

УДК 621.311.13

ФЕРОРЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ НА ПІДСТАНЦІЯХ З ЕЛЕГАЗОВИМИ ВИМИКАЧАМИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ**І.Ю. Тугай**, канд. техн. наук, **В.А. Мельничук**, магістрІнститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна
e-mail: tugay@iad.org.ua

Досліджено характерні особливості виникнення ферорезонансних процесів у розподільних пристроях з елегазовими вимикачами та розроблено заходи запобігання можливим аномальним режимам. Розглянуто зміну характеру протікання перехідних процесів при заміні вимикачів розподільних пристроїв на елегазові. Проведено аналіз необхідних та достатніх умов розвитку ферорезонансів на підстанціях з елегазовими вимикачами. Надано рекомендації з попередження виникнення та розвитку цих ферорезонансних процесів. Бібл. 7, рисунок.

Ключові слова: ферорезонансний процес, розподільний пристрій, елегазовий вимикач, перенапруги, надструми.

Газові високовольтні вимикачі використовують як основне силове комутаційне обладнання в електричних мережах надвисокої напруги (НВН). Тривалий час як робочий газ у цих вимикачах використовується повітря. Конструктивно вони складаються з ряду послідовних модульних дугогасильних камер, в яких синхронно виконується рух контактів і виникають розриви. Кількість модулів, включених послідовно, вибирають відповідно до номінальної напруги. Необхідною умовою задовільної роботи вимикачів з багаторазовим розривом є рівномірний розподіл відновлюваної напруги між розривами. Для забезпечення рівномірного розподілу напруги між розривами при будь-якій частоті відновлюваної напруги застосовують ємнісні дільники. Але експлуатація повітряних вимикачів (ПВ) пов'язана зі значними матеріальними витратами, наприклад, як у компресорному господарстві, маслогосподарстві, повітропроводах тощо. Також суттєвими недоліками ПВ є великі габарити та сильний шум під час виконання комутацій.

Принципово нові перспективи для створення сучасних електричних апаратів з'явилися тоді, коли почали використовувати в якості ізолюючого середовища замість повітря шестифтористу сірку – SF_6 . Цю сполуку в Україні називають елегазом (електротехнічний газ). Елегаз не вступає в реакцію з конструкційними матеріалами, нетоксичний, пожегобезпечний. Густина його в п'ять разів перевищує густину повітря. Ця особливість, а також здатність молекул елегазу через великий переріз радіаційного захоплення інтенсивно приєднувати вільні електрони й обумовили його високу ізоляційну здатність. Тому елегазові вимикачі (ЕВ) мають у кілька разів менші габарити, ніж ПВ і спрощену експлуатацію.

Враховуючи викладені фактори, кількість ЕВ у вітчизняних електричних мережах неухильно зростає. Такі вимикачі застосовують як на нових об'єктах, так і при реконструкції діючих підстанцій, поступово витісняючи з них ПВ. На цей час у мережах 110...750 кВ найбільш поширеними є ЕВ колонкового типу з застосуванням так званих компресійного та автокомпресійного принципів гасіння дуги. Фірма Asea Brown Boveri Ltd. (ABB), обладнання якої широко використовується в електротехніці, відповідно випускає два типи вимикачів: серії HPL з компресійною дугогасильною камерою та серії LTB з автокомпресійною дугогасильною камерою [7].

Головна відмінність між ПВ та ЕВ саме в принципах роботи дугогасильних камер. У ПВ гасіння дугових розрядів відбувається потоком повітря під високим тиском 20...40 атм, що гарантує гасіння дуги за будь-яких умов і в будь-який момент часу. Дугогасильні камери ЕВ значно менші, оскільки елегаз значно краще за повітря проводить тепло. Відмінні теплопровідні властивості елегазу дають змогу швидко розсіювати значну кількість енергії, а значить, ефективно переривати великі струми при відключенні ліній електропередач надвисокої напруги (ЛЕП НВН) при порівняно невисокому тиску (6...8 атм). Відновлення ізоляційних

