



УДК 631.17

DOI: 10.37128/2520-6168-2023-2-14

**АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В СИСТЕМИ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПІДПРИЄМСТВ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ**

Бойко Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
Національний університет «Запорізька політехніка»
Жуков Олексій Анатолійович, к.т.н., доцент
Коваль Андрій Миколайович, к.т.н., старший викладач
Вінницький національний технічний університет
Печенюк Дмитро Вікторович, директор
ТОВ «Екоенергопромінь»

Serhii Boiko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Zaporizhzhya Polytechnic National University
Oleksii Zhukov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Andriy Koval, Candidate of Technical Sciences, Senior lecturer
Vinnytsia National Technical University
Dmytro Pechenyuk, Director
LLC "Energopromin"

На сьогодні агропромисловий комплекс України визначає соціально-економічний розвиток держави, і є цілісною виробничо-економічною системою, об'єднуючи в собі низку сільськогосподарських, промислових, науково-виробничих та навчальних галузей, спрямованих на одержання, транспортування, зберігання, переробку та реалізацію сільськогосподарської продукції. Проте на сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу України суттєвою перешкодою для забезпечення належного рівня конкурентоспроможності підприємств та виробленої ними продукції на зовнішньому ринку є високий рівень витрат енергоресурсів. Окремою проблемою є повна залежність від електроенергетичної системи, що переважно використовує традиційні паливні ресурси та має низку недоліків, що створює ризики для ефективного функціонування стратегічно важливого сектора економіки держави та обґрунтовує актуальність наукових досліджень, спрямованих на підвищення оптимізації структури енергоспоживання та енергопостачання, у тому числі за рахунок впровадження елементів альтернативної енергетики на підприємствах агропромислового комплексу України. Таким чином, впроваджуючи ДРГ та ВДЕ, підприємства АПК наращують свої потужності, що сприяє залученню інвестицій та підвищує їх конкурентоспроможність. Такий стан справ призводить до перегляду питання активного впровадження ВДЕ в структури електропостачання підприємств АПК, що пов'язано з негативними впливами на системи електропостачання електроспоживачів. Але аналіз попередніх досліджень свідчать про те, що при певній комбінації завод на однойменних та різнойменних гармонічних складових енергетичних процесів різнорідних типів генераторів може виникати взаємокомпенсація або взаємопідсилення тієї чи іншої гармонічної складової в навантаженнях. Крім того, трифазні силові трансформатори з групою з'єднань "зірка з нулем - трикутник" широко застосовуються в системах електропостачання підприємств АПК для живлення електричних машин та інших потужних споживачів. У такому разі напруга живлення від розподільчих мереж 6-10 кВ подається до обмоток трансформатора, з'єднаних трикутником, а споживачі приєднуються до низької сторони 0,4 кВ, обмотки якої з'єднані у зірку з нейтраллю. Однак, останнім часом, досить часто на низькій стороні трансформатора у системі електропостачання встановлюють генеруючі потужності. Це можуть бути фотоелектричні станції, біогазові енергетичні установки або дизель-генераторні установки, які почали масово встановлювати після кризи електропостачання, пов'язаних з російською агресією. У роботі розглянуто переваги, проблеми та перспективи ДРГ на базі ВДЕ на підприємствах АПК України, що доводить економічну доцільність в системах електропостачання. Запропонований підхід щодо впровадження ДРГ на базі ВДЕ в системи електропостачання підприємств АПК сприяє зниженню рівня енергетичної залежності цих підприємств та є одним із чинників підвищення конкурентоспроможності виробленої продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках за рахунок зменшення собівартості її виробництва. Впровадження ВДЕ в структури системи



централізованого електропостачання підприємств АПК підвищує надійність систем електропостачання за рахунок забезпечення електроенергією від двох незалежних джерел живлення. Крім того, значно зменшуються обсяги електроенергії, отриманої від енергопостачальної компанії. Застосування технології штучного інтелекту в побудові систем керування комбінованими системами електропостачання підприємств АПК підвищить рівень якості електричної енергії, оптимальне використання ВДЕ та зменшення аномальних режимів функціонування електротехнічного комплексу підприємств АПК в цілому.

Ключові слова: трифазний силовий трансформатор, струми нульової послідовності, несиметрія напруг, електропостачання, альтернативна енергетика.

