

І.М. Луценко

ОЦІНКА ВПЛИВУ ФАКТОРІВ ОТОЧУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА НАВАНТАЖУВАЛЬНУ ЗДАТНІСТЬ ВИБУХОБЕЗПЕЧНИХ КОМПЛЕКТНИХ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ПІДСТАНЦІЙ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

Вплив факторів оточуючого середовища на навантажувальну здатність вибухобезпечних комплектних трансформаторних підстанцій вугільних шахт. Комплексний вплив температури та швидкості повітряного струменю на допустиме завантаження шахтних трансформаторів.

К л ю ч о в і с л о в а: навантажувальна здатність, вибухобезпечна трансформаторна підстанція, температура повітря, швидкість повітряного струменю, перевищення температури.

Влияние факторов окружающей среды на нагрузочную способность взрывобезопасных комплектных трансформаторных подстанций угольных шахт. Комплексное влияние температуры и скорости воздушной струи на допустимую загрузку шахтных трансформаторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нагрузочная способность, взрывобезопасная трансформаторная подстанция, температура воздуха, скорость воздушной струи, превышение температуры.

Постановка проблеми. Дослідження підземної системи електропостачання вугільних шахт та реального завантаження її елементів, що виконані у роботах [1, 2], дозволили отримати репрезентативну вибірку графіків електричних навантажень (ГЕН) та проаналізувати реальні режими роботи таких важливих об'єктів як вибухобезпечні комплектні трансформаторні підстанції (КТП) технологічних дільниць. Статистична обробка даних ГЕН з точки зору завантаження трансформаторів показала, що довготривале економічно доцільне навантаження ($0,75 \dots 1,0 S_{ном}$ [3]) має місце лише 17 % часу роботи на добовому проміжку для видобувних дільниць і близько 2 % – для прохідницьких. Протягом останнього проміжку часу завантаження трансформаторів є нижчим. Це свідчить про те, що встановлена потужність КТП суттєво завищена і використовується неефективно. Така ситуація зумовлена рядом похибок, які вносяться при виборі потужності КТП через неврахування на етапі проектування технологічних особливостей і усього спектру режимів роботи видобувних і прохідницьких дільниць [4]. Також однією з причин завищення встановленої потужності трансформаторів доцільно вважати нехтування особливостями умов експлуатації обладнання за факторами оточуючого середовища, характерними для вугі-

льних шахт, а саме впливом температури та швидкості повітряного струменю у місці встановлення КТП на її навантажувальну здатність. Це може призвести до застосування підстанції на ступінь більшого типорозміру, що відповідно матиме негативний вплив на наступні показники її роботи, оскільки спричинює низьке завантаження, значне перевищення нормативних термінів експлуатації та відповідний моральний знос, збільшення капітальних витрат на придбання. Таким чином, врахування впливу факторів оточуючого середовища при виборі потужності КТП сприятиме підвищенню ефективності використання навантажувальної здатності, а обґрунтована оцінка даного впливу є актуальною науковою задачею.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженню режимів роботи шахтних КТП, навантажувальної здатності та впливу факторів оточуючого середовища на показники їх роботи присвячені роботи А.М.Селіщева, Е.П.Михайленка, В.М.Грушка та інших. Так, у роботі проф. А.М.Селіщева [5], встановлено, що існує вплив умов оточуючого середовища (температури повітря та швидкості повітряного струменю) у місці установки КТП на теплові показники режимів її роботи, а у [6] приведений приклад врахування впливу цих умов на перевантажувальну здатність КТП, проте застосування результатів обмежується лише конкретними прикладами. У роботі [7] піднято питання ефективного використання КТП і уникнення прийняття завищеної їх потужності шляхом врахування поправки на температуру оточуючого середовища, проте не враховано фактор швидкості повітряного струменю та відсутній зв'язок з реальними режимами їх роботи.