властивостей елегазу відбувається протягом дуже короткого проміжку часу (10...20 мкс) в околі нульового значення струму. Під час цього в плазмі дуги відбуваються складні невірноважені фізичні мікропроцеси, а саме: рекомбінація іонів і електронів в атоми; асоціації атомів у молекули; утворення електронегативних іонів. Тобто проходження миттєвого значення змінного струму через нуль є обов'язковою умовою нормальної роботи ЕВ. Слід відзначити, що вимикачі з автокомпресійними камерами мають спрощену конструкцію і дешевші, ніж з компресійними, оскільки необхідний тиск у них створюється не тільки механічним шляхом, а й за рахунок самого горіння дуги. Але дуга має нелінійні властивості, тому на практиці виявляється, що вимикачі з автокомпресійними камерами надійно працюють при відносно невеликих струмах (тиск створює тільки механічний пристрій) та при дуже великих (горіння дуги значно підвищує тиск). У той же час при середніх значеннях струмів можлива відмова вимикача, оскільки додатковий тиск від горіння дуги виявляється недостатнім. Таке явище характерне за наявності в струмі значної аперіодичної складової.

Для комутації ЛЕП НВН дугогасильні камери ЕВ мають певну кількість розривів, як і у ПВ. Так, для вимикачів фірми АВВ на напругу 330...500 кВ дугогасильні камери мають два розриви, а для 750 кВ – чотири. Кожний розрив шунтується конденсатором ємністю 1600 пФ, відповідно еквівалентні ємності на полюс становлять 800 пФ для номінальної напруги 300...500 кВ і 400 пФ для номінальної напруги 750 кВ.

Проте процес модернізації розподільних пристроїв високої напруги шляхом поступової заміни масляних та повітряних вимикачів на елегазові, яка здійснюється останнім часом у магістральних електричних мережах України, показав, що поряд з отриманням очевидних переваг виникають і певні проблеми, що пов'язані, перш за все, з короткочасними та тривалими перехідними процесами [5]. Це означає, що не потрібно відмовлятися від застосування елегазових вимикачів, а тільки необхідно коректно враховувати всі фактори під час експлуатації.

Характер протікання перехідного процесу визначається початковими умовами при комутації. Ясно, що через відміну у принципах гасіння дуги ці умови будуть відрізнятися при розімкненні ПВ та ЕВ. Але й характер ввімкнення вимикачів різний. У ПВ замикання електричного кола відбувається через пробій повітряного проміжку в момент наближення контактів і відповідає моменту максимального значення напруги. Таким чином, початкові умови перехідного процесу є фіксованими, і можливість їх зміни в процесі комутації відсутня. У той же час, оскільки елегаз перевершує за ізоляційною здатністю більшість твердих і рідких діелектриків, пробій проміжків не спостерігається і замикання кола в ЕВ відбувається практично на момент гальванічного контакту. Отже, миттєве значення напруги на момент комутації може бути довільним, що дає можливість з допомогою відповідних налагоджень впливати на значення початкових умов перехідних процесів під час комутації.

Фірма АВВ комплектує свої вимикачі пристроями керування комутації Switchsync. Згідно з рекомендаціями фірми він перш за все призначений для синхронізації операцій вмикавання та відмикання вимикачів з однополюсним керуванням, але може також застосовуватись при триполюсному керуванні. Пристрій синхронізації Switchsync дає змогу синхронізувати момент комутації відносно фази напруги або струму, що дає можливість, коли це необхідно, впливати на процеси, які виникають при комутації кола.

Пристрої Switchsync отримують команди на спрацювання вимикача від схеми керування та, враховуючи власні затримки спрацювання вимикача, передають їх вимикачу в моменти часу, при яких забезпечуються замикання або розмикання контактів у бажану фазу напруги. Після того як синхронізуючий пристрій отримав команду по одному з двох ввідних каналів, його мікропроцесор починає відлік часу від моменту, коли миттєве значення контрольної напруги досягне нуля. Контрольну напругу отримують від трансформатора напруги з боку живлення вимикача. Синхронізуючий пристрій передає команду на спрацювання соленоїдам керування вимикача з певною затримкою часу, величину якої визначає процесор на основі введених у нього даних та у випадку адаптивного керування результатів вимірювань при попередніх комутаціях з врахуванням, якщо необхідно, компенсації змін у результаті впливу навколишньої температури та інших зовнішніх впливів.