Ф. 2. Рис. 3. Літ. 14.

1. Постановка проблеми

На сьогодні агропромисловий комплекс України визначає соціально-економічний розвиток держави, і є цілісною виробничо-економічною системою, об'єднуючи в собі низку сільськогосподарських, промислових, науково-виробничих та навчальних галузей, спрямованих на одержання, транспортування, зберігання, переробку та реалізацію сільськогосподарської продукції [1].

Між тим, стратегічні дослідження Продовольчої та сільськогосподарської організації ООН, показують, що попит на продовольчі товари на світовому ринку буде зростати [2], що зумовлює необхідність нарощення обсягів виробництва та створює передумови для розвитку національної економіки.

Проте на сучасному етапі розвитку агропромислового комплексу України суттєвою перешкодою для забезпечення належного рівня конкурентоспроможності підприємств та виробленої ними продукції на зовнішньому ринку є високий рівень витрат енергоресурсів. Особливою проблемою є повна залежність від електроенергетичної системи, що переважно використовує традиційні паливні ресурси та має низку недоліків, що створює ризики для ефективного функціонування стратегічно важливого сектора економіки держави та обґрунтовує актуальність наукових досліджень, спрямованих на підвищення оптимізації структури енергоспоживання та енергопостачання, у тому числі за рахунок впровадження елементів альтернативної енергетики на підприємствах агропромислового комплексу України [2].

Енергоефективність кожного окремо підприємства агропромислового комплексу (АПК) є рушієм розвитку інфраструктури АПК, що має на меті покращення матеріально-технічних умов для ефективного використання виробничого потенціалу АПК та зменшує енергетичну залежність та собівартість готової продукції.

Між тим, потужні підприємства споживають значні обсяги енергії, у тому числі електричної енергії. На сьогоднішній день українські підприємства не охоче самостійно впроваджують джерела розосередженої генерації (ДРГ) у тому числі на базі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що пов'язано із рядом бар'єрів на шляху до розвитку.

Слід зазначити, що на теренах України все ж таки є кагорта промислових та комунальних підприємств різної форми власності серед яких своє місце займають підприємства АПК, які впроваджують використання вторинних енергоресурсів, сонячної енергії та альтернативних видів палива.

Таким чином, впроваджуючи ДРГ та ВДЕ, підприємства АПК нарощують свої потужності, що сприяє залученню інвестицій та підвищує їх конкурентоспроможність. Такий стан справ призводить до перегляду питання активного впровадження ВДЕ в структури електропостачання підприємств АПК, що пов'язано з негативними впливами на системи електропостачання електроспоживачів. Але аналіз попередніх досліджень свідчать про те, що при певній комбінації заводів на однойменних та різнойменних гармонічних складових енергетичних процесів різнорідних типів генераторів може виникати взаємокомпенсація або взаємопідсилення тієї чи іншої гармонічної складової в навантаженнях [3].

Крім того, трифазні силові трансформатори з групою з'єднань "зірка з нулем - трикутник" широко застосовуються в системах електропостачання підприємств АПК для живлення електричних машин та інших потужних споживачів. У такому разі напруга живлення від розподільчих мереж 6-10 кВ подається до обмоток трансформатора, з'єднаних трикутником, а споживачі приєднуються до низької сторони 0,4 кВ, обмотки якої з'єднані у зірку з нейтраллю. Така система має ряд переваг, детально описаних у [4]. Однак, останнім часом, досить часто на низькій стороні трансформатора у системі електропостачання встановлюють генеруючі потужності. Це можуть бути фотоелектричні



станції, біогазові енергетичні установки або дизель-генераторні установки, які почали масово встановлювати після кризи електропостачання, пов'язаних з російською агресією.

Таким чином утворена система електропостачання може працювати паралельно з мережею або автономно, живлячись власними генеруючими потужностями частково або повністю відповідно, а трансформатор має джерело енергії на низькій стороні, де утворена чотирипровідна мережа.

Проте, в такій системі спостерігається виникнення аварійних режимів роботи, пов'язаних з циркулюванням струмів нульової послідовності у трансформаторі. Нульова послідовність струмів може виникнути через несиметричну генерацію фазних напруг на низькій стороні трансформатора, або за рахунок спотворення форми напруги живлення. Це може призвести до перевантаження обмоток трансформатора та пошкодження.

