

Г.В. Безпрозваних, М.В. Гринишина

Ефективні параметри діелектричної абсорбції полімерної ізоляції з напівпровідними покриттями силових високовольтних кабелів

На підставі послідовно-паралельної нелінійної схеми заміщення напівпровідних покриттів та лінійної електричної полімерної ізоляції у широкому діапазоні частоти визначено ефективні параметри діелектричної абсорбції силових високовольтних кабелів одножильного виконання. За результатами моделювання, з урахуванням дисперсії електрофізичних характеристик напівпровідних покриттів, доведено, що ефективна електрична ємність тришарової композитної ізоляційної системи визначається ємністю полімерної ізоляції. Встановлено характер частотних залежностей та максимальні значення ефективного тангенсу кута діелектричних втрат в залежності від співвідношення між питомою електропровідністю на постійному і змінному струмі та товщиною напівпровідних екранів. Отримані співвідношення є підставою для розроблення практичних рекомендацій щодо обґрунтування товщини та електрофізичних параметрів напівпровідних покриттів для зменшення їх впливу на ефективний тангенс кута діелектричних втрат тришарової композитної електроізоляційної системи силових високовольтних кабелів. Бібл. 23, рис. 6.

Ключові слова: напівпровідні покриття, полімерна ізоляція, силовий високовольтний кабель, нелінійна схема заміщення, комплексна діелектрична проникність, активна питома провідність, ефективна електрична ємність, ефективний тангенс кута діелектричних втрат.

Вступ. Електропостачання 15 млн. одиниць різних груп споживачів в Україні здійснюється завдяки мережам середньої напруги, довжина яких становить понад 92 % від мереж усіх класів [1]. Необхідність заміни близько 140 тис. км електричних мереж обумовлює впровадження силових високовольтних кабелів з полімерною ізоляцією на основі зшитого поліетилену, високопродуктивних термопластичних еластомерів [2, 3]. З впровадженням сучасних кабельних високовольтних систем з'являється, по-перше, можливість широкого використання розгалуженої розподіленої кабельної мережі для передачі даних значного об'єму [4, 5]. По-друге, – проведення діагностики ізоляції для виявлення ознак її деградації, які в найбільшій мірі проявляються у високочастотному діапазоні [6-12].

Конструктивною особливістю силових високовольтних кабелів з полімерною ізоляцією є наявність напівпровідних екранів по струмопровідній жилі і ізоляції для вирівнювання електричного поля на поверхні жили і зменшення електричного поля на поверхні ізоляції [13, 14]. Напівпровідні екрани наносяться одночасно з екструзуванням полімерної ізоляції. Така технологія забезпечує високу адгезію між екранами і ізоляцією, зменшує ймовірність утворення газових включень в ізоляції і на границі з напівпровідними екранами.

Зазвичай застосовуються напівпровідні прошарки з композитного полімерного матеріалу додаванням технічного вуглецю в якості наповнювача в решітку полімеру. Такий матеріал забезпечує поступове зміння питомої електричної провідності та діелектричної проникності при переході електричного поля від струмопровідної жили до електричної ізоляції [14].

Введення домішок ацетиленової сажі, питомий опір частинок яких знаходиться в діапазоні від 0,0001 до 100 Ом·м, призводить до симетричного радіального профілю електричного поля в силовому кабелі коаксіальної конструкції, що запобігає збільшенню локального поля. Локальне електричне поле є головним стимулом для утворення та розростання водяних трингів, часткових розрядів і навіть механічних розривів силових кабелів [15].

Наявність напівпровідних екранів призводить до появи додаткових діелектричних втрат в порівнянні з полімерною ізоляцією без екранів. Втрати в кабелях за умови наявності напівпровідних покриттів залежать від діелектричної проникності та питомого опору композитного полімерного матеріалу, які є частотно-залежними параметрами [16, 17].

У статті використано поняття діелектричної абсорбції, що пов'язується з втратами енергії в поліетиленовій ізоляції, які в свою чергу, визначаються електричною ємністю та тангенсом кута діелектричних втрат. У загальному випадку термін «діелектрична абсорбція» пояснюється, наприклад, в роботах [18, 19] і використовується в дослідженні фізичних механізмів поглинання електромагнітної енергії, створення залишкового заряду, ін., а також в теорії електромагнітних хвиль [20], до того ж у статті [19] діелектрична абсорбція та втрати розділяються.

Аналіз літературних джерел. Електрофізичні характеристики напівпровідних покриттів істотно впливають на розподіл електричного поля і втрати в кабелях на робочій частоті 50 Гц [13]. В [21] авторами отримано ефективний тангенс кута діелектричних втрат тришарової композитної ізоляції без урахування залежності від частоти питомої провідності і діелектричної проникності та товщини напівпровідних покриттів.

Вплив напівпровідних покриттів з урахуванням втрат на поляризацію в діапазоні частоти 200 Гц – 20 кГц враховано в [16] на підставі паралельної схеми заміщення у вигляді електричної ємності та опору кожного з компонентів тришарової композитної системи, включених послідовно.

Із застосуванням схеми заміщення поліетиленової зшитої ізоляції з трьома релаксаційними RC-колами в [22] доведено виникнення релаксаційних максимумів на частотній залежності тангенсу кута діелектричних втрат в полімерній ізоляції з напівпровідними екранами силових кабелів середньої напруги.

В роботі [17] експериментально показано, що діелектричні втрати в напівпровідних екранах стають

домінуючими в силових високовольтних кабелях з полімерною ізоляцією на частоті більше 10 МГц.

Невисвітленими та вкрай актуальними залишаються питання щодо визначення впливу товщини та електрофізичних характеристик напівпровідних покриттів на ефективні електричну ємність і тангенс кута діелектричних втрат силових високовольтних кабелів в широкому діапазоні частоти.

Метою статті є визначення ефективної електричної ємності та тангенсу кута діелектричних втрат силових високовольтних кабелів з полімерною ізоляцією у широкому діапазоні частоти з урахуванням дисперсії електрофізичних характеристик та товщини напівпровідних екранів.