Як було зазначено вище, вирішальним фактором успішного відімкнення елегазових вимикачів є наявність переходу струму через нульове значення. Перехід струму через нульове значення визначається величиною аперіодичної складової струму, який цей вимикач розриває. Робота обмежувачів перенапруг і явище корони не мають помітного впливу на аперіодичну складову струму, а дуга при розмиканні контактів вимикача сприяє зменшенню аперіодичної складової струму. Тому вони можуть не враховуватися при моделюванні короткотривалих перехідних процесів.

Інша справа з довготривалими перехідними процесами, до яких належать ферорезонансні. Як відомо, для них характерним є тригерний ефект, коли в певній точці при незначній зміні напруги на вході відбувається різка зміна струму в колі [2]. Це зумовлено насиченням сталого осердя, що відповідає різкому зменшенню індуктивності обмотки трансформатора.

У нелінійному колі виникають затухаючі вільні коливання, початкова частота яких визначається не тільки значеннями ємності та індуктивності, як у випадку лінійного кола, а й значенням напруги в початковий момент.

Візьмемо у початковий момент напругу на затискачах ємності нелінійного контура рівною U_0 . У початковий момент t_0 відбувається комутація вимикача, що призводить до появи у колі струму i з частотою $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$. Потік у котушці та напруга на затискачах ємності тоді дорівнюватимуть

$$\begin{aligned}\psi &= (U_0/\omega_1) \sin \omega_1 t; \\ u &= U_0 \cos \omega_1 t.\end{aligned}$$

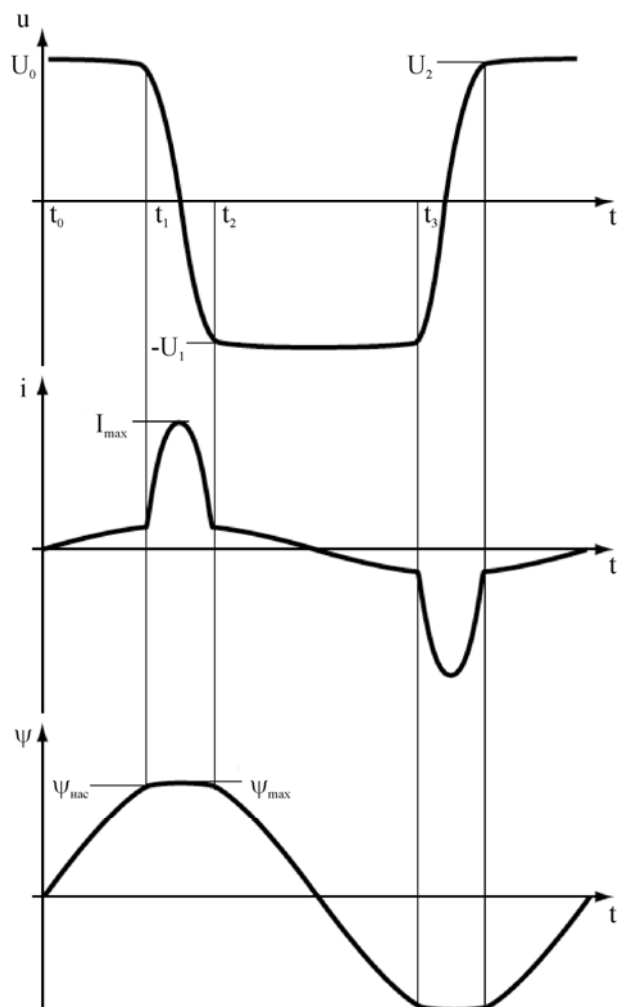
Струм i , напругу u та потік у котушці нелінійного контура ψ як залежності від часу показано на рисунку [6].

Якщо $U_0/\omega_1 > \psi_{\text{нас}}$ на момент часу t_1 , потік ψ досягає значення потоку насичування $\psi_{\text{нас}}$, напруга u дорівнює U_1 , а індуктивність насиченої котушки стає L_n . Оскільки L_n значно менша у порівнянні з індуктивністю котушки L , конденсатор раптово розряджається через котушку у вигляді коливань з частотою $\omega_2 = 1/\sqrt{L_n C}$. Струм та потік досягають максимуму, коли електромагнітна енергія, що накопичується в котушці, стане рівною електростатичній енергії $\frac{1}{2}CU_1^2$, яка була накопичена конденсатором.

