

УДК 621.316

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2024-106-12>

ВИКОРИСТАННЯ ОСНОВНИХ ТЕОРІЙ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРАХУНКАХ МЕРЕЖ ЗМІННОГО СТРУМУ ГІРНИЧОГО ПІДПРИЄМСТВА

Папаїка Юрій Анатолійович,

доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри електроенергетики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0001-6953-1705

Лисенко Олександра Геннадіївна,

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри електропривода
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0000-0002-7041-671X

Буртний Дмитро Іванович,

магістр з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0008-7758-8566

Малишко Максим Михайлович,

аспірант кафедри електроенергетики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0000-0413-053X

Удовик Олександр Васильович,

аспірант кафедри електроенергетики
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0002-1000-7815

Леонов Олексій Сергійович,

аспірант кафедри електропривода
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»
ORCID ID: 0009-0009-3680-9542

У статті проведено аналіз сфери застосування основних теорій реактивної потужності (РП) в електричних мережах змінного струму. Наведено основні аспекти теорій потужності Фрізе та Будаєву, розподілено наявні методи аналізу теорій потужності за групами відповідно до теоретичного підходу і тлумачення фізичної величини. Також у статті виведено алгоритм моделювання оптимальних перетоків РП у системі електропостачання гірничого підприємства за даними проведеного дослідження ділянки електричної мережі шахтоуправління ім. Героїв Космосу. За виведеним алгоритмом визначено технічні параметри основного технологічного обладнання лави, їх режими роботи. Проведено аналіз впливу компенсації РП на переток потужності в шахтній мережі шляхом розрахунку значень активної та реактивної потужності у відповідних точках схеми. За допомогою аналізу отриманих результатів визначено найбільш оптимальні точки встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності з урахуванням технологічного процесу робочого об'єкта та габаритних розмірів устаткування. Метою роботи є формування комплексного підходу до моделювання та розрахунку оптимальних перетоків РП з урахуванням конфігурації електричної мережі гірничого підприємства та пошуку шляхів оптимізації режимів роботи електричного обладнання, а також визначення найбільш оптимальних точок підключення устаткування з компенсації РП, ураховуючи вимоги технологічного процесу об'єкта, що досліджується. Для розв'язання поставлених задач було проведено аналіз режимів роботи основного електричного обладнання розглянутої ділянки шахтного поля, здійснено розрахунок електричних навантажень, сформовано таблицю з порівнянням результатів. На підставі проведених розрахунків було виконано аналіз впливу компенсації

РП на перетоки потужності в мережі, що досліджується, та розміщення устаткування з компенсації РП. Викладений у статті матеріал ставить задачу зв'язку теоретичних аспектів питання підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання гірничого підприємства з режимами роботи електричної мережі, які виникають під час роботи обладнання на об'єкті гірничого підприємства.

Ключові слова: реактивна потужність, теорії реактивної потужності, гірничі підприємства, перетоки реактивної потужності, режими роботи електричного обладнання.

Papaika Yurii, Lysenko Oleksandra, Burtnyi Dmytro, Malyshko Maksym, Udovyk Oleksandr, Leonov Olekcij. The use of basic theories of reactive power in electrical calculations of alternating current supply of a mining enterprise

The article analyzes the scope of application of the main theories of reactive power in alternating current electrical supply. The main aspects of Frize's and Boudean's theories of power are presented, existing methods of analysis of power theories are divided into groups according to the theoretical approach and interpretation of physical quantities. Also, in the article, the algorithm for modeling the optimal flows of RP in the power supply system of the mining enterprise is derived based on the data of the conducted research of the section of the electrical supply of the mine management named after Heroes of the Cosmos. According to the derived algorithm, the technical parameters of the main technological equipment of the bench, their modes of operation, are determined. An analysis of the influence of RP compensation on power flows in the mine supply was carried out by calculating the values of active and reactive power at the corresponding points of the scheme. Using the analysis of the obtained results, the most optimal installation points for reactive power compensation devices were determined, taking into account the technological process of the operating object and the overall dimensions of the equipment. The purpose of the work is to form a comprehensive approach to modeling and calculating optimal RP flows, taking into account the configuration of the electrical supply of the mining enterprise and finding ways to optimize the operating modes of electrical equipment, as well as determining the most optimal connection points for RP compensation equipment, taking into account the requirements of the facility's technological process, which is being investigated. To solve the problems, an analysis of the operating modes of the main electrical equipment of the considered section of the mine field was carried out, electrical loads were calculated, and a table was created with a comparison of the results. On the basis of the calculations, an analysis of the impact of RP compensation on power flows in the investigated supply was performed, and placement of RP compensation equipment was performed. The material presented in the article poses the task of connecting the theoretical aspects of the issue of increasing the energy efficiency of the power supply systems of the mining enterprise with the modes of operation of the electrical supply that arise during the operation of the operating equipment at the facility of the mining enterprise.