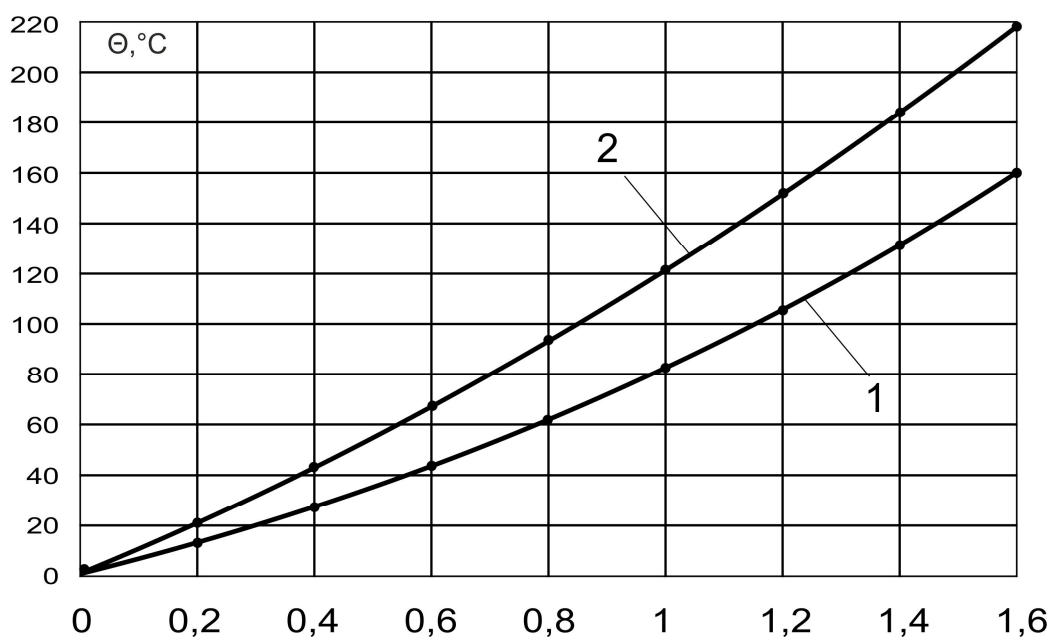
Мета досліджень. Встановити закономірність комплексного впливу температури та швидкості повітряного струменю на навантажувальну здатність трансформаторів вибухобезпечних КТП.

Результати досліджень. Аналіз досліджень та публікацій дозволив встановити, що факторами, які впливають на навантажувальну здатність трансформатора КТП, є умови оточуючого середовища: температура повітря та швидкість повітряного струменю у місці її встановлення. Так, вимоги ГОСТ 15542-79 пред'являються до КТП, що працюють при максимально допустимій температурі оточуючого середовища, яка згідно ГОСТ 15150-69 (кліматичне виконання і категорія розміщення У5) становить $T_{oc} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Швидкість повітряного струменю у місці установки взагалі не враховується ($V_{нов.с} = 0\text{ м/с}$). Проте на практиці такі показники не відповідають дійсності. По-перше, згідно ДСП 3.3.1.095 – 2002 «Підприємства вугільної промисловості» температура T_{oc} на робочих місцях не повинна перевищувати $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Аналіз схем живлення дільниць показав, що КТП знаходяться на виробках з вхідним струменем, тобто для них є справедливим $T_{oc} \leq 26\text{ }^{\circ}\text{C}$. По-друге, згідно нормованих значень швидкості повітряного струменю у виробках має бути на рівні $V_{нов.с} = 0,25...2\text{ м/с}$, тобто $V_{нов.с} > 0\text{ м/с}$. До того ж, експериментальні дослідження, виконані у роботі

[5], вказують, що у місці встановлення КТП швидкість повітряного струменю коливається у межах 1,5...6 м/с.

