

А.В. Беспрозванных, В.М. Золотарев, Ю.А. Антонец

## ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ ИЗОЛЯЦИИ ЗАЩИЩЕННЫХ ПРОВОДОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛЭП НА ИХ ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ПО ТОКУ

*Розроблено методику визначення оптимальної товщини поліетиленової зшитого і оксидної ізоляції для забезпечення найменшого теплового опору теплопередачі захищених і неізолюваних проводів. Обґрунтовано можливість застосування розробленої методики для оптимізації товщини ізоляції захищених проводів напругою 20 кВ. Показано можливість підвищення пропускної здатності за струмом на 20 % захищених проводів в порівнянні з неізолюваними дротами за рахунок оптимізації товщини їх ізоляції. Встановлено, що внутрішній перепад температури в зшитій поліетиленовій ізоляції на порядок менше в порівнянні з оксидною ізоляцією при однакових значеннях тангенса кута діелектричних втрат. Бібл. 12, табл. 3, рис. 5.*

**Ключові слова:** неізолювані проводи, захищені проводи, зшита поліетиленова ізоляція, оксидна ізоляція, тепловий опір, оптимальна товщина ізоляції, тепловий баланс, ефективний коефіцієнт теплопередачі, пропускна здатність за струмом.

*Разработана методика определения оптимальной толщины полиэтиленовой сшитой и оксидной изоляции для обеспечения наименьшего теплового сопротивления теплопередаче защищенных и неизолированных проводов. Обоснована применимость разработанной методики для оптимизации толщины изоляции защищенных проводов напряжением 20 кВ. Показана возможность повышения пропускной способности по току защищенных проводов на 20 % по сравнению с неизолированными проводами за счет оптимизации толщины их изоляции. Установлено, что внутренний перепад температуры в сшитой полиэтиленовой изоляции на порядок меньше в сравнении с оксидной изоляцией при одинаковых значениях тангенса угла диэлектрических потерь. Библ. 12, табл. 3, рис. 5.*

**Ключевые слова:** неизолированные провода, защищенные провода, сшитая полиэтиленовая изоляция, оксидная изоляция, тепловое сопротивление, оптимальная толщина изоляции, тепловой баланс, эффективный коэффициент теплопередачи, пропускная способность по току.

**Введение.** Основным направлением технической политики при проектировании, строительстве и техническом перевооружении линий электропередачи (ЛЭП) является модернизация электрических сетей и повышение их энергоэффективности с целью увеличения пропускной способности и надежности, снижения потерь на основе инновационного подхода к развитию и модернизации действующего электросетевого комплекса [1]. Техническое переоснащение, реконструкция электрических сетей и их развитие должны осуществляться на отечественной нормативной базе с учетом рекомендаций Международной электротехнической комиссии и региональных особенностей относительно условий надежности и экологической безопасности с учетом реальной стоимости земель и максимального использования основных материалов и оборудования собственного производства.

Одним из основных направлений работы в области построения высоковольтных ЛЭП с повышенной пропускной способностью по току является создание новых типов проводов: высокотемпературных неизолированных на основе алюминиевых сплавов [2] и защищенных [3, 4]. Применение высокотемпературных проводов с повышенной пропускной способностью по току в два раза при увеличении стоимости, практически, на порядок, наиболее эффективно для высоковольтных ЛЭП класса напряжения 110 кВ и выше [2].

В качестве прогрессивной альтернативы стандартным неизолированным алюминиевым проводам для высоковольтных ЛЭП класса напряжения 6-110 кВ можно рассматривать защищенные провода (ЗП). Конструкция защищенного провода представляет собой одножильный многопроволочный проводник, покрытый защитной оболочкой [3, 4]. Проводник

изготавливается из алюминиевого сплава, защитный слой – из светостабилизированного сшитого полиэтилена. Допустимая длительная рабочая температура сшитой полиэтиленовой изоляции соответствует 90 °С [3, 4]. Рабочая температура неизолированных алюминиевых проводов не превышает 75 °С [5].

Применение ЗП обеспечивает повышение пропускной способности по току высоковольтных линий электропередачи в сравнении с неизолированными алюминиевыми проводами [3, 5] (табл. 1).

