

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311.42

DOI 10.20535/1813-5420.3.2022.270246

О.С. Яндутьський, д-р. техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-0362-7947

В.І. Моссаковський, аспірант ORCID 0000-0002-5096-5957

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ ВСТАНОВЛЕНОЇ ТРАНСФОРМАТОРНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА РОЗПОДІЛЬЧИХ ПІДСТАНЦІЯХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

*Робота присвячена підходам щодо визначення та обґрунтування оптимальної величини потужності трансформаторів на розподільчих підстанціях. Підбираючи трансформатор під графік електричного навантаження споживачів розподільчої підстанції в електричній мережі, потрібно забезпечити повне використання кожної одиниці встановленої трансформаторної потужності. На прикладах трьох трансформаторів, що належать до класів напруги 10 кВ, 35 кВ та 110 кВ показано обчислення оптимальної величини трансформаторної потужності, виконано підбір цієї потужності, виходячи з наявної номенклатури трансформаторів даного класу напруги. Здійснено техніко-економічне порівняння можливих варіантів у кількості та потужності трансформаторів для набору оптимальної потужності.*

*В якості оцінки встановленої трансформаторної потужності слугують втрати активної енергії, прибуток від передачі активної енергії та функція сумарних дисконтованих затрат. Обрані до встановлення на підстанцію трансформатори перевіряються на можливість працювати за найбільшого рівня температури оточуючого середовища +40°C, виходячи із температури найбільш нагрітої точки на поверхні ізоляції обмоток.*

*Робота завершується порівнянням результатів двох підходів до оцінки часу напруження та залишкового ресурсу ізоляції, - коли найбільш нагріта точка вважається нерухомою і коли вона здійснює переміщення при зміні величини електричного навантаження.*

**Ключові слова:** графік електричного навантаження, розподільча підстанція, паралельна робота трансформаторів, навантажувальна здатність трансформатора, економічні показники, теплове зношення ізоляції, залишковий ресурс.

**Вступ.** У кошторисі підстанції самим вартісним є силовий трансформатор, а якщо передбачається паралельна робота декількох трансформаторів, то капітальні затрати та видатки зростають в рази. Споживачі, підключені до підстанції, формують найрізноманітніші за виглядом графіки електричного навантаження і трансформатори на підстанціях мають забезпечити транзит потужності до споживачів за цим графіком без порушення якості та надійності електропостачання. Постає питання до визначення та підбору оптимальної величини встановленої трансформаторної потужності на підстанції електричної мережі.

Вважається вкрай неефективним підбір потужності трансформаторів на підстанціях, виходячи з принципу «на розбудову», «на перспективу» тощо. Необхідно в повному обсязі використовувати кожну одиницю встановленої трансформаторної потужності.

Стандарти з керівництва навантажувальної здатності силових трансформаторів кажуть, що для трансформатора припустимо працювати з деяким тривалим у часі перевантаженням, але даний час потрібно компенсувати роботою зі зниженим навантаженням, аби строк служби ізоляції не був вичерпанам завчасно.

Навантажувальна здатність трансформатора та залишковий ресурс визначаються температурою найбільш нагрітої точки на поверхні ізоляції обмоток

**Мета та завдання.** Визначення оптимальної величини встановленої трансформаторної потужності розподільчої підстанції електричної мережі з подальшим підбором отриманої потужності із наявної номенклатури силових трансформаторів. Для кожного отриманого значення трансформаторної потужності визначаються економічні показники та допустимий робочий діапазон температур оточуючого середовища, виходячи з номінальної величини теплового зношення ізоляції обмоток.

**Матеріали досліджень.** Потужність одного чи декількох трансформаторів на підстанціях в електричних мережах має бути підібрана так, аби повністю використовувався кожен кВА. В даній роботі розглядається можливість набору необхідної встановленої потужності  $S_{вст}$  трансформаторного обладнання деякої розподільчої підстанції, кількість трансформаторів варіюється від одного до трьох. У випадку

набору встановленої потужності групою трансформаторів, що працюють паралельно, необхідно враховувати наступні зауваження та рекомендації:

1. мінімальне значення встановленої трансформаторної потужності не може бути меншим за середню потужність, виходячи з графіку навантаження;
2. встановлена потужність має бути меншою за пікову потужність, виходячи з графіку навантаження, щоб мало місце короточасне перевантаження трансформаторів. Тобто  $P_{\max}/S_{\text{вст}} > 1$ ;
3. для трансформаторів, що працюють паралельно, головною умовою є рівність напруг короткого замикання;
4. номінальна потужність таких трансформаторів не повинна відрізнятися більше, ніж в три рази [1,2].

Скажемо, що в подальшому для трансформаторів, що працюють паралельно, вище зазначені пункти 3 та 4 завжди виконуються.

Згідно з методикою, представленою в [3], для визначення величини  $S_{\text{вст}}$  необхідно вихідний графік навантаження перетворити на еквівалентний двоступеневий, де виділяються:

- коефіцієнт завантаження  $K_1$ , для якого має виконуватися умова  $K_1 < 1$ ,
- коефіцієнт завантаження  $K_2$ , максимум навантаження, для якого має виконуватися умова  $K_2 > 1$ ,
- тривалість максимуму навантаження  $K_2$ ,  $t$ , год.

