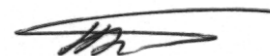


Вінницький національний технічний університет
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ПІРНЯК ВІКТОР МИХАЙЛОВИЧ



УДК 621.316.13

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ ПРИНЦИПУ ГАМІЛЬТОНА-ОСТРОГРАДСЬКОГО

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



В.М. Пірняк

Науковий керівник: Лежнюк Петро Дем'янович, доктор технічних наук,
професор

Вінниця – 2018

АНОТАЦІЯ

Пірняк В. М. Методи та засоби оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах на основі принципу Гамільтона-Остроградського. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 «Електричні станції, мережі і системи». – Вінницький національний технічний університет, Вінниця, 2018.

Робота присвячена розв'язанню задачі зменшення втрат та підвищення якості напруги у електромережах, шляхом розроблення методів та засобів оптимізації потоків реактивної потужності на основі принципу Гамільтона-Остроградського.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та задачі дослідження. Зазначено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи, особистий внесок здобувача та публікації. Зазначено зв'язок роботи з науковими програмами, темами.

У першому розділі проаналізовано проблеми оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах (ЕМ) з частковою децентралізацією живлення. За результатами аналізу відомих методів та засобів вирішення проблеми виявлено низку недоліків, які вимагають усунення. Показано, що для підвищення адекватності визначення оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ необхідно враховувати зміни у структурі електроспоживання, надійність електромереж та якість інформаційного забезпечення. Крім того важливим фактором є вплив розосереджених джерел енергії (РДЕ) на режими електромереж. Показано можливість визначення оптимальних параметрів та місць приєднання джерел реактивної потужності (ДРП) з використанням принципу Гамільтона-Остроградського. Проаналізовано сучасні тенденції щодо автоматизації розподільних електромереж. Визначено напрямки

вдосконалення систем керування ДРП групової компенсації. Зокрема, обґрунтовано доцільність децентралізації таких систем з використанням локальних систем автоматичного керування (САК).

У другому розділі проаналізовано особливості сучасних розподільних електромереж з огляду на проблему оптимізації перетікання реактивної потужності. Показано, що значна зношеність основного обладнання ЕМ України та недостатня оснащеність засобами моніторингу негативно впливають на ефективність планування заходів щодо зменшення втрат та підвищення якості напруги. За результатами досліджень запропоновано метод формування комплексного показника обґрунтованої ефективності впровадження ДРП. Він забезпечує врахування надійності електромережі, якості напруги у її вузлах, а також точності визначення корисного відпуску та втрат електроенергії. Це дозволяє вилучати з області пошуку оптимальних місць встановлення ДРП фрагменти мереж з частими відмовами або без засобів моніторингу режимів. Отже, підвищується обґрунтованість рішень щодо впровадження групової компенсації реактивної потужності.

За результатами досліджень обґрунтовано доцільність використання принципу Гамільтона-Остроградського для підвищення надійності та швидкодії розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП у електричних мережах за критерієм максимуму рентабельності капіталовкладень. Використовуючи модель «ідеального» режиму ЕМ цю задачу нелінійної оптимізації зведено до принципово простішої задачі пошуку екстремального струморозподілу в заступній r -схемі мережі. Для врахування економічних факторів оптимізаційної задачі схему «ідеального» режиму ЕМ доповнено економічними опорами ДРП. Вирази для визначення економічних опорів отримано для різних постановок задачі оптимізації параметрів та умов функціонування ДРП в електромережах. Для врахування активних обмежень, зокрема обмежень на відхилення напруги в ЕМ, запропоновано метод коригування оптимальних потужностей ДРП. Він передбачає розв'язання допоміжної лінеаризованої задачі оптимізації. Результати досліджень

дозволили розширити область застосування підходу, що базується на моделюванні «ідеальних» режимів ЕМ, а також підвищити ефективність проектних рішень.

У третьому розділі на основі імітації «ідеальних» режимів ЕМ розроблено алгоритми визначення оптимального рівня групової компенсації реактивних навантажень за критерієм максимальної рентабельності. Крім того запропоновано алгоритм багатокритеріальної оптимізації потужностей та розміщення ДРП в електричних мережах. Показано, що алгоритмічно задачі оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ незалежно від критерію оптимальності, можуть бути зведені до оптимізації режиму певної фіктивної електромережі за втратами активної потужності. Виходячи з цього, оптимальне навантаження ДРП можна визначати з результатів розрахунку усталеного режиму ЕМ за її заступною r -схемою. Для забезпечення обмежень за напругою у вузлах мережі значення потужностей ДРП та коефіцієнтів трансформації уточнюються за результатами розв'язання системи вузлових рівнянь ЕМ. Остання формується за результатами розрахунку економічного струморозподілу.

Для підвищення рівня автоматизації оперативного керування ДРП у розподільних мережах вдосконалено структурну схему системи керування. Отримано умови оптимальності перетікань реактивної потужності з урахуванням витрат на експлуатацію ДРП та якості електроенергії. Для цього використано метод оптимізації інтегральних функцій Понтрягіна. Розроблено алгоритми визначення налагоджувальних параметрів САК, які локально забезпечують оптимізацію реактивних перетікань у мережах. Періодичне коригування їх налаштувань вимагає проведення значної кількості імітаційних розрахунків з урахуванням взаємозв'язків між окремими ДРП. Тому для реалізації системи керування запропоновано двоконтурну схему з децентралізацією функцій автоматичного керування. Такий підхід забезпечує високу надійність та ефективність системи.

У четвертому розділі прикладі реальних електричних мереж 110-35-10

кВ ПАТ «Вінницяобленерго» показано адекватність та ефективність методу оптимізації перетікань реактивної потужності, який базується на визначенні та реалізації «ідеального» струморозподілу в електричних мережах. Так, вдосконалений програмний засіб було використано для техніко-економічного обґрунтування впровадження ДРП в електромережах 110-35 кВ ПАТ «Вінницяобленерго». За результатами досліджень визначено оптимальну послідовність впровадження ДРП, яка характеризується високою рентабельністю. Очікувана окупність встановлення 56 ДРП за кумулятивним ефектом не перевищує 6 років. Врахування надійності електромереж, якості електроенергії та точності інформаційного забезпечення дозволило оцінити обґрунтований ефект. Він виявився нижчим на 12%, що призвело до підвищення терміну окупності до 7 років. Використовуючи аналіз чутливості визначено перелік ДРП, що мають найбільший вплив на втрати та рівні напруги в ЕМ. Імітаційні розрахунки показали, що введення перших 13 пристроїв з автоматичним керуванням на 7 підстанціях зменшує термін окупності до 4 років. Їх впровадження забезпечує біля 75% ефекту, що може бути отриманий від повної реалізації проекту. При цьому укрупнена вартість становить лише 29% від сукупної вартості проекту.

На прикладі Вінницьких міських електромереж 10 кВ було підтверджено ефективність запропонованого методу оцінювання обґрунтованого ефекту від ДРП. Показано, що встановлення додаткових ДРП у електричних мережах, які характеризуються високою чутливістю втрат, супроводжується високим додатковим прибутком. Останній не можливо оцінити адекватно без врахування надійності електромереж та якості інформаційного забезпечення. Так, врахування означених факторів дозволило обґрунтовано зменшити оптимальну встановлену потужність ДРП для окремих фрагментів досліджуваних мереж до 3 разів. Перенесення ДРП на підстанції з нижчим розрахунковим ефектом зменшення втрат, але кращими показниками надійності та якості інформаційного забезпечення, дозволило зменшити ризики реалізації проекту та підвищити обґрунтованість

капіталовкладень.

На прикладі ДРП, що експлуатуються у Вінницьких міських електричних мережах, проведено натурні експерименти з визначення уставок для локальної компенсації реактивної потужності. Показано, що період їх актуальності становить від 1 до 3 місяців. У випадку використання ДРП для групової компенсації через взаємовплив вузлів навантаження ЕМ, уставки по коефіцієнтах потужності необхідно періодично уточнювати протягом доби.

Для визначення періодів актуальності уставок запропоновано алгоритм, який передбачає аналіз кореляції оптимальних потужностей ДРП з локальним реактивним споживанням. Послідовний зсув діапазону порівняння дозволяє визначати границі періодів, як моменти часу, що відповідають локальним максимумам квадратичного критерію Пірсона.

Для визначення уставок у межах періоду актуальності запропоновано використовувати імітаційну модель САК ДРП. За її допомогою граничні коефіцієнти потужності підбираються за методом найменших квадратів відхилень між оптимальними та імітованими потужностями ДРП. Уставки по часу для САК визначаються з урахуванням швидкості зміни осереднених оптимальних потужностей ДРП у межах періоду актуальності.

Таким чином, в дисертаційній роботі отримано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності керування потоками реактивної потужності у електричних мережах. Воно полягає у розробленні на основі принципу Гамільтона-Остроградського математичної моделі критерію оптимальності для вказаної задачі, методів оптимізації розміщення засобів компенсації реактивної потужності в електричних мережах, а також засобів оптимального керування компенсуючими установками для таких мереж. Їх реалізація дозволяє підвищити ефективність сумісного використання електричних мереж енергопостачальними компаніями та активними споживачами.

