

УДК 621.316

П. Д. Лежнюк, д-р техн. наук, проф.;

А. В. Килимчук, асп.;

О. Є. Рубаненко, канд. техн. наук, доц.

ЗМЕНШЕННЯ ДОДАТКОВИХ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ, ВИКЛИКАНИХ ЇХ ВЗАЄМВПЛИВОМ

Розглянуто математичні моделі й алгоритми визначення втрат потужності в електричних мережах, викликаних їх взаємвпливом. Показано можливість використання для зменшення цих втрат лінійних регуляторів, встановлених в мережі нижчої напруги. Запропоновано метод визначення оптимального місця встановлення таких пристроїв.

Вступ

Одним з результатів реформ в електроенергетиці став розподіл електричних мереж енергосистем на магістральні та розподільні як технічно, так і економічно. Магістральні електричні мережі (МЕМ), адміністративно виділені у окрему енергетичну структуру, стали транзитерами, що передають через свої мережі електроенергію як суміжним електроенергетичним системам (ЕЕС), так і розподільним електричним мережам (РЕМ) обласних енергопостачальних компаній (ЕК). Розподільні електричні мережі (ЕК) реалізують послуги щодо передавання електроенергії споживачам. При цьому МЕМ і РЕМ як окремі суб'єкти господарювання вирішують свої технічні й економічні проблеми самостійно у відповідності до ринкових умов [1, 2]. Разом з тим, режими функціонування цих мереж встановлюються згідно із законами електротехніки незалежно від форми господарювання і від того, кому вони належать.

Паралельна робота ліній електропередачі (ЛЕП) різної напруги через високу міру неоднорідності викликає ускладнення в процесі транспортування та розподілу електроенергії. Між електричними мережами ЕЕС через неоднорідність виникають взаємні перетоки потужності, які завантажують мережі суміжних енергопостачальних компаній, причому відомо, що мережі вищої напруги розвантажуються на паралельно працюючі мережі нижчої напруги [3]. Наслідком цього є додаткові втрати електроенергії, а також перевантаження комутаційних апаратів та ЛЕП нижчої напруги.

Дослідження міри впливу взаємних і транзитних перетоків потужності на рівень додаткових втрат електроенергії є актуальною задачею. Її розв'язання дозволить контролювати та оцінювати вплив перетоків потужності магістральних електричних мереж на додаткові втрати в розподільних мережах обласних (ЕК), а також аналізувати наслідки взаємовпливу електричних мереж. В цій статті розглядаються можливості компенсації додаткових втрат електроенергії в електричних мережах ЕМ, викликаних їх взаємовпливом, шляхом введення в контури е. р. с. лінійними регуляторами типу вольто-додаткових трансформаторів (ВДТ) або крос-трансформаторів (КТ).

Постановка задачі

Через з взаємовплив електричних мереж і транзитних потоків потужності виникають задачі визначення додаткових втрат потужності й електроенергії. Результати розв'язання цих задач використовуються для аналізу та оцінювання взаємовпливу електричних мереж і впливу транзитних перетоків на режими, зокрема на втрати в мережах вищої напруги (ВН) і нижчої напруги (НН). У відповідності до значення цих втрат розробляються заходи щодо їх оптимізації в мережах ВН і НН. В залежності від умов експлуатації та взаємовідносин між МЕМ і РЕМ можливі два варіанти. Можуть бути досягнуті домовленості щодо мінімізації сумарних втрат ΔP_{Σ} в мережах ВН і НН і визначення оптимальних значень коефіцієнтів трансформаторів і автотрансформаторів зв'язку:

$$\min \{ \Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{ВН}} + \Delta P_{\text{НН}} \}, \quad (1)$$

де $\Delta P_{\text{ВН}}$, $\Delta P_{\text{НН}}$ — втрати потужності, відповідно, в мережах ВН і НН.

