

Л.А. Щебенюк, Т.Ю. Антоненць

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ В ІЗОЛЯЦІЇ ВИСОКОВОЛЬТНИХ СИЛОВИХ КАБЕЛІВ З ПОЛІМЕРНОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Розглянуто сучасний нормативний підхід до визначення втрат в ізоляції силових високовольтних кабелів. В стаціонарному режимі навантаження (100 %-ий коефіцієнт навантаження) за діючим міжнародним стандартом (IEC60287-1-1) діелектричні втрати залежать тільки від напруги і від використаного ізоляційного матеріалу. Силові високовольтні кабелі з ізоляцією зі шнитоного поліетилену (СПЕ-кабелі) мають безперечні переваги перед традиційними маслом наповненими, що зумовило їх повсюдне застосування у всіх розвинених країнах і помітне скорочення використання інших типів кабелю. Ряд суттєвих особливостей СПЕ-кабелів, які впливають на температуру в елементах конструкції кабелю, а саме: 1) більший, ніж у традиційних кабелів, значення площі перерізу жил і товщини ізоляції; 2) більша, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °C); 3) більші, ніж у традиційних кабелів, значення товщини ізоляції і напівпровідних екранів по жилі і по ізоляції; 4) суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури; 5) наявність елементів конструкції з високим питомим тепловим опором (до 50 °C·м/Вт), що суттєво змінює температуру в елементах конструкції кабелю і, відповідно втрати в цих елементах. Представлено дані щодо визначення втрат в системі ізоляції і напівпровідних екранів по жилі і по ізоляції СПЕ-кабелю на напругу 110 кВ для електрофізичних і конструктивних характеристик матеріалів системи ізоляції конкретного кабелю на основі схеми заміщення системи ізоляції. Струм в цій ізоляційній системі є комплексною величиною і значення тангенса кута її діелектричних втрат за промислової частоти визначено як відношення дійсного струму до реактивного. В роботі виконано розрахунок втрат в системі ізоляції, що складається з ізоляції і шнитоного поліетилену, екранів по жилі і по ізоляції з напівпровідного поліетилену. Робота спрямована на створення методу визначення допустимого струму цих кабелів в конкретних умовах експлуатації. Бібл. 7, рис. 2.

Ключові слова: силовий кабель, СПЕ-кабель, втрати в ізоляції, система ізоляції, тангенс кута діелектричних втрат.

Рассмотрен современный нормативный подход к определению потерь в изоляции силовых высоковольтных кабелей. В стационарном режиме нагрузки (100 % -ный коэффициент нагрузки) в соответствии с действующим международным стандартом (IEC 60287-1-1) диэлектрические потери зависят только от напряжения и от использованного изоляционного материала. Силовые высоковольтные кабели с изоляцией из шнитоного полиэтилена (СПЭ-кабели) имеют безусловные преимущества перед традиционными, что обусловило их широкое использование во всех развитых странах и заметное сокращение использования других типов кабелей. Ряд существенных особенностей СПЭ-кабелей, которые влияют на температуру в элементах конструкции кабеля и, соответственно, на потери в них как в рабочих, так и в аварийных режимах эксплуатации, а именно: 1) большие, чем у традиционных маслом наполненных кабелей, значения площади сечения жил и толщины изоляции; 2) большая, чем у традиционных маслом наполненных кабелей, допустимая температура изоляции (90 °C); 3) большие, чем у традиционных маслом наполненных кабелей, значения толщины полупроводящих экранов по жиле и по изоляции; 4) существенная зависимость теплопроводности и теплоемкости полиэтиленовой изоляции от температуры; 5) наличие элементов конструкции с высоким удельным тепловым сопротивлением (до 50 °C·м/Вт), что существенно влияет на температуру в элементах конструкции СПЭ-кабеля и, соответственно, на потери в них. Представлены данные о потерях в системе, состоящей из изоляции и полупроводящих экранов по жиле и по изоляции СПЭ-кабеля на напряжение 110 кВ для электрофизических и конструктивных характеристик материалов системы изоляции конкретного кабеля на основе схемы замещения. Ток в этой изоляционной системе является комплексной величиной, и значение тангенса угла ее диэлектрических потерь при промышленной частоте определено как отношение действительного тока к реактивному. В работе выполнен расчет потерь в системе изоляции, состоящей из изоляции из шнитоного полиэтилена, экрана по жиле и экрана по изоляции из полупроводящего полиэтилена. Работа нацелена на разработку метода оценки пропускной способности СПЭ-кабелей в конкретных условиях испытаний и эксплуатации. Библ. 7, рис. 2.

