

УДК 621.331

СИЧЕНКО В. Г., к.т.н., ст.н.с,  
ЗУБЕНКО В. А., ст. викладач,  
БОСИЙ Д. О., ст. викладач (ДНУЗТ)

## Дослідження електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання постійного струму: проблеми, технічні засоби та реалізація

*Представив д.т.н., професор Щербак Я.В.*

### Вступ

Експериментальні дослідження є основним джерелом інформації для вивчення електромагнітних процесів у системі тягового електропостачання (СТЕ) електрифікованих залізниць постійного струму та для побудови математичних моделей процесів перетворення і споживання електричної енергії, електромагнітних процесів і завад, а також конкретних електричних пристроїв [1, 2]. Побудована таким чином математична модель дозволяє проводити варіантні теоретичні дослідження розроблюваних технічних заходів та засобів та виявляти можливі рівні та ступінь електромагнітних впливів на суміжні низькоенергетичні пристрої. Модель електромагнітної сумісності (ЕМС) системи тягового електропостачання має імовірнісний характер, а параметри енергообмінних процесів є статистичними характеристиками. Звідси, дослідження ЕМС базуються на застосуванні статистичних методів обробки та аналізу експериментальних даних, отриманих як в результаті фізичного експерименту, так і в результаті математичного моделювання.

Відомо [3], що при вивченні технічних задач і фізичних явищ точні (у сенсі процедури рішення) результати, отримані від якого-небудь розрахункового пристрою, не гарантують збігу з дійсними. Через це необхідно зіставляти результати аналітичного дослідження з результатами експерименту. Проте, при сучасних складних системах, які характеризуються чисельними впливаючими чинниками, у тому числі і задачах електромагнітної сумісності, пряме зіставлення одиничного розрахунку з одиничним дослідом часто може дати абсолютно нехарактерні результати.

У таких технічних системах, в залежності від поєднань цих чинників і випадкових умов, можуть отримуватись істотно різні результати. Тому неспівпа-

дання результатів одиничного розрахунку і одиничного досліду в окремих випадках не може з упевненістю характеризувати неправильність теорії або помилковість розрахунків, і, аналогічно, не дає упевненості і одиничний збіг [3].

На практиці, для доведення реальної строгості технічного дослідження зіставлення розрахунку і результату експерименту для будь-якої складної системи має проводитися з урахуванням можливих випадкових варіацій в параметрах, особливо у випадках, наближених до якого-небудь екстремального стану, наприклад, перевірки рівнів гармонійних складових у вимушеному режимі роботи СТЕ. Таке зіставлення повинне проводитися по спеціально розробленій методиці, що враховує або варіацію параметрів, отриманих в результаті експериментальних досліджень реальної системи, або варіацію параметрів, отриманих при розрахунках, причому результати розрахунків і дослідів необхідно подавати і зіставляти в критерійній формі, записаній відповідно до теорії подібності [4].

Відомо, що будь-яке математичне моделювання зумовлює ту або іншу ступінь ідеалізації досліджуваного процесу. Тому оцінку достовірності результатів, отриманих при математичному моделюванні задач електромагнітної сумісності СТЕ, необхідно вести в порівнянні теоретичних і експериментальних даних. Причому вивчення перешкод, що змінюються під впливом численних випадкових чинників, обов'язково вимагає статистичних методів.

### Основна частина

Модель електромагнітної сумісності СТЕ з суміжними низькоенергетичними пристроями в загальному вигляді має ймовірнісний характер, а параметри процесу є статистичними характеристиками. До таких

параметрів необхідно віднести [2]: по-перше, гармонійний склад випрямленої напруги і тягового струму при різних режимах роботи перетворювачів тягових підстанцій і електрорухомого складу; гармонійний склад струмів, що протікають по проводах трифазних ліній електропостачання автоблокування (АБ) і подовжного електропостачання (ПЕ); характеристики несинусоїдальних і несиметричних струмів і напруг; по-друге, струморозподіл гармонійних в тяговій мережі, рейкових ланцюгах і інших впливаючих лініях; по-третє, параметри передачі енергії перешкоди впливаючого об'єкта в тракт прийому інформації суміжної системи.