2. Аналіз останніх досліджень та публікацій

Виконання не в повному обсязі положень Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року [5] та повільний темп впровадження відновлювальних джерел енергії в Україні стимулюють необхідність детального аналізу досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців для виявлення шляхів розвитку впровадження ДРГ на базі ВДЕ в умовах підприємств АПК [6-9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій дає можливість зробити висновок, що дослідження вчених переважно спрямовані на вивчення окремих складових, факторів та чинників, необхідних для ефективного впровадження ВДЕ на теренах України та не мають цілісного ґрунтового підходу щодо проблематики та перспективних напрямів впровадження джерел електричної енергії на базі ВДЕ підприємствами АПК [11-14].

Головною метою цієї роботи є визначення передумов підвищення енергетичної ефективності підприємств АПК за рахунок впровадження ДРГ на базі ВДЕ та дослідження причин виникнення струмів нульової послідовності у трансформаторі з групою з'єднань "зірка з нулем - трикутник" та пов'язаних з ними аварійних режимів роботи, що дасть змогу запропонувати методи запобігання таким режимам.

3. Виклад основного матеріалу

Технологічні процеси сучасних фермерських господарств, як типових структурних елементів АПК України потребують надійного електропостачання та високу якість електроенергії [1]. Побудова систем електропостачання з використанням ВДЕ: сонячної, вітрової, біологічної дозволить підвищити надійність та економічні показники електропостачання підприємств АПК. Між тим, ефективне використання ВДЕ можливе з урахуванням графіків навантаження та систем електропостачання конкретних підприємств АПК [9].

Приклад описаної системи електропостачання поданий у вигляді однолінійної схеми, поданої на рисунку 1. У ній трансформатор Т з групою з'єднань обмоток «трикутник – зірка з нейтраллю» працює при живленні від системи С зі сторони високої напруги (ВН) (6-10 кВ) та встановленими генеруючими потужностями Г на стороні низької напруги (НН) (0,4 кВ). У такій системі електропостачання можуть бути споживачі на обох сторонах трансформатора, при чому значна кількість споживачів на низькій стороні є частотно керованими асинхронними приводами, тобто є джерелами вищих гармонік [10].

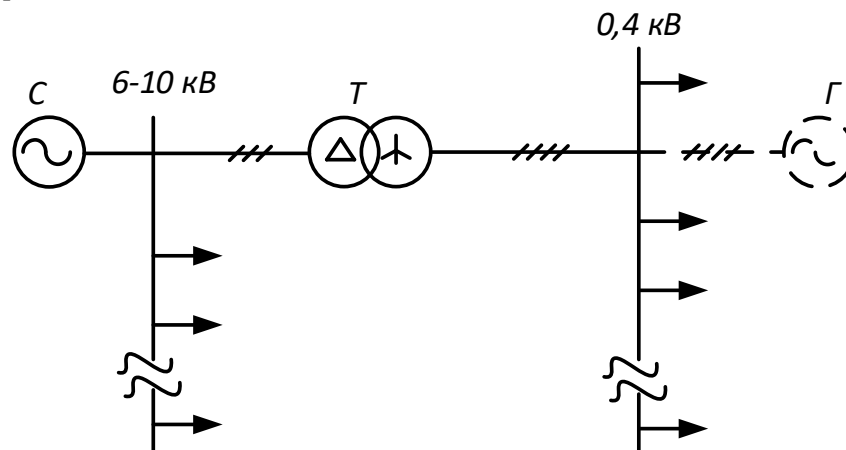


Рис. 1. Однолінійна схема системи електропостачання



Електричне коло на низькій стороні є трифазним колом з нейтраллю. В таких колах, як відомо, можуть протікати струми нульової послідовності [2]. Джерелами таких струмів можуть бути несиметрія трифазної системи напруг генеруючих установок, яка виникає внаслідок недосконалості виробництва електричних машин. Трифазну систему векторів напруг генератора можна розкласти на симетричні складові прямої, зворотної та нульової послідовності. Напряга нульової послідовності визначається:

$$\underline{U}_{G0} = \frac{1}{3}(\underline{U}_{GA} + \underline{U}_{GB} + \underline{U}_{GC}) \quad (1)$$

Іншим джерелом струмів нульової послідовності може бути спотворення форми напруги на низькій стороні нелінійними споживачами. У такому разі несинусоїдна напруги матиме гармонічні складові кратні трьом, що також мають нульову послідовність.