Спираючись на експериментальні графічні залежності перевищення температури обмоток з кремнійорганічною ізоляцією трансформаторів КТП від навантаження [6] без зовнішнього обдуву ($V_{нов.с} = 0$ м/с) і при швидкості повітряного струменю $V_{нов.с} = 3,5$ м/с (рисунок 1), проаналізуємо вплив факторів оточуючого середовища на їх навантажувальну здатність.

Отже, в реальних умовах експлуатації температура оточуючого середовища не є постійною і для конкретної шахти може бути навіть нижчою, ніж нормована, що створює деякий запас за навантажувальною здатністю, яка жорстко обмежується перевищеннями температури ізоляції обмоток. Таким чином, просте виконання вимог по забезпеченню регламентованих санітарних умов дає температурний запас в 9 °С, що доцільно і необхідно враховувати при визначенні допустимості роботи КТП з навантаженням, яке перевищує номінальне.



1 – при швидкості повітряного струменю 3,5 м/с; 2 – без зовнішнього обдуву

Рисунок 1 – Криві залежностей середнього перевищення температури обмоток від навантаження [6]

Іншим важливим фактором впливу на навантажувальну здатність КТП є наявність та значення швидкості повітряного струменю у місці її установки. Враховуючи, що номінальна потужність трансформатора є функцією теплового стану його активної частини, котрий, в свою чергу залежить від її конструкції, умов охолодження, класу нагрівостійкості ізоляційних матеріалів, то результати досліджень теплового стану КТП можуть дати відповіді на деякі питання, що цікавлять як їх розробників, так і експлуатаційні служби підприємств, які застосовують даний вид обладнання [6].

Дослідження розробником (ДП «УкрНДІВЕ») електромагнітних і теплових параметрів вибухобезпечних трансформаторів і КТП, у тому числі потужністю 1000 кВ·А з кремнійорганічною ізоляцією і примусовим обдувом зі швидкістю повітряного струменю 3,5 м/с, дозволили отримати криву залежності середнього перевищення температури його обмоток від навантаження як основного критерію допустимої потужності трансформатора. Доведено, що така закономірність у загальному випадку ідентична для всіх конструкцій трансформаторів з кремнійорганічною ізоляцією, розташованих в герметичному оребреному корпусі. Таким чином доцільно і корисно для практичного застосування визначити аналогічні характеристики для можливого в реальних умовах експлуатації розкиду значень швидкості повітряного струменю.

В залежності від швидкості повітряного струменю можна отримати сімейство кривих, аналогічних до рисунку 1 з відповідним перевищенням середньої температури обмоток. Вони з достатньою точністю можуть бути описані поліноміальними рівняннями другого порядку:

$$\theta = a \cdot K_z^2 + b \cdot K_z + c,$$

де θ – перевищення температури обмоток;

K_z – коефіцієнт завантаження трансформатора.

Аналіз реальних температурних полів, отриманих при проведенні теплових випробувань для підстанції типу КТПВ потужністю 1000 кВ·А в різних режимах роботи [8], дозволив побудувати криву залежності перевищення температури найбільш нагрітої точки (ННТ) обмотки від навантаження (рисунок 2), так як саме за температурним станом ННТ доцільно визначати стан ізоляційної системи трансформатора в цілому.

На рисунку 2 побудовані і апроксимовані криві залежностей перевищення температури обмоток від K_z як без зовнішнього обдуву, також і при швидкості повітряного струменю 3,5 м/с.

