УДК 621.315.62.027.3.004.1.

**В. С. Собчук, к. т. н., проф.; Н. В. Собчук, к. т. н., доц.; О. В. Слободянюк, к. п. н.**

# МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПОРНОГО ІЗОЛЯТОРА ІЗ ВНУТРІШНЬОЮ АРМАТУРОЮ ДЛЯ ВНУТРІШНЬОЇ УСТАНОВКИ

*Проаналізовано можливі механізми утворення дефектів ізоляції закритих екранованих струмопроводів через електричні, механічні та теплові чинники. Запропоновано математичну модель опорного ізолятора із внутрішньою арматурою для внутрішньої установки.*

***Ключові слова:*** *ізоляція, закриті екрановані струмопроводи, математична модель ізолятора, вісесиметричні тіла обертання, коаксіальна система,концентратори механічних напруг.*

Опорні ізолятори із внутрішньою арматурою використовують у комплектних екранованих струмопроводах для з'єднання генератора і трансформатора в єдиний блок електричних станцій.

Надійність ізоляції струмопроводів у складі блоків повинна бути не нижчою за надійність ізоляції генераторів і трансформаторів. Цій вимозі не повною мірою відповідає ізоляція пофазноекранованого струмопроводу типу ТКЭП-6/3200-125 Новоднестровської ГЕС, для якого статистичні дані пошкоджень ізоляторів типу ИОР-10-750ШУХЛ2 наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

**Статистичні дані пошкоджень ізоляторів типу ИОР-10-750ШУХЛ2**

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Загальна довжина струмопроводу, м | Г1-Т1<br>140 | Г2-Т2<br>125 |
| 2 | Кількість ізоляторів у фазі, шт. | 130 | 85 |
| 3 | Загальна кількість ізоляторів, шт. | 390 | 255 |
| 4 | Загальна кількість вимикань струмопроводу за рік | 13 | 3 |
| 5 | Імовірність пошкодження за рік одного ізолятора | 0,0333 | 0,00118 |

Наведені в таблиці дані свідчать про низьку якість опорних ізоляторів. Потік відмов ізоляторів у струмопроводі Г1-Т1 у чотири рази більший, ніж у Г2-Т2.

Блок пофазноекранованого струмопроводу типу ТКЭП-6/3200-125, показаний на рис. 1, має для кожної фази індивідуальні алюмінієві оболонки з перерізом у вигляді правильного восьмикутника з високою жорсткістю. Фази струмопроводу розташовано в одній горизонтальній площині. Трубчасті шини 2 діаметром 120 мм і товщиною 10 мм кріпляться на опорних ізоляторах 5. Кожний ізолятор кріпиться крізь гумову прокладку болтом до фланця, який у свою чергу закріплюється на оболонці 1 чотирма болтами.