Таблица 1  
Пропускная способность по току алюминиевых неизолированных и защищенных проводов на основе сшитой полиэтиленовой изоляции толщиной 2,3 мм высоковольтных ЛЭП напряжением 20 кВ  
(температура окружающего воздуха 25 °С)

Сечение жилы $S$ , мм <sup>2</sup>	70	120	150	185	240
Длительный ток нагрузки неизолированного провода $I$ , А	235	330	370	430	500
Длительный ток нагрузки ЗП $I$ , А	310	430	485	560	600

**Постановка проблемы.** Длительный рабочий ток, протекающий по одножильному проводнику, определяется на основании теплового расчета [6] и зависит от: активного сопротивления жилы  $R_g$ , температуры жилы  $T_g$  и окружающей среды  $T_c$ , тепловых сопротивлений изоляции  $R_{is}$  и окружающей среды (воздуха)  $R_{oc}$ , мощности диэлектрических потерь в изоляции  $P_d = U_f^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$  [7]

$$I = \sqrt{\frac{T_g - T_c - P_d(R_{is} + R_{oc})}{R_g \cdot (R_{is} + R_{oc})}}, \quad (1)$$

где  $U_f$  – фазное напряжение,  $\omega$  – круговая частота,  $C$  – собственная емкость провода,  $\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

© А.В. Беспрозванных, В.М. Золотарев, Ю.А. Антонец

Существующие методики расчета [4, 7] не учитывают влияние толщины изоляции на длительную токовую нагрузку проводов по значениям максимально допустимой рабочей температуры проводников (жил). Необходимость анализа влияния толщины сшитой полиэтиленовой изоляции на длительно допустимую рабочую температуру защищенных проводов является актуальной задачей, т.к. позволяет оптимизировать размеры провода.

**Целью статьи** является исследование влияния толщины изоляции защищенных проводов высоковольтных ЛЭП на их пропускную способность по току.

**Методика расчета теплового баланса.** Длительная рабочая температура провода при протекании номинального тока нагрузки определяется на основании уравнения теплового баланса между выделяемой  $P_v$  и отдаваемой  $P_{oid}$  мощностью [8]

$$P_v = P_{oid} \quad (2)$$

Мощность тепловыделения определяется тепловым сопротивлением изоляции  $R_{is}$ , температурой нагретой жилы  $T_g$  и температурой поверхности провода  $T_p$  [8]

$$P_v = \frac{T_g - T_p}{R_{is}} \quad (3)$$

Для провода, находящегося в воздухе, мощность отведенного тепла  $P_{oid}$  зависит от теплового сопротивления окружающего воздуха  $R_{oc}$  и температуры поверхности провода  $T_p$  и среды  $T_c$  [8]

$$P_{oid} = \frac{T_p - T_c}{R_{t0}} \quad (4)$$

Тепловое сопротивление изоляции  $R_{is}$ , тепловое сопротивление окружающего воздуха  $R_{oc}$  и общее тепловое сопротивление  $R_t$  определяются как [8]

$$R_{is} = \frac{1}{2\lambda} \ln\left(\frac{d_2}{d_{21}}\right), \quad R_{t0} = \frac{1}{\alpha_{ef} S_{is}}, \quad R_t = R_{is} + R_{t0}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – теплопроводность изоляции;  $d_1, d_2 = d_1 + 2\Delta_{ins}$ ,  $S_{is} = \pi d_2 l_{pr}$  – диаметр жилы, диаметр изолированного провода, толщина изоляции и поверхность охлаждения провода длиной  $l_{pr}$  соответственно;  $\alpha_{ef} = \alpha_c + \alpha_{rad}$  – эффективный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду за счет конвекции  $\alpha_c$  и излучения  $\alpha_{rad}$  [8, 9].

**Оптимальная толщина изоляции для обеспечения минимального сопротивления теплопередаче.** При расчетах учитывается наличие на поверхности неизолированного алюминиевого проводника естественной плотной пленки на основе оксида алюминия, предохраняющей его от дальнейшего контакта с воздухом. Толщина пленки составляет единицы – сотни нм в зависимости от срока эксплуатации и условий окружающей среды [9].

На рис. 1 приведены зависимости теплового сопротивления изоляции  $R_{is}$  (кривая 1), теплоотдачи в окружающую среду  $R_{oc}$  (кривая 2) и общего теплового сопротивления  $R_t$  (кривая 3) в зависимости от отношения диаметра изолированного провода  $d_2$  к диаметру алюминиевой жилы  $d_1$ :  $K_{kp} = d_2/d_1$ . Для ЗП с увеличением толщины сшитой полиэтиленовой изоляции  $\Delta_{ins}$  при неизменном диаметре жилы  $d_1$  тепловое со-

противление изоляции  $R_{is}$  возрастает (рис. 1,а, кривая 1 для  $\lambda = 0,25$  Вт/м·К), а тепловое сопротивление  $R_{oc}$  окружающего воздуха – уменьшается (рис. 1,а: кривая 2 для  $\alpha_{ef} = 17$  Вт/м<sup>2</sup>·К). Общее тепловое сопротивление  $R_t$  (кривая 3) имеет минимальное значение при пересечении кривых  $R_{is}$  и  $R_{oc}$ , соответствующее критическому (оптимальному) значению  $K_{kp}$ . При  $K > K_{kp}$  тепловое сопротивление теплопередаче возрастает, при  $K < K_{kp}$  – снижается. Критические значения  $K_{kp}$  равны 1,5 (рис. 1,а) и 70 (рис. 1,б) для защищенного провода из сшитой светостабилизированной полиэтиленовой изоляции и провода с оксидной изоляцией соответственно.

