

УДК 621.311.1.018

Б. І. Мокін, акад. НАПН України, д-р. техн. наук, проф.;
О. А. Паянок, канд. техн. наук; С. М. Бабій, канд. техн. наук

АВТОМАТИЧНЕ ФІЛЬТРУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК НА ШИНАХ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ РЕАКТОРІВ З ПІДМАГНІЧУВАННЯМ

Розроблено математичну модель закону автоматичного фільтрування вищих гармонік напруги тягової підстанції електротранспорту із використанням існуючого підходу в застосуванні реакторів з підмагнічуванням, на базі запропонованої математичної моделі синтезовано структуру пристрою, який дозволяє значно покращити якість електроенергії та дає позитивний ефект в разі його застосування на тягових підстанціях міського електричного транспорту.

Вступ

Характерна риса сучасних систем електропостачання, в тому числі і системи електропостачання наземного міського електротранспорту — наявність у них різних типів перетворювального обладнання та нелінійних нестационарних елементів [1, 2].

Несинусоїдальні режими, які виникають в результаті роботи тягових підстанцій міського електричного транспорту, обумовлюють появу вищих гармонік та є їх джерелами [3]. Наявність в електричних мережах міського електричного транспорту вищих гармонік як по стороні змінного, так і по стороні постійного струму зумовлює появу низки небажаних явищ, серед яких:

- погіршення експлуатаційних показників засобів рухомого складу;
- збої в роботі електронного обладнання та пристроїв релейного захисту та автоматики;
- зниження експлуатаційного терміну служби електрообладнання;
- збільшення додаткових втрат в мережах та елементах електрообладнання тощо [4, 5].

Результати аналізу доступних літературних джерел свідчать про те, що пошуком рішень проблеми мінімізації вищих гармонік займається досить широке коло науковців, проте недостатньо дослідженими в галузі електропостачання міського електричного транспорту залишаються питання впливу на форму кривої напруги змінного струму системи електропостачання гармонік, які виникають на стороні постійного струму внаслідок зміни в часі кількості засобів електротранспорту, під'єднаних до секцій контактної мережі постійного струму.

Відомі на сьогодні засоби фільтрування вищих гармонік не дозволяють в повній мірі забезпечити належну якість електропостачання міського електричного транспорту.

Всі вищенаведені міркування та обставини обумовлюють беззаперечну актуальність питання, яке розглядається в статті.

Постановка задачі дослідження

Задачею роботи є розробка математичної моделі закону автоматичного фільтрування вищих гармонік напруги тягової підстанції електротранспорту та синтез на базі цієї моделі структурної схеми автоматичного регулятора спектра напруги з використанням реакторів з підмагнічуванням. Практична реалізація такого пристрою в перспективі дозволить суттєво покращити якість електропостачання міського електричного транспорту шляхом одночасної компенсації декількох превалюючих вищих гармонік спектра напруги контактної мережі.

Матеріали і результати дослідження

Складність та різноманітність режимів роботи системи електропостачання міського електричного транспорту показують, що залучення традиційних підходів до їх модернізації та вдо-

сконалення з метою підвищення їх енергоефективності, а також створення таких систем не дозволяють отримати оптимальні структури та оптимальні закони їх функціонування.

Комплексне розв'язання задачі зменшення впливу на форму кривої напруги змінного струму системи електропостачання гармонік, які виникають на стороні постійного струму, і покращення якості електричної енергії полягає у застосуванні багатофункціональних пристроїв, які забезпечуватимуть підвищення стабільності та ефективності електропостачання засобів рухомого складу міського електричного транспорту. Прикладом таких багатофункціональних пристроїв є силові резонансні фільтри вищих гармонік, які являють собою послідовне з'єднання індуктивного та ємнісного опорів, налагоджених в резонанс на фільтровану гармоніку [6]. За певних умов такі фільтри можуть використовуватись для шунтування струмів вищих гармонік.

Розглядаючи це питання в площині підвищення якості електропостачання тягових підстанцій електротранспорту міста, науковий пошук слід зосередити зокрема на класі автоматично налагоджуваних фільтрів, оскільки будь-який пасивний фільтр придатний тільки для гармоніки тієї частоти, для якої він був спроектований, тому для інших частот будуть потрібні індивідуальні фільтри.

