

Л.А. ШЕБЕНЮК, канд. техн. наук, проф., НТУ «ХП»;
В.М. КИРИЛЕНКО, канд. техн. наук, доц., НТУУ «КПІ», Київ;
О.В. ГОЛИК, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХП»

ДО АНАЛІЗУ ВТРАТ В НАПІВПРОВІДНИХ ЕКРАНАХ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ ІЗ ЗШИТОЮ ПОЛІЕТИЛЕНОВОЮ ІЗОЛЯЦІЄЮ

Проаналізовано затухання електромагнітного поля в напівпровідних екранах кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 330 кВ. Досліджено вплив товщини екрану по жилі на товщину ізоляції кабелю.

Проанализировано затухание электромагнитного поля в полупроводниковых экранах кабелей со шитой полиэтиленовой изоляцией на напряжение 330 кВ. Исследовано влияние толщины экрана по жиле на толщину изоляции кабеля.

Fading of the electromagnetic field is analysed in the semiconductor screens of cables with the sewn together polyethylene isolation on tension 330 kV. Influencing of thickness of screen on a tendon on the thickness of isolation of cable is explored.

Постановка проблеми. Відповідно до діючих міжнародних стандартів [1] для кабелів високої напруги із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу до 110 кВ включно втратами в напівпровідних екранах, які виготовляють з матеріалу ізоляції, наповненого сажею, нехтують. Однак результати вимірювань електрофізичних характеристик матеріалу для напівпровідних екранів кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією [2] свідчать про те, що відношення комплексної діелектричної проникності (показник розсіяння енергії електричного поля в матеріалі) до дійсної є дуже високим (кілька сотень). Тому питання про необхідність врахування втрат в напівпровідних екранах для кабелів надвисокої напруги (330 кВ) із зшитою поліетиленовою ізоляцією, як інноваційної вітчизняної продукції, є актуальним.

Аналіз літературних джерел. 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 електромагнітного поля в неідеальному діелектрику, що проводить електричний струм [3] згідно з рівняннями Максвелла у комплексній формі:

$$\operatorname{rot} \dot{H}_m = (\gamma + j\omega\epsilon_a) \dot{E}_m = \dot{\delta}_m + \dot{\delta}_{mzm}, \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \dot{E}_m = (-j\omega\mu_a) \dot{H}_m, \quad (2)$$

де \dot{H}_m – амплітуда напруженості магнітного поля; \dot{E}_m – амплітуда напруженості електричного поля; γ, ϵ_a – питома електропровідність та абсолютна діелектрична проникність матеріалу; $\dot{\delta}_m, \dot{\delta}_{mzm}$ – амплітуди густини струмів електропровідності та зміщення; ω – кругова частота.

Вирішення (1) і (2) для напівпровідних екранів кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією дозволяє оцінити затухання електромагнітного поля в екранах.

Ціль, задачі дослідження. Проаналізувати затухання електромагнітного поля в напівпровідних екранах кабелів із зшитою поліетиленовою ізоляцією на напругу 330 кВ за рівняннями (1) і (2), за умови розповсюдження електромагнітного поля вздовж однієї осі, що відповідає радіальному полю цих кабелів. Дослідити вплив товщини екрану по жилі на товщину ізоляції кабелю, а відтак на вартість матеріалів системи «надпровідний екран по жилі – ізоляція» таких кабелів за різних максимально допустимих напруженостей електричного поля в ізоляції.

Основний матеріал дослідження. Рівняння (1) і (2) за умови напрямлення осі z по вектору напруженості електричного поля і вибору напрямку розповсюдження електромагнітного поля вздовж осі y (розповсюдження вздовж однієї осі) у декартових координатах мають класичне рішення як диференціальне рівняння другого порядку:

$$\dot{E}_{mz} = \dot{E}_m = \dot{C}_1 e^{-\mathfrak{D}y} + \dot{C}_2 e^{\mathfrak{D}y}, \quad (3)$$

де \mathfrak{D} – коефіцієнт розповсюдження:

$$\mathfrak{D} = (j\omega\mu_a (\gamma + j\omega\epsilon_a))^{0.5}. \quad (4)$$

У (3) постійні \dot{C}_1 і \dot{C}_2 є визначеними, якщо прийняти початкові умови: за $y \rightarrow \infty$, $\dot{E}_m \rightarrow 0$; за $y = 0$, $\dot{E}_m = \dot{E}_{mz}(0)$. Тоді $\dot{C}_1 = \dot{E}_{mz}(0)$; $\dot{C}_2 = 0$ і (3) може бути використана для конкретних розрахунків з урахуванням зроблених припущень.