Відомо, що величини гармонік напруг і струмів в тяговій мережі і подовжніх лініях електропостачання залежать від схемних рішень і режимів роботи перетворювальних агрегатів, ступеню спотворення напруги на шинах 10 кВ, яка обумовлюється параметрами системи зовнішнього електропостачання. Крім того, дані лінії є лініями з розподіленими параметрами. Тому рівень перешкод сильно залежить від параметрів землі, погодних умов, сезонних змін, ступеню забрудненості і конструктивного виконання самих багатопровідних ліній. По-друге, ступінь дії заважаючої перешкоди, наприклад на систему АЛСН залежить не лише від амплітудно-частотного спектру гармонійних струму в рейкових ланцюгах, але і від процесу проникнення енергії перешкоди з рейкового ланцюга в тракт прийому інформації локомотивної сигналізації. Сказане стосується також і взаємодії інших підсистем, суміжних з електричною тягою.

Вирішення будь-яких завдань із застосуванням теорії ймовірності в тих випадках, коли використовується їх статистичне визначення, неможливе без отримання відповідного статистичного матеріалу, що базується на великій кількості дослідів або спостережень. При цьому виникають завдання, пов'язані з правильною обробкою статистичних матеріалів і доданням ним форми, зручної для подальшого аналізу.

Сукупність спостережуваних значень величин вказаних вище параметрів є первинним статистичним матеріалом і називається статистичним, або часовим рядом [5]. Часовий ряд представляє собою впорядковану послідовність спостережень у визначені моменти часу. Природа ряду та структура викликаючого процесу визначають порядок вказаної послідовності. Зазвичай, часові ряди формуються на базі дискретної послідовності спостережень через визначені регулярні відрізки часу. Результати таких вимірювань можна подати у вигляді безперервної змінної (випадкової функції), яка підпорядковується якомусь ймовірнісному закону. Реалізації випадкового процесу можуть включати в себе і помилки спостережень. Необхідно зазначити, що в багатьох випадках часові ряди одночасно з флуктуаціями та нерегулярностями (викидами) мають деякі тенденції зміни (тренд), які можуть опису-

ватись різними моделями. Найбільш поширеним підходом до виділення тренду є процедури згладжування: моделі ковзного середнього та процесів авторегресії.

Для характеристики випадкових величин та їх опису застосовуються закони розподілу, які можуть бути задані у різних формах [6]. Знаючи закон розподілу випадкової величини, можна визначити його статистичні характеристики. Зазначимо, що і підбір закону розподілу досліджуваної змінної числового ряду, і визначення статистичних характеристик проводяться в умовах обмеженості вибірки, оскільки великий обсяг вимірювань у реальних умовах фактично недосяжний [7]. При обробці такого статистичного матеріалу є доцільним вирішити питання про те, як підібрати для отриманого статистичного ряду теоретичну криву розподілу, яка відбиває лише істотні риси статистичного матеріалу, а не випадковості, пов'язані з недостатнім обсягом експериментальних даних. В багатьох випадках експериментальні дані добре описуються нормальним законом розподілу ймовірності, але його також зручно використовувати для випадкових величин, не розподілених по нормальному закону, оскільки:

- величину можна перетворити таким чином, щоби вона мала нормальний розподіл;
- розподіл суми випадкових величин наближається до нормального при збільшенні до  $\infty$  обсягу вибірки;
- похибка, пов'язана з застосуванням статистичних критеріїв, базованих на припущенні нормального розподілу експериментальних даних, незначна.

Основні статистичні характеристики часового ряду визначаються [5, 6, 8]: математичним очікуванням випадкової величини, дисперсією випадкової величини, автокореляційною функцією та ін.

Такі статистичні характеристики відносяться до інтервальних оцінок, до яких висуваються наступні вимоги: незмішуваність, спроможність, ефективність та достатність. Інтервальне оцінювання тісно зв'язане з перевіркою гіпотез. На сьогодні існує багато різноманітних методів оцінювання параметрів [9], але найбільш часто через простоту застосовуються наступні критерії: критерій згоди Колмогорова-Смірнова та критерій згоди  $\chi^2$  Пірсона.