Дисперсія електрофізичних характеристик матеріалів напівпровідних покриттів. Полімерна неполярна ізоляція силових кабелів (зшитий поліетилен, термоеластопласти) характеризується високими діелектричними властивостями у широкому діапазоні частоти. Так, для зшитої поліетиленової ізоляції питома об'ємна провідність γ дорівнює ($10^{-13} - 10^{-14}$) См/м; діелектрична проникність – на рівні 2,5 (статичне значення) та, практично, слабо залежать від частоти в області слабких електричних полів, що обумовлює несуттєве значення коефіцієнта діелектричних втрат $\varepsilon''(\omega)$ та, відповідно, тангенсу кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta$ полімерної ізоляції. Дисперсія діелектричної проникності для зшитого поліетилену становить $2,5 - 2,38 = 0,12$ в спектрі частоти до 100 МГц [3].

Напівпровідні покриття характеризуються високими значеннями питомої об'ємної провідності, діелектричної проникності та коефіцієнту діелектричних втрат, що обумовлено морфологічними та структурними особливостями полімерного матеріалу.

Умовно композитний полімерний матеріал з домішками сажі складається з трьох фаз: ізоляційної (рис. 1, область I), перколяційної (рис. 1, область II) та провідної (рис. 1, область III) [23].

В області низької частоти тунельний ефект між частинками сажі (вуглецю) вважається основним механізмом, що обумовлює слабку залежність питомої електричної провідності напівпровідника від частоти.

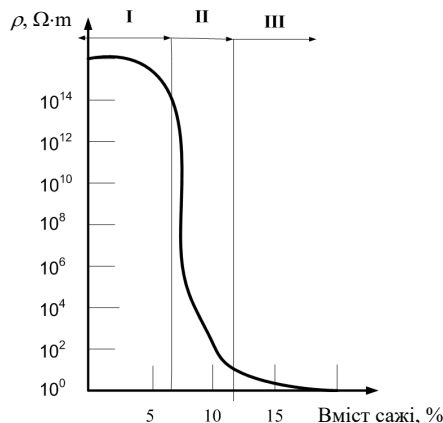


Рис. 1. Вплив вмісту сажі на питому провідність напівпровідного покриття силових кабелів

В такому разі питома об'ємна провідність γ мало відрізняється від питомої об'ємної провідності γ_{dc} на постійному струмі. Тангенс кута діелектричних втрат

$\text{tg} \delta_e$, обумовлений електропровідністю, зменшується обернено пропорційно круговій частоті ω та дійсній частині $\varepsilon'(\omega)$ комплексної діелектричної проникності ε^* матеріалу напівпровідного покриття (рис. 2,а) [21]

$$\text{tg} \delta_e = \frac{\gamma_{dc}}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega)}, \quad (1)$$

де $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична стала.

Загальний тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg} \delta_{semi}$ напівпровідного покриття враховує втрати на електропровідність $\text{tg} \delta_e$ та поляризацію $\text{tg} \delta_{pol}$ [16, 21]

$$\text{tg} \delta_{semi} = \text{tg} \delta_e + \text{tg} \delta_{pol} = \frac{\gamma_{dc}}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega)} + \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)}, \quad (2)$$

де $\varepsilon''(\omega)$ – залежна від частоти уявна частина комплексної діелектричної проникності (рис. 2,б).

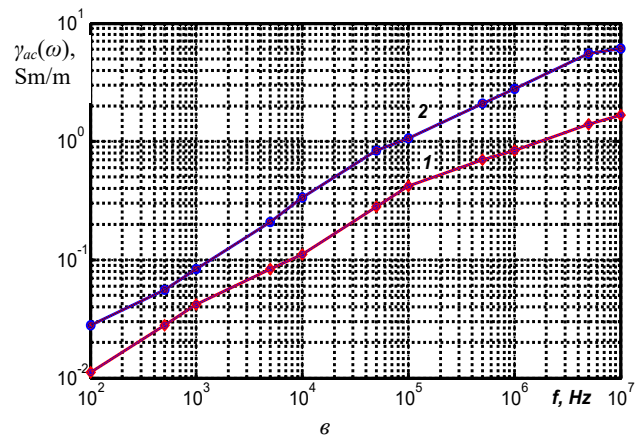
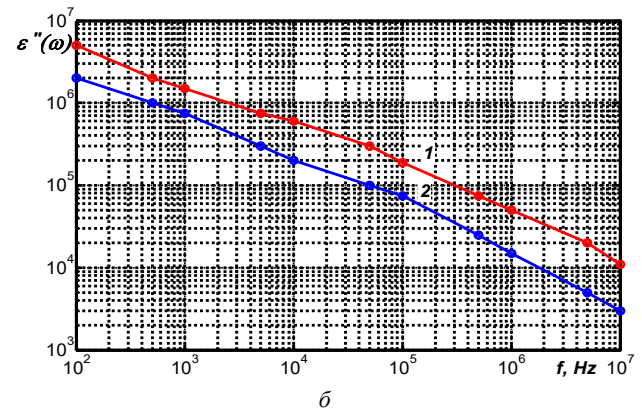
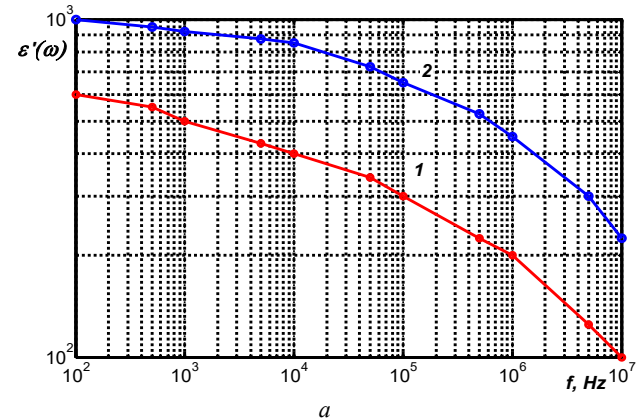


