

analizu // Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrayiny. Zb.nauk.prats. –2012. – Vyp.31. – S. 38-48.2.

2. Shevchuk S.P. Povyshenie effektivnosti vodootlivnyh ustanovok: Ucheb.posobie. – K.: UMK VO, 1990. – 104s.

3. Shevchuk S.P., Popovych O.M., Svitlytskyy V.M. Nasosni, ventilyatorni ta pnevmatychni ustanovky: pidruchnyk. – K.: NTUU "KPI", 2010. – 308 s.

*Стаття надійшла до редакції 15.05.2014 р.*

УДК 621.316.

**І. О. Гунько, асп., П. Д. Лежнюк, д.т.н., проф. (ІнЕЕЕМ ВНТУ)**

### **ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС ШЛЯХОМ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВВОДІВ**

---

**І. О. Hunko, postgraduate, P. D. Lezhniuk, doc. of tech. sc., prof. (InPEEN VNTU)**

### **OPTIMAL CONTROL OF NORMAL MODES OF EES BY INCREASING RELIABILITY HIGH-VOLTAGE INPUTS**

*Розглянуто метод оперативного визначення коефіцієнта залишкового ресурсу трансформатора, який, на відміну від існуючих, шляхом врахування, серед інших, і коефіцієнтів залишкового ресурсу високовольтних вводів, дозволяє зменшити похибку прогнозування технічного стану силового трансформатора та виявляти трансформатори, в яких стан високовольтних вводів обґрунтовано обмежує їх регулювальний ефект.*

**Ключові слова:** оптимальне керування, оливнонаповнені високовольтні вводи, короткозамкнений контур, тепловізор.

*Рассмотрен метод оперативного определения коэффициента остаточного ресурса трансформатора, который, в отличие от существующих, путем учета коэффициентов остаточного ресурса высоковольтных вводов, позволяет уменьшить погрешность прогнозирования технического состояния силового трансформатора и определить трансформаторы, в которых состояние высоковольтных вводов обоснованно ограничивает их регулировочный эффект.*

**Ключевые слова:** оптимальное управление, маслонаполненные высоковольтные вводы, короткозамкнутый контур, тепловизор.

*Describes the method of determining the coefficient of operative residual life of the transformer, which, unlike existing ones can reduce the error of prediction of technical condition of the power transformer and the coefficients of residual life of high-voltage inputs, and identify transformers in which the state of high-voltage inputs reasonably limits their adjustment effect.*

**Keywords :** optimal control, oil-filled inputs, short-circuit, infrared controller.

**Вступ.** В наш час особливостями електроенергетичних систем (ЕЕС) стали складність внутрішніх і зовнішніх зв'язків, наявність адаптивних

властивостей [1], впровадження енергоощадних та інформаційних технологій SMART GRIDS [2,4]. Властивістю сучасних ЕЕС, яка ускладнює процес керування і значно зменшує ефективність керувальних впливів, є зростання частки обладнання, яке відпрацювало нормативний термін і тому потребує визначення поточного технічного стану. В багатьох країнах світу, а серед них і в Україні, частка обладнання, яке відпрацювало свій паспортний ресурс, перевищила половину [6]. Тому ознакою сьогодення є підвищення вимог із забезпечення безаварійної експлуатації такого обладнання, особливо під час оптимального керування режимами. До інших факторів, які ускладнюють керування нормальними режимами ЕЕС, відносяться: великі масштаби загального виробництва електроенергії джерелами (в тому числі альтернативними), розподіленими на значних територіях, але об'єднаними спільним режимом та оперативним керуванням; жорсткий взаємозв'язок у часі процесу виробництва, транспортування та споживання електроенергії; необхідність впровадження нових засобів керування та інші. При оптимальному керуванні режимами ЕЕС доцільно використовувати трансформатори з РПН, вимикачі та інше обладнання. Відомо, що особливістю силових трансформаторів, регулювальних реакторів, вимикачів є пошкоджуваність їх високовольтних вводів.