Однією з важливих проблем статистичного аналізу часових рядів є визначення та виключення аномальних даних (викидів). Спотворення вимірювання може бути викликане або неправильною роботою реєструючих пристроїв внаслідок неконтрольованої зміни умов функціонування, або ж появою дійсного екстремального значення контрольованої випадкової величини, яке виникає дуже рідко [7]. Для оцінки значимості викидів застосовуються спеціальні статистичні процедури, які застосовують для:

- вирівнювання спостережень перед аналізом (усунення викидів);
- забезпечення впевненості про присутність аномальних даних, що повинне привести до перегляду процедури отримання значень ряду;
- виділення спостережень, які можуть представляти інтерес саме через свою екстремальність.

Необхідно також звернути увагу, що процес заміни початкового аналогового сигналу цифровим [10, 11] відбувається через рівні проміжки часу  $\Delta t$ . Згідно теореми Котельникова (Найквіста) мінімальне число відліків, необхідне для опису реалізації часового ряду  $T$  при ширині спектру  $f$ , визначається як  $N = 2fT$ . Тому, при постійному лазі по часу, максимальний інтервал дискретності  $\Delta t = 1/2f$ . При цьому, якщо вимірювання проводяться у точках, віддалених одна від одної на  $\Delta t_1 < 1/2f$ , ми отримуємо великий обсяг корельованих даних. Якщо ж вимірювання проводити в точках  $\Delta t_2 > 1/2f$ , може виникати явище переплутування низько- та високочастотних складових процесу, яке називається маскуванням (підміною) частот [7, 8]. Гранична частота  $f_{\Gamma} = 1/2\Delta t$  називається частотою згортки. Для позбавлення помилок маскування частот необхідно ще в аналоговому сигналі усунути частину інформації, яка може утримувати частоти, більші ніж  $f_{\Gamma}$ . Окрім правильного вибору інтервалу дискретизації  $\Delta t$ , важливим питанням є і довжина періоду реалізації  $T$ . Вона повинна бути достатньою для отримання достовірних інтервальних оцінок.

З метою експериментального дослідження електромагнітного впливу мережі тягового електропостачання на існуючі лінії зв'язку і пристрої залізничної автоматики, а також для визначення ступеня такої дії необхідно розробляти спеціальні методики вимірювань, які розповсюджувалися б на підсистеми постійного і змінного струму, електрорухомий склад, рейкові ланцюги, пристрої АБ і лінії зв'язку. Для визначення максимальних значень вищих гармонійних струму і напруги впливаючих ліній (мережах тягового електропостачання, високовольтних лініях електропередач, електрорухомому складі), при яких ще забезпечується надійна робота суміжних ліній (рейкових ланцюгів, пристроїв залізничної автоматики і зв'язку), зазвичай проводять як роздільні, так і сумісні вимірювання.

Основними проблемами, які підлягають вирішенню при проведенні тривалих експериментальних досліджень, є необхідність забезпечення зберігання великого масиву даних, їх синхронізація, методика обробки та аналізу, а також розділення постійної та змінних складових в колах електричної тяги постійного струму. Для експериментальних досліджень ЕМС

СТЕ на кафедрі електропостачання залізниць ДНУЗТ (ДІП) розроблена методика вимірювань, згідно якої вимірювання можуть проводитись одночасно та синхронно на всіх присіданнях перетворення електричної енергії та колах її споживання. Апаратна реалізація методики вимірювань ЕМС здійснюється з застосуванням сучасних приладів та засобів обробки інформації у реальному часі.

Методика базується на електромагнітних безконтактних записках кривих струмів і напруги (реалізованих на сучасних датчиках з оптичною розв'язкою), тобто заснована на однозначному зв'язку струму і створюваного їм в навколишньому просторі магнітного поля. Дослідження рівнів електромагнітних завад здійснюється, як правило, у такій послідовності: в умовах експлуатації реально діючої ділянки STE або під час експериментальної поїздки на електрорухомому складі записуються значення струмів і напруг у досліджуваних колах, після чого проводиться їх аналіз у лабораторних умовах з застосуванням сучасної комп'ютерної техніки та програмного забезпечення. Це дозволяє не лише визначити рівні і тривалість окремих гармонік, але і обґрунтувати ступінь впливу сильноточкових ланцюгів на суміжні пристрої, а також розділити ступінь впливу між окремими джерелами завад.

Типова схема апаратної реалізації проведення вимірювань ЕМС STE наведена на рис. 1.

Сучасні засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) дозволяють реалізовувати вимірювальні алгоритми високого рівня складності з відповідним збільшенням вимірювальних можливостей та високою точністю вимірювань, при цьому частина вимірювальної процедури базується на реалізації її програмними засобами. В даному випадку основне рівняння вимірювань має наступний вигляд [10]:

$$\lambda^* = \gamma \cdot R_1 \cdot K \cdot R_2,$$

де  $\lambda^*$  – результат вимірювань (одне із значень часового ряду);

$\gamma$  – вхідна дія (первинний сигнал);

$R_1$  – перетворення, виконуване в аналоговій формі;

$R_2$  – перетворення, виконуване в цифровій формі;

$K$  – аналого-цифрове перетворення.

Для контролю та фіксації якості електромагнітних процесів у колах змінного струму основним засобом вимірювальної техніки, який застосовується, є портативні аналізатори типу EDL-175xg чи PNA-296 виробництва фірми SATEC, на базі приладу для вимірювання показників якості та обліку електричної енергії PM175. Основні технічні характеристики наведені в табл. 1.

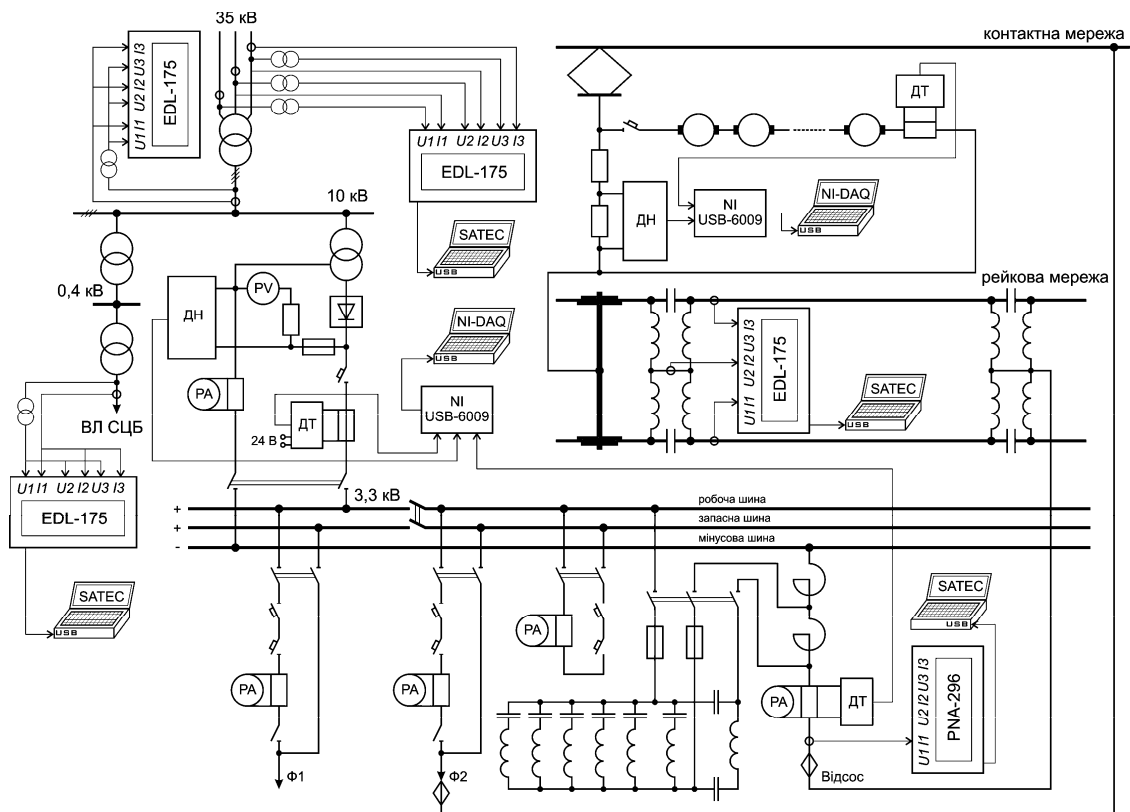


Рисунок 1 – Типова схема проведення вимірювань ЕМС на тяговій підстанції

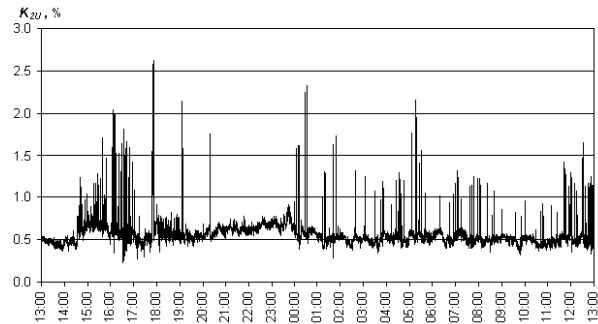
Таблиця 1 – Основні технічні характеристики приладу РМ175

№ п/п	Назви величин	Позначення	Параметри
1	Напруга, струм	$U, I$	фазні / лінійні
2	Потужність	$P, Q, S, \lambda$	активна, реактивна, повна, коефіцієнт потужності
3	Частота	$f$	
4	Електроенергія	$W_{сп}, W_{ген}$	спожита / генерована
5	Коефіцієнти несиметрії напруги	$K_{0U}, K_{2U}$	за нульової / зворотною послідовністю
6	Коефіцієнти несинусоїдності	$K_U, K_I$	за напругою / струмом
