

## ПІДВИЩЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА КОРИСНОЇ ДІЇ НАФТОПРОМИСЛОВОЇ РОЗПОДІЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

Ю. Ф. Романюк, О. В. Соломчак, М. В. Гложик

ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727172,  
e-mail: [ep eo@n i p g . e d u . u a](mailto:ep eo@n i p g . e d u . u a)

Розглянуто питання підвищення ефективності передачі електроенергії споживачам за різного характеру їх навантаження. Проаналізована залежність коефіцієнта корисної дії (ККД) електричної мережі нафтопромислу, що складається з лінії живлення і знижувального трансформатора, від повної потужності навантаження за різних співвідношень між активною і реактивною складовими потужності, й визначено умови, за яких можна забезпечити максимальну ефективність електропередачі. Показано на прикладах, що ККД електропередачі залежить не тільки від активного навантаження, але й значною мірою від її реактивного навантаження. За наявності сталого реактивного навантаження та збільшення активного навантаження збільшується повна потужність і ККД електропередачі знижується, причому у режимі малих навантажень графік зміни ККД електропередачі наближається до параболічної форми, так як зменшується вплив активного навантаження на величину втрат активної потужності, і їх величина буде залежати, в основному, від реактивного навантаження, яке залишається незмінним. ККД досягає максимального значення за умови рівності активної та реактивної складових потужності. У разі іншого співвідношення між ними ККД знижується. За одночасного збільшення активного й реактивного навантажень та сталого значення коефіцієнта потужності ККД електропередачі суттєво знижується через збільшення втрат. За сталого активного навантаження та збільшення реактивного ККД електропередачі знижується, оскільки при збільшенні реактивного навантаження збільшуються втрати активної потужності, тоді як активна потужність залишається незмінною. Другою умовою, за якої ККД лінії буде максимальним, є повна компенсація реактивного навантаження. Тому з метою підвищення ефективності електропередачі потрібно здійснювати компенсацію реактивної потужності, що дозволяє зменшити втрати електроенергії та видатки на її оплату й покращити якість електроенергії. Запропоновано також інші способи підвищення ККД електропередачі шляхом регулювання рівня напруги в центрі живлення, зменшення еквівалентного опору проводів лінії, оптимального завантаження трансформаторів знижувальних підстанцій та забезпечення економічних режимів їх роботи.

Ключові слова: електрична мережа, передача електроенергії, втрати потужності, коефіцієнт корисної дії.

Рассмотрены вопросы повышения эффективности передачи электроэнергии потребителям при различном характере их нагрузки. Проанализирована зависимость коэффициента полезного действия (КПД) электрической сети нефтепромысла, состоящего из линии питания и понижающего трансформатора, от полной мощности нагрузки при различных соотношениях между активной и реактивной составляющими мощности, и определены условия, при которых можно обеспечить максимальную эффективность электропередачи. Показано на примерах, что КПД электропередачи зависит не только от активной нагрузки, но и во многом от ее реактивной нагрузки. При наличии постоянной реактивной нагрузки и увеличении активной нагрузки увеличивается полная мощность и КПД электропередачи снижается, причем в режиме малых нагрузок график изменения КПД электропередачи приближается к параболической форме, так как уменьшается влияние активной нагрузки на величину потерь активной мощности, и их величина будет зависеть, в основном, от реактивной нагрузки, которая остается неизменной. КПД достигает максимального значения при условии равенства активной и реактивной составляющих мощности. В случае иного соотношения между ними КПД снижается. При одновременном увеличении активной и реактивной нагрузок и постоянного значения коэффициента мощности КПД электропередачи существенно снижается из-за увеличения потерь. При постоянной активной нагрузке и увеличении реактивной КПД электропередачи снижается, так как при увеличении реактивной нагрузки увеличиваются потери активной мощности, тогда как активная мощность остается неизменной. Вторым условием, при которой КПД линии будет максимальным, является полная компенсация реактивной мощности. Поэтому с целью повышения эффективности электропередачи нужно осуществлять компенсацию реактивной нагрузки, что позволяет уменьшить потери электроэнергии и расходы на ее оплату и улучшить качество электроэнергии. Предложены также другие способы повышения КПД электропередачи путем регулирования уровня напряжения в центре питания, уменьшения эквивалентного сопротивления проводов линии, оптимальной загрузки трансформаторов понижающих подстанций и обеспечения экономических режимов их работы.

Ключевые слова: электрическая сеть, несимметричные нагрузки, потери мощности, нейтральный провод.