Але, зважаючи на те, що за паралельної роботи мереж ВН і НН втрати збільшуються тільки в мережі НН, то задача (1) вироджується в необхідність «витіснення» наведених транзитних перетоків потужності з мережі НН у мережу ВН. Тобто розв'язується така задача:

$$\min \{ \Delta P_{\text{нн}} \}. \quad (2)$$

Складність реалізації результатів розв'язання задачі (2) полягає в тому, що засоби, за допомогою яких вони можуть практично досягнуті (трансформатори і автотрансформатори зв'язку), знаходяться на балансі МЕМ і доступ до них з боку РЕМ обмежений. Отже, з позиції РЕМ залишається єдиний вихід — встановлювати ВДТ в своїх мережах. При цьому виникають такі задачі: визначення найефективнішого місця встановлення ВДТ в мережі НН та його потужності; оцінка доцільності: яким має бути ВДТ — з регульованим чи ні коефіцієнтом трансформації.

На перший погляд через те, що зрівнювальна е. р. с. залежить від навантаження як мережі ВН, так і НН, то ВДТ має бути з РПН. З іншого боку, враховуючи, що першопричиною негативного впливу мережі ВН на мережу НН, тобто виникнення додаткових втрат потужності й електроенергії, є неоднорідність мереж, яка є конструктивним параметром, то доцільно дослідити можливість встановлення ВДТ з нерегульованим коефіцієнтом трансформації. В останньому випадку за допомогою такого ВДТ (значно дешевшого, ніж в першому варіанті) буде скомпенсована постійна складова додаткових втрат, яка залежить виключно від неоднорідності мереж.

В електричних мережах наприклад Російської Федерації (РФ), ефективно використовуються ВДТ, якими зсувається кут вектора вторинної напруги трансформатора відносно первинної на постійну величину [4]. Такі трансформатори названі крос-трансформаторами (КТ), а сам процес корегування потоків потужності з метою зменшення втрат від транзитних перетоків — крос-трансформаторною технологією. Перевагою крос-трансформаторів є те, що вони не мають пристроїв РПН, але допускають ступінчасте перемикання за допомогою допоміжних вимикачів. Встановлюються вони в електричних мережах вищої напруги, тобто в магістральних мережах. Виходячи з наведених вище міркувань, доцільно також дослідити можливість і ефективність встановлення ВДТ типу крос-трансформаторів в розподільних електричних мережах.

Математична модель для виділення з сумарних втрат в електричній мережі НН втрат від наведених транзитних перетоків

В [5] показано, що втрати потужності у вітках електричних мереж можна визначити як

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{в}} = \dot{\mathbf{T}}_k \dot{\mathbf{S}} + \dot{\mathbf{V}}_{\text{нб}}, \quad (3)$$

де $\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{в}} = \Delta \mathbf{P}_{\text{в}} + j \Delta \mathbf{Q}_{\text{в}}$ — вектор втрат активної і реактивної потужностей у вітках; $\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{P} + j \mathbf{Q}$ — вектор потужностей у вузлах; $\dot{\mathbf{T}}_k$ — матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках заступної схеми в залежності від потужностей у її вузлах з урахуванням коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв'язків; $\dot{\mathbf{V}}_{\text{нб}}$ — вектор-стовпець втрат потужності у вітках заступної схеми від незбалансованих коефіцієнтів трансформації.

Кожний рядок матриці $\dot{\mathbf{T}}_k$, який містить коефіцієнти розподілу втрат потужності для i -ї вітки заступної схеми від потужності у її вузлах, визначається за формулою

$$\dot{\mathbf{T}}_{ki} = (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{ki}) \hat{\mathbf{C}}_{ki} \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}, \quad (4)$$