**Основна частина.** Пропоную під час оптимального керування нормальними режимами ЕЕС враховувати коефіцієнт залишкового ресурсу високовольтних вводів, який змінюється від 0 до 1(в.о.) [5,6] і є інтегральним параметром, який серед інших діагностичних параметрів [5] враховує зміну різниці температур корпусів компенсаторів тиску різних фаз одного трансформатора однакової напруги. Ці коефіцієнти враховуються при визначенні коефіцієнта якості функціонування трансформаторів з РПН та високовольтних вимикачів з метою оцінки їх впливу на загальносистемні втрати активної потужності в ЕЕС. Коефіцієнт якості функціонування трансформатора є комплексним параметром, який враховує не лише можливість трансформатора перетворювати електроенергію, а й можливість ефективно впливати на режим енергосистеми. Він визначається за виразом [5] (1):

$$k_{\text{як.функ.}} = (a_1 + a_2) \cdot k_{\text{респ}} \cdot k_{\text{ресввод.}} \cdot k_{\text{ресл}} \cdot a_3 \cdot k_{\text{втрат}}, \text{ де:} \quad (1)$$

$k_{\text{втрат}}$  - коефіцієнт втрат активної потужності, який визначають за формулою (2):

$$k_{\text{втрат}} = \frac{\Delta P_{\text{неопт}} - \Delta P_{\text{опт}}}{\Delta P_{\text{опт}}}, \quad (2)$$

коефіцієнт залишкового ресурсу по параметру «накопичений комутований струм» РПН трансформатора  $k_{\text{ресл}}$  визначають за формулою (3):

$$k_{\text{ресл}} = \frac{I_{\text{зал.}} - n \cdot I_{\text{ком}}}{I_{\text{пасп.}}}, \quad (3)$$

залишковий накопичений комутований струм  $I_{\text{зал.}}$  за формулою (4):

$$I_{\text{зал.}} = I_{\text{пасп.}} - I_{\text{нак.}}, \quad (4)$$

визначають коефіцієнт ресурсу по параметру кількості перемикачів  $k_{\text{ресн}}$  за формулою (5):

$$k_{\text{ресн}} = \frac{n_{\text{зал.}} - n}{n_{\text{пасп.}}}, \quad (5)$$

коефіцієнт залишкового ресурсу температури одного високовольтного вводу за виразом (6):

$$k_{\text{рес.ввод.}i,j} = \frac{\Delta t_{\text{ном}jj}}{t_{ij} \text{ справ}}, \quad \text{де:} \quad (6)$$

$\Delta t_{\text{ном}i,j}$  – поточне значення різниці температур корпусів компенсаторів тиску однотипних вводів різних фаз одного трансформатора для  $j$ -того режиму,  $\Delta t_{\text{макс}дон}$  – максимально допустиме значення різниці температур корпусів компенсаторів тиску однотипних вводів різних фаз одного трансформатора, використовують загальний коефіцієнт залишкового ресурсу всіх вводів, який розраховують за виразом (7):

$$k_{\text{рес.ввод.}} = \sum_{i=1}^n \lambda \cdot k_{\text{рес.ввод.}i,j}, \quad \text{де:}, \quad (7)$$

$\lambda = 1/\Omega$  – коефіцієнт, який враховує вплив кожного вводу окремо;  $\Omega$  – кількість вводів (погіршення стану одного вводу на інший не впливає) вагові коефіцієнти визначаються за виразами (8):

$$a_1 = \frac{B_1}{B_{\text{сум}}}, \quad a_2 = \frac{B_2}{B_{\text{сум}}}, \quad a_3 = \frac{B_3}{B_{\text{сум}}}, \quad (8)$$