The issues of increasing the efficiency of electricity transmission to consumers with different nature of their load are considered. The dependence of the efficiency of the electric network of the oil field, consisting of a power line and a step-down transformer, on the total load power at various ratios between the active and reactive components of the power is analyzed, and the conditions under which the maximum transmission efficiency can be ensured are determined. It is shown by examples that the power transmission efficiency depends not only on the active load, but also largely on its reactive load. In the presence of a constant reactive load and an increase in active load, the total power increases and the power transmission efficiency decreases. In the low-load mode, the schedule for changing the power transmission efficiency approaches a parabolic form, since the influence of the active load on the amount of active power loss decreases, and their value will mainly depend on reactive load, which remains unchanged. The efficiency reaches its maximum value provided that the active and reactive components of the power are equal. In the case of a different ratio between them, the efficiency decreases. With a simultaneous increase in active and reactive loads and a constant value of the power factor, the power transmission efficiency is significantly reduced due to an increase in losses. With a constant active load and an increase in reactive load, efficiency of power transmission decreases, since with an increase in reactive load, losses of active power increase, while the active power remains unchanged. The second condition, under which the line efficiency will be maximum, is full compensation of reactive power. Therefore, in order to increase the efficiency of power transmission, it is necessary to compensate for the reactive load, which can reduce the loss of electricity and the cost of its payment and improve the quality of electricity. Other methods are also proposed to increase the efficiency of power transmission by regulating the voltage level in the power center, reducing the equivalent resistance of the line wires, optimizing the loading of the transformers of the step-down substations and ensuring the economic modes of their operation.

Keywords: electrical network, electricity transmission, power loss, efficiency factor.

### Постановка і актуальність проблеми

Передача електроенергії від джерел живлення до споживачів супроводжується втратами електроенергії, які залежать від номінальної напруги електричної мережі, її параметрів та величини й характеру навантаження споживачів. Згідно з даними Міненерго України технологічні витрати електроенергії на передачу електричними мережами 0,38-800 кВ ОЕС України за 2018 рік становили 11,82 % від відпуску електроенергії в мережу, в той час як в енергосистемах країн Європейського Союзу згідно з програмним документом ERGEG [1] вони становлять в середньому від 2 % до 12 %. Тому проблема підвищення енергоефективності наших вітчизняних мереж в умовах постійного здорожчання електроенергії в Україні є надзвичайно актуальною. Європейська директива щодо зменшення втрат електроенергії вимагає від усіх операторів країн ЄС, у тому числі й від України, яка стала учасником оптового ринку електроенергії в рамках проекту інтеграції енергосистем ОЕС до складу Об'єднаної системи континентальної Європи, підвищувати потенціал енергоефективності, конкретизуючи заходи щодо зменшення втрат електроенергії. Таким чином, важливими на сьогодні є питання оптимізації режимів електропостачальних систем з метою зниження втрат та забезпечення енергоефективності передачі енергії.

Одним з найбільш ефективних технічних заходів щодо зниження втрат електроенергії в електричних мережах нафтогазових комплексів (НГК) є компенсація реактивної потужності навантаження [2, 3], що дозволяє зменшити

втрати електроенергії та видатки на її оплату й покращити якість електроенергії.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [4] встановлено чинники, що впливають на зміну технічних втрат електроенергії, та залежність динаміки зміни технічних втрат за час експлуатації елементів систем електропостачання, а також розроблено заходи щодо зниження втрат електроенергії у системах електропостачання.

Питанням підвищення економічної ефективності роботи розподільчих електричних мереж присвячена велика кількість вітчизняних і зарубіжних наукових публікацій [5-7] та інші.

Методика вибору типу й оптимальної потужності джерел компенсації реактивного навантаження споживачів за критерієм мінімуму дисконтованих витрат, які включають витрати на генерування та передавання реактивної потужності споживачам, капітальні вкладення на встановлення компенсуювальних пристроїв і витрати на їх експлуатацію запропонована у [8]. Для визначення оптимального розподілу реактивного навантаження між джерелами використано метод невизначених множників Лагранжа з врахуванням технічних обмежень.

У статті [9] досліджено вплив компенсації реактивної потужності на параметри режиму і стійкість електричної системи, встановлено вплив допустимих рівнів компенсації реактивної потужності на стійкість вузлів навантаження. Встановлена техніко-економічна ефективність ступеня компенсації реактивної потужності на параметри режиму електричної системи

за схемою "глибокого вводу" з урахуванням добової нерівномірності навантаження.

У [10] показано, що, змінюючи ступінь компенсації реактивної потужності в розподільних мережах промислових споживачів, можна значно зменшити втрати активної потужності, зумовлені реактивним навантаженням споживачів в електричних мережах енергопостачальних компаній.

Залежність ККД трансформатора від коефіцієнтів завантаження та різних рівнів вхідної напруги та різного характеру навантаження детально проаналізовані в [5]. Показано, що оптимальний коефіцієнт завантаження трансформатора, який відповідає максимальному значенню ККД, залежить не тільки від його номінальних параметрів, а й значною мірою від його вхідної напруги. Максимальні значення ККД сучасних трансформаторів відповідають низьким коефіцієнтам завантаження, тому регулювання напруги на їх вході є одним з ефективних заходів підвищення економічності їх роботи. В усіх випадках, незалежно від зміни характеру навантаження трансформатора, його ККД збільшується з підвищенням коефіцієнта потужності.

Тому в цій роботі проаналізуємо залежність ККД електропередачі від величини й характеру навантаження споживача з врахуванням сумарних втрат потужності в живильній лінії та знижувальному трансформаторі з метою можливого забезпечення максимальної ефективності передачі електроенергії.