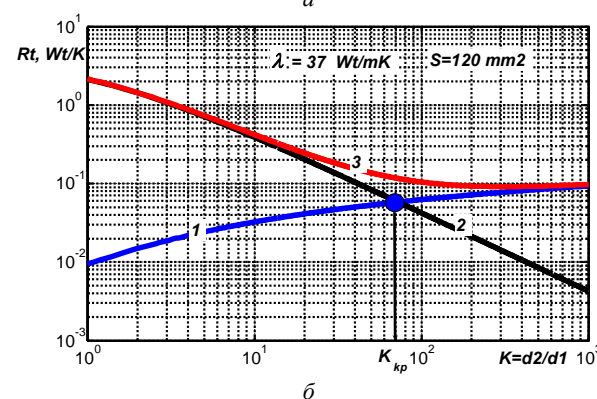
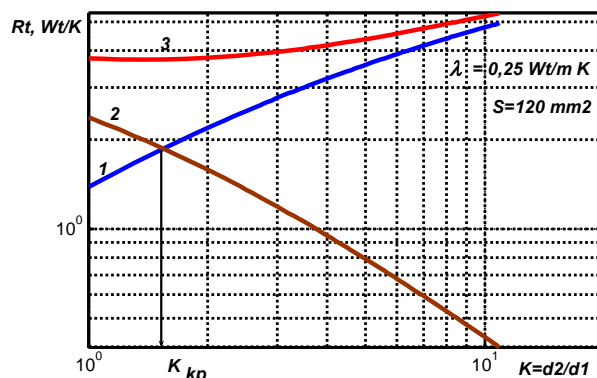


Рис. 1. К определению оптимальной толщины изоляции защищенного провода и провода с оксидной диэлектрической пленкой при сечении жилы 120 мм<sup>2</sup>

Толщина изоляции провода, соответствующая минимальному тепловому сопротивлению теплопередаче, является *оптимальной*. Для защищенного провода и провода с оксидной изоляцией оптимальная толщина изоляции равна  $\Delta_{ins\ opt} = 3,2$  мм и 434 мм соответственно.

Критические значения  $K_{kp}$  для ЗП при соответствующих сечениях жилы равны:  $K_{kp} = 1,9$  (70 мм<sup>2</sup>),  $K_{kp} = 1,5$  (120 мм<sup>2</sup>),  $K_{kp} = 1,5$  (150 мм<sup>2</sup>),  $K_{kp} = 1,4$  (185 мм<sup>2</sup>),  $K_{kp} = 1,2$  (240 мм<sup>2</sup>).

**Влияние толщины изоляции на тепловую устойчивость защищенных проводов.** На основании представленной методики выполнен тепловой расчет для длительно допустимой токовой нагрузки (см. табл. 1) защищенного и неизолированного проводов высоковольтной ЛЭП напряжением 20 кВ (табл. 2). На данном этапе расчета не учитывается мощность диэлектрических потерь  $P_d$  в изоляции. Эффективный

коэффициент теплоотдачи (рис. 2) определен с использованием критериального уравнения естественной конвекции и уравнения Стефана-Больцмана [8, 9].

Таблица 2

Влияние толщины изоляции на тепловую устойчивость ЗП высоковольтных ЛЭП напряжением 20 кВ

Сечение алюминиевой жилы $S$ , мм <sup>2</sup>				
70	120	150	185	240
Длительная токовая нагрузка $I$ , А				
310	430	485	560	600
<b>1. Температура окружающего воздуха 25 °С</b>				
1.1. ЗП из сшитой светостабилизированной полиэтиленовой изоляции				
Температура алюминиевой жилы $T_g$ , °С: в числителе – для оптимальной толщины изоляции, в знаменателе – на 33 % меньше оптимальной				
81/85	80/84	80/82	80/81	75/77
Температура поверхности провода $T_p$ , °С: в числителе – для оптимальной толщины изоляции, в знаменателе – на 33 % меньше оптимальной				
75/80	75/80	75/77	75/77	75/76
1.2. Неизолированный алюминиевый провод				
Температура жилы $T_g$ , °С: в числителе – для неизолированного, в знаменателе – с оксидной пленкой толщиной 100 нм				
105/105	95/95	92/92	90/90	82/82
<b>2. Температура окружающего воздуха 30 °С</b>				
2.1. ЗП из сшитой светостабилизированной полиэтиленовой изоляции				
Температура алюминиевой жилы $T_g$ , °С: в числителе – для оптимальной толщины изоляции, в знаменателе – на 33% меньше оптимальной				
85/90	85/85	85/85	85/87	77/79
Температура поверхности провода $T_p$ , °С: в числителе – для оптимальной толщины изоляции, в знаменателе – на 33 % меньше оптимальной				
80/85	80/85	80/82	80/82	76/78
2.2. Неизолированный алюминиевый провод				
Температура жилы $T_g$ , °С: в числителе – для неизолированного, в знаменателе – с оксидной изоляцией толщиной 100 нм				
120/120	105/105	95/95	95/95	87/87