Ключевые слова: силовой кабель, СПЭ-кабель, потери в изоляции, система изоляции, тангенс угла диэлектрических потерь.

Постановка проблеми. Високовольтні СПЕ-кабелі мають ряд суттєвих особливостей, які впливають на тепловий режим як робочому, так і в аварійному режимі експлуатації:

- більші, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, значення площі перерізу жил і товщини ізоляції, що зумовлює суттєву залежність процесу нагрівання кабелю від теплоємності жили і ізоляції та від втрат в ній;

- більша, ніж у традиційних маслом наповнених кабелів, допустима температура ізоляції (90 °C), що,

по-перше, зумовлює високі значення допустимого струму [1]; по-друге, збільшує втрати в елементах конструкції кабелю, що вимагає окремого розгляду втрат в ізоляції [2];

- суттєва залежність теплопровідності і теплоємності поліетиленової ізоляції від температури (наприклад, питома теплоємність поліетилену при температурі 20 °C дорівнює 2300 Дж/кг·°C, а при 80 °C – 3750 Дж/кг·°C) та наявність елементів конструкції

з високим питомим тепловим опором (до $50\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$), що змінює тепловий режим роботи ізоляції порівняно з режимом роботи традиційних маслом наповнених кабелів.

Тому дослідження втрат в ізоляції високовольтних кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією, є необхідним для прийняття технічних рішень щодо їх пропускної і переважувальної спроможності.

Аналіз літератури. Поєднання високої робочої напруженості електричного поля (до $8\text{ кВ}/\text{мм}$ і більше) з тривалою підвищеною температурою ізоляції (до $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ і більше) зумовлюють застосування тривалих і дорогих випробувань (long-term test) [3], за якими СПЕ-кабелі піддають сотням циклів нагріву (кожний по 8 годин) з одночасною дією підвищеної напруги $1,7U$; в процесі дії циклів нагріву контролюють всі основні параметри:

- електричні (тангенс кута діелектричних втрат, рівень часткових розрядів);
- теплові (температура в елементах конструкції кабелю і на його поверхні).

В той же час пропускна спроможність силових кабелів визначається виключно розрахунком в номінальних умовах, тобто в стаціонарному режимі навантаження (100 % -ий коефіцієнт навантаження) [4]. Відповідно, номінальний струм I_n , – необмежено тривалий, за якого встановлюється максимальна температура жили при номінальних умовах оточуючого середовища. Практично застосовні розрахункові моделі для визначення I_n обов'язково включають розрахунок втрат в ізоляції високовольтних кабелів [4].

Оскільки втрати в елементах конструкції кабелю опосередковано впливають на втрати в ізоляції, а в умовах експлуатації кабель практично ніколи не працює в стаціонарному гранично допустимому режимі, то для перевірки працездатності конкретних кабелів використовують або спеціальні лабораторії [5, 6], або кабель приймають під гарантії виробника. Останнє означає необхідність дослідження у виробника втрат в ізоляції конкретних кабелів. Очевидно, що нормовані розрахунки є необхідними. Але для інноваційної продукції, яка суттєво відрізняється від традиційної, використання тільки нормованих методів є недостатнім. Наприклад, в [7] нами запропоновано метод використання універсальних і уніфікованих розрахункових моделей процесів тепло і масообміну в високовольтних кабелях з пластмасовою ізоляцією для дослідження їх пропускної спроможності шляхом інтервального оцінювання параметрів моделей. Показано, що для розрахунку пропускної спроможності силового високовольтного кабелю з пластмасовою ізоляцією необхідне спільне вирішення моделей, які описують конструктивні, електричні, теплові та економічні параметри кабелю. Наведено рішення для одножильного кабелю перерізом 625 мм^2 на напругу 220 кВ . Встановлено, що оптимальний діапазон товщини ізоляції від $9,5\text{ мм}$ до $10,5\text{ мм}$ і при подальшому зменшенні товщини ізоляції пропускна спроможність кабелю зменшується.

Мета роботи – оцінити потужність втрат в системі ізоляції СПЕ-кабелю на напругу 110 кВ в номінальному режимі навантаження за допомогою схем заміщення.