Ключові слова: електрична мережа, перетікання реактивної енергії, багатofакторна оптимізація, принцип Гамільтона-Остроградського,

«ідеальний» режим, економічний опір, джерело реактивної потужності.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

[1] В.М. Пірняк, П.Д. Лежнюк, О.Д. Демов, та Ю.Ю. Півнюк, «Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності для вузлів електричної мережі,» *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, №3, 2013. [online]. Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/370>.

[2] В.В. Кулик та В.М. Пірняк, «Оптимізація перетікань реактивної енергії в розподільних електричних мережах з використанням принципу найменшої дії,» *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 6, с. 71-79, 2017.

[3] V. Kulyk, O. Burykin, and V. Pirnyak, «Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes,» *Technology audit and production reserves*, vol. 40, no. 2/1, pp. 59-65, 2018.

[4] В.В. Кулик та В.М. Пірняк, «Оптимізація розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі з урахуванням активних обмежень,» *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 29(68), Ч. 2, № 5, с. 108-112, 2018.

[5] В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, та В.М. Пірняк, «Комплексне оцінювання ефективності встановлення додаткових джерел реактивної потужності у розподільних електричних мережах,» *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*, № 4 (124), с. 103-111, 2018.

[6] П.Д. Лежнюк, Ю.В. Грицюк, та В.М. Пірняк, «Регулювання реактивної потужності й напруги в електричних мережах як допоміжна послуга,» *Наукові праці Вінницького національного університету*, №2, 2012. [online]. Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/321>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

[7] П. Д. Лежнюк, О. В. Слободянюк, та В. М. Пірняк, «Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності на основі коефіцієнтів

розподілу втрат,» у *Матеріалах XI Міжнародної науково-технічної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)»*, Вінниця, 2012, с. 168.

[8] О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк, та В. М. Пірняк, «Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності на основі відносних спадів напруги,» у *Матеріалах II Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2013)»*, Вінниця, 2013, с. 34.

[9] В. М. Пірняк, «Оптимізація перетікань реактивної енергії в електричних мережах з використанням принципу найменшої дії,» у *Матеріалах IV Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2017)»*, Вінниця, 2017. [online]. Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okeu/okeu/paper/view/3502/2961>.

[10] Volodymyr Kulyk, Oleksandr Burykin, Malogulko Juliya, and Pirnyak Viktor. «Optimization of reactive energy flows in the electric grid taking into account allowable voltage fluctuations,» in *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 265-270. (Індексується у SCOPUS).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

[11] В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, та О. В. Слободянюк, «Коефіцієнти розподілу втрат, як інструмент для розрахунку економічного еквіваленту реактивної потужності,» *Новини енергетики*, № 9, с. 34-37, 2012.

[12] О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк, П. Д. Лежнюк, та В. М. Пірняк, «Економічні еквіваленти реактивної потужності, як відносні спади напруги,» *Енергетика та електрифікація*, №8, с. 17-20, 2013.

[13] В. М. Пірняк, О. Д. Демов, О. В. Слободянюк, та О. П. Паламарчук, «Декомпозиція функції зниження втрат при розрахунку компенсації реактивної потужності на основі формули Тейлора,» *Енергетика та електрифікація*, № 4, с. 55-57, 2012.

ABSTRACT

Pyrnyak V.M. Methods and means of optimization of reactive power flows in power distribution networks on the basis of the Hamilton-Ostrogradsky principle. – Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

A thesis submitted for the candidate degree in technical sciences on the speciality 05.14.02 "Electric power stations, networks and systems". – Vinnytsia National Technical University, Vinnytsya, 2018.

The work is devoted to solving the problem of reducing losses and improving the quality of voltage in the electricity grids, by developing methods and means for optimizing reactive power flows based on the Hamilton-Ostrogradsky principle.

The introduction substantiates the relevance of the topic of the dissertation, formulates the purpose and objectives of the research. The scientific novelty and practical value of the received results are indicated. Information is given on the testing of work, the personal contribution of the competitor and the publication. The connection of work with scientific programs, themes is indicated.

The first section analyzes the problems of optimization of reactive power flows in power distribution networks (DN) with partial decentralization of power supply. The results of the analysis of known methods and means of solving the problem revealed a number of shortcomings that require removal. It has been shown that in order to increase the adequacy of determining the optimal levels of compensation of reactive power in the DN, changes in the structure of electricity consumption, reliability of the electricity grids and the quality of information support should be taken into account. In addition, an important factor is the impact of dispersed energy sources (DESSs) on power grid regimes. It is shown the possibility of determining the optimal parameters and places of joining sources of reactive power (RPSs) using the Hamilton-Ostrogradsky principle. The modern tendencies concerning the automation of distribution electric networks are analyzed. The directions of improvement of the control systems of the RPS of

group compensation are determined. In particular, the expediency of decentralization of such systems with the use of local automation control systems (SACs) has been substantiated.

In the second section the features of modern distribution networks are analyzed in view of the problem of optimizing the flow of reactive power. It has been shown that significant deterioration of the main equipment of DN Ukraine and insufficient equipment by means of monitoring negatively affect the effectiveness of planning measures for reducing losses and improving the quality of stress. According to the results of the research, the method of forming a complex indicator of the guaranteed effectiveness of the implementation of the RPS is proposed. It provides consideration of the reliability of the power grid, the quality of voltage at its nodes, as well as the accuracy of determining the useful leave and electricity losses. This allows you to remove from the search area the optimal places for installing RPS fragments of networks with frequent failures or without monitoring modes. Consequently, the rationale for decisions on the implementation of group reactive power compensation is increased.

According to the results of the research, the expediency of using the Hamilton-Ostrogradsky principle to improve the reliability and speed of the solution of the problem of optimization of the allocation of electric power transmission networks on the criterion of maximum profitability of investments is substantiated. Using the model of the "ideal" mode of DN, this nonlinear optimization problem is reduced to a fundamentally simpler task of searching for extreme current distribution in the subnetting r-scheme of the network. For take into account the economic factors of the optimization problem, the scheme of "ideal" DN mode is supplemented with the economic supports of the RPS. Expressions for determination of economic impediments are obtained for various statements of the problem of optimization of parameters and conditions of the operation of the electric power transmission system. For take into account active limitations, in particular restrictions on voltage deviations in EM, a method of correction of optimal capacities of the RPS is proposed. It involves solving the

auxiliary linearized optimization problem. The results of the research allowed to extend the scope of application based on simulation of "ideal" DN modes, as well as to increase the efficiency of design solutions.

In the third chapter, based on the simulation of "ideal" DN modes, algorithms for determining the optimal level of group compensation of reactive loads by the criterion of maximum profitability were developed. In addition, an algorithm for multi-criteria optimization of capacities and allocation of electric power transmission lines is proposed. It is shown that algorithmically, the problems of optimization of jet power flows in the DN regardless of the optimality criterion can be reduced to optimizing the regime of a certain fictitious power grid for losses of active power. Proceeding from this, the optimal load of the RPS can be determined from the results of calculating the steady-state DN by its sub-r-scheme. In order to provide voltage constraints at the network nodes, the values of the capacities of the RPS and the transformation factors are specified according to the results of the solution of the DN nodal equation system. It is formed on the basis of the calculation of economic current distribution.

In order to increase the level of automation of operational control of RPS in distribution networks, the structural scheme of the control system has been improved. The conditions of optimality of reactive power flows are considered, taking into account the expenses for the operation of the electric power transmission line and the quality of electric power. To do this, we use the method of optimizing Pontryagin integral functions. The algorithms for determining the adjustment parameters of the SAC, which locally provide the optimization of reactive fluxes in the networks, are developed. Periodically adjusting their settings requires a large number of simulation calculations, taking into account the interrelationships between individual RPSs. Therefore, for the implementation of the control system, a two-circuit diagram with a decentralization of automatic control functions is proposed. This approach ensures high reliability and efficiency of the system.

In the fourth section the adequacy and efficiency of the method of

optimization of reactive power flows which is based on the definition and implementation of "ideal" current distribution in electric networks are shown. Thus, an improved software tool was used for the feasibility study on the implementation of the transmission grid in the 110-35 kV electricity grids of PJSC "Vinnytsyaoblenergo". According to the results of the research, the optimal sequence of the implementation of a high-profit, high-yielding RPS is determined. The expected payback of the installation of 56 RPSs for a cumulative effect does not exceed 6 years. Taking into account the reliability of the electricity grids, the quality of the electricity and the accuracy of the information security, it was possible to assess the guaranteed effect. It was lower by 12%, which led to an increase in the payback period of up to 7 years. Using the sensitivity analysis, a list of RPSs that have the greatest impact on the loss and voltage levels in the DN are determined. Imitation calculations have shown that the introduction of the first 13 devices with automatic control at 7 substations reduces the payback period to 4 years. Their implementation provides about 75% of the effect that can be obtained from the full implementation of the project. At the same time, the enlarged value is only 29% of the total cost of the project.

On the example of the 10 kV Vinnytsia city DN, the effectiveness of the proposed method for evaluating the guaranteed effect of the RPS was confirmed. It is shown that the installation of additional RPSs in electric networks, which are characterized by high loss sensitivity, is accompanied by high additional profits. The latter can not be estimated adequately without considering the reliability of the power grids and the quality of information provision. Thus, taking into account the above factors, it was possible to substantially reduce the optimal installed power of the RPS for individual fragments of the studied networks up to 3 times. The transfer of the RPS to substations with a lower settlement effect of loss reduction, but better indicators of reliability and quality of information provision, has allowed to reduce the risks of project implementation and increase the substantiality of investments.