В сумі ці два джерела напруги нульової послідовності через незначний опір лінії електропередач, під'єднаний до обмоток НН трансформатора, з'єднаними у зірку з нейтраллю. Протікаючи через обмотки НН ці струми створюють в осерді магнітний потік нульової послідовності, який індукуює в обмотках ВН систему ЕРС нульової послідовності, що у випадку з'єднання цих обмоток трикутником замикаються на власний опір обмоток. Таким чином спрощену схему заміщення нульової послідовності такого кола можна подати у вигляді, як на рисунку 2.

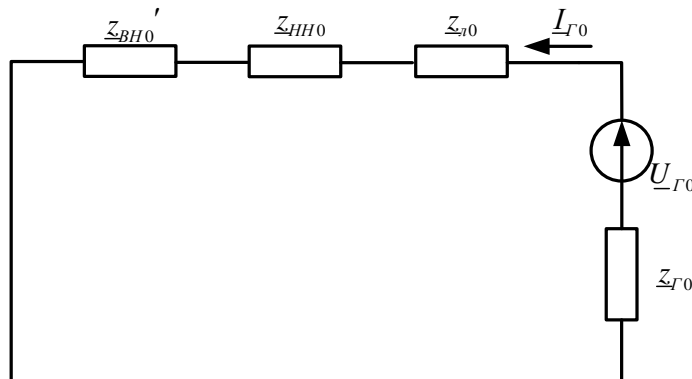


Рис. 2. Спрощена схема заміщення нульової послідовності

В поданій схемі $Z_{Г0}$, $Z_{Л0}$, $Z_{НН0}$, $Z'_{ВВ0}$ - деякі комплексні опори, приведені до НН, що характеризують активний та індуктивні опори обмоток генератора, лінії, обмоток НН та ВН трансформатора Т. Струм в такому колі обмежується невеликими за значенням вказаних опорів:

$$I_{Г0} = \frac{\underline{U}_{Г0}}{Z_{Г0} + Z_{Л0} + Z_{НН0} + Z'_{ВВ0}}, \quad (2)$$

а трансформатор працює практично в режимі короткого замикання щодо струмів нульової послідовності і вказані струми навіть за незначних значень напруги нульової послідовності можуть досягати близьких до номінальних для трансформатора. Тому такі режими роботи трансформатора є аномальними.

Зокрема експерименти, проведені засобами електронного моделювання електричних кіл програмного застосування Мігросар (Рис. 3) показали, що навіть за незначної несиметрії напруги в межах допустимих нормативними документами 5% призводить до значних перевантажень обмоток трансформатора.

І хоч подана модель є занадто ідеалізована, де не враховані опори генератора та ліній, але показує, що лінійні струми НН складають 1462, 1523 та 631 А при номінальному значенні 909 А, а струм нейтралі 3469 А. При цьому фазні напруги генератора складають 230, 225, 227 В, тобто максимальне відхилення складає 5 В.

Отже, досліджено режими роботи трифазного силового трансформатора з групою з'єднання «трикутник – зірка з нейтраллю» при роботі її з генеруючими установками зі сторони, де обмотки з'єднанні у зірку з нейтраллю. Показано, що в системі електропостачання з такими схемо-технічними рішеннями можуть виникати аномальні режими роботи, пов'язані з протіканням струмів нульової послідовності. Для уникнення таких режимів необхідна розробка більш досконалих математичних та



імітаційних моделей, які дозволяють досліджувати вплив різних чинників на їх протікання, що, в свою чергу, дасть змогу пошуку методів їх запобігання або зменшення негативного впливу в реальних системах електропостачання.