Key words: reactive power, theories of reactive power, mining enterprises, flows of reactive power, operating modes of electrical equipment.

Вступ. Сучасні технології видобутку вугілля закритим способом на гірничих підприємствах характеризуються проведенням видобувних робіт на глибоких підземних горизонтах у досить складних умовах навколишнього середовища. Ці фактори зумовлюють специфічні вимоги до підземного електричного устаткування, формують особливі схеми електричних мереж зовнішнього та внутрішнього електропостачання та призводять до появи унікальних співвідношень параметрів режиму електроспоживання стаціонарних установок.

Мета дослідження – аналіз основних підходів до дослідження теорії реактивної потужності (РП) та особливостей розрахунку перетоків РП за кожним із методів. Також сформовано алгоритм комплексного підходу з оцінювання впливу РП на електричні параметри підземної електричної мережі гірничого підприємства з урахуванням основного електричного обладнання ділянки, що бере участь у дослідженні.

Основний зміст роботи. У контексті розгляду питання підвищення енергетичної ефективності систем електропостачання гірничого підприємства обов'язковим є розгляд теорій

реактивної потужності (далі – РП) [1]. Насамперед така необхідність зумовлена передовими вітчизняними і зарубіжними дослідженнями в області цього питання, оскільки впровадження засобів із компенсації реактивної потужності в наявний технологічний процес дозволяють досягти найбільшої енергетичної ефективності на умовну одиницю капіталовкладень у порівнянні з упровадженням інших заходів.

Натепер розрізняють декілька підходів до аналізу та розрахунку реактивної потужності. Розбіжність підходів зумовлена розбіжністю тлумачень поняття однієї фізичної величини. Таким чином, усі наявні методи визначення складників потужності можливо поділити на три групи [1]:

1) Спектральні методи (метод Будеану, метод В. Шеферду – П. Закіхані та метод Шарону);

2) Інтегральні методи (метод Іліовісі – Маєвського);

3) Енергопотоківі методи (метод Фрізе, метод Зарнецького);

З метою розв'язання поставлених у статті завдань розглянемо дві основних групи методів:

спектральні та енергопотоків й, відповідно, методи аналізу РП у несинусоїдальних електричних мережах за теоріями Фрізе та Будеану.

Теорія Фрізе

Відповідно до класичної теорії потужності Фрізе, миттєве значення струму розкладається на миттєвий активний та миттєвий неактивний (реактивний) струми [2].

Таким чином, миттєвий фазний струм навантаження розраховується як алгебраїчна сума «миттєвого активного» та «миттєвого неактивного» струмів:

$$i_{La,b,c} = i_{Lpa,b,c} + i_{Lna,b,c}, \quad (1.1)$$

де

$$i_{Lpa,b,c} = \frac{P_L(t)}{\sum_{a,b,c} U_{Sa,b,c}^2(t)} \cdot U_{Sa,b,c}, \quad (1.2)$$

$$P_L(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T_s}^t (u_{Sa} \cdot i_{La} + u_{Sb} \cdot i_{Lb} + u_{Sc} \cdot i_{Lc}) dt, \quad (1.3)$$

– середня активна потужність навантаження, обчислена в періоді T_s або в іншому інтервалі часу, який слідує перед розглянутим інтервалом часу [2].

$$\sum_{a,b,c} U_{Sa,b,c}^2(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T_s}^t \sum_{a,b,c} U_{Sa,b,c}^2 dt, \quad (1.4)$$

– сума квадратів дієвих значень напруг фаз джерела.

Під час розгляду режимів роботи обладнання в реальних схемах електропостачання було виявлено, що графік миттєвої активної потужності залежить від технологічного процесу, асиметрії струмів по фазах навантаження та напруг мережі, виду нелінійності опорів навантаження [3]. Таким чином, можна вважати, що значення миттєвої активної потужності є випадковою функцією часу, тому використання підходу з аналізу реактивної потужності за теорією Фрізе коректне лише в разі розрахунку усталено повторюваних електромагнітних процесів.