On the example of RPS operated in Vinnytsia city DN, experiments were

carried out to determine the settings for local compensation of reactive power. It is shown that the period of their relevance is from 1 to 3 months. In the case of the use of RPS for group compensation through the interaction of nodes DM load, the power factor settings need to be periodically updated within a day.

To determine the validity periods of the settings, an algorithm is proposed, which involves analyzing the correlation of optimal capacities of the RPS with local reactive consumption. The sequential shift of the comparison range allows you to determine the boundaries of periods as time points corresponding to the local maxima of the quadratic Pearson criterion.

In order to determine the settings within the period of relevance, it is proposed to use the simulation model SAC RPS. With its help, the limiting power factors are selected by the method of least squares of deviations between optimal and simulated RPSs. The time settings for the SAC are determined taking into account the rate of change of the average optimal capacity of the RPS within the period of relevance.

Thus, in the dissertation the new solution of the actual scientific and applied problem of increasing the efficiency of control of reactive power flows in electric networks is obtained. It consists in developing, on the basis of the Hamilton-Ostrogradsky's mathematical model, the optimality criterion for the given problem, the methods of optimizing the allocation of reactive power compensation facilities in power grids, and also the means of optimal control of compensating installations for such networks. Their implementation allows to increase the efficiency of the joint use of electricity grids by power supply companies and active consumers.

Key words: electric network, reactive power flow, multifactorial optimization, Hamilton-Ostrogradsky principle, "ideal" mode, economic resistance, reactive power sources.

THE LIST OF THE APPLICANT'S PUBLICATION BY DISSERTATION:

Proceedings where basic scientific results of thesis are published:

[1] V.M. Pirnyak, P.D. Lezhnyuk, O.D. Demov, and Yu.Yu. Pivniuk, "Calculating the economic equivalents of reactive power for the nodes of the electrical

network," *Scientific works of the Vinnytsia National Technical University*, No. 3, 2013. [online]. Available: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/370>.

[2] V.V. Kulyk and V.M. Pirnyak, "Optimization of reactive power flows in distribution electric networks using the least action principle," *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, No. 6, pp. 71-79, 2017.

[3] V. Kulyk, O. Burykin, and V. Pirnyak, "Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes," *Technology audit and production reserves*, No. 2/1 (40) , pp. 59-65, 2018.

[4] V.V. Kulyk and V.M. Prinyak, "Optimization of the location of reactive power sources in the electric network, taking into account the active limitations," *Scientific notes of the Taurida National University named after V.I. Vernadsky. Series: Engineering*, vol. 29 (68), p. 2, no. 5, pp. 108-112, 2018.

[5] V.V. Kulyk, O.B. Burykin, and V.M. Pirnyak, "Integrated Assessment of the Efficiency of Installing Additional Sources of Reactive Power in Distribution Electric Networks," *Bulletin of the Kyiv National University of Technology and Design. Series: Technical Sciences*, vol. 124, no. 4, pp. 103-111, 2018.

[6] P.D. Lezhnyuk, Yu.V. Hrytsyuk, and V.M. Pirniak, "Regulation of reactive power and voltage in electric networks as an auxiliary service," *Scientific works of Vinnytsia National Technical University*, no. 2, 2012. [online]. Available: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/321>

Proceedings that certify an improvement of thesis materials:

[7] P. D. Lezhnyuk, O. V. Slobodyanyuk, and V. M. Pirnyak, "Calculating the economic equivalents of reactive power on the basis of losses distribution coefficients," in *Proc. of the XI Int. Scientific and Technical Conf. "Control and management in complex systems (KUSS-2012) "*, Vinnytsya, 2012, pp. 168.

[8] O. D. Demov, Yu. Yu. Pivniuk, and V. M. Pirnyak, "Calculating the economic equivalents of reactive power on the basis of relative voltage drops," in *Proc. of the 2nd Int. Scientific and Technical Conf. "Optimal Electrical Control (OKEU-2013)»*, Vinnytsya, 2013, pp. 34.

[9] V. M. Pirnyak, "Optimization of the jet energy flows in electric networks using the principle of least action," in *Proc. of the IV Int. Scientific and Technical*

Conf. "Optimal Electrical Control (OKEU-2017)", Vinnytsya, 2017. [online]. Available: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okey/okey/paper/view/3502/2961>

[10] Volodymyr Kulyk, Oleksandr Burykin, Malogulko Juliya, and Pirnyak Viktor. "Optimization of reactive energy flows in the electric grid taking into account allowable voltage fluctuations," in *Proc. of the 2018 IEEE 3rd Int. Conf. on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 265-270. (Indexed to SCOPUS).

Proceedings, which additionally reflect the scientific results of the thesis:

[11] V. M. Pirnyak, P. D. Lezhnyuk, O. D. Demov, and O. V. Slobodyanyuk, "Loss Distribution Coefficients as a Tool for Calculating the Economic Equivalent of Reactive Power," *Energy News*, no. 9, pp. 34-37, 2012.

[12] O. D. Demov, Yu. Yu. Pivniuk, P. D. Lezhnyuk, and V. M. Pyrniak, "Economic equivalents of reactive power as relative voltage drop," *Power engineering and electrification*, no. 8, pp. 17-20, 2013.

[13] V.M. Pirnyak, O.D. Demov, O.V. Slobodyanyuk, and O.P. Palamarchuk, "Decomposition of the loss reduction function for calculating the compensation of reactive power on the basis of Taylor's formula," *Power Engineering and Electrification*, no. 4, pp. 55-57, 2012.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

ВСТУП..... 21

РОЗДІЛ 1 ПРОБЛЕМА КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

В СУЧАСНИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

1.1 Особливості сучасних електричних мереж з огляду на проблему керування перетіканнями реактивної потужності **Error! Bookmark not defined.**

1.2 Методи розв'язання задач оптимізації перетікань реактивної потужності в електричних мережах **Error! Bookmark not defined.**

1.3 Оптимізація режимів електричних мереж на основі принципу найменшої дії..... **Error! Bookmark not defined.**

1.4 Автоматизація оптимального керування компенсацією реактивної потужності в електромережах з застосуванням *Smart Grid* **Error! Bookmark not defined.**

1.5 Висновки по розділу 1 **Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 2 ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМПЕНСАЦІЇ

РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ ТА

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ КОМПЕНСУВАЛЬНИХ УСТАНОВОК **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

2.1 Особливості електричних мереж енергопостачальних компаній в контексті задачі оптимізації перетікань реактивної потужності **Error! Bookmark not defined.**

2.2 Метод комплексного оцінювання ефективності функціонування ДРП у розподільних електромережах **Error! Bookmark not defined.**

2.2.1 Комплексне оцінювання якості функціонування розподільних електричних мереж **Error! Bookmark not defined.**

2.2.2 Проблема якості інформаційного забезпечення для визначення втрат електроенергії в електричних мережах **Error! Bookmark not defined.**

2.2.3 Оцінювання обґрунтованого ефекту від впровадження КРП з урахуванням недосконалості вихідної інформації **Error! Bookmark not defined.**

2.3 Оптимізація розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі на основі моделювання її ідеальних режимів **Error! Bookmark not defined.**

2.3.1 Формування заступної схеми для моделювання ідеального режиму електромережі за реактивною потужністю **Error! Bookmark not defined.**

2.3.2 Визначення економічних опорів ДРП для розв'язання експлуатаційних задач **Error! Bookmark not defined.**

2.3.3 Визначення економічних опорів ДРП для розв'язання проектних задач..... **Error! Bookmark not defined.**

2.4 Оптимізація розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі з урахуванням активних обмежень **Error! Bookmark not defined.**

2.4.1 Врахування обмежень на параметри задачі оптимізації розміщення ДРП в електричних мережах **Error! Bookmark not defined.**

2.4.2 Результати оптимізації розміщення ДРП з урахуванням обмежень на параметри..... **Error! Bookmark not defined.**

2.5 Висновки по розділу 2..... **Error! Bookmark not defined.**

РОЗДІЛ 3 АЛГОРИТМИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЕРЕТІКАНЬ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА

АВТОМАТИЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

3.1 Визначення оптимального рівня компенсації реактивних навантажень для електромереж на основі принципу найменшої дії **Error! Bookmar**

3.1.1 Оптимізація рівнів компенсації реактивної потужності в ЕМ за результатами імітації ідеальних режимів **Error! Bookmark not defined.**

3.1.2 Оптимізація розміщення ДРП в електричних мережах за критерієм максимальної рентабельності. **Error! Bookmark not defined.**

3.1.3 Багатокритеріальна оптимізація розміщення та потужностей ДРП в електричних мережах **Error! Bookmark not defined.**

3.2 Автоматизація оперативного керування джерелами реактивної потужності у розподільних електромережах **Error! Bookmark not defined.**

3.2.1 Особливості електричних мереж, як об'єкту керування перетіканнями реактивної потужності **Error! Bookmark not defined.**

3.2.2 Проблеми, пов'язані з автоматизацією керування перетіканнями реактивної потужності у електричних мережах **Error! Bookmark**