Результати досліджень. В основу розрахунків втрат в ізоляції високовольтних СПЕ-кабелів покладено аналогію процесів тепло-масообміну, зокрема процесів перенесення зарядів і процесу перенесення тепла. Відповідні моделі однакові за своєю структурою, вони включають як базові різницю потенціалів (електричних чи теплових), потік, опір, провідність. Відповідно всі інші елементи моделей, що описують той чи інший процес, є похідними від цих величин, і математичний опис того чи іншого процесу в системі диференціальних рівнянь є досить універсальним та уніфікованим [2, 3].

У циліндричних координатах (r, θ, z) , найбільш прийнятних для опису процесів тепломасообміну в кабелях, для потенціалу застосовують рівняння Пуассона, в якому, якщо потенціал φ залежить тільки від радіуса r (радіальне поле в однорідній речовині), градієнт потенціалу обернено пропорційний до радіуса:

$$-d\varphi/dr = \varphi_0/[r \cdot \ln(r_2/r_1)], \quad (1)$$

де r_1, r_2 – радіуси екіпотенціалей, між якими має місце радіальне поле в однорідній речовині, $r_1 < r_2$; $\varphi = \varphi_0$ при $r = r_1$, і $\varphi = 0$ при $r = r_2$.

Ця модель є основною розрахунковою моделлю, що використовується в кабельній техніці для опису стаціонарних процесів перенесення зарядів чи тепла через однорідну речовину в радіальному полі.

Оскільки потенціал залежить тільки від радіуса лише за умови необмежено довгого кабелю, а речовина, в якій відбувається процес перенесення, в тій чи іншій мірі є неоднорідною, то застосування моделі (1) зумовлює похибку тим меншу, чим названі вище умови ближчі до реальності. Щоб уникнути суттєвої похибки, треба обчислення виконувати для інтервалів можливих значень параметрів і порівнювати результати розрахунків із результатами, що впливають з реального досвіду.

Наприклад, при розрахунку втрат у діелектрику кабелів з поліетиленовою ізоляцією треба використати інтервал значень питомого теплового опору ізоляції, оскільки цей параметр залежить від температури [7]. Використання аналогії процесів переносу зарядів і переносу тепла для визначення розподілу напруженості поля в елементах конструкції СПЕ-кабелю, якщо процес перенесення **стаціонарний** (параметри процесу не залежать від часу) і **лінійний**, відношення відповідних рушійної різниці потенціалів (наприклад, різниця температур τ, K) до інтенсивності потоку (для теплового потоку $P, \text{Дж}/\text{с}$) є сталим. Тоді для потоку через будь-який однорідний елемент конструкції кабелю:

$$\tau = P \cdot S, \quad (2)$$

де S – опір елемента конструкції кабелю.

Якщо потік тепловий і радіальний, то тепловий опір ізоляції визначається **на одиницю довжини кабелю** формулою :

$$S_i = \sigma_i \ln(r_2/r_1)/2\pi, \quad (3)$$

де r_1, r_2 – радіуси еквіпотенціалей радіального поля відповідно по жилі і по ізоляції; σ_i – питомий тепловий опір ізоляції.

Система ізоляції СПЕ-кабелю складається з послідовно розташованих шарів різних матеріалів: напівпровідного екрану по жилі, ізоляції і напівпровідного екрану по ізоляції. Тому для розрахунку процесу перенесення зарядів при постійному струмі в такій системі необхідно врахувати різні значення питомого електричного опору всіх трьох елементів.

Напівпровідні екрани по жилі і по ізоляції складаються з композиційного матеріалу – зшитого поліетилену, наповненого ацетиленовою сажею. Такий матеріал за структурою і характеристиками можна розглядати як неідеальний діелектрик, що проводить електричний струм. Для орієнтовного оцінювання потужності розсіювання енергії в напівпровідних екранах конкретних конструкцій кабелів можна використати різні схеми заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції». Наприклад, відому паралельну схему заміщення для кожного з елементів системи, наведену на рис. 1.

Якщо параметри схеми заміщення C_1, C_2, C_3 і R_1, R_2, R_3 визначити за відомими формулами для радіального електричного поля:

$$C = 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \ln(r_2/r_1), \quad (4)$$

де ε_0 – електрична константа, ε – відносна діелектрична проникність ізоляції; $\varepsilon_0 = 1/\mu_0 c_0^2 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м; $c_0 = 2,99 \dots \times 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнітна константа;

$$R = (2\pi \cdot \gamma)^{-1} \cdot \ln(r_2/r_1), \quad (5)$$

де γ – питома електропровідність матеріалу елемента, то відповідні комплексні опори цих елементів визначаються спільною формулою (6).

