

УДК 621.316

© Яндульський О.С.<sup>1</sup>, Нестерко А.Б.<sup>2</sup>, Труніна Г.О.<sup>3</sup>**КООРДИНОВАНЕ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В РОЗПОДІЛЬНІЙ ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ З ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ**

Запропоновано підхід до регулювання напруги в розподільній електричній мережі (РЕМ) з джерелами розосередженого генерування (ДРГ), що передбачає координоване керування різномісними засобами регулювання напруги та враховує здатність ДРГ регулювати напругу у вузлі підключення. Координована робота засобів регулювання напруги з урахуванням змінного генерування ДРГ, згідно запропонованого підходу, дозволяє підвищити активну потужність генерування ДРГ.

**Ключові слова:** розподільна електрична мережа, джерело розосередженого генерування, синхронний компенсатор, РПН трансформатора, регулювання напруги.

**Яндульський А.С., Нестерко А.Б., Труніна А.А. Координированное регулирование напряжения в распределительной электрической сети с источниками рассредоточенной генерации.** Предложен подход к регулированию напряжения в распределительной электрической сети (РЭС) с источниками рассредоточенного генерирования (ИРГ), который предусматривает координированное управление различными средствами регулирования напряжения и учитывает способность ИРГ регулировать напряжение в узле подключения. Координированная работа средств регулирования напряжения с учетом переменного генерирования ИРГ, согласно предложенному подходу, позволяет повысить активную мощность генерации ИРГ. **Ключевые слова:** распределительная электрическая сеть, источник рассредоточенной генерации, синхронный компенсатор, РПН трансформатора, регулирование напряжения.

**O.S. Yandulsky, A.B. Nesterko, G.O. Trunina. Coordinated voltage control in the electrical distribution network with a source of distributed generation.** Distributed generation sources affect the electric network work: voltage, frequency, relaying, etc. In order to not violate voltage valid values the distributed generation source should reduce its active power. The way to regulate voltage in the distribution electric network with distributed generation sources has been developed. It provides coordinated control of different types of regulation means based on the theory of sensitivity and makes it possible for distributed generation sources to regulate voltage at the connection node and can both reduce the system cost and increase the efficiency of the coordinated control of regulation means and distributed generation sources. Such an approach takes into account that the distributed generation source can regulate voltage and power factor in the connection node in the electrical distribution network. Synchronous compensator and regulated under voltage transformer are thought of as means for voltage regulation. In the case of distributed generation source operating in voltage regulation mode with synchronous compensators and regulated under voltage transformers the power losses are less than power losses in the distributed generation source operating in power factor regulation mode. This is due to the fact that distributed generation source doesn't consume reactive power in voltage control mode. So, the proposed approach makes it possible to increase output active power of the distributed generation source and decrease operational costs of means for voltage control.

<sup>1</sup> д-р техн. наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [yandu\\_kpi@ukr.net](mailto:yandu_kpi@ukr.net)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, старший викладач, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [watefir@gmail.com](mailto:watefir@gmail.com)

<sup>3</sup> асистент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [g\\_trunina@ukr.net](mailto:g_trunina@ukr.net)

*Keywords: electrical distribution network, source of distributed generation, synchronous compensator, regulated under voltage transformers, voltage control.*

**Постановка проблеми.** Функціонування джерел розосередженого генерування (ДРГ) на основі відновлюваних джерел енергії у складі розподільної електричної мережі (РЕМ) впливає на її роботу, зокрема на напругу [1]. Так як ДРГ переважно підключаються зі сторони споживача, в мережі може змінюватись величина перетоків потужності, що може призводити до підвищення рівнів напруги у вузлах РЕМ [2], а це, в свою чергу, веде до необхідності зниження потужності генерування ДРГ. При цьому регулювання напруги в РЕМ ускладнюється змінністю генерування ДРГ.

