],” *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 4, pp. 20–28, 2011. (in Russian)
 23. V. S. Lupikov, N. V. Kriukova, and O. A. Geliarovskaia, “Analiz magnitnogo momenta tokov trekhfaznogo istochnika polia [Analysis of magnetic moment produced by currents of a three-phase field source],” *Electrical Engineering & Electromechanics*, no. 4, pp. 47–51, 2006. (in Russian)
 24. O. Korol, “Otsenka maksimalnogo magnitnogo polia avtomaticheskikh vykliuchatelei [Estimation of the maximum magnetic field in automatic switches],” *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 29, pp. 25–34, 2010. (in Russian)
 25. O. A. Heliarovskaia et al., “Modelirovanie kompensirovannogo magnitnogo polia avtomaticheskogo vykliuchatelia [Modelling of the compensated magnetic field in the automatic switch],” *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 48, pp. 14–22, 2011. (in Russian)
 26. S. V. Izmailov, *Kurs Elektrodinamiki. Uchebnik Dlia Fiziko-Matematicheskikh Fakultetov Pedagogicheskikh Institutov [Course in Electrodynamics. Textbook for Physics and Mathematics Departments of Teacher Training Institutes]*. Moscow: Gosudarstvennoe uchebno-pedagogicheskoe izdatelstvo ministerstva prosveshcheniia RSFSR [State educational and pedagogical publishing house of the Ministry of Education of the RSFSR], 1962. (in Russian)
 27. O. A. Heliarovskaia and V. S. Lupikov, “Analiz metodov rascheta magnitnogo polia prostranstvennogo kontura s tokom [Analysis of methods used for computation of magnetic fields in the spatial contour with current],” *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Problems of Electrical Machines and Apparatus Perfection. The Theory and Practice*, no. 29, pp. 9–17, 2010. (in Russian)

Надійшло (received) 18.08.2022

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

Середя 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@khp.edu.ua.

Король Олена Геннадіївна (Olena Korol) – 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@khp.edu.ua.