На рис. 2 представлены результаты расчета эффективного коэффициента теплоотдачи (рис. 2,а) и теплового сопротивления окружающей среды (рис. 2,б) защищенного и неизолированного провода с разными сечениями алюминиевой жилы. Увеличение поверхности охлаждения защищенного провода в сравнении с неизолированным проводом при одинаковых сечениях жилы приводит к уменьшению эффективного коэффициента теплоотдачи и теплового сопротивления (рис. 2,а,б): кривые 1 и 1' – для защищенного провода с сечением жилы 120 мм<sup>2</sup> и 150 мм<sup>2</sup>, 2 и 2' – для неизолированного провода сечением 120 мм<sup>2</sup> и 150 мм<sup>2</sup> соответственно.

Результаты теплового расчета показывают, что защищенные провода, толщина изоляции которых на 33 % меньше оптимальной, обеспечивают пропускную способность по току при повышенной температуре окружающего воздуха 30 °С: температура жилы не превышает допустимую рабочую температуру сшитой полиэтиленовой изоляции (см. табл. 2, кривая 4 рис. 3,а).

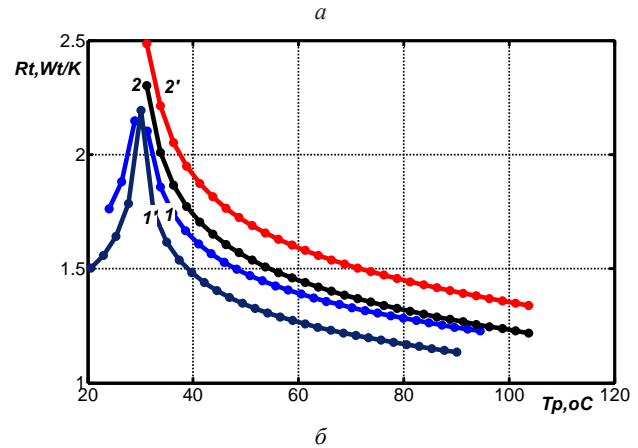
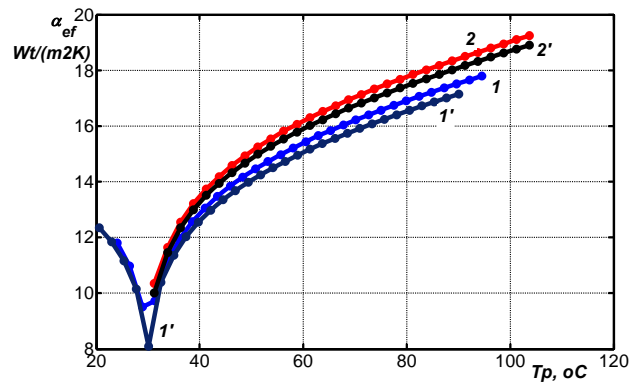


Рис. 2. Влияние поверхности охлаждения провода на температурные зависимости эффективного коэффициента теплоотдачи (а) и теплового сопротивления окружающей среды (воздуха) (б)

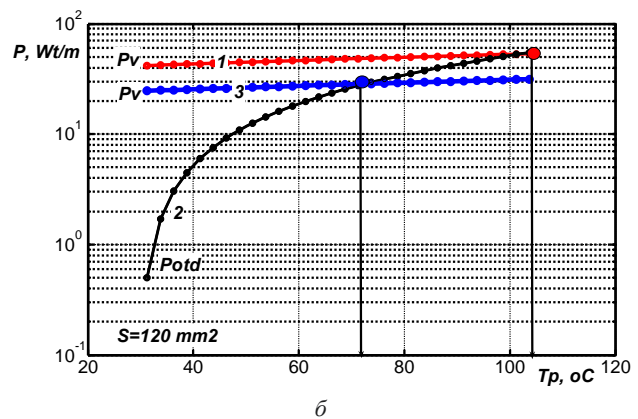
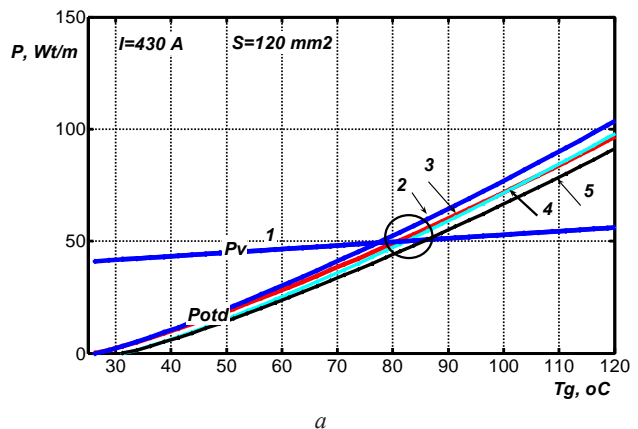