вартість понаднормованих технічних втрат активної потужності за виразом (9):

$$B_3 = (\Delta P_{\text{пот}} - \Delta P_{\text{норм}}) \tau C, \quad (9)$$

сумарну вартість за виразом (10):

$$B_{\text{сум}} = B_1 + B_2 + B_3, \quad \text{де:} \quad (10)$$

$B_1, B_2$  – вартості: – втраченої електричної енергії в результаті роботи по ремонтній схемі, – ремонту РПН трансформатора в разі його пошкодження при оперативних перемикачнях;  $n$  – кількість потрібних перемикачів для досягнення оптимального режиму;  $\Delta P_{\text{опт}}$  – оптимальне значення втрат активної потужності;  $\Delta P_{\text{неопт}}$  – значення втрат активної потужності при відмові від перемикачів даним трансформатором;  $I_{\text{зал.}}$  – залишковий струм комутації;  $I_{\text{ком}}$  – струм, який комутує трансформатор при одному перемикачні;  $I_{\text{пасп.}}$  – струм, який повинен комутувати трансформатор по паспорту;  $I_{\text{нак.}}$  – накопичений комутований струм;  $\Delta P_{\text{норм}}$  – нормативне значення технічних втрат активної потужності;  $\Delta P_{\text{пот}}$  – поточне значення втрат активної потужності;  $C$  – вартість електроенергії;  $\tau$  – тривалість періоду між перемикачнями. Далі трансформатори з РПН ранжують за значеннями коефіцієнтів якості функціонування, та під час керування нормальними режимами вибирають той

трансформатор у якого значення коефіцієнта якості функціонування найбільше і здійснюють керуючі впливи.

Таким чином оперативний персонал першим виявляє погіршення коефіцієнта якості функціонування силового обладнання, яке використовує високовольтні вводи. Сучасні системи періодичного та безперервного контролю технічного стану високовольтних вводів дозволяють вчасно зафіксувати небезпечні відхилення в температурі корпусів компенсаторів тиску вводів та попередити про це експлуатуючий та ремонтний персонал енергопідприємств з метою їх вчасного ремонту, заміни на справні та усунення обмежень в апаратному забезпеченні оптимальних режимів ЕЕС. Однак для обґрунтованого прийняття рішення про доцільність виведення в ремонт вводу та планування заходів з ремонту проаналізуємо причини та наслідки зростання температури компенсаторів тиску ОБВ.

Так, аналіз результатів тепловізійного контролю вводів силових трансформаторів дозволив виявити різницю температур в однотипних вводах (рис.1).

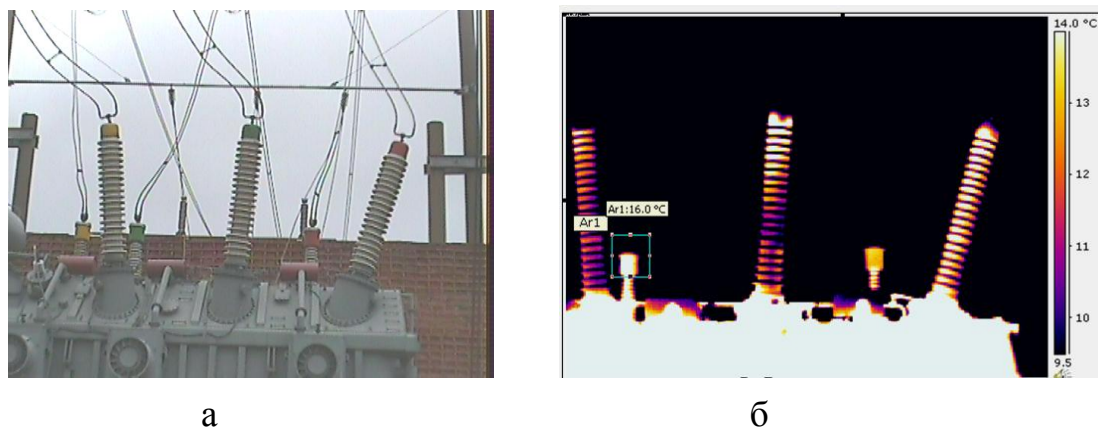


Рис. 1. Фотографія автотрансформатора та його тепловізійне зображення з термограми (рис. 1 б видно, що корпус компенсатора тиску фази А середньої напруги 110 кВ має підвищену (порівняно з фазами В, С тієї ж напруги) температуру, а на рис. 2 а – підвищений нагрів компенсатора тиску вводу до 16,3 °С при температурі навколишнього середовища 8,4°С.