На момент часу t_2 потік знову стає рівним $\psi_{\text{нас}}$, індуктивність повертається до величини L та при нехтуванні активними втратами напруга u , яка змінить напрямок, буде дорівнювати $-U_1$.

На момент часу t_3 потік досягає значення $-\psi_{\text{нас}}$, а напруга u дорівнює $-U_2$. Оскільки на практиці ω_1 має дуже мале значення, тому $U_2 \approx U_1 \approx U_0$.

Таким чином, період T коливань буде знаходитись між $2\pi\sqrt{LC}$ у ненасиченому стані та $2\pi\sqrt{L_n C} + 2(t_3 - t_2)$ у насиченому



стані, де $t_3 - t_2 \approx 2\psi_{\text{нас}} / U_0$. Відповідно частота $f = 1/T$ у цьому випадку буде

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{\text{н}}C}}.$$

Це показує, що при такій індуктивності на відміну від лінійного резонансу ферорезонанс відбувається не при деякому фіксованому значенні C , а в досить широкому діапазоні величин C . Ця початкова частота залежить від $\psi_{\text{нас}}$, тобто ступеня нелінійності та початкової величини U_0 .

На практиці через втрати Ri^2 в опорі R (головним чином при зміні напрямку напруги) амплітуда напруги U зменшується ($U_2 < U_1 < U_0$). Приріст потоку $\Delta\psi$ під час ненасиченого періоду ($t_3 - t_2$) буде $\Delta\psi = 2\psi_{\text{нас}} = \int_{t_2}^{t_3} u dt$.

Отже, зменшення u призводить до зниження частоти. Цей процес може зупинитись, якщо на кожному періоді втрати енергії будуть покриватись джерелом електрорушійної сили системи, тобто зниження частоти власних коливань може зупинитись на частоті, кратній частоті системи [6]. Тому саме початкове значення напруги визначає можливість виникнення квазістаціонарного ферорезонансного режиму після перехідного процесу. Якщо наявність ємності дільників напруги ЕВ та нелінійної індуктивності трансформатора в схемі заміщення є достатньою умовою виникнення ферорезонансного процесу на станції, то досягнення напругою певного критичного значення є необхідною умовою початку цього процесу.

При критичному значенні напруги частота вільних коливань перевищує частоту системи. Через втрати енергії (в обмотках та осерді) частота коливань, поступово знижуючись, може зафіксуватися на частоті системи, якщо на кожному періоді втрати будуть компенсовані підживленням контура від системи. Ферорезонанс можливий також при початковій частоті, меншій від частоти системи, якщо частота системи є кратною субгармонічній частоті (звичай 1/3), тобто компенсація втрат відбувається не на кожному періоді вільних коливань. Зрозуміло, що і енергія коливань на субгармонічній частоті буде меншою. На практиці, якщо ферорезонансні коливання на основній частоті викликають руйнування електротехнічного обладнання, то на субгармонічній призводять до відмови пристроїв релейного захисту та автоматики.

Якщо критичне значення напруги не перевищує нормальне робоче, то відповідна умова виконується завжди, і ферорезонанс буде виникати постійно при відповідних комутаціях у робочій схемі. Такий ферорезонанс може бути передбачений за допомогою спеціальних небезпечних зон для цієї номінальної напруги [1]. Якщо для даної підстанції критичне значення напруги перевищує нормальне робоче, то ферорезонансний процес може виникнути в схемі розподільного пристрою підстанції неочікувано, при появі, наприклад, комутаційних перенапруг [3]. Відповідним налагодженням пристрою контролю комутації ЕВ можна запобігти перенапругам, а значить, і виникненню небезпечного ферорезонансного процесу. Слід відзначити, що це справедливо навіть для значень перенапруг, які є безпечними для ізоляції електрообладнання.

Зокрема, при ввімкненні ЛЕП НВН з великою зарядною потужністю фірма АВВ рекомендує виконати управління ЕВ таким чином, щоб замикати контакти на момент, коли миттєва напруга на шинах підстанції дорівнює нулю. Тим самим існує можливість обмежити великі перенапруги незалежно від фактично розподіленого вздовж ЛЕП заряду. Цей захід простий і часто забезпечує необхідну кратність перенапруг, особливо коли застосовується у поєднанні з обмежувачами перенапруг. У багатьох випадках розподілений заряд буде фактично нульовим або близьким до нуля, особливо за наявності на лінії електромагнітних трансформаторів напруги.