В результаті роботи схеми випрямлення «дві зворотні зірки із роздільною котушкою» тягових підстанцій електротранспорту міста її миттєва випрямлена напруга має пульсуючий характер із періодичністю, яка залежить від кількості пульсацій p за період. Крива випрямленої напруги містить дві складові: постійну та змінну [6].

В результаті проведених досліджень, описаних у роботах [7, 8], отримано докази того, що випрямлена напруга на виході тягових підстанцій міського електричного транспорту містить змінну складову із гармоніками частотою 100, 200, 300, 600, 900 та 1200 Гц. Причому всі ці гармоніки повторювались у довільному порядку. А враховуючи режими, які характеризувались високою густиною руху ЗРС, в спектрі напруги проявлялись гармонічні складові вищих порядків із частотами 12, 14, 16 та 20 кГц.

Для уникнення впливу цих гармонік на мережу постійного та змінного струму доцільним є використання згладжувальних фільтрів, призначення яких полягає в зменшенні пульсацій вихідної напруги після фільтра в порівнянні з напругою до фільтра. Фільтр повинен максимально зменшувати амплітуди гармонік, на які він налагоджений, але при цьому мінімально впливати на рівень постійної складової випрямленої напруги. Враховуючи такі міркування фільтр можна виконати із використанням реактивних елементів L та C .

Враховуючи вищесформовані завдання, які покладаються на засіб фільтрування, використання пасивних силових фільтрів є просто недоцільним через неможливість усунення впливу одночасно декількох вищих гармонік спектра.

Цього недоліку позбавлені автоматичні регулятори форми кривої напруги, які можуть здійснювати компенсацію одночасно декількох вищих гармонік шляхом автоматичної зміни значення індуктивності або автоматичного вимкнення конденсатора. Саме тому оптимальним рішенням є використання автоматичного фільтра гармонік.

З метою компенсації одночасно декількох вищих гармонік адаптивна система автоматичного фільтрування гармонічних складових розв'язує одну із найважливіших задач визначення амплітуд превалюючих гармонік A_i та їх частот $\omega_{\text{ФГ}}^{(i)}$, яка в математичному записі має вигляд

$$U(t) = \psi_1(A_0, A_2, \dots, A_k, t);$$

$$A_k = \sup_{\omega_{\text{ФГ}}^{(i)} \leftrightarrow A_i} (A_0, A_2, \dots, A_n), \quad k = 2, \dots, n, \quad \text{поки } K_U > K_{U \text{ доп.}}, \quad (1)$$

$$k = \overline{k, (k-i)}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, n,$$

де $U(t)$ — напруга у вузлі мережі, що розглядається; A_1, A_2, \dots, A_n — амплітудний спектр напруги мережі; A_k — амплітуда превалюючої гармоніки; K_U — коефіцієнт спотворення форми кривої напруги.

Математичний запис $k = \overline{k, (k-i)}$, $i = 0, 1, 2, \dots, n$ свідчить про можливість поліпшення K_U напруги мережі через компенсації у випадку необхідності, всіх існуючих гармонік спектру напруги.

З урахуванням вищевказаної умови математична модель має вигляд (2), в якій взяті такі позначення: $\omega_{\Phi\Gamma}^{(k)}$ — частота превалюючої гармоніки; K_U — значення реального коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги мережі; $K_{U_{\text{доп}}}$ — значення коефіцієнта спотворення форми кривої напруги; $\omega_{\text{РФ}}^{(k)}$ — резонансна частота фільтра для k -ї гармоніки; $\phi_1(LC)$ — резонансна характеристика фільтра; $\phi_3(\Delta\omega_*^{(k)})$ — характеристика перетворювача «частота-постійний струм»; $I_{\Phi\Gamma}$ — струм в фільтрі, що виникає при його резонансному налагодженні; $I_{\text{Д}}$ — струм в елементах LC-фільтра, допустимий по умовам їх неруйнування; K_{ω} — коефіцієнт пропорційності; $I_n^{(k)}$ — значення струму підмагнічування, що формується у відповідності з функцією ϕ_2 в функції розлагодження фільтра,