Незважаючи на фундаментальні підходи, описані в теорії Фрізе, вона не може бути використана як основна теорія побудови систем управління компенсаторами, які мають у своїй конструкції активний силовий фільтр, через неприпустимість запізнь у вимірі миттєвого значення активної потужності.

Теорія Будеану

Сутність теорії Будеану полягає в розкладанні повної потужності на активну, реактивну та потужність спотворення [4].

$$S = \left(\sum_{k=a,b,c} P_k \right)^2 + \left(\sum_{k=a,b,c} Q_k \right)^2 + \left(\sum_{k=a,b,c} D_k \right)^2, \quad (1.5)$$

Теоретичний підхід до аналізу поняття реактивної потужності за теорією Будеану в сучасних електричних мережах набув широкого вжитку через використання в розрахунках реактивної потужності значення сигналу з n-гармоніки [4]:

$$Q = \sum_{n=1} U_n I_n \sin \varphi_n. \quad (1.6)$$

Формування комплексного підходу до аналізу перетоків реактивної потужності мереж гірничого підприємства

Оптимізація режимів роботи основного електротехнічного обладнання на всіх ланках технологічного процесу є найважливішим етапом у забезпеченні раціонального перетоку РП [4].

На основі наукових та експериментальних досліджень електричних систем гірничих підприємств розрахунки проводять у такій послідовності:

– розрахунок значень електричних навантажень стаціонарних установок окремих ланок виробництва;

– виконання перевірки режиму та якості напруги до найбільш віддаленого електроприймача в момент роботи нелінійних навантажень;

– вибір конструктивного виконання кабельних ліній (КЛ) електричних мереж;

– вибір засобів компенсації реактивної потужності (КРП) та їх розподіл між мережами 0,4, 0,66 кВ і 6 кВ.

Сучасні електричні мережі гірничих підприємств характеризуються значною кількістю перетворювачів енергії на різних технологічних ланках, через що виникає необхідність аналізу співвідношення режимів споживання реактивної потужності від генерації вищих гармонік.

З огляду на вищезазначене можливо сформувати алгоритм моделювання оптимальних перетоків РП у підземних електричних мережах.



Рис. 1. Алгоритм моделювання оптимальних перетоків РП у підземних шахтних мережах

Відповідно до наведеного алгоритму початковим етапом є визначення технічних характеристик основного технологічного обладнання лави.

Під час проведеного дослідження ділянки електричної мережі шахтоуправління ім. Героїв Космосу було з'ясовано, що електричне навантаження 962 лави є типовим для виробництва та формується з електричних навантажень окремих споживачів, дані яких внесено до табл. 1.

Таблиця 1

Відомості про споживачів електроенергії в 962 лави

Назва споживачів	Встановлена потужність	Робоча потужність	cos φ
	Р, кВт	Р, кВт	
Очисний комбайн КА-200	200	165	0,84
Конвеєр СП-251	200	150	0,86
ВСКП	75	56,2	0,88
ЛГКН	18,5	15,2	0,89
Унівенк	55	47	0,88

Згідно з теоретичними умовами компенсації РП, найбільша ефективність засобів компенсації РП досягається під час їх максимального наближення до точок генерації РП, причому обов'язковим є врахування обмежень у виборі обладнання, які виникають через особливості технологічного процесу гірничих підприємств. До особливостей процесу, крім обмеженості простору в лаві, слід віднести також те, що розроблення лави ведеться безперервно впродовж року, отже, обладнання перебуває в постійному русі.

Для прикладу розглянемо схему електропостачання 962 лави (рис. 2).



Рис. 2. Схема підключення споживачів до КТПВ збирного штреху 962 лави

У наведеній схемі електропостачання найкращим рішенням, спрямованим на оптимізацію перетоків РП у підземній мережі, є встановлення нерегульованих БК напругою 6 кВ з підключенням безпосередньо до КТПВ, від якої отримують живлення споживачі.

Установлення пристроїв компенсації саме на цій ділянці призводить до значного зменшення рівня реактивного складника струму, що підвищує пропускну спроможність мережі та дозволяє зменшити перетин кабельно-провідникової продукції в шахтній мережі.

За результатами дослідження оптимізації перетоків РП у шахтній мережі було складено таблицю з аналізу впливу компенсації РП на переток реактивної потужності в шахтній мережі (табл. 2).