### Невирішені частини загальної проблеми

Виконана робота присвячена питанню підвищення економічної ефективності роботи розподільчих нафтопромислових електричних мереж. Невирішеними залишаються питання аналізу залежності ККД цих мереж від потужності й характеру навантаження та визначення умов, за яких може бути забезпечена максимальна ефективність передачі електроенергії споживачам.

### Мета та завдання досліджень

Метою цієї роботи є аналіз ефективності передачі електричної енергії споживачам за різного характеру їх навантаження та визначення умов, за яких можна забезпечити максимальний ККД електропередачі.

Для вирішення поставленої проблеми сформульовано такі завдання:

– проаналізувати залежність ККД розподільчої електричної мережі від потужності та характеру навантаження;

– визначити умови, за яких електрична мережа буде працювати з максимальним ККД;  
– запропонувати способи підвищення ефективності передачі електричної енергії.

### Результати досліджень

Одним з економічних показників роботи електричних мереж, що характеризує ефективність передачі електроенергії споживачам, є коефіцієнт корисної дії передачі (ККД). Для ліній електропередавання ККД визначають за формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{л}}}, \quad (1)$$

де  $P_1, P_2$  – відповідно активна потужність навантаження на початку та в кінці лінії;

$\Delta P_{\text{л}}$  – втрати активної потужності в лінії, які обчислюють за формулою

$$\Delta P_{\text{л}} = \frac{S_2^2}{U_2^2} r = \frac{P_2^2}{U_2^2 \cos^2 \varphi_2} r, \quad (2)$$

де  $S_2$  – повна потужність навантаження в кінці лінії;

$U_2$  – напруга в кінці лінії;

$r$  – активний опір лінії;

$$\cos \varphi = \frac{P_2}{\sqrt{P_2^2 + Q_2^2}} - \text{коефіцієнт потужності}$$

навантаження лінії.

Для трансформаторів ККД розраховують за формулою [5]

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_x + \Delta P_k} = \frac{k_3 S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{k_3 S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \Delta P_x + \Delta P_k k_3^2}, \quad (3)$$

де  $S_{\text{ном}}$  – номінальна потужність трансформатора;

$P_2, \cos \varphi_2$  – активна потужність і коефіцієнт потужності навантаження;

$\Delta P_x, \Delta P_k$  – відповідно втрати неробочого ходу і короткого замикання;

$$k_3 = \frac{S_2}{S_{\text{ном}}} - \text{коефіцієнт завантаження}$$

трансформатора.

Отже, ККД ліній і трансформаторів залежать не тільки від активної потужності навантаження, але й від реактивного навантаження, рівня напруги розподільної мережі та інших параметрів (перерізу й матеріалу проводів, довжини лінії, типу й потужності трансформаторів, коефіцієнтів їх завантаження і режимів роботи тощо).

Проаналізуємо, наприклад, ефективність передачі електроенергії споживачам за різних режимів навантаження споживачів нафтопромислу. Електропостачання нафтопромислу здійснюється однофазною повітряною лінією напругою 35 кВ, довжиною 20 км, з проводом АС-120 та погонними параметрами  $r_0 = 0,249$  Ом/км,  $x_0 = 0,403$  Ом/км. На знижувальній підстанції 35/10 кВ встановлено трансформатор ТМН-10000/35 з РПН  $\pm 6 \times 1,5\%$  з номінальними параметрами:  $S_{ном} = 10000$  кВ·А,  $U_{вн} = 35$  кВ,  $U_{нн} = 10,5$  кВ,  $\Delta P_x = 17$  кВт,  $\Delta P_k = 85$  кВт,  $I_x = 0,7\%$ ,  $U_k = 7,5\%$ .

Розглянемо наступні режими навантаження знижувальної підстанції:

$$P_2 = \text{var}, Q_2 = 0, \cos\varphi_2 = 1;$$

$$P_2 = \text{var}, Q_2 = \text{const};$$

$$P_2 = \text{var}, Q_2 = \text{var}, \cos\varphi_2 = \text{const};$$

$$P_2 = \text{const}, Q_2 = \text{var}.$$

Для розрахунку режимів електричної мережі з метою їх оптимізації та забезпечення ефективності передачі електроенергії була розроблена спеціальна програма, за допомогою якої враховано регулювання напруги зміною коефіцієнтів трансформації трансформатора за умови забезпечення заданого рівня напруги на його виводах та залежність втрат потужності в трансформаторі й лінії від вхідної напруги. Розрахунок режимів виконувався методом послідовних наближень у середовищі Excel.

Результати розрахунків залежності втрат потужності в лінії живлення та знижувальному трансформаторі і ККД електропередачі для заданих режимів і вихідних даних наведені в таблиці 1.

Для аналізу результатів розрахунку побудуємо графічні залежності втрат потужності й ККД лінії від її режимних параметрів (рис. 1-4).