$$\begin{aligned} \omega_{\text{РФ}}^{(k)} &\Leftrightarrow \omega_{\Phi\Gamma}^{(k)}; \quad \omega_{\text{РФ}}^{(k)} = \phi_1(L^{(k)}, C); \\ I_n^{(k)} &= \phi_2(L^{(k)}); \quad L^{(k)} = \phi_3(\Delta\omega_*^{(k)}); \\ \Delta\omega_*^{(k)} &= \omega_{\Phi\Gamma}^{(k)} - \omega_{\text{РФ}}^{(k)} + \Delta\omega(\Delta I_{\text{Д}}); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta\omega(\Delta I_{\text{Д}}) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } I_{\Phi\Gamma}^{(k)} < I_{\text{Д}}; \\ K_{\omega} \cdot \Delta I_{\Phi\Gamma}^{(k)}, & \text{якщо } I_{\Phi\Gamma}^{(k)} > I_{\text{Д}}; \end{cases}$$

$$\Delta I_{\text{Д}} = I_{\Phi\Gamma}^{(k)} - I_{\text{Д}}.$$

За критерій оцінки якості електроенергії у цій математичній моделі використовується коефіцієнт спотворення форми кривої напруги K_U . Тобто, пошук та виділення зі спектру напруги превалюючих вищих гармонік виконується в разі виконання умови $K_U > K_{U_{\text{доп}}}$.

У відповідності до ГОСТ 13109-97 [9] нормоване допустиме значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги становить 8 %. Проте для аналізу рівня спотворення кривої випрямленої напруги доцільно використовувати коефіцієнт спотворення форми кривої напруги K_U у вигляді

$$K_U = \frac{1}{A_0} \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} > 0,08, \quad (3)$$

де A_0 — амплітуда постійної складової випрямленої напруги мережі; A_k — амплітуди гармонік, присутніх в гармонічному спектрі напруги; $K_{U_{\text{доп}}} = 8\%$ — нормоване допустиме значення коефіцієнта спотворення форми кривої напруги.

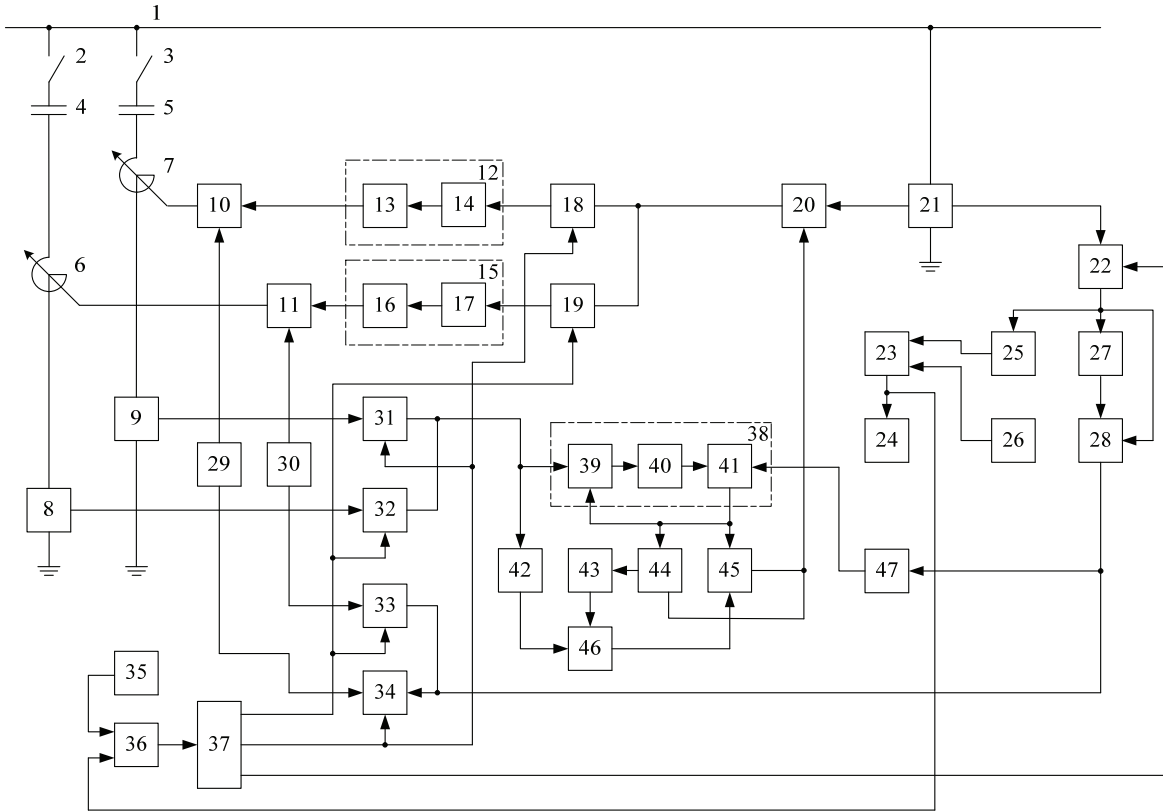
Запропонована математична модель (1)–(3) лежить в основі роботи класу пристроїв, які в своїй силовій частині передбачають застосування реакторів з підмагнічуванням, пошук резонансу в яких відбувається шляхом підмагнічування котушки реактора постійним струмом, завдяки чому відбувається зміна індуктивності $L^{(k)}$ по закону ϕ_2 з метою отримання значення резонансної характеристики ϕ_3 , яка мінімізує розлагодження $\Delta\omega_*^k$; індекс k в позначеннях інших параметрів вказує на те, що вони характеризують фільтр по відношенню до k -ї гармоніки.