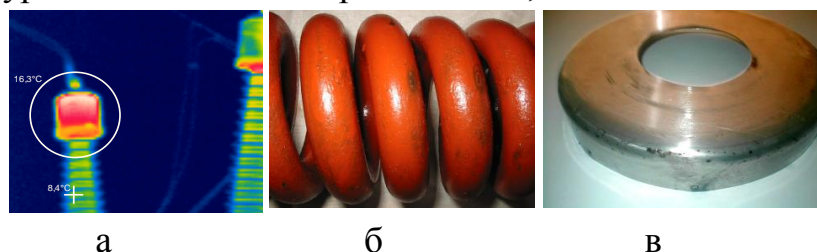


Рис. 2. Підвищений нагрів компенсаторів тиску вводів

Подальші дослідження пошкоджених вводів дозволили виявити точки горіння мікродуг, які є точками зміни кольору фарби внаслідок нагріву (рис.2 б,в). Проаналізувавши конструкцію ОБВ та з'єднавши ці точки вдалось побудувати шляхи протікання струмів в короткозамкнених контурах (КЗК) пружино-стягуювального вузла (рис. 3). Розміри КЗК і результати розрахунків

електрорушійної сили (е.р.с.) в КЗК наведені у таблиці 1. Якщо перехідний опір в місці горіння мікродуг буде зростати то активна потужність, яка розсіюється у контурі:

$$P(R_1) = I^2 R_1 = E^2 \cdot R_1 / (X^2 + R_1^2) = E^2 / (X^2/R_1 + R_1). \quad (11)$$

Визначимо максимальну активну потужність, яка виділяється в елементах контуру з урахуванням того, що  $X=X_L=105,2$  мкОм, а  $E=0,058614$  В. Тоді максимальна потужність (рис.4), яка може виділитись в контурі  $x - ж - з - м$  у відповідності до виразу (12) дорівнює:

$$P_{max} = E^2 / Y_{min} = 3.435624 \cdot 10^{-3} / 2.103302 \cdot 10^{-4} = 16.334429 \text{ Вт}, \quad (12)$$

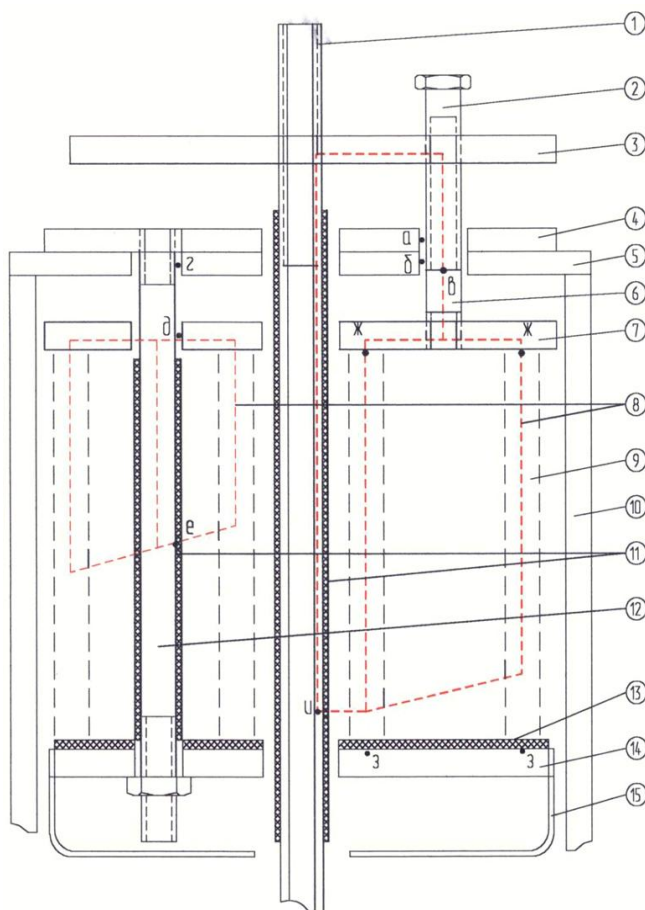


Рис. 3. Шляхи протікання струмів короткозамкнених контурів та можливі перегреви місця торкань і горіння мікродуг:

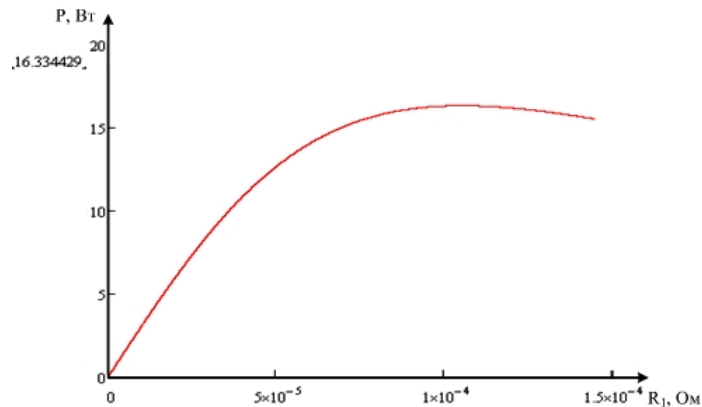
а - гвинтів установочних і диска стяжного допоміжного; б - гвинтів установочних і диска стяжного; в - гвинтів установочних і вставки натискної; г - шпильок стяжних і диска стяжного; д - шпильок стяжних і диска натискного верхнього; е - шпильок стяжних і пружин що компенсують; ж - пружин що компенсують і диска натискного верхнього; з - пружин, що компенсують тиск і піддона; и - пружин, що компенсують тиск і труби.

Результати вимірів опору пружини, яка має найбільший з опорів елементів контуру свідчать про те, що її опір знаходиться в межах 900-1000 мкОм. Тому приймаємо активний опір контуру -  $1 \cdot 10^{-3}$  Ом. За такого опору максимальна потужність, яка розсіюється в КЗК « $x - ж - з - м$ »  $P_{max} = 3,398 \text{ Вт}$

при  $X_L=105,1651$  мкОм. Залежність потужності, що розсіюється у контурі, від активного опору контуру ( $R_I=0-150$  мкОм) « $x - ж - з - м$ » побудована в MathCAD і показана на рис. 4. Під час ремонту деяких ввідів службою ремонтів високовольтного обладнання ПЗЕС були виявлені сліди можливого протікання струмів в декількох КЗК.

Таблиця 1. Параметри контуру та результати розрахунків

Точки замкнення, що створюють короткозамкнені контури	Розмір сторін контуру, мм			е.р.с., В	Індуктивність контуру, мкГн	Індуктивний опір дорівнює активному опору, мкОм
	$a$	$b$	$h$			
$x - ж - з - м$	50	150	340	0.0586	0,33475	105,165
$x - ж - н$	60	100	80	0.0064	0,05607	17,6160
$ж - ж - з - з$	60	150	200	0.0286	0,21780	68,4420
$ж - и - н$	60	150	160	0.0230	0,19060	59,8755
$л - е - л$	60	150	100	0.0144	0,14517	45,6053

Рис. 4. Залежність потужності  $P$ , що розсіюється у контурі, від активного опору контуру

Ці контури містили пружини стягувального вузла вводу. Як приклад, таких контурів – шість. Тоді очікувана сумарна потужність, яка могла виділятися в цих контурах дорівнює (13):

$$P_{\Sigma} = 6 \cdot P_{\max} = 6 \cdot 3,398 = 20,388 \approx 20 \text{ Вт.} \quad (13)$$

З метою обґрунтування доцільності контролю корпусів компенсаторів тиску (КТ) оливо-наповнених ввідів для виявлення КЗК порохуємо можливу температуру стінки корпусу КТ ОБВ (рис.5).

Вважаємо, що температура повітря, яке оточує ввід дорівнює  $t_{\text{пов}}=8,4$  °С. Для спрощення розрахунків вважаємо, що корпус КТ виготовлений з металу і має діаметр  $D=0,3$  м, висоту  $H=0,3$  м, товщину металевої стінки корпусу ввода  $\delta_{\text{мет}}=0,003$  м. Коефіцієнт теплопровідності сталі  $\lambda_{\text{мет}}=16,3$  Вт/(м·град).