Таблиця 1 – Результати розрахунку втрат потужності та ККД для різних режимів навантаження споживачів

Режим навантаження	$P_2$ , МВт	$Q_2$ , Мвар	$S_2$ , МВ·А	$\cos \varphi$	$\Delta P_L$ , кВт	$\Delta P_T$ , кВт	$\Delta P$ , кВт	$\eta$ , в.о.
$P_2 = \text{var}$ $Q_2 = 0$ $\cos\varphi_2 = 1$	1	0	1	1	4,3	17,7	22,0	0,979
	2	0	2	1	16,9	20,2	37,1	0,982
	3	0	3	1	38,3	24,4	62,7	0,980
	4	0	4	1	68,7	30,5	99,2	0,976
	5	0	5	1	108,5	38,5	146,9	0,971
	6	0	6	1	158,0	48,5	206,5	0,967
	7	0	7	1	218,1	60,5	278,5	0,962
	8	0	8	1	288,9	74,7	363,5	0,957
	9	0	9	1	371,2	91,1	462,2	0,951
	10	0	10	1	465,7	109,8	575,5	0,946
$P_2 = \text{var}$ $Q_2 = \text{const}$ $\cos\varphi_2 = \text{var}$	0	4	4,000	0,000	75,8	30,5	106,2	0,000
	1	4	4,123	0,243	81,4	31,4	112,7	0,899
	2	4	4,472	0,447	96,5	34,1	130,6	0,939
	3	4	5,000	0,600	121,6	38,8	160,4	0,949
	4	4	5,657	0,707	157,2	45,4	202,6	0,952
	5	4	6,403	0,781	203,5	54,1	257,6	0,951
	6	4	7,211	0,832	261,3	64,9	326,2	0,948
	7	4	8,062	0,868	331,1	77,9	409,0	0,945
	8	4	8,944	0,894	413,8	93,3	507,0	0,940
	9	4	9,849	0,914	510,1	111,1	621,2	0,935
10	4	10,770	0,928	621,1	131,5	752,5	0,930	
$P_2 = \text{var}$ $Q_2 = \text{var}$ $\cos\varphi_2 = \text{const}$	1	1	1,414	0,707	9,2	18,4	27,6	0,973
	2	2	2,828	0,707	36,7	23,4	60,1	0,971
	3	3	4,243	0,707	85,1	32,3	117,3	0,962
	4	4	5,657	0,707	157,2	45,4	202,6	0,952
	5	5	7,071	0,707	256,7	63,2	319,8	0,940
	6	6	8,485	0,707	388,1	86,0	474,1	0,927
	7	7	9,899	0,707	557,3	114,5	671,8	0,912
	8	8	11,314	0,707	771,8	149,5	921,3	0,897
	9	9	12,728	0,707	1042,8	191,9	1234,7	0,879
	10	10	14,142	0,707	1383,6	243,1	1626,7	0,860

Продовження таблиці 1

Режим навантаження	$P_2$ , МВт	$Q_2$ , Мвар	$S_2$ , МВ·А	$\cos \varphi$	$\Delta P_L$ , кВт	$\Delta P_T$ , кВт	$\Delta P$ , кВт	$\eta$ , в.о.
$P_2 = const$ $Q_2 = var$ $\cos \varphi_2 = var$	5	0	5,000	1,000	108,5	38,5	146,9	0,971
	5	1	5,099	0,981	116,7	39,5	156,2	0,970
	5	2	5,385	0,928	134,7	42,4	177,0	0,966
	5	3	5,831	0,857	163,3	47,2	210,5	0,960
	5	4	6,403	0,781	203,5	54,1	257,6	0,951
	5	5	7,071	0,707	256,7	63,2	319,8	0,940
	5	6	7,810	0,640	324,2	74,5	398,7	0,926
	5	7	8,602	0,581	407,7	88,4	496,0	0,910
	5	8	9,434	0,530	509,2	104,8	614,0	0,891
	5	9	10,296	0,486	631,0	124,1	755,2	0,869
	5	10	11,180	0,447	776,0	146,5	922,5	0,844