Апроксимація цих графічних залежностей дозволила отримати рівняння наступного вигляду:

$$\Theta_{\text{ННТ.0}} = 23,33 \cdot K_z^2 + 141,7 \cdot K_z - 1,018;$$

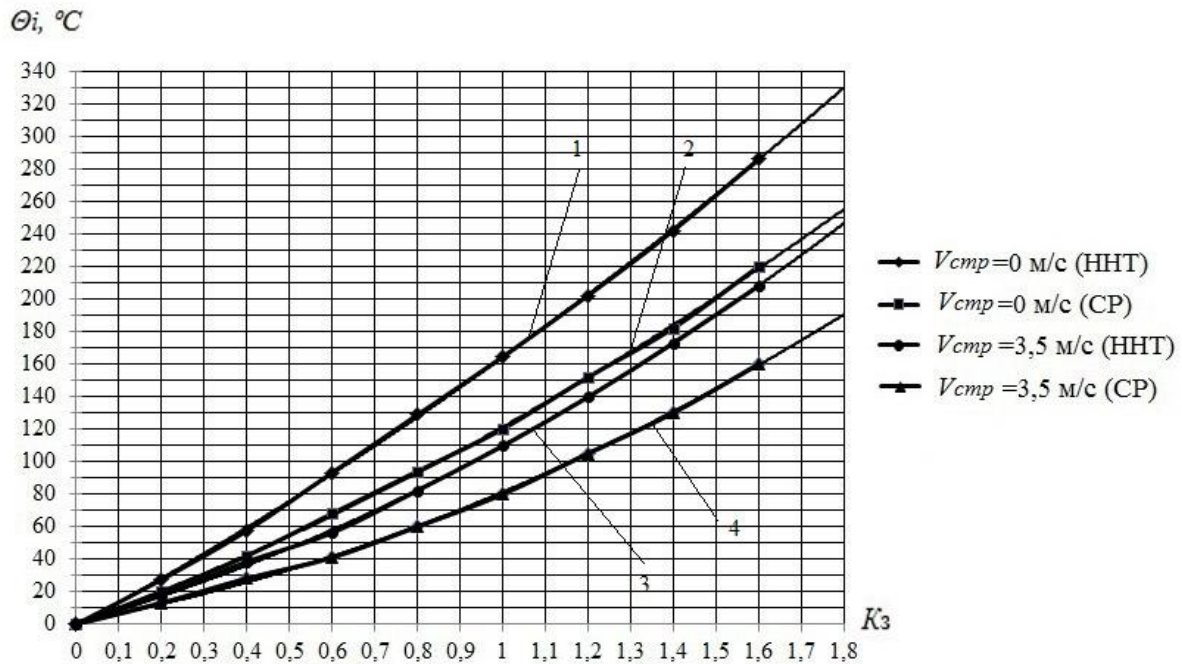
$$\Theta_{\text{ННТ.3,5}} = 34,43 \cdot K_z^2 + 74,34 \cdot K_z + 0,936;$$

$$\Theta_{\text{СП.0}} = 25,59 \cdot K_z^2 + 95,54 \cdot K_z + 0,133;$$

$$\Theta_{\text{СП.3,5}} = 31,38 \cdot K_z^2 + 48,45 \cdot K_z + 1,339.$$

За рівняннями можна побудувати сімейство кривих, які будуть описувати вплив швидкості повітряного струменю на температуру обмоток в залежності від K_z . У відповідності до положення про те, що ці криві ідентичні для всіх типорозмірів сухих вибухобезпечних КТП з кремнійорганічною ізоляцією (серій КТПВ, ТВПШ), їх можна застосувати як універсальні. Важливим є також те положення, що можливі резерви

навантажувальної здатності або її обмеження необхідно розглядати по відношенню до ННТ обмотки, так як саме вона є найбільш слабким місцем ізоляційної системи. Тому, у відповідності до положень роботи [5] було доцільним побудувати відповідну криву для ННТ обмотки (крива 1 на рисунку 2).