Аналіз впливу компенсації РП на перетоки потужності в шахтній мережі

Ділянка		Розподіл потужностей без БСК			Розподіл потужностей з БСК		
		P, кВт	Q, квар	S, кВА	P, кВт	Q, квар	S, кВА
Енергопотяг	КТПВ	425,0	653,0	779,1	425,0	203,0	471,0
КТПВ	РПП-10	478,6	798,7	931,1	468,5	347,3	583,2
РПП-10	муфта. ПК 252	480,9	799,7	933,1	469,4	347,6	584,1
муфта. ПК 252	РПП-6	484,6	801,0	936,2	470,8	348,2	585,6
РПП-6	РПП-2	493,9	803,0	942,8	474,5	349,0	589,0
РПП-2	ЦПП-370 гор.	499,3	804,2	946,3	476,6	349,4	590,9
ЦПП-370 гор.	Розд. т-р 6/6 кВ	501,2	805,3	948,5	477,3	349,9	591,8
Розд. т-р 6/6 кВ	ГПП ком. № 56	511,2	859,3	999,7	481,2	370,9	607,5

Теоретичні аспекти з розрахунку перетоків РП в електричній мережі свідчать про те, що режим споживання РП та генерації вищих гармонік має варіативний характер, причому ступінь споживання реактивної потужності залежить від споживаної активної потужності, що відповідає результатам дослідження.

Висновки. У статті було проаналізовано основні аспекти теорій реактивної потужності та сферу їх практичного застосування

під час розрахунку електричних мереж змінного струму гірничого підприємства. Наведено результати практичного дослідження питання впливу компенсації РП на оптимізацію режимів роботи підземної електричної мережі напругою 6 кВ. Аналіз отриманих результатів свідчить про залежність режимів споживання та перетоку РП від рівня генерації вищих гармонік, що корелюється з теоретичними аспектами теорії Будеану.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Реактивна потужність в електричних мережах : монографія. І.В. Жежеленко та ін. ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. у-т «Дніпровська політехніка». Дніпро : НТУ «ДП», 2020. 72 с.
2. Енергетична ефективність систем електропостачання : монографія. Г.Г. Півняк та ін. ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». 2-ге вид. Дніпро : НТУ «ДП», 2018. 148 с.
3. Енергетична ефективність систем електропостачання гірничих підприємств з нелінійними навантаженнями : дис. ... на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. НТУ «Дніпровська політехніка», 2019.
4. Застосування індивідуальних графіків вищих гармонік в задачах електромагнітної сумісності та енергоефективності гірничих підприємств / Ю.А. Папаїка та ін. *Гірничі електромеханіка*. 2019. № 101. С. 3–7.
5. Оціночні методи визначення економічного еквіваленту реактивної потужності / Ю.А. Папаїка та ін. *Гірничі електромеханіка та автоматика*. 2017.

REFERENCES:

1. V. Zhezhelenko, G.G., Pivnyak, G. G., & Trofimov, Yu.A. Papayka (2020). Reaktyvna potuzhnist v elektrychnykh merezhakh [Reactive power in electrical measurements]: monograph. I; Ministry of Education and Science of Ukraine, Nat. tech. U-T "Dneprovskaya Polytechnic". Dnipro: NTU "DP". 72 p.
2. G.G., Pivnyak, I.V., Zhezhelenko, & Yu.A., Papaika (2018). Enerhetychna efektyvnist system elektropostachannia [Energy efficiency of electrical power supply systems]: monograph; Ministry of Education and Science of Ukraine, Nat. tech. Dnipro Polytechnic University. Dnipro: NTU "DP", 148 p.
3. Papaika, Yu.A (2019). Enerhetychna efektyvnist system elektropostachannia hirnychykh pidpriumstv z nelineinymy navantazhenniamy [Energy efficiency of power supply systems for power plants with non-linear inputs]: dissertation for the development of the scientific level of Doctor of Technical Sciences – NTU "Dnipro Polytechnic".
4. Papaika, Yu.A. (2019). Zastosuvannia indyvidual. hrafikiv vyshchych harmonik v zadachakh elektromahn. sumisnosti ta enerhoefektyvnosti hirnychykh pidpriumstv [The application is individual. graphs of higher harmonics in electromagnetic problems. compatibility and energy efficiency of mining enterprises]. I.V. Zhezhelenko, Yu. A. Papaika, O.H. Lysenko, K.S. Rodna *Mining Electromechanics*. No. 101. P. 3–7.
5. I.V., Zhezhelenko, Yu. A., Papaika, & O.H., Lysenko (2017). Otsinochni metody vyznachennia ekonomichnoho ekvivalentu reaktyvnoi potuzhnosti [Evaluation methods for determining the economic equivalent of reactive power]. *Mining electromechanics and automation*.