Визначення величини  $S_{\text{вст}}$  відбуватиметься за процедурою: використовуючи в [3, стор. 28] ілюстрацію з допустимою величиною навантаження, що відповідає нормальному тепловому зношенню, наносяться  $K_1$  та  $K_2$ , вертикаль та горизонталь яких мають перетнутися на тривалості максимуму навантаження  $t$ . Якщо перетин відбудеться в іншій точці, тобто вище або нижче часу  $t$ , то це свідчатиме про дефіцит або надлишок  $S_{\text{вст}}$ . Результати буде проілюстровано для наведеної в [3, 4] типової температури оточуючого середовища  $\theta_a = 20^\circ\text{C}$ , рис. 1.

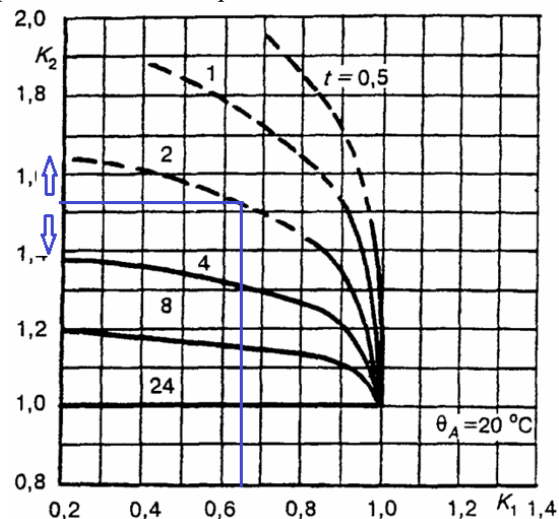


Рисунок 1 – Ілюстрація режиму навантаження та параметрів еквівалентного двоступеневого графіку навантаження

Потрібно розрахувати оптимальну величину  $S_{\text{вст}}$  деякої трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ що живить споживачів, які сумарно формують наступний графік навантаження [5, 6], рис. 2.

Для представленого добового графіку навантаження варто виділити такі показники, як кількість переданої активної енергії 2947,6 кВт·год, середня потужність 122,81 кВт та максимальна потужність 179 кВт.

Починаючи із мінімально можливої величини, яку доцільно обрати на рівні  $S_{\text{вст}} = 126$  кВА, що набирається двома ТМ-63/10, отримано наступні показники еквівалентного двоступеневого графіку навантаження:  $K_1 = 0,76$  в.о.,  $K_2 = 1,42$  в.о.,  $t = 7,1$  год, рис.3. Втім, впродовж  $t = 7,1$  год для  $S_{\text{вст}} = 126$  кВА перевантаження може бути лише на рівні  $K_2 = 1,17$  в.о., для необхідного  $K_2 = 1,42$  в.о., тривалість має бути не більше 2,5 год. Таким чином має місце дефіцит потужності для  $S_{\text{вст}} = 126$  кВА. Подальший підбір потужності  $S_{\text{вст}} = 130$  кВА,  $S_{\text{вст}} = 140$  кВА,  $S_{\text{вст}} = 150$  кВА,  $S_{\text{вст}} = 160$  кВА,  $S_{\text{вст}} = 170$  кВА показує, що зупинитися варто на  $S_{\text{вст}} = 142$  кВА рис. 4:  $K_1 = 0,79$  в.о.,  $K_2 = 1,26$  в.о.,  $t = 4,0$  год.

З використанням представленої в [7] методики буде обчислено економічні показники  $S_{\text{вст}}$ , необхідної для роботи за представленим графіком навантаження. Виходячи з номенклатури типу та потужності трансформаторів 10/0,4 [8, 9], обчислення проводитимуться для 2×ТМ-63, що відповідає середній потужності графіку навантаження, пари ТМ-40+ТМ-100 сумарна потужність яких є найбільш наближеною до оптимальної  $S_{\text{вст}}$ , та для ТМ-160, якщо виходити з найближчої можливої величини потужності одиничного трансформатора. Деякі величини, як то  $S_{\text{вст}} = 150$  кВА просто неможливо набрати.

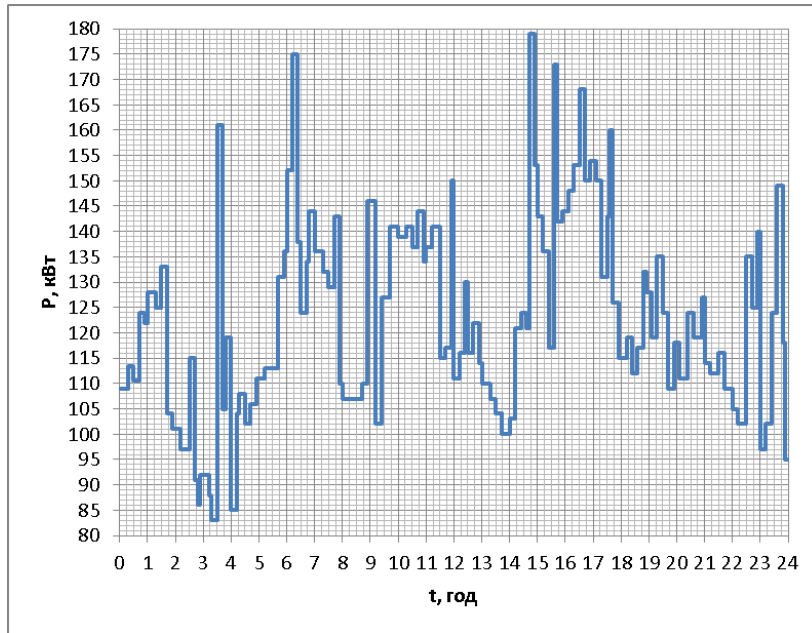


Рисунок 2 – Графік роботи споживачів трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ

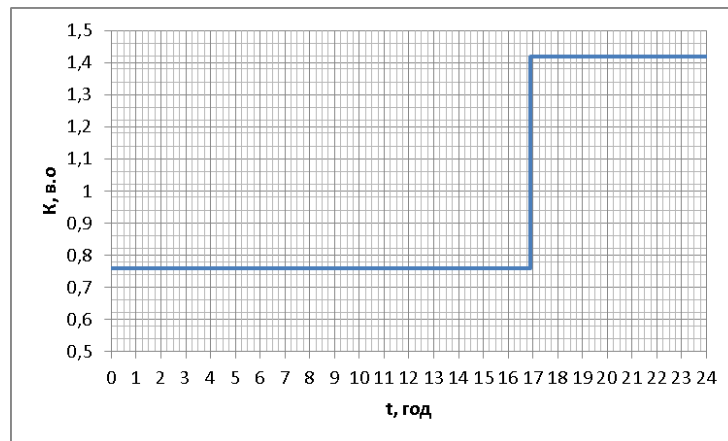


Рисунок 3 – Еквівалентний двоступеневий графік для  $S_{ест}=126$  кВА

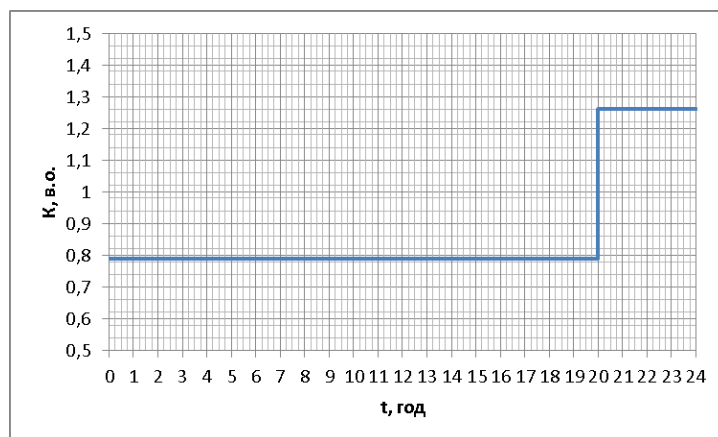


Рисунок 4 – Еквівалентний двоступеневий графік для  $S_{ест}=142$  кВА. Оптимальна величина

Економічними показниками слугуватимуть: дохід, видатки на обслуговування та ремонт, видатки на амортизацію, компенсація втрат активної енергії, прибуток, чистий прибуток (з урахуванням податку) та функція сумарних дисконтованих затрат. Результати розрахунку наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Економічні показники  $S_{вст}$  для підстанції 10/0,4 кВ

	2хТМ-63, грн	ТМ-40+ТМ-100, грн		ТМ-160, грн
		ТМ-40, грн	ТМ-100, грн	
Дохід	1807468,3	516418,6	1291049,7	1807468,3
		1807468,3		
Видатки на обслуговування та ремонт	1920,0	828	1140	1536,0
		1968		
Видатки на амортизацію	2880,0	1242	1710	2304,0
		2952		
Видатки на компенсацію втрат активної енергії	41636,3	11859,3	26490,24	29157,7
		38349,5		
Прибуток	1761032,0	502489,4	1261709,4	1774470,7
		1764198,8		
Чистий прибуток	1232722,4	351742,5	883196,61	1242129,5
		1234939,2		
Функція сумарних дисконтованих затрат	515562,8	161372,9	323802,4	370936,6
		485175,3		

За результатами отриманих економічних показників, а саме найбільшим значенням чистого прибутку та найменшим значенням функції сумарних дисконтованих затрат, для роботи під заданим графіком навантаження потрібно приймати ТМ-160. Співвідношення чистого прибутку  $ТМ-160 > (ТМ-40 + ТМ-100) > 2 \times ТМ-63$ . Співвідношення функції сумарних дисконтованих затрат  $ТМ-160 < (ТМ-40 + ТМ-100) < 2 \times ТМ-63$ .

Нехай група підстанцій 10/0,4 кВ отримують живлення від підстанції 35/10 кВ. Сумарно, споживачі формують графік навантаження, представлений на рис.5 [5, 6]. Потрібно обґрунтувати та отримати оптимальну величину встановленої трансформаторної потужності для підстанції 35/10 кВ.