- 1 – перевищення температури ННТ обмотки без зовнішнього обдуву;
 2 – середнє перевищення температури обмоток без зовнішнього обдуву;
 3 – перевищення температури ННТ обмотки при швидкості повітряного струменю 3,5 м/с; 4 – середнє перевищення температури обмоток при швидкості повітряного струменю 3,5 м/с

Рисунок 2 – Криві залежностей перевищення температури обмоток від навантаження

Визначимо вплив швидкості повітряного струменю на навантажувальну здатність трансформатора. Аналіз представлених на рисунку 2 кривих показує, що при однаковому змінному K_z у квадратичному рівнянні і незмінній температурі оточуючого середовища, але за різної швидкості повітряного струменю, будемо мати різну температуру обмоток (як середню, так і максимальну). Тобто, на температуру обмоток матимемо вплив саме швидкості повітряного струменю (V_{cmp}). Так як криві будуть аналогічними, то зазнають зміни коефіцієнти рівнянь при змінній K_z . Тоді можна вивести залежність їх зміни, визначаючи коефіцієнт рівнянь, отриманих шляхом апроксимації експериментальних даних (таблиця 1) для двох випадків: без обдуву та з обдувом зі швидкістю повітряного струменю $V_{cmp} = \text{і } 3,5 \text{ м/с}$.

За даними таблиці можна вирахувати, якої зміни зазнає кожен коефіцієнт для середньої температури обмотки при зміні швидкості повітряного струменю на 1 м/с:

$$a_v = \frac{a_{3,5} - a_0}{3,5} = \frac{31,38 - 25,59}{3,5} = 1,66 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}{\text{м}};$$

$$b_v = \frac{b_{3,5} - b_0}{3,5} = \frac{48,45 - 95,54}{3,5} = -13,45 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}{\text{м}};$$

$$c_v = \frac{c_{3,5} - c_0}{3,5} = \frac{1,33 - 0,133}{3,5} = 0,34 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}{\text{м}}.$$

Таблиця 1

$V_{cmp}, \text{ м/с}$	Коефіцієнти апроксимованих залежностей при змінній K_3		
	a_v	b_v	c_v
	для θ_{cp}		
0	25,59	95,54	0,133
3,5	31,38	48,45	1,339
	для θ_{HHT}		
0	23,33	141,7	-1,018
3,5	34,43	74,34	0,936

Таким чином, для будь-яких значень V_{cmp} і K_3 отримаємо залежність для вирахування перевищення середньої температури:

$$\theta_{cp.obm} = (a_0 + a_v \cdot V_{cmp}) \cdot K_3^2 + (b_0 - b_v \cdot V_{cmp}) \cdot K_3 + (c_0 + c_v \cdot V_{cmp}), ^{\circ}\text{C} \quad (1)$$

Для ННТ обмотки рівняння буде виглядати аналогічно

$$a'_v = \frac{a'_{3,5} - a'_0}{3,5} = \frac{34,43 - 23,33}{3,5} = 3,17 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}{\text{м}};$$

$$b'_v = \frac{b'_{3,5} - b'_0}{3,5} = \frac{74,34 - 141,7}{3,5} = -19,25 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}{\text{м}};$$

$$c'_v = \frac{c'_{3,5} - c'_0}{3,5} = \frac{0,936 - 1,018}{3,5} = 0,558 \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{с}}{\text{м}};$$

$$\theta_{HHT} = (a'_0 + a'_v \cdot V_{cmp}) \cdot K_3^2 + (b'_0 - b'_v \cdot V_{cmp}) \cdot K_3 + (c'_0 + c'_v \cdot V_{cmp}). \quad (2)$$

Результатом вирішення рівнянь (1) і (2) для конкретних значень V_{cmp} і K_3 буде відповідно середнє і максимальне перевищення температури обмоток. За даними рівняннями можна, знаючи завантаження КТП, побудувати відповідні залежності перевищення температури обмоток для будь-якої швидкості повітряного струменю.

Вирішення квадратного рівняння виду (2) за незмінної, наперед визначеної швидкості повітряного струменю та змінної температури оточуючого середовища з можливого розкиду її значень, дозволяє знайти розв'язок у вигляді відповідного певним умовам допустимого коефіцієнту завантаження $K_{3\,доп.}$, який буде «сприйматися» трансформатором як номінальний для даних умов оточуючого середовища, тобто за роботи трансформатора з таким $K_{3\,доп.}$ отримаємо номінальний знос ізоляції обмоток.