Рис. 3. Тепловой баланс в защищенном (а) и неизолированном (б) проводе

Уменьшение толщины сшитой полиэтиленовой изоляции позволяет уменьшить массо-габаритные размеры защищенного провода.

На рис. 3,а кривая 1 соответствует выделяемой мощности, кривые 2, 3, 4 и 5 – отдаваемой: кривые 2 и 4 соответствуют оптимальной толщине изоляции, кривые 3, 5 – на 33 % меньше оптимальной при температуре окружающего воздуха 25 °С (кривые 2, 3) и 30 °С (кривые 4, 5).

Температура жилы  $T_g$  неизолированных проводов превышает допустимую рабочую температуру на 30 °С – 45 °С (для провода сечением 70 мм<sup>2</sup>) и 7 °С – 12 °С (для провода сечением 240 мм<sup>2</sup>) (см. табл. 2 и рис. 3,б).

Наличие на поверхности голого провода оксидной пленки толщиной 100 нм не влияет на условие теплового баланса: температура на поверхности провода остается постоянной.

Требование к ограничению рабочей температуры неизолированных проводов обусловлено процессом возможного отжига холоднотянутых алюминиевых проволок, увеличением пластического удлинения и, как следствие, стрелы провисания. При токе нагрузки 430 А кривые отдаваемой  $P_{out}$  (кривая 2) и выделяемой  $P_v$  (кривая 1) мощности пересекаются в точке, соответствующей температуре 105 °С (рис. 3,б). Уменьшение тока нагрузки до 330 А, т.е. на 20 %, приводит к пересечению  $P_v$  (кривая 3) и  $P_{out}$  (кривая 2) в точке, соответствующей рабочей температуре 75 °С (рис. 3,б).

**Влияние диэлектрических потерь в изоляции на пропускную способность по току защищенного провода.** Внутренний перепад температуры в изоляции (см. (1))  $\Delta T_{ins} = P_d(R_{is} + R_{oc})$  определяется мощностью диэлектрических потерь  $P_d = U_f^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$ , которая зависит от электрофизических характеристик изоляции: тангенса угла диэлектрических потерь изоляции и относительной диэлектрической проницаемости, определяющей емкость провода. Емкость одиночного фазного провода с изоляцией определяется на основе расчета электрического поля в кусочно-однородной среде методом вторичных источников [11], который сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Первые  $N_e$  строк СЛАУ вытекают из интегрального уравнения Фредгольма первого рода для потенциалов на поверхности токопроводящей жилы (электрода). Следующие  $N_d$  строк – из интегрального уравнения Фредгольма второго рода для скачков нормальной составляющей напряженности поля  $E_n$ , претерпевающих излом на границах раздела диэлектрических сред с относительными диэлектрическими проницаемостями  $\epsilon_1$  и  $\epsilon_2$  для выполнения условия:  $\epsilon_1 \cdot E_{1n} = \epsilon_2 \cdot E_{2n}$ . Форма записи объединенной СЛАУ имеет вид [12]

$$\bar{A} \cdot \bar{\sigma} = \bar{U}, \quad (6)$$

где  $\bar{\sigma}$  – матрица-столбец неизвестных расчетных плотностей вторичных зарядов, Кл/м<sup>2</sup>;  $\bar{U}$  – матрица-столбец, первые  $N_e$  членов которой отражают заданные потенциалы узлов, лежащих на электроде, а остальные – равны нулю (потенциалы узлов, лежащих

на границе раздела диэлектрических сред);  $\bar{A}$  – квадратная матрица коэффициентов.