де $\dot{\mathbf{U}}_t$, $\dot{\mathbf{U}}_d$ — транспонований вектор і діагональна матриця напруг у вузлах включаючи і базисний; \mathbf{M}_{ki} — i -й стовпець матриці з'єднань віток у вузлах \mathbf{M}_k , в якій для віток з трансформаторами замість значень «-1» містяться значення їх коефіцієнтів трансформації; $\hat{\mathbf{C}}_{ki}$ — i -й рядок матриці струморозподілу $\dot{\mathbf{C}}_k = \mathbf{z}_{\text{в}}^{-1} \mathbf{M}_{kt} (\hat{\mathbf{M}}_k \mathbf{z}_{\text{в}}^{-1} \mathbf{M}_{kt})^{-1}$ з урахуванням трансформаторних зв'язків; $\mathbf{z}_{\text{в}} = \mathbf{r}_{\text{в}} + j \mathbf{x}_{\text{в}}$ — діагональна матриця опорів віток (тут і далі знак «^» означає, що матриця або вектор є спряжені, t — що транспоновані).

Значення втрат в i -й вітці від незбалансованих коефіцієнтів трансформації трансформаторних зв'язків визначаються за формулою

$$\dot{V}_{\text{H6}i} = (\dot{U}_t \mathbf{M}_{ki}) \widehat{\mathbf{D}}_{6i} \widehat{U}_6, \quad (5)$$

де $\widehat{\mathbf{D}}_{6i}$ — i -й рядок матриці провідностей $\dot{\mathbf{D}}_6 = \mathbf{z}_B^{-1} \left(\mathbf{M}_{6kt} - \mathbf{M}_{kt} (\widehat{\mathbf{M}}_k \mathbf{z}_B^{-1} \mathbf{M}_{kt})^{-1} \mathbf{Y}_6 \right)$, що обмежують струми від незбалансованих коефіцієнтів трансформації у замкнених контурах електричної мережі (у випадку розімкненої електричної мережі або збалансованих коефіцієнтів трансформації $\dot{\mathbf{D}}_6$ перетворюється в нульову матрицю); \dot{U}_6 — вектор-стовпець напруг у балансуючих вузлах; \mathbf{M}_{6kt} — підматриця з'єднань балансуючих вузлів, яка виділена з транспонованої матриці з'єднань \mathbf{M}_{kt} ; $\mathbf{Y}_6 = \widehat{\mathbf{M}}_k \mathbf{z}_B^{-1} \mathbf{M}_{6kt}$ — фрагмент матриці вузлових провідностей, що відповідає балансуючим вузлам.

Якщо коефіцієнти розподілу втрат потужності для i -ї вітки $\dot{\mathbf{T}}_{ki}$ і вектор потужностей вузлів $\dot{\mathbf{S}}$ згрупувати окремо для мереж ВН і НН, то втрати потужності в будь-якій i -й вітці мережі НН можна визначити як дві складові: втрати від власних перетоків, які визначаються потужностями власних вузлів, $\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}i}^{\text{HH}}$, і втрати від перетоків, які викликані впливом мережі ВН, $\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}i}^{\text{BH}}$:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}i} = \Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}i}^{\text{HH}} + \Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}i}^{\text{BH}} = \left| \dot{\mathbf{T}}_{ki}^{\text{HH}} \dot{\mathbf{T}}_{ki}^{\text{BH}} \right| \begin{vmatrix} \dot{\mathbf{S}}^{\text{HH}} \\ \dot{\mathbf{S}}^{\text{BH}} \end{vmatrix} = \dot{\mathbf{T}}_{ki}^{\text{HH}} \dot{\mathbf{S}}^{\text{HH}} + \dot{\mathbf{T}}_{ki}^{\text{BH}} \dot{\mathbf{S}}^{\text{BH}}, \quad (6)$$

де $\dot{\mathbf{T}}_{ki}^{\text{HH}}$, $\dot{\mathbf{T}}_{ki}^{\text{BH}}$ — відповідно, коефіцієнти розподілу втрат потужності для i -ї вітки мережі НН від потужностей вузлів мереж НН і ВН; $\dot{\mathbf{S}}^{\text{HH}}$, $\dot{\mathbf{S}}^{\text{BH}}$ — відповідно, вектори потужностей вузлів мереж НН і ВН.