7	Коефіцієнти гармонік	$K_{U(n)}, K_{I(n)}$	струму / напруги
8	Провали, коливання напруги	$\delta U, \delta U_t$	
9	Доза флікера	$P_{St}, P_{Lt}$	короткочасна / тривала
10	Відповідність показників стандарту		EN50160 / ГОСТ 13109-97
11	Реєстрація осцилограм		до 2560 періодів
12	Дискретизація осцилограми		128 точок / період
13	Об'єм енергонезалежної пам'яті		1 МБ
14	Час спрацьовування уставок		0,15 с
15	Клас точності		0,2 S (IEC 60687)

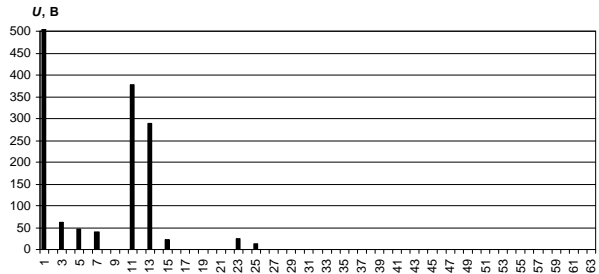
На сьогодні відома ціла низка й інших ЗВТ аналогового класу, але вибір SATEC був обумовлений не тільки кращими технічними можливостями та ціною, а й тим, що цей ЗВТ був внесений у державний реєстр України одним з перших та має найбільший міжпові-

рочний інтервал.

В якості прикладу на рис. 2 показані результати вимірювань якості електричної енергії в лінії живлення автоблокування.



а) Коefіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності лінії АБ



б) Спектр напруги лінії АБ 10 кВ

Рисунок 2 – Вибіркові результати вимірювань якості електричної енергії в лінії АБ

## Висновки

Для контролю якості та фіксації електромагнітних процесів у колах постійного струму були застосовані типові, а також розроблені на кафедрі первинні вимірювальні перетворювачі струму і напруги, здатні працювати під високим потенціалом з передачею інформації по оптичному каналу, модулі збору

інформації NI USB6009, які дозволяють вимірювати до 8 аналогових сигналів з дозволом 14 біт і частотою дискретизації 48 кГц та програмне забезпечення NI-DAQ, призначене для збору і обробки вимірюваної інформації [12]. В якості прикладу на рис. 3 показано робоче вікно програми з результатами запису струму фідера і напруги на шинах тягової підстанції і в контактній мережі при КЗ.