Рис. 2. Типові частотні залежності електрофізичних характеристик покриттів по жилі (крива 1) та ізоляції (крива 2) силових високовольтних кабелів за умови лінійної вольт-амперної характеристики напівпровідних матеріалів

Враховуючи, що активна питома об'ємна провідність $\gamma_{ac}(\omega)$ на змінній напрузі кругової частоти ω визначається уявною частиною $\varepsilon'(\omega)$ комплексної діелектричної проникності (рис. 2,б)

$$\gamma_{ac}(\omega) = \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon''(\omega), \quad (3)$$

частотна залежність тангенсу кута діелектричних втрат напівпровідних покриттів визначається як

$$\operatorname{tg} \delta_{semi}(\omega) = \frac{\gamma_{semi}(\omega)}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega)}, \quad (4)$$

де $\gamma_{semi}(\omega) = \gamma_{dc} + \gamma_{ac}(\omega)$.

За умови $\gamma_{ac}(\omega) \gg \gamma_{dc}$, що справедливо для сучасних композицій напівпровідних екранів силових високовольтних кабелів, тангенс кута діелектричних втрат напівпровідних покриттів визначається на підставі (5) [16]

$$\operatorname{tg} \delta_{semi}(\omega) = \frac{\gamma_{ac}(\omega)}{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'(\omega)}. \quad (5)$$

Ефективні параметри діелектричної абсорбції полімерної ізоляції з напівпровідними покриттями. Послідовно-паралельна схема заміщення тришарової композитної ізоляційної системи з урахуванням дисперсії електрофізичних характеристик напівпровідних покриттів силових високовольтних кабелів представлена на рис. 3,а.

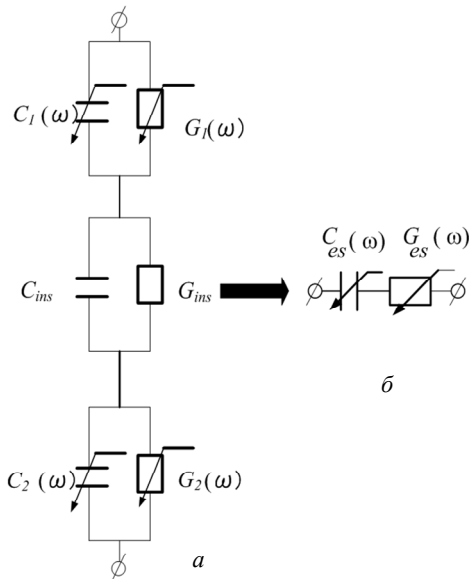


Рис. 3. Послідовно-паралельна (а) та еквівалентна послідовна (б) нелінійні схеми заміщення електричної ізоляції та напівпровідних покриттів силових високовольтних кабелів

На рис. 3,а позначено: C_{ins} , $C_1(\omega)$, $C_2(\omega)$ – ємності та G_{ins} , $G_1(\omega)$, $G_2(\omega)$ – активні провідності прошарків

$$C_{es}(\omega) = \frac{C_{1s} \cdot C_{inss} \cdot C_{2s}}{C_{1s} \cdot C_{inss} + C_{1s} \cdot C_{2s} + C_{inss} \cdot C_{2s}} = \frac{2 \pi \cdot A_1 \cdot A_{ins} \cdot A_2 \cdot D_1 \cdot D_{ins} \cdot D_2}{\omega^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot [A_1 \cdot A_{ins} \cdot \varepsilon'_2(\omega) \cdot \Delta_2 \cdot D_1 \cdot D_{ins} + A_1 \cdot A_2 \cdot \varepsilon'_{ins} \cdot \Delta_{ins} \cdot D_1 \cdot D_2 + A_{ins} \cdot A_2 \cdot \varepsilon'_1(\omega) \cdot \Delta_1 \cdot D_{ins} \cdot D_2]}, \quad (11)$$

та тангенс кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta_{es}(\omega)$

полімерної ізоляції та напівпровідних покриттів по струмопровідній жилі та ізоляції за паралельною схемою заміщення відповідно

$$C_1(\omega) = \frac{\varepsilon'_1(\omega) \cdot \varepsilon_0 \cdot S_1}{\Delta_1}; \quad C_{ins} = \frac{\varepsilon'_{ins} \cdot \varepsilon_0 \cdot S_{ins}}{\Delta_{ins}}; \quad (6)$$

$$C_2(\omega) = \frac{\varepsilon'_2(\omega) \cdot \varepsilon_0 \cdot S_2}{\Delta_2};$$

$$G_1(\omega) = \gamma_{semi1}(\omega) \cdot \frac{S_1}{\Delta_1}; \quad G_{ins} = \gamma_{ins} \cdot \frac{S_{ins}}{\Delta_{ins}}; \quad (7)$$

$$G_2(\omega) = \gamma_{semi2}(\omega) \cdot \frac{S_2}{\Delta_2};$$

де ε'_{ins} , $\varepsilon'_1(\omega)$, $\varepsilon'_2(\omega)$ – дійсні частини комплексної діелектричної проникності ізоляції, напівпровідних покриттів по жилі та ізоляції; γ_{ins} – об'ємна питома провідність ізоляції та γ_{semi1} , γ_{semi2} – загальні об'ємні питомі провідності з урахуванням частотної залежності активної провідності напівпровідних покриттів по жилі та ізоляції; S_{ins} , S_1 , S_2 – перерізи та Δ_{ins} , Δ_1 , Δ_2 – товщини ізоляції та напівпровідних покриттів по жилі і ізоляції відповідно.