З метою зменшення рівнів напруги у вузлах мережі, що дозволить підвищити потужність генерування ДРГ, використовують засоби компенсації реактивної потужності, що, у свою чергу, може призводити до збільшення втрат активної потужності в мережі та характеризується високою вартістю обладнання. Також для регулювання напруги в РЕМ з ДРГ застосовуються системи регулювання положення РПН трансформаторів, але змінний характер генерування ДРГ веде до збільшення кількості перемикачів положення системи РПН і тим самим призводить до зменшення її терміну служби. ДРГ може самостійно регулювати напругу в вузлі підключення до мережі: знижує свою активну потужність або регулює коефіцієнт потужності, що веде за собою споживання реактивної потужності та може призводити до збільшення втрат активної потужності в РЕМ. В той же час, поєднання роботи ДРГ та декількох різнотипних засобів регулювання напруги дозволить уникнути ряду недоліків роботи окремо взятих засобів регулювання напруги та максимально збільшити потужність генерування ДРГ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанню координованого керування різнотипними засобами регулювання напруги в РЕМ за наявності ДРГ присвячено ряд вітчизняних та зарубіжних робіт. В [3-4] пропонується координувати роботу ДРГ з перемиканням положення системи РПН трансформатора, що дозволяє знизити втрати активної потужності в мережі та дає можливість ДРГ збільшити потужність генерування, але лише в межах діапазону регулювання системи РПН. Головний недолік розглянутого підходу полягає у збільшенні частоти перемикачів положення системи РПН, що, як зазначалося раніше, призводить до зменшення терміну служби РПН.

В [5] пропонується поєднання роботи ДРГ та БСК з регулюванням положення системи РПН, причому керування відбувається на основі прогнозування зміни перетоків потужності в електричній мережі. Такий підхід дозволяє зменшити втрати активної потужності в мережі та кількість перемикачів положення системи РПН, але у той же час вирішує питання збільшення потужності генерування ДРГ лише в межах діапазону регулювання системи РПН через неможливість БСК знижувати напругу у вузлах мережі.

Як показано в [6], поєднання роботи ДРГ, системи РПН трансформатора, БСК та ССК дозволяє розширити можливості керування нормальними режимами роботи РЕМ та вирішити ряд проблем. В [7] з метою підвищення ефективності регулювання напруги до роботи наведених в [6] засобів долучаються шунтуючі реактори (ШР). Зазначені підходи дозволяють максимально збільшити генерування потужності ДРГ. Головні недоліки таких підходів: висока вартість обладнання та потреба в розширеній комунікаційній системі.

Для кожного вузла РЕМ можна визначити його коефіцієнти чутливості по напрузі відносно зміни реактивної потужності пристроїв компенсації [8], і таким чином, встановити яким саме пристроєм слід регулювати напругу у конкретному вузлі мережі.

Враховуючи результати аналізу, пропонується координування роботи ДРГ з роботою РПН трансформаторів та СК виконувати на основі теорії чутливості, що дозволить одночасно зменшити вартість системи координованого регулювання та збільшити потужність генерування ДРГ.

**Ціль статті** – розробити підхід до регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, який передбачає координоване керування різнотипними засобами регулювання на основі теорії чутливості, а також враховує здатність ДРГ регулювати напругу у вузлі підключення та дозволяє одночасно зменшити вартість системи координованого керування та збільшити потужність генерування ДРГ.

**Виклад основного матеріалу.** Існує декілька режимів роботи ДРГ для регулювання напруги у вузлі підключення в РЕМ:

- З фіксованим коефіцієнтом потужності  $\cos\phi$ : реактивна потужність ДРГ змінюється та-

ким чином, щоб при зміні активної потужності ДРГ  $\cos\phi$  залишався незмінним.

• Регулювання реактивної потужності ДРГ: ДРГ має можливість генерувати або споживати реактивну потужність при зниженій активній потужності ДРГ у відповідності до співвідношення:

$$P_{ДРГ} = \sqrt{S_{ДРГ}^2 - Q_{ДРГ}^2}, \quad (1)$$

де  $P$  – активна потужність ДРГ;  $S$  – повна потужність ДРГ;  $Q$  – реактивна потужність ДРГ.

• Робота з фіксованим значенням реактивної потужності: при зміні активної потужності ДРГ значення його реактивної потужності залишається незмінним.

• Зниження значення вихідної активної потужності ДРГ.

В даній роботі пропонується підхід до регулювання напруги в РЕМ з ДРГ, що передбачає координоване керування СК, РПН трансформаторів та ДРГ. Координування роботи СК здійснюється на основі значень коефіцієнтів чутливості, що дозволяє визначити, яким саме СК слід регулювати напругу у конкретному вузлі РЕМ.

На рис. 1 наведено модель типової розподільної електричної мережі 150/35/10 кВ (фрагмент Молочанської РЕМ) в програмному забезпеченні PowerFactory, в якій проводились дослідження. Координувана система регулювання напруги складається з двох СК типу КСВБ-50-11 потужністю 50 МВА, систем РПН на трьох трансформаторах та двох залучених до регулювання ДРГ.