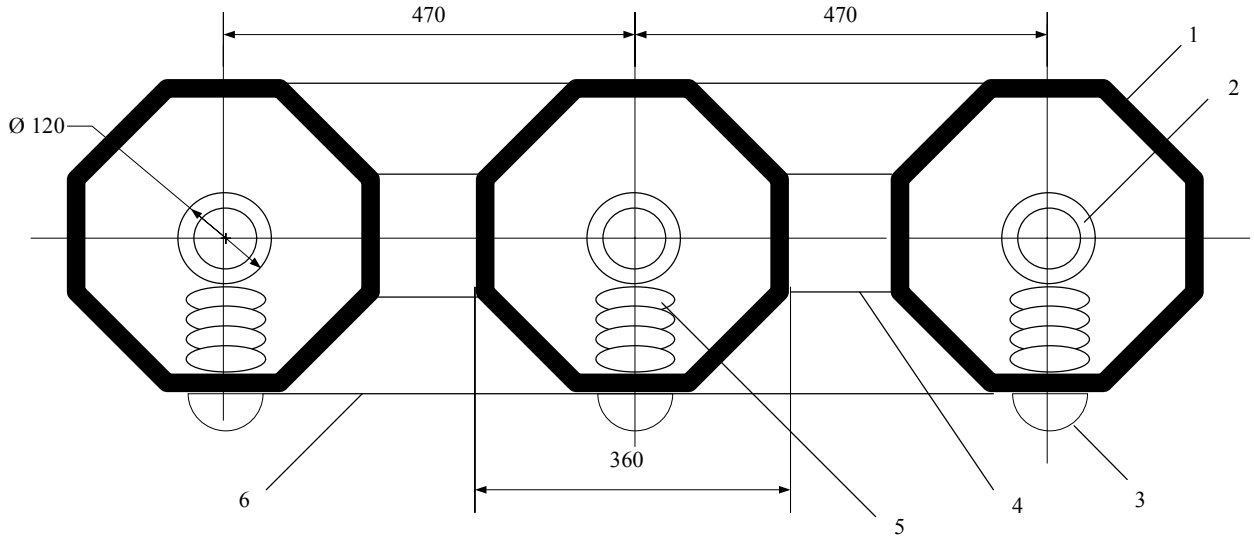


Рис. 1. Струмопровід типу ТЗМЭП-6-3150-128У1

Місце кріплення ізолятора закривається кришкою 3 з гумовою прокладкою. Для підсилення місць кріплення ізоляторів з внутрішньої сторони екранів приварено бобишки із алюмінієвого сплаву.

Кріплення струмопроводів до будівельних металоконструкцій ковзне (вільне) – сталевими хомутами. Екрани 1 різних фаз струмопроводу з'єднуються перемичками 4. Фазні оболонки можуть об'єднуватись однією загальною оболонкою 6.

Такі пофазноекрановані струмопроводи мають більші габарити порівняно зі струмопроводами із загальним екраном, і на них витрачається більше металу. Магнітне поле шин цих струмопроводів значною мірою компенсується магнітними полями струмів, які індукуються в екранах. Ось чому механічні навантаження, які діють у разі КЗ на шини й ізолятори, тут менші. Отже, електродинамічна стійкість пофазноекранованих струмопроводів вища, ніж струмопроводів із загальним екраном.

Відомо, що при КЗ температура алюмінієвих і мідних шин може підніматись до 200 $^0$С і 300 $^0$С відповідно.

Конструкція ізолятора типу ИОР-10-750IIIУХЛ2, наведена на рис. 2, складається з трьох співвісних циліндрів: зовнішнього – фарфорового; проміжного – цементного; внутрішнього – металевого. Два перших циліндри товстостінні, а внутрішній складається із двох суцільних циліндричних тіл із немагнітного сірого чавуну марки СЧ, які розділені фарфоровою перемичкою товщиною 25 мм.

Кріплення металевої арматури до фарфорового тіла за допомогою цементного розчину здійснюють заповненням кільцевої порожнини між арматурою і фарфоровим тілом портландцементним розчином, який складається із двох частин портландцементу й однієї частини наповнювача (дрібного річкового піску, відмитого від глинистих речовин, або фарфорового борошна), замішаних на воді.

Після затвердіння портландцементний розчин зчіплюється з поверхнею фарфору й арматури та міцно з'єднує їх між собою.

Для приготування розчину використовують портландцемент марки не нижче за 400 для опорних ребристих ізоляторів внутрішньої установки на 6 – 10 кВ [1].

Межа міцності зразків розміром 40×40×160 мм$^3$ після затвердіння при стискуванні $\sigma_{ст} > 40$ МПа; при статичному вигинанні $\sigma_{виг} > 5,5$ МПа.

Температурний коефіцієнт лінійного розширювання цементної суміші $ТК_l = 10 \cdot 10^{-6}$.

Ущільнення цементної суміші після заповнення нею кільцевої порожнини між фарфором і арматурою досягається короткочасною вібрацією ізолятора або ж заповнення порожнини

цементною сумішшю здійснюється під тиском 0,2 – 0,3 МПа, що є еквівалентним насажуванню циліндра в циліндр з натягом.