В таблиці 1 наведені відповідні прийняті діапазони та результати розрахунків.

Дані таблиці свідчать про те, що у вибраних діапазонах електрофізичних характеристик поліетилену, наповненого сажею, на електричне поле в напівпровідному екрані суттєво впливає питома електропровідність і частота. Для промислової частоти визначальним є вплив питомої електропровідності матеріалу екранів по жилі і по ізоляції. Цей вплив ілюструє рисунок 1, на якому представлені результати

розрахунку за (3) за різних значень питомої електропровідності матеріалу екрану.

Таблиця 1 – Діапазони можливих значень електрофізичних характеристик зшитого поліетилену, наповненого ацетиленовою сажею, і параметрів розповсюдження змінного електричного поля за різних частот

Частота Гц	Значення коефіцієнту затухання α (Нп/м) і коефіцієнту фази β (рад/м) в діапазоні відносної діелектричної проникності матеріалу $\epsilon \in [2,3 - 10]$ за наступних значень питомої електропровідності γ (См/м) (числові значення α і β співпадають)					
	10^{-2}	10^{-1}	10^0	10^1	10^2	10^3
50	$1,407 \cdot 10^{-3}$	$4,45 \cdot 10^{-3}$	0,014	0,044	0,141	0,445
60	$1,613 \cdot 10^{-3}$	$5,101 \cdot 10^{-3}$	0,016	0,051	0,161	0,51
10^3	$8,05 \cdot 10^{-3}$	0,025	0,081	0,255	0,805	2,546
10^5	0,079	0,215	0,793	2,507	7,928	25,07
10^7	0,716	2,481	7,919	25,064	79,266	250,663
10^9	1,242	12,083	71,646	248,125	791,859	2506

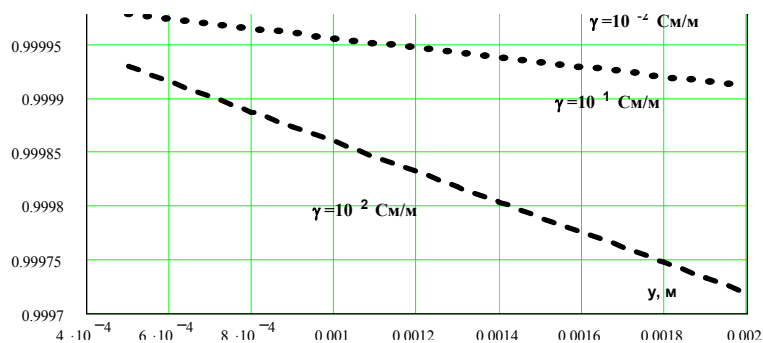


Рис. 1 – Залежності коефіцієнту зменшення амплітуди напруженості E_t змінного електричного поля в матеріалі напівпровідного екрану високовольтного кабелю від відстані y , м від поверхні струмопровідної жили за промислової частоти і різних значень питомої електропровідності матеріалу екрану

Значення коефіцієнту зменшення амплітуди напруженості електричного поля на рис.1 свідчать про те, що розсіяння енергії електромагнітного поля в матеріалі напівпровідних екранів в реальних кабелях дуже незначне, але таке розсіяння, по-перше, існує, а по-друге, суттєво залежить від електропровідності екрану і частоти електромагнітного поля.

Діапазон доцільних значень товщини напівпровідних екранів надвисоковольтних кабелів визначений їх призначенням, – регулюванням напруженості електричного поля в ізоляції кабелів.

Товщина ізоляції пов'язана з максимальною допустимою напруженістю E_{max} і товщиною екрану Δe співвідношенням:

$$\Delta iz = (rg + \Delta e) \left[\exp\left(\frac{U}{E_{max} \cdot (rg + \Delta e) \cdot \sqrt{3}}\right) - 1 \right], \quad (5)$$

де rg - радіус струмопровідної жили; U - номінальна напруга.

Відповідно до (6) може бути визначено витрати C на матеріал напівпровідного екрану по жилі і матеріал ізоляції при різних значеннях максимальної допустимої напруженості електричного поля в ізоляції кабелю на задану напругу:

$$C = 2\pi \cdot c \left[\Delta e \cdot (rg + \Delta e \cdot 1.5) \cdot k_e + \Delta iz \cdot (rg + \Delta e + \frac{\Delta iz}{2}) \right], \quad (6)$$

де c - вартість матеріалу ізоляції на 1 мм^2 площі поперечного перерізу і на 1 м довжини кабелю; k_e – коефіцієнт вартості матеріалу екрану по відношенню до матеріалу ізоляції.

На рисунку 2 наведені залежності суми вартостей матеріалу напівпровідного екрану по жилі і матеріалу ізоляції від товщини екрану при різних значеннях максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю на напругу 330 кВ з перерізом жили 625 мм^2 .

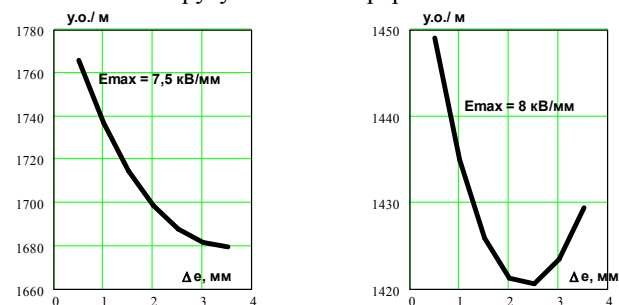


Рис. 2 – Залежності суми вартостей матеріалу напівпровідного екрану по жилі і матеріалу ізоляції від товщини екрану при різних значеннях максимальної напруженості електричного поля в ізоляції кабелю на напругу 330 кВ з перерізом жили 625 мм^2 : умовна ціна матеріалу ізоляції $0,1 \text{ у.о./мм}^2 \text{ м}$

Результати розрахунків за (5) і (6), які ілюструє рис. 2, свідчать про те, що для кожної конкретної конструкції кабелю існує економічний оптимальний розмір товщини напівпровідного екрану, який визначається за заданої напруги, перш за все, розміром струмопровідної жили, допустимою максимальною напруженістю електричного поля в ізоляції і співвідношенням вартості матеріалу екрану і ізоляції.

При подальшому визначенні втрат в напівпровідних екранах розрахунки велись для відповідних діапазонів оптимальної товщини екранів. 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, використати відому паралельну схему заміщення для кожного з елементів системи, наведену на рисунку 3

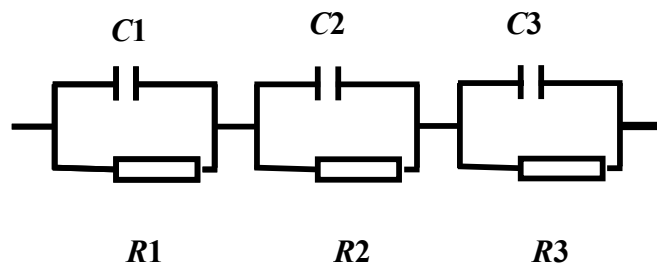


Рис. 3 – Схема заміщення системи «напівпровідний екран по жилі – ізоляція – напівпровідний екран по ізоляції»

Якщо параметри схеми заміщення $C1$, $C2$, $C3$ (ємності елементів системи) і $R1$, $R2$, $R3$ (електричні опори елементів системи) визначити за відомими формулами для радіального електричного поля, то відповідні комплексні опори цих елементів визначаються формулою:

$$z = -j \left(\frac{1}{\omega C} \right) \frac{R}{R - j \left(\frac{1}{\omega C} \right)}, \quad (7)$$

Струм, який протікає через ізоляцію і напівпровідні екрани кабелю визначається фазною напругою U_{ϕ} і сумою комплексних опорів цих елементів конструкції кабелю:

$$I = \frac{U_{\phi}}{z_1 + z_2 + z_3}, \quad (8)$$

Напруги на елементах системи і активні втрати в них визначаються формулами:

$$U_1 = I \cdot z_1; P_{a1} = U_1 \cdot [\operatorname{Re}(I) - j \cdot I_m(I)]_p \quad (9)$$

$$U_2 = I \cdot z_2; P_{a2} = U_2 \cdot [\operatorname{Re}(I) - j \cdot I_m(I)]_p \quad (10)$$

$$U_3 = I \cdot z_3; P_{a3} = U_3 \cdot [\operatorname{Re}(I) - j \cdot I_m(I)]_p \quad (11)$$

Критерієм відповідності результатів розрахунків за схемою заміщення є значення розрахованої за (10) величини втрат в діелектрику P_{a2} , оскільки в цих розрахунках, в принципі не використане

поняття тангенсу кута діелектричних втрат $\operatorname{tg} \delta$ ізоляції. Тому є принципово важливим порівняння результату розрахунку P_{a2} з оцінкою цієї величини за відомою формулою для P_{iz} (12), яка базується на експериментально визначеному значенні $\operatorname{tg} \delta = 0,0014$ [2] для зшитого поліетилену у високовольтних кабелях.

Потужність втрат в діелектрику P_{iz} у високовольтних кабелях з ізоляцією із зшитого поліетилену [1]:

$$P_{iz} = U_{\phi}^2 \omega C_2 \operatorname{tg} \delta, \quad (12)$$

$$P_{iz} = (330000 / \sqrt{3})^2 2\pi \cdot 50 \cdot 0,47 \cdot 10^{-10} \cdot 0,0014 = 0,753 \text{ Вт/м.}$$

За схемою заміщення значення розрахованої за (3.6.13) при питомій електропровідності ізоляції кабелю 10^{-11} См/м: $P = 0,842$ Вт/м.

Результати розрахунків за (9) і (11), по-перше, свідчать про те, що зменшення питомої електропровідності матеріалу екрану зумовлює збільшення втрат в екрані, але в достатньо широкому діапазоні значень питомої електропровідності матеріалу екрану, до якого належать реальні значення у відповідних конструкціях кабелю, а саме від 10^{-3} См/м до 10^2 См/м, потужність втрат в напівпровідних екранах знаходиться в межах від 10^{-3} Вт/м до 10^{-8} Вт/м. Тому при визначенні теплового режиму роботи надвисоковольтних кабелів на напругу 330 кВ, а значить при визначенні їх пропускної спроможності, потужністю втрат в напівпровідних екранах можна знехтувати. Цей висновок зберігається і для інших, більш складних, схем заміщення.

Висновки. 1. При визначенні теплового режиму роботи надвисоковольтних кабелів на напругу 330 кВ, а значить при визначенні їх пропускної спроможності, потужністю втрат в напівпровідних екранах можна знехтувати.

2. Для кожної конкретної конструкції кабелю існує економічний оптимальний розмір товщини напівпровідного екрану, який визначається за заданої напруги, перш за все, розміром струмопровідної жили, допустимою максимальною напруженістю електричного поля в ізоляції і співвідношенням вартості матеріалу екрану і ізоляції.

Список літератури: 1. IEC 287-1-1. Electric cables – Calculation of the current rating – Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General. 2. Mugala G.: Comparing Two Measurement Techniques for High Frequency Characterization / G. Mugala // IEE Transaction on Dielectrics and Electrical insulation, 2006.– Vol. 13. – № 4. – P. 712-716 3. Говорков В.А. Теория электромагнитного поля / В.А.Говорков, С.Л. Купалян. – М. : Высш. шк., 1963. – 371 с.

Надійшла до редколегії 03.11. 2010