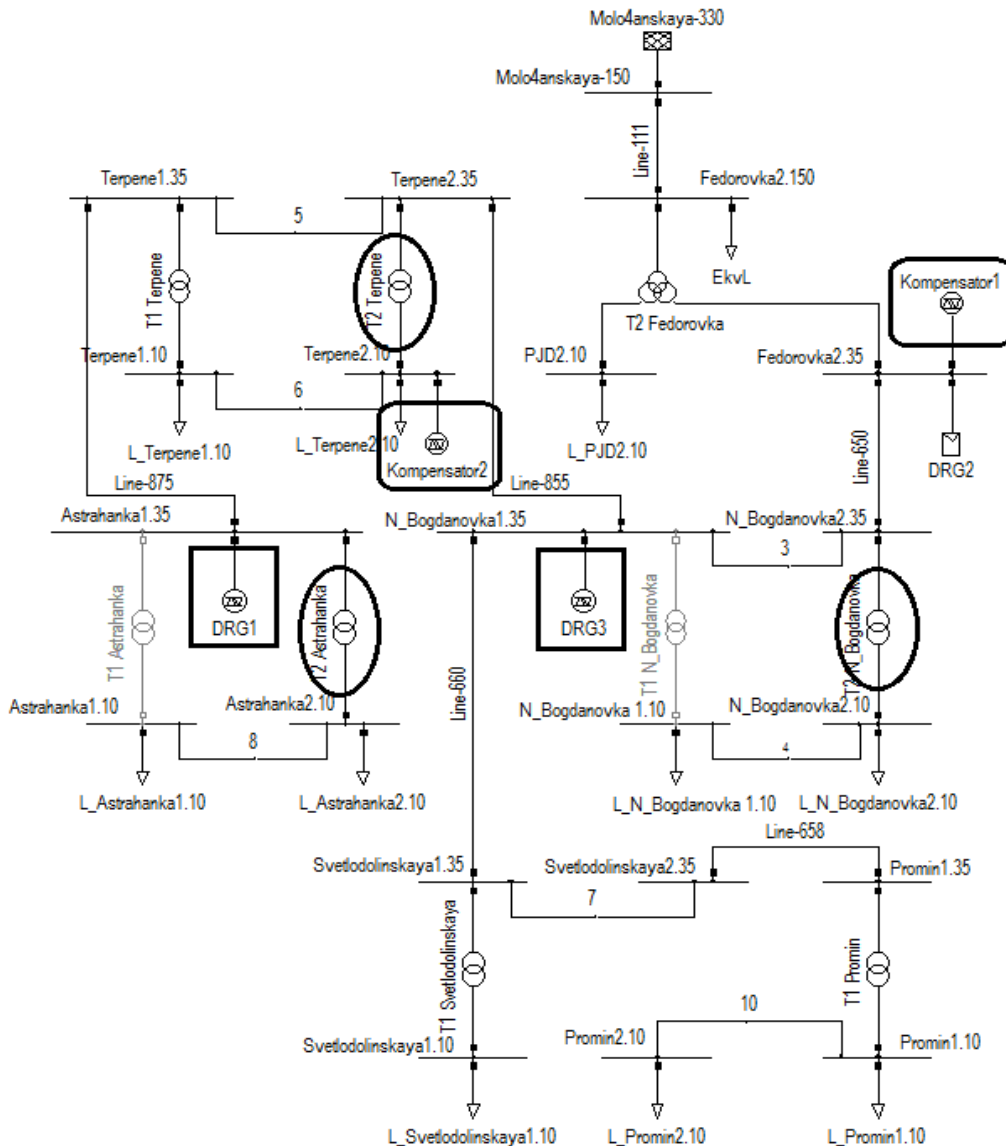


Рис. 1 – Модель розподільної електричної мережі в програмному забезпеченні PowerFactory

Регулятор координованого керування СК пропонується побудувати таким чином, щоб врахувати коефіцієнти чутливості зміни напруги у вузлах РЕМ [9] відносно зміни реактивної потужності СК (2). Таким чином, для регулювання напруги у конкретному вузлі мережі обирається той СК, який має найбільший вплив на напругу.

$$dU_i / dQ_{СКn} = \left[ dU_1 / dQ_{СКn} \quad dU_2 / dQ_{СКn} \quad \dots \quad dU_{ДРГ} / dQ_{СКn} \quad \dots \quad dU_m / dQ_{СКn} \right], \quad (2)$$

де  $i$  – номер вузла мережі;  $m$  – кількість вузлів, що відслідковуються системою координованого регулювання;  $n$  – номер СК.

