

М. Й. Бурбело¹
 О. М. Кравець¹
 Ю. В. Лобода¹
 Р. О. Слободян¹

МОДЕЛЮВАННЯ SOFT OPEN POINT ЗА ВИПАДКОВОГО ХАРАКТЕРУ НАВАНТАЖЕННЯ

¹Вінницький національний технічний університет

Подано результати дослідження ефективності застосування *Soft Open Point (SOP)* — сучасних силових електронних пристроїв, що інтегруються в розподільні електричні мережі операторів систем розподілу. *SOP* встановлюються між суміжними фідерами замість традиційних нормально розімкнених роз'єднувачів і здатні виконувати низку важливих функцій, таких як перерозподіл активної потужності між фідерами, компенсація реактивної потужності, автоматичне керування структурою мережі, що, зі свого боку, викликає підвищення надійності електропостачання споживачів, зменшення втрат електроенергії та стабілізації рівня напруги в мережі.

Запропоновано метод керування *SOP* активною та реактивною потужностями. В основу керування покладено критерій мінімуму втрат активної потужності, для реалізації якого використано опосередковано пов'язані спади комплексних напруг у вузлах приєднання пристрою, що дозволяє підвищити точність керування та мінімізувати втрати активної потужності.

Наведені результати моделювання *Soft Open Point* в розподільних електричних мережах за випадкового характеру навантаження. У ході дослідження змодельовано алгоритми керування *SOP* за активною та реактивною потужностями для різних типів навантаження. Зокрема, моделювання показало, що зі встановленням *SOP* на суміжних фідерах можна досягти значного зниження втрат активної потужності та стабілізувати напругу в вузлах навантаження. Максимальне значення втрат напруги у відносно невеликих фідерах довжиною 4 км в результаті оптимізації за допомогою *SOP* зменшилося з 0,16 кВ до 0,12 кВ, а середні втрати потужності зменшилися з 5,1 кВт до 2,5 кВт.

Подані результати доводять ефективність впровадження *SOP* для оптимізації розподільних електричних мереж операторів систем розподілу в умовах випадкового характеру навантажень.

Ключові слова: електрична мережа, оптимізація перетоків активної та реактивної потужності, втрати активної потужності.

Вступ

Soft Open Point (SOP) — це силові електронні пристрої, які встановлюють між окремими фідерами замість нормально відкритих роз'єднувачів в розподільних мережах операторів систем розподілу (рис. 1).

SOP здатні забезпечувати ефективний перерозподіл активної потужності між фідерами, компенсацію реактивної потужності в кожному з фідерів з метою зменшення втрат електроенергії та відхилень напруги за нормальних умов роботи мережі, а також швидко ізоляцію несправності та відновлення електропостачання після усунення пошкодження [1]—[11].

У разі живлення фідерів від одних шин підстанції, напруги U_i , U_j двох фідерів різні, і може існувати різниця фаз θ_{ij} між цими напругами.

В [12] розглянуто принципи керування *SOP*, а в [13] проаналізовано можливість підвищення точності керування реактивною потужністю компенсуючих пристроїв в електричних мережах за напругою у вузлі k відносно балансувального вузла (вузла живлення):

$$Q_k \approx \text{Im} \left(\frac{\dot{U}_{\Delta k}}{Z_{kk}} U_{\text{ном}} \right), \quad (1)$$

де $\dot{U}_{\Delta k}$ — комплексна напруга вузла k електричної мережі відносно балансувального вузла; Z_{kk} — власний вузловий комплексний опір вузла k електричної мережі; $U_{\text{ном}}$ — номінальна напруга мережі.