Однак необхідно врахувати, якщо ЛЕП НВН є компенсованою, тобто на ній встановлені шунтувальні реактори, то такий алгоритм роботи пристрою може спричинити появу в струмі значної аперіодичної складової і вихід ЕВ з ладу [4]. Тому налагодження має бути то-

чним, з урахуванням обох факторів. Для цього необхідно провести моделювання перехідних процесів після комутації ЕВ і визначити компромісні початкові умови, які забезпечить обраний момент комутації.

Аналіз ферорезонансного процесу можна виконати за допомогою програмного забезпечення, розробленого в Інституті електродинаміки НАН України і впровадженого в енергосистемах України [1]. Програма реалізує комбінований метод розрахунку ферорезонансних процесів – перевірка наявності умов існування коливань виконується методом Гальоркіна в просторі частот, а перехідний та усталений режими моделюються чисельним методом у просторі часу. Це програмне забезпечення дає змогу виконати перевірку наявності достатніх умов для початку ферорезонансного процесу та визначення перебігу перехідного і усталеного режимів у розподільному пристрої високої напруги з ЕВ та електромагнітним трансформаторами напруги.

Висновки. 1. Заміна в розподільних пристроях підстанцій високої напруги масляних та повітряних вимикачів на элегазові створює передумови розвитку ферорезонансних коливань. Тому перед проведенням модернізації підстанцій у магістральних електричних мережах необхідно виконати попередній аналіз початкових умов на можливість виникнення триваліх перехідних процесів.

2. Достатніми умовами появи ферорезонансу є наявність відповідних значень ємності дільників напруги ЕВ та нелінійної індуктивності трансформаторів напруги, а необхідною – поява на шинах підстанції напруги більшої певного критичного значення. Тому запобігти виникненню ферорезонансу можна за допомогою пристрою контролю комутації ЕВ, який дає змогу задати значення напруги на початок перехідного процесу.

3. Перевірку наявності достатніх і необхідних умов виникнення ферорезонансних процесів при встановленні ЕВ доцільно виконувати за допомогою спеціального програмного забезпечення, зокрема, розробленого в Інституті електродинаміки НАН України.

1. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І., Шидловський А.К., Гашимов А.М., Дмитрієв Є.В. Виявлення ферорезонансних процесів у електричних мережах високої напруги та запобігання їм: Методичні вказівки. – К.: ДП НЕК “Укренерго”, 2008. – 52 с.: Затверджено Мінпаливенерго. Наказ № 536 від 4.11.2008 р.
2. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Дослідження динаміки ферорезонансного процесу в розподільчому пристрої підстанції високої напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2013. – Вип. 34. – С. 12–15.
3. Тугай І.Ю. Визначення наявності умов виникнення ферорезонансного процесу в електричних мережах високої напруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 9–12.
4. Тугай Ю.І., Кучанський В.В., Пляшко Р.В. Дослідження впливу параметрів ЛЕП НВН на аномальні перенапруги // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 37. – С. 17–21.
5. Тугай Ю.І., Мельничук В.А. Перехідні процеси в розподільчих пристроях електростанцій з элегазовими вимикачами // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2014. – Вип. 39. – С. 5–8.
6. Ferracci P. Ferroresonance // Cahier technique. Schneider Electric. – Paris, 1998. – No. 190. – P. 1–28.
7. Live Tank Circuit Breakers. Buyer’s Guide. – ABB AB. – 2014. – 152 p.