Модель розробленого регулятора координованої роботи СК наведена на рис. 2.

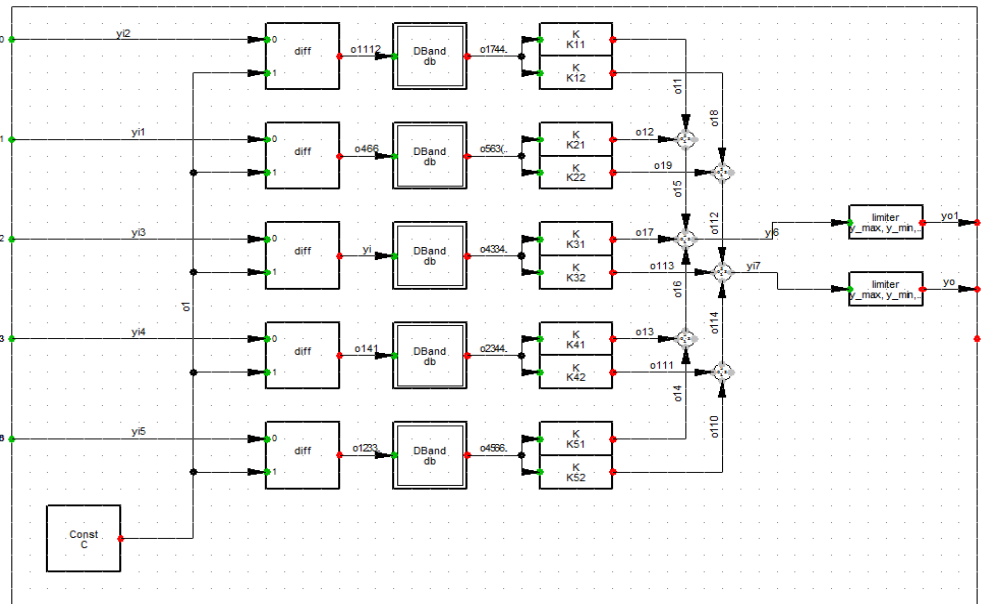


Рис. 2 – Модель регулятора координованої роботи СК

Проведено дослідження координованої роботи ДРГ з різнотипними засобами регулювання напруги:

- 1) Робота ДРГ в режимі регулювання напруги у вузлі підключення;
- 2) Робота ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності у вузлі підключення;
- 3) Робота ДРГ в режимі регулювання напруги у вузлі підключення у поєднанні з роботою СК та РПН трансформаторів;
- 4) Робота ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності у вузлі підключення у поєднанні з роботою СК та РПН трансформаторів.

Зміну активної потужності ДРГ в різних випадках показано на рис. 3.

Аналіз отриманих результатів показав, що при регулюванні напруги та коефіцієнта потужності ДРГ без додаткових засобів вироблена електроенергія станції може знижуватись до 83÷111 МВт·год (із можливих 383 МВт·год). При поєднанні роботи ДРГ з координованим регулюванням СК та РПН трансформаторів потужність генерування ДРГ збільшується в 3 рази і становить 332÷382 МВт·год.

У випадку координування роботи ДРГ, системи РПН та СК сумарна кількість спрацьовувань систем РПН трансформаторів становить 12÷20 перемикачів. У той же час напруги у вузлах мережі (рис. 4, а) та в вузлах підключення ДРГ (рис. 4, б) змінюються в допустимих межах. Напруги у вузлах РЕМ змінюються в допустимих межах з короткочасними порушеннями, що пояснюється затримкою в системі керування засобами регулювання напруги.

Втрати активної потужності в мережі у порівнянні з енергією ДРГ наведено на рис. 5. З рис. 5 можна побачити збільшення втрат активної потужності в РЕМ при регулюванні СК та ДРГ. Це пояснюється збільшенням перегоків реактивної потужності в мережі, що викликано споживанням реактивної потужності СК та ДРГ. Але, у той же час, при регулюванні реактивної потужності збільшується потужність генерування ДРГ.