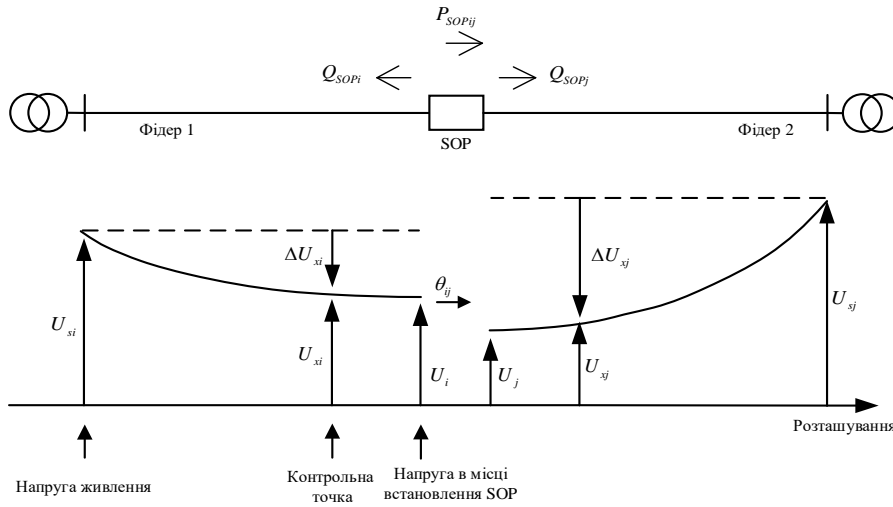


Рис. 1. Напруга на двох суміжних фідерах

Такий метод може бути використаний для керування SOP за реактивною потужністю і поширений на керування SOP за активною потужністю.

Метою роботи є розробка методу керування SOP за активною та реактивною потужностями та дослідження точності керування за випадкового характеру навантажень.

1. Метод керування SOP

Задача оптимальної компенсації реактивної потужності в суміжних фідерах формується у вигляді двох незалежних умов

$$Q_{k1} \approx \text{Im} \left(\frac{-\Delta \dot{U}_{k1}}{Z_{k1}} U_{\text{ном}} \right); \quad Q_{k2} \approx \text{Im} \left(\frac{-\Delta \dot{U}_{k2}}{Z_{k2}} U_{\text{ном}} \right), \quad (2)$$

де $\Delta \dot{U}_{k1}, \Delta \dot{U}_{k2}$ — комплексні спади напруг в суміжних фідерах; Z_{k1}, Z_{k2} — комплексні опори фідерів.

У випадку виконання цих умов втрати активної потужності в фідерах будуть мінімальними.

Задача оптимізації перетоків активної потужності між суміжними фідерами фактично може бути зведена до вирівнювання спадів напруг на суміжних фідерах

$$P_k \approx \text{Re} \left(\frac{\text{Re} \Delta \dot{U}_{k2} - \text{Re} \Delta \dot{U}_{k1}}{Z_{k1} + Z_{k2}} U_{\text{ном}} \right). \quad (3)$$

У разі виконання умов (2), (3) втрати напруги в фідерах будуть однаковими і мінімальними. Мінімальними будуть і втрати активної потужності.

2. Моделювання SOP

На рис. 2 показано схему заміщення двох суміжних ліній, кожна з яких має дві дільниці. Дільниці виконані проводом АС 50 (перша і друга) і АС 35 (третя і четверта). Довжина кожної дільниці 2 км.

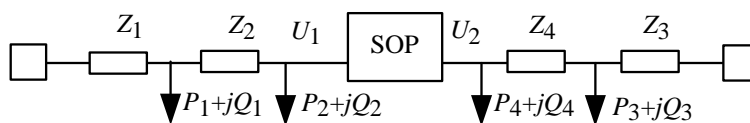


Рис. 2. Схема заміщення суміжних ліній електропередачі

Для моделювання повної потужності використано нормальний розподіл випадкових незалежних величин, а для моделювання коефіцієнта потужності — рівномірний розподіл випадкових

незалежних величин в діапазоні 0,5...0,95. Функції розподілу активної та реактивної потужності у вузлах навантаження подано відповідно на рис. 3 та рис. 4.