Неармовані фарфорові ізолятори не знижують своєї механічної міцності внаслідок дії багатьох циклів температурних змін від +50 $^0$С до –40 $^0$С, а також при тривалому охолодженні до –60 $^0$С.

При зміні температури армованих фарфорових ізоляторів у місцях з'єднання фарфору з арматурою виникають додаткові механічні напруги, які зумовлені різницею коефіцієнтів лінійного розширення фарфору, цементної суміші й металу арматури.

Для зменшення цих додаткових напруг поверхні фарфору й арматури, які межують із цементною сумішшю, вкривають шаром компенсувальної промазки товщиною 0,2 – 0,3 мм (асфальтобітумний лак марок БТ-99 або БТ-377). На торцеві поверхні цементного шару наносять вологостійке покриття, наприклад, емаль ПФ-115. Варто пам'ятати, що цементний шар руйнується під дією трансформаторного масла.

Дефекти опорних ізоляторів із внутрішньою арматурою виникають у вигляді аксіально-радіальних тріщин (розколів). У сухому стані електричний опір ізолятора з тріщинами не зменшується, проте в разі високої вологості, характерної для ГЕС, у тріщині утворюється мікроплівка води на обох поверхнях розлому, а також і на фарфоровій перемичці, де довжина шляху витоку не перевищує 25 мм.

У непошкодженого ізолятора зволожується ребриста зовнішня поверхня, яка має довжину значно більшу, ніж перемичка, і розрахована на нормальний рівень ізоляції, тому перекриття робочою напругою не відбувається.

Розрахункова середня вологорозрядна напруженість електричного поля для фарфору становить величину 2 – 2,5 кВ/см і залишається однаковою для дефектного і бездефектного ізоляторів, тому залишковий рівень ізоляції по зволоженій поверхні перемички становить 5 – 6 кВ. Ось чому потік відмов ізоляторів ТКЭП6/3200-125 не зменшується, незважаючи на постійні заміни дефектних ізоляторів на нові.

Є підстави вважати, що всі ізолятори струмопроводів Г1-Т1 і Г2-Т2 мають дефекти у вигляді аксіально-радіальних тріщин і при зволоженні створюють шляхи для пофазних коротких замикань. Експериментальні випробування нових ізоляторів «тепловим ударом» у лабораторії техніки й електрофізики високих напруг Вінницького національного технічного університету свідчать про те, що після проходження струму ОКЗ величиною 31,5 кА по струмопроводу температура внутрішньої арматури ізоляторів сягає 200 $^0$С, унаслідок чого фарфорові деталі тріскаються із утворенням радіально-аксіальної тріщини. Ці тріщини зменшують довжину шляху витоку по ребристій поверхні до величини товщини перемички (від 180 мм до 25 мм), тобто в 7,2 рази. У сухому стані ізолятори з такими дефектами зберігають залишковий рівень ізоляції не менше 30 кВ. У разі зволоження тріщини цей рівень різко знижується до 4 – 5 кВ, тобто виникає шлях до нового ОКЗ. Унаслідок цього ОКЗ на всі ізолятори фази діє «тепловий удар» і тріскаються останні ізолятори, серед яких і нові, встановлені замість дефектних. Отже, можна вважати, що всі ізолятори цього типу в комплектних екранованих струмопроводах Новодністровської ГЕС є дефектними: з характерним дефектом – радіально-аксіальною суцільною тріщиною. Радикально виправити ситуацію можна негайною заміною всіх ізоляторів цього типу на такі, у яких $\Omega < 2$, або $k < 0{,}57731$. Вхідний контроль цих ізоляторів треба здійснити за методикою, наведеною в цій статті.

Для теоретичних досліджень запропоновано математична модель опорного ізолятора із внутрішньою арматурою, яка розроблена вченими в галузі опору матеріалів [1]. Під час посадці одного циліндра в інший з натягом колові напруги у внутрішньому циліндрі є стискувальними, а в зовнішньому – розтяжними. Епюри розподілу механічних напруг, які виникають після посадки, представлено на рис. 2.