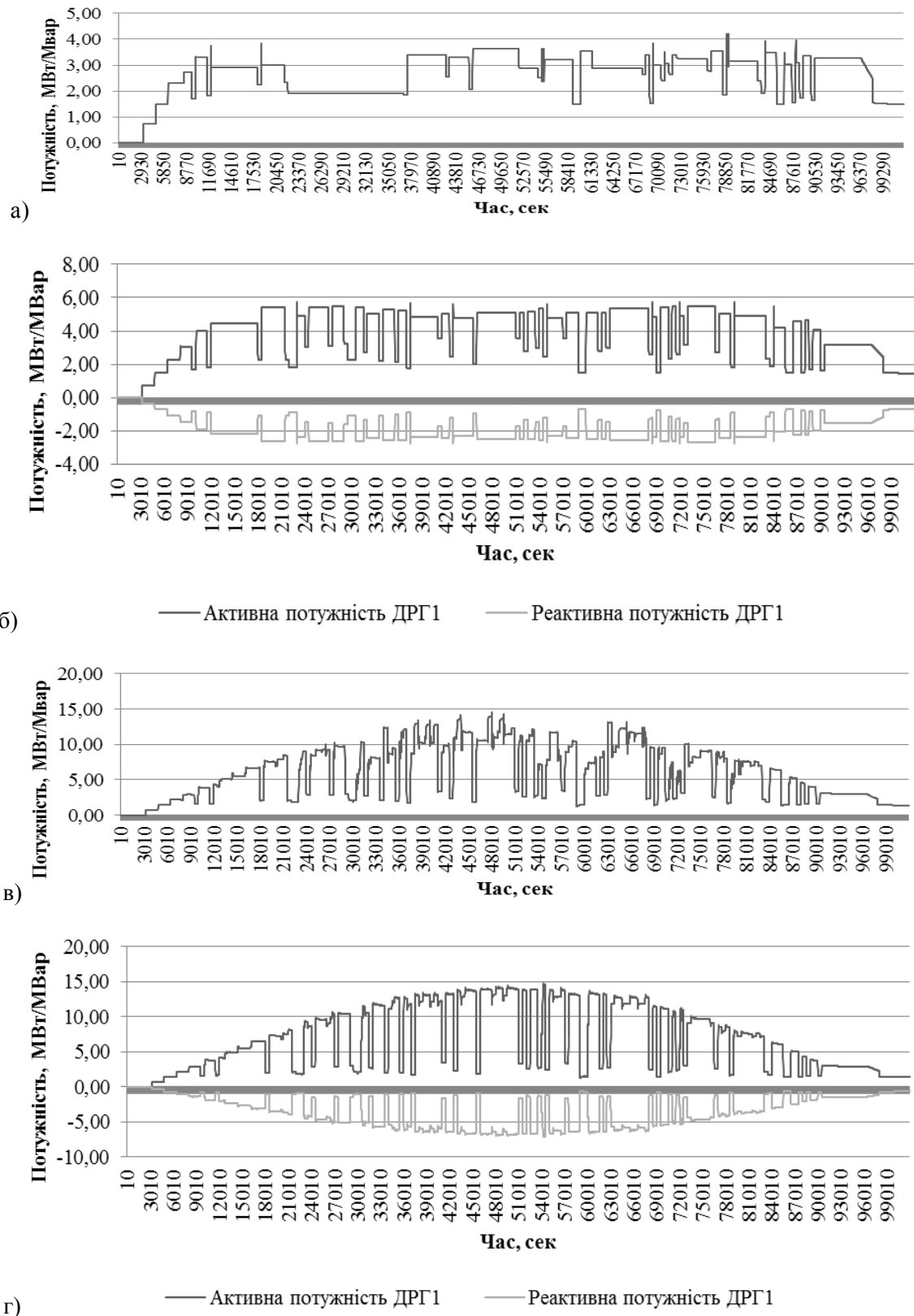


Рис. 3 – Зміна потужності ДРГ в режимах регулювання напруги або коефіцієнта потужності у поєднанні з іншими засобами регулювання напруги: а – ДРГ в режимі регулювання напруги у вузлі підключення; б – ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності у вузлі підключення; в – СК+РПН+ДРГ в режимі регулювання напруги у вузлі підключення; г – СК+РПН+ДРГ в режимі регулювання коефіцієнта потужності у вузлі підключення