УДК 621.311.13

І.Ю. Тугай, канд. техн. наук, **В.А. Мельничук**, магістр

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03680, Україна

Феррорезонансные процессы на подстанциях с элегазовыми выключателями и электромагнитными трансформаторами напряжения

Исследованы характерные особенности возникновения феррорезонансных процессов в распределительных устройствах с элегазовыми выключателями и разработаны мероприятия по предотвращению возможных аномальных режимов. Рассмотрено изменение характера протекания переходных процессов при замене выключателей распределительных устройств высокого напряжения на элегазовые. Показано, что при замене масляных и воздушных выключателей на элегазовые, осуществляемой в последнее время в магистральных электрических сетях Украины, наряду с преимуществами возникают и определенные проблемы, связанные с длительными переходными процессами, к которым относится феррорезонанс. Отмечено, что при проектировании и эксплуатации это нужно учитывать, поскольку феррорезонансные колебания на основной частоте вызывают разрушение электротехнического оборудования, а на субгармонических приводят к отказу устройств релейной защиты и автоматики. Проведен анализ необходимых и достаточных условий развития фер-

резонанса в распределительных устройствах с элегазовыми выключателями. Указано, что соответствующей настройкой устройства контроля коммутации элегазовых выключателей можно избежать перенапряжений и возникновения феррорезонанса. Даны рекомендации по предупреждению возникновения и развития феррорезонансных процессов на подстанциях с элегазовыми выключателями. Библ. 7, рисунок.

Ключевые слова: феррорезонансный процесс, распределительное устройство, элегазовый выключатель, перенапряжения, сверхтоки.

I.Yu. Tugai, V.A. Melnychuk

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv, 03680, Ukraine

Ferroresonance processes at the substation with gas-insulated (SF₆) circuit breakers and electromagnetic voltage transformers

In this paper the characteristics of ferroresonance processes occurrence in high-voltage switchgears with SF₆ circuit breakers and measures to prevent possible abnormal modes are presented. The change in the character of transient processes when replacing circuit breakers of high-voltage switchgears on SF₆ circuit breakers is considered. It is shown that the replacement of oil and air circuit breakers for SF₆ circuit breakers, which carried out recently in the electric networks of Ukraine, along with the advantages there are certain problems associated with such long transients as ferroresonance. It is noted that ferroresonance oscillations at the fundamental frequency can cause the destruction of electrical equipment and ferroresonance at the subharmonic frequency can lead to failure of relay protection and automation devices. The analysis of ferroresonance necessary and sufficient conditions at high-voltage substations with SF₆ circuit breakers was developed. It is indicated that with the corresponding configuration of controlled switching of SF₆ circuit breakers the occurrence of overvoltages and ferroresonance can be avoided. Recommendations for the prevention of the ferroresonance processes emergence and development in substations with SF₆ circuit breakers are presented. References 7, figure.

Key words: ferroresonance process, switchgear, SF₆ circuit breaker, overvoltage, overcurrent.

Надійшла 31.05.2016

Received 31.05.2016

УДК 621.3.01

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МАКЕТА ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ АКТИВНОГО ЭКРАНИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Б.И. Кузнецов¹, докт. техн. наук, **Т.Б. Никитина²**, докт. техн. наук, **И.В. Бовдуй³**, канд. техн. наук, **А.В. Волошко⁴**, канд. техн. наук, **Е.В. Виниченко⁵**, канд. техн. наук

1, 3–5 – Институт технических проблем магнетизма НАН Украины,
ул. Индустриальная, 19, Харьков, 61106, Украина
e-mail: bikuznetsov@mail.ru

2 – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет,
ул. Петровского, 25, Харьков, 61002, Украина

Проведена экспериментальная верификация метода синтеза замкнутых систем активного экранирования магнитного поля на разработанном макете трехфазной одноцепной воздушной линии электропередачи, создающей вращающееся поле с наиболее сложной пространственно-временной структурой. Экспериментально подтверждена возможность уменьшения магнитной индукции до нормативного уровня для жилых помещений. Библ. 9, рис. 3.

Ключевые слова: трехфазные одноцепные воздушные линии электропередачи, магнитное поле промышленной частоты, макет системы активного экранирования, экспериментальные исследования.

Введение. Для выполнения нормативных уровней магнитного поля (МП) с частотой 50 Гц, введенных в 2014 году Министерством топлива и энергетики Украины [4], целесообразно использование систем активного экранирования (САЭ) МП [2, 7–9]. В [1] разработан метод синтеза САЭ МП, а также приведен пример синтеза системы с наиболее сложной пространственно-временной структурой вращающегося МП, создаваемого трехфазной одноцепной ЛЭП. Однако разработанный метод синтеза САЭ не имеет экспериментального подтверждения.