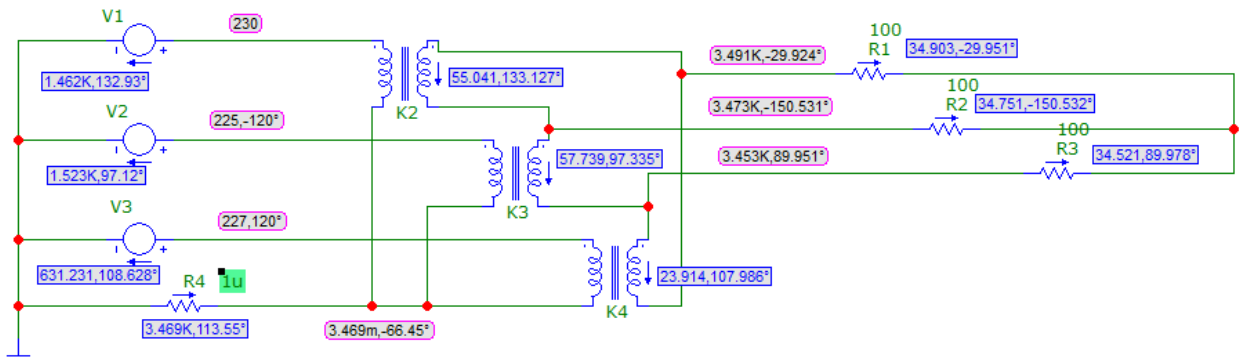


Рис. 3 Електронна модель трансформатора ТМ630/6/0,4 при роботі з несиметричною напругою генерації.

Між тим, за останні роки темпи розвитку цифровізації життєдіяльності світового суспільства суттєво прискорились. Слід відмітити, що цифровізація в енергетичному секторі слідує загальним тенденціям технологічного розвитку, що останніми роками суттєво прискорилися.

З поміж іншого слід зазначити, що штучний інтелект (ШІ) є відносно новою технологією широкого застосування цифрових технологій, зокрема, удосконалення процесів забезпечення різних аспектів життєдіяльності суспільств та триває вивчення можливостей його застосування в різних сферах економіки та суспільства [13, 14].

Враховуючи той факт, що ШІ характеризуються перш за все як організована сукупність інформаційних технологій, із застосуванням якої можливо виконувати складні комплексні завдання шляхом використання системи наукових методів досліджень і алгоритмів обробки інформації, то ШІ може бути використаний при побудові систем керування електротехнічними комплексами електропостачання підприємств АПК. Такий підхід має зменшити кількість аномальних режимів функціонування системи електропостачання в цілому та підвищити якість та надійність системи електропостачання підприємств АПК. З поміж іншого слід зазначити, що в Україні процес застосування ШІ знаходиться на початковому етапі [14].

5. Висновки

Розглянуто переваги, проблеми та перспективи ДРГ на базі ВДЕ на підприємствах АПК України, що доводить економічну доцільність в системах електропостачання.

Запропонований підхід щодо впровадження ДРГ на базі ВДЕ в системи електропостачання підприємств АПК сприяє зниженню рівня енергетичної залежності цих підприємств та є одним із чинників підвищення конкурентоспроможності виробленої продукції на внутрішньому та зовнішньому ринках за рахунок зменшення собівартості її виробництва.

Впровадження ВДЕ в структури системи централізованого електропостачання підприємств АПК підвищує надійність систем електропостачання за рахунок забезпечення електроенергією від двох незалежних джерел живлення. Крім того, значно зменшуються обсяги електроенергії, отриманої від енергопостачальної компанії.

Застосування технології штучного інтелекту в побудові систем керування комбінованими системами електропостачання підприємств АПК підвищить рівень якості електричної енергії, оптимальне використання ВДЕ та зменшення аномальних режимів функціонування електротехнічного комплексу підприємств АПК в цілому.

Список використаних джерел

1. Калетнік Г. М. Перспективи підвищення енергетичної автономії підприємств АПК в рамках виконання енергетичної стратегії України. *Вісник аграрної науки Причорномор'я*. 2019. № 4. С. 90–98.