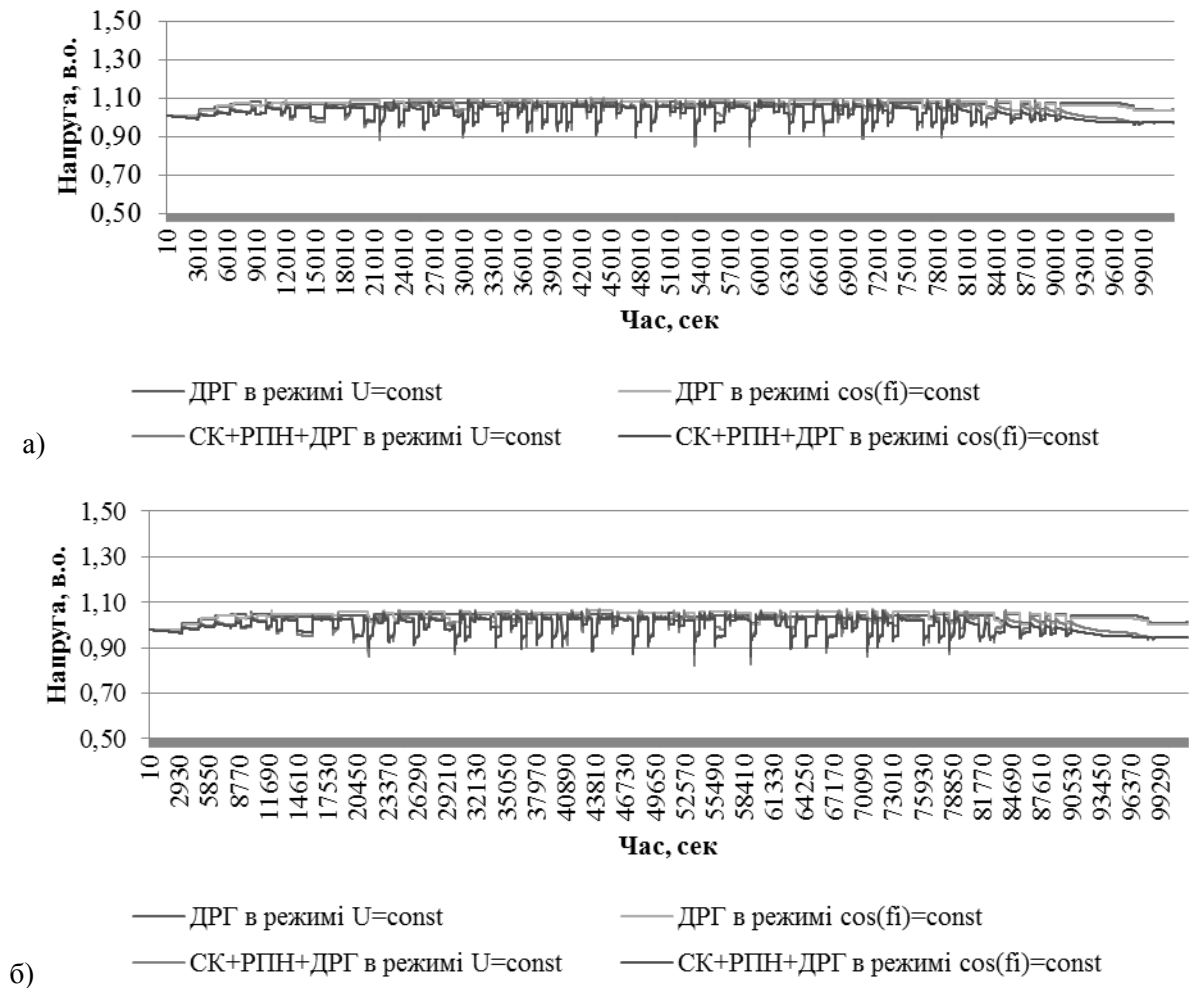


Рис. 4 – Зміна напруг у вузлах мережі при роботі ДРГ та інших засобів регулювання напруги: а – у вузлі РЕМ; б – у вузлі підключення ДРГ