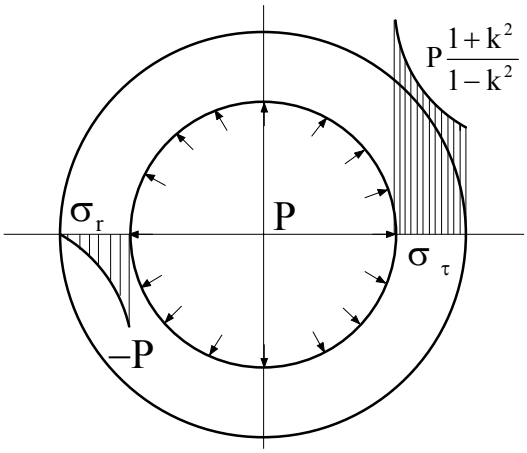


Рис. 2. Епюри розподілу механічних напруг в ізоляторі ИОР

Опорний ізолятор як складний циліндр під час зміни температури внутрішнього циліндру, внаслідок ОКЗ у струмопроводі, створює в зовнішньому фарфоровому циліндрі додаткові розтягальні колові і стискувальні радіальні напруги (див. рис. 2). Ці напруги описуються за формулами:

$$\sigma_r = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}\left(1 - \frac{r_2^2}{r^2}\right)p, \tag{1}$$

$$\sigma_\tau = \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2}\left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right)p, \tag{2}$$

$$u = \frac{1-\mu}{E}\cdot\frac{r_1^2 p}{r_2^2 - r_1^2}r + \frac{1+\mu}{E}\cdot\frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}p\cdot\frac{1}{r}. \tag{3}$$

Напруга $\sigma_r$ всюди стискувальна, а $\sigma_\tau$ – розтяжна. Найбільші величини $\sigma_r$ і $\sigma_\tau$ будуть біля внутрішньої поверхні циліндра за умови $r = r_1$:

$$\sigma_{r(r=r_1)} = -p; \tag{4}$$

$$\sigma_{\tau(r=r_1)} = \frac{1+k^2}{1-k^2}\cdot p, \tag{5}$$

де $k = r_1/r_2$.

Радіальний зсув біля внутрішньої поверхні (збільшення внутрішнього радіуса)

$$u = \frac{r_1}{E}\cdot\left(\frac{1+k^2}{1-k^2} + \mu\right)\cdot p. \tag{6}$$

Відомо [1], що циліндр з товстою стінкою не витримує внутрішнього тиску більшого за величину $[\sigma]/2$. Підстановка цього критерію у формулу (5) дає величину співвідношення

$$\sigma_{\tau_{крит}(r=r_1)} = \frac{1+k^2}{1-k^2}\cdot\frac{\sigma_{\tau_{крит}}}{2},$$

або $\dfrac{1+k^2}{1-k^2} \le 2$, а $k \le 0{,}57731$.

Напруги і зсуви біля зовнішньої поверхні циліндра за умови $r = r_2$:

$$\sigma_{r(r=r_2)} = 0; \tag{7}$$

$$\sigma_{\tau(r=r_2)} = \frac{2k^2}{1-k^2} \cdot p; \tag{8}$$

$$u_{r=r_2} = \frac{r_2}{E} \cdot \frac{2k^2}{1-k^2} \cdot p. \tag{9}$$

Епюри механічних напруг, наведені на рис. 2, змінюються за гіперболічним законом. Найнебезпечнішою для руйнування є точка біля внутрішньої поверхні фарфорового циліндра.

Колові напруги від внутрішнього тиску підсумовують з напругами від посадки у фарфорі і відніматимуть від них у внутрішньому циліндрі. Радіальні напруги від внутрішнього тиску і тиску посадки підсумовують в обох циліндрах.

