

СУЧАСНИЙ СТАН ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ В НИЗЬКОВОЛЬТНИХ МЕРЕЖАХ З НЕЛІНІЙНИМИ СПОЖИВАЧАМИ

(Представлено к.т.н. Соколовським О.Ф.)

Розглянуто причини виникнення гармонік в електричних мережах, проаналізовано їх вплив на електроустановки та запропоновано методи захисту конденсаторних батарей від резонансу.

Постановка проблеми. Виникнення вищих гармонік в електричних мережах є важливою частиною проблеми якості електричної енергії та більш загального поняття – електромагнітної сумісності електрообладнання. Її значення почало зростати протягом останніх 10–15 років у зв'язку зі стрімким розвитком нових технологій, що призвели, з одного боку, до росту електроспоживання електроприймачами, які вносять спотворення в мережу (перетворювальні установки, дугові сталеплавильні печі тощо), а з іншого – до широкого розповсюдження електронних систем автоматичного керування технологічними процесами, чутливих до спотворень [1, 2, 23].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Масове впровадження сучасної силової електроніки в різноманітні види обладнання призвело до того, що наявність гармонік в електричних мережах стало серйозно позначатися на всіх секторах економічної діяльності. Крім того, обладнання, що генерує таке спотворення, часто є критично важливим для підприємства чи організації [3, 7]. До того ж, дуже часто розглянуті електроприймачі є одночасно винуватцями та жертвами порушень електромагнітної сумісності [11, 12, 13].

Враховуючи одночасно збільшення кількості як потужних нелінійних так і чутливих до спотворень споживачів, які з'явилися останнім часом, можна зробити висновок про доречність і своєчасність статті.

Формулювання цілей статті. Дослідити аномальні процеси, які відбуваються в низьковольтних електричних мережах з нелінійними споживачами щоб з'ясувати основні причини виникнення гармонійних спотворень, проаналізувати вплив вищих гармонік на стан електроустановок, дати оцінку наслідкам такого впливу та запропонувати методи покращення стану електромагнітної сумісності для кожного конкретного споживача електричної енергії середньої та великої потужності.

Викладення основного матеріалу. Як і багато інших форм спотворень, гармоніки впливають на всі види електричного обладнання, що знаходиться на досить великій відстані від місця генерації гармонік [14, 15, 16].

Найчастіше в трифазних розподільчих мережах зустрічаються непарні гармоніки. Зі збільшенням частоти амплітуди гармонік, зазвичай, зменшуються [6, 7]. Гармоніки вище 50-го порядку мають незначну амплітуду, тому їх вимірювання не мають сенсу. Достатньо точні результати можна отримати при вимірюванні гармонік до 30-го порядку. Підприємства-постачальники електричної енергії контролюють вміст 3, 5, 7, 11 та 13-ої гармонік у мережах живлення. В цілому, достатнім є усунення гармонік нижчих порядків (до 13-го). При більш ретельному контролі враховуються гармоніки до 25-ої включно [9].

Водночас проблема компенсації реактивної потужності завжди займала важливе місце в загальному комплексі питань підвищення ефективності передачі, розподілу та споживання електричної енергії. Правильне вирішення таких завдань значною мірою зумовлює економію грошових і матеріальних ресурсів, підвищення якості електропостачання. Основні питання компенсації реактивної потужності повинні розглядатися з урахуванням сучасних технічних рішень у цій області [5].

Одним із ефективних шляхів зменшення перетоків реактивної потужності та навіть усунення їх повністю, є використання секцій конденсаторних батарей, які встановлюються безпосередньо в місцях споживання реактивної потужності. Обмін енергією, в даному випадку, буде відбуватися між індуктивністю та ємністю кола. Між індуктивністю та джерелом енергії буде відбуватися обмін лише некомпенсованою частиною енергії [32].