2. Савченко Є. А. Застосування сонячної енергії у сільському господарстві України: можливості і проблеми. *Аграрна економіка*. 2012. № 1-2, т. 5. С. 128–135.
3. Денисюк С. П., Дерев'янка Д. Г., Щербань К. Ю. Особливості аналізу впливу завад від різнорідних типів джерел розосередженої генерації на процеси в навантаженнях. *Журнал інженерних наук*. 2014. №2. т. 1. С. В1–В7.
4. How manufacturers are developing and using renewable energy. *Smart Cities Dive*: веб-сайт. URL: <https://www.smartcitiesdive.com/ex/sustainablecitiescollective/how-manufacturers-are-developing-and-using-renewable-energy/1175001> (дата звернення: 09.04.2023).
5. Івашків І. М., Стефанишин С.В., Король С.В. Економічні передумови використання відновлювальних енергетичних ресурсів на вітчизняних підприємствах в умовах розвитку зеленої енергетики. *Агросвіт*. 2020. № 13/14. С. 61–65.
6. Бойко С. М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств: монографія / за ред. Сінчука О.М. Кременчук: ПП Щербатих О.В, 2020. 263 с.
7. Ольховик О. І., Ольховик Б. Є. Використання інфраструктури зрошувальних систем для виробництва альтернативної енергії. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. пр. НУВГП*. 2016. Вип. 4 (76). С. 59–66.
8. Рубаненко О. Є., Бондаренко Є. А., Гунько І. О., Коваль А. М. Вплив відновлюваних джерел енергії на технічний стан обладнання розподільних мереж. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2018. № 6. т. 1. С. 204–213.
9. Стаднік М. І., Проценко Д. П., Бабій С. М. Гібридне електропостачання з використанням відновлюваних джерел енергії. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 4 С. 33–41
10. Коваль А. М., Кухарчук В. В., Печенюк Д. В. Анормальні режими роботи трифазних силових трансформаторів при роботі з генераторними установками. *Матеріали «LII Науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (2023)»*. 31 травня 2023 р. Вінниця: ВНТУ, 2023. С. 25–26.
11. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл із зосередженими та розподіленими параметрами: підручник / Карпов Ю. О., Каців С. Ш., Кухарчук В. В., Ведміцький Ю. Г. Вінниця: ВНТУ. 2011. 377 с.
12. Бодунов В. М. Рекомендації щодо вибору потужності джерел розподіленої генерації в розподільних електричних мережах сільських регіонів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 3. С. 115–118.
13. Vardi U., Asmar T. El., Lavacchi A. Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture. *Journal of cleaner production*, 2013. № 53. P. 224–231.
14. Про схвалення Концепції розвитку штучного інтелекту в Україні: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 2 груд. 2020 р. № 1556-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text>

References

- [1] Kaletnik, G.M. (2019). Perspektyvy pidvyshchennia enerhetychnoi avtonomii pidpriumstv APK v ramkakh vykonannia enerhetychnoi stratehii Ukrainy. [Prospects for increasing the energy autonomy of agro-industrial complex enterprises within the framework of the implementation of the energy strategy of Ukraine]. *Visnyk ahrarnoi nauky Prychornomia – Herald of Agrarian Science of the Black Sea Region*, 4, 90–98 [in Ukrainian].
- [2] Savchenko, Ye.A. (2012). Zastosuvannia soniachnoi enerhii u silskomu hospodarstvi Ukrainy: mozhlyvosti i problemy. [Application of solar energy in agriculture of Ukraine: opportunities and problems]. *Ahrarna ekonomika – Agrarian economy*, 5, 1-2, 128–135 [in Ukrainian].
- [3] Denysiuk, S.P., Derevianko, D.H., Shcherban, K.Yu. (2014). Osoblyvosti analizu vplyvu zavad vid riznoriidnykh typiv dzherel rozoseredzhenoi heneratsii na protsesy v navantazheniakh. [Peculiarities of the analysis of the influence of disturbances from different types of sources of distributed generation on processes in loads]. *Zhurnal inzhenernykh nauk – Journal of Engineering Sciences*, 2 (1), В1–В7. [in Ukrainian].
- [4] How manufacturers are developing and using renewable energy. *Smart Cities Dive*. URL: <https://www.smartcitiesdive.com/ex/sustainablecitiescollective/how-manufacturers-are-developing-and-using-renewable-energy/1175001>.
- [5] Ivashkiv, I.M., Stefanyshyn, L.S., Korol, S.V. (2020). Ekonomichni peredumovy vykorystannia vidnovliualnykh enerhetychnykh resursiv na vitchyznianskykh pidpriumstvakh v umovakh rozvytku zelenoi