Зміна температури оточуючого середовища вводиться у рівняння (2) шляхом попереднього визначення перевищення температури ННТ:

$$\theta_{ННТ} = \theta_{ННТ.ном} + T_{ос.ном} - T_{ос.реал},$$

де $\theta_{ННТ.ном} = 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимально допустиме перевищення температури найбільш нагрітої точки обмотки для кремнійорганічної ізоляції класу нагрівостійкості $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ при максимально допустимій температурі оточуючого середовища;

$T_{ос.ном} = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ – температура оточуючого середовища згідно виконання У5;

$T_{ос.реал}$ – реальна температура оточуючого повітря в місці установки.

В залежності від оточуючої температури будемо мати реально допустиме перевищення температури ННТ обмотки. Задаючи різні значення температури оточуючого середовища в діапазоні температур виконання У5 ($-10 \dots +35\text{ }^{\circ}\text{C}$), а також, приймаючи при цьому швидкість повітряного струменю допустимого в діапазоні від 0 м/с до 6 м/с , отримаємо коефіцієнти завантаження трансформатора відповідно до конкретних умов оточуючого середовища (таблиця 2).

За її даними побудуємо графічні залежності $K_{3\,доп.}$ від температури оточуючого середовища для конкретної швидкості повітряного струменю (рисунок 3).

Таблиця 2

$T_{ос}$	$K_{3\,доп.} = f(T_{ос}, V_{cmp})$ при $V_{cmp}, \text{ м/с}$								
	0	1	2	3	3,5	4	5	6	7
-10	1,237	1,334	1,439	1,552	1,611	1,672	1,797	1,927	2,058
-8	1,227	1,323	1,428	1,541	1,600	1,661	1,786	1,916	2,048
-6	1,217	1,313	1,417	1,530	1,589	1,650	1,776	1,905	2,037
-4	1,207	1,303	1,407	1,519	1,578	1,639	1,765	1,895	2,027

Продовження таблиці 2

T_{oc}	$K_{з, доп} = f(T_{oc}, V_{cmp})$ при $V_{cmp}, \text{ м/с}$								
	0	1	2	3	3,5	4	5	6	7
-2	1,197	1,292	1,396	1,508	1,567	1,628	1,754	1,884	2,017
0	1,187	1,282	1,385	1,497	1,556	1,617	1,743	1,873	2,006
2	1,177	1,271	1,374	1,486	1,545	1,606	1,732	1,862	1,995
4	1,166	1,261	1,364	1,475	1,534	1,595	1,721	1,851	1,985
6	1,156	1,250	1,353	1,464	1,523	1,584	1,710	1,840	1,974
8	1,146	1,239	1,342	1,453	1,512	1,573	1,699	1,829	1,963
10	1,136	1,229	1,331	1,442	1,501	1,561	1,687	1,818	1,953
12	1,125	1,218	1,320	1,431	1,489	1,550	1,676	1,807	1,942
14	1,115	1,207	1,309	1,420	1,478	1,539	1,665	1,796	1,931
16	1,105	1,197	1,298	1,408	1,467	1,527	1,653	1,785	1,920
18	1,094	1,186	1,287	1,397	1,455	1,516	1,642	1,774	1,909
20	1,084	1,175	1,276	1,385	1,444	1,504	1,630	1,762	1,898
22	1,074	1,164	1,264	1,374	1,432	1,493	1,619	1,751	1,887
24	1,063	1,153	1,253	1,362	1,421	1,481	1,607	1,739	1,875
26	1,053	1,142	1,242	1,351	1,409	1,469	1,595	1,728	1,864
28	1,042	1,131	1,230	1,339	1,397	1,457	1,584	1,716	1,853
30	1,032	1,120	1,219	1,328	1,385	1,446	1,572	1,704	1,841
32	1,021	1,109	1,208	1,316	1,374	1,434	1,560	1,693	1,830
34	1,011	1,098	1,196	1,304	1,362	1,422	1,548	1,681	1,818
35	1,00	1,093	1,190	1,298	1,356	1,416	1,542	1,675	1,812