Забруднення мереж вищими гармоніками небезпечно, зокрема, для конденсаторних батарей тим, що існує небезпека виникнення паралельного резонансу в коливальному контурі, створеному ємністю батареї та індуктивністю споживача (мережі), що, в свою чергу, може призвести до виходу з ладу обладнання керування та захисту конденсаторних батарей та всієї компенсаційної установки [1, 11, 13, 32].

Для вирішення наведених проблем необхідно, в першу чергу, вирішити питання проведення точних вимірювань і моделювання мереж живлення, що дозволить виконувати глибокий аналіз складних процесів розповсюдження гармонік у мережах [20, 21, 22, 24, 26, 27].

Будь-яка безперервна функція, що повторюється на інтервалі T , може бути представлена сумою основної синусоїдної компоненти та серії гармонійних складових більш високого порядку, з частотами, кратними основній частоті.

Ряд Фур'є для періодичної функції $x(t)$ має вигляд [4]:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) \right], \quad (1)$$

де a_0 – середнє значення функції $x(t)$; a_n та b_n – проєкції n -ої гармоніки на дійсну та уявну осі.

Вектор n -ої гармоніки:

$$A_n e^{j\varphi_n} = a_n + j b_n, \quad (2)$$

має амплітуду

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (3)$$

та фазовий кут

$$\varphi_n = \operatorname{arctg}\left(\frac{b_n}{a_n}\right). \quad (4)$$

Основним кількісним показником впливу спотворень, викликаних гармоніками на електроустановки є коефіцієнт несинусоїдності напруги:

$$K_{нс} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2}}{U_1} \cdot 100 \approx \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^n U_k^2}}{U_1} \cdot 100, \quad (5)$$

де U_k – діюче значення напруги k -ї гармоніки; U_1 – діюче значення напруги основної гармоніки; n – номер останньої з гармонік, що враховуються.

Основним кількісним показником впливу спотворень, викликаних гармоніками на електроустановки є коефіцієнт несинусоїдності напруги [3, 6, 7, 12].

Відповідно до державних стандартів [9], значення коефіцієнта несинусоїдності напруги в межах до 5 % допустимо на затискачах будь-якого приймача [1, 2, 13, 23].

Основними джерелами гармонік струму в даний час є некеровані та керовані випрямлячі й інвертори з фазовим керуванням. Всі вони поділяються на три групи: 1) потужні перетворювачі, що можуть бути використані, наприклад, в металургії та для передачі постійного струму високої напруги; 2) перетворювачі середньої потужності, подібні тим, що використовуються в промисловості для керування електродвигунами та на залізниці; 3) малопотужні перетворювачі однофазних пристроїв, таких як телевізори, комп'ютери та пристрої підзарядки батарей [11, 13, 19, 25].

Основними формами впливу вищих гармонік на системи електропостачання є: а) збільшення струмів і напруг гармонік внаслідок паралельного та послідовного резонансів; б) зниження ефективності процесів генерації, передачі та використання електроенергії; в) старіння ізоляції електрообладнання та скорочення внаслідок цього терміну його служби; г) помилкова робота обладнання.

Теоретично порядки n гармонік пов'язані з еквівалентною кількістю фаз p випрямляча загальним виразом: $n = pk \pm 1$ (k – ціле додатне число), а їх амплітуди обернено пропорційні порядку гармоніки.

Наприклад, для трифазної мостової схеми гармоніки напруги мають порядки $n = 6k$.

З ростом α (кут керування, ел. град.) статичного перетворювача, амплітуди гармонік більш високих порядків збільшуються швидше.

Використання силових транзисторів і тиристорів дозволяє застосовувати перетворювачі в області керування двигунами змінного струму [8].

Керування інверторами здійснюється за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Цей метод використовується для регулювання тривалості вмикання напівпровідникових ключів та полягає у перериванні вихідної напруги інвертора з метою керування напругою основної частоти [8, 13, 21].

Зниження гармонік нижчих порядків може бути отримано комплексною ШІМ за рахунок збільшення перемикаючої здатності інвертора. Проблема полягає у виборі такої стратегії керування ШІМ, що дозволяла б отримати необхідну лінійну залежність напруги від частоти та знизити гармонійні струми або мінімізувати втрати від гармонік.