3.2.3 Автоматизоване керування компенсацією реактивної потужності на принципах Smart Grid	Error! Bookmark not defined.
3.2.4 Задачі оперативної оптимізації перетікань реактивної потужності у електричних мережах	Error! Bookmark not defined.
3.2.5 Умови оптимальності режимів ДРП для групового керування перетіканнями реактивної потужності....	Error! Bookmark not defined.
3.2.6 Адаптивне керування джерелами реактивної потужності з децентралізацією базових функцій	Error! Bookmark not defined.
3.3 Висновки по розділу 3.....	Error! Bookmark not defined.
РОЗДІЛ 4 ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗА РЕАКТИВНОЮ ПОТУЖНІСТЮ ТА НАПРУГОЮ.....	
ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.	
4.1 Оцінювання обґрунтованої ефективності встановлення ДРП на прикладі електричних мереж 110-35 кВ ПАТ "Вінницяобленерго"	Error! Bookmark not defined.
4.1.1 Постановка оптимізаційної задачі, формування обмежень	Error! Bookmark not defined.
4.1.2 Порівняння оптимальних рішень за різними критеріями	Error! Bookmark not defined.
4.1.3 Визначення оптимальної послідовності розміщення ДРП	Error! Bookmark not defined.
4.2 Вплив надійності електромереж та якості інформаційного забезпечення та результати оптимізації розміщення ДРП	Error! Bookmark not defined.
4.3 Визначення налагоджувальних параметрів локальних систем керування ДРП	Error! Bookmark not defined.
4.4 Висновки по розділу 4.....	Error! Bookmark not defined.
ВИСНОВКИ	ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	30
ДОДАТКИ	Error! Bookmark not defined.
ДОДАТОК А Техніко-економічні параметри електричних мереж 110-35 кВ ПАТ «Вінницяобленерго» необхідні для оптимізації розміщення засобів компенсації реактивної потужності	Error! Bookmark not defined.
ДОДАТОК Б Результати розрахунку технічних втрат електроенергії для фрагменту Вінницьких міських електричних мереж 10 кВ	Error! Bookmark not defined.

ДОДАТОК В Оцінювання ефективності визначення місць приєднання додаткових джерел реактивної потужності в Вінницьких міських електричних мережах з використанням ПК «ВТРАТИ»	Error! Bookmark not defined.
ДОДАТОК Г Довідки про впровадження результатів досліджень	Error! Bookmark not defined.
ДОДАТОК Д Список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	Error! Bookmark not defined.

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Функціонування сучасних розподільних електричних мереж (РЕМ) характеризується локальним зростанням споживання електроенергії, появою двосторонніх перетікань енергії, підвищеними вимогами до забезпечення надійності та керованості. Крім того, стають більш жорсткими екологічні обмеження для енергетичної галузі в цілому [1]. В таких умовах загострюються проблеми раціонального використання енергетичних і матеріальних ресурсів, вирішення яких покликане підвищити економічність та екологічність роботи енергосистеми шляхом впровадження енергозберігаючих заходів.

В останні роки світові тенденції спрямовані на підвищення енергозбереження і раціонального використання природних ресурсів призвели до інтеграції відновлювальних джерел енергії в наявні розподільні електричні мережі у вигляді розосереджених джерел енергії (РДЕ) [2], [3]. Причому частка останніх в енергобалансі енергосистем зростає і в деяких електричних мережах вже сьогодні досягає 20–30% і більше. Таким чином, розподільна електрична мережа поступово перетворюється в мережу з характерними особливостями локальної електричної системи (ЛЕС), яка отримує живлення як від власних розосереджених джерел електроенергії, так і від централізованого джерела – електроенергетичної системи [4] – [6].

Разом з тим, розподільні електромережі енергосистем проектувалися і споруджувалися за умов централізованого електропостачання, виходячи з чого розбудова в них розосереджених джерел електроенергії породжує нові проблеми та задачі [3]. Основними з технічної точки зору тут є задачі підтримання балансу активної і реактивної потужностей та оптимізації розосередженого генерування активної та реактивної енергії [3], [7] – [9].

Основними негативними факторами, що пов'язані з передачею реактивної потужності електричними мережами є збільшення струмових навантажень, зростання спадів напруги, збільшення втрат активної потужності та витрат енергоресурсів на виробництво енергії та ін. Особливе

місце втрат електроенергії, як критерію оптимальності компенсації реактивної потужності (КРП) зумовлене відносною простотою його оцінювання в грошовому вигляді, на відміну від інших. Тому на основі виділення додаткових втрат електроенергії від потоків реактивної потужності й мінімізації останніх побудовано чинну методику КРП [10].

Вона має низку недоліків, які потребують доопрацювання. Це відсутність взаємопов'язаних рішень для енергопостачальних компаній, споживачів та власників РДЕ, приєднаних до їх електромереж; не врахування низки важливих економічних аспектів, що стосуються функціонування розосереджених джерел у мережах енергопостачальних компаній; низька ефективність врахування реверсивних перетікань реактивної потужності в розподільних електричних мережах (ЕМ) тощо.

Вказані недоліки ускладнюють використання методики [10] для оптимізації перетікань реактивної потужності в ЕМ, до яких приєднані РДЕ. Так, особливістю компенсації реактивної потужності в локальній електричній системі є те, що РДЕ можуть генерувати або споживати реактивну енергію [6], [8], [9], призводячи до появи реверсивних її перетікань. Окремі РДЕ, маючи засоби регулювання реактивної потужності, дають додаткові можливості підвищення ефективності її транспортування, що не враховано у [10].

Вдосконалення нормативної бази, зокрема [10], вимагає розроблення методів та засобів оцінювання ефективності перетікань реактивної потужності в ЕМ, які б дозволяли повною мірою враховувати особливості сучасних електромереж, зокрема, зношеність обладнання, неоптимальність схем, наявність РДЕ, а також вплив вказаних факторів на якість та економічність функціонування ЕМ.

З розвитком інформаційно-обчислювальних засобів стає можливим перехід від сукупності техніко-економічних задач оптимізації окремих етапів впровадження та експлуатації джерел реактивної потужності (ДРП), які часто мають суперечні критерії, до комплексної задачі оптимізації за інтегральним критерієм, який пов'язує проблеми втрат, якості електроенергії, надійності

мереж та окупності засобів КРП. Це зробить можливим отримувати технічні рішення, максимально адаптовані до практичної реалізації.

З приєднанням до електромереж РДЕ, генерування яких істотно залежить від впливу випадкових факторів, особливо гостро постає проблема автоматизації керування режимами ЕМ, зокрема ДРП [4], [11]. Вдосконалення підходів до автоматизованого та автоматичного керування потоками реактивної потужності в ЕМ дозволить підвищити ефективність компенсації завдяки регулюванню напруги та підвищенню пропускну здатності електромереж. Для визначення та впровадження керувальних впливів щодо КРП доцільно застосовувати інформаційні можливості та комунікаційні технології *SMART Grid* [12].

Традиційно для реалізації підходів до керування потоками реактивної потужності в ЕМ та вибору оптимальних технічних рішень, використовуються чисельні методи лінійного і нелінійного програмування. Загальним їх недоліком є те, що вони дають часткові розв'язки. У даній роботі досліджується можливість визначення оптимальних параметрів ЕМ та побудови систем керування реактивними перетіканнями на основі принципу найменшої дії (ПНД) у трактуванні Гамільтона-Остроградського [13], а також принципу максимуму інтегральних функцій Понтрягіна [14].

Отже, дослідження методів та засобів оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах з розосередженими джерелами електроенергії на основі принципу найменшої дії, є актуальною науково-прикладною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дисертація виконана в плані наукових досліджень, проведених кафедрою електричних станцій та систем Вінницького національного технічного університету за держбюджетними темами «Оптимізація режимів електричних мереж з розподіленими джерелами енергії» (№ держреєстрації 0113U002260С), «Інтелектуалізація електроенергетичних систем з відновлюваними джерелами енергії на основі принципу Гамільтона-Остроградського» (№ держреєстрації 0115U002382). Автор брав участь у

виконанні вищевказаних робіт як виконавець.

Мета і завдання дослідження. Метою даної дисертаційної роботи є зменшення втрат та підвищення якості напруги у електричних мережах, шляхом розроблення методів та засобів оптимізації потоків реактивної потужності на основі принципу Гамільтона-Остроградського.

Відповідно до вказаної мети в роботі розв'язано такі основні завдання:

- аналіз стану компенсації реактивних навантажень в електричних мережах енергопостачальних компаній та її методичного забезпечення;
- аналіз існуючих методів оптимізації режимів електричних мереж за реактивною потужністю;
- дослідження впливу якості інформаційного забезпечення на результати розв'язання оптимізаційних задач, пов'язаних з регулюванням реактивних перетікань та напруги в розподільних мережах;
- розроблення методу оцінювання обґрунтованого ефекту від компенсації реактивної потужності в розподільних електромережах з урахуванням якості інформаційного забезпечення;
- розвиток методу оптимізації розміщення засобів КРП з імітацією «ідеального» струморозподілу в електромережах за заступною г-схемою шляхом вдосконалення методу визначення та коригування економічних опорів для компенсувальних установок;
- розроблення методу оптимізації розміщення засобів компенсації реактивної потужності за критерієм максимуму рентабельності з урахуванням допустимих відхилень напруги;
- формування умов оптимальності функціонування засобів компенсації реактивної потужності у розподільних мережах;
- розроблення структурної схеми та алгоритмів функціонування системи групової компенсації реактивної потужності в електромережах з використанням локальних систем автоматичного керування КРП.

