

ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДЯЩИХ ЭКРАНОВ СИЛОВЫХ КАБЕЛЕЙ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ СО СШИТОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ

В силовых кабелях средней та високої напруги застосовують напівпровідні екрани по жилі та ізоляції. Виконано аналіз впливу діелектричної проникності та питомого об'ємного опору напівпровідних композицій на напруженість електричного поля, тангенс кута діелектричних втрат та пропускну спроможність силового кабелю на напругу 110 кВ.

В силовых кабелях среднего и высокого напряжений применяют полупроводящие экраны по жиле и изоляции. Выполнен анализ влияния диэлектрической проницаемости и удельного электрического сопротивления полупроводящих композиций на напряженность электрического поля, тангенс угла диэлектрических потерь и пропускную способность силового кабеля напряжением 110 кВ.

ВВЕДЕНИЕ

В кабелях высокого напряжения 35-220 кВ средняя рабочая напряженность в 3 раза выше, чем в кабелях среднего напряжения 6-35 кВ (табл. 1). Любые неоднородности: заусеницы на проволоках токопроводящей жилы, инородные включения в толще и на поверхности изолированной жилы приводят к локальному повышению напряженности электрического поля и развитию дендритов. Для выравнивания напряженности электрического поля вокруг проволок токопроводящей жилы, снижения напряженности поля на поверхности изоляции кабеля применяют полупроводящие экраны [1-4].

Таблица 1

Требования к однородности изоляции кабелей среднего и высокого напряжений

Параметр	Кабели среднего напряжения 6-35 кВ	Кабели высокого напряжения 35-220 кВ
Средняя напряженность электрического поля E , кВ/мм	2	6
Размер недопустимых примесей, мкм	>200	>100
Примеси, подлежащие контролю, мкм	100-200	70-100
Максимально допустимая концентрация примесей, подлежащих контролю, шт/кг	3	10

Требования к качеству полупроводящих экранов высоковольтных кабелей достаточно высокие. Концентрация и размеры поверхностных дефектов в композициях для экранов должны быть минимальны. Сам материал также должен иметь повышенную химическую чистоту и тепловую устойчивость. В современных проводящих композициях максимальная концентрация ионов не более 100 массовых долей; максимальное содержание серы – не более 200 массовых долей.

Полупроводящие экраны наносятся одновременно с экструдированием сшитой полиэтиленовой изоляции с помощью строенных экструдеров. Такая технология обеспечивает хорошую адгезию между экранами и изоляцией, а также отсутствие газовых включений в изоляции и на границе с экранами, т.е. уменьшает вероятность образования дендритов.

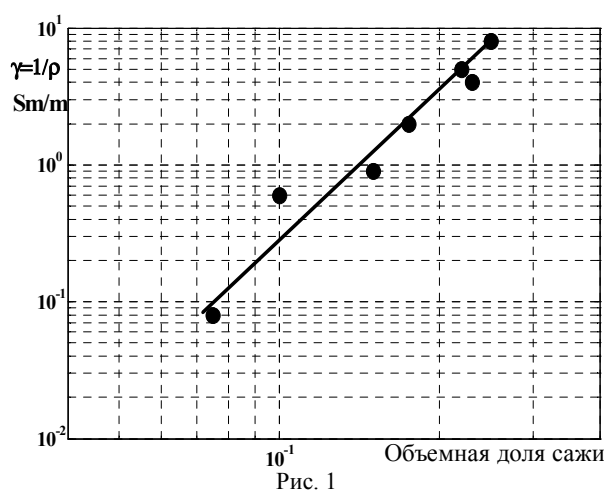


Рис. 1

При этом важно, чтобы теплофизические характеристики полупроводящих экранов и изоляции были идентичны для исключения термомеханических напряжений на границах раздела, а значит, отслаивания покрытия и изоляции. Материал полупроводящих экранов – наполненный сажей полиэтилен. Для всех типов высоковольтных кабелей (от средних до сверхвысоких значений напряжений) экранирующий слой из электропроводящего материала играет важную роль в обеспечении нормальной работы силовых кабелей. Проводимость электропроводящих материалов зависит от содержания углеродной сажи, используемой в качестве наполнителя: при изменении объемной доли сажи в два раза проводимость возрастает в два раза, т.е. удельное объемное сопротивление уменьшается соответственно в два раза (рис. 1). Электрофизические характеристики полупроводящих покрытий: удельное сопротивление и диэлектрическая проницаемость существенным образом влияют на распределение напряженности электрического поля, потери в кабеле и его пропускную способность.

Распределение напряженности электрического поля в кабеле при наличии полупроводящих экранов

На рис. 2 приведено распределение напряженности поля по толщине однородной полиэтиленовой изоляции одножильного силового кабеля сечением 800 мм² без применения полупроводящих покрытий по

жиле и изоляции: 1 – при толщине изоляции 12 мм, 2 – 16 мм и 3 – 20 мм. Там же показаны средние значения напряженностей: 5,25; 4 и 3,2 кВ/мм соответственно. Максимальная напряженность – на жиле, минимальная – на внешней поверхности изоляции, т.е. металлической оболочке: электрическое поле неравномерно по толщине изоляции. Так, при толщине изоляции 16 мм напряженность на жиле равна 5,8 кВ/мм, на металлической оболочке – 2,8 кВ/мм, т.е. напряженности отличаются более чем в 2 раза. Для уменьшения неравномерности распределения напряженности по толщине изоляции в силовых кабелях с бумажно-пропитанной изоляцией применяют градирование изоляции: более плотную (с большим значением диэлектрической проницаемости) кабельную бумагу располагают возле токопроводящей жилы, менее плотную (с меньшим значением диэлектрической проницаемости) – возле металлической оболочки (экрана).

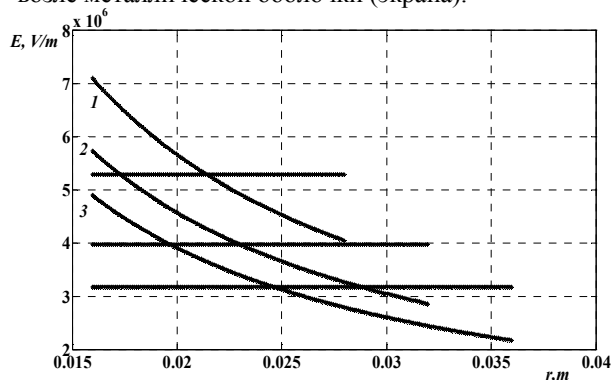


Рис. 2

При работе кабеля под переменным напряжением постоянная времени τ переходного процесса равна произведению электрической емкости C на сопротивление изоляции $R_{из}$:

$$\tau = R_{из} \cdot C = \frac{\rho}{2\pi} \ln \frac{r_{об}}{r_g} \cdot \frac{2\pi \epsilon \epsilon_0}{\ln \frac{r_{об}}{r_g}} = \pi \epsilon_0 \epsilon \rho, \quad (1)$$

где r_g , $r_{об}$ – радиусы кабеля по токопроводящей жиле и металлической оболочке соответственно; $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная, ϵ – диэлектрическая проницаемость изоляции, ρ – удельное объемное сопротивление изоляции, Ом·м.

Если τ больше полупериода приложенного напряжения

$$\tau \gg 1/(2f),$$

объемные заряды не успевают накапливаться, и напряженность поля распределяется в соответствии со значениями диэлектрических проницаемостей:

$$\epsilon_g \cdot E_g = \epsilon \cdot E = \epsilon_i \cdot E_i. \quad (2)$$

Если в структуре изоляции присутствуют неоднородности, то в соответствии с (2) на границах раздела изоляция – неоднородность наблюдаются скачки напряженности электрического поля ϵ

$$\epsilon_g / \epsilon, \epsilon / \epsilon_i.$$

Для кабеля с сечением токопроводящей жилы $S = 800 \text{ мм}^2$ и при толщине изоляции 16 мм емкость равна 0,25 мкФ/км, а сопротивление изоляции –