- enerhetyky. [Economic prerequisites for the use of renewable energy resources at domestic enterprises in the context of the development of green energy]. *Ahrosvit – Agroworld*, 13/14, 61–65. [in Ukrainian].
- [6] Boyko, S.M., Sinchuk, O.M. (2020). *Teoretychni zasady formuvannia elektroenerhetychnykh system z dzherelamy rozoseredzhenoi heneratsii hirnychorudnykh pidpriemstv: monohrafiia* [Theoretical foundations of the formation of electric power systems with sources of distributed generation of mining enterprises: monograph]. Kremenchuk: «PP Shcherbatiykh O.V.» [in Ukrainian].
- [7] Olkhovyk, O.I., Olkhovyk, B.E. (2016). Vykorystannia infrastruktury zroshuvalnykh system dlia vyrobnytstva alternatyvnoi enerhii [The use of the infrastructure of irrigation systems for the production of alternative energy]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia: zb. nauk. pr. NUVHP. – Bulletin National University of Water and Environmental Engineering: coll. of science works NUWEE*, 4 (76), 59–66 [in Ukrainian].
- [8] Rubanenko, O.E., Bondarenko, E.A., Gunko, I.O., Koval, A. M. (2018). Vplyv vidnovliuvanykh dzherel enerhii na tekhnichniy stan obladnannia rozpodilnykh merezh [The influence of renewable energy sources on the technical condition of equipment of distribution networks]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Bulletin of the Khmelnytskyi National University. Series: Technical sciences*, 1 (6), 204–213. [in Ukrainian].
- [9] Stadnik, M.I., Protsenko, D.P., Babyi, S.M. (2020). Hibrydne elektropostachannia z vykorystanniam vidnovliuvanykh dzherel enerhii [Hybrid power supply using renewable energy sources]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 4, 33–41 [in Ukrainian].
- [10] Koval, A.M., Kuharchuk, V.V., Pechenyuk, D.V. (2023). Anormalni rezhymy roboty tryfaznykh sylovykh transformatoriv pry roboti z heneratornymy ustanovkamy [Abnormal modes of operation of three-phase power transformers when working with generator sets]. *Materialy «LII Naukovo-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu (2023)» – Materials of the "LII Scientific and Technical Conference of Subdivisions of the Vinnytsia National Technical University (2023)".* Vinnytsia: VNTU. (25–26) [in Ukrainian].
- [11] Karpov, Yu.O., Katsyv, S.Sh., Kukharchuk, V.V., Vedmitskyi, Yu.H. (2011). *Ustaleni rezhymy liniinykh elektrychnykh kil iz zoseredzhenymy ta rozpodilenymy parametramy: pidruchnyk* [Theoretical foundations of electrical engineering. Fixed modes of linear electric circuits with concentrated and distributed parameters. Textbook]. Vinnytsia: VNTU [in Ukrainian].
- [12] Bodunov, V.M. (2012). Rekomendatsii shchodo vyboru potuzhnosti dzherel rozpodilenoii heneratsii v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh silskykh rehioniv [Recommendations regarding the selection of power sources of distributed generation in distribution electric networks of rural regions]. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu – Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*, 3, 115–118 [in Ukrainian].
- [13] Bardi, U., Asmar, T.El, Lavacchi, A. (2013). Turning electricity into food: the role of renewable energy in the future of agriculture. *Journal of cleaner production*, 53, 224–231. [in English].
- [14] Pro skhvalennia Kontseptsii rozvytku shtuchnoho intelektu v Ukraini: Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 2 hrud. 2020 r. № 1556-r. [On the approval of the Concept of the development of artificial intelligence in Ukraine: Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated on 02.12.2020 № 1556] (n.d.). *zakon.rada.gov.ua*. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-2020-%D1%80#Text/> [in Ukrainian].

ASPECTS OF IMPLEMENTATION OF DISTRIBUTED GENERATION SOURCES IN THE ELECTRICITY SUPPLY SYSTEM OF ENTERPRISES OF THE AGRICULTURAL COMPLEX