Общее число узлов (число неизвестных плотности заряда) равно:  $N = N_e + N_d$ . Решая СЛАУ (6) численным методом, определяется расчетная плотность (в вакууме) вторичных зарядов. Напряженность поля для поверхности электрода определяется расчетной плотностью зарядов  $E_i = \sigma_i / \epsilon_0$  и для границ раздела

диэлектрических сред  $E_i = \frac{\sigma_i}{2\epsilon_0} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)$ , где  $\alpha$  – параметр, связанный с диэлектрической проницаемостью

смежных сред:  $\alpha = (\epsilon_2 - \epsilon_1) / (\epsilon_2 + \epsilon_1)$  [12]. Истинная плотность  $\sigma'$  зарядов на поверхности жилы, которая изолирована диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_2$ , больше в  $\epsilon_2$  раз [12]. Искомая емкость определяется как отношение истинного заряда к заданному фазному напряжению. Провода находятся в воздухе с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1 = 1$ .

На рис. 4 показаны развертки напряженности электрического поля в зависимости от длины образующей  $SDL$  ( $SDL$  соответствует сокращению «sum of DL» – сумма множества участков малой длины) для ЗП и неизолированного провода напряжением 20 кВ с сечением жилы 120 мм<sup>2</sup>. Кривая 1 – оптимальная толщина изоляции (3,2 мм) и кривая 2 – на 33 % меньше оптимальной (2,3 мм) для защищенного провода из сшитой полиэтиленовой изоляции: (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_2 = 2,3$ ). Кривая 3 – для провода с оксидной изоляцией толщиной 100 нм (относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_2 = 9$ : для сплошной оксидной пленки, получаемой, например, методом высоковольтного оксидирования, значение относительной диэлектрической проницаемости равно  $\epsilon = 8-10$  на частоте 50 Гц). Участок I – распределение напряженности по поверхности жилы, участок II – по поверхности изоляции. Относительная диэлектрическая проницаемость в значительной степени влияет на распределение напряженности электрического поля (сравни кривые 1, 2 и 3, рис. 4): напряженность электрического поля на поверхности провода с оксидной пленкой на 30 % больше в сравнении с ЗП с изоляцией на основе сшитого полиэтилена.

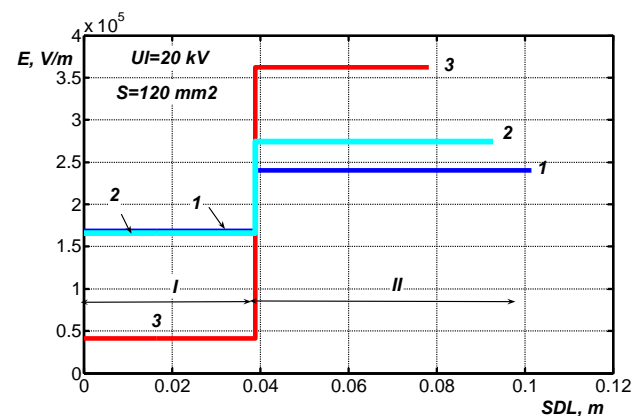


Рис. 4. Влияние относительной диэлектрической проницаемости и толщины изоляции на распределение напряженности электрического поля по поверхности провода

В табл. 3 приведены результаты расчета собственной емкости проводов для разных сечений и толщины изоляции.

Таблица 3

Влияние толщины изоляции на собственную емкость проводов высоковольтных ЛЭП напряжением 20 кВ

Сечение алюминиевой жилы $S$ , мм <sup>2</sup>				
70	120	150	185	240
<b>1. Емкость защищенного провода <math>C</math>, пФ/м</b> оптимальная толщина изоляции				
11,1	11,5	11,7	11,9	12,1
толщина изоляции на 33 % меньше оптимальной				
10,9	11,4	11,5	11,7	12,0
<b>2. Емкость провода <math>C</math>, пФ/м</b> толщина оксидной изоляции 100 нм				
10,5	11,0	11,3	11,5	11,8

Результаты расчетов показывают (рис. 5), что расположенные треугольником на расстоянии 50 см друг от друга соседние фазные защищенные провода приводят к уменьшению собственной емкости проводов: на 18 % – для провода в вершине треугольника ( $C_1 = 9,7$  пФ/м); на 8 % – для двух других ( $C_2 = 10,6$  пФ/м и  $C_3 = 10,6$  пФ/м).