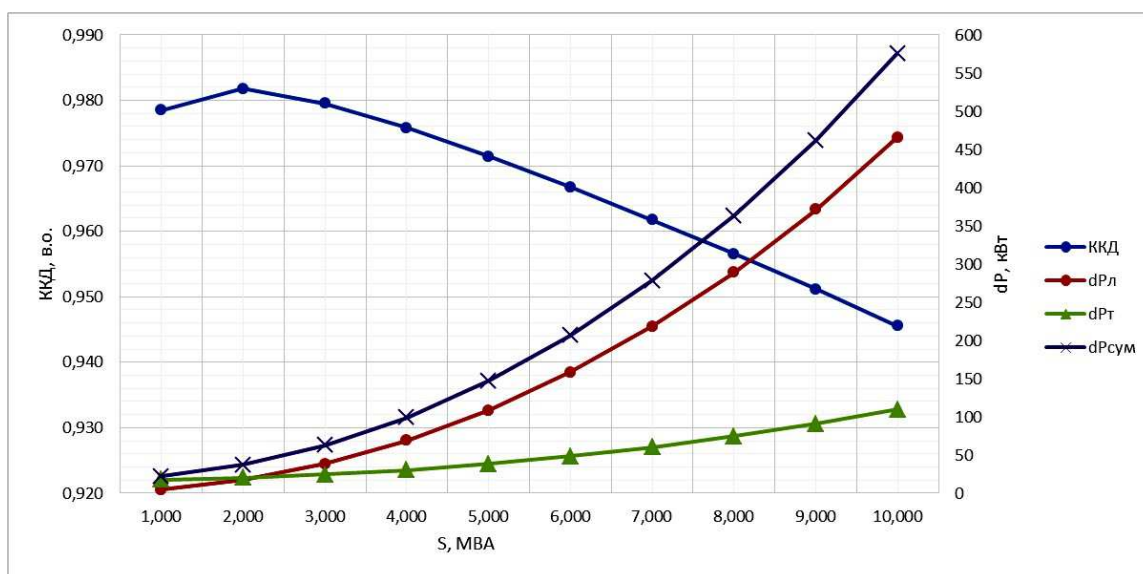


Рисунок 1 – Графіки залежностей  $\Delta P = f(S_2)$ ,  $\eta = f(S_2)$  для режиму навантаження  $P_2 = var$ ,  $Q_2 = 0$ ,  $\cos \varphi_2 = 1$

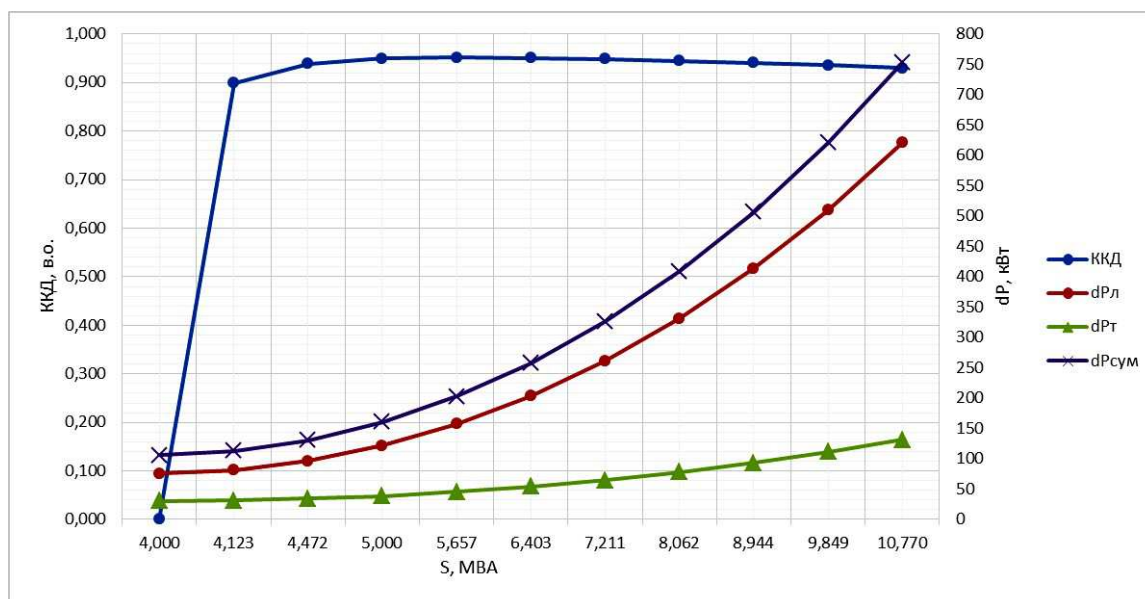


Рисунок 2 – Графіки залежностей  $\Delta P = f(S_2)$ ,  $\eta = f(S_2)$  для режиму навантаження  $P_2 = var$ ,  $Q_2 = const$ ,  $\cos \varphi_2 = var$