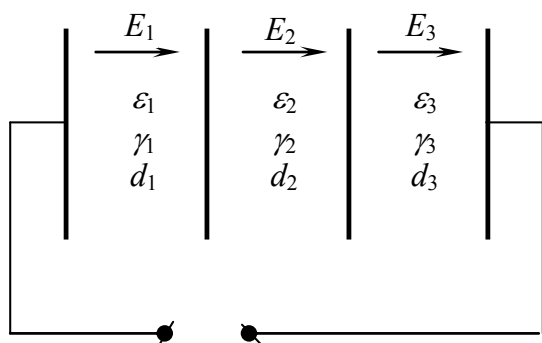


Рис. 1. Схема системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції»: $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – відносні діелектричні проникності матеріалу елементів; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ – питомі електропровідності матеріалу елементів; d_1, d_2, d_3 – товщини елементів системи

Комплексні опори елементів системи ізоляції:

$$Z = -jX_c \cdot R / (R - jX_c), \quad (6)$$

де R, X_c – активний і реактивний опір відповідного елемента системи, $X_c = (\omega C)^{-1} = (2\pi f C)^{-1}$; f – частота; C – ємність елемента системи ізоляції.

В (6) замість Z, C, R підставлено відповідні значення для напівпровідного екрану по жилі (Z_1, C_1, R_1),

ізоляції (Z_2, C_2, R_2), напівпровідного екрану по ізоляції (Z_3, C_3, R_3). Струм, який протікає через ізоляцію і напівпровідні екрани кабелю визначається фазною напругою кабелю U і сумою комплексних опорів елементів системи ізоляції кабелю:

$$I = U / (Z_1 + Z_2 + Z_3). \quad (7)$$

Напруга на елементах системи і активні втрати в них визначено формулами:

$$U_1 = I \cdot Z_1; \quad P_1 = U_1 \cdot [Re(I) - jIm(I)]; \quad (8)$$

$$U_2 = I \cdot Z_2; \quad P_2 = U_2 \cdot [Re(I) - jIm(I)]; \quad (9)$$

$$U_3 = I \cdot Z_3; \quad P_3 = U_3 \cdot [Re(I) - jIm(I)]. \quad (10)$$

Втрати в системі ізоляції визначено формулою:

$$P = U \cdot [Re(I) - jIm(I)]. \quad (11)$$

Таким чином, втрати в системі ізоляції P залежать від напруги, пов'язані з електрофізичними характеристиками використаного матеріалу (з відносною діелектричною проникністю ε , питомою електропровідністю γ) і з геометричними розмірами елементів системи ізоляції.

З іншого боку практично застосовною і рекомендованою відповідним міжнародним стандартом [2] формулою, за якою визначають втрати P_d в діелектрику силових високовольтних кабелів, є співвідношення, що включає значення тангенса кута діелектричних втрат $tg\delta$:

$$P_d = \omega C U^2 tg\delta, \quad (12)$$

де ω – кругова частота, $\omega = 2\pi f$; C – ємність на одиницю довжини; U – фазна напруга.

Значення тангенса кута діелектричних втрат визначають експериментально. Для зшитого поліетилену високовольтних кабелів в [2] наведено значення $tg\delta = 0,0015$. Потужність втрат P_d у діелектрику кабелю АПвЕВнгд 1×500 на 110 кВ за (12) становить $P_d = 0,33$ Вт/м.

Значення потужності втрат в системі ізоляції розраховане за формулою (11) для цього кабелю $P = 0,34$ Вт/м при питомій електропровідності діелектрика 10^{-11} См/м і питомій електропровідності матеріалу напівпровідних екранів в діапазоні від 10^{-1} См/м до 10^1 См/м. Очевидно, що застосування більш складних схем заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції» кабелю може забезпечити більшу точність розрахунків. Але відповідність значень P_d і P є достатньою для вирішення за допомогою даної схеми заміщення поставленої задачі, а саме, – орієнтовної оцінки втрат у напівпровідних екранах високовольтного кабелю порівняно із втратами в його ізоляції.