Знаючи втрати потужності, які викликані впливом мережі ВН в кожній вітці мережі НН, можна визначити сумарні втрати в мережі НН, які викликаються впливом мережі ВН:

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}}^{\text{BH}} = \sum_{i \in \mathbf{M}_{\text{HH}}} \Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}i}^{\text{BH}}$$

або, з урахуванням (6):

$$\Delta \dot{\mathbf{S}}_{\text{HH}}^{\text{BH}} = \sum_{i \in \mathbf{M}_{\text{HH}}} \dot{\mathbf{T}}_{ki}^{\text{BH}} \dot{\mathbf{S}}^{\text{BH}}, \quad (7)$$

де \mathbf{M}_{HH} — множина номерів віток мережі НН.

Місце встановлення ВДТ (КТ) в мережі НН за результатами аналізу чутливості

В [6] показано, що неоднорідність складнозамкнених електричних мереж оцінюється загально-системним показником:

$$\boldsymbol{\gamma} = \mathbf{M}_{kt} \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_{kt}, \quad (8)$$

де \mathbf{r} , \mathbf{x} — активна і реактивна складові матриці вузлових опорів.

Виразимо, як залежить загальносистемний показник неоднорідності від коефіцієнтів трансформації трансформаторів. Для цього матрицю \mathbf{M}_{kt} запишемо як

$$\mathbf{M}_{kt} = \mathbf{M}_t^+ + \mathbf{k} \mathbf{M}_t^-, \quad (9)$$

де \mathbf{M}_t^+ — матриця, яка містить фрагмент матриці з'єднань, елементами якої є нулі та одиниці зі знаком «+»; \mathbf{M}_t^- — та ж матриця, але її елементами є нулі та одиниці зі знаком «-»; \mathbf{k} — діагональна матриця комплексних коефіцієнтів трансформації (якщо в i -й вітці трансформатор відсутній, то i -й діагональний елемент $k_{i,i} = 1$).

Підставивши (9) у (8), отримаємо:

$$\boldsymbol{\gamma} = (\mathbf{M}_t^+ + \mathbf{k} \mathbf{M}_t^-) \mathbf{x} \mathbf{r}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} (\mathbf{M}_t^+ + \mathbf{k} \mathbf{M}_t^-). \quad (10)$$

Після перетворення (10) матимемо:

$$\gamma = \left(\mathbf{kM}_t^- \mathbf{xr}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{kM}_t^- \right) + \left(\mathbf{M}_t^+ \mathbf{xr}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t^+ \right)$$

або

$$\gamma = \mathbf{k} \left(\mathbf{M}_t^- \mathbf{xr}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t^- \right) + \left(\mathbf{M}_t^+ \mathbf{xr}^{-1} - \mathbf{x}_B \mathbf{r}_B^{-1} \mathbf{M}_t^+ \right). \quad (11)$$

Оскільки матриця \mathbf{k} містить усі коефіцієнти трансформації електричної мережі, разом з коефіцієнтом трансформації розглядуваного лінійного регулятора, то необхідно з матриці γ , сформованої згідно з (11), вибрати ті елементи, які найбільше змінюються в процесі регулювання коефіцієнтів трансформації ВДТ. Для цього можна скористатися одним з методів аналізу чутливості оптимальних рішень.

З множини віток, яким відповідають вибрані елементи γ_{ij} , необхідно призначити ту вітку, в якій максимальне γ_{ij} і в якій є практична можливість встановити ВДТ. Тобто, вона має «опиратися» на підстанцію, де є можливість розмістити ВДТ і здійснювати ним оптимальне керування потоками потужності.

Приклад. Розглянемо оптимізацію потоків активної потужності на прикладі електричних мережах 138—230 кВ тестової схеми RTS-96 IEEE, що показана на рис. 1. З метою оцінки впливу міжсистемного перетоку в розрахункову схему введено транзит потужності між вузлами 23 та 22.