Сумарні епюри напруг після прикладання тиску мають вигляд, представлений на рис. 2. Характерним тут є стрибок в епюрі $\sigma_\tau$ і перелом в епюрі $\sigma_r$ на радіусі контакту циліндрів. Відомо [2], що фарфор має значно меншу міцність на розтягування, ніж на стискування, тому радіально-аксіальні тріщини виникають від внутрішнього тиску

$$p \le \frac{|\sigma_\tau|}{2},$$

як це показано в [1].

Аналіз формули (5) засвідчує, що конструктивний параметр $\Omega = \frac{1+k^2}{1-k^2}$ є визначальним для умов руйнування фарфорового тіла опорного ізолятора із внутрішньою арматурою.

Для визначення діапазону змін цього параметра в сучасних реальних ізоляторах було виміряно відповідні геометричні розміри $r_1$, $r_2$, $r_3$.

Величини $ТК_l$ [2] для сірого чавуну (сталі) $ТК_{l1} = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/град, цементної зв'язки $ТК_{l2} = 12 \cdot 10^{-6}$ 1/град дозволяють дійти висновку, що чавун і цементна зв'язка є однорідним матеріалом за цим параметром. Умови задачі дозволяють перейти до двоциліндрової моделі опорного ізолятора, у якого внутрішній циліндр має радіус $r_{екв} = r_1 + r_2$, а зовнішній – відповідно $r_3$.

Для такої моделі визначено експериментально величини $k = r_{екв}/ r_3$ й побудовано залежність $\Omega = f(k)$, яку представлено графічно на рис. 3 і в таблиці 2.

Таблиця 2

| k | 0,95 | 0,9 | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,7 | 0,65 | 0,6 | 0,55 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ω | 19,5 | 9,5 | 6,2 | 4,55 | 3,57 | 2,9 | 2,46 | 2,12 | 1,86 |