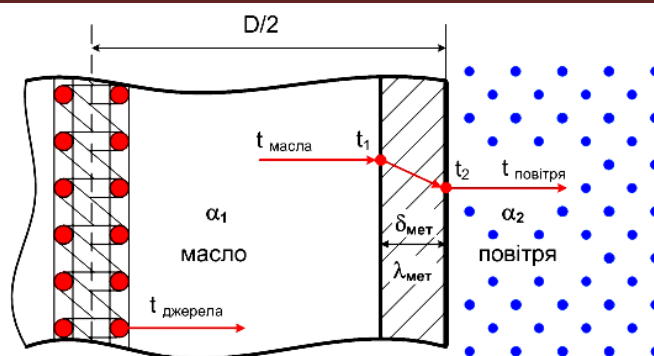


Рис. 5. Спрощений фрагмент ескізу компенсатора тиску вводу

Ввод заповнений трансформаторною оливою. Джерело тепла знаходиться посередині в корпусі вводу і відповідно до табл.1, в ньому виділяється потужність  $P=20$  Вт, яка повністю витрачається на нагрів.

Площа поверхні охолодження:

$$S = \pi \cdot D \cdot H,$$

$$S = 3.14 \cdot 0.3 \cdot 0.3 = 0.2826 \text{ м}^2. \quad (14)$$

Щільність теплового потоку:

$$q = P/S,$$

$$q = 20/0.2826 = 70,8 \text{ Вт/м}^2. \quad (15)$$

Згідно коефіцієнт теплової віддачі конвекцією та випромінюванням від корпусу до повітря:

$$\alpha_2 = \frac{q}{t_2 - t_{нов}}, \quad \text{де:} \quad (16)$$

$t_2$  – температура зовнішньої поверхні корпусу компенсатора тиску вводу, °С; а  $t_{нов}$  – температура повітря, °С.

Температура зовнішньої поверхні корпусу компенсатора тиску вводу:

$$t_2 = \frac{q}{\alpha_2} + t_{нов}. \quad (17)$$

Підставимо в (17) значення  $q$  з (15), з підставимо значення  $\alpha_2 = 9$  Вт/(м<sup>2</sup>·град), а температуру повітря прийемо  $t_{нов} = 8.4$  °С. Тоді отримаємо температуру зовнішньої поверхні корпусу компенсатора тиску вводу (18):

$$t_2 = \frac{70.8}{9} + 8.4 = 16.267 \approx 16.3 \text{ °С}. \quad (18)$$

Ця температура співпадає з результатами тепловізійного контролю (рис.2).

Проведені дослідження свідчать про те, що причиною появи в трансформаторній оливі ОБВ розчинених вуглеводневих газів може бути протікання струмів по короткозамкнених контурах для потоків розсіяння, що створюються робочим струмом вводу та проявляється у підвищенні температури корпусу компенсатора тиску вводу.

Для виключення таких струмів потрібно не допускати торкання пружин одна одної в компенсаторах тиску ОБВ 110 – 750 кВ та ізолювати з одного боку пружини від натискного диску. Така реконструкція може здійснюватись

експлуатуючою організацією, як це робиться на ділянці з ремонту високовольтних вводів 110-750 кВ Південно-Західної енергетичної системи, в якій автор приймала участь під час виробничої практики (рис.6 б).

Фрагмент процесу реконструкції пружинного вузла вводу з встановленням ізоляційних циліндрів між пружинами з піддоном для розриву контурів протікання струмів від потоків розсіяння показаний на рис.6 (а)



а

б

Рис. 6. Ізоляція пружин від корпусу головки вводу

Ефективність запропонованих заходів з відновлення стану ОВВ підтверджується даними табл. 2.1., з яких видно, що відновлені ОВВ виявлених дефектів нагріву корпусу пружинно-стяжного вузла під час повторної експлуатації не мали.