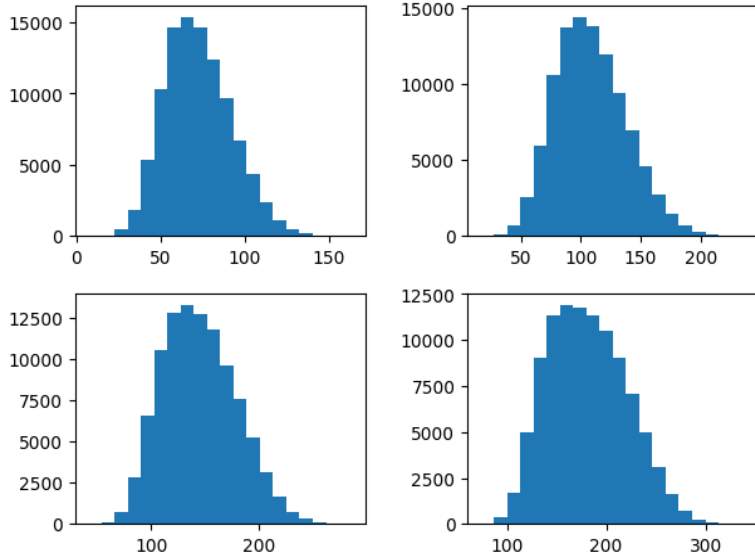


Рис. 3. Функції розподілу активної потужності у вузлах навантаження

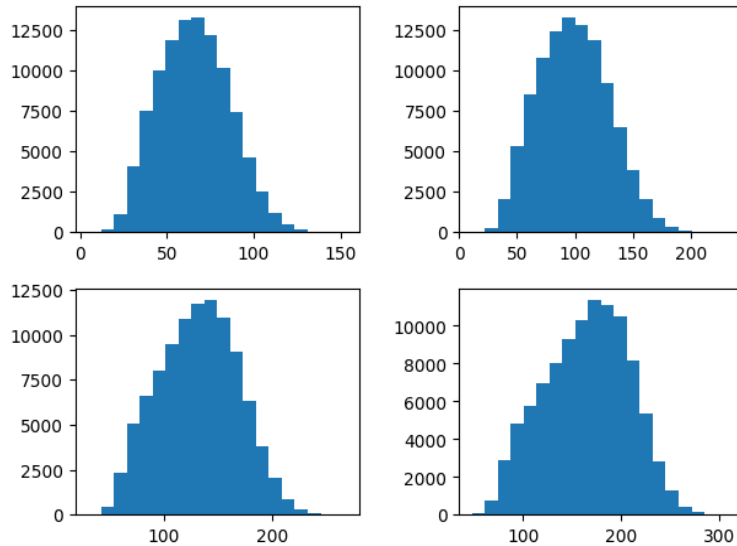


Рис. 4. Функції розподілу реактивної потужності у вузлах навантаження

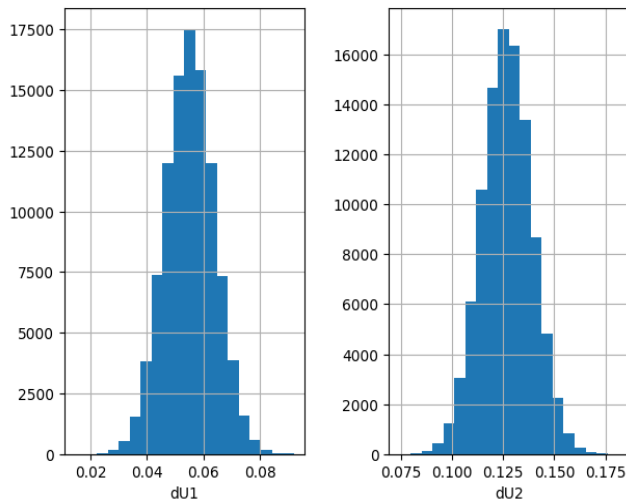


Рис. 5. Функції розподілу втрат напруги до встановлення SOP

Функції розподілу втрат напруги в лінії до встановлення SOP показано на рис. 5. Як впливає з рис. 5, максимальне значення втрат напруги в першій і другій лініях відповідно становлять 0,08 кВ та 0,16 кВ.

Функції розподілу реактивної потужності, яка генерується SOP в першій та другій фідери, що забезпечують мінімальне значення втрат активної потужності в лініях електропередачі, визначених за формулою (2), показано на рис. 6. Максимальне сумарне значення реактивної потужності приблизно становить 500 кВАр.