Перехід від паралельної до послідовної схеми заміщення дозволяє визначити тангенс кута діелектричних втрат, електричну ємність та активну провідність кожного з компонентів з урахуванням (5) – (7):

– для напівпровідного покриття по жилі:

$$\operatorname{tg} \delta_1(\omega) = \frac{G_1(\omega)}{\omega \cdot C_1(\omega)};$$

$$C_{1s}(\omega) = C_1(\omega) \cdot (1 + \operatorname{tg} \delta_1^2(\omega)); \quad (8)$$

$$G_{1s}(\omega) = \frac{\omega \cdot C_{1s}(\omega)}{\operatorname{tg} \delta_1(\omega)};$$

– для ізоляції кабелю:

$$C_{inss} = C_{ins} \cdot (1 + \operatorname{tg} \delta_{ins}^2); \quad (9)$$

$$G_{inss} = \frac{\omega \cdot C_{inss}}{\operatorname{tg} \delta_{ins}};$$

– для напівпровідного покриття по ізоляції:

$$\operatorname{tg} \delta_2(\omega) = \frac{G_2(\omega)}{\omega \cdot C_2(\omega)};$$

$$C_{2s}(\omega) = C_2(\omega) \cdot (1 + \operatorname{tg} \delta_2^2(\omega)); \quad (10)$$

$$G_{2s}(\omega) = \frac{\omega \cdot C_{2s}(\omega)}{\operatorname{tg} \delta_2(\omega)};$$

та визначити ефективні електричні параметри (рис. 3,б) тришарової композиційної системи за умови заданих частотних електрофізичних характеристик та товщин напівпровідних покриттів та ізоляції:

– електричну ємність $C_{es}(\omega)$:

$$\operatorname{tg} \delta_{es}(\omega) = \frac{\omega \cdot C_{es}(\omega)}{G_{es}(\omega)} = \frac{\omega \cdot C_{es}(\omega) \cdot (G_{1s}(\omega) \cdot G_{inss} + G_{1s}(\omega) \cdot G_{2s}(\omega) + G_{inss} \cdot G_{2s}(\omega))}{G_{1s}(\omega) \cdot G_{inss} \cdot G_{2s}(\omega)} =$$

$$\frac{\omega \cdot \varepsilon_0 \cdot D_1 \cdot D_{ins} \cdot D_2 \cdot \left[A_1 \cdot A_{ins} \cdot \frac{\varepsilon_2''(\omega)}{\gamma_{semi2}(\omega)} \cdot \frac{\Delta_2}{D_2} + A_1 \cdot A_2 \cdot \frac{\varepsilon_{ins}''}{\gamma_{ins}} \cdot \frac{\Delta_{ins}}{D_{ins}} + A_{ins} \cdot A_2 \cdot \frac{\varepsilon_1''(\omega)}{\gamma_{semi1}(\omega)} \cdot \frac{\Delta_1}{D_1} \right]}{\omega^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \left[A_1 \cdot A_{ins} \cdot \varepsilon_2'(\omega) \cdot \Delta_2 \cdot D_1 \cdot D_{ins} + A_1 \cdot A_2 \cdot \varepsilon_{ins}' \cdot \Delta_{ins} \cdot D_1 \cdot D_2 + A_{ins} \cdot A_2 \cdot \varepsilon_1'(\omega) \cdot \Delta_1 \cdot D_{ins} \cdot D_2 \right]}, \quad (12)$$

де

$$A_1 = (\omega^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot \varepsilon_1'(\omega) + \gamma_{semi1}^2(\omega)),$$

$$A_{ins} = (\omega^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot \varepsilon_{ins}' + \gamma_{ins}^2),$$

$$A_2 = (\omega^2 \cdot \varepsilon_0^2 \cdot \varepsilon_2'(\omega) + \gamma_{semi2}^2(\omega))$$

– розмірні коефіцієнти (См²/м²), які враховують частотні залежності електрофізичних характеристик напівпровідних екранів та полімерної ізоляції;

$$D_1 = (r_g + \Delta_1 / 2),$$

$$D_{ins} = (r_g + \Delta_1 + \Delta_{ins} / 2),$$

$$D_2 = (r_g + \Delta_1 + \Delta_{ins} + \Delta_2 / 2)$$

– геометричні фактори, залежні від радіуса жили r_g , товщини напівпровідного покриття по жилі Δ_1 , товщини ізоляції Δ_{ins} і товщини напівпровідного покриття по ізоляції Δ_2 відповідно.

Частотні залежності ефективних параметрів діелектричної абсорбції тришарової композитної системи силових кабелів. На рис. 4 представлено модельні частотні залежності ефективної ємності (рис. 4,а) та ефективного тангенсу кута діелектричних втрат (рис. 4,б), визначені на підставі (11) і (12), силового одножильного кабелю з перерізом струмопровідної жили 95 мм² напруги 35 кВ. Товщина зшитий поліетиленової ізоляції дорівнює 7 мм. Значення тангенсу кута діелектричних втрат поліетиленової ізоляції становить $\operatorname{tg} \delta_{ins} = 1 \cdot 10^{-4}$ на частоті 50 Гц та змінюється обернено пропорційно частоті відповідно до (1): визначальними є втрати на електропровідність.

Криві 1, 1' та 2 відповідають складовим електричної ємності: 1 та 1' – напівпровідному екрану по струмопровідній жилі, товщина котрого дорівнює 0,8 та 1,6 мм відповідно; крива 2 – напівпровідному екрану по зшитий поліетиленовій ізоляції товщиною 0,6 мм, крива 3 – власне ефективної ємності тришарової композитної системи (рис. 4,а). Об'ємні питомі провідності на постійному струмі напівпровідних покриттів по жилі та ізоляції дорівнюють $\gamma_{dc1} = 10^{-2}$ См/м, $\gamma_{dc2} = 1$ См/м відповідно. Поліетиленової ізоляції – $\gamma_{ins} = 10^{-13}$ См/м. Активні питомі об'ємні провідності напівпровідних екранів $\gamma_{ac}(\omega)$ на змінній напрузі визначено на підставі (3) з урахуванням частотної залежності компонентів, представлених на рис. 2,в.