Формування в функції розлагодження фільтра складової $\Delta\omega(\Delta I_{\text{Д}})$ залежить від умов роботи фільтра вищих гармонік, тобто визначається допустимими струмами, які протікають в силових елементах фільтруючого пристрою.

У відповідності із розробленою математичною моделлю здійснено синтез практичної реалізації структури автоматично налагоджуваного фільтра.

Синтезований пристрій розрахований для роботи в умовах присутності в спектрі сигналу напруги декількох превалюючих гармонічних складових, які суттєво спотворюють форму напруги мережі. А тому, в силовій частині адаптивної системи керування фільтром передбачено дві регульовані індуктивності, кожна з яких компенсує одну вищу гармоніку з «плаваючою» частотою.

Функціональна схема синтезованого пристрою показана на рисунку.



Функціональна схема автоматичного регулятора вищих гармонік напруги тягової підстанції:

- 1 — електрична мережа; 2, 3 — вимикачі; 4, 5 — ємності; 6, 7 — регульовані індуктивності; 8, 9 — сенсори струму; 10, 11 — підсумовуючий блоки; 12, 15 — блоки зміни індуктивності фільтра, що складаються з інтеграторів 14, 17 та підсилювачів 13, 16; 18, 19 — блоки пам'яті; 20 — фазовий дискримінатор; 21 — сенсор напруги; 22 — аналізатор спектра; 23 — блок порівняння; 24 — індикатор; 25 — блок обчислення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ; 26 — задавач нормованого допустимого значення $K_{U\text{доп}}$; 27 — блок виділення амплітуди превалюючої гармоніки; 28 — блок визначення та запам'ятовування частоти превалюючої гармоніки; 29, 30 — перетворювачі «частота—постійний струм»; 31, 32 — ключі; 33, 34 — блоки пам'яті; 35 — генератор тактових імпульсів; 36 — елемент «I»; 37 — розподільовач тактів; 38 — блок синхронізації, що складається з фазового дискримінатора 39, інтегратора 40 та керованого генератора 41; 42 — релейні елемент; 43 — елемент пам'яті; 44 — елемент порівняння; 45 — елемент зсуву фази; 46 — елемент помноження; 47 — перетворювач «частота—напруга постійного струму»

Синтезований пристрій в якості критерію оцінки якості електроенергії використовує коефіцієнт спотворення форми кривої напруги [9] у формі (3).