За допомогою (7) тангенс кута діелектричних втрат системи ізоляції може бути визначено як відношення дійсного струму до реактивного:

$$tg\delta = Re(I)/Im(I). \quad (13)$$

На рис. 2 наведено ілюстрацію результатів розрахунків за (13) у вигляді залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції СПЕ-кабелю на напругу 110 кВ від питомої електропровідності матеріалу екрана. Ці дані, по-перше, свідчать про те, що зменшення питомої електропровідності матеріалу екрана зумовлює збільшення втрат в екрані, але в достатньо широкому діапазоні значень питомої елект-

ропровідності матеріалу екрана, до якого належать реальні значення у відповідних конструкціях кабелю, а саме від 10^{-3} См/м до 10^2 См/м, потужністю втрат у напівпровідних екранах можна знехтувати у порівнянні з потужністю втрат в ізоляції.

По-друге, максимум на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції СПЕ-кабелю на напругу 110 кВ від питомої електропровідності матеріалу екрана γ_e за будь-яких значень відносної діелектричної проникності матеріалу екрана знаходиться далеко від реальних значень γ_e (щонайменше на п'ять порядків), тобто цей максимум не має практичного значення.

По-третє, за реальних значень відносної діелектричної проникності матеріалу напівпровідних екранів в системі ізоляції високовольтних СПЕ-кабелів (не менше 100 при частоті 50 Гц), максимальне значення $tg\delta$ наближається до нормативного ($tg\delta = 0,0015$). Це свідчить про прийнятність схеми заміщення у вигляді послідовного з'єднання комплексних опорів трьох елементів системи ізоляції. Всі елементи представлені паралельним з'єднанням активного і реактивного опору.

Максимум на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції СПЕ-кабелю має місце за умови рівності абсолютних значень активного і реактивного опору напівпровідних екранів:

$$Re(Z_1) = -Im(Z_1); \quad (14)$$

$$Re(Z_3) = -Im(Z_3), \quad (15)$$

що свідчить про переважно ємнісний характер струму через напівпровідний екран при реальних значеннях електрофізичних характеристик матеріалу напівпровідного екрану.

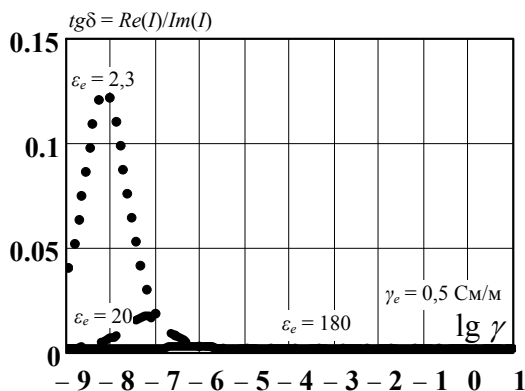


Рис. 2. Залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції СПЕ-кабелю на напругу 110 кВ від питомої електропровідності матеріалу екрана за різних значень відносної діелектричної проникності матеріалу екрана ϵ_e (наведені результати одержані для кабелю з товщиною ізоляції 16 мм)

Висновки

1. За допомогою аналізу схеми заміщення визначено потужність втрат в системі ізоляції СПЕ-кабелю на напругу 110 кВ в номінальному режимі навантаження.

2. Виходячи з того, що значення $tg\delta$ зшитого поліетилену за стандартами ІЕС становить 0,0015, визначено, що потужність втрат в системі ізоляції кабелю АПвЕВнгд 1×500 на 110 кВ дорівнює 0,33 Вт/м. Зна-

чення потужності втрат в системі ізоляції, розраховане за схемою заміщення для цього ж кабелю, становить 0,34 Вт/м при питомій електропровідності діелектрика 10^{-11} См/м та питомій електропровідності матеріалу напівпровідних екранів в діапазоні від 10^{-1} См/м до 10^1 См/м.

3. Струм, який тече через ізоляцію і напівпровідні екрани кабелю, визначається фазною напругою і сумою комплексних опорів цих елементів конструкції кабелю. Критерієм коректності результатів розрахунків за схемою заміщення є фактичний збіг цих результатів з даними міжнародних нормативних документів. Відтак можна зробити висновок, що розрахунки за прийнятою схемою заміщення можна застосовувати для орієнтовної оцінки необхідності врахування втрат у напівпровідних екранах високовольтного кабелю порівняно із втратами в його ізоляції.

4. В достатньо широкому діапазоні значень питомої електропровідності матеріалу екрана, до якого належать реальні значення у відповідних конструкціях кабелю, а саме від 10^{-3} См/м до 10^2 См/м, потужністю втрат у напівпровідних екранах можна знехтувати у порівнянні з потужністю втрат в ізоляції.