Крива 4 – значення ємності ізоляції, визначеної за (13) [15]

$$C_{ins} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon_{ins}' \cdot \varepsilon_0}{\log(D_2 / D_1)}, \quad \Phi/\text{м}. \quad (13)$$

Результати моделювання доводять: значення ефективної ємності тришарової ізоляції (крива 3, рис. 4,а), визначеної на підставі (11), практично, не відрізняються від значень, отриманих на основі (13) (крива 4, рис. 4,а). Ефективна ємність кабелю з напівпровідними екранами визначається діелектричною проникніс-

тю самої ізоляції та товщиною компонентів: вплив напівпровідних екранів несуттєво проявляється у високочастотному діапазоні (див. рис. 4,а).

Ефективний тангенс кута діелектричних втрат тришарової композиції суттєво залежить, як від електрофізичних властивостей матеріалів напівпровідних екранів, так і їх товщині навіть за умови однакових електрофізичних характеристик (порівняйте криві 1 та 1', рис. 4,б). Збільшення товщини напівпровідного екрану по струмопровідній жилі в 2 рази призводить до зростання ефективного тангенсу кута діелектричних втрат в 2 рази з проявом характерного дипольного максимуму на частоті 50 кГц.

Варіювання електрофізичних властивостей та товщини напівпровідних екранів по жилі та зшитий поліетиленовій ізоляції силового кабелю напруги 35 кВ призводить до різного характеру частотних залежностей ефективного тангенсу кута діелектричних втрат (криві 1–5, рис. 5,а). Ефективний тангенс кута діелектричних втрат тришарової композитної системи в (1–7) разів перевищує тангенс кута діелектричних втрат власне полімерної ізоляції $\operatorname{tg} \delta_{ins}$ для частоти 50 Гц (порівняйте криві 1–5, рис. 5,б) у широкому діапазоні частоти, що обумовлено впливом активної питомої провідності напівпровідних покриттів (див. рис. 2,в).

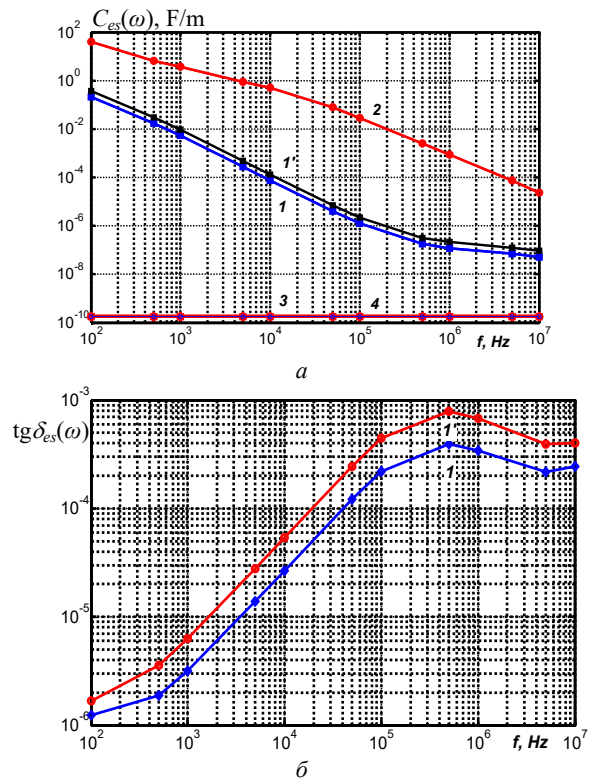


Рис. 4. Частотні залежності еквівалентних параметрів діелектричної абсорбції силового високовольтного кабелю з урахуванням дисперсії електрофізичних характеристик напівпровідних екранів

На рис. 5а,б криві 1 – 5 відповідають модельним залежностям, крива 6 (рис. 5,а) – експериментальній для зразка силового одножильного кабелю з поліетиленовою ізоляцією (товщина ізоляції 7 мм) на напругу 35 кВ, який довгий час знаходився в незахищеному від вологи стані – природна зволоженість (в конструкції кабелю відсутні водоблокуючі стрічки). Діелектричні параметри виміряне цифровим вимірювачем ємності і тангенсу кута діелектричних втрат RLC Meter DE-5000 в діапазоні частоти 100 Гц – 100 кГц.

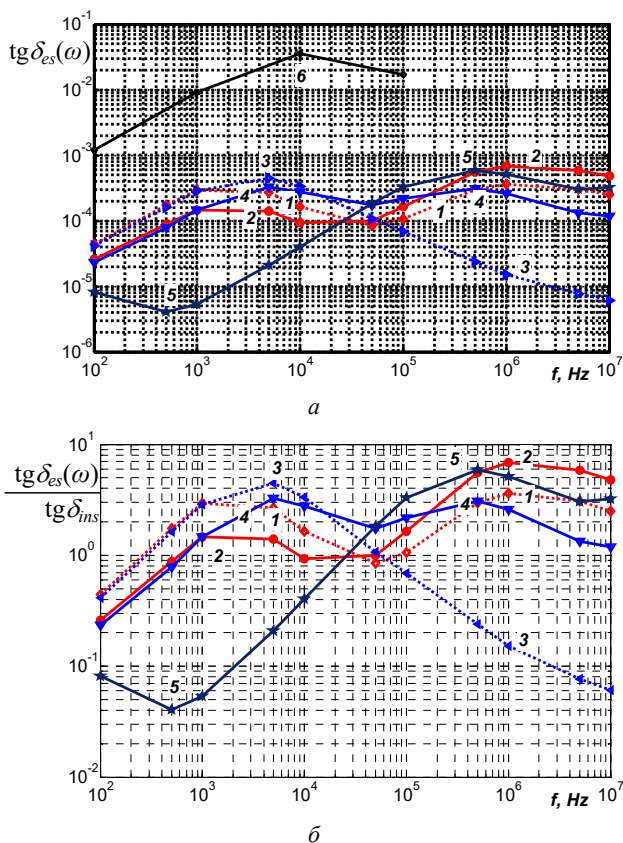


Рис. 5. Частотні залежності тангенсу кута діелектричних втрат при різних електричних властивостях та товщині напівпровідних екранів силового кабелю на напругу 35 кВ