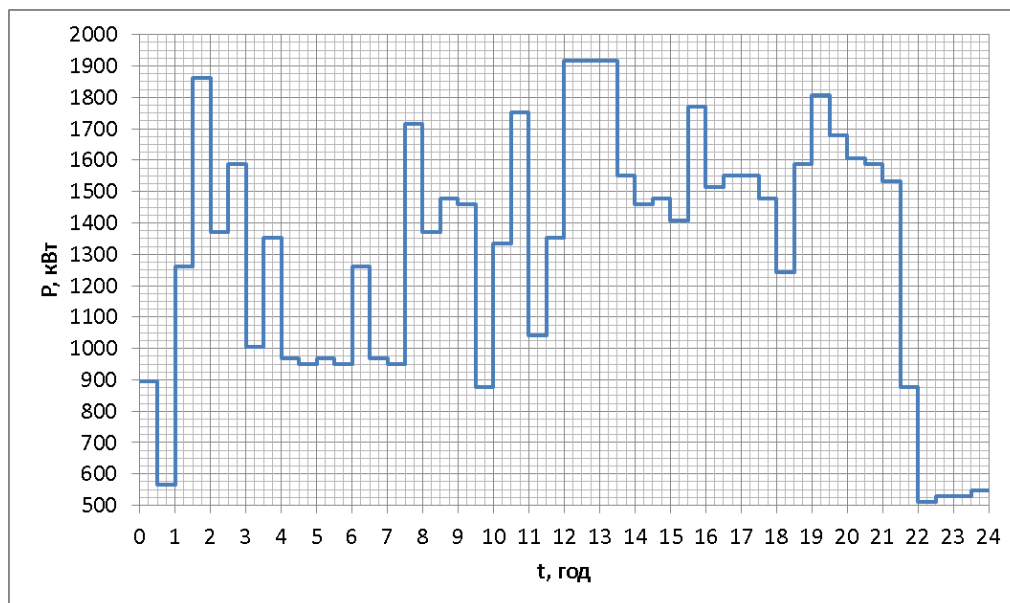


Рисунок 5 – Графік роботи споживачів, сформований для трансформаторної підстанції 35/10 кВ

Для представленого добового графіку навантаження варто виділити такі показники, як кількість переданої активної енергії 31425,46 кВт·год, середня потужність 1309,4 кВт та максимальна потужність 1917,3 кВт.

Починаючи з мінімальної величини  $S_{вст}=1400$  кВА, отримано наступні показники еквівалентного двоступеневого графіку навантаження:  $K_1=0,67$  в.о.,  $K_2=1,37$  в.о.,  $t=10,2$  год. Втім, впродовж  $t=10,2$  год для зазначеної  $S_{вст}$  можливо працювати з перевантаженням  $K_2=1,135$  в.о., для необхідного  $K_2=1,37$  в.о., тривалість має бути не більше 3,5 год. Таким чином має місце дефіцит потужності для  $S_{вст}=1400$  кВА.

Подальший підбір потужності  $S_{вст}=1500$  кВА,  $S_{вст}=1600$  кВА,  $S_{вст}=1700$  кВА,  $S_{вст}=1800$  кВА, показує, що варто зупинитися на  $S_{вст}=1570$  кВА рис. 6:  $K_1=0,71$  в.о.,  $K_2=1,22$  в.о.,  $t=5,92$  год.

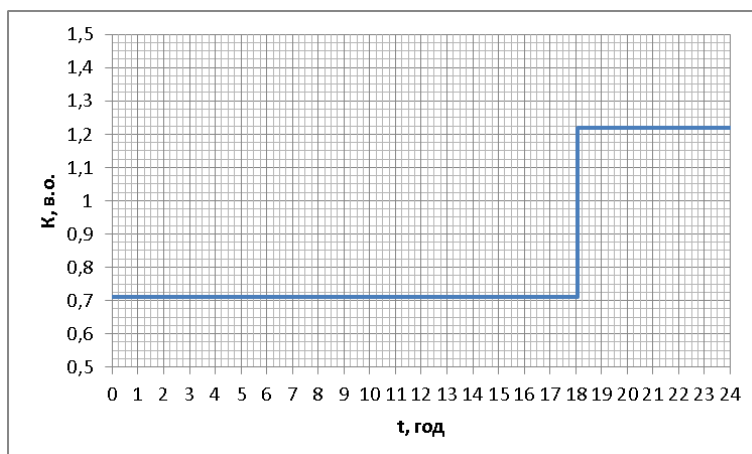


Рисунок 6 – Еквівалентний двоступеневий графік для  $S_{вст}=1570$  кВА. Оптимальна величина

Виходячи з номенклатури типу та потужності трансформаторів 35/10 кВ [8, 9], обґрунтування вигідної  $S_{вст}$  проводитиметься для пари ТМН-400/35+ТМН-1000/35, сумарна потужність яких відповідає середній потужності з графіку навантаження підстанції, ТМН-1600/35, якщо виходити з найближчої можливої величини потужності одиничного трансформатора, та для пари ТМН-630/35+ТМН-1250/35, де обраний варіант слугує лише порівнянням.

Виходячи з мінімального значення втрат активної енергії за добу, потрібно приймати ТМН-1600/35. Співвідношення величини втрат активної енергії виглядає наступним чином: (ТМН-400+ТМН-1000)>(ТМН-630+ТМН-1250)>ТМН-1600, тобто  $448,4 > 348,3 > 330$  кВт·год.