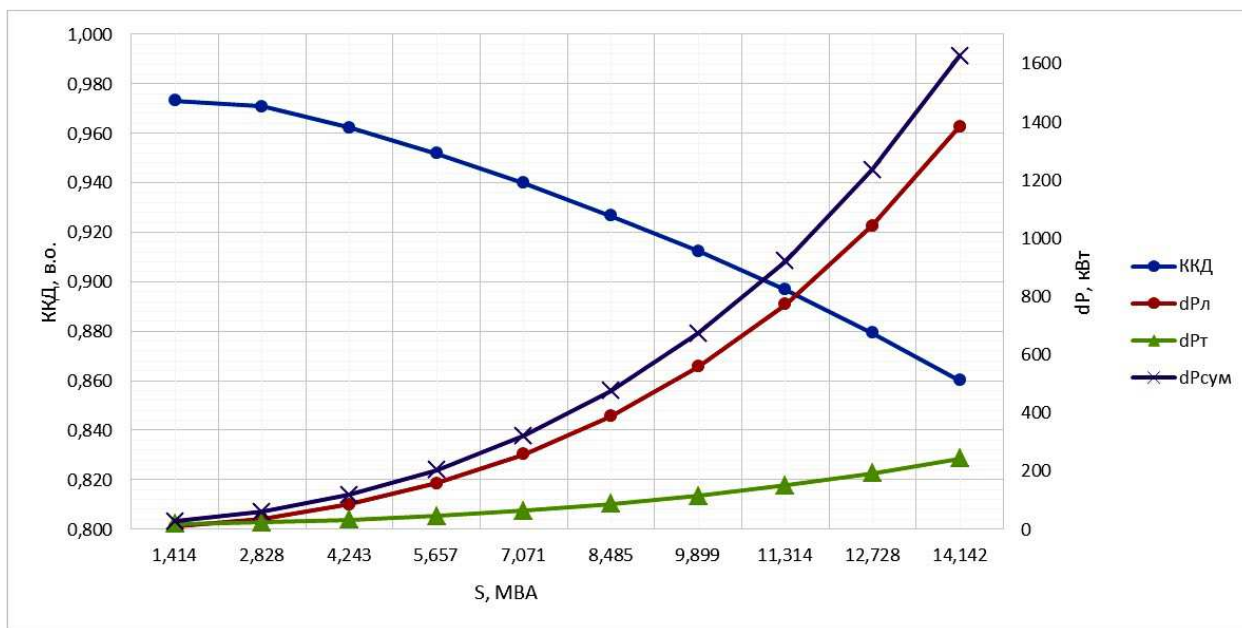


Рисунок 3 – Графіки залежностей  $\Delta P = f(S_2)$ ,  $\eta = f(S_2)$  для режиму навантаження  $P_2 = \text{var}$ ,  $Q_2 = \text{var}$ ,  $\cos \varphi_2 = \text{const}$

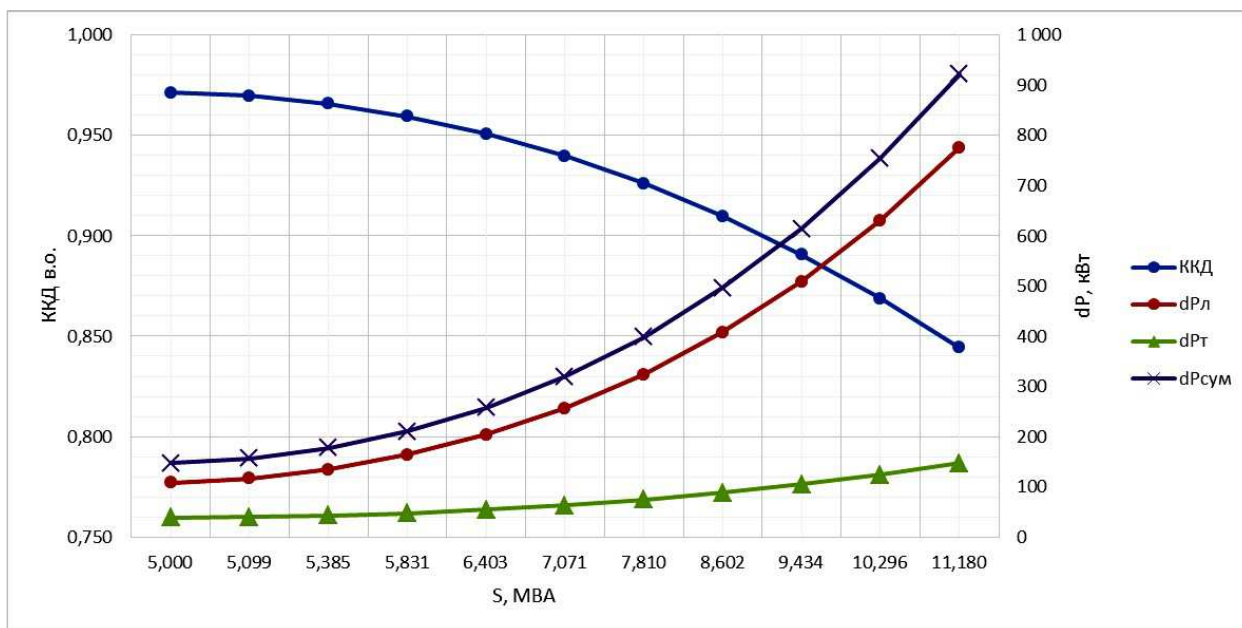


Рисунок 4 – Графіки залежностей  $\Delta P = f(S_2)$ ,  $\eta = f(S_2)$  для режиму навантаження  $P_2 = \text{const}$ ,  $Q_2 = \text{var}$ ,  $\cos \varphi_2 = \text{var}$

З наведених вище рисунків бачимо, що у разі збільшення активної потужності за відсутності реактивного навантаження (див. рис. 1) втрати активної потужності в лінії і трансформаторі збільшуються, внаслідок чого ККД електричної мережі зменшується, і навпаки, у разі зменшення активного навантаження ККД електропередачі збільшується. Отже, з метою підвищення ККД потужність споживачів потрібно зменшувати.