Крива 1 – товщина напівпровідних екранів по струмопровідній жилі та ізоляції дорівнює 1,2 та 0,6 мм, крива 2 – $\Delta_1 = 0,6$ мм та $\Delta_2 = 1,2$ мм з питомою провідністю на постійному струмі $\gamma_{dc1} = 10^{-4}$ См/м, $\gamma_{dc2} = 10^{-2}$ См/м відповідно; криві 3, 4 – $\Delta_1 = 0,6$ мм та $\Delta_2 = 1,2$ мм з $\gamma_{dc1} = 10^{-4}$ См/м, $\gamma_{dc2} = 10^{-4}$ См/м (крива 3) та $\gamma_{dc1} = 10^{-2}$ См/м, $\gamma_{dc2} = 10^{-4}$ См/м (крива 4); крива 5 – $\Delta_1 = 1,2$ мм та $\Delta_2 = 0,6$ мм з $\gamma_{dc1} = 10^{-2}$ См/м, $\gamma_{dc2} = 1$ См/м.

Так, за умови:

1) $\Delta_1 > \Delta_2$ та $\gamma_{ac1} > \gamma_{dc1}$, $\gamma_{ac2} \approx \gamma_{dc2}$ (крива 1) спостерігається два характерних максимуми ефективного тангенсу кута діелектричних втрат близько частоти 1 кГц та 1 МГц зі значеннями $\text{tg} \delta_{es}$ в 3–3,3 рази вище $\text{tg} \delta_{ms}$;

2) $\Delta_1 < \Delta_2$ та $\gamma_{ac1} > \gamma_{dc1}$, $\gamma_{ac2} > \gamma_{dc2}$ (крива 3) спостерігається один максимум $\text{tg} \delta_{es}$ на частоті 5 кГц з перевищенням значення в 4,5 рази;

3) $\Delta_1 > \Delta_2$ та $\gamma_{ac1} \approx \gamma_{dc1}$, $\gamma_{ac2} \approx \gamma_{dc2}$ (крива 5) один максимум $\text{tg} \delta_{es}$ близько частоти 50 МГц зі значеннями $\text{tg} \delta_{es}$ в 6 разів вище $\text{tg} \delta_{ms}$.

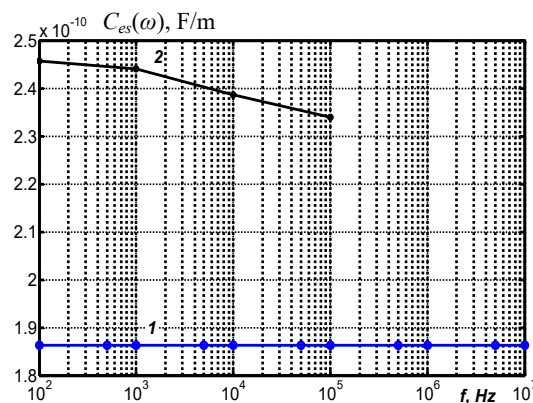


Рис. 6. Модельна (крива 1) та експериментальна (крива 2) залежності еквівалентної ємності одножильного кабелю на напругу 35 кВ

Характер змінення частотної модельної залежності ефективного тангенсу кута діелектричних втрат для кривої 3 в більшій мірі узгоджується з експериментальною кривою 6 зразка силового кабелю зі зволоженою поліетиленовою ізоляцією. Підтвердженням зволоженості та дифузії ацетиленової сажі (вуглецю) відповідно до теорії перколяції є прояв частотної залежності ємності зразка силового кабелю 35 кВ з товщиною ізоляції 7 мм (рис. 6, крива 2).

Висновки.

Вперше у широкому діапазоні частоти встановлено вплив електрофізичних характеристик, з урахуванням дисперсії комплексної діелектричної проникності і активної питомої провідності, та товщини напівпровідних екранів на ефективні параметри діелектричної абсорбції тришарової композитної електроізоляційної системи силових високовольтних кабелів.

Ефективна електрична ємність тришарової композитної системи визначається електричною ємністю полімерної ізоляції та залежить від діелектричної проникності і товщини ізоляції, що підтверджується експериментальними даними.

Розглянутий алгоритм визначення ефективного тангенсу кута діелектричних втрат у широкому діапазоні частоти є основою для створення методики щодо обґрунтування електрофізичних характеристик та товщини напівпровідних екранів для зменшення їх впливу на ефективні параметри діелектричної абсорбції силових високовольтних кабелів з полімерною ізоляцією.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007 Норми випробування електрообладнання (нова редакція 2020 р.). – Київ, 2020. – 262 с. Режим доступу: <https://docs.dtkr.ua/download/pdf/1225.943.1> (Дата звернення: 28.03.2021).
2. Wire and Cable Market (Type - Wire, and Cable; Voltage Type - Low Voltage, Medium Voltage, and High and Extra High Voltage; Applications - Power Transmission and Distribution, Transport, Data Transmission, Infrastructure): Global Industry Analysis, Trends, Size, Share and Forecasts to 2024. *Infinium Global Research*, 2020. Режим доступу: <https://www.infiniumglobalresearch.com/ict-semiconductor/global-wire-and-cable-market> (Дата звернення: 28.03.2021).

3. Huang X., Zhang J., Jiang P. Thermoplastic insulation materials for power cables: History and progress. *Gaodiyana Jishu/High Voltage Engineering*, 2018, vol. 44, no. 5, pp. 1377-1398. doi: <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20180430001>.
4. Cataliotti A., Daidone A., Tine G. Power Line Communication in Medium Voltage Systems: Characterization of MV Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1896-1902. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.919048>.
5. Zhao H., Zhang W., Wang Y. Characteristic Impedance Analysis of Medium-Voltage Underground Cables with Grounded Shields and Armors for Power Line Communication. *Electronics*, 2019, vol. 8, no. 5, p. 571. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics8050571>.
6. Linde E., Verardi L., Fabiani D., Gedde U.W. Dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for cable insulation based on crosslinked polyethylene. *Polymer Testing*, 2015, vol. 44, pp. 135-142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.04.004>.
7. Bezprozvannykh G.V., Kostjukov I.A. A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.08>.
8. Araneo R., Celozzi S., Faria J.A.B. Frequency-domain analysis of the characteristic impedance matrix of high-voltage transmission lines. *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*, 2017, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2017.8094662>.
9. Papazyan R. Concepts for market-based MV cable operations and maintenance using insulation parameters measurements. *2020 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF)*, 2020, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326055>.
10. Heider M.Z., Rahman M.M., Al-Arainy A.A. Study of frequency variant tan delta diagnosis for MV cables insulation status assessment. *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, 2019, pp. 260-264. doi: <https://doi.org/10.1109/ICAEE48663.2019.8975616>.
11. Sun B., Makram E., Xu X. Impacts of Water-Tree Fault on Ferroresonance in Underground Cables. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2017, vol. 05, no. 12, pp. 75-86. doi: <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.512010>.
12. Burkes K.W., Makram E.B., Hadidi R. Water Tree Detection in Underground Cables Using Time Domain Reflectometry. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 53-62. doi: <https://doi.org/10.1109/JPETS.2015.2420791>.
13. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Technical Electrodynamics*, 2017, no. 2, pp. 19-24. doi: <http://doi.org/10.15407/techned2017.02.019>.
14. Wei Y., Liu M., Han W., Li G., Hao C., Lei Q. Charge Injection Characteristics of Semi-Conductive Composites with Carbon Black-Polymer for HVDC Cable. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 7, p. 1134. doi: <https://doi.org/10.3390/polym11071134>.
15. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G. The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 6, pp. 54-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.6.09>.
16. Liu T., Fothergill J., Dodd S., Nilsson U. Influence of semicon shields on the dielectric loss of XLPE cables. *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2009, pp. 246-249. doi: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
17. Chunchuan Xu, Boggs S.A. High frequency properties of shielded power cable. Part 2: sources of error in measuring shield dielectric properties. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2006, vol. 22, no. 1, pp. 7-13. doi: <https://doi.org/10.1109/MEI.2006.1618966>.
18. Fröhlich H. *Theory of dielectrics. Dielectric constant and dielectric loss*. Oxford, Clarendon Press, 1949. 180 p.
19. Murphy E.J., Lowry H.H. The Complex Nature of Dielectric Absorption and Dielectric Loss. *The Journal of Physical Chemistry*, 1930, vol. 34, no. 3, pp. 598-620. doi: <https://doi.org/10.1021/j150309a014>.
20. Von Hippel A.R. *Dielectrics and waves*. New York, London, John Wiley and Sons, Chapman and Hall, 1959. 284 p.
21. Золотарев В.М., Золотарев В.В., Бузько С.В., Антоненко Т.Ю., Науменко А.А. Влияние проводимости экранов на диэлектрические потери в кабелях. *Вісник НТУ «ХПИ»*, 2014, № 21, С. 50-54. Режим доступу: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/9217/1/vestnik_HPI_2014_21_Zolotaryov_Vliyaniye.pdf (Дата звернення: 15.04.2021).
22. Bezprozvannykh A.V., Kessaev A.G., Shcherba M.A. Frequency dependence of dielectric loss tangent on the degree of humidification of polyethylene cable insulation. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 3, pp. 18-24. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.018>.
23. Rothon R. *Fillers for Polymer Applications*. Springer International Publishing, 2017. 317 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.

REFERENCES

1. SOU-N EE 20.302: 2007 Standards for testing electrical equipment (new version 2020). – К., 262 p. (Ukr). Available at: <http://www.elec.ru/articles/innovacionnyc-prorv-na-rynke-silovyh-transformatorov> (Accessed 28 March 2021).
2. Wire and Cable Market (Type - Wire, and Cable; Voltage Type - Low Voltage, Medium Voltage, and High and Extra High Voltage; Applications - Power Transmission and Distribution, Transport, Data Transmission, Infrastructure): Global Industry Analysis, Trends, Size, Share and Forecasts to 2024. *Infinium Global Research*, 2020. Available at: <https://www.infiniumglobalresearch.com/ict-semiconductor/global-wire-and-cable-market> (Accessed 28 March 2021).
3. Huang X., Zhang J., Jiang P. Thermoplastic insulation materials for power cables: History and progress. *Gaodiyana Jishu/High Voltage Engineering*, 2018, vol. 44, no. 5, pp. 1377-1398. doi: <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20180430001>.
4. Cataliotti A., Daidone A., Tine G. Power Line Communication in Medium Voltage Systems: Characterization of MV Cables. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, vol. 23, no. 4, pp. 1896-1902. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.919048>.
5. Zhao H., Zhang W., Wang Y. Characteristic Impedance Analysis of Medium-Voltage Underground Cables with Grounded Shields and Armors for Power Line Communication. *Electronics*, 2019, vol. 8, no. 5, p. 571. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics8050571>.
6. Linde E., Verardi L., Fabiani D., Gedde U.W. Dielectric spectroscopy as a condition monitoring technique for cable insulation based on crosslinked polyethylene. *Polymer Testing*, 2015, vol. 44, pp. 135-142. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.04.004>.
7. Bezprozvannykh G.V., Kostjukov I.A. A calculation model for determination of impedance of power high voltage single-core cables with polymer insulation. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2021, no. 3, pp. 47-51. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2021.3.08>.
8. Araneo R., Celozzi S., Faria J.A.B. Frequency-domain analysis of the characteristic impedance matrix of high-voltage transmission lines. *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC EUROPE*, 2017, pp. 1-6. doi: <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2017.8094662>.
9. Papazyan R. Concepts for market-based MV cable operations and maintenance using insulation parameters measurements. *2020*