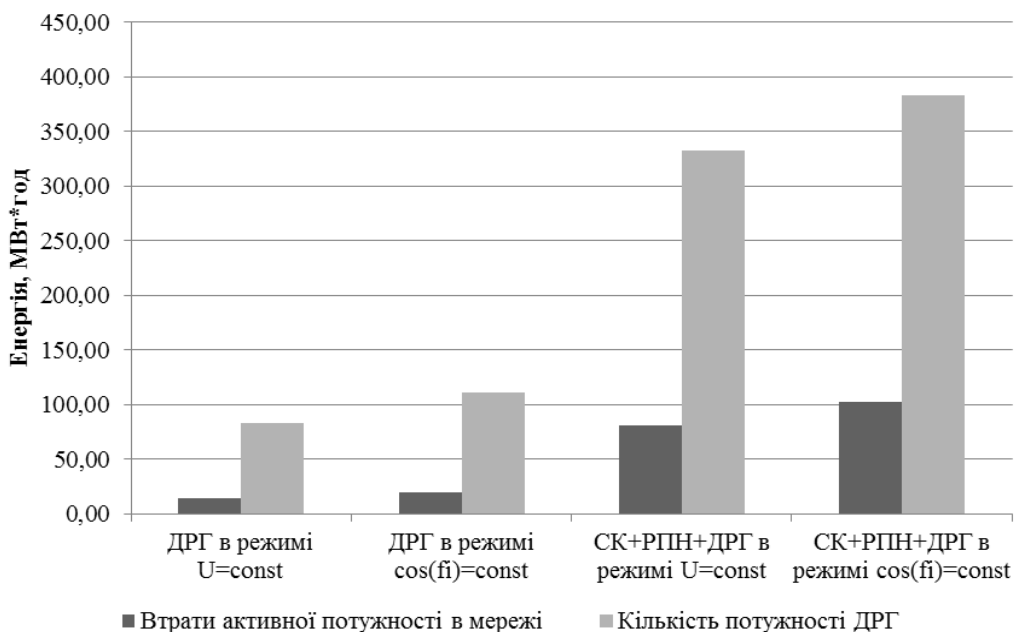


Рис. 5 – Втрати активної потужності в РЕМ у порівнянні з енергією ДРГ в різних випадках

**Висновки**

Таким чином, завдяки керуючим властивостям ДРГ, можливо послабити їх вплив на напругу в РЕМ. Для цього ДРГ можуть знижувати свою активну потужність для регулювання напруги або коефіцієнта потужності у вузлі підключення, але у такому випадку енергія ДРГ зменшується до  $83 \div 111$  МВт·год із можливих 383 МВт·год. Очевидно, що регулювання лише ДРГ, без допоміжних засобів, збільшує потужність генерування ДРГ тільки в межах його діапазону регулювання напруги у вузлі РЕМ. Хоча втрати потужності в мережі при цьому сягають лише 20 МВт·год. У випадку поєднання роботи ДРГ з регулюванням СК та РПН трансформаторів потужність генерування ДРГ збільшується в 3 рази (до 382 МВт·год) при зміні напруги у вузлах в допустимих межах. Але при цьому втрати активної потужності в мережі зростають до 100 МВт·год, що викликано збільшенням споживання реактивної потужності СК та ДРГ, коли останнє працює в режимі регулювання коефіцієнта потужності. При роботі ДРГ в режимі регулювання напруги втрати активної потужності на 20 МВт·год менші.

Отже, залучаючи ДРГ до системи координованого регулювання напруги можливо збільшити його потужність генерування при утриманні напруги в вузлах мережі в допустимих межах.

**Список використаних джерел:**

1. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах / П.Д. Лежнюк [та інш.]. – Вінниця : ВНТУ, 2014. – 204 с.
2. Кириленко О.В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лукьяненко // Технічна електродинаміка. – 2011. – Вип. 1. – С. 46-53.
3. Kojovic L.A. Coordination of Distributed Generation and Step Voltage Regulator Operations for Improved Distribution System Voltage Regulation / L.A. Kojovic // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 18-22 June. – 2006. – Pp. 122-127.
4. Agalgaonkar Y.P. Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators / Y.P. Agalgaonkar, B.C. Pal, R.A. Jabr // IEEE Transactions on Power Systems. – 2014. – Vol. 29. – Issue 1. – Pp.182-192.
5. Viawan F.A. Coordinated Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Distributed Generation / F.A. Viawan, D. Karlsson // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting «Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century», 20-24 July. – 2008. – Pp. 231-236.
6. Nagendra Rao P.S. Radial Load Flow for Systems Having Distributed Generation and Controlled Q Sources / P.S. Nagendra Rao, R.S. Deekshit // Electric Power Components and Systems. – 2005. – Vol. 33. – Issue 6. – Pp. 641-655.
7. Optimal Distribution Voltage Control and Coordination With Distributed Generation / T. Senjyu [et. al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2008. – Vol. 23. – Issue 2. – Pp. 1236-1242.
8. Яндутьський О.С. Визначення зон ефективного регулювання напруги джерелами розосередженої генерації з інверторним приєднанням у розподільній електричній мережі [Електронний ресурс] / О.С. Яндутьський, Г.О. Труніна // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2014. – № 4. – Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/422/420>.
9. Труніна Г.О. Зони ефективного регулювання напруги джерелами розосередженої генерації з інверторним приєднанням в розподільній електричній мережі / Г.О. Труніна // Технічна електродинаміка. – 2014. – № 5. – С. 54-56.