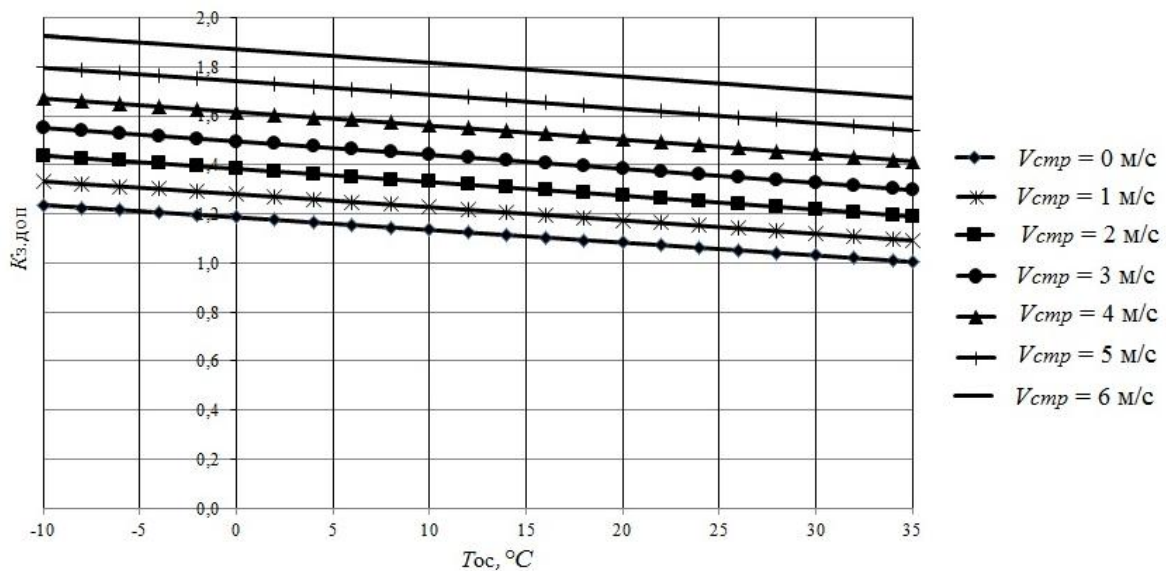


Рисунок 3 – Залежності коефіцієнту допустимого навантаження трансформатора КТП від умов оточуючого середовища

Лінійна апроксимація отриманих характеристик з високою достовірністю дозволяє представити кожну залежність у вигляді прямої

$$K_{з.дон} = \kappa \cdot T_{окр.реал} + d,$$

де $\kappa = -0,005 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ – кутовий коефіцієнт у рівнянні, що описує залежність $K_{з.дон.}$ від температури оточуючого середовища;

$d = d_0 \cdot d_v = 1,187 \cdot 1,08^{V_{сmp}}$ – коефіцієнт, що враховує вплив швидкості повітряного струменю у місці встановлення КТП на допустиме навантаження.

Таким чином, рівняння, що описує залежність нормально допустимого $K_{з.дон.}$ трансформатора від умов оточуючого середовища, має вигляд:

$$K_{з.дон} = \kappa \cdot T_{ос.реал} + d_0 \cdot d_v = -0,005 \cdot T_{ос.реал} + 1,187 \cdot 1,08^{V_{сmp}}.$$