- 12th Electrical Engineering Faculty Conference (BulEF), 2020, pp. 1-5. doi: <https://doi.org/10.1109/BulEF51036.2020.9326055>.
10. Heider M.Z., Rahman M.M., Al-Arainy A.A. Study of frequency variant tan delta diagnosis for MV cables insulation status assessment. *2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, 2019, pp. 260-264. doi: <https://doi.org/10.1109/ICAEE48663.2019.8975616>.
11. Sun B., Makram E., Xu X. Impacts of Water-Tree Fault on Ferroresonance in Underground Cables. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2017, vol. 05, no. 12, pp. 75-86. doi: <https://doi.org/10.4236/jpee.2017.512010>.
12. Burkes K.W., Makram E.B., Hadidi R. Water Tree Detection in Underground Cables Using Time Domain Reflectometry. *IEEE Power and Energy Technology Systems Journal*, 2015, vol. 2, no. 2, pp. 53-62. doi: <https://doi.org/10.1109/JPETS.2015.2420791>.
13. Kucheriava I.M. Power cable defects and their influence on electric field distribution in polyethylene insulation. *Technical Electrodynamics*, 2017, no. 2, pp. 19-24. doi: <http://doi.org/10.15407/techned2017.02.019>.
14. Wei Y., Liu M., Han W., Li G., Hao C., Lei Q. Charge Injection Characteristics of Semi-Conductive Composites with Carbon Black-Polymer for HVDC Cable. *Polymers*, 2019, vol. 11, no. 7, p. 1134. doi: <https://doi.org/10.3390/polym11071134>.
15. Bezprozvannykh G.V., Kyessayev A.G. The technological and exploitative factors of local increase of electric field strength in the power cable of coaxial design. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no. 6, pp. 54-59. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2016.6.09>.
16. Liu T., Fothergill J., Dodd S., Nilsson U. Influence of semiconductor shields on the dielectric loss of XLPE cables. *2009 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2009, pp. 246-249. doi: <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2009.5377792>.
17. Chunchuan Xu, Boggs S.A. High frequency properties of shielded power cable. Part 2: sources of error in measuring shield dielectric properties. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2006, vol. 22, no. 1, pp. 7-13. doi: <https://doi.org/10.1109/MEI.2006.1618966>.
18. Fröhlich H. *Theory of dielectrics. Dielectric constant and dielectric loss*. Oxford, Clarendon Press, 1949. 180 p.
19. Murphy E.J., Lowry H.H. The Complex Nature of Dielectric Absorption and Dielectric Loss. *The Journal of Physical Chemistry*, 1930, vol. 34, no. 3, pp. 598-620. doi: <https://doi.org/10.1021/j150309a014>.
20. Von Hippel A.R. *Dielectrics and waves*. New York, London, John Wiley and Sons, Chapman and Hall, 1959. 284 p.
21. Zolotarev V.M., Zolotarev V.V., Buzko S.V., Antonets T.Yu., Naumenko A.A. Effect of shield conductivity on dielectric losses in cables. *Bulletin NTU «KhPI»*, 2014, no. 21, pp. 50-54. (Rus). Available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/9217/1/vestnik_HPI_2014_21_Zolotaryov_Vliyaniye.pdf (Accessed 15 April 2021).
22. Bezprozvannykh A.V., Kessaev A.G., Shcherba M.A. Frequency dependence of dielectric loss tangent on the degree of humidification of polyethylene cable insulation. *Technical Electrodynamics*, 2016, no. 3, pp. 18-24. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2016.03.018>.

How to cite this article:

Bezprozvannykh G.V., Grynyshyna M.V. Effective parameters of dielectric absorption of polymeric insulation with semiconductor coatings of power high voltage cables. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2022, no. 3, pp. 39-45. doi: <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2022.3.06>

23. Rotheron R. *Fillers for Polymer Applications*. Springer International Publishing, 2017. 317 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9>.

Надійшла (Received) 10.01.2022
 Прийнята (Accepted) 11.02.2022
 Опублікована (Published) 01.06.2022

Безпрозваних Ганна Вікторівна¹, д.т.н., проф.,
 Гринишина Маргарита Володимирівна², аспірантка,
 техн. директор,

¹ Національний технічний університет
 «Харківський політехнічний інститут»
 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2,
 e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua (Corresponding author)
² ТОВ «Інтеркабель Київ»,
 08112, Київська обл., Києво-Святошинський р-н,
 с. Капітанівка, вул. Дачна, 5.
 e-mail: m.grynyshyna@interkabel.ua

G.V. Bezprozvannykh¹, M.V. Grynyshyna²
¹ National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
 2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

² TOV «Interkabel Kiev»,
 5, Dachnaya Str., p. Kapitanovka,
 Kiev-Svyatoshinsky district, Kiev region, 08112, Ukraine.

Effective parameters of dielectric absorption of polymeric insulation with semiconductor coatings of power high voltage cables.

Introduction. The presence of semiconductor shields leads to additional dielectric losses compared to polymer insulation without shields. Losses in cables in the presence of semiconductor coatings depend on the dielectric permittivity and resistivity of the composite polymeric material, which are frequency-dependent characteristics. **Purpose.** To determine in a wide range of frequencies, taking into account the variance of electrophysical characteristics and thickness of semiconductor shields effective electric capacitance and tangent of dielectric losses angle of high-voltage power cables with polymer insulation. **Methodology.** Serial-parallel nonlinear circuit replacement of semiconductor coatings and linear polymer insulation to determine in a wide range of frequency the effective parameters of the dielectric absorption of a three-layer composite system of high-voltage power cables of single core. **Practical value.** The obtained relations are the basis for the development of practical recommendations for substantiating the thickness and electrophysical parameters of semiconductor shields to reduce the impact on the effective tangent of the dielectric losses angle of a three-layer composite system of high-voltage power cables. References 23, figures 6.

Key words: semiconductor coatings, polymer insulation, high-voltage power cable, nonlinear substitution circuit, complex dielectric permittivity, active conductivity, effective electric capacitance, effective tangent of dielectric losses angle.