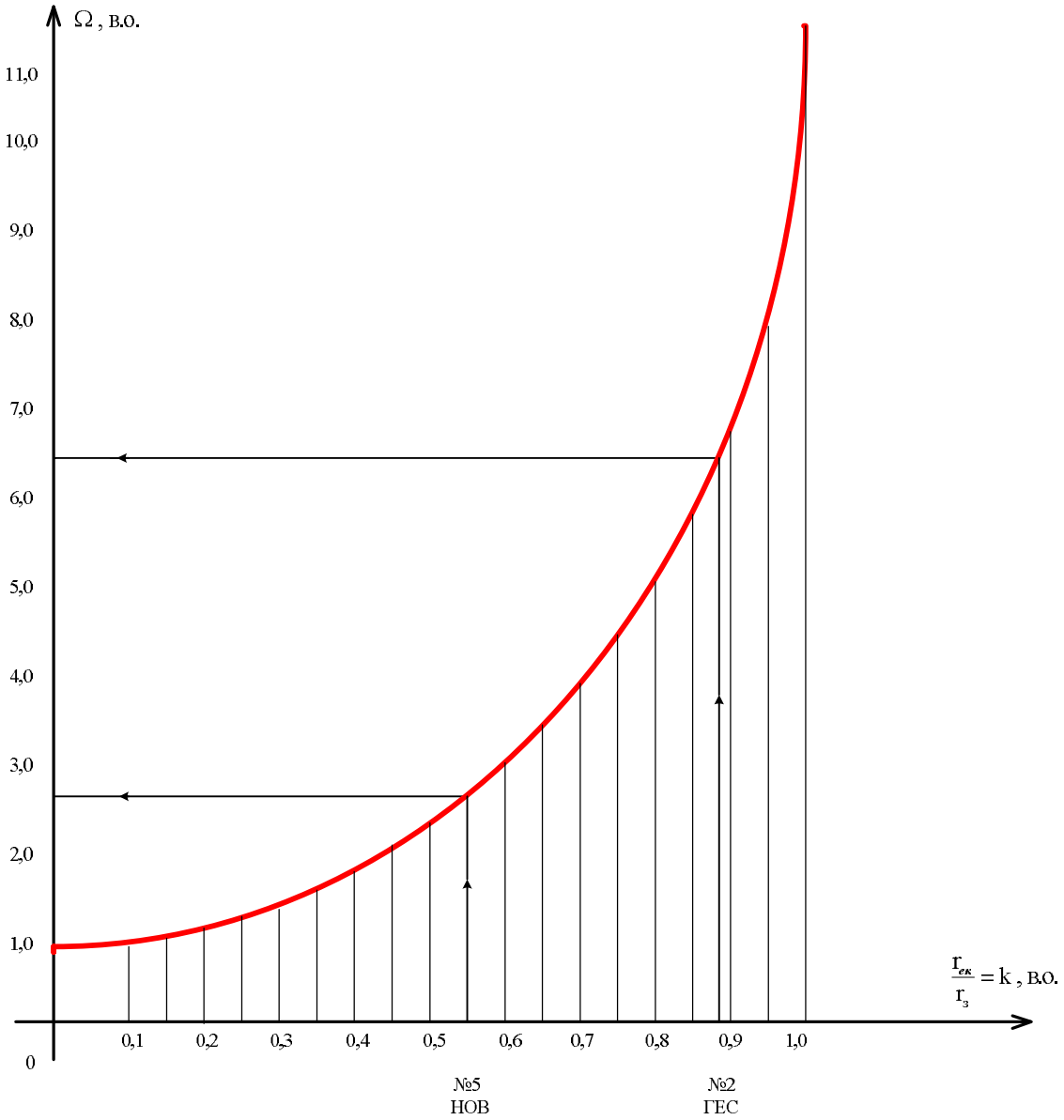


Рис. 3. Залежність Ω = f(k)

Внутрішній тиск в ізоляторі виникає внаслідок «теплового удару», який відповідає умовам проходження по струмопроводу струму ОКЗ.

Відомо [3], що температура алюмінієвих і мідних шин може зрости в цьому процесі до 200 $^0$C і 300 $^0$C відповідно.

В експериментальних дослідженнях до внутрішньої арматури ізолятора на короткий термін прикладали нагрівальний пристрій з температурою поверхні 200 $^0$C.

Звичайно, температурне поле в циліндрах вісесиметричне і постійне аксіально. За цих умов можна вважати, що поперечні перерізи залишаються пласкими і деформація $\sigma_z$ = const. Під час нагрівання ізоляторів типу ИОР-10-750IIIУХЛ2 з внутрішнім діаметром $2r_1$ = 75 мм і зовнішнім $2r_2$ = 90 мм до температури внутрішньої поверхні $T_1$ = 200 $^0$C, а зовнішньої поверхні до температури $T_2$ = 20 $^0$C температурні напруги в фарфорі можна визначити, враховуючи, що температура стінки змінюється за лінійним законом. У розрахунках приймаємо такі характеристики фарфору:

E = 0,5·10$^6$ кГ/см$^2$ – модуль пружності;

$\alpha = 4{,}5 \cdot 10^{-6}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення;

$\mu = 0{,}3$ – коефіцієнт Пуассона.

Перевищення температури внутрішньої поверхні над зовнішньою становить 180 $^0$C.

Визначимо тангенціальну й аксіальну напруги біля внутрішньої поверхні фарфорового циліндра за формулою

$$\sigma_{\tau(r=r_1)} = \sigma_{z(r=r_1)} = \frac{E\alpha T}{3(1-\mu)(r_2 - r_1)}\left[3r_1 - \frac{2\left(r_2^3 - r_1^3\right)}{r_2^2 - r_1^2}\right]. \qquad (10)$$

Для ізолятора типу ИОР-10-750ІІІУХЛ2 $\sigma_\tau = \sigma_z = -$ 684 кГ/см$^2$.

Результати експериментів двох типів ізоляторів наведено в таблиці 2.