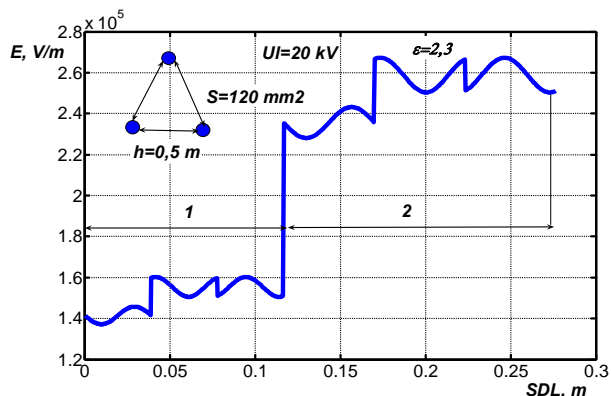


Рис. 5. Влияние рядом расположенных защищенных проводов на распределение напряженности электрического поля по поверхностям жил (кривая 1) и сшитой полиэтиленовой изоляции (кривая 2)

Мощность диэлектрических потерь в изоляции из сшитого полиэтилена составляет  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Вт/м, 0,005 Вт/м для значений  $\text{tg} \delta = 0,1\%$  и  $1\%$  соответственно. Тепловое сопротивление провода равно  $1 \text{ м}^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$  при температуре жилы  $90^{\circ}\text{C}$  и окружающего воздуха  $30^{\circ}\text{C}$  (см. рис. 2,б). Внутренний перепад температуры в изоляции  $\Delta T_{ins} = P_d(R_{is} + R_{oc})$  (см. формулу (1)) составляет  $0,12\%$  и  $1,2\%$  для соответствующих значений  $\text{tg} \delta$  в сравнении с общим перепадом температуры между жилой и окружающим воздухом  $\Delta T = T_g - T_c$ . Для провода с оксидной изоляцией  $\Delta T_{ins} = 10\%$  ( $\text{tg} \delta = 1\%$ ), что обуславливает уменьшение допустимой токовой нагрузки в неизолированном проводе.

#### Выводы.

1. Впервые разработана методика определения оптимальной толщины полиэтиленовой сшитой и оксидной изоляции для обеспечения наименьшего теплового сопротивления теплопередаче защищенных проводов, применение которой позволяет повысить

пропускную способность по току проводов на 20 % по сравнению с неизолированными проводами.

2. Обоснована применимость разработанной методики для оптимизации толщины изоляции, как отдельных защищенных проводов различных типов, так и для высоковольтных ЛЭП на их основе, при условии ограничения минимального расстояния между фазными проводами ЛЭП на уровне 0,5 м.

3. Результаты выполненных исследований, при условии их соответствующего экспериментального обоснования, могут стать научной основой для создания нового класса компактных высоковольтных ЛЭП с повышенной пропускной способностью по току.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стандарт підприємства. Технічна політика ДП «НЕК «УКРЕНЕРГО» у сфері розвитку та експлуатації магістральних та міждержавних електричних мереж / СОУ НЕК. – 20.261. – Київ, 2017. – 84 с.
2. Энергоэффективные провода нового поколения для ЛЭП / Каталог ООО «Сим-Росс-Ламифил». – 2014. – 26 с.
3. ДСТУ 4743:2007. Проводи самоутримні ізольовані та захищені для повітряних ліній електропередавання. Загальні технічні умови. – 2007. – 26 с.
4. Щербань А.А., Перетятко Ю.В., Золотарев В.В. Самонесущие изолированные и высоковольтные защищенные провода. – Институт электродинамики НАН Украины, Национальный технический университет Украины «КПИ», ЗАО «Завод «Южкабель», 2008. – 271 с.
5. Guide for qualifying high temperature conductors for use on overhead transmission lines / CIGRÉ TB 426. – 2010. – 44 p.
6. IEC 60287-1-1:2006 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General specifications.
7. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обоснование электрофизических характеристик полупроводящих экранов силовых кабелей высокого напряжения со сшитой изоляцией // Електротехніка і електромеханіка. – 2010. – №3. – С. 44-47. doi: 10.20998/2074-272X.2010.3.10.
8. Беспрозванных А.В., Набока Б.Г. Математические модели и методы расчета электроизоляционных конструкций. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2012. – 108 с.
9. Carslaw H.S., Jaeger J.C. Conduction of heat in solids. – Second Ed. Clarendon Press, London. – 2003. – 510 p.
10. Hunter M., Fowle P. Natural and thermally formed oxide films on aluminium // Journal of the Electrochemical Society. – 1956. – vol.103. – no.9. – pp. 482-485. doi: 10.1149/1.2430389.
11. Набока Б.Г. Расчеты электростатических полей в электроизоляционной технике: учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей. – К: ИСДО, 1995. – 120 с.
12. Беспрозванных А.В. Сильное электрическое поле и частичные разряды в многожильных кабелях // Технічна електродинаміка. – 2010. – №1. – С. 23-29.