Результати розрахунку економічних показників для зазначених варіантів  $S_{вст}$  наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Економічні показники  $S_{вст}$  для підстанції 35/10 кВ

	ТМН-400/35+ТМН-1000/35, грн		ТМН-1600/35, грн	ТМН-630/35+ТМН-1250/35, грн	
	ТМН-400/35, грн	ТМН-1000/35, грн		ТМН-630/35, грн	ТМН-1250/35, грн
Дохід	5505740,6	13764351,48	19270092,07	6457530,85	12812561,22
	19270092,07			19270092,07	
Видатки на обслуговування та ремонт	5520	9360	12960	6840	11712
	14880			18552	
Видатки на амортизацію	8280	14040	19440	10260	17568
	22320			27828	
Видатки на компенсацію втрат активної енергії	101857,5	164459	194827,8	71386,53	132252,8
	266316,6			203639,3	
Прибуток	5390083	13576492	19042864	6369044	12651028
	18966576			19020073	
Чистий прибуток	3773058,13	9503544,73	13330004,97	4458331,03	8855719,9
	13276602,86			13314050,93	
Функція сумарних дисконтованих затрат	1303775,5	2128190,1	2617878,3	1067265,3	1927647,8
	3431965,53			2994913,09	

За результатами отриманих економічних показників, а саме найбільшим значенням чистого прибутку та найменшим значенням функції сумарних дисконтованих затрат, для роботи під заданим графіком навантаження потрібно приймати ТМН-1600/35.

Нехай група підстанцій 10/0,4 кВ отримують живлення від підстанції 110/10 кВ. Сумарно, споживачі формують графік навантаження, представлений на рис.7 [5, 6].

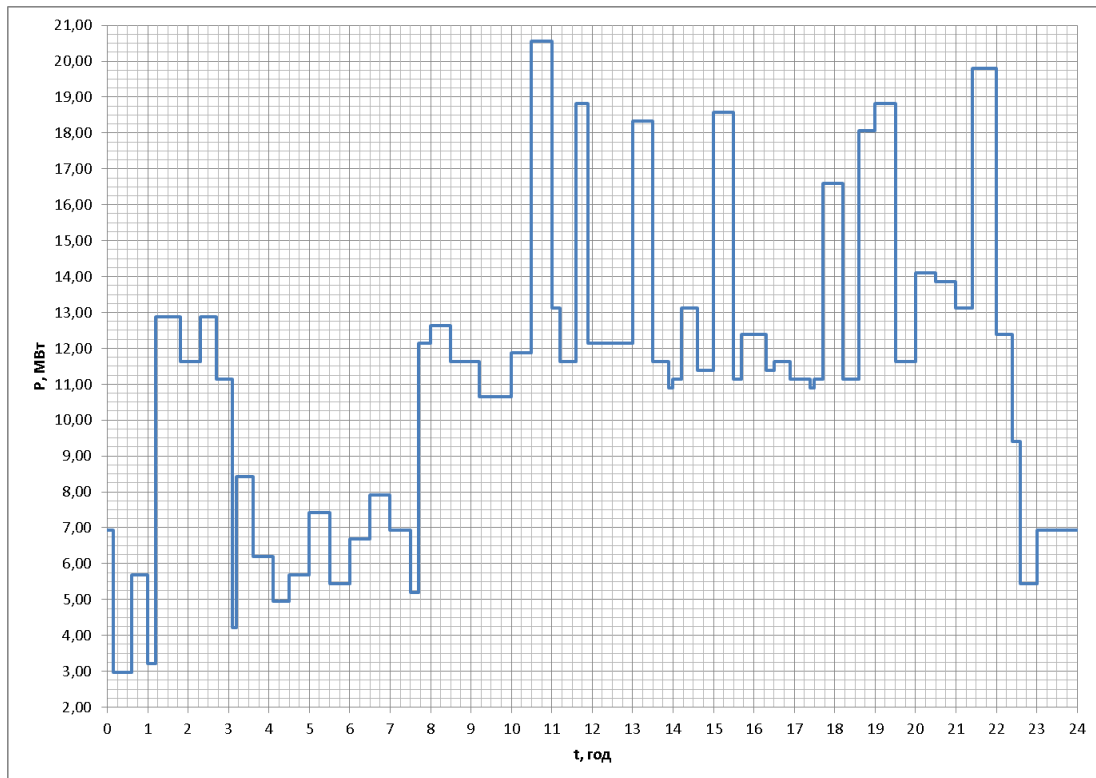


Рисунок 7 – Графік роботи споживачів, сформований для трансформаторної підстанції 110/10 кВ

Для представленого добового графіку навантаження варто виділити такі показники, як кількість переданої активної енергії 271471,5 кВт·год, середня потужність 11,31 МВт, максимальна потужність 20,55 МВт.

Починаючи з мінімальної величини  $S_{вст}=12000$  кВА, отримано наступні показники еквівалентного двоступеневого графіку навантаження:  $K_1=0,62$  в.о.,  $K_2=1,71$  в.о.,  $t=7,4$  год. Втім, впродовж  $t=7,4$  год для зазначеної  $S_{вст}$  можливо працювати з перевантаженням  $K_2=1,16$  в.о., для необхідного  $K_2=1,71$  в.о., тривалість має бути не більше 0,9 год. Таким чином має місце дефіцит потужності для  $S_{вст}=1200$  кВА.

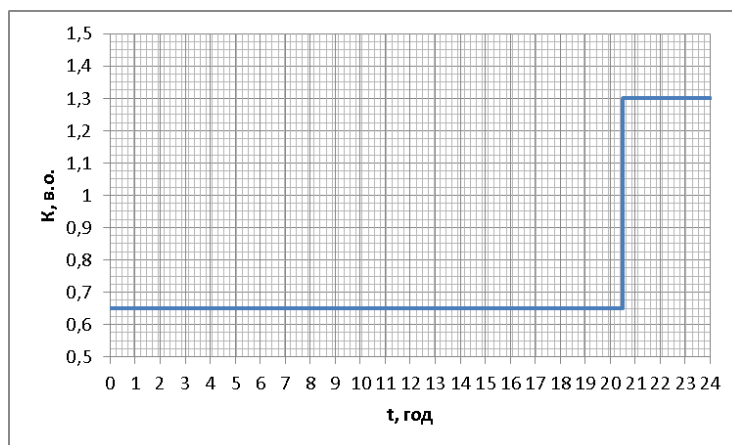


Рисунок 8 – Еквівалентний двоступеневий графік для  $S_{вст}=15800$  кВА. Оптимальна величина

Подальший підбір потужності  $S_{вст}=13000$  кВА,  $S_{вст}=14000$  кВА,  $S_{вст}=15000$  кВА,  $S_{вст}=16000$  кВА,  $S_{вст}=17000$  кВА,  $S_{вст}=18000$  кВА, показує, що оптимальною є величина  $S_{вст}=15800$  кВА рис. 8:  $K_1=0,65$  в.о.,  $K_2=1,3$  в.о.,  $t=3,5$  год.

Виходячи з номенклатури типу та потужності трансформаторів 110/10 кВ [8, 9], визначення  $S_{вст}$  проводитиметься для 2хТМН-6300, сумарна потужність яких відповідає середній потужності з графіку навантаження підстанції 110/10 кВ, для ТМН-4000+ТМН-10000, потужність яких використовується для порівняння, виходячи із відносної простоти її набору, для ТМН-2500+2хТМН-6300, сумарна потужність



яких є найближчою до оптимальної величини, та ТДН-16000, що в номенклатурі потужностей є найближчою потужністю одиничного трансформатора.

Виходячи з мінімального значення втрат активної енергії за добу, потрібно приймати ТДН-16000/110:  $2 \times \text{ТМН-6300} > (\text{ТМН-2500} + 2 \times \text{ТМН-6300}) > (\text{ТМН-4000} + \text{ТМН-10000}) > \text{ТДН-16000}$  або  $1057502,03 > 957000,49 > 773789,6 > 582681,86$  кВт·год.

За результатами отриманих економічних показників для роботи із заданим графіком навантаження потрібно приймати ТДН-16000/110. Чистий прибуток:  $\text{ТДН-16000} > (\text{ТМН-4000} + \text{ТМН-10000}) > (\text{ТМН-2500} + 2 \times \text{ТМН-6300}) > 2 \times \text{ТМН-6300}$  або  $115716303,8 > 115476496,58 > 115279186,24 > 115191021,39$  грн.

Також найменше значення функції сумарних дисконтованих затрат 14182279,25 грн проти найбільшого 21456554,15 грн. для  $2 \times \text{ТМН-6300}$ .

### Діапазон допустимих температур

Попередньо обрані трансформатори перевіряються на можливість працювати в діапазоні температур оточуючого середовища  $-25^{\circ}\text{C}..+40^{\circ}\text{C}$ , виходячи із даних, представлених в [3, 4]. З підвищенням рівня температури оточуючого середовища постає питання щодо необхідності зменшення навантаження, аби температура найбільш нагрітої точки на поверхні ізоляції обмоток не перевищила допустиме значення. Температура оточуючого середовища  $+40^{\circ}\text{C}$  можна вважати критичною для перевірки.

ТМН-160/10 за температури  $+40^{\circ}\text{C}$  має працювати з перевантаженням  $K_2=1,12$  в.о. впродовж  $t=0,9$  год. З таким перевантаженням може працювати 1,99 год, а впродовж зазначених 0,9 год витримує  $K_2=1,315$  в.о. За температури  $0^{\circ}\text{C}$  із зазначеним перевантаженням  $K_2=1,12$  в.о. ТМН-160/10 може працювати 24 год. Таким чином потужність трансформатора було обрано зі значним запасом.

ТМН-1600/35 за температури  $+40^{\circ}\text{C}$  має працювати з перевантаженням  $K_2=1,2$  в.о. впродовж  $t=4,7$  год. Натомість з таким перевантаженням може працювати 1,75 год, а впродовж зазначених 4,7 год витримує лише  $K_2=0,985$  в.о. Таким чином потрібно провести додаткові дослідження.

Скориставшись методикою, представленою в [4], було визначено температуру найбільш нагрітої точки  $\theta_h$  на поверхні ізоляції обмоток трансформатора, що працює з у навантаження рис.5. Графік зміни температури  $\theta_h$  впродовж доби представлено на рис. 9.

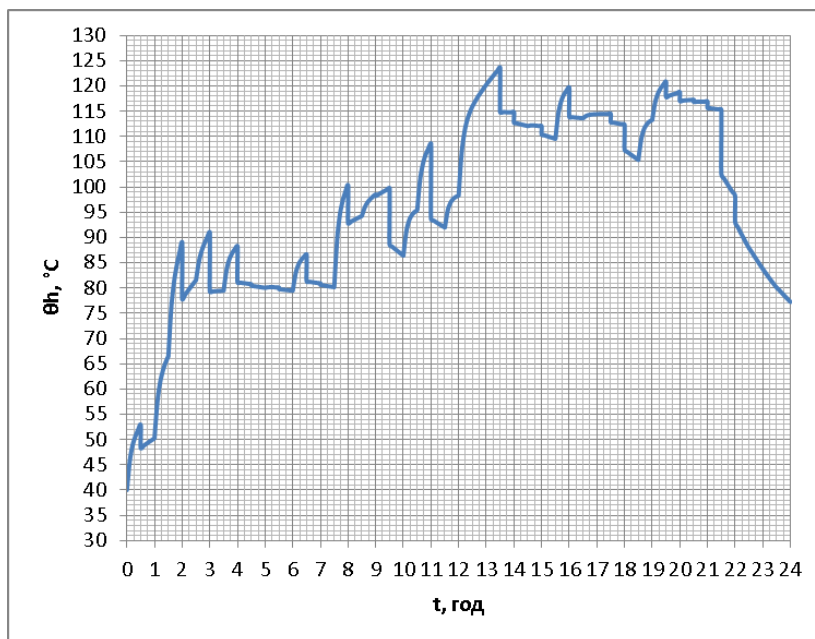


Рисунок 9 – Температура найбільш нагрітої точки ТМН-1600/35

Визначивши швидкість теплового зношення, яка виливає з правила «шести градусів»: через кожні  $6^{\circ}\text{C}$  перевищення температури понад норми, дана швидкість зростає в два рази, було визначено фактичний строк служби трансформатора. Як було раніше з'ясовано, [10], найбільш нагріта точка здійснює переміщення поверхню обмотки, реагуючи на зміну і величини завантаження трансформатора і рівень температури оточуючого середовища. Діючими стандартами з питань керівництва навантажувальною здатністю силових оливних трансформаторів, як то [3 та 4], переміщення найбільш нагрітої точки не враховується, тому представлена там методика оцінки залишкового ресурсу показала, що за добу ТМН-1600/35 напрацював 77,31 год, тобто постарішав в 3,2 рази.

З урахуванням переміщення найбільш нагрітої точки поверхнею обмотки з'ясувалося, що найбільші втрати у строку служби матимуть місце між 12:00 та 13:30, коли трансформатор постарішає на 14,8 год, що і виявиться найбільшою величиною старіння за 24 год. Таким чином, додаткові дослідження вказали на можливість ТМН-1600/35 працювати з таким графіком навантаження за найбільшої температури +40°C.

ТДН-16000/110 за температури +40°C має працювати з перевантаженням  $K_2=1,28$  в.о. впродовж  $t=3,5$  год. Натомість з таким перевантаженням може працювати 1,75 год, а впродовж зазначених 3,5 год витримує лише  $K_2=1,1$  в.о. Таким чином потрібно провести додаткові дослідження, як для попереднього ТМН-1600/35 за такої ж самої температури.

Вважаючи найбільш нагріту точку нерухомою, методики в [3 та 4] показали напрацювання за добу 57,54 год, тобто старіння в 2,4 рази. Оскільки найбільш нагріта точка здійснює переміщення поверхнею обмотки, то найбільші втрати у строку служби матимуть місце лише між 21:24 та 22:00, коли трансформатор постарішає на 14,96 год, що і буде найбільшим рівнем теплового зношення впродовж 24 год для представленого графіка навантаження. Додаткові дослідження показали можливість ТДН-16000/110 працювати з таким графіком навантаження за температури +40°C.

### **Висновки**

Вибір оптимальної величини встановленої трансформаторної потужності є багатокритеріальною задачею в складі якої є порівняння таких показників, як втрати активної енергії, прибуток, функція сумарних дисконтованих затрат. Техніко-економічне обґрунтування є невід'ємною складовою при проектуванні та побудові об'єктів електроенергетики.

Для кожної сторони напруги розглядалися різні варіанти набору потужності. 10 кВ: 2хТМ-63, (ТМ-40+ТМ-100), ТМ-160. 35 кВ: (ТМН-400+ТМН-1000), ТМН-1600, (ТМН-630+ТМН-1250). 110 кВ: 2хТМН-6300, ТМН-4000+ТМН-10000, ТМН-2500+2хТМН-6300 та ТДН-16000.

Для сторони 10 кВ оптимальною розрахунковою величиною є 142 кВА, а було прийнято 160 кВА. Для сторони 35 кВ доцільно обрати 1570 кВА, прийнято 1600 кВА. Для сторони 110 кВ вигідно 15800 кВА, прийнято 16000 кВА. Для зазначених сторін напруги силові трансформатори ТМ-160/10, ТМН-1600/35 та ТДН-16000/110, що характеризувалися найменшими втратами активної енергії та найбільшими економічними показниками. Два і більше паралельно працюючих силових трансформатори характеризуватимуться відносно більшими значеннями втрат активної енергії, капітальних вкладень та необхідних видатків.

Обрані для своїх класів напруги трансформатори було перевірено на можливість працювати в діапазоні температур, зазначених Стандартами з керівництва навантажувальною здатністю. Діючими стандартами не враховується переміщення найбільш нагрітої точки на поверхні ізоляції обмоток трансформатора. Через це вважалося, що ТМН-1600/35 за добу за температури оточуючого середовища +40°C напрацював 77,31 год, тобто постарішав в 3,2 рази. Урахування переміщення найбільш нагрітої точки показало старіння лише на 14,8 год за добу.