**References:**

1. Lezhnyuk P.D., Kovalchuk O.A., Nikitorovich O.V., Kulyk V.V. *Vidnovljivani dzherela energii' v rozpodil'nyh elektrychnykh merezhah* [Renewable sources of energy in electric distribution networks]. Vinnytsia, Vinnytsia National Technical University Pubh., 2014. 204 p. (Ukr.)
2. Kirilenko O.V., Pavlovskiy V.V., Lukyanenko L.M. *Tehnichni aspekty vprovadzhennja dzherel rozpodil'noi' generacii' v elektrychnykh merezhah* [Technical aspects of implementation of the sources of distribution generation in electrical networks]. *Tehnichna elektrodynamika – Technical electrostatics*, 2011, iss. 1, pp. 46-53. (Ukr.)

3. Kojovic, L.A. Coordination of Distributed Generation and Step Voltage Regulator Operations for Improved Distribution System Voltage Regulation. [Abstracts of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting], Montreal, 2006, pp. 122-127.
4. Agalgaonkar Y.P., Pal B.C., Jabr R.A. Distribution Voltage Control Considering the Impact of PV Generation on Tap Changers and Autonomous Regulators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, vol. 29, iss. 1, pp. 182-192.
5. Viawan, F.A., Karlsson D. Coordinated Voltage and Reactive Power Control in the Presence of Distributed Generation. [Abstracts of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting «Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century»]. Pittsburgh, 2008, pp. 231-236.
6. Nagendra Rao P.S., Deekshit R.S. Radial Load Flow for Systems Having Distributed Generation and Controlled Q Sources. *Electric Power Components and Systems*, 2005, vol. 33, iss. 6, pp. 641-655.
7. Senjyu T., Miyazato Y., Yona A., Urasaki N., Funabashi T. Optimal Distribution Voltage Control and Coordination With Distributed Generation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, iss. 2, pp. 1236-1242.
8. Yandulskyy A.S., Trunina G.O. Vyznachennja zon efektyvnogo reguljuvannja naprugy dzherelamy rozoseredzhenoi' generacii' z invertornym pryjednannjam u rozpodil'nij elektrychnij merezhi [Identifying areas of effective regulation voltage source inverter of distributed generation from joining in the electrical distribution network]. *Naukovi praci Vinnyts'kogo nacional'nogo tehnic'nogo universytetu – Collected works of Vinnytsia National Technical University*, 2014, no.4. Available at: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/422/420> (Accessed 20 June 2017).
9. Trunina A.A. Zony efektyvnogo reguljuvannja naprugy dzherelamy rozoseredzhenoi' generacii' z invertornym pryjednannjam v rozpodil'nij elektrychnij merezhi [Areas of effective voltage control of distributed generation sources with inverter connecting to the electrical distribution network]. *Tehnichna elektrodynamika – Technical electrodynamics*, 2014, no.5, pp. 54-56. (Ukr.)

Рецензент: С.О. Кудря  
д-р техн. наук, проф., «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

Стаття надійшла 21.06.2017

УДК 621.317.1:621.3.015

© Зиновченко А.Н.<sup>1</sup>, Гаркуша Г.Г.<sup>2</sup>

### ИЗМЕРЕНИЕ АРГУМЕНТА НАПРЯЖЕНИЯ ОБРАТНОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В МЕТОДЕ МНОГОФАЗНОГО ВЫПРЯМЛЕНИЯ

*Приведен краткий анализ известных способов измерения параметров несимметрии трёхфазной системы напряжений. Наибольшей точностью обладает метод многофазного выпрямления, и в этом методе аргумент напряжения обратной последовательности можно измерить как фазовый сдвиг между напряжением второй гармоники выпрямленного линейного напряжения и напряжением второй гармоники выходного сигнала многофазного выпрямителя, питаемого от исследуемой системы напряжений. Показано, что введение корректирующего сигнала позволяет существенно повысить точность измерений.*

**Ключевые слова:** несимметрия напряжений, напряжение прямой последовательности, напряжение обратной последовательности, аргумент напряжения обратной последовательности, преобразователь числа фаз, многофазный выпрямитель.

<sup>1</sup> канд. техн. наук, доцент, Азовский морской институт национального университета Одесская морская академия, г. Мариуполь, [zynovchenko@gmail.com](mailto:zynovchenko@gmail.com)

<sup>2</sup> канд. техн. наук, профессор, Азовский морской институт национального университета Одесская морская академия, г. Мариуполь, [garkushash@gmail.com](mailto:garkushash@gmail.com)