Об'єктом дослідження дисертаційної роботи є нормальні режими розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії.

Предметом дослідження є методи і засоби аналізу та оптимізації перетікань реактивної потужності в розподільних електричних мережах з розосередженими джерелами енергії та оптимального керування установками компенсації реактивної потужності.

Методи дослідження. Для аналізу та розв'язання поставлених задач використані принцип найменшої дії у формулюванні Гамільтона-Остроградського, принцип максимуму інтегральних функцій Понтрягіна, узагальнювальні методи теорії моделювання, методи лінійного та нелінійного програмування. Усталені режими ЕМ моделюються і аналізуються на базі методу вузлових напруг та методу середніх навантажень. Для розподілу втрат електроенергії між окремими трансакціями реактивної потужності використовуються диференційні методи та метод коефіцієнтів розподілу втрат. Для розроблення алгоритмів аналізу перетікань реактивної потужності в розподільних електромережах з РДЕ та формування законів оптимального керування ДРП використовувались матрична алгебра, теорія графів та декомпозиція. Для розроблення систем автоматичного керування використано положення теорії автоматичного керування.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що показано доцільність використання принципу найменшої дії для визначення та підтримання оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в електричних мережах, а також встановлено залежність оптимальних рівнів КРП від надійності електричних мереж та якості інформаційного забезпечення. Зокрема:

1. Запропоновано новий метод оцінювання обґрунтованої ефективності компенсації реактивної потужності в електричних мережах у вигляді комплексного показника, що на відміну від відомих, враховує надійність мереж, якість напруги у їх вузлах, а також точність визначення корисного відпуску та втрат електроенергії. Це дозволяє обґрунтовано визначати область оптимальності встановлення ДРП з урахуванням ризиків, пов'язаних з відмовами в мережах та відсутністю засобів моніторингу їх режимів.

2. Набув подальшого розвитку метод оптимізації перетікань

електроенергії на основі принципу найменшої дії, що проявляється у врахуванні питомих капітальних та експлуатаційних витрат у моделі «ідеального» режиму електричної мережі. Це дозволяє розширити межі застосування методу на задачі техніко-економічної оптимізації і, зокрема, підвищити надійність та швидкодію розв'язання задачі оптимізації розміщення ДРП у електричних мережах за критерієм максимуму рентабельності.

3. Вдосконалено метод оптимізації встановлених потужностей ДРП на основі принципу найменшої дії, що проявляється в врахуванні обмежень на відхилення напруги в електричних мережах та коригуванні оптимальних потужностей джерел за результатами розв'язання допоміжної задачі мінімізації приросту втрат електроенергії. Зведення її до лінійної, використовуючи коефіцієнти розподілу втрат потужності, дозволило підвищити надійність та швидкодію методу оптимізації.

4. На основі принципу найменшої дії отримано аналітичні співвідношення, що описують оптимальні режими джерел реактивної потужності у розподільних мережах за критерієм максимального прибутку від їх встановлення. Це дозволило вдосконалити алгоритми керування компенсувальними установками, а також алгоритми визначення налагоджувальних параметрів систем автоматичного керування ними.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що на основі вдосконаленого методу розрахунку оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності в розподільних мережах розроблено алгоритм, у якому враховано обмеження за надійністю та якістю електроенергії, що дає можливість обґрунтовано розміщувати ДРП в мережах енергопостачальних компаній та коригувати їх параметри. Розроблені структурні схеми й алгоритми керування наявними ДРП дозволяють підтримувати оптимальні (за сумарними витратами) перетікання реактивної потужності в ЕМ з врахуванням зміни режимних параметрів, зокрема, під впливом РДЕ.

Отримані в дисертаційній роботі результати наукових досліджень впроваджено в ПАТ "Вінницяобленерго" (акт від 16 жовтня 2018 р.) з метою

вдосконалення процесу оптимізації реактивних перетікань в електричних мережах енергопостачальної компанії за критерієм мінімуму втрат електроенергії від них. Результати реалізовано у формі алгоритмів та програм для розрахунку оптимальних рівнів компенсації реактивної потужності, а також для коригування уставок систем автоматичного керування ДРП.

Результати досліджень впроваджено в ТОВ «Подільський енергетичний консалтинг» у вигляді програми для оцінювання обґрунтованого ефекту від розвитку розподільних ЕМ, а також оптимізації розміщення додаткових джерел реактивної потужності в них (довідка від 08 жовтня 2018 р.).

Результати наукових досліджень впроваджено також у навчальному процесі Вінницького національного технічного університету (акт від 12 вересня 2018 р.) у формі вдосконалення лабораторної установки з регулювання потужності конденсаторних батарей для централізованої та групової компенсації реактивних навантажень в ЕМ. Теоретичні результати включено до лекційних, лабораторних і практичних курсів.

Особистий внесок здобувача. Усі результати, які складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором самостійно.

В роботах, опублікованих у співавторстві автору належать: у [15] – алгоритм визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для окремих вузлів ЕМ за відносними спадами напруги; у [16] – розв’язання задачі оптимізації перетікань реактивної енергії у інтегральній постановці за принципом максимуму Понтрягіна, структура автоматизованої системи керування ДРП; у [17] – метод визначення та оперативного коригування економічних опорів ДРП, введення яких у заступну схему ЕМ зводить задачу максимізації рентабельності впровадження компенсуючих установок (КУ) до відтворення низки режимів з мінімальними втратами; у [18] – метод врахування обмежень на відхилення напруги у вузлах ЕМ під час розв’язання задачі оптимізації розміщення ДРП; у [19] – вдосконалення методу оцінювання обґрунтованого ефекту від впровадження ДРП в електромережах з урахуванням

неточності вихідної інформації; у [20] – алгоритм оцінювання плати для активного споживача за регулювання напруги, як системної послуги; у [21] – вдосконалення методу визначення економічних еквівалентів реактивної потужності у електромережах з РДЕ, висновки; у [22] – алгоритм уточнення економічних еквівалентів реактивної потужності в ЕМ за відносними спадами напруги; у [23] – алгоритм аналізу чутливості втрат електроенергії в електромережах та визначення областей корекції для декомпозиції задачі оптимального розміщення ДРП; у [24] – оцінювання адекватності методу визначення економічних еквівалентів реактивної потужності, як коефіцієнтів розподілу втрат; у [25] – оцінювання адекватності визначення економічних еквівалентів реактивної потужності за відносними спадами напруги; у [27] – метод врахування обмежень за напругою, алгоритм та програмна реалізація регулювання напруги в ЕМ у циклі оптимізації розміщення додаткових ДРП.

Результати теоретичних досліджень, що викладені у [15]–[27], були отримані у Вінницькому національному технічному університеті (ВНТУ).

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися: на XI Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління у складних системах (КУСС-2012)» (м. Вінниця, 2012 р.); на II Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2013)» (м. Вінниця, 2013 р.); на IV Міжнародній науково-технічній конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2017)» (м. Вінниця, 2017 р.); на III Міжнародній науково-технічній конференції «*Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2018)*» (м. Харків, 2018 р.); на XIV Міжнародній науково-технічній конференції «Контроль і управління у складних системах (КУСС-2018)» (м. Вінниця, 2018 р.).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 13 робіт, з них 6 статей у наукових фахових виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах даних, 3 статті у інших журналах, 4 публікації у збірниках матеріалів міжнародних конференцій (з них 1 стаття індексується у наукометричній базі *SCOPUS*).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (137 найменувань) і додатків. Основний зміст викладений на 135 сторінках друкованого тексту, містить 27 рисунків, 23 таблиці. Загальний обсяг дисертації – 200 сторінок.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Б. С. Стогній, "Сталий розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи," *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск*, с. 6-10, 2010.
- [2] F. Hinz and D. Moest, "Techno-economic Evaluation of 110 kV Grid Reactive Power Support for the Transmission Grid," *IEEE Transactions on Power Systems*, no. 99, 2018.
- [3] Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, та С.П. Денисюк, "Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення," *Технічна електродинаміка*, №6, с. 44-50, 2015.
- [4] W. Becker, M. Hable, M. Malsch, T. Stieger, and F. Sommerwerk, "Reactive power management by distribution system operators concept and experience," *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 2509-2512, Oct. 2017.
- [5] R. Moreira, G. Strbac, P. Papadopoulos, and A. Laguna, "Business case in support for reactive power services from distributed energy storage," *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1609-1613, Oct. 2017.
- [6] L. De Alvaro Garcia, F. Beaune, M. Pitard, and L. Karsenti, "Cost-benefit analysis of MV reactive power management and active power curtailment," *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1660-1663, Oct. 2017.
- [7] О. В. Кириленко та А. В. Праховник, "Енергетика сталого розвитку : виклики та шляхи побудови," *Праці Інституту електродинаміки НАН України. Спеціальний випуск*, с. 10–16, 2010.
- [8] L. Wautier, F. Beaune, J. Fournel, and L. Karsenti, "Using LV distributed generation's reactive power for voltage regulation," *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 2037-2040, Oct. 2017.
- [9] S. Yin, L. Wu, W. Song and X. Wang, "Multi-objective reactive power optimisation approach for the isolated grid of new energy clusters connected to VSC-HVDC," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1024-1028,