Всі потужні перетворювальні схеми складаються з комбінацій основних трифазних груп, а вирази для їх гармонік можуть бути отримані з аналізу спектрів трифазних перетворювачів з фазовим керуванням.

Присутність у мережах конденсаторів, які використовуються для компенсації реактивної потужності, може призвести до місцевих резонансів, що, в свою чергу, можуть викликати надмірне збільшення струму в конденсаторах та вихід їх із ладу [1, 2, 13].

Паралельний резонанс виникає внаслідок високого опору гармонікам струму на резонансній частоті. Так як більшість гармонік є джерелами струму, це викликає збільшення падіння напруги гармонік та їх великі струми в кожній з паралельних гілок. При послідовному резонансі великий струм гармоніки може протікати через конденсатор при відносно невеликій напрузі гармоніки [1, 4, 7].

Існує три різні способи ослаблення гармонік [14, 17, 28, 29, 31]:

- модифікація електроустановки;
- застосування спеціальних пристроїв у системі електроживлення;
- фільтрація.

Щоб обмежити поширення гармонік у розподільчій мережі, існують різні рішення, що повинні враховуватися, особливо при проектуванні нової електроустановки. Гармонійні спотворення напруги збільшуються зі зменшенням потужності короткого замикання. Не враховуючи всіх економічних міркувань, бажано переважно приєднувати нелінійні навантаження як можна ближче до джерела живлення.

При розробці однолінійної схеми нелінійні пристрої повинні бути відокремлені від інших. Ці дві групи пристроїв повинні живитися від окремих систем шин.

Для обмеження вмісту гармонік у мережі можна також використовувати джерело живлення з окремим трансформатором. Недолік даного способу полягає в підвищенні вартості електроустановки.

Різні з'єднання обмоток трансформатора дозволяють усунути певні гармоніки, наприклад:

- застосування трифазного трансформатора з двома вторинними обмотками, одна з яких з'єднана в зірку, а інша – в трикутник, дозволяє зменшити п'яту та сьому гармоніки в первинній обмотці;
- з'єднання типу «трикутник–зірка» зменшує третю гармоніку.

При живленні частотно-керованих приводів встановлення лінійних реакторів дозволяє згладити форму струму. Збільшення повного опору мережі живлення обмежує вміст гармонік струму. Встановлення послідовно з батареями конденсаторів реакторів збільшує повний опір комбінації «реактор–конденсатор» для вищих гармонік. Це усуває резонанс і захищає конденсатори.

Також необхідно вірно вибирати відповідну систему заземлення установки. В системі TN-C по провіднику PEN протікають струми, викликані нерівномірним навантаженням по фазах. У сталому режимі по провіднику PEN протікають струми гармонік. Оскільки він має певний опір, то незначні зміни потенціалу (декілька вольт) між пристроями можуть призвести до збоїв у роботі електронних приладів. Тому система TN-C повинна використовуватися тільки для живлення силових кіл у головній частині мережі та не повинна застосовуватися для живлення чутливих споживачів.

Система TN-S. Дану систему рекомендується застосовувати за наявності в живильній мережі гармонік. Нульовий провідник і захисний провідник (PE) повністю відокремлені один від одного, і тому розподіл потенціалів по мережі є більш рівномірним.

У випадках, коли описані вище превентивні заходи виявляються недостатніми, необхідно обладнати електроустановку системами фільтрації. Існують три типи фільтрів [18, 30]: пасивні, активні, гібридні.

Критерії вибору фільтра наступні [1, 2].

Пасивний фільтр. Забезпечує компенсацію реактивної потужності та ефективну фільтрацію гармонік струму. Такі фільтри також знижують рівень гармонік напруги в електроустановках, в яких форма напруги живлення відрізняється від синусоїдної. Якщо генерована фільтром реактивна потужність велика, то рекомендується відключати встановлений пасивний фільтр в ті періоди часу, коли коефіцієнт навантаження установки є низьким.