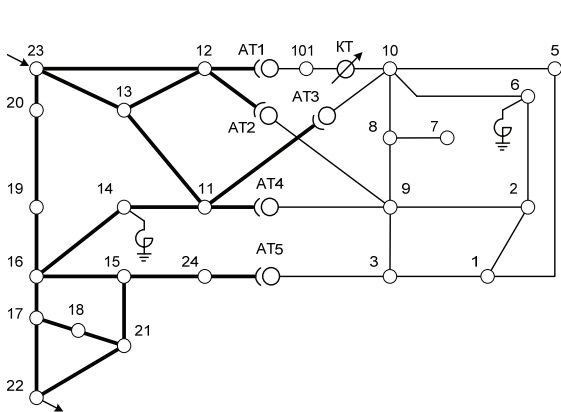


Рис. 1. Схема електричної мережі 138—230 кВ IEEE RTS-96

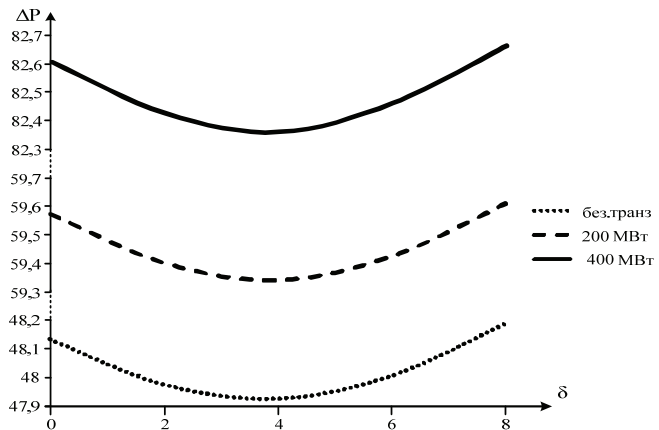


Рис. 2. Залежність загальносистемних втрат активної потужності від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 200 та 400 МВт

Також в схему введено крос-трансформатор між шинами 138 кВ (101 вузол) автотрансформатора зв'язку та вузлом 10.

Встановлення лінійного регулятора в ЕС, а саме крос-трансформатора, дає змогу перерозподілити перетік потужності зміною його поперечної складової коефіцієнта трансформації і тим самим зменшити додаткові втрати активної потужності. Визначимо оптимальний кут КТ, за якого втрати активної потужності для режиму максимального навантаження будуть найменші. На рис. 2 показано залежність загальносистемних втрат активної потужності від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 200 і 400 МВт.

З рис. 2 видно, що мінімальні сумарні втрати активної потужності в мережі будуть в режимах без транзиту потужності та з транзитом 200 МВт і 400 МВт, а найменші тоді, коли кут КТ складатиме 4 електричних градусів.

На рис. 3 та рис. 4 показані залежності втрат активної потужності від коефіцієнта трансформації КТ відповідно в мережах 138 кВ та 230 кВ. Так само розглянуто режими без транзиту та з транзитом 200 і 400 МВт.

Отже, в мережі НН 138 кВ мінімальні втрати активної потужності в режимі без транзиту будуть, коли кут 5 ел. гр., для транзиту 200 МВт — 4 ел. гр., для транзиту 400 МВт — 2 ел. гр. В мережі ВН 230 кВ оптимальним кутом як за відсутності транзиту, так і за наявності транзитів 200 МВт і 400 МВт, є кут 4 ел. гр. Як видно для цього прикладу, щоб зменшувати втрати електроенергії в мережі НН, коефіцієнт трансформації КТ в залежності від режиму необхідно змінювати. Оскільки КТ знаходиться в мережі НН, то така можливість є.