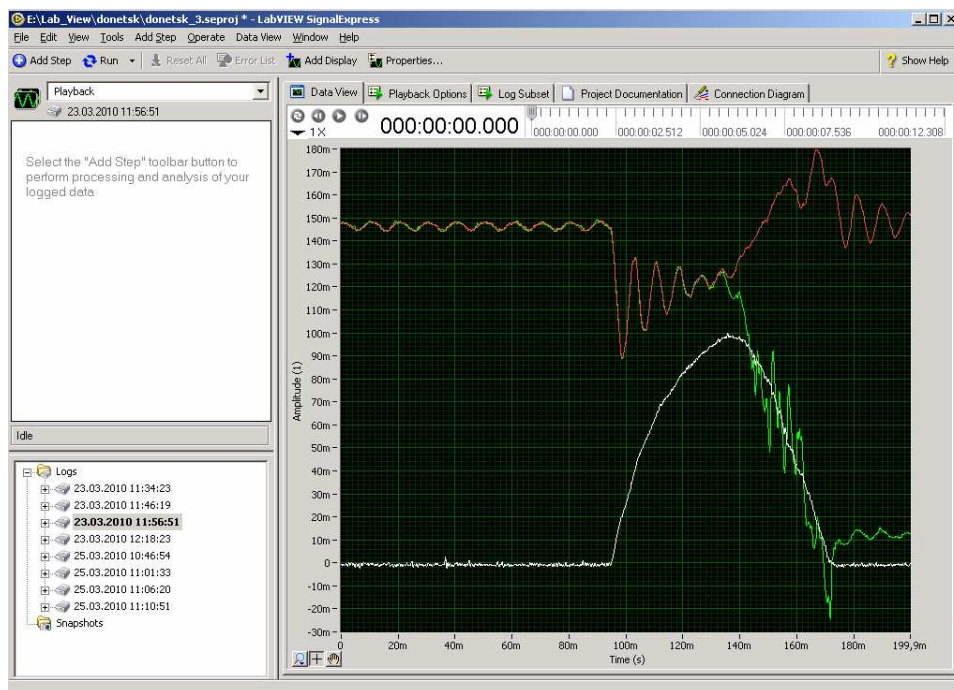


Рисунок 3 – Графіки струму та напруги фідера при короткому замиканні

## Література

## Резюме

1. *Советов Б. Я.*, Моделирование систем [Текст] / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
2. *Бадер М. П.* Электромагнитная совместимость [Текст] / М. П. Бадер. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.
3. *Электрические системы*. Математические задачи электроэнергетики [Текст] / под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1981. – 288 с.
4. *Веников В.А.* Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) [Текст] / В.А. Веников, Г. В. Веников. – М.: Высшая школа, 1984. – 439 с.
5. *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов [Текст] / Т. Андерсон. – М.: Мир, 1976. – 760 с.
6. *Пугачев, В. С.* Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. [Текст] / В.С. Пугачев. – М.: ГИФМЛ, 1960.– 884 с.
7. *Химмельблау Д.* Анализ процессов статистическими методами [Текст] / Д. Химмельблау. – М.: Мир, 1973. – 960 с.
8. *Бендат Дж.*, Прикладной анализ случайных данных [Текст] / Дж. Бендат, А. Пирсол. – М.: Мир, 1989. – 540 с.
9. *Справочник по теории вероятностей и математической статистике* [Текст] / В. С. Королук, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин. – М.: Наука, 1985. – 640 с.
10. *Цветков Э. И.* Процессорные измерительные средства [Текст] / Э. И. Цветков. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд., 1989. – 224 с.
11. *Мирский Г. Я.* Аппаратурное определение характеристик случайных процессов [Текст] / Г. Я. Мирский. – М.: Энергия, 1972. – 456 с.
12. *Зубенко В.А.* Опыт мониторинга сглаживающих фильтров тяговых подстанций постоянного тока с применением современных аппаратно-программных средств фирмы National Instruments [Текст] / В.А. Зубенко, В.Г. Сыченко // Материалы II Международной научно-практической конференции “Электромагнитная совместимость и безопасность на железнодорожном транспорте”. – Днепропетровск, 2009. – С. 29-30

Досліджено електромагнітні процеси у системі електропостачання, яка працює на постійному струмі. Розглянуто технічні засоби для реалізації таких систем

Исследованы электромагнитные процессы в системе электроснабжения, которая функционирует на постоянном токе. Рассмотрены технические средства для реализации таких систем

The electromagnetic processes in the electric power supply system, which operates at a constant current, are investigated. Technical means for such system are described

**Ключові слова:** електропостачання, тяговий струм, електромагнітна сумісність

*Поступила 18.01.2011 г.*