За наявності сталого реактивного навантаження та збільшення активної потужності збільшується повна потужність навантаження,

тому ККД електропередачі знижується більшою мірою, аніж за попереднього режиму, оскільки при цьому збільшуються сумарні втрати активної потужності, причому характер зміни ККД буде дещо іншим (див. рис. 2). У режимі малих навантажень графік зміни ККД лінії наближається до параболічної форми. Максимальне значення ККД електропередачі  $\eta = 0,952$  відповідає рівності потужностей  $P_2 = Q_2 = 4 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ . При зменшенні активного навантаження ККД починає знижуватись внаслідок того, що зменшується вплив активного навантаження на величину втрат активної потужності, і їх величину

на буде залежати, в основному, від реактивного навантаження, яке залишається незмінним. Очевидно, що у цьому випадку з метою підвищення ККД електричну мережу слід розвантажити від передачі реактивної потужності шляхом компенсації реактивного навантаження.

За одночасного збільшення активного й реактивного навантаження та сталого значення коефіцієнта потужності (див. рис. 3) ККД електропередачі суттєво знижується через збільшення втрат. За сталого активного навантаження та збільшення реактивного (див. рис. 4) ККД електропередачі, як і в першому випадку, знижується, оскільки при збільшенні реактивного навантаження збільшуються втрати активної потужності, тоді як активна потужність залишається незмінною.

В усіх розглянутих випадках з метою підвищення економічності режимів роботи електропередачі потрібно знижувати її повне навантаження, наприклад, шляхом компенсації реактивної потужності, або зменшувати активний опір мережі шляхом увімкнення резервних кіл. Одночасно можна зменшувати також споживання активної потужності, наприклад, впроваджуючи енергоощадні технології та інші заходи щодо зменшення втрат активної потужності.

З метою аналізу залежності ККД лінії електропередавання від параметрів режиму виразимо її ККД через втрати активної потужності  $\Delta P_n$ , виражені окремо від передачі активної та реактивної потужностей:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_n} = \frac{1}{1 + \frac{P_2}{U_2^2} r + \frac{Q_2^2}{P_2 U_2^2} r}, \quad (4)$$

де  $P_2$ ,  $Q_2$  – активна і реактивна потужності навантаження в кінці лінії;

$U_2$  – напруга в кінці лінії.

Визначимо умови, за яких лінія буде працювати з максимальним ККД при заданій потужності навантаження. Для цього прирівняємо часткові похідні  $\eta$  згідно з (4) по  $P_2$  і  $Q_2$  до нуля:

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_2} = - \frac{\frac{r}{U_2^2} - \frac{Q_2^2 r}{P_2^2 U_2^2}}{\left(1 + \frac{P_2}{U_2^2} r + \frac{Q_2^2}{P_2 U_2^2} r\right)^2} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial Q_2} = - \frac{\frac{2Q_2 r}{P_2 U_2^2}}{\left(1 + \frac{P_2}{U_2^2} r + \frac{Q_2^2}{P_2 U_2^2} r\right)^2} = 0. \quad (6)$$

З виразу (5) одержимо умову, за якої ККД лінії буде максимальним:

$$\frac{r}{U_2^2} \left(1 - \frac{Q_2^2}{P_2^2}\right) = 0, \quad (7)$$

звідки випливає умова рівності активної та реактивної потужностей навантажень

$$|Q_2| = |P_2|. \quad (8)$$

У разі передачі повної потужності  $S_2 = \sqrt{P_2^2 + Q_2^2}$  з іншим співвідношенням її активної та реактивної складових ККД лінії знижується (див. рисунок 2). Підвищити ефективність електропередачі можна, вирівнявши активне та реактивне навантаження, наприклад, шляхом часткової компенсації реактивного навантаження за низьких значень коефіцієнта потужності.

З виразу (6) одержимо другу умову, за якої ККД лінії досягне максимального значення. При цьому реактивна потужність навантаження лінії повинна дорівнювати нулю:

$$Q_2 = 0. \quad (9)$$

Цій умові відповідає повна компенсація реактивної потужності навантаження лінії. За одночасного зменшення активного і реактивного навантаження зменшуються сумарні втрати активної потужності й згідно з виразом (4) підвищується ККД лінії.

Очевидно, що ККД лінії залежить також від активного опору  $r$  фаз лінії і величини напруги  $U_2$  в кінці лінії. У разі зменшення опору проводів і підвищення рівня напруги  $U_2$ , як це випливає з (2), ККД лінії збільшується. Отже, при заданих параметрах лінії підвищити її ККД можна також шляхом регулювання рівня робочої напруги в центрі живлення.

Загальний ККД електропередачі, як показують результати розрахунку, дорівнює добутку ККД лінії й трансформатора. Аналітично його можна визначити за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_x + \Delta P_k \frac{P_2^2 + Q_2^2}{S_{ном}^2} + \Delta P_n}. \quad (10)$$

З виразу (10) видно, що підвищити ефективність передачі електроенергії можна зменшивши сумарні втрати потужності в розподільчій мережі, наприклад, шляхом підвищення рівня робочої напруги лінії, збільшення перерізу проводів, розвантаження мережі від передачі реактивної потужності, забезпечення економічних режимів роботи трансформаторів на двотрансформаторних підстанціях, зменшення сумарного навантаження споживачів внаслідок впровадження енергоощадних технологій і енерго-

ощадного обладнання та інших заходів. Компенсацію реактивного навантаження доцільно здійснювати на шинах нижчої напруги знижувальної підстанції, так як при цьому одночасно зменшуються втрати потужності в трансформаторі та лінії і підвищується загальний ККД електропередачі.