1 ГОм·км. Постоянная времени $\tau = 3,4 \cdot 10^3 \text{ с} \gg 1/(2 \cdot 50)$. На границах раздела происходит скачкообразное изменение напряженности электрического поля в соответствии со значениями диэлектрических проницаемостей: полупроводящий экран – изоляция – напряженность возрастает в ϵ_g/ϵ раз (граница участков II – III); изоляция – полупроводящий экран – напряженность уменьшается в ϵ/ϵ_i раз (граница участков III – II) (рис. 3).

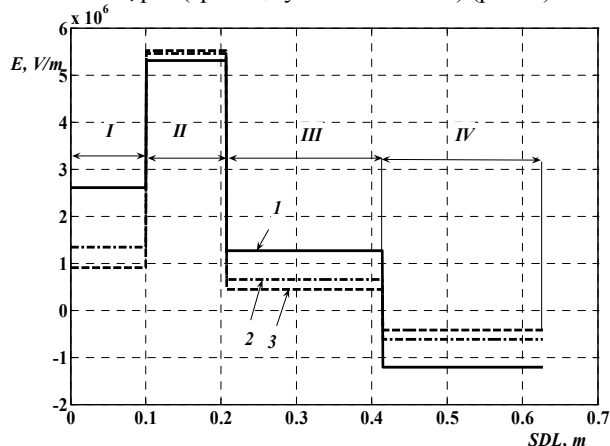


Рис. 3

На рис. 3 показано влияние относительной диэлектрической проницаемости полупроводящих экранов толщиной 1 мм на распределение напряженности электрического поля по поверхностям: жилы (участок I), полупроводящего экрана по жиле (участок II), изоляции (участок III) и полупроводящего экрана по изоляции (участок IV). Расчет выполнен для таких значений диэлектрических проницаемостей полупроводящих покрытий: 1 – $\epsilon_g = \epsilon_i = 5$; 2 – $\epsilon_g = \epsilon_i = 10$; 3 – $\epsilon_g = \epsilon_i = 15$. Диэлектрическая проницаемость сшитого полиэтилена в расчетах принята равной $\epsilon = 2,3$, толщина изоляции – 16 мм.

Применение полупроводящих экранов по жиле и изоляции приводит к уменьшению напряженности электрического поля на поверхности, как жилы, так и изоляции (сравни кривую 2 на рис. 1 и участки I и II на рис. 3). Причем, чем больше значение диэлектрической проницаемости покрытия, тем в большей степени происходит перераспределение напряженности поля на границах раздела сред. При этом напряженность поля на поверхности полупроводящего покрытия возрастает.

К определению допустимой удельной электропроводности материала полупроводящих покрытий жилы и изоляции

Представим промежуток "жила – полупроводящее покрытие по жиле – изоляция – полупроводящее покрытие по изоляции – металлический медный экран" схемой замещения рис. 4.

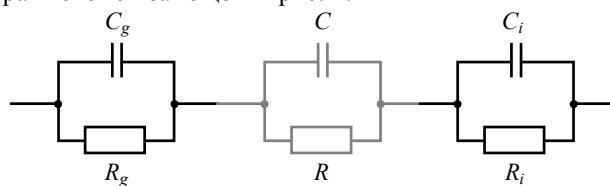


Рис. 4

Найдем тангенс угла диэлектрических потерь такой схемы.

Переходя от параллельных схем замещения каждого слоя к последовательным, получим:

а) для полупроводящего покрытия по жиле (g)

$$tg\delta_g = \frac{1}{R_g \omega C_g}, \quad C_{gs} = C_g (1 + tg\delta_g^2), \quad R_{gs} = \frac{tg\delta_g}{\omega \cdot C_{gs}}, \quad (3)$$

б) для изоляции кабеля

$$tg\delta = \frac{1}{R \cdot \omega \cdot C}; \quad C_s = C(1 + tg\delta^2); \quad R_s = \frac{tg\delta}{\omega \cdot C_s}; \quad (4)$$

в) для полупроводящего покрытия по изоляции (i)

$$tg\delta_i = \frac{1}{R_i \cdot \omega \cdot C_i}; \quad C_{is} = C_i (1 + tg\delta_i^2); \quad R_{is} = \frac{tg\delta_i}{\omega \cdot C_{is}}, \quad (5)$$

где индексы s означают последовательные схемы замещения компонентов.

Тогда общее активное последовательное сопротивление равно:

$$R_{os} = R_{gs} + R_s + R_{is}, \quad (6)$$

а общая емкость

$$\frac{1}{C_{os}} = \frac{1}{C_{gs}} + \frac{1}{C_s} + \frac{1}{C_{is}}. \quad (7)$$

Результирующий тангенс угла диэлектрических потерь равен:

$$tg\delta_o = R_{os} \cdot \omega \cdot C_{os}. \quad (8)$$

Таким образом, последовательность формул (3) – (6) описывает искомый тангенс угла диэлектрических потерь через параметры схемы замещения каждого слоя – емкость и эквивалентное параллельное сопротивление.

Выразим параметры схем замещения каждого слоя через известные толщины h, относительные диэлектрические проницаемости ε и удельные сопротивления ρ:

а) для полупроводящего покрытия по жиле

$$C_g = \frac{\epsilon_g \cdot \epsilon_0 \cdot S_g}{h_g}; \quad R_g = \rho_g \frac{h_g}{S_g}; \quad (9)$$

б) для изоляции кабеля

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{h}; \quad R = \rho \frac{h}{S}; \quad (10)$$

в) для полупроводящего покрытия по изоляции

$$C_i = \frac{\epsilon_i \cdot \epsilon_0 \cdot S_i}{h_i}; \quad R_i = \rho_i \frac{h_i}{S_i}, \quad (11)$$

где S – площади указанных слоев.

На рис. 5 представлены результаты расчета результирующего тангенса угла диэлектрических потерь в зависимости от удельного объемного сопротивления ρ полупроводящего покрытия по жиле и изоляции для кабеля сечением 800 мм². Значение потерь в изоляции принято равным tgδ = 0,0005. Толщина полупроводящего покрытия по жиле и изоляции h_g = h_i = 1 мм; относительная диэлектрическая проницаемость покрытий ε_g = ε_i = 10; толщина изоляции – переменная величина: h = 4, 8, 12, 16, 20 и 24 мм (кривые 1, 2, 3, 4, 5 и 6 соответственно). На рис. 5 линия I отмечает tgδ собственно изоляции, а линия II – максимально допустимое значение тангенса угла диэлек-

трических потерь кабеля tgδ_k = 0,12 %.

Как видно из рис. 5, наибольшие значения tgδ кабеля будут наблюдаться при ρ ≈ 10⁸ Ом·м. Казалось бы, допустимыми (с точки зрения минимизации tgδ) являются значения удельного сопротивления полупроводящих слоев свыше 10¹¹ Ом·м. Однако, в этом случае не произойдет экранирования поля на микровыступах жил и экрана, с которых начинают развиваться дендриты.