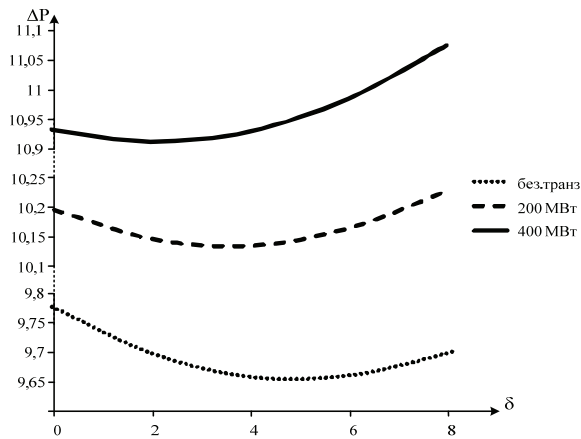


Рис. 3. Залежність втрат активної потужності в мережі 138 кВ від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 200 і 400 МВт

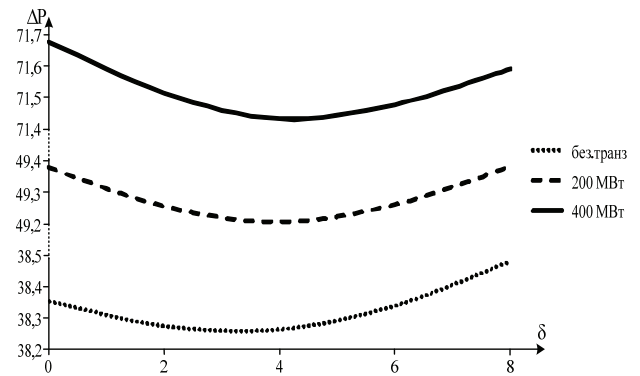


Рис. 4. Залежність втрат активної потужності в мережі 230 кВ від коефіцієнта трансформації КТ без транзиту та з транзитом 200 і 400 МВт

Проте для того, щоб повністю визначитися з параметрами КТ і умовами його експлуатації (буде він регульований чи ні), необхідно провести розрахунки всіх характерних режимів електричних мереж, враховуючи перспективи їх розвитку. За результатами таких розрахунків може бути вибраний оптимальний кут, на який необхідно зсунути вектор напруги, щоб компенсувати додаткові втрати, викликані взаємовпливом електричних мереж. Якщо буде доцільно встановлювати регульований КТ, то визначиться необхідний регульований діапазон кута δ .

Висновки

1. Під час паралельної роботи магістральних і розподільних електричних мереж через їх неоднорідність в мережах нижчої напруги виникають додаткові втрати потужності. Для зменшення цих втрат може бути встановлено ВДТ або крос-трансформатор. Він може бути встановлений з боку мережі нижчої напруги.

2. Місце встановлення лінійного регулятора в мережі нижчої напруги доцільно визначати за результатами найефективнішої компенсації негативного впливу неоднорідності електричних мереж. Для цього можуть бути використані математичні моделі і програмне забезпечення визначення втрат від транзитних перетоків потужності та визначення віток мережі, які найбільше впливають на неоднорідність паралельно працюючих електричних мереж.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ілка Левінгтон. Україна — впровадження Концепції оптового ринку електроенергії (ОРЕ) / Ілка Левінгтон // Електропанорама. — 2009. — № 1—2. — С. 40—44.
2. Кириленко О. В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови / О. В. Кириленко, А. В. Праховник // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск. — К., 2010. — С. 10—16.
3. Идельчик В. И. Электрические системы и сети / В. И. Идельчик. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 592 с.
4. Ольшванг М. В. Особенности кросс-трансформаторной технологии транспортирования энергии по сетям 110—765 кВ / М. В. Ольшванг // Электро. — 2004. — № 2. — С. 6—12.
5. Лежнюк П. Д. Оцінка взаємовпливу електричних мереж енергосистем з трансформаторними зв'язками / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, О. Б. Бурикін // Технічна електродинаміка: темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». Ч. 7. — 2006. — С. 27—30.
6. Лежнюк П. Д. Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов / П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, Д. И. Оболонский // Электричество. — 2007. — № 11. — С. 2—8.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем

Стаття надійшла до редакції 27.06.2013
Рекомендована до друку 22.07.2013

Лежнюк Петро Дем'янович — завідувач кафедри, *Килимчук Антон Володимирович* — аспірант, *Рубаненко Олександр Євгенійович* — доцент.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця