

УДК 621.314

МЕТОДИКА ВИБОРУ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ В УМОВАХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

- ПАПАЙКА Ю.А. д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Papaika.Yu.A@nmu.one;
- ЛУЦЕНКО І.М. канд. техн. наук, доцент, професор кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Lutsenko.I.M@nmu.one;
- КОШЕЛЕНКО Є.В. асистент кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Koshelenko.Ye.V@nmu.one;
- ЦИГАН П.С. аспірант кафедри електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна, e-mail: Tsyhan.P.S@nmu.one;

Мета роботи. Обґрунтувати методику вибору номінальної потужності силових трансформаторів для підвищення ефективності їх використання в розподільчих електричних мережах міст.

Методи дослідження. Аналітична обробка статистичних даних.

Отримані результати. У роботі вирішено задачу ефективного використання встановленої потужності трансформаторів, раціонального їх вибору при проектуванні електричних мереж в умовах сьогодення шляхом розробки методики комплексного врахування параметрів режимів роботи типових споживачів міських електричних мереж та їх структури при виборі номінальної потужності живлячих трансформаторів підстанцій 6(10)/0,4 кВ. Встановлено, що вибір трансформаторів за класичними методиками викликає суттєву похибку і завищення номінальної потужності на етапі проектування. Для зниження цієї похибки розроблено методику вибору потужності трансформаторів міських електричних мереж, яка враховує прогнозовані показники режимів роботи обладнання, тип споживачів, навантажувальну здатність обладнання, параметри режиму роботи та оточуючого середовища, постійну часу нагріву існуючих типів трансформаторів, які можуть бути прийняті до встановлення, доцільний рівень компенсації реактивних навантажень.

Наукова новизна полягає у розробці методики вибору номінальної потужності силових трансформаторів 6(20)/0,4 кВ міських розподільчих електричних мереж шляхом комплексного врахування параметрів режимів роботи типових споживачів та їх фактичної структури, що дозволить ефективно використовувати трансформаторне обладнання за навантажувальною здатністю протягом регламентованого строку їх експлуатації.

Практична цінність отриманих результатів полягає у підвищенні ефективності капітальних та експлуатаційних витрат шляхом вибору раціональної номінальної потужності розподільчих трансформаторів 6(20)/0,4 кВ із забезпеченням ефективного використання їх навантажувальної здатності в умовах електричних мережах міст.

Ключові слова: навантажувальна здатність трансформатора; компенсація реактивної потужності; розподільчі мережі.

І. ВСТУП

Електроенергетична сфера є однією з найважливіших галузей національної економіки. Проблеми, які характерні для електроенергетики – це низька ефективність роботи, викликана експлуатацією морально і фізично застарілого обладнання. Основною проблемою функціонування електричних мереж є збільшені в порівнянні з розвиненими країнами рівні технологічних витрат електроенергії, застарілість основних фондів, неефективне використання обладнання, підвищені експлуатаційні витрати, значна кількість відмов електроустаткування мереж та час ліквідації аномальних режимів. Підвищення ефективності роботи електричних мереж України є пріоритетним напрямком діяльності, а розробка і впровадження відповідних заходів – актуальним завданням. Трансформаторні підстанції є найбільш важливою складовою частиною електричних мереж з точки зору забезпечення надійності електропостачання. Основним і в той же час найбільш капіталоемним електрообладнанням підстанцій є трансформатори, які в силу різних причин використовуються неефективно. Аналіз факторів впливу, встановлення причин неефективного використання трансформаторного обладнання, розробка заходів щодо оптимізації їх експлуатації є досить важливим завданням.

У даній статті вирішена задача підвищення ефективності роботи силових трансформаторів однієї з основних, найбільш репрезентативних ланок ланцюга

розподілу електроенергії – підстанцій міських електричних мереж 6-20/0,4 кВ шляхом розробки адекватної методики вибору їх номінальної потужності з урахуванням характеристик режимів навантаження типових споживачів.

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Центральне місце в структурі енергетичних об'єктів, що знаходяться на балансі та в обслуговуванні операторів систем розподілу в населених пунктах займають підстанції 10/0,4 кВ та 6/0,4 кВ та КЛ-6(10) кВ зв'язку між ними.

Питання підвищення ефективності експлуатації силових трансформаторів міських ТП є досить важливим. Основною причиною неефективної експлуатації є завищення номінальної потужності при проектуванні через використання методів розрахунку, які недостатньо адекватно відображають режим роботи устаткування, або взагалі не враховують його. Так, у попередніх дослідженнях за даним напрямом було проаналізовано ефективність експлуатації трансформаторів районних підстанцій високовольтних електричних мереж напругою 110-220 кВ [1], розподільчих трансформаторів 6(10)/0,4 кВ [2]. В цих дослідженнях встановлено та доведено, що проблема неадекватно завищеної потужності існує, а вирішувати її необхідно, перш за все, на етапі проектування шляхом максимально можливого врахування поправкових коефіцієнтів та параметрів режимів роботи електричних мереж, технічних заходів і рішень щодо зниження розрахункового максимуму з одночасним задоволенням параметрів мережі за пропускну здатністю.

Безперечно, впровадження моніторингу режимів роботи трансформаторів, як це запропоновано у роботах [1]-[2], сприятиме інформатизації режимів експлуатації силових трансформаторів та оцінці відпрацювання їх ресурсу. Проте доцільно визначити загальні критерії та розробити конкретні заходи щодо підвищення ефективності використання трансформаторів, що дозволить отримати уточнену методика розрахунку вибору їх потужності, а не обмежуватися загальними висновками про наявний ресурс за навантажувальною здатністю. Головна задача – це ефективно використання навантажувальної здатності та перехід до експлуатації електрообладнання у відповідності до паспортних параметрів та регламентованого строку служби.

III. МЕТА РОБОТИ

Обґрунтувати методику вибору номінальної потужності силових трансформаторів для підвищення ефективності їх використання в розподільчих електричних мережах міст.

IV. ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

У порівнянні з системоутворюючими електричними мережами розподільчі мережі в більшій мірі

потребують реконструкції, модернізації та оптимізації розвитку в зв'язку з великим фізичним і моральним зносом. До інноваційних заходів, техніки і технологій підвищення енергетичної ефективності в розподільчих електричних мережах слід віднести наступні розробку і впровадження нового, більш економічного, електрообладнання, зокрема, силових трансформаторів зі зменшеними активними і реактивними втратами холостого ходу.

Аналіз «вузьких» місць в мережах 6-20/0,4 кВ дозволяє запропонувати заходи щодо вдосконалення їх функціонування, для чого необхідно розробити адекватну методику вибору номінальної, ефективної з позицій максимального використання навантажувальної здатності, потужності трансформаторів з урахуванням максимально можливого спектру факторів та параметрів режимів їх роботи.

Аналіз існуючих причин встановлення завищеної потужності трансформаторного устаткування. Основною причиною завищення типорозмірної структури парку трансформаторного устаткування є недосконалість методів розрахунку електричних навантажень для визначення розрахункового максимуму, який, як правило, приймається 30-хвилинним, що призводить до суттєвого недовантаження обладнання у випадку нерівномірного графіка електричних навантажень, що характерно для режимів роботи споживачів міських електричних мереж.

Розрахунок електричних навантажень – це вихідний момент при створенні СЕП будь-якого об'єкта. Вони визначають розмір капіталовкладень і експлуатаційні показники СЕП. Електричні навантаження є вихідними даними для вирішення комплексу технічних і економічних питань, що виникають при проектуванні електропостачання об'єктів. Визначення електричних навантажень є першим етапом проектування будь-якої системи електропостачання і виконується з метою вибору і перевірки струмоведучих елементів і трансформаторів по нагріванню, розрахунку відхилень і коливань напруги, вибору захисних пристроїв і т. д. Від правильної оцінки очікуваних електричних навантажень залежить раціональність вибору схеми і всіх елементів системи електропостачання та її техніко-економічні показники (капітальні вкладення, щорічні експлуатаційні витрати, витрати кольорового металу і втрат електроенергії).

Більшість мереж, які зараз експлуатуються, спроектовані шляхом розрахунку електричних навантажень за методами: коефіцієнта попиту, упорядкованих діаграм [3], методом питомих навантажень, які мають свої недоліки, основним з яких є завищення розрахункової потужності та відсутність врахування фактичного режиму роботи обладнання. Протягом останнього десятиріччя поширення щодо використання набув статистичний модифікований метод (метод розрахункових коефіцієнтів). Проте, всі ці методи найбільш придатні для розрахунку навантажень потужних вузлів (цехів, ГЗП, РП та інші промислові об'єкти). Перевагою та основною відмінністю методу

розрахункових коефіцієнтів є те, що в ньому врахована ієрархічна побудова систем електропостачання за рівнями розподілу електроенергії, а розрахункові коефіцієнти для визначення максимальних навантажень залежать від постійної часу нагрівання елементів мереж, яка збільшується зі зростанням рівня розподілу, причому для трансформаторного вибору трансформаторного обладнання, магістральних шинопроводів, головних розподільчих щитів постійна часу T становить 150 хв або 2,5 год, що дозволяє отримати значення розрахункового коефіцієнта менше 1, а це в свою чергу понижує значення розрахункового максимуму і відповідно зменшити номінальні параметри основного електрообладнання та капіталовкладення в СЕП. Недоліком методу є його використання у більшості випадків для проектування промислових підприємств [4]. Ця особливість є визначальною і має бути врахована при проектуванні систем електропостачання і виборі електрообладнання міських електричних мереж.

Розрахунок електричних навантажень міських електричних мереж 0,4-10 кВ. Вихідними даними для розрахунку електричних навантажень на шинах підстанції для вибору лінії живлення 0,4 кВ є характеристики і тип споживачів. Розрахунок електричних навантажень виконується відповідно до нормативного документа ДБН В 2.5-23-2010 [5] за питомими показниками електричних навантажень типових струмоприймачів міських електричних мереж.

Навантаження на шини 0,4 кВ ТП. Для розрахунків громадських будівель і цивільних споруд використовують такий показник як питома навантаження, який визначений для споживача конкретного типу в залежності від його характеристики.

Розрахункове активне навантаження P_p об'єкта при цьому визначається з виразу:

$$P_p = P_{num} \cdot N,$$

де P_{num} – питома навантаження, кВт/показник;

N – кількість показників.

Недоліком методу є недостатнє врахування реального режиму роботи струмоприймачів (ГЕН) і вибір устаткування ТП (силових трансформаторів) за розрахунковим максимумом без урахування постійних часу нагрівання елементів. Перевагою є адекватне застосування для розрахунку міських електричних мереж.

Оцінюючи методи в цілому, необхідно зробити наступні висновки:

1. При розрахунку електричних навантажень використовується два підходи: емпіричний – реалізований в методах коефіцієнта попиту і і статистичний в поєднанні з елементами моделювання – в інших розглянутих методах.

2. Ні метод коефіцієнта попиту, ні статистичні моделі, крім при використанні достовірних, попередньо визначених з експерименту, вихідних даних, не забезпечують отримання результатів з нормативною ($\delta = \pm 10\%$) похибкою.

3. Статистичні моделі для визначення розрахункових електричних навантажень доцільно застосовувати в тих умовах, які послужили базою для їх розробки.

4. Основними причинами, що призводять до значних похибок у розрахунках електричних навантажень, слід вважати порушення області застосування розроблених моделей, низьку достовірність, а в ряді випадків і невизначеність вихідних даних, у тому числі внаслідок їх «старіння», відсутність врахування зв'язку параметрів моделей і розрахункових коефіцієнтів з організаційними експлуатаційними факторами, типовими характеристиками об'єктів.

Викладене вказує на те, що необхідні більш глибокі дослідження, щоб зрозуміти явище тотального завищення розрахункового максимуму, а також розробка, на основі цих знань, напрямків і заходів з вдосконалення методів їх розрахунку і механізму підвищення ефективності систем електропостачання на різних етапах створення та функціонування СЕП – від науково-дослідної роботи до проектування і експлуатації.

Аналіз режимів електроспоживання типових споживачів міст. Для обґрунтування деяких важливих параметрів, які стосуються розроблюваної методики вибору трансформаторів в міських електричних мережах, слід виконати аналіз графіків електричного навантаження (ГЕН) типових міських об'єктів. За ГЕН типових споживачів (рис. 1) у разі їх живлення від окремої ТП можна визначити доцільну потужність трансформаторів ТП, їх кількість з позицій ефективного використання.

У разі живлення від окремої ТП різних за характером, або декілька споживачів району доцільно скористатися наступними типовими ГЕН (рис. 2), у яких враховано прив'язку до найпотужнішого об'єкту.

Згідно даних щодо типових графіків електричних навантажень об'єктів міських електричних мереж та розрахованих коефіцієнтів нерівномірності можна зробити висновки, що маневрена частина ГЕН малопотужних комунально-побутових споживачів є більш яскраво вираженою, порівняно з ГЕН енергосистеми, оскільки переважна більшість таких споживачів не використовує механізм диференційованої системи тарифікації плати за користування електричною енергією. Це спричиняє суттєвий нічний провал електроспоживання порівняно, зокрема, з ранковим та вечірнім піками. Відношення мінімального (базового) навантаження до максимального (пікового) коливається в діапазоні 60-90 % для окремих видів споживачів та складає 75% - на рівні живлячих підстанцій району з житловими будинками з електроплитами, 85 % - на рівні живлячих підстанцій району з житловими будинками з газовими плитами.

Як правило, електричні навантаження на рівні підстанцій формує група струмоприймачів, найбільш потужними з яких є багатопверхові будинки з газовими або електричними плитами. Типові ГЕН примі-

ських мереж з приватними будинками можна прийняти аналогічними, залежно від виду електрифікації об'єктів, що підключаються до ТП, або з урахуванням їх газифікації.

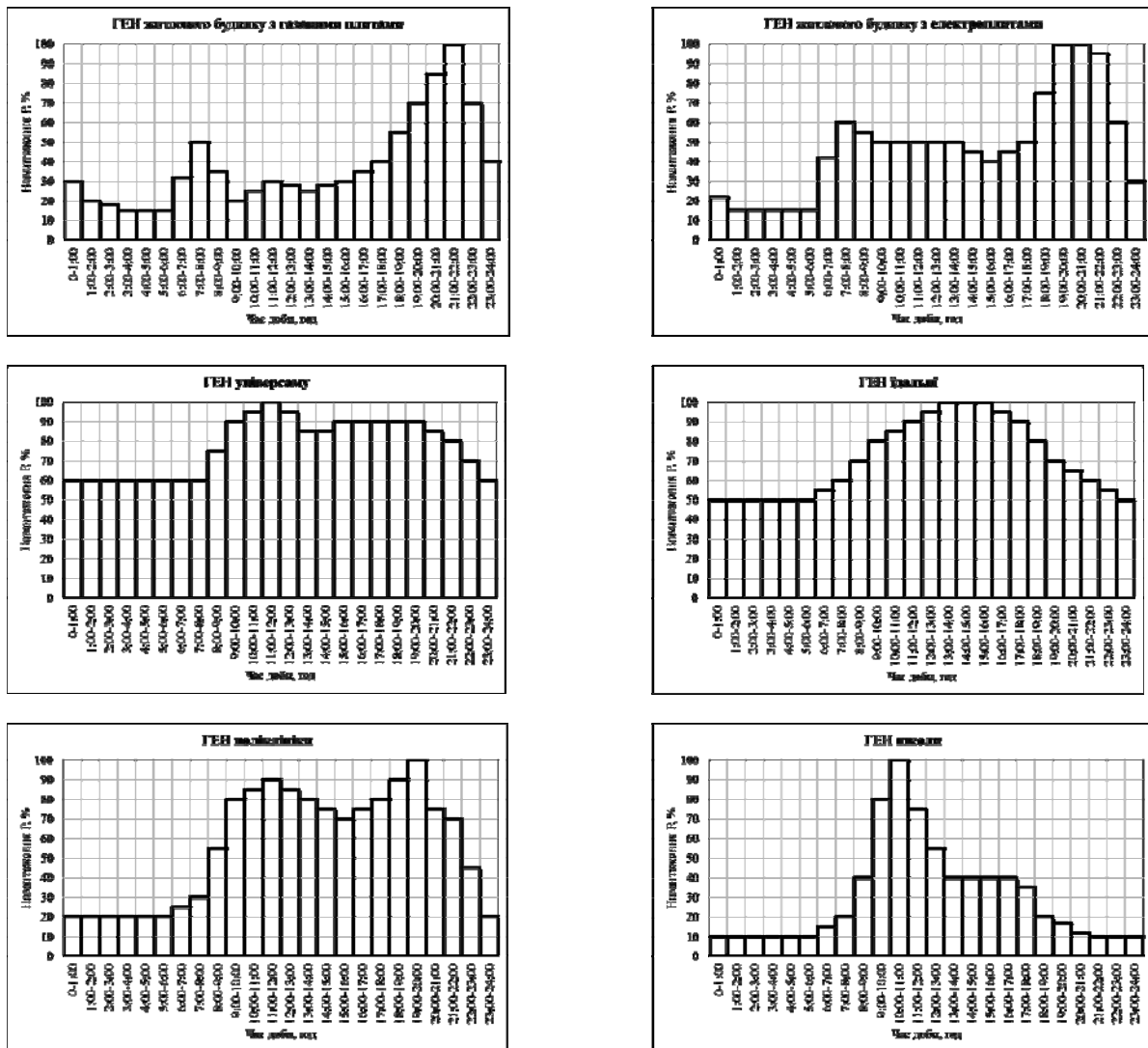


Рисунок 1. ГЕН типових споживачів міських електричних мереж

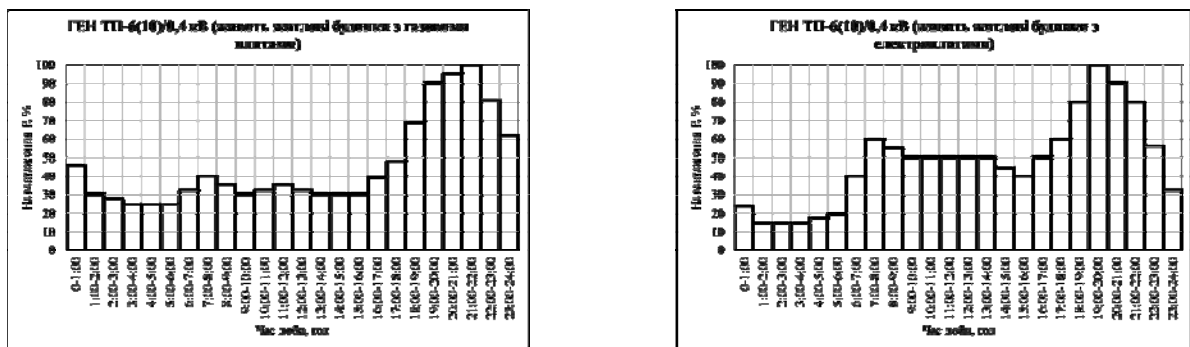


Рисунок 2. ГЕН ТП-6(10)/0,4, що живить житлові будинки з газовими та електричними плитами

Таблиця 1. Коефіцієнти типових графіків електричного навантаження об'єктів міста

Об'єкт	Коефіцієнт нерівномірності, $K_{нр}$	T_m , год	P_c , в.о.	$P_{ск}$, в.о.	$K_{з.г.}$	$K_{ф}$	$\cos \phi$
Житловий будинок із газовими плитами	0,15	3325,7	0,380	0,440	0,3796	1,16	0,92
Житловий будинок з електроплитами	0,15	4176,1	0,477	0,539	0,4767	1,13	0,93
Універсам	0,6	6754,7	0,771	0,784	0,7708	1,02	0,85
Їдальня	0,5	6206,8	0,708	0,733	0,7083	1,04	0,95
Поліклініка	0,2	4928,2	0,563	0,632	0,5625	1,12	0,92
Школа	0,1	2624,7	0,300	0,391	0,2996	1,30	0,9
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з газовими плитами)	0,25	3975,8	0,454	0,510	0,4538	1,12	0,9
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з електроплитами)	0,15	4179,8	0,477	0,530	0,4771	1,11	0,91

Аналіз факторів впливу на вибір потужності трансформаторів. Номінальна потужність силових трансформаторів може бути знайдена за розрахунковою (методи розрахунку електричних навантажень), або, виходячи з максимальної за ГЕН за наступною відомою формулою:

$$S_{нт} \geq S_{розр} = \frac{S_M}{(n-1)k_{ав}}$$

де $k_{ав}$ - коефіцієнт допустимого аварійного навантаження (приймається 1,4 для масляних трансформаторів);
 n - число трансформаторів на підстанції.

Рекомендований ГОСТ 14209-69 (раніше) і ПУЕ дотепер $k_{ав} = 1,4$ однозначно визначає для двохтрансформаторних підстанцій вибір потужності трансформаторів не менше як на 0,65-0,70 розрахункової потужності.

В той же час $k_{ав} = 1,4$ - це граничне допустиме перевантаження при умовах, що $k_{з.г.} \leq 0,75$, $t_m = 6$ год протягом інтервалу часу не більше 5 діб (згідно ПУЕ).

З іншої сторони, для ряду дрібних (до 5 МВт) підприємств і виробництв аграрного й комунального сектору тривалість добового максимуму може складати менше 6 год (2-4 год). У цих випадках трансформатори можуть перевантажуватися більше, ніж на 40 % ($k_{ав} > 1,4$) без прискореного скорочення строку служби.

Неврахування наведених вище обставин може призвести до неефективного використання потужності встановлених трансформаторів через закладення надмірного запасу.

З приведеної формули можна зробити висновок, що для багатотрансформаторних підстанцій ($n > 2$) можна збільшити їх завантаження у вихідному режимі, оскільки навантаження післяаварійного режиму будуть забезпечувати два і більше трансформатори [6].

Слід зауважити, що вибір трансформаторів за максимальним розрахунковим навантаженням, навіть реальним (за ГЕН), вносить деяке завищення потужності, яке доцільно додатково враховувати коефіцієнтом запасу $K_{зап}$, який можна представити як відношення «гріючої» потужності до максимальної. Під «гріючою» потужністю розуміється середньоквадратичне значення повної потужності [6]:

$$K_{зап.S} \leq \frac{K_{ф.S}}{K_{м.S}} = \frac{S_{ср.кв}}{S_{макс.ГЕН}} < 1$$

Згідно наведеного виразу коефіцієнт запасу для типових споживачів чи їх сукупностей міських електричних мереж, знайдений за показниками фактичних графіків електричних навантажень згідно даних таблиці 1, буде наступним (див. табл. 2).

Таблиця 2. Коефіцієнти запасу за розрахунковою потужністю

Об'єкт	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.С}}$
Житловий будинок із газовими плитами	0,440
Житловий будинок з електроплитами	0,539
Універсам	0,784
Їдальня	0,733
Поліклініка	0,632
Школа	0,391
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з газовими плитами)	0,510
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з електроплитами)	0,530

При цьому доцільно внести деяке коригування даного коефіцієнту при виборі трансформаторів з урахуванням постійної часу їх нагрівання, який може складати від 2,5 год, згідно ГОСТ 14209-97 (масляні трансформатори); та 1,5 год згідно ДСТУ-2767-94 (сухі трансформатори).

За умови $T_{\text{мт}} = 150$ хв, осереднення ГЕН споживачів необхідно виконувати для часу, що дорівнює $3T_{\text{мт}} = 450$ хв (7,5 год) – для масляних трансформаторів.

Для сухих трансформаторів аналогічно за умови $T_{\text{ст}} = 90$ хв, осереднення ГЕН споживачів необхідно

виконувати для часу, що дорівнює $3T_{\text{мс}} = 270$ хв (4,5 год).

Таким чином, застосування масляних трансформаторів дозволяє виконати осереднення ГЕН за більший проміжок часу, що досягається кращою системою охолодження, порівняно з сухими.

Для оцінки кількісного впливу системи охолодження трансформатора виконаємо відповідні розрахунки для типових ГЕН з оцінкою коефіцієнта запасу із забезпеченням надійної роботи трансформаторів, без надмірних перевантажень.

Таблиця 3. Уточнені коефіцієнти запасу залежно від типу трансформаторів

Об'єкт	Добовий ГЕН	Масляні трансформатори	Сухі трансформатори
	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.С}}$	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.мт}}$	Коефіцієнт запасу, $K_{\text{зап.ст}}$
Житловий будинок із газовими плитами	0,440	0,678	0,817
Житловий будинок з електроплитами	0,539	0,769	0,922
Універсам	0,784	0,944	0,982
Їдальня	0,733	0,976	1,033
Поліклініка	0,632	0,851	0,891
Школа	0,391	0,648	0,770
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з газовими плитами)	0,510	0,784	0,924
ТП-10/0,4, (живить житлові будинки з електроплитами)	0,530	0,746	0,876

Додатково уникнути завищення потужності трансформаторів і одночасно підвищити їх завантаження до $K_{\text{з.доц}}$ можливо шляхом компенсації реактивних навантажень споживачів на шинах 6-10 кВ [6].

Коефіцієнти потужності типових споживачів мі-

ських електромереж знаходяться в діапазоні $\cos\varphi = 0,9-0,98$, залежно від об'єкту, що розглядається або переважає в сукупному навантаженні.

Режими роботи та умови використання навантажувальної здатності трансформаторів. З метою усу-

нення протиріччя щодо вибору силових трансформаторів у новому стандарті (ГОСТ 14209-97, ДСТУ-2767-94) наводяться рекомендації щодо тривалих аварійних перевантажень трансформаторів 3-х класів, з системами охолодження 4-х категорій у відповідному режимі роботи в залежності від: θ_a , K_1 , K_2 , t_m ,

де θ_a – температура оточуючого середовища (повітря), °С;

K_1 – коефіцієнт попереднього завантаження трансформатора;

K_2 – коефіцієнт перевантаження трансформатора;

t_m – проміжок часу перевантаження трансформатора значенням K_2 .

Положення, наведені у Стандарті [7], можливо використовувати:

а) на етапі вибору потужності силових трансформаторів, якщо заздалегідь відомий добовий режим роботи навантаження (ГЕН) або його показники (середнє та максимальне навантаження та його тривалість);

б) у процесі експлуатації – для коригування рівня навантаження або рекомендації застосування доцільного типорозміру трансформатора (фактичний ГЕН – відомий)

В теперішній час в міських електричних мережах застосовуються переважно розподільчі трансформатори з $S_{T.ном} \leq 2500$ кВ·А.

Для трансформаторів усіх типів важливою характеристикою є навантажувальна здатність, яка визначається властивостями ізоляції обмоток і охолоджуючого середовища. Навантажувальна здатність – це сукупність допустимих навантажень і перевантажень трансформатора у процесі експлуатації, при яких не відбувається прискореного скорочення строку його служби.

При навантаженні, що перевищує номінальне, рекомендується не перевищувати граничні значення, наведені в таблиці 1 [7].

Однотрансформаторні підстанції. Визначальним у даному випадку є нормальний режим систематичних навантажень (режим з номінальним строком служби трансформатора). Вибір технічно доцільної потужності двохобмоткового трансформатора здійснюється за формулою:

$$S_{T.ном} \geq S_m \cdot$$

Використання співвідношення забезпечує деякий запас, який обумовлений трьома причинами:

1) дискретністю шкали номінальних потужностей трансформаторів;

2) неврахуванням конфігурації графіку навантажень на добовому (сезонному, річному) розрізі;

3) неврахування постійної часу нагрівання трансформатора.

4) неврахуванням різниці між фактичною температурою охолоджуючого середовища у місці установки трансформатора й температурою нормованою ГОСТ 11677-65 для масляних трансформаторів, яка дорівнює

20 °С;

5) неврахування коефіцієнту потужності характерної сукупності споживачів.

Тому, з метою більш ефективного використання потужності трансформаторів ГОСТ 14209-97 пропонує використовувати коефіцієнт допустимого систематичного навантаження K_2 .

$$S_{T.ном} \geq S_m / K_2 \cdot$$

Реальний графік навантаження слід перетворити у еквівалентний за нагрівом, тобто зносом ізоляції, двоступінчатий відповідно до [7].

За отриманими даними можливо встановити можливість режиму роботи трансформатора певного типорозміру та остаточно рекомендувати прийняти його номінальну потужність.

Методика вибору ефективної потужності силових трансформаторів в міських електричних мережах. Основою для вибору і побудови системи електропостачання служать розрахункові електричні навантаження струмоприймачів. Саме вони визначають рівень капітальних і експлуатаційних витрат і ефективність проєктованих та споруджуваних електроустановок. Неприпустимо як завищення, так і заниження розрахункових величин. При завищенні – збільшуються витрати в СЕП, заниження – може призвести до виходу з ладу елементів СЕП, аварійних перерв у електропостачанні і збитку.

Розробка нової методики, яка б забезпечила економічно доцільні границі по точності визначення розрахункових електричних навантажень, – досить ризикозна і складна науково-технічна задача. На це вказує хоча б той факт, що, незважаючи на численні дослідження, досягнуті в цьому напрямку результати по зниженню похибки розрахункових методів, залишаються досить скромними.

Значних матеріальних ресурсів на вирішення цих проблем немає. Проте вже сьогодні в рамках відомих підходів і нових знань про механізм впливу похибки на техніко-економічні показники СЕП, можна сформулювати вимоги до більш досконалої методики, її змісту і можливостей, в тому числі щодо похибки.

Основних вимог до методики декілька:

1. Методика повинна забезпечити визначення розрахункових електричних навантажень для вибору та перевірки трансформаторів, по нагріванню і економічним критеріям.

2. Моделі для визначення електричних навантажень повинні розроблятися, виходячи з можливості отримання достовірної вхідної інформації стосовно проєктованих об'єктів, а також необхідної точності кінцевих результатів.

3. З метою досягнення найбільшої точності кінцевих результатів необхідно, щоб розрахунок електричних навантажень ґрунтувався на тих вихідних параметрах електроустановок і процесів, які відповідають шуканому ступеню розподілу електроенергії.

4. Врахування особливостей характеристик ти-

пових споживачів міських електричних мереж повинно виконуватися на рівні отримання коефіцієнтів моделей. При цьому коефіцієнти моделей повинні відносно легко уточнюватися в міру зміни режиму роботи, складу або характеру навантаження споживачів.

5. Розрахунки за методикою повинні ґрунтуватися на єдиній із завданнями ресурсозбереження та ефективного використання елементів СЕП бази даних. Вихідні дані, що забезпечують надійність роботи системи електропостачання, повинні систематично уточнюватися.

Аналіз методів розрахунку електричних навантажень, досвід їх розробки і застосування переконує, що для вдосконалення галузевої методики найбільш прийнятним є поєднання методу, який ґрунтується на питомій нормі навантаження у поєднанні з моделюванням та урахуванням технічних характеристик і номінальної граничної здатності обладнання, що вибирається для та обліку індивідуальних характеристик споживачів.

При цьому передбачається, що такий підхід забезпечить не тільки більшу точність, а й багатоцілкове використання цих даних для вирішення різних електроенергетичних завдань, як, наприклад, підвищення ефективності використання трансформаторів за номінальною потужністю.

Таким чином запропонована методика реалізується за наступним алгоритмом:

1. Визначення розрахункової активної, реактивної та повної потужності на шинах 0,4 кВ ТП згідно ДБН В 2.5-23-2010 [5].

- за питомими показниками електричних навантажень типових струмоприймачів міських електричних мереж розрахункове активне навантаження P_p об'єкта при цьому визначається:

$$P_p = P_{\text{пит}} \cdot N,$$

де $P_{\text{пит}}$ – питоме навантаження, кВт/показник;
 N – кількість показників.

Розрахункове навантаження житлового будинку в цілому (від жител, силових електроприймачів та вбудованих чи прибудованих приміщень) за умови, коли найбільшою складовою є навантаження від жител, $P_{\text{бюд.жс}}$ визначають за формулою 12 [5]:

$$P_{\text{бюд.жс}} = P_{\text{жс}} + 0,9P_{\text{сил}} + \sum_{i=1}^n P_{\text{сп}} \cdot K_{\text{уч}}$$

де $P_{\text{жс}}$ – розрахункове навантаження електроприймачів жител (квартир), кВт;

$P_{\text{сил}}$ – розрахункове навантаження силових електроприймачів житлового будинку, кВт;

$P_{\text{сп1}} \dots P_{\text{спn}}$ – розрахункові навантаження вбудованих чи прибудованих громадських приміщень, кВт, що живляться від електрощитової житлового будинку (визначаються за методикою, викладеною в підрозділі "Навантаження громадських будинків (приміщень) та

споруд, адміністративних і побутових будинків (приміщень) промислових підприємств");

$K_{\text{уч1}} \dots K_{\text{учn}}$ – коефіцієнти участі в максимумі навантаження квартир і силових електроприймачів житлового будинку, навантажень вбудованих і прибудованих приміщень, що визначаються за таблицею 3.14 [5].

2. Моделювання ГЕН типового споживача або їх сукупності. За даними типових ГЕН споживачів виконується моделювання ГЕН, адекватного до відтворення в умовах, що розглядаються (рис. 1,2).

3. Перерахунок максимальної потужності за відтвореним ГЕН та знаходження розрахункової раціональної потужності з урахуванням коефіцієнта запасу залежно від типу трансформатора (масляний, сухий) та характеристики споживачів.

$$S_{\text{розр.рац}} = S_{\text{макс.ГЕН}} K_{\text{зап.іТ}}$$

де $K_{\text{зап.іТ}}$ - знаходиться за таблицею 2 залежно від типу споживача та системи охолодження трансформатора

4. Визначення кількості трансформаторів підстанції з урахуванням резервування живлення споживачів:

- однотрансформаторна $n = 1$;
- багатотрансформаторна $n > 2$;

4.1. Для багатотрансформаторних підстанцій виконується розподіл споживачів за секціями шин і повторюється розрахунок за пунктами 1, 2, 3 з отриманням ГЕН індивідуального трансформатора.

5. Визначення коефіцієнту допустимого тривалого навантаження з урахуванням температури оточуючого середовища K_{24} для введення поправки на неї відповідно до ГОСТ 14209-97, ГОСТ 30221-97.

6. Попередньо приймається мінімальний типорозмір трансформатора за показниками індивідуальних ГЕН, виходячи з наступних міркувань: номінальна потужність одиночного трансформатора повинна бути не меншою раціонального активного навантаження (реактивне навантаження може бути компенсовано повністю або на доцільному рівні) з урахуванням температурного коефіцієнту тривалої роботи обладнання K_{24} . Розрахунок проводиться до моменту задоволення прийнятого типорозміру перевіркам роботи обладнання у нормальному (для однотрансформаторних ТП) та післяаварійному режимах роботи (для багатотрансформаторних ТП).

$$S_{\text{ном.т}} \geq \frac{S_{\text{розр.рац.інд}} \cos \varphi}{K_{24}} \geq \frac{P_{\text{розр.рац.інд}}}{K_{24}}$$

6.1. Перевірка №1. Нормальний режим систематичних навантажень (для всіх ТП). Виконується моделювання двоступінчатого ГЕН нормального режиму з урахуванням тривалості максимумів протягом доби з визначенням коефіцієнту допустимого систематичного перевантаження в нормальному режимі роботи $K_{2\text{норм}}$.

6.2. Перевірка №2. Режим тривалих аварійних

перевантажень (для багатотрансформаторних ТП). Виконується моделювання двоступінчатого ГЕН післяварійного режиму з визначенням коефіцієнту допустимого перевантаження у післяварійному режимі роботи $K_{2ав}$, оцінюється температура найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора та фізичний знос.

7. Техніко-економічне обґрунтування доцільного типорозміру трансформатора з певною системою охолодження шляхом порівняння капіталовкладень на реалізацію проекту.

Аналіз потенційного економічного ефекту від реалізації розробленої методики розрахунку і вибору потужності трансформаторів доцільно виконати для випадку застосування трансформаторів суміжних типорозмірів [6].

V. ВИСНОВКИ

Силові трансформатори 6(10) кВ ТП міських електричних мереж є однією з основних ланок ланцюга розподілу електроенергії, надійність роботи якої безпосередньо пов'язана з безперебійністю електропостачання споживачів, а ефективна робота трансформаторів ТП забезпечує своєчасність їх заміни більш прогресивними зразками, максимально раціональні капіталовкладення в мережу, енерго- та ресурсозбереження.

У роботі вирішено задачу ефективного використання встановленої потужності трансформаторів, раціонального їх вибору при проектуванні електричних мереж в умовах сьогодення шляхом розробки методики комплексного врахування параметрів режимів роботи типових споживачів міських електричних мереж та їх структури при виборі номінальної потужності живлячих трансформаторів підстанцій 6(10)/0,4 кВ.

Встановлено, що вибір трансформаторів за класичними методиками викликає суттєву похибку і завищення номінальної потужності на етапі проектування. Для зниження цієї похибки розроблено методику вибору потужності трансформаторів міських електричних мереж, яка враховує прогнозовані показники режимів роботи обладнання, тип споживачів, навантажувальну здатність обладнання, параметри режиму роботи та оточуючого середовища, постійну часу нагріву існуючих типів трансформаторів, які можуть бути прийняті до встановлення, доцільний рівень компенсації реактивних навантажень.

Результати роботи можуть бути використані проектними організаціями при виконанні техніко-економічних обґрунтувань рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Луценко І.М. Обґрунтування доцільності переходу до системи обслуговування силових трансформаторів за поточним технічним станом / І.М. Луценко, В.Б. Калініков // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників - 2011» – 2011. – Т. 4. – С. 75–79.
- [2] Заїка В. Т. Навантажувальна здатність трансформаторів розподільних мереж селищ міського типу / В.Т. Заїка, С.С. Котенко, І.М. Луценко // Науковий вісник Національного гірничого університету – 2010. – Вип. №6. – С. 86–91.
- [3] Справочник по электроснабжению промышленных предприятий: в 2 Т. / Под общей редакцией А.А. Федорова. – М.: Энергоатомиздат, 1973. [Розд. 24].
- [4] ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015. Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. – Введ. 2016-01-07. – 79 с.
- [5] Державні будівельні норми України, Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. ДБН В.2.5-23:2010 Київ, Міністерство регіонального розвитку та будівництва України 2010. – 102 с.
- [6] І.М. Луценко, Є.В. Кошеленко, П.С. Циган. Підвищення точності вибору та ефективності використання силових трансформаторів розподільчих мереж // Вісник КрНУ. – Кременчук: 2017. – Вип. 5/2017 (106).
- [7] ДСТУ 3463-96. Керівництво з навантаження силових масляних трансформаторів. – Введ. 1999-01-01. – 101 с.
- [8] ДСТУ 2767-94. Керівництво з навантаження силових сухих трансформаторів. – Введ. 1999-01-01. – 75 с.
- [9] Папаїка Ю.А., Півняк Г.Г., Жежеленко І.В. Енергетична ефективність систем електропостачання. – Д.: НТУ «ДП», 2018. – 149 с.
- [10] Папаїка Ю.А. Методика определения номинальной мощности цеховых трансформаторов при наличии электроприемников с нелинейной вольт-амперной характеристикой / Ю.А. Папаїка, А.Г. Лысенко // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2012. – № 88. – С. 28-33.
- [11] Баланс энергий в силовых цепях / В.Е. Тонкаль, А.В. Новосельцев, С.П. Денисюк и др. – К.: Наукова думка, 1992. – 312 с.
- [12] Ущатовський К.В. Прогнози розвитку електроенергетики України: оцінка надійності та достовірності / К.В. Ущатовський // Енергосбереження. Енергетика. Енергоаудит. – 2015. - №7. С. 14-23.
- [13] Жежеленко И.В. Комплексный подход к проблеме повышения энергетической эффективности электрических сетей / И.В. Жежеленко, Г.Г. Трофимов, В.Э. Воротницкий, В.А. Исаев // Энергетика, 2017. - №2 (610). – с.14-16.
- [14] Папаїка Ю.А. Оцінка енергетичної ефективності систем електропостачання за допомогою індексу надійності / І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2018. – № 100. – С. 25-30.
- [15] Коцур І., Гуразда А., Доля Б., Шестов Л., Енер-

гофективный электропривід вентиляційних установок. // Електротехніка та електроенергетика. - 2020. - №1. - С.18-25.
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-2>

[16] Папайка, Ю., Лисенко, О., Бубликов, А., & Олішевський, І. (2021). Проблеми

електромагнітної сумісності потужних енергооб'єднань при масовому приєднанні відновлювальних джерел енергії. Електротехніка та електроенергетика, (1), 34–45.
<https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-4>

Стаття надійшла до редакції 18.05.2021

МЕТОДИКА ВЫБОРА НОМИНАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ В УСЛОВИЯХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

ПАПАЙКА Ю.А.

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой электроэнергетики Национального технического университета «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Papaika.Yu.A@nmu.one;

ЛУЦЕНКО И.Н.

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры электроэнергетики Национального технического университета «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Lutsenko.I.M@nmu.one;

КОШЕЛЕНКО Е.В.

ассистент кафедры электроэнергетики Национального технического университета «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Koshelenko.Ye.V@nmu.one;

ЦЫГАН П.С.

аспирант кафедры электроэнергетики Национального технического университета «Днепровская политехника», Днепр, Украина, e-mail: Tsyhan.P.S@nmu.one;

Цель работы. Обосновать методику выбора номинальной мощности силовых трансформаторов для повышения эффективности их использования в распределительных электрических сетях городов.

Методы исследования. Аналитическая обработка статистических данных.

Полученные результаты. В работе решена задача эффективного использования установленной мощности трансформаторов, рационального их выбора при проектировании электрических сетей в существующих условиях путем разработки методики комплексного учета параметров режимов работы типовых потребителей городских электрических сетей и их структуры при выборе номинальной мощности питающих трансформаторных подстанций 6(10)/0,4 кВ. Установлено, что выбор трансформаторов по классическим методикам вызывает существенную погрешность и завышение номинальной мощности на этапе проектирования. Для снижения этой погрешности разработана методика выбора мощности трансформаторов городских электрических сетей, которая учитывает прогнозируемые показатели режимов работы оборудования, тип потребителей, нагрузочную способность оборудования, параметры режима работы и окружающей среды, постоянную времени нагрева существующих типов трансформаторов, которые могут быть приняты к установке, целесообразный уровень компенсации реактивной нагрузки.

Научная новизна состоит в разработке методики выбора номинальной мощности силовых трансформаторов 6(20)/0,4 кВ городских распределительных сетей путем комплексного учета параметров режимов работы типовых потребителей и их фактической структуры, что позволит эффективно использовать трансформаторное оборудование по нагрузочной способности на протяжении регламентированного срока его эксплуатации.

Практическая ценность полученных результатов состоит в повышении эффективности капитальных и эксплуатационных затрат путем выбора рациональной номинальной мощности распределительных трансформаторов 6(20)/0,4 кВ с обеспечением эффективного использования их нагрузочной способности в условиях электрических сетей городов.

Ключевые слова: нагрузочная способность трансформатора; компенсация реактивной мощности; распределительные сети.

METHODOLOGY FOR SELECTING THE RATED PARAMETERS OF POWER TRANSFORMERS IN THE CONDITIONS OF DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS OF SETTLEMENTS

PAPAİKA YU.A.

Sci.D, Professor, Head of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: papaika@ukr.net;

LUTSENKO I.M.

PhD, Professor of the Department of Power Engineering, Dnipro University of technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Lutsenko.I.M@nmu.one;

KOSHELENKO I.E.V. Assistant of the Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Koshelenko.Ye.V@nmu.one;

TSYHAN P.S. Postgrad. St. of the Department of Power Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, e-mail: Tsyhan.P.S@nmu.one;

Purpose. To substantiate a technique of a choice of nominal power of power transformers for increase of their use efficiency in distributive electric networks of the cities

Methods. Analytical processing of statistical data.

Findings. The paper solves the problem of efficient use of the installed power of transformers, their rational choice in the design of urban electrical networks. It was found that the choice of transformers according to classical methods causes a significant error and an overestimation of the rated power at the design stage. The method of reducing this error was developed for selecting the power of transformers of urban electrical networks. This method takes into account the predicted indicators of the operating modes of the equipment, the type of consumers, the load capacity of the equipment, the parameters of the operating mode and the environment, constant heating time of existing types of transformers that can be accepted for installation, the appropriate level of reactive load compensation.

Originality The scientific novelty lies in the development of the method for selecting the rated power of power transformers 6 (20) /0.4 kV urban distribution networks by comprehensive consideration of the parameters of typical consumers and their actual structure, which will effectively use transformer equipment for load capacity during the regulated period of their operation.

Practical value. The obtained results show the increase in the efficiency of capital and operating costs by selecting a rational rated power of distribution transformers 6 (20) / 0.4 kV with ensuring the effective use of their load capacity in the conditions of electric grids of cities.

Keywords: reactive power compensation; electrical distribution grids; loading capacity of the transformers.

REFERENCES

- [1] Lutsenko, I.M., Kalinnikov, V.B. (2011). Justification of the feasibility of transition to the system of servicing power transformers according to the current technical condition. Materials of the international conference "Forum of miners - 2011", 4, 75–79.
- [2] Zaika, V.T., Kotenko, S.S., Lutsenko, I.M. (2010). Load capacity of transformers of distribution networks of urban-type settlements. Scientific Bulletin of the National Mining University, 6, 86–91.
- [3] Fedorov, A.A. (1973). Reference book on power supply of industrial enterprises: in 2 Vol. Under the general editorship of, Moscow, Energoatomizdat, 24.
- [4] DSTU-N B V.2.5-80:2015. 2016-01-07, 79.
- [5] State building codes of Ukraine, Design of electrical equipment of civil objects. DBN V.2.5-23:2010 Kyiv, Ministry of Regional Development and Construction of Ukraine 2010, 102.
- [6] Lutsenko, I.M., Koshelenko, E.V., Tsygan, P.S. (2017). Improving the accuracy of choice and efficiency of the use of power transformers of distribution networks. KrNU Bulletin, Kremenchuk, Ex. 5/2017 (106).
- [7] DSTU 3463-96. Load guide for oil transformers. - Till. 1999-01-01, 101.
- [8] DSTU 2767-94. Manual on the load of power dry transformers. 1999-01-01, 75.
- [9] Papaika, Y.A., Pivnyak, G.G., Zhezhelenko, I.V. (2018). Energy efficiency of power supply systems, Dnipro, NTU "DP", 149.
- [10] Papaika, Yu.A., Lysenko, A.G. (2012). Methods of determining the nominal power of shop transformers in the presence of electrical receivers with nonlinear volt-ampere characteristic. Mining electromechanics and automatics, 88, 28-33.
- [11] Tonkal, V.E., Novoseltsev, A.V., Denisyuk, S.P. (1992). Balance of energies in power chains. Kyiv, Naukova Dumka, 312.
- [12] Uschapovsky, K.V. (2015). Forecasts of the development of electricity in Ukraine: reliability and reliability assessment. Energy Saving Energy, 7, 14-23.
- [13] Zhezhelenko, I.V., Trofimov, G.G., Vorotnitsky, V.E., Isaev, V.A. (2017). Integrated approach to the problem of increasing the energy efficiency of electrical networks. 2017, 2 (610), 14-16.
- [14] Papaika, Y.A., Zhezhelenko, I.V., Lysenko, O.G. (2018). Assessment of energy efficiency of power supply systems using reliability index. Mining electromechanics and automatics, 100, 25-30.
- [15] Kotsur, I., Gurazda, A., Dolya, B., Shestov, L., (2020). Energy-efficient electric drive of ventilation installations. Electrical engineering and electricity. 1, 18-25. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1-2>
- [16] Papaika, Y., Lysenko, O., Bublikov, A., & Olishevsky, I. (2021). Problems of electromagnetic compatibility of powerful energy associations with mass join-on of renewable energy sources. Electrical engineering and electrical energetics, (1), 34-45. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2021-1->