Функція розподілу активної потужності, що передається SOP з першого на другий фідер, яка забезпечує однакове значення втрат напруги в лініях електропередачі, визначених за формулою (3), показано на рис. 7. Максимальне значення перетоку активної потужності приблизно становить 150 кВт.

Функції розподілу втрат напруги в лініях після компенсації показано на рис. 8, з якого видно, максимальне значення втрат напруги в лінії 2 зменшилось з 0,16 кВ до 0,12 кВ.

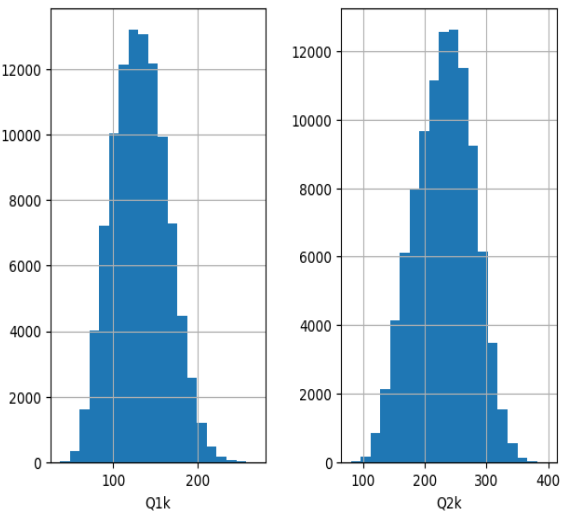


Рис. 6. Функції розподілу реактивної потужності, що генерується SOP в першій та другій фідери

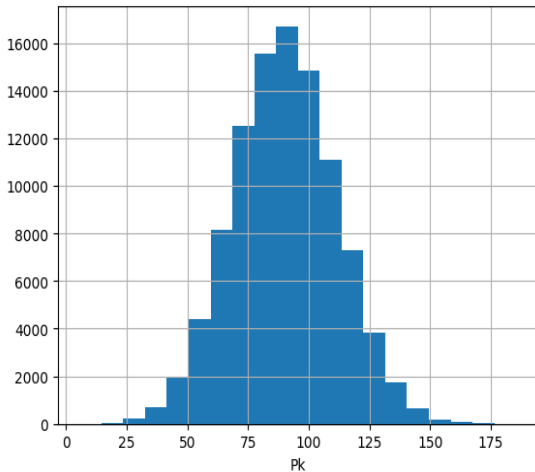


Рис. 7. Функція розподілу активної потужності, що передається SOP з першого на другий фідер

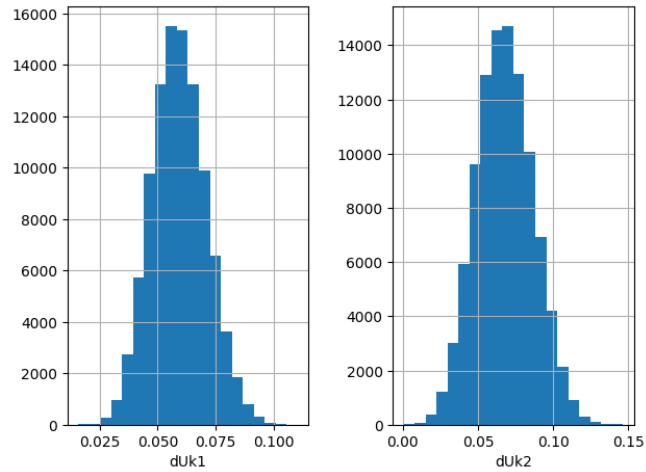


Рис. 8. Функції розподілу втрат напруги після встановлення SOP

Функції розподілу втрат активної потужності в лінії, що зумовлені перетоком реактивної та активної потужностей, до і після встановлення *SOP* показано відповідно на рис. 9 та рис. 10. Середнє значення втрат, зумовлених перетоками реактивної потужності, зменшилось з 2,34 кВт до 0,17 кВт. Середнє значення втрат, зумовлених перетоком активної потужності, зменшилось з 2,78 кВт до 2,32 кВт. Середнє значення втрат потужності в лініях зменшилось з 4,7 кВт до 2,3 кВт.

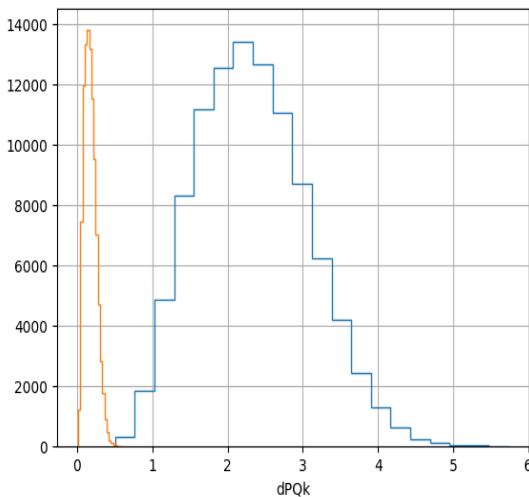


Рис. 9. Функції розподілу втрат активної потужності в лініях, що зумовлені перетоком реактивної потужності, до і після встановлення SOP

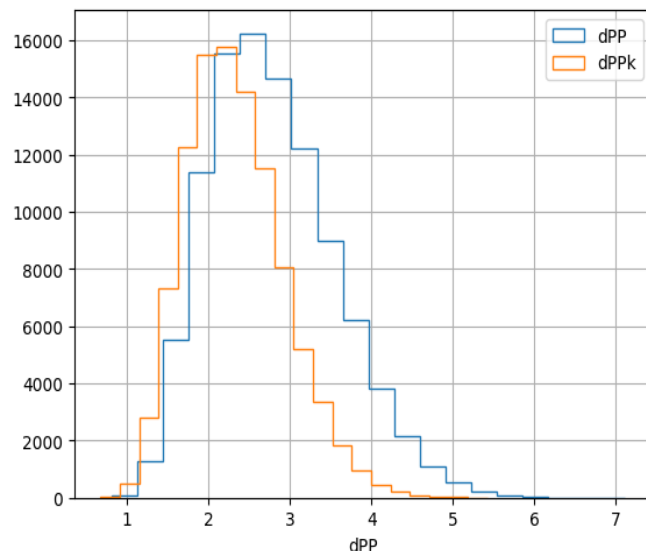


Рис. 10. Функції розподілу втрат активної потужності в лініях, що зумовлені перетоком активної потужності, до і після встановлення SOP

Додатковий аналіз показує, що ефективним також є використання керування за активною потужністю з частковою компенсацією реактивної потужності.

Висновки

Запропоновано метод керування Soft Open Point за активною та реактивною потужностями, як основу керування за реактивною потужністю взято критерій мінімуму втрат активної потужності. За основу керування за активною потужністю взято критерій мінімуму втрат напруги. Метод керування SOP проаналізовано за випадкового характеру навантаження. У ході дослідження змодельовано алгоритми оптимального керування SOP за активною та реактивною потужностями для різних типів навантаження з одночасним використанням обох критеріїв. Зокрема, моделювання показало, що у разі встановлення SOP на суміжних фідерах можна досягти значного зниження втрат активної потужності та стабілізувати напругу в вузлах навантаження. Максимальне значення

втрат напруги після оптимізації за допомогою SOP зменшилося з 0,16 кВ до 0,12 кВ, а математичні сподівання втрат потужності зменшилися з 5,1 кВт до 2,5 кВт.

Подані результати доводять ефективність впровадження Soft Open Point для оптимізації розподільних електричних мереж в умовах випадкового характеру навантажень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] C. Wang, J. Wu, J. Ekanayake, and N. Jenkins, *Smart Electricity Distribution Networks*. CRC Press, 2017, 416 p.
- [2] J. M. Bloemink, and T. C. Green, "Benefits of Distribution-Level Power Electronics for Supporting Distributed Generation Growth," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 911-919, April. 2013.
- [3] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, and T. Green, "Operating principle of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation," *Applied Energy*, no. 164, pp. 245-257, 2016.
- [4] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, and T. Green, "Benefits Analysis of Soft Open Points for Electrical Distribution Network Operation," *Applied Energy*, no. 165, pp. 36-47, 2016.
- [5] Q. Qi, J. Wu, and C. Long, "Multi-objective Operation Optimization of an Electrical Distribution Network with Soft Open Point," *Applied Energy*, no. 208, pp. 734-744, 2017.
- [6] V. Popov, O. Yarmoliuk, V. Tkachenko, I. Frolov, V. Natalych, "Feature of Optimal Network Reconfiguration Problem Statement in Distribution Systems with Local Energy Sources," *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*, вип. 4(135), с. 53-62, 2022.
- [7] A. Farzamnia, S. Marjani, S. Galvani and K. T. T. Kin, "Optimal Allocation of Soft Open Point Devices in Renewable Energy Integrated Distribution Systems," *IEEE Access*. vol. 10, 2022.
- [8] Alwash Shamam, Ibrahim Sarmad, and M. Abed Azher, "Distribution System Reconfiguration with Soft Open Point for Power Loss Reduction in Distribution Systems Based on Hybrid Water Cycle Algorithm," *Energies* 2023, 16, 199. 22 p.
- [9] Ferry A. Viawan, "Voltage Control and Voltage Stability of Power Distribution Systems in the Presence of Distributed Generation." in Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden, 2008, 157 p.
- [10] О. С. Яндутьський, Г. О. Труніна, А. Б. Нестерко, *Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії*, моногр. Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021, 191 с.
- [11] X. P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*, 2nd edition, Berlin: Springer Verlag, 2012, 552 p.
- [12] Ю. В. Лобода, і Р. О. Слободян, «Застосування Soft Open Point для оптимізації втрат електроенергії в розподільних електричних мережах», *Вісник Хмельницького національного університету*. Технічні науки, № 2, с. 166-170, 2024.
- [13] М. Й. Бурбело, і Р. О. Слободян, «Стратегія керування джерелами реактивної потужності в розподільних електричних мережах для оптимізації втрат електроенергії», *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, № 1, с. 209-214, 2024.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.08.2024

Бурбело Михайло Йосипович — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com ;

Кравець Олександр Миколайович — канд. техн. наук, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: omkravec@gmail.com ;

Лобода Юрій Васильович — д-р філософії, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: lobodaeseem@gmail.com ;

Слободян Руслан Олександрович — аспірант кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, ruslan.slobodyan@gmail.com .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

M. Yo. Burbelo¹
O. M. Kravec¹
Yu. V. Loboda¹
R. O. Slobodian¹

Simulation of Soft Open Point under Random Character of Load

¹Vinnitsia National Technical University

The article presents the results of a study of the efficiency of Soft Open Point (SOP) usage — modern power electronic devices that are integrated into the distribution networks of distribution system operators. SOPs are installed between adjacent feeders instead of traditional normally open disconnectors and are able to perform a number of important functions, such as redistribution of active power between feeders, compensation of reactive power, automatic control of the network structure, which, in turn, leads to increased reliability of electricity supply to consumers, reduction of electricity losses and stabilization of the voltage level in the network.

The article proposes a SOP control method for active and reactive power. The control is based on the criterion of the minimum loss of active power, for the implementation of which the indirectly related drops of complex voltages in the connection nodes of the device are used, which enables to improve the accuracy of control and minimize the loss of active power.

The results of Soft Open Point modeling in distribution electric networks with a random nature of the load are given. In the course of the study, SOP control algorithms were simulated for active and reactive power for different types of load. In particular, simulations showed that when installing SOP on adjacent feeders, it is possible to achieve a significant reduction in active power losses and stabilize the voltage in the load nodes. The maximum value of voltage losses in the relatively small 4 km long feeders was reduced from 0.16 kV to 0.12 kV by the SOP optimization, and the average power losses were reduced from 5.1 kW to 2.5 kW.

The presented results prove the effectiveness of the implementation of SOP for the optimization of distribution electric networks of distribution systems operators in conditions of random nature of loads.

Keywords: electric network, optimization of active and reactive power flows, active power losses.

Burbelo Michailo Yo. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Kravets Oleksandr M. — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: omkravec@gmail.com ;

Loboda Yurii V. — Ph. D., Associate Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: lobodaeseem@gmail.com;

Slobodian Ruslan Oleksandrovych — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: ruslan.slobodyan@gmail.com