Наприклад, при швидкості повітряного струменю і температурі оточуючого середовища згідно санітарних норм ($T_{ос} = 26 \text{ } ^{\circ}\text{C}$; $V_{сmp} = 2 \text{ м/с}$) отримаємо:

$$K_{з.дон} = -0,005 \cdot 26 + 1,187 \cdot 1,08^2 = 1,255.$$

Допустимий номінальний $K_{з.дон.}$, враховуючи граничні умови щодо перевищення температури ННТ обмотки, складає 1,255. Таким чином, при врахуванні реальних умов роботи трансформатора за розглянутими факторами, можна внести поправку при виборі потужності КТП за існуючою методикою (метод коефіцієнта попиту) або дати попередню оцінку можливості її експлуатації з визначеним допустимим навантаженням без прискореного скорочення терміну служби даного обладнання за зносом ізоляції обмоток.

Положення про можливу відмінність умов оточуючого середовища від номінальних доцільно враховувати вже на стадії проектування пропускної спроможності комутаційної і вимірювальної апаратури заводом-виробником, щоб уникнути обмежень ефективного використання навантажувальної здатності КТП при експлуатації. Наприклад, у [6] відмічено, що в конструкції КТП потужністю 630 кВ·А застосовується автоматичний вимикач на номінальну силу струму 630 А, а сила струму при номінальному навантаженні складає 527 А. Таким чином, максимально можливою для цієї КТП є робота з перевантаженням на рівні лише 19,6 %.

Висновки:

1. Встановлено закономірність комплексного впливу температури та швидкості повітряного струменю на навантажувальну здатність трансформаторів вибухобезпечних КТП.
2. Встановлено універсальну залежність коефіцієнту допустимого навантаження $K_{з.дон.}$ від комплексного впливу температури оточуючого середовища та швидкості повітряного струменю.

3. Урахування поправки на вплив цих факторів дозволяє уникнути прийняття завищеного типорозміру КТП при виборі її потужності та більш ефективно використовувати її за навантажувальною здатністю.

4. Застосування отриманої залежності дозволить надавати рекомендації стосовно можливості експлуатації даного виду обладнання при його використанні в специфічних умовах оточуючого середовища.

Список літератури

1. Система учета и контроля расхода электроэнергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, В.В. Ткачев, В.Т. Заика [и др.] // Промышленная энергетика. – 1992. – №7. – С.19–21.

2. Пивняк Г.Г. Експериментальні дослідження завантаженості електромережного обладнання з метою підвищення ефективності систем підземного електропостачання / Г.Г. Пивняк, В.Т. Заїка // Вісник ВТУ. – Вінниця, 1999. – № 6. – С. 26–32.

3. Беккер Р.Г. Эксплуатация и обслуживание шахтных комплектных трансформаторных подстанций / Р.Г. Беккер. – М.: Недра, 1981. – 80 с.

4. Пивняк Г.Г. О нормировании погрешности в расчетах электрических нагрузок промышленных предприятий / Г.Г.Пивняк, В.Т.Заика, Ю.Т. Разумный // Электричество. – 1988. – № 6. – С. 66–69.

5. Селищев А.Н. Шахтные сухие трансформаторы и передвижные подстанции / А.Н.Селищев. – М.: Недра, 1968. – 384 с.

6. Перегрузочная способность взрывобезопасных трансформаторных подстанций / И.Я. Чернов, В.В. Шилов, В.М. Грушко [и др.] // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2011. – С. 42–46.

7. Нагорный М. А. Метод определения нагрузки трансформатора для электроснабжения угледобывающих участков по его фактическому тепловому состоянию / М.А. Нагорный, А.П. Ковалев, Л.И. Колесник // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, ЛТД», 2001. – С. 113–119.

8. Сорока Е.А. Экспериментальное исследование теплового состояния взрывозащищенного трансформатора рудничной подстанции мощностью 1000 кВ·А в различных режимах / Е.А.Сорока, И.Н. Луценко // Гірнична електромеханіка і автоматика: наук.-техн. зб. – Днепропетровск, 2012. – Вып. 88. – С. 6–11.