Також, для ТДН-16000/10 вважалося, що за добу за температури оточуючого середовища +40°C трансформатор напрацює 57,54 год, тобто постарішає в 2,4 рази. Уточнення в розрахунку фактичного рівня теплового зношення через врахування переміщення найбільш нагрітої точки поверхнею обмотки показали старіння на 14,96 год за добу.

Таким чином можна стверджувати, що всі трансформатори відпрацюють навіть понад норми і непотрібно буде впроваджувати заходів зі зменшення електричного навантаження споживачів.

### **Список використаної літератури**

1. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник/М.О. Осташевський, О.Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора В.І. Мілих. – Київ: Каравела, 2018. – 452 с.
2. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
3. ГОСТ 14209-97. Керівництво з навантаження силових оливних трансформаторів
4. IEC 60076-7:2018. Power transformers - Part 7: Loading guide for mineral-oil-immersed power transformers
5. І.Є. Щербак. Оцінка вирівнювання графіків електричних навантажень. Міжнародний журнал «Світлотехніка та електроенергетика», Вип. 51, №01.
6. Міністерство енергетики України. Альбом типових графіків електричних навантажень. Електронний ресурс [Режим доступу]: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245201705&cat\\_id=245201683](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245201705&cat_id=245201683)
7. Визначення економічної ефективності капітальних вкладень в енергосистему та електричні мережі. Затверджено Міненерго України наказом №1ПС від 23.02.95.
8. ТОВ «Еліз». Запорізький трансформаторний завод. Електронний ресурс [Режим доступу] <http://ua.eliz.zp.ua/oil-immersed-power-transformers/>



9. ЛВ Маркет. Приватне науково-технічне товариство. Електронний ресурс [Режим доступу]: <http://www.lvmarket.com.ua/silovi-transformatori>

10. О.С. Яндутьський. В.І. Моссаковський. Моделювання силових трансформаторів для визначення положення найбільш нагрітої точки при зміні умов експлуатації. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2021. – Випуск 4(129) – 192 с.

**O. Yandulskyi**, Dr.Sc.(Eng.), Prof. , ORCID 0000-0002-0362-7947  
**V. Mossakovskiy**, Ph.D, ORCID 0000-0002-5096-5957  
National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

#### EVALUATION CRITERIA OF INSTALLED TRANSFORMER POWER AT DISTRIBUTION SUBSTATIONS OF ELECTRICAL NETWORKS

*This work is devoted to approaches to determining and substantiating the optimal power value of transformers that installed at distribution substations. During the selection of the transformer under working the electrical load schedule of consumers of distribution substation in the power grid, it is necessary to ensure in full using of every unit of installed transformer capacity. For example, there are three transformers that belongs to the 10 kV, 35 kV and 110 kV voltage levels. It is shown the calculation of the optimal value of the transformer power and the selection of this power is performed, based on the nomenclature of transformers. It was carried out a technical and economic comparison of possible combinations in number and capacity of transformers to set the optimal power level.*

*Active energy losses, profit from the transporting of active energy and the total discounted costs function are the estimation of the installed transformer capacity. The transformers chosen for installation at the substation of the power grid are estimated for the ability to work at the highest ambient temperature level of +40°C, based on the temperature of the hot-spot point on the surface of the insulation of the windings.*

*This work ends by conclusion in comparison of the results of two approaches to estimating the lifetime and residual operation life - when the hot-spot point is in stationary and when it moves during electric load changes.*

**Keywords:** *electrical load schedule, distribution substation, operation of transformers in parallel, transformer load capacity, economic indicators, thermal ageing of insulation, residual operating life.*

#### References

1. Electric machines and transformers: teaching. guide/M. Ostashevsky, O.Yuryev; under the editorship Dr. Tech. Sciences, Professor V. Dear - Kyiv: Caravela, 2018. - 452 p.
2. Electric machines and devices: study guide / Yu. Kutsenko, V. Yakovlev et al. - K.: Agrarian education, 2013. - 449 p.
3. DSTU 14209-97. Loading guide for oil-immersed power transformers
4. IEC 60076-7:2018. Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers
5. I. Shcherbak Assessment of the alignment of electrical load schedules. International Journal "Light Engineering and Power Engineering", Vol. 51, No. 01.
6. Ministry of Energy of Ukraine. An album of typical graphs of electric loads. Electronic resource [Access mode]: [http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art\\_id=245201705&cat\\_id=245201683](http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245201705&cat_id=245201683)
7. Determining the economic efficiency of capital investments in the energy system and electrical networks. Approved by the Ministry of Energy of Ukraine by order No. 1PS dated 23.02.95.
8. "Elise" LLC. Zaporizhzhia Transformer Plant. Electronic resource [Access mode] <http://ua.eliz.zp.ua/oil-immersed-power-transformers/>
9. LV Market. Private scientific and technical society. Electronic resource [Access mode]: <http://www.lvmarket.com.ua/silovi-transformatori>
10. O. Yandulskyi V.Mossakovskiy. Modeling of power transformers to determine the position of the hot-spot point according the operating conditions changes. Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug. – Kremenchuk: KrNU, 2021. – Issue 4(129) – 192 p.

Надійшла 19.09.2022  
Received 19.09.2022