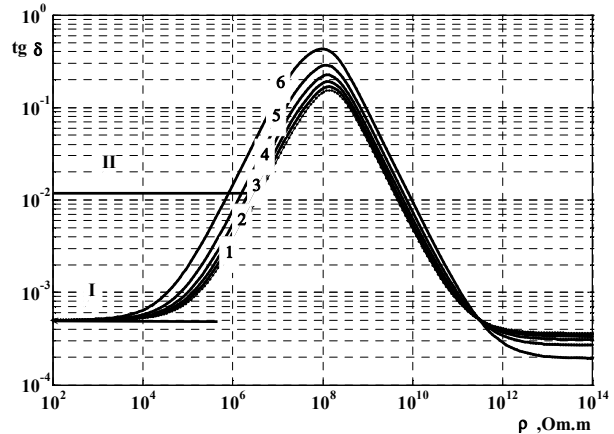


Рис. 5

Влияние тангенса угла диэлектрических потерь в кабеле на пропускную способность

Под пропускной способностью силовых кабелей понимается ток, который может протекать длительно по токопроводящей жиле. Для кабелей высокого напряжения важно обеспечить протекание больших значений рабочего тока. Так, при сечении жилы 2500 мм² расчетное значение тока составляет 3700А. Поэтому, при напряжении кабеля 110 кВ передаваемая мощность составит 3,7кА·110 кВ = 135 МВА.

Длительный рабочий ток определяется на основе теплового расчета кабеля. Особенностью теплового расчета кабелей высокого и сверхвысокого напряжения является учет мощности тепловыделений в изоляции:

$$P_d = U_{\phi}^2 \omega C tg\delta_k, \quad (12)$$

где U_φ – фазное напряжение кабеля.

Потери в изоляции возрастают в 4 раза при росте напряжения в 2 раза при том же значении tgδ.

Задача решается для стационарного теплового поля. Рассматривается установившийся режим, при котором тепловое состояние кабеля стабилизировалось, и тепловые свойства материалов не меняются во времени.

При протекании тока I по жиле кабеля с активным электрическим сопротивлением R_ж выделяется мощность:

$$P_{выд} = I^2 \cdot R_{ж}. \quad (13)$$

Токопроводящая жила нагревается до температуры T_г. Тепловой поток движется наружу, преодолевая тепловые сопротивления полупроводящего экрана по жиле R_г, изоляции R, полупроводящего экрана по изоляции R_и, защитной оболочки R_{об}. Внутреннее тепловое сопротивление кабеля:

$$R_{is} = R_g + R + R_i + R_{об}. \quad (14)$$

Тогда общая мощность тепловыделения внутри кабеля будет равна:

$$P_{\text{внутр}} = I^2 \cdot R_{\text{ж}} = P_d \cdot (R_{\text{из}} / 2 + R_{\text{об}}). \quad (15)$$

Для кабеля, находящегося в воздухе (туннеле, коллекторе) мощность отводимого тепла $P_{\text{отв}}$ зависит от теплового сопротивления $R_{\text{ос}}$ окружающего воздуха и температуры поверхности T_p кабеля и среды T_c (внешнего перепада температуры $\Delta T_{\text{внешн}}$).

Тепловое сопротивление окружающей среды зависит от поверхности охлаждения кабеля $S_{\text{охл}}$ и эффективного коэффициента теплоотдачи воздуха $\alpha_{\text{эфф}}$ за счет естественной конвективной α_k и лучистой (радиационной) α_l теплоотдачи:

$$R_{\text{ос}} = \frac{1}{\alpha_{\text{эфф}} S_{\text{охл}}}. \quad (16)$$

Тогда длительный рабочий ток, протекающий по жиле кабеля, определяется как:

$$I = \sqrt{\frac{T_g - T_p - P_d (R_{\text{из}} / 2 + R_{\text{об}} + R_{\text{ос}})}{R_{\text{ж}} \cdot (R_{\text{лс}} + R_{\text{ос}})}}. \quad (17)$$

На рис. 6 приведены результаты расчета длительного тока одножильного кабеля напряжением 110 кВ сечением 800 мм² при значениях $\text{tg} \delta_k = 0,05; 5; 10\%$ (кривые 1, 1'; 2, 2'; 3, 3' при рабочих температурах жилы 70 и 90°C соответственно). При расчете учитывается изменение активного сопротивления токопроводящей медной жилы за счет скин-эффекта и повышенной рабочей температуры.

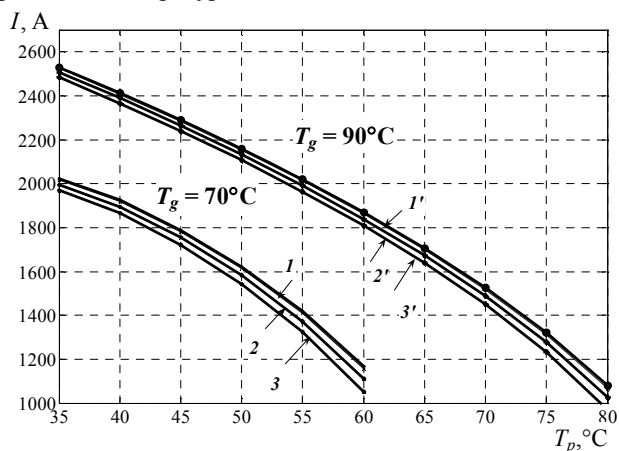


Рис. 6

Как видно, $\text{tg} \delta_k$ влияет на пропускную способность кабеля. При увеличении тангенса угла диэлектрических потерь кабеля от 0,05 до 5% – (удельное объемное сопротивление полупроводящих экранов изменяется на три порядка) длительный рабочий ток уменьшается на 13% при внутреннем перепаде температуре 10°C. Передаваемая мощность при этом уменьшается на 13%.

ВЫВОДЫ

1. В процессе производства кабелей высокого напряжения необходимо осуществлять тщательный контроль концентрации растворимых ионов и серы в углеродной саже.

2. Удельное электрическое сопротивление материала полупроводящих экранов по жиле и изоляции должно быть не более 10⁴ Ом·м. Только в этом случае потери в полупроводящих экранах не влияют на тангенс угла диэлектрических потерь кабеля.

3. Вклад рассеяния энергии полупроводящими покрытиями в общие диэлектрические потери кабеля увеличивается с уменьшением толщины изоляции. Поэтому для кабелей меньшего номинального напряжения толщину покрытий необходимо уменьшать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основы кабельной техники: [учебник для студ. высш. учебн. заведений] / В.М. Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный. – М.: Издательский центр "Академия", 2006. – 432 с.
2. Пешков И.Б. Электрохимическое старение полимерной экструдированной изоляции силовых кабелей: исследование, испытания, диагностика, оценка ресурса / И.Б. Пешков, М.Ю. Шувалов // Изв. Акад. наук России. Энергетика. – 2008. – № 1. – С. 70-88.
3. Образцов Ю.В. Силовые кабели среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. Факторы качества / Ю.В. Образцов, А.А. Фрик, А.А. Сливов // Кабели и провода. – Москва. – 2005. – № 1. – С. 9-14.
4. Щерба А.А. Анализ процессов электрического старения полиэтиленовой изоляции высоковольтных силовых электрокабелей / А.А. Щерба, М.М. Резинкина // Технічна електродинаміка. – Тем.вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – Київ. – 2006. – Ч. 1. – С. 106-111.
5. Теоретические основы электротехники: [учебник для вузов в 3-х томах] / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.: Питер, 2003. – 463 [1] с.

Поступила 19.02.2010

Беспрозванных Анна Викторовна, к.т.н., доц.,

Набока Борис Григорьевич, д.т.н., проф.,

Москвитин Евгений Сергеевич, аспирант

Национальный технический университет

"Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"

Тел. (057) 700-60-10, e-mail: naboka@kpi.kharkov.ua,

bezprozvannych@kpi.kharkov.ua

Bezprozvannych A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S.

Substantiation of electrophysical characteristics of high-voltage power cable semiconducting screens with stitched insulation.

In power cables of average and high voltage, semiconducting screens for a conductor and insulation are utilized. Influence of dielectric permeability and specific resistance of semiconducting compositions on electric field intensity, dielectric dissipation, and transmitting capacity of a 110-kV power cable is analyzed.

Key words – power cable, semiconducting screen, dielectric permeability, electric resistance, dielectric dissipation, analysis.