5. Зменшення питомої електропровідності матеріалу екрана зумовлює збільшення втрат в системі ізоляції кабелю. Відповідно на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції високовольтного СПЕ-кабелю спостерігається максимум. Значення питомої електропровідності матеріалу екрана γ_e , за якого є максимум втрат:

- знаходиться далеко від реальних значень γ_e (щонайменше на п'ять порядків), тобто не має практичного значення;

- за реальних значень відносної діелектричної проникності матеріалу напівпровідних екранів в системі ізоляції високовольтних СПЕ-кабелів (не менше 100), максимальне значення $tg\delta$ наближається до нормативного ($tg\delta = 0,0015$);

- максимум на залежності тангенса кута діелектричних втрат системи ізоляції СПЕ-кабелю має місце за умови рівності абсолютних значень активного і реактивного опору напівпровідних екранів, що є властивістю прийнятої схеми заміщення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карпушенко В.П., Щебенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Х.: Регіон-інформ, 2000. – 376 с.
2. ІЕС 60287-1-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General. – 65 p.
3. СИГРЭ № 303 «Revision of qualification procedures for high voltage and extra high voltage AC extruded underground cable systems», 2006.
4. ІЕС 60287-2-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. – 84 p.
5. ІЕС 62067: Ed. 1.1b: 2006. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV

($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements. – 90 p.

6. HD 632 S1: 1998. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ($U_m = 42$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) Part 2: Additional test methods.

7. Щебенюк Л.А., Антоненко Т.Ю. До визначення пропускної спроможності високовольтних силових кабелів з пластмасовою ізоляцією // Вісник НТУ «ХПІ». – 2011. – №3. – С. 152-157.

REFERENCES

1. Karpushenko V.P., Shchebeniuk L.A., Antonets Yu.O., Naumenko O.A. *Sylovi kabeli nyz'koyi ta seredn'oyi napruhy. Konstruyuvannya, tekhnolohiya, yakist'* [Power cables of low and medium voltage. Designing, technology, quality]. Kharkiv, Region-inform Publ., 2000. 376 p. (Ukr).

2. IEC 60287-1-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses – General. – 65 p.

3. SIGRE № 303 «Revision of qualification procedures for high voltage and extra high voltage AC extruded underground cable systems», 2006.

4. IEC 60287-2-1: 2001. Electric cables. Calculation of the current rating. Part 2-1: Thermal resistance – Calculation of thermal resistance. – 84 p.

5. IEC 62067: Ed. 1.1b: 2006. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 150 kV ($U_m = 170$ kV) up to 500 kV ($U_m = 550$ kV) – Test methods and requirements. – 90 p.

6. HD 632 S1: 1998. Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 36 kV ($U_m = 42$ kV) up to 150 kV ($U_m = 170$ kV) Part 2: Additional test methods.

7. Shchebeniuk L.A., Antonets T.Yu. To determine the capacity of high-voltage power cables with plastic insulation. *Visnyk NTU «KhPI» – Bulletin of NTU «KhPI»*, 2011, no.3, pp. 152-157. (Ukr).

Щебенюк Леся Артемівна¹, к.т.н., проф.,

Антоненко Тарас Юрійович¹, аспірант,

¹Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 21, e-mail: agurin@kpi.kharkov.ua

L.A. Shchebeniuk¹, T.Yu. Antonets¹

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», 21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Investigation of losses in insulation of high-voltage power cables with XLPE insulation.

In this paper the authors calculate the losses in insulation system cable with XLPE-polyethylene as a solid dielectric insulation and with semiconductor polyethylene used as a conductor screen and an insulation screen. The paper is devoted to the investigation of losses in the insulation system of high-voltage XLPE-cables. The line of XLPE-cables in group running horizontally, provided that the cables are of equal diameter and emit equal losses. It is limited to the following: the air flow around the cables may be necessary restricted by proximity to next cables. The dielectric losses are voltage depended and related to the insulation system materials being used. All current in this insulation system are complex quantities containing both real ($Re(I)$) and imaginary ($Im(I)$) parts. Values of the loss factor of the insulation system at power frequency $tg\delta$ are given as $tg\delta = Re(I)/Im(I)$. It was proposed the quantities criterion of the loss factor of the insulation system to high voltage XLPE-cables. The work is devoted to creation of a method for calculation of the current rating of high-voltage cables in conditions function. References 7, figures 2.

Key words: power cable, XLPE-cable, insulation losses, insulation system, loss factor.

Надійшла (received) 05.05.2016