Усі ізолятори типу ИОР-10-750ІІІУХЛ2 з Г1-Т1 і Г2-Т2 Новодністровської ГАЕС розкололись від теплового удару з утворенням аксіально-радіальної тріщини по всій висоті ізоляторів. Ізолятори іншого типу ИОР-10-750 витримали тепловий удар без руйнування.

Отже, експериментально встановлено, що параметр подібності конструкції ізоляторів $\Omega$ еквівалентний коефіцієнту підсилення тангенціальних напруг $\sigma_\tau$ на внутрішній поверхні фарфорового циліндра і може бути критерієм для вибору надійного типу ізоляторів для КЕТ.

## Висновки

1. Ізолятори типу ИОР-10-750ІІІУХЛ2 в експлуатації тріскаються з утворенням аксіально-радіальної тріщини по всій висоті, що призводить до зменшення довжини шляху витоку по поверхні ізолятора від 180 мм до 25 мм.

2. Процес, який розглянуто у П. 1 призводить до руйнування фарфорової перемички між внутрішньою арматурою струмопроводу й екрана, тому що аксиально-радіальна тріщина розкривається й утворює замість перемички відкриту поверхню довжиною товщини перемички, тобто 25 мм

3. Залишковий рівень ізоляції за умови сухої поверхні тріщини значно вищий за фазну напругу струмопроводу типу ТЗМЭП-6-3150-128У1.

4. Залишковий рівень ізоляції за умови зволоження поверхні тріщини становить 5 – 6 кВ, що менше за фазну напругу.

5. У випадку умов П. 4 горіння дуги ОЗЗ вздовж висоти перемички призводить до розтоплювання аморфного складника фарфору з утворенням склоподібного шляху (каналу).

6. Теплофізичні випробування нових ізоляторів типу ИОР-10-750ІІІУХЛ2 призвели до розтріскування всіх ізоляторів згідно з П. 1. При цьому виникають чотири тріщини, вниз опускаються дві дуже тонкі (волосяні), вони закінчуються на рівні перемички, а дві інші, шириною 0,1 – 0,18 мм – по радіусу і висоті.

7. Встановлено аналогію конструкції ИОР з товстостінними коаксіальними циліндрами, які з натягом посаджені один в інший.

8. На основі умов П. 7 побудовано математичну модель ізолятора ИОР, яка дозволила запропонувати критерій для геометричних співвідношень конструкції $\Omega \le 2$, або $k = r_1/r_2 \le 0{,}6$ з урахуванням ОДЗ $p \le \frac{|\sigma|}{2}$. Накладання на криву $\Omega = f(k)$ величин $k_1 = 0{,}6$ і $k_2 = 0{,}8$ показує, що ізолятори другого типу ИОР-10-750ІУХЛ2 не повинні тріскатися під час теплофізичних випробуваннях нових ізоляторів, що й підтверджено експериментально.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Справочник по электрическим аппаратам высокого напряжения : [под ред. В. В. Афанасьева]. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 498 с.

2. Сопротивление материалов : [под. ред. Г. С. Писаренко]. – Киев, ГИТЛ УССР, 1963. – 606 с.

3. Собчук В. С. Импульсный метод профилактических испытаний штыревых изоляторов : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.12 «Техника высоких напряжений» / В. С. Собчук. – Киев,

1983. – 16 с.

4. Собчук В. С. Координація параметрів ізоляції електрообладнання і пристроїв технічної діагностики / В. С. Собчук, В. Н. Пащенко // Вісник ВПІ, 1995, № 3, с. 41 – 43.

5. Руцкий А. И. Электрические станции и подстанции. Часть 1. Основное техническое оборудование / А. И. Руцкий. – Минск, 1984. – 394 с.

***Собчук Валерій Степанович*** – к. т. н., професор кафедри електричних станцій та систем.

***Собчук Наталья Валеріївна*** – к. т. н., доцент кафедри електричних станцій та систем.

***Слободянюк Олена Валеріївна*** – к. п. н., ст. викладач кафедри інженерної і комп'ютерної графіки.
Вінницький національний технічний університет.