### **Висновки**

Коефіцієнт корисної дії електропередачі залежить не тільки від активного навантаження, але й значною мірою також від її реактивного навантаження. Тому з метою підвищення ефективності передачі потрібно здійснювати компенсацію реактивної потужності навантаження.

Максимальний ККД передачі електроенергії відповідає повній компенсації реактивної потужності.

За сталого реактивного навантаження ККД електропередачі досягає максимального значення за умови рівності активної та реактивної складових потужності. У разі іншого співвідношення між ними ККД знижується.

Для підвищення ефективності передачі електроенергії слід зменшувати сумарні втрати потужності в розподільчій мережі.

### **Література**

1. Reduction of Technical and Non-Technical Losses in Distribution Networks. CIRED Working Group CC-2015-2 on losses reduction. Final report. 20.11.2017.
2. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. Москва: ЭНАС, 2014. 456 с.
3. Бурбело М. Й. Математичні задачі електроенергетики. Математичне моделювання електропостачальних систем: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2016. 185 с.
4. Ципленков Д. В., Красовський П. Ю. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання. *Електротехніка та електроенергетика*. 2015. № 1. С.77-82.
5. Романюк Ю. Ф., Коломойцев К. В. Підвищення економічної ефективності роботи трансформаторів знижувальних підстанцій підприємств нафтогазової галузі. *Нафтогазова енергетика*. 2014. № 2(22). С. 71-78.
6. Романюк Ю. Ф., Соломчак О. В. Оптимізація рівнів напруги в електричних мережах з метою зменшення втрат потужності та енергії в

трансформаторах. *Промелектро*. 2014. № 6(90). С. 45-48.

7. Романюк Ю. Ф., Федорів М. Й., Терлецький Ю. О. Оптимізація режимів роботи трансформаторів знижувальних підстанцій нафтопромислових мереж. *Нафтогазова енергетика*. 2014. № 2(22). С. 63-72.

8. Romaniuk Y. F., Solomchak O.V. Application of the method of lagrange's undetermined multipliers in determination of optimal reactive power compensation. *The current stage of development of scientific and technological progress' 2019. SWorld – March. 2019.* URL: <https://www.sworld.com.ua/index.php/ru/ge7-5/31224-ge7-030>.

9. Хоменко І. В., Піскур'єв М. Ф., Стасюк І. В. До питання компенсації реактивної потужності в електричних системах. *Вісник Національного технічного університету "ХПИ". Сер. Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика: зб. наук. праць*. 2018. № 32 (1308). С. 71-76.

10. Демов О. Д., Никитенко Ю. В., Коноплицький В. А. Вплив компенсуювальних установок промислових споживачів на зниження втрат в електричних мережах енергопостачальних компаній. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2015. № 6. С.125-128.

### **References**

1. Reduction of Technical and Non-Technical Losses in Distribution Networks. CIRED Working Group CC-2015-2 on losses reduction. Final report. 20.11.2017.
2. Zhelezko Yu.S. Losses of Electricity. Reactive power Electricity Quality: A Manual for Practical Calculations. Moscow: ENAS, 2014. 456 p.
3. Burbelo M. Ya. Mathematical problems of electric power engineering. Mathematical modeling of power supply systems: teach. manual. Vinnytsia: VNTU, 2016. 185 p.
4. Tsyplenkov DV, Krasovsky P. Yu. Methods and means of reducing the technical losses of electricity in the elements of power supply systems. *Electrical engineering and power engineering*. 2015. No. 1. P.77-82.
5. Romanyuk Yu.F., Kolomoitsev K.V. Improvement of the economic efficiency of the transformers of downstream substations of the oil and gas industry enterprises. *Oil and Gas Power Engineering*. 2014. No. 2 (22). P. 71-78.
6. Romanyuk Yu. F., Solomchak O. V. Optimization of voltage levels in electric networks in order to reduce power and energy losses in transformers. *Promelektro*. 2014, No. 6 (90). P. 45-48.



7. Romanyuk Yu.F., Fedoriv M.Ya., Terlets'kyi Yu.O. Optimization of operating modes of transformers of downstream substations of oil-field networks. *Oil and Gas Power Engineering*. 2014. No. 2 (22). P. 63-72.

8. Romaniuk Y. F., Solomchak O.V. Application of the method of Lagrange's undetermined multipliers in determination of optimal reactive power compensation. *The current stage of development of scientific and technological progress' 2019. SWorld – March. 2019*. URL: <https://www.sworld.com.ua/index.php/ru/ge7-5/31224-ge7-030>.

9. Khomenko I.V., Piskuryov M.F., Stasyuk I.V. On the issue of compensation of reactive power in electric systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series Problems of perfection of electric machines and apparatuses. Theory and practice. Zb. sciences works*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2018. No. 32 (1308). P. 71-76.

10. Demov O. D., Nikitenko Yu. V., Konoptyts'kyi V.A. Influence of compensating installations of industrial consumers on reduction of losses in electric networks of energy supplying companies. *Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute*. 2015. No 6. P. 125-128.