Таблиця 3. Кількість ремонтваних та реконструйованих ОВВ

Показники			
Рік	2011	2012	2013
Кількість відремontованих ОВВ	30	25	24
Кількість пошкоджених з відремontованих	0	0	0

Зменшення відмов вводів, кількості вводів які надходять на ремонт, свідчить про дієвість заходів з ремонту і реконструкції ОВВ.

### Висновки

1. Використання результатів розрахунків коефіцієнтів якості функціонування високовольтних трансформаторів, що серед інших діагностичних параметрів враховують і стан їх високовольтних вводів, в процесі автоматизованого та автоматичного керування режимами ЕЕС дозволяє зменшити пошкоджуваність трансформаторів, покращити якість, ефективність та надійність роботи ЕЕС.

2. Вперше запропоновано метод оперативного визначення коефіцієнта залишкового ресурсу трансформатора, який, на відміну від існуючих, шляхом врахування, серед інших, і коефіцієнтів залишкового ресурсу високовольтних вводів, дозволяє зменшити похибку прогнозування технічного стану силового трансформатора та виявляти трансформатори, в яких стан високовольтних вводів обґрунтовано обмежує їх регульовальний ефект.



3. Результати вищенаведених розрахунків створили підґрунтя для початку робіт з усунення виявлених дефектів у вузлі компенсатора тиску, які успішно закінчились модернізацією конструкції ОВВ та вдосконаленням технології їх ремонтів в умовах експлуатації.

4. Дослідження конструктивних особливостей та пошкоджуваності ОВВ свідчать про випадки зростання температури компенсатора тиску в трансформаторній оливі якого зросла концентрація розчинених газів.

5. Аналіз результатів огляду компенсаторів тиску, які містять КЗК, свідчать про зміну кольору фарби пружин, шпильок та інших деталей, викликану горінням мікродуг.

6. Розроблена математична модель процесу нагріву компенсатора тиску ОВВ, який містить КЗК.

### Список використаних джерел

1. Lezhnyuk P.D. Metody optymizatsiyi v elektroenerhetytsi. Kryterialnyy metod: navch. Posibnyk / P.D. Lezhnyuk, S.V. Bevz. – Vinnytsya: VDTU, 1999. – 177 s.

2. Intelktual'ni elektrychni merezhi elektroenerhetychnykh system ta yikhne tekhnolohichne zabezpechennya / Stohniy B.S., Kyrylenko O.V., Denysyuk S.P. // Tekhn. Elektrodynamika. 2010. №6, S.44-50. – ISSN1607-7970.

3. I.O.Rubanenko, S.D. Mel'nyk, O.O. Derepashchuk Dyferentsialne ta intehral'ne chyslennya // tezy dopovidey KHXXVIII rehional'noyi naukovotekhnichnoyi konferentsiyi VNTU 10–13.03. 2009, Vinnytsya – 2009. [Elektronyy resurs]. – Rezhym dostupu: <http://conf.vntu.edu.ua/allvntu/2009/initki/txt/rubanenko.pdf>.

4. Grid 2030; A National Version for Electricity's Second 100 Years. – Office of Electric Transmission and Distribution United State Department of Energy, July 2003.

5. Pat. №76464 Ukrayina, MPK N02J23/00. Sposib optimalnoho keruvannya rezhymamy roboty elektroenerhetychnoyi systemy / Lezhnyuk P. D., Les'ko V.O., Rubanenko O. O., Rubanenko I.O. –№2012 058664. Zayavleno 14.05.2012. Opubl.10.01.2013, Byul.№1. –10 s.

6. Rubanenko O. Optymalne keruvannya normalnymy rezhymamy elektroenerhetychnykh system z vrakhuvannyam yakosti funktsionuvannya rehulyuyuchykh prystroyiv / O.Rubanenko, I.Rubanenko // Elektromekhanichni i enerhetychni systemy: KH mizhn. nauk.-tekhn. konf. mol. uch. i spets., 28–29 ber.2012 r.: Zbir. mater. konf. – Kremenchuk – 2012. №1. – S.292-293. – ISSN 2079-51-06.

*Стаття надійшла до редакції 22. 05. 2014 р.*