- 2017.
- [10] Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії / Нормативний документ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. – (Затверджено Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України 06.02.2018 №87). Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0392-18>.
- [11] Y. Hu, J. Xiang, Y. Peng, P. Yang, and W. Wei, "Decentralised control for reactive power sharing using adaptive virtual impedance," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 5, pp. 1198-1205, Mar. 2018.
- [12] Electric Power Research Institute Tech. Rep. THE SMART GRID INTEROPERABILITY STANDARDS ROADMAP. Aug. 2009, http://collaborate.nist.gov/twikisgrid/pub/SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal/Report_to_NIST1August10.pdf
- [13] Р. Фейнман, Р. Лейтон, и М. Сэндс, "Глава 19. Принцип наименьшего действия," *Фейнмановские лекции по физике. Т. 6: Электродинамика*. Москва, СССР: Мир, 1966.
- [14] Л. С. Понтрягин, *Принцип максимума*. Москва, Российская Федерация: Оригинал, 1998.
- [15] В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, та Ю. Ю. Півнюк, "Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності для вузлів електричної мережі," *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. №3, 2013. [online]. Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/370>.
- [16] В.В. Кулик та В.М. Пірняк, "Оптимізація перетікань реактивної енергії в розподільних електричних мережах з використанням принципу найменшої дії," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №6, с. 71-79, 2017.
- [17] V. Kulyk, O. Burykin, and V. Pirnyak, "Optimization of the placement of reactive power sources in the electric grid based on modeling of its ideal modes," *Technology audit and production reserves*, vol. 40, no. 2/1, pp. 59-65, 2018.
- [18] В.В. Кулик та В.М. Пірняк, "Оптимізація розміщення джерел реактивної потужності в електричній мережі з урахуванням активних обмежень,"

- Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 29(68), Ч. 2, № 5, с. 108-112, 2018.
- [19] В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, та В.М. Пірняк, "Комплексне оцінювання ефективності встановлення додаткових джерел реактивної потужності у розподільних електричних мережах," *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія: Технічні науки*, № 4 (124), с. 103-111, 2018.
- [20] П.Д. Лежнюк, Ю.В. Грицюк, та В.М. Пірняк, "Регулювання реактивної потужності й напруги в електричних мережах як допоміжна послуга," *Наукові праці Вінницького національного університету*, №2, 2012. [online]. Доступно: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/321>.
- [21] В. М. Пірняк, П. Д. Лежнюк, О. Д. Демов, та О. В. Слободянюк, "Коефіцієнти розподілу втрат, як інструмент для розрахунку економічного еквіваленту реактивної потужності," *Новини енергетики*, №9, с. 34-37, 2012.
- [22] О.Д. Демов, Ю.Ю. Півнюк, П.Д. Лежнюк, та В.М. Пірняк, "Економічні еквіваленти реактивної потужності, як відносні спади напруги," *Енергетика та електрифікація*, №8, с. 17-20, 2013.
- [23] В.М. Пірняк, О.Д. Демов, О.В. Слободянюк, та О.П. Паламарчук, "Декомпозиція функції зниження втрат при розрахунку компенсації реактивної потужності на основі формули Тейлора," *Енергетика та електрифікація*, № 4, с. 55-57, 2012.
- [24] П. Д. Лежнюк, О. В. Слободянюк, та В. М. Пірняк, «Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності на основі коефіцієнтів розподілу втрат,» у *Матеріалах XI Міжнародної науково-технічної конференції «Контроль і управління в складних системах (КУСС-2012)»*, Вінниця, 2012, с. 168.
- [25] О. Д. Демов, Ю. Ю. Півнюк, та В. М. Пірняк, «Розрахування економічних еквівалентів реактивної потужності на основі відносних спадів напруги,» у *Матеріалах II Міжнародної науково-технічної конференції*

- «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2013)», Вінниця, 2013, с. 34.
- [26] В. М. Пірняк, «Оптимізація перетікань реактивної енергії в електричних мережах з використанням принципу найменшої дії,» у *Матеріалах IV Міжнародної науково-технічної конференції «Оптимальне керування електроустановками (ОКЕУ–2017)»*, Вінниця, 2017. [online]. Доступно: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/okeu/okeu/paper/view/3502/2961>.
- [27] Volodymyr Kulyk, Oleksandr Burykin, Malogulko Juliya, and Pirnyak Viktor. «Optimization of reactive energy flows in the electric grid taking into account allowable voltage fluctuations,» in *Proceedings of the 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, 2018, pp. 265-270.
- [28] H. W. Dommel and W. F. Tinney, "Optimal power flow solutions," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 87, pp.1866-1876, 1968.
- [29] J. F. Fuller, E. F. Fuchs, and K. J. Roesler, "Influence of harmonics on power distribution system protection," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 3, pp. 549-557, Apr. 1988.
- [30] Zhu Jizhong, "Optimization of Power System Operation. Reactive Power Optimization". New-York, USA: Wiley-IEEE Press, pp. 409-454, 2009.
- [31] Ю.С. Железко, *Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов*, Москва, Российская Федерация: ENAS, 2009.
- [32] Методичні рекомендації з аналізу технологічних витрат електричної енергії та вибору заходів щодо їх зниження. СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-96:2014: офіційне видання. Державне підприємство «Національна енергетична компанія України», 84 с., 2014.
- [33] F. Hinz and D. Moest, "Techno-economic Evaluation of 110 kV Grid Reactive Power Support for the Transmission Grid," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, 2018.
- [34] W. Becker, M. Hable, M. Malsch, T. Stieger, and F. Sommerwerk, "Reactive power management by distribution system operators concept and

- experience," *CIREC-Open Access Proceedings Journal*, №1, pp. 2509-2512, 2017.
- [35] R. Moreira, G. Strbac, P. Papadopoulos, and A. Laguna, "Business case in support for reactive power services from distributed energy storage," *CIREC-Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1609-1613, Oct. 2017.
- [36] A. Zecchino, M. Marinelli, C. Træholt, and M. Korpås, "Guidelines for distribution system operators on reactive power provision by electric vehicles in low-voltage grids," *CIREC-Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1787-1791, Oct. 2017.
- [37] M. Tarafdar Hagh, M. Jadidbonab, and M. Jedari, "Control strategy for reactive power and harmonic compensation of three-phase grid-connected photovoltaic system," *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 559-563, Oct. 2017.
- [38] A. Samir, M. Taha, M. M. Sayed, and A. Ibrahim, "Efficient PV-grid system integration with PV-voltage-source converter reactive power support," *The Journal of Engineering*, vol. 2018, no. 2, pp. 130-137, Feb. 2018.
- [39] L. De Alvaro Garcia, F. Beaune, M. Pitard, and L. Karsenti, "Cost-benefit analysis of MV reactive power management and active power curtailment," *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 1660-1663, Oct. 2017.
- [40] L. Wautier, F. Beaune, J. Fournel, and L. Karsenti, "Using LV distributed generation's reactive power for voltage regulation," *CIREC - Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 2037-2040, Oct. 2017.
- [41] S. S. Alkaabi, H. H. Zeineldin, and V. Khadkikar, "Short-Term Reactive Power Planning to Minimize Cost of Energy Losses Considering PV Systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, Oct. 2018.
- [42] T. Ren-chuan, Z. Cheng-gong, L. Zhi-jun, C. Yong, X. Wei, and Z. De-sheng, "Research of reactive power control strategy to reduce the reactive power exchange of AC and DC power grid," *The Journal of Engineering*,

- vol. 2017, no. 13, pp. 751-755, 2017.
- [43] A. Rostami, M. Bagheri, S. B. Naderi, M. Negnevitsky, A. Jalilian, and F. Blaabjerg, "A novel islanding detection scheme for synchronous distributed generation using rate of change of exciter voltage over reactive power at DG-Side," in *Proceedings of the 2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, Australia, 2017, pp. 1-5.
- [44] C. Kaloudas and R. Shaw, "Long-term forecasting of reactive power demand in distribution networks," *CIREN-Open Access Proceedings Journal*, vol. 2017, no. 1, pp. 2406-2410, Oct. 2017.
- [45] Z. Qian, Z. Ningyu, Z. Xinyao, Z. Jingbo, and C. Zhe, "Improved power flow algorithm for hybrid AC/DC grid with reactive power control," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 2009-2014, 2017.
- [46] Ю.С. Железко, *Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах*. Москва, СССР: Энергоиздат, 1981.
- [47] S. Rau Narayan, "Solved Nonlinear Optimization Problems" in *Optimization Principles: Practical Applications to the Operation and Markets of the Electric Power Industry*. New-York, USA: Wiley-IEEE Press, 2003, pp. 245-295.
- [48] П.Д. Лежнюк, О.Д. Демов, та Ю.Ю. Півнюк, "Поетапний розрахунок компенсації реактивної потужності в розподільних електричних мережах із використанням відносних спадів напруги," *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*, вип. 30, т. 2, с.108-115, 2015.
- [49] Zhu Jizhong, "Reactive Power Optimization" in *Optimization of Power System Operation*, New-York, USA: Wiley-IEEE Press, 2009, pp. 409-454.
- [50] P. Singh, P. Purey, L. S. Titare, and S. C. Choube, "Optimal reactive power dispatch for enhancement of static voltage stability using jaya algorithm," in *Proceedings of the 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, Indore, 2017, pp. 1-5.
- [51] K.P. Wong, A. Li, and T.M.Y. Law, "Advanced constrained genetic algorithm load flow method," *IEEE Proc. C*, Vol. 146, No. 6, pp. 609-618,

- 2009.
- [52] S. Yin, L. Wu, W. Song, and X. Wang, "Multi-objective reactive power optimisation approach for the isolated grid of new energy clusters connected to VSC-HVDC," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1024-1028.
- [53] S. Khan, S. Bahadoorsingh, R. Rampersad, C. Sharma, and C. Powell, "Reactive power planning combining the reduced jacobian V-Q and voltage sensitivity indices on the sub-transmission network of a caribbean island power system," in *Proceedings of the 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2018, pp. 1-6.
- [54] О. В. Кириленко, М. С. Сегеда, О. Ф. Буткевич, та Т. А. Мазур, *Математичне моделювання в електроенергетиці: підручник*. Львів, Україна: Національний університет «Львівська політехніка», 2010.
- [55] В.П. Сигорский, *Математический аппарат инженера*. Киев, СССР: Техніка, 1977.
- [56] I. Idehen, S. Abraham, Gregory, and V. Murphy, "Reactive power and voltage control in a power grid: A game-theoretic approach," in *Proceedings of the 2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, 2018, pp. 1-6.
- [57] M. Mohsen and H. Siahkali, "Multi-objective optimization of reactive power dispatch in power systems via SPMGSO algorithm," in *Proceedings of the 2017 Smart Grid Conference*, Tehran, Iran, 2017, pp. 1-9.
- [58] B. M. Dehkordi, "Optimal Voltage and Reactive Power Control Based on Multi-Objective Genetic Algorithm," in *Proceedings of the 2006 International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems*, New Delhi, India, 2006, pp. 1-5.
- [59] A. Man-Im, W. Ongsakul, J. G. Singh, and C. Boonchuay, "Multi-objective optimal power flow using stochastic weight trade-off chaotic NSPSO," in *Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, Bangkok, Thailand, 2015, pp. 1-8.
- [60] C. Dai, W. Chen, Y. Zhu, and X. Zhang, "Seeker Optimization Algorithm

- for Optimal Reactive Power Dispatch," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, no. 3, pp. 1218-1231, Aug. 2009.
- [61] J. Saebi, H. Ghasemi, S. Afsharnia, and H. Rajabi Mashhadi, "Imperialist Competitive Algorithm for reactive power dispatch problem in electricity markets," in *Proceedings of the 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Tehran, Iran, 2012, pp. 433-437.
- [62] V. Mahesh, J. R. Deepieha, and N. Kamaraj, "Reactive power dispatch and its pricing in re-structured electricity markets," in *Proceedings of the 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC)*, Sri Ranganlatchum Dindigul, India, 2013, pp. 377-381.
- [63] Q. Zhang and H. Li, "MOEA/D: A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 11, no. 6, pp. 712-731, Dec. 2007.
- [64] Bin Zhou, Ka Wing Chan, Tao Yu, Hua Wei, and Jie Tang, "Strength Pareto Multigroup Search Optimizer for Multiobjective Optimal Reactive Power Dispatch," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, May 2014.
- [65] Mohammad Mohsen and Hassan Siahkali, "Multi-objective optimization of reactive power dispatch in power systems via SPMGSO algorithm," in *Proceedings of the 2017 IEEE Smart Grid Conference (SGC 2017)*, Tehran, Iran, 2017, pp. 1-9.
- [66] T. Bhattacharjee and A. K. Chakraborty, "Congestion management in a deregulated power system using NSGAI," in *Proceedings of the 2012 IEEE Fifth Power India Conference*, Murthal, India, 2012, pp. 1-6.
- [67] A. Man-Im, W. Ongsakul, J. G. Singh, and C. Boonchuay, "Multi-objective optimal power flow using stochastic weight trade-off chaotic NSPSO," in *Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT ASIA)*, Bangkok, Thailand, 2015, pp. 1-8.
- [68] M. H. Sulaiman, Z. Mustaffa, O. Aliman, H. Daniyal, and M. R. Mohamed, "An application of Moth-Flame Optimization algorithm for solving optimal reactive power dispatch problem," in *Proceedings of the 4th IET Clean*

- Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016, pp. 1-5.
- [69] Seyedali Mirjalili, "Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm," *Knowledge-Based Systems*, no. 89, pp. 228-249, 2015.
- [70] Y. Liu, W. B. Xia, S. Zheng, K. Wang, P. Wu, and S. Fang, "A semi-definite programming approach for solving optimal reactive power reserve dispatch," in *Proceedings of the 2017 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Bangalore, India, 2017, pp. 1-6.
- [71] Jose Luis Rueda-Torres and Francisco Gonzalez-Longatt, "Multi-Agent based Approach for Intelligent Control of Reactive Power Injection in Transmission Systems," in *Dynamic Vulnerability Assessment and Intelligent Control: For Sustainable Power Systems*. New-York, USA: Wiley-IEEE Press, 2018, pp. 448-468.
- [72] A. Rostami, M. Bagheri, S. B. Naderi, M. Negnevitsky, A. Jalilian, and F. Blaabjerg, "A novel islanding detection scheme for synchronous distributed generation using rate of change of exciter voltage over reactive power at DG-Side," in *Proceedings of the 2017 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Melbourne, Australia, 2017, pp. 1-5.
- [73] S. Yin, L. Wu, W. Song, and X. Wang, "Multi-objective reactive power optimisation approach for the isolated grid of new energy clusters connected to VSC-HVDC," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1024-1028, 2017.
- [74] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, В. В. Нетребський, та В. В. Тептя, *Принцип найменшої дії в електротехніці та електроенергетиці*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2014.
- [75] Г.Я. Мякишев, *Динамические и статистические закономерности в физике*. Москва, СССР: Наука, 1973.
- [76] С. Безверхий, В. Нагул, та Шабат Гассан, "Принцип найменшої дії: історична довідка та деякі застосування в електротехніці та електромеханіці," *Проблемы создания новых машин и технологий*

- (*Научные труды Кременчугского политехнического института*), №1, с. 272-276, 2000.
- [77] А. Чабан, "Застосування принципу Гамільтона-Остроградського для одержання рівняння трифазної лінії електропередач з розподіленими параметрами," *Електроінформ*, №3, с. 23-26, 2008.
- [78] И.В. Пентегов и И.В. Волков, "Лагранжиан электрической цепи с сосредоточенными параметрами и его применение," *Электричество*, №5, с. 59-63, 1969.
- [79] В. М. Горнштейн, Б. П. Мирошниченко, А. В. Пономарев и др., *Методы оптимизации режимов энергосистем*. Москва, СССР: Энергоиздат, 1981.
- [80] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, и Д. И. Оболонский, "Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов," *Электричество*, №11, с. 2-8, 2007.
- [81] S. Ibrahim, A. Cramer, X. Liu, and Y. Liao, "PV inverter reactive power control for chance-constrained distribution system performance optimisation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 5, pp. 1089-1098, Mar. 2018.
- [82] W. Zhibing, X. Yang, and W. Xitian, "Coordinated control strategy of reactive power for large-scale wind power transmission by LCC-HVDC links," *The Journal of Engineering*, vol. 2017, no. 13, pp. 1082-1086, 2017.
- [83] Y. Hu, J. Xiang, Y. Peng, P. Yang, and W. Wei, "Decentralised control for reactive power sharing using adaptive virtual impedance," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 5, pp. 1198-1205, 2018.
- [84] А.А. Красовский, *Справочник по теории автоматического управления*. Москва, СССР: Наука. – 1987.
- [85] Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, та С.П. Денисюк, "Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їх технологічне забезпечення," *Технічна електродинаміка*, №6, с. 44-50, 2015.
- [86] Y. Zhu, Q. Fan, B. Liu, and T. Wang, "An Enhanced Virtual Impedance Optimization Method for Reactive Power Sharing in Microgrids," *IEEE*

- Transactions on Power Electronics*, vol. PP, no. 99, pp. 1-1, Oct. 1109.
- [87] Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, та С.П. Денисюк, "Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення," *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 44-50, 2010.
- [88] A. A. Aquino–Lugo and T. J. Overbye, "Agent technologies for control application in the power grid," in *Proceedings of the 43th Hawaii International Conference on System Sciences*, Honolulu, USA, 2010, pp. 1-10.
- [89] Y. M. Atwa, E. F. El–Saadany, M. M. A. Salama, and R. Seethapathy, "Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization," *IEEE Trans. Power Syst*, no. 25(1), pp. 360-370, 2010.
- [90] V. Bakker, M. Bosman, A. Molderink, J. Hurink, and G. Smit, "Demand side load management using a three step optimization methodology," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 431-436.
- [91] L. Chen, N. Li, S. H. Low, and J. C. Doyle, "Two market models for demand response in power networks," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 397-402.
- [92] S. Ghosh, J. Kalagnanam, D. Katz, M. Squillante, X. Zhang, and E. Feinberg, "Incentive design for lowest cost aggregate energy demand reduction," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 519-524.
- [93] S. Kishore and L. V. Snyder, "Control mechanisms for residential electricity demand in smartgrids," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 443-448.
- [94] A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal residential load control with price prediction in real–time electricity pricing environments," *IEEE Trans. Smart Grid*, no. 1(2), pp. 120-133, 2010.
- [95] D. O'Neill, M. Levorato, A. Goldsmith, and U. Mitra, "Residential demand response using reinforcement learning," in *Proceedings of the 2010 IEEE*

- International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 409-414.
- [96] B. Ramachandran, S. K.Srivastava, C. S. Edrington, and D. A. Cartes, "An intelligent auction scheme for smart grid market using a hybrid immune algorithm," *IEEE Trans. Ind. Electron*, no. 58(10), pp. 4603-4612, 2011.
- [97] P. Samadi, A. H. Mohsenian–Rad, R. Schober, V. W. Wong, and J. Jatskevich, "Optimal real–time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 415-420.
- [98] S. Bu, F. R. Yu, and P. X. Liu, "Stochastic unit commitment in smart grid communications," in *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Green Communications and Networking (INFOCOM 2011)*, Shanghai, China, 2011, pp. 307-312.
- [99] X. Fang, D. Yang, and G. Xue, "Online strategizing distributed renewable energy resource access in islanded microgrids," in *Proceedings of the 2011 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2011)*, Houston, TX, USA, 2011, pp. 232-237.
- [100] D. Forner, T. Erseghe, S. Tomasin, and P. Tenti, "On efficient use of local sources in smart grids with power quality constraints," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 555-560.
- [101] M. G. Kallitsis, G. Michailidis, and M. Devetsikiotis, "A framework for optimizing measurement–based power distribution under communication network constraints," in *Proceedings of the 2010 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm'10)*, Sydney, Australia, 2010, pp. 185-190.
- [102] X. Liu, "Economic load dispatch constrained by wind power availability: A wait-and-see approach," *IEEE Trans. Smart Grid*, no. 1(3), pp. 347-355, 2010.
- [103] X. Liu and W. Xu, "Minimum emission dispatch constrained by stochastic wind power availability and cost," *IEEE Trans. Power Syst*, no. 25(3), pp.

1705-1713, 2010.

- [104] С. П. Денисюк, П. Й. Тарасевич, О. В. Сподинський, та Д. Г. Дерев'янку, "Забезпечення надійності функціонування та стійкої роботи інтелектуальних енергетичних систем," *Праці Інституту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр.*, вип. 27, с. 27-33, 2010.
- [105] С. П. Денисюк та Д. Г. Дерев'янку, "Особливості застосування систем гнучкої передачі змінного струму (FACTS) в сучасних електроенергетичних мережах," *Енергетика: економіка, технології, екологія*, №1, с. 29-37, 2011.
- [106] Д.Б. Банін, О.С. Яндутьський, М.Д. Банін, А.М. Боднар, та А.В. Гнатовський, "Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз," *Промелектро*, №1, с. 22-33, 2004.
- [107] П.Д. Лежнюк та В.О. Комар, *Оцінка якості оптимального керування критеріальним методом: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006.
- [108] O. Burykin, P. Lezhniuk, V. Kulyk, and Yu. Malogulko, *Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph*. Vinnytsya, Ukraine: VNTU, 2018.
- [109] Ю.С. Железко, "Методы расчета нагрузочных потерь электроэнергии в радиальных сетях 0,38 – 20 кВ по обобщенным параметрам схем," *Электрические станции*, №1, с. 31-37, 2006.
- [110] В.Г. Дерзский и В.Г. Ленко, "О нормировании технологического расхода электроэнергии в распределительных сетях," *Энергетика и электрификация*, №8, с. 25-31, 2003.
- [111] В.Г. Дерзский, "Тарифная политика и потери электроэнергии в распределительных сетях," *Энергетика и электрификация*, №4, с. 25-30, 2003.
- [112] А.А. Потребич, "К вопросу расчета коэффициента потерь электроэнергии в электрических сетях энергокомпаний," *Энергетика и электрификация*, №8, с. 12-14, 2003.
- [113] А.А. Потребич и В.И. Ткачев, "Нормирование потерь энергии в

- электрических сетях энергокомпаний," *Энергетика и электрификация*, №3, с. 27-29, 2005.
- [114] Л.Н. Добровольська, В.В. Кулик, та П.Д. Лежнюк, *Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем*. Луцьк, Україна: Вежа-Друк, 2018.
- [115] O. Burykin, P. Lezhniuk, V. Kulyk and others, *Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems: monograph*. Vinnytsya, Ukraine: VNTU, 2018.
- [116] В.М. Пейзель и А.С. Степанов, "Расчеты технических потерь энергии в распределительных электрических сетях с использованием информации АСКУЭ и АСДУ," *Электричество*, №3, с. 10-15, 2002.
- [117] Б.С. Рогальський та Л.М. Мельничук, "Визначення та розподілення втрат електричної енергії між споживачами," *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №1, с. 38-41, 2004.
- [118] Б.С. Рогальський, Є.А. Штогрін, та О.М. Нанака, "Метод визначення економічних еквівалентів реактивної потужності для замкнених мереж," *Енергетика : економіка, технології, екологія*, №2, с. 66-70, 2006.
- [119] М.Й. Бурбело та Л.М. Мельничук, *Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.
- [120] О.Д. Демов, О.П. Паламарчук, І.О. Бандура, та Ю.А. Григора, "Про розрахунок економічного еквівалента реактивної потужності," *Промелектро*, №2, с. 3-6, 2010.
- [121] О.Д. Демов, *Оптимізація процесу впровадження компенсуючих установок в розподільних електричних мережах енергопостачальних компаній*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2016.
- [122] В.Г. Холмский, "Оптимизация потокораспределения в замкнутых электрических сетях с высокой степенью неоднородности," *Электричество*, №9, с. 16-21, 1965.
- [123] Под ред. В. А. Веникова, *Электрические системы: электрические расчеты, программирование и оптимизация режимов*. Москва, СССР: Высшая школа, 1973.

- [124] ГКД 340.000.002-97 Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергетику. Методика. Енергосистеми і електричні мережі (діючий), Київ, Україні: Коопосвіта, 1997.
- [125] О.Б. Бурикін, П.Д. Лежнюк, та В.В. Кулик, *Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами: монографія*. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2008.
- [126] В.В. Кулик, О.Б. Бурикін, К.І. Кравцов, та В.О. Лесько, "Автоматизована інформаційно-розрахункова система аналізу режимів розподільних електричних мереж," *Праці Інституту електродинаміки НАНУ. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск*, с. 121-130, 2012.
- [127] S. Adhikar, F. Li, and H. Li, "P-Q and P-V control of photovoltaic generators in distribution systems", *IEEE Transmission Smart Grid*, Vol. 6, No. 6, pp. 2929-2941, 2015.
- [128] M. M. Aly, M. Abdel-Akher, Z. Ziadi, and T. Senjyu, "Assessment of reactive power contribution of photovoltaic energy systems on voltage profile and stability of distribution systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 61, pp. 665-672, 2014.
- [129] Ahmad Eid and Mamdouh Abdel-Akher, «Voltage/Var Control of Unbalanced Distribution Systems Equipped with Distributed Single-Phase PV Generators,» *Electric Power Systems Research*, Vol. 135, pp. 105-113, 2016.
- [130] M. Islam, N. Afrin, and S. Mekhilef, "Efficient Single Phase Transformerless Inverter for Grid-Tied PVG System With Reactive Power Control", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, No. 99, pp. 1-11, 2016.
- [131] Hui Li and lunwei Lu, "Reactive Power Compensation and DC link Voltage Control using Fuzzy-PI on Grid-connected PV System with d-STATCOM", in *Proceedings of the 2016 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Conference (APPEEC)*, Xi'an, China, 2016, pp. 1240-1244.
- [132] Epameinondas Kontos, Georgios Tsolaridis, Remus Teodorescu, and Pavol Bauer, «High Order Voltage and Current Harmonic Mitigation Using the Modular Multilevel Converter STATCOM,» *Power Quality and Harmonics*

Issues of Future and Smart Grids. Special section, vol. 5, pp. 16684-16692, 2017.

- [133] Д.Б. Банін, О.С. Яндульський, М.Д. Банін, А.М. Боднар, та А.В. Гнатовський, "Економічні еквіваленти реактивної потужності. Математичний та чисельний аналіз," *Промелектро*, №1, с. 22-23, 2004.
- [134] В.В. Кулик, І.В. Грицюк, та Ю.В. Грицюк, "Оптимальне керування потоками реактивної потужності в розподільних електромережах з розосередженим генеруванням," *Праці Інституту електродинаміки НАНУ. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск*, с. 151-158, 2013.
- [135] М.Й. Бурбело, О.М. Кравець, Ю.П. Войтюк, та Ю.В. Лобода, "Керування установками динамічної компенсації реактивної потужності за несиметричних навантажень," *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*, №4, 2016. Режим доступу: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/view/486/485>.
- [136] Andreas T. Procopiou and Luis F. Ochoa, "Voltage Control In PV-Rich LV Networks Without Remote Monitoring", *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 32, no. 2, pp. 1224-1236, 2017.
- [137] *Укрупнені показники вартості будівництва підстанцій напругою від 6 кВ до 150 кВ та ліній електропередавання напругою від 0,38 кВ до 150 кВ. Норми*: Офіційне видання. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України (СОУ-Н МЕВ 45.2-37471933-44-2016). Київ, Україна: 2016.