Today, the agro-industrial complex of Ukraine determines the socio-economic development of the state, and is an integrated production and economic system, uniting a number of agricultural, industrial, scientific-production and educational sectors aimed at obtaining, transporting, storing, processing and selling agricultural products. However, at the current stage of development of the agro-industrial complex of Ukraine, a significant obstacle to ensuring the appropriate level of competitiveness of enterprises and their products on the foreign market is the high level of energy consumption. A separate problem is the complete dependence on the electric power system, which mainly uses traditional fuel resources and has a number of disadvantages, which creates risks for the effective functioning of a strategically important sector of the state economy and substantiates the relevance of scientific research aimed at improving the optimization of the structure of energy consumption and energy supply, in that including due to the introduction of elements of alternative energy at enterprises of the agro-industrial complex of Ukraine. Thus, by implementing DRG and RES, agro-industrial complex enterprises increase their capacities, which contributes to the attraction of investments and increases their competitiveness. This state of affairs leads to a review of the issue of the active introduction of RES into



the electricity supply structures of agricultural enterprises, which is associated with negative effects on the electricity supply systems of electricity consumers. But the analysis of previous studies shows that with a certain combination of disturbances on the same and different harmonic components of energy processes of different types of generators, mutual compensation or mutual reinforcement of one or another harmonic component in loads may occur [1]. In addition, three-phase power transformers with a "star-zero-delta" group of connections are widely used in the power supply systems of agro-industrial complex enterprises to power electric machines and other powerful consumers. In this case, the supply voltage from distribution networks of 6-10 kV is supplied to the transformer windings connected by a delta, and consumers are connected to the low side of 0.4 kV, the windings of which are connected in star with neutral. However, recently, quite often generating power is installed on the low side of the transformer in the power supply system. These can be photovoltaic plants, biogas power plants or diesel generator plants, which began to be installed en masse after the power supply crisis associated with Russian aggression. The paper examines the advantages, problems and prospects of DRG based on renewable energy sources at Ukrainian agro-industrial complex enterprises, which proves its economic feasibility in power supply systems. The proposed approach is that the introduction of DRG based on renewable energy into the power supply system of agro-industrial complex enterprises contributes to reducing the level of energy dependence of these enterprises and is one of the factors of increasing the competitiveness of manufactured products on the domestic and foreign markets due to the reduction of the cost of their production. The introduction of RES into the structures of the centralized power supply system of agricultural enterprises increases the reliability of power supply systems by providing electricity from two independent power sources. In addition, the amount of electricity received from the power supply company is significantly reduced. The use of artificial intelligence technology in the construction of control systems for the combined power supply systems of agro-industrial complex enterprises will increase the quality of electric energy, optimal use of RES and reduce abnormal modes of operation of the electrical complex of agro-industrial complex enterprises as a whole.

Key words: three-phase power transformer, zero amplification currents, voltage asymmetry, power supply, alternative energy.

F. 2. Fig. 3. Ref. 14.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Бойко Сергій Миколайович – кандидат технічних наук., доцент кафедри "Транспортні технології" Національного університету «Запорізька політехніка» (вул. Жуковського, 64, Запоріжжя, Україна, 69063 e-mail: boiko_s_n@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9778-2202>).

Жуков Олексій Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри Комп'ютеризовані електромеханічні системи і комплекси Вінницький національний технічний університет (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: alex4444_2004@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7451-7633>).

Коваль Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів Вінницького національного технічного університету (Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: koval.a.m@vntu.edu.ua, <https://orcid.org/0009-0004-1156-3930>)

Печенюк Дмитро Вікторович – директор, ТОВ «Екоенергопром» (вул. Заводська, 13/1Вінницька обл., Жмеринський р.-н., село Деробчин, 23545, e-mail: info@energyray.com.ua, <https://orcid.org/0009-0005-3392-2890>).

Serhii Boiko – Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the "Transport Technologies" department of the Zaporizhzhya Polytechnic National University (street Zhukovsky, 64, Zaporozhye, Ukraine, 69063 e-mail: boiko_s_n@ukr.net).

Oleksii Zhukov – Candidate of Technical Sciences. Associate Professor of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes of the Vinnytsia National Technical University (Khmelnitsky hwy, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21008 e-mail: alex4444_2004@ukr.net).

Andriy Koval – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Computerized Electromechanical Systems and Complexes of the Vinnytsia National Technical University (Khmelnitsky hwy, 95, Vinnytsia, Ukraine, 21008 e-mail: koval.a.m@vntu.edu.ua).

Dmytro Pechenyuk – Director, LLC " Energopromin" (Zavodska street, building 13/1, Vinnytsia region, Zhmeryn district, Derobchyn village, 23545, e-mail: info@energyray.com.ua, <https://orcid.org/0009-0005-3392-2890>).