Активні компенсатори гармонік. Забезпечують зниження амплітуд гармонік в широкому діапазоні частот і можуть працювати з будь-яким типом навантаження. З іншого боку, потужності даних пристроїв є низькими.

Гібридні фільтри. Поєднують у собі переваги активних і пасивних фільтрів.

В електричних системах фільтри застосовуються перш за все для того, щоб зменшити амплітуду струмів або напруг однієї або декількох фіксованих частот (паралельні фільтри).

Коли ж необхідно уникнути проникнення струмів певної частоти в окремі вузли перетворювальної підстанції або в частину енергетичної системи (як, наприклад, у випадку пульсації сигналів керування), використовується послідовний фільтр, який складається з паралельно ввімкнених конденсатора та котушки індуктивності, що створюють великий опір протіканню струму на обраній частоті. Однак дане рішення не може бути застосовано для обмеження рівня гармонік самого джерела, оскільки генерація гармонік нелінійними елементами підстанції (наприклад, трансформаторами та статичними перетворювачами) є невід'ємною рисою їх нормальної роботи.

Щодо самих статичних перетворювачів, то, зазвичай, в них повинно бути вжито заходів з обмеження проникнення гармонік струму в систему за допомогою створення короткозамкнутого шляху з малим опором для гармонійних частот. В принципі, можливе створення комбінованих послідовних і паралельних фільтрів для мінімізації гармонік струму та напруги, однак для цього необхідні великі витрати [2].

Через складність і велику вартість фільтрів було розроблено декілька інших способів керування гармоніками. До них належать: усунення за допомогою компенсації магнітного потоку, усунення за допомогою генерації додаткових гармонік та усунення за допомогою пульсацій постійного струму.

Найкраще рішення з урахуванням технічних і економічних факторів ґрунтується на результатах ретельного аналізу – аудиту систем енергопостачання середньої та низької напруги на наявність гармонік.

Аудит розподільчої електромережі повинен проводитися інженером-фахівцем, що має необхідну апаратуру та програмне забезпечення для аналізу й моделювання.

Аудит містить такі етапи:

– вимірювання спотворень кривих струму, лінійної та фазної напруги, що виникають через наявність у мережі нелінійних навантажень;

– комп'ютерне моделювання явищ у мережі для з'ясування причин виникнення гармонік та вибору найкращого рішення;

– повний звіт про результати аудиту, що відображає:

- поточні рівні збурень;
- максимальні допустимі рівні збурень (відповідно до МЕК 61000, МЕК 34 тощо);

– пропозиції, що містять рішення з гарантованими рівнями функціонування електроустановки;

– реалізацію обраного рішення з використанням необхідних засобів і ресурсів.

Весь процес аудиту описаний в міжнародному стандарті ISO 9001:2008 [10].

Необхідно зазначити, що промислово більш розвинуті країни зіткнулися з проблемою, що розглядається, значно раніше. Але, незважаючи на це, «панацеї» на сьогоднішній день не існує. Своєрідним «гальмом» є тенденція розгляду питання в площині показників якості електроенергії з традиційною прив'язкою до відносин «енергопостачальна організація–споживач». Дана тенденція характерна для Західної Європи та країн СНД. Значно більш правильним здається північноамериканський підхід, реалізований в рекомендаційному стандарті США IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis (IEEE Brown book) (ANSI) IEEE Std 399-1997. Відмінною рисою такого підходу є переадресація відповідальності на рівень виробників електроустаткування, проєктантів та постачальників технологічних комплексів [11].

Висновки. Аналіз попередніх досліджень та публікацій свідчить про те, що проблема електромагнітної сумісності електрообладнання є актуальною. Розглянуті існуючі методи боротьби не дають можливості повністю усунути вищі гармоніки, водночас впровадження таких методів і заходів часто економічно не вигідне. Тому постає завдання вдосконалення існуючих методів впливу на вищі гармоніки, зокрема покращення стану електромагнітної сумісності за рахунок зменшення спотворень напруги та струму на рівні джерел генерування гармонійних складових.

Список використаної літератури:

1. Гармонические искажения в электрических сетях и их снижение // Техническая коллекция Schneider Electric. – Вып. 22. – 2008. – 32 с. [Електронна версія]. – Режим доступу : <http://www.schneider-electric.ru>.
2. Руководство по устройству электроустановок 2009 // Техническая коллекция Schneider Electric. – Вып. 1. – 2009. – 469 с. [Електронна версія]. – Режим доступу : <http://www.schneider-electric.ru>.
3. Гармоники в электрических системах / Дж. Арриллага и др. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.И. Иванов, В.И. Соколов. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
5. Зайцев Г.З. Компенсация реактивной мощности / Г.З. Зайцев, Б.А. Константинов. – Л. : Энергия, 1976. – 104 с.
6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И.В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
7. Жежеленко И.В. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, Ю.Л. Саенко. – 4-ое изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2005. – 262 с.
8. Фираго Б.И. Теория электропривода / Б.И. Фираго. – Мн. : ЗАО «Техноперспектива», 2004. – 527 с.
9. ГОСТ 13109-97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-87. – Введ. 2000-0101. – Минск : Изд-во стандартов, 1999. – 31 с.
10. ISO 9001:2008 «Система менеджменту якості. Вимоги».

11. Крищенко Г.С. Эпидемия высших гармоник в системах электроснабжения / Г.С. Крищенко, С.А. Шаповалов, ООО «КП ЭНРИ» [Электронна версія]. – Режим доступу : <http://www.kpenri.com.ua/pr02.htm>.
12. Жаркін А.Ф. Електромагнітна сумісність в низьковольтних електричних мережах з нелінійними споживачами : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи»/ А.Ф. Жаркін. – К., 2004. – 32 с.
13. Обследование режимов электропотребления и показателей качества электроэнергии для решения различных проблем электроснабжения. ООО «КП ЭНРИ» [Электронна версія]. – Режим доступу : <http://www.kpenri.com.ua>.
14. Пясецький В. Борьба с резонансом / В.Пясецкий, М.Флорковский, М.Фульчик и др. – АББ Ревю 4/2005.
15. Жаркин А.Ф. Искажение синусоидальности кривых токов и напряжений в низковольтных сетях при различных значениях загрузки питающего трансформатора / А.Ф. Жаркин // Техн. електродинаміка. – 2001. – № 6. – С. 43–45.
16. Жаркин А.Ф. Анализ высших гармоник в низковольтных сетях с помощью традиционных моделей / А.Ф. Жаркин, Н.Н. Капличный // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Електродинаміка : зб. наук. пр. – К. : ІЕД НАН України, 2001. – С. 91–95.
17. Римар С.В. Трансформатори і реактори пристроїв пригнічення вищих гармонік струму : автореф. дис. ... докт. техн. наук : спец. 05.09.01 «Електричні машини і апарати»/ С.В. Римар. — К., 2010. — 36 с.
18. Улучшение качества электроэнергии в сетях промышленных предприятий посредством фильтров высших гармоник тока / И.В. Волков, М.Н. Курильчук, И.В. Пентегов, С.В. Рымар // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. праць. Енергетика. – 2005. – Ч. 2. – Вип. 15. – С. 15–19.
19. Гармонический состав тока, потребляемого из сети, при работе нового источника питания плавильной электропечи на базе трех однофазных выпрямителей / И.В. Пентегов, А.С. Письменный, Е.П. Стемковский и др. // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 3. – С. 42–45.
20. Щербакова П.Г. Развитие методов назначения часткового вносу субъектов электрической системы у погіршення якості електроенергії : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи»/ П.Г. Щербакова. – Донецьк, 2009. – 14 с.
21. Жаркін А.Ф. Дослідження гармонічного складу кривої вхідного струму перетворювача змінної напруги на постійну з корекцією коефіцієнта потужності / А.Ф. Жаркін, А.Г. Пазєєв // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 4. – С. 12–17.
22. Пазєєв А.Г. Аналіз точності визначення коефіцієнта гармонік вхідного струму перетворювача змінної напруги на постійну з корекцією коефіцієнта потужності, пониженою вихідною напругою та безпосереднім зв'язком входу з виходом / А.Г. Пазєєв // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України : зб. наук. праць. – К. : ІЕД НАНУ, 2006. – № 1(13). – С. 109–114.
23. Повышение энергоэффективности и электромагнитной совместимости автономных источников электроэнергии / А.Г. Пазеев, А.Ф. Жаркин, В.Б. Павлов и др. // Праці Ін-ту електродинаміки НАН України : зб. наук. праць. – К. : ІЕД НАНУ, 2008. – Вип. 21. – С. 102–105.
24. Жаркін А.Ф. Експериментальні дослідження однофазного перетворювача змінної напруги на постійну з корекцією коефіцієнту потужності та гальванічним зв'язком входу з виходом / А.Ф. Жаркін, А.Г. Пазєєв // Техн. електродинаміка : тем. випуск "Силовая електроніка та енергоефективність". – 2009. – Ч. 2. – С. 56–60.
25. Ягуп К.В. Подавлення неканонічних гармонік вхідних струмів тягової підстанції : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.22.09 "Електротранспорт"/ К.В. Ягуп. – Харків, 2008. – 20 с.
26. Сендерович Г.А. Математическая модель для исследования несимметричных режимов в трехфазной сети / Г.А. Сендерович, В.Г. Ягуп, Е.В. Ягуп // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – Харків : НТУ "ХПИ", 2005. – № 57. – С. 86–93.
27. Ягуп Е.В. Моделирование электромагнитных процессов выпрямляча тягової підстанції засобами MATLAB / Е.В. Ягуп // Вісник Харківського державного національного університету сільського господарства "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків : ХНТУСГ, 2005. – Вип. 37. – Т. 1. – С. 86–91.
28. Щербак Я.В. Подавление гармоник входного тока управляемого выпрямителя в замкнутой структуре / Я.В. Щербак, Е.В. Ягуп // Технічна електродинаміка. Силовая електроніка та енергоефективність. – 2006. – Ч. 4. – С. 61–64.
29. Ягуп Е.В. Подавление высших гармоник первичных токов выпрямителя методом поканальной коррекции управляющих импульсов / Е.В. Ягуп, Я.В. Щербак // Електромашинобудування та

- електрообладнання. Проблеми автоматизованого електропривода. – Одеса : Техніка, 2006. – Вип. 66. – С. 298–301.
30. *Божко В.В.* Демпфований вхідний фільтр вольтодобатка на двоопераційних тиристорах дванадцятипульсних випрямлячів тягових перетворювальних агрегатів метрополітену / *В.В. Божко, М.В. Хворост* // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків : УкрДАЗТ, 2006. – № 3. – С. 41–45.
31. Энергоэффективный преобразовательный агрегат с функциями фильтрации гармоник выходного напряжения тяговой подстанции системы электроснабжения постоянного тока напряжения 3 кВ / *В.М. Самсонкин, М.В. Панасенко, Ю.П. Гончаров и др.* // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. В.Лазаряна. – Дніпропетровськ : ДНУЗТ, 2008. – Вип. 20. – С. 66–72.
32. *Льонг Т.Ф.* Компенсация реактивной и искажающей мощностей в судовых и корабельных электроэнергетических системах : автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.09.01 "Электромеханика и электрические аппараты" / *Т.Ф. Льонг.* – М., 2009. – 20 с.

БУШМА Сергій Валерійович – асистент кафедри електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології Житомирського агроекологічного університету.

Наукові інтереси:

– теоретичні основи електротехніки;

– математичне та комп'ютерне моделювання процесів в електричних колах.

Тел.: (067) 265–76–13.

E-mail: serg_b80@mail.ru.

Стаття надійшла до редакції 06.02.2013