#### REFERENCES

1. Enterprise standard. Technical policy of SE «NEK» UKRENERGO» in the field of development and operation of in trunk and interstate electric networks. SOU NEC 20.261. Kyiv, 2017. 84 p. (Ukr).
2. Catalog of LLC «Sim-Ross-Lamifil». Energy-efficient wires of a new generation for power lines. 2014. 26 p. (Rus).
3. DSTU 4743: 2007. Provody samoutrimni izolovani ta zakhyshcheni dlia povitrianykh linii elektropredavannia. Zahalni tekhnichni umovy [State Standard of Ukraine DSTU 4743: 2007. Wires self-supporting insulated and protected for overhead transmission lines. General specifications]. Kyiv, 2007. 26 p. (Ukr).

4. Shcherba A.A., Peretyatko Yu.V., Zolotaryov V.V. *Samone-sushchie izolirovannye i vysokovol'tnye zashchishchennye provoda* [Self-supporting insulated and high-voltage protected wires]. Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine, National Technical University of Ukraine «KPI», Private Joint-stock company Yuzhcable works Publ., 2008. 271 p. (Rus).
5. *Guide for qualifying high temperature conductors for use on overhead transmission lines*. CIGRÉ TB 426. 2010. 44 p.
6. IEC 60287-1-1:2006 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses. General specifications.
7. Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Substantiation of electrophysical characteristics of high-voltage power cable semiconducting screens with stitched insulation. *Electrical engineering & electromechanics*, 2010, no.3, pp. 44-47. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2010.3.10.
8. Bezprozvannykh G.V., Naboka B.G. *Matematicheskie modeli i metody rascheta elektroizoliatsionnykh konstruktiv* [Mathematical models and methods of calculation of electrical designs]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2012. 108 p. (Rus).
9. Carslaw H.S., Jaeger J.C. *Conduction of heat in solids. Second Ed.* Clarendon Press, London, 2003. 510 p.
10. Hunter M., Fowle P. Natural and thermally formed oxide films on aluminium. *Journal of the Electrochemical Society*, 1956, vol.103, no.9, pp. 482-485. doi: 10.1149/1.2430389.
11. Naboka B.G. *Raschety elektrostatischeskikh polei v elektroizoliatsionnoi tekhnike: uchebnoe posobie dlia studentov elektroenergeticheskikh spetsial'nostei* [Settlements electrostatic fields in the insulating technique: a textbook for students of electric power specialties]. Kiev, IEDL Publ., 1995. 120 p. (Rus).
12. Bezprozvannykh A.V. High electric field and partial discharges in bundled cables. *Technical electrodynamics*, 2010, no.1, pp. 23-29. (Rus).

Поступила (received) 25.01.2018

Безпрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Золотарев Владимир Михайлович<sup>2</sup>, д.т.н., проф.,  
Антонец Юрий Афанасьевич<sup>2</sup>, к.т.н.,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +380 57 7076010,  
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> ПАО «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ»,  
61099, Харьков, ул. Автогенная, 7,  
тел/phone +380 57 7545312,  
e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua, antonets@yuzhcable.com.ua

G.V. Bezprozvannykh<sup>1</sup>, V.M. Zolotaryov<sup>2</sup>, Y.A. Antonets<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
2, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

<sup>2</sup> Private Joint-stock company Yuzhcable works,  
7, Avtogennaya Str., Kharkiv, 61099, Ukraine.

**Effect of the thickness of insulation of protected wires of high-voltage overhead transmission lines to their current carrying capacity.**

**Introduction.** The main direction of technical policy in the design, construction and technical re-equipment of transmission lines is the modernization of electrical networks and increase their energy efficiency in order to increase the throughput and reliability. **Problem.** Existing calculation methods do not take into account the influence of insulation thickness on the long-term current load of the wires according to the values of the maximum permissible working temperature of the conductors. **Purpose.** The investigation of the influence of insulation thickness of the protected wires of high-voltage electric transmission lines on their current carrying capacity. **Methodology.** The long operating temperature of the wire when the rated load current flows is determined based on the heat balance equation. **Results.** A method has been developed for determining the optimum thickness of polyethylene cross linked and oxide insulation to provide the lowest thermal resistance to the heat transfer of protected wires, the use of which allows increasing the current carrying capacity by 20 % compared to bare wires. It is shown that the internal temperature drop in cross linked polyethylene insulation is an order of magnitude smaller in comparison with the oxide insulation at identical values of the dielectric loss tangent. **Originality.** The calculations take into account the presence on the surface of a non-insulated aluminum conductor of a natural dense film based on aluminum oxide, which protects it from further contact with air. The capacitance of a single phase conductor with insulation is determined on the basis of the calculation of the electric field in a piecewise homogeneous medium by the method of secondary sources. References 12, tables 3, figures 5.

**Key words:** bare conductor, protected wire, cross-linked polyethylene insulation, oxide insulation, thermal resistance, optimal insulation thickness, heat balance, effective heat transfer coefficient, current carrying capacity.