Робота такого пристрою полягає у такому. Аналізатор 22 спектра розкладає сигнал, який надходить від сенсора 21 напруги мережі, в ряд Фур'є із частотами, які є кратними основній частоті струму в мережі, рівній 50 Гц. Отриманий на виході аналізатора 22 спектр напруги мережі надходить на входи блока 25 обчислення коефіцієнта спотворення форми кривої напруги та блока 27 виділення амплітуд превалюючих вищих гармонік. В блоці 25 на основі отриманих значень амплітуд вищих гармонік спектра напруги обчислюється значення реального K_U мережі та порівнюється із нормованим гранично допустимим значенням цього коефіцієнта від задавача 26.

В блоці 27 попарним порівнянням амплітуд визначається амплітуда превалюючої вищої гармоніки. В блоці 28 визначення та запам'ятовування частоти превалюючої вищої гармоніки за сигналом керування з блока 27 фіксується частота превалюючої гармонічної складової.

У випадку, коли гармонічний спектр напруги знаходиться в межах норми та коефіцієнт спотворення форми кривої напруги не перевищує допустимого значення, пристрій перебуває в стані очікування, постійно аналізуючи спектр напруги мережі. В разі перевищення окремими гармоніками напруги контактної мережі нормованих величин коефіцієнт спотворення форми кривої напруги досягає недопустимих значень, про що свідчать покази блоку 24 індикації стану. Елемент порівняння формує сигнал про перевищення K_U встановленого значення, який надходить на елемент «І», тим самим дозволяючи проходження тактових імпульсів від генератора 35 тактових імпульсів на вхід розподільвача тактів 37. Блок 37 формує сигнал керування, який надходить на один з входів аналізатора 22 спектра, що свідчить про готовність блока 37 до роботи та необхідність оновлення спектра напруги мережі.

В блоках 22, 27 і 28 визначається амплітуда превалюючої вищої гармоніки та фіксується її частота, після чого отриманий сигнал надходить в блок пам'яті 34. Вихідний сигнал блока пам'яті, який містить інформацію про частоту превалюючої вищої гармоніки, за сигналом керування розподільвача тактів 37 перетворюється блоком 29 в сигнал постійного струму. Сигнал струму надходить на обмотку підмагнічування індуктивності 7 першого фільтра. В результаті параметри індуктивності змінюються таким чином, щоб фільтр виявився налагодженим в резонанс на частоту виділеної превалюючої гармоніки.

Одночасно вихідний сигнал блока 28 перетворюється перетворювачем 47 в напругу, яка надходить на генератор 38 синхронізації і переналагоджує параметри генератора, а значить і весь блок синхронізації на частоту превалюючої вищої гармоніки.

Після компенсації виділеної вищої гармоніки блок обчислення коефіцієнта спотворення форми кривої напруги визначає нове значення K_U на основі амплітуд гармонічних складових, які залишилися в спектрі напруги після усунення превалюючої гармоніки. Якщо обчислене значення коефіцієнта не перевищує норми даного показника, то система керування переходить в стан очікування, постійно відслідковуючи спектр напруги контактної мережі тягової підстанції. Проте, якщо K_U все ще перевищує встановлене значення, то за сигналом з розподільвача тактів блоки 27 і 28 виділяють із отриманого в аналізаторі 22 спектра напруги амплітуду та частоту превалюючої в цей час вищої гармоніки. На основі вихідного сигналу блока 28 визначення та запам'ятовування частоти превалюючої гармоніки відбувається налагодження другого фільтра на компенсацію вищої гармоніки, яка стала превалюючою після усунення впливу попередньої.

Розміщення в колі фільтра сенсорів струму 8 і 9 та кола захисту від недопустимих струмів дає можливість захистити фільтруючий пристрій в разі виникнення резонансу струмів між фільтром і контактною мережею. Зв'язок сенсорів струму із колом захисту здійснюється через ключі 31 і 32, які дозволяють відслідковувати значення струму при подачі на їх входи сигналів керування від розподільника тактів.

Для обмеження резонансних струмів вищих гармонік, які протікають через фільтр, до допустимих значень на вхід релейного елемента 42 подаються сигнали з сенсорів струму 8 і 9. Ці сигнали струму є пропорційними струму, який протікає в колі фільтра. Поріг спрацювання релейного елемента 42 вибирається рівним максимально допустимому значенню струму фільтра.

В разі виникнення резонансу струмів між фільтром та контактною мережею, коли струм в колі фільтра перевищує допустиме значення, за допомогою спільної роботи блока множення 46, елемента пам'яті 43, елемента зсуву фази 45, керованого генератора 41 та фазового дискримінатора 20 формується коригувальний сигнал зміни індуктивності регульованих реакторів, в результаті чого змінюється реактивна складова опору кола фільтра.

Як органи зміни індуктивності фільтра використовуються блоки 12 і 15. Вибір необхідного органу зміни індуктивності здійснюється через блоки пам'яті 18 і 19, на входи керування яких надходять сигнали від кола розподілу сигналів.

Зміна реактивної складової опору кола фільтра викликає розлагодження резонансу між лінійним фільтром та контактною мережею. Зміна реактивної складової опору кола фільтра буде тривати до тих пір, поки струм в колі фільтра I_{ϕ} не стане рівним допустимому струму $I_{д}$.

У випадку, якщо є недостатньою компенсація двох гармонік, відбувається повторне переналагодження обох фільтрів. Проте, як правило, для покращення якості напруги достатньо компенсувати одну-дві найбільших за амплітудою вищих гармоніки.

В разі, якщо компенсація двох превалюючих вищих гармонік є недостатньою і не дає можливості зменшити коефіцієнт спотворення форми кривої до нормованих меж, цей пристрій може бути доповнений декількома аналогічними колами фільтрування.

Висновки

Розроблено математичну модель закону автоматичного фільтрування вищих гармонік напруги тягової підстанції електротранспорту із використанням існуючого підходу в застосуванні реакторів з підмагнічуванням. На базі запропонованої математичної моделі синтезовано структуру пристрою, який дозволяє значно підвищити якість електроенергії та дає позитивний ефект в разі його застосування на тягових підстанціях міського електричного транспорту. В основі компенсації закладено принцип підмагнічування реактора постійним струмом для налагодження силового кола в резонанс на виділену превалюючу вищу гармоніку.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Жежеленко И. В. Качество электрической энергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. — К. : Техника, 1981. — 160 с.
2. Шевченко В. В. Электроснабжение наземного городского электрического транспорта / В. В. Шевченко, Н. В. Арзамасцев, С. С. Бодрухина. — М. : Транспорт, 1987. — 272 с.
3. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий / Игорь Владимирович Жежеленко. — 4-е изд., перераб. и доп. — М. : Энергоатомиздат, 2000. — 332 с.
4. Курбацкий В. Г., Контроль несинусоидальности напряжения в электрических сетях / В. Г. Курбацкий, Г. Г. Трофимов // Электричество. — 1991. — № 6. — С. 17—21.
5. Шидловский А. Е. Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения / А. Е. Шидловский, М. П. Гринберг, Ю. С. Железко // Электричество. — 1982. — № 12. — С. 24—27.
6. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / [И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко та ін.]; под ред. И. В. Жежеленко. — М. : Энергоатомиздат, 2007. — 294 с.
7. Паянок О. А. Дослідження гармонічного складу напруг в контактній мережі постійного струму тягових підстанцій міста / О. А. Паянок // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2008. — № 1. — С. 84—89.
8. Мокін Б. І. Дослідження гармонічного складу напруг та струмів на вході змінного струму тягових підстанцій електротранспорту міста / Б. І. Мокін, О. А. Паянок // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. — Кременчук : КДПУ, 2008. — Вип. 4/2008 (51). Частина 2. — С. 57—61.
9. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. ГОСТ 13109-97. — Введ. взамен ГОСТ 13109-67. — М. : Изд-во стандартов, 1997. — 80 с.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортні електричні системи і комплекси

Стаття надійшла до редакції 7.06.12

Рекомендована до друку 10.07.12

Мокін Борис Іванович — професор, **Паянок Олександр Анатолійович** — доцент.

Кафедра відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів;

Бабій Сергій Миколайович — доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця