

А.В. Беспрозванных, И.А. Мирчук

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ НОРМАЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ВИТЫХ ПАР В ПОЛИВИНИЛХЛОРИДНОЙ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОЙ ВЛАЖНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ

*Представлені результати прискореного старіння в умовах підвищеної вологості та температури неекранованого кабелю на основі чотирьох неекранованих витих пар з поліетиленовою термопластичною ізоляцією в захисній оболонці з полівінілхлоридного пластикату. Оцінка стійкості кабелю до дії зовнішніх факторів, що впливають, виконана за частковими ємностями та тангенсу кута діелектричних втрат ізоляційних проміжків між жилами. Конструктивна особливість кабелю призводить до групування часткових ємностей в чотири характерних області. Встановлено динаміку зміння діелектричних параметрів в процесі гігроскопічного зволоження, природної сушки та теплового старіння при температурі 90 °С зразка кабелю. Визначено коефіцієнти парної кореляції між діелектричними параметрами в початковому стані та після зовнішніх факторів. Показано, що конструкція кабелю стійка до дії підвищеної вологості та температури.* Бібл. 5, табл. 1, рис. 5.

*Ключові слова:* кабелі на основі витих пар для суднобудування, прискорене старіння, гігроскопічне зволоження, теплове старіння, часткові ємності, тангенс кута діелектричних втрат, строк служби.

*Представлены результаты ускоренного старения в условиях повышенной влажности и температуры образца неэкранированного кабеля на основе витых пар с полиэтиленовой термопластичной изоляцией в защитной оболочке на основе поливинилхлоридного пластика. Оценка устойчивости кабеля к действию внешних воздействующих факторов выполнена по частичным емкостям и тангенсу угла диэлектрических потерь изоляционных промежутков между жилами. Конструктивная особенность кабеля приводит к группированию частичных емкостей в четыре характерные области. Установлена динамика изменений диэлектрических параметров в процессе гигроскопического увлажнения, естественной сушки и теплового старения при температуре 90 °С образца кабеля. Определены коэффициенты парной корреляции между диэлектрическими параметрами в исходном состоянии и после внешних воздействующих факторов. Показано, что конструкция кабеля устойчива к действию повышенной влажности и температуры.* Библ. 5, табл. 1, рис. 5.

*Ключевые слова:* кабели на основе витых пар для судостроения, ускоренное старение, гигроскопическое увлажнение, тепловое старение, частичные емкости, тангенс угла диэлектрических потерь, срок службы.

**Введение.** Развитие объектов инфраструктуры судостроения предусматривает наличие современных разветвленных структурированных систем управления с высокоскоростной передачей данных.

К судовым кабелям предъявляются более высокие требования по электрическим, монтажным характеристикам, стойкости к внешним воздействующим факторам (температуре, влажности, вибрации, солнечному излучению и т.д.), чем к кабелям общепромышленного назначения. Кабели промышленного интерфейса должны соответствовать критериям безопасности и техническим требованиям, в первую очередь, по пожаровзрывобезопасности [1, 2].

Следует отметить, что порядка 60-70 % от общего количества электрических кабелей на кораблях составляют кабели систем управления, сигнализации и связи. Развитие кабелей для структурированных кабельных систем на основе витых пар для судостроения осуществляют по двум основным направлениям: повышение пожарной безопасности кабелей и повышение длительно допустимой рабочей температуры посредством применения новых, более теплоустойчивых, электроизоляционных материалов. В [3] показано, что кабели общепромышленного применения на основе витых пар категории 5е могут работать в условиях повышенной радиационной обстановки.

**Цель статьи** – обоснование возможности работы в условиях повышенной влажности и высоких рабочих температур неэкранированного кабеля на основе неэкранированных витых пар с термопластичной полиэтиленовой изоляцией в защитной поливинилхло-

ридной (ПВХ) оболочке по результатам ускоренного старения.

**Характерные области частичных емкостей изоляционных промежутков.** Оценка устойчивости кабеля к действию внешних воздействующих факторов выполнена по частичным емкостям и тангенсу угла диэлектрических потерь изоляционных промежутков между жилами. Усадка изоляции в процессе теплового старения либо набухание в ходе длительного гигроскопического увлажнения приводит к изменению характеристик изоляционных промежутков кабеля.

Для кабелей на основе витых пар характерна случайная ориентация пар. Шаги скрутки неэкранированных витых пар (UTP) разные для обеспечения требуемой помехозащищенности: в результате происходит усреднение расстояний между жилами, из-за чего число групп частичных емкостей уменьшается. Так, в 4-парном кабеле на основе UTP (рис. 1, 2) расстояние между жилами 1 и 3 в среднем такое же, как между жилой 1 и любой другой – 4, 5, 6, 7 или 8. В результате все частичные емкости между 8-мью жилами (а таких емкостей столько же, сколько сторон у 8-ми угольника, т.е.  $N = \frac{n(n-1)}{2} = \frac{8(8-1)}{2} = 28$ ) группируются всего в 4 области – рис. 3.

Первая область – емкости между соприкасающимися жилами одной и той же пары ( $i-j$  – промежутки: 1 – 2, 3 – 4, 5 – 6, 7 – 8, рис. 1); вторая – емкости меж-

ду жилами соприкасающихся пар ( $i-k$  – промежутки, например: 1 – 7, 1 – 8, 2 – 7, 2 – 8, рис. 1); третья – емкости между жилами не соприкасающихся пар ( $i-l$  – промежутки: 1 – 5, 1 – 6, 2 – 5, 2 – 6 и т.д., рис. 1). Четвертую группу могут образовать измерения по схеме «жила – против всех остальных» ( $i-s$  – область изоляции жил, например, 1 – 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, рис. 1).

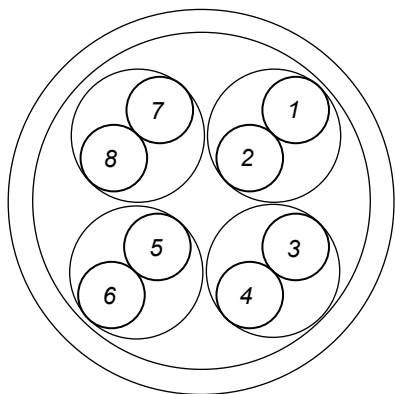


Рис. 1. Схема неэкранированного кабеля на основе витых пар (UTP): 4 витые пары, причем с разными шагами скрутки (случай одинаковой ориентации витых пар, возможный на отдельных сечениях кабеля)

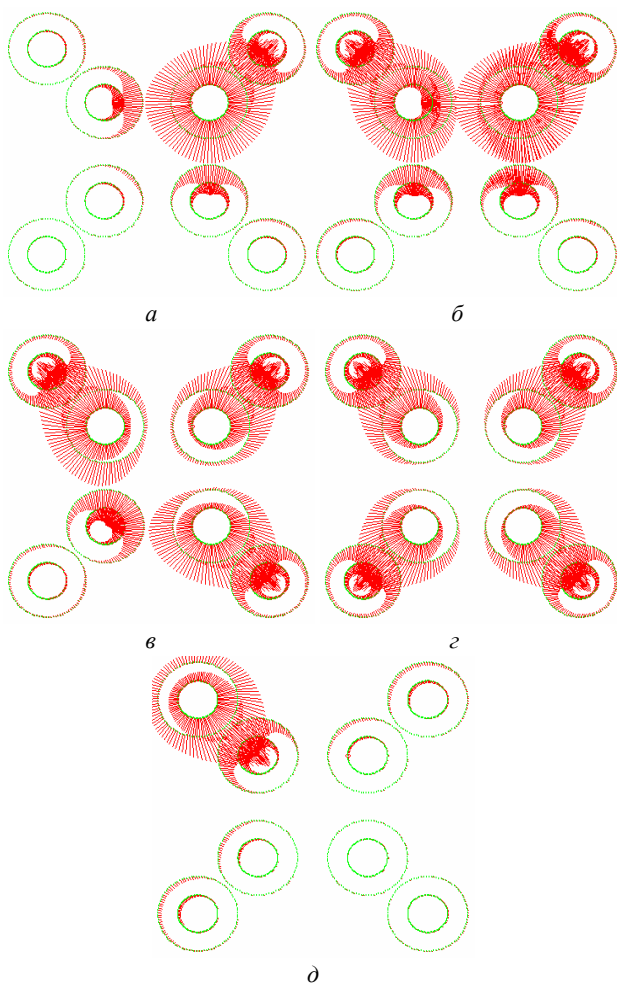


Рис. 2. Картины силовых линий электрического поля в сечении UTP-кабеля с разной ориентацией пар при разных схемах подачи потенциала на жилы

Нормативные характеристики изоляционных

промежутков определены на основе расчета электростатического поля. На рис. 2 представлены силовые линии электрического поля при разных схемах подачи потенциала на жилы: на вторую жилу первой пары (рис. 2,а); на вторую жилу первой и восьмую жилу четвертой пары (рис. 2,б); на вторую жилу первой, восьмую жилу четвертой и третью жилу второй пары (рис. 2,в); на вторую жилу первой, восьмую жилу четвертой, третью жилу второй и пятую жилу третьей пары (рис. 2,г) соответственно. На основе расчета электростатического поля определены погонные емкости ( $C$ ) и доли запасенной энергии ( $\eta$ ) [4] потенциальных жил по отношению к полной энергии, накопленной в кабеле (рис. 3):  $C = 53,0$  пФ/м;  $\eta = 0,506$  – для одной внутренней (рис. 2,а);  $C = 37,7$  пФ/м;  $\eta = 0,473$  – для одной внешней (рис. 2,д);  $C = 101,9$  пФ/м;  $\eta = 0,524$  – для двух внутренних (рис. 2,б);  $C = 114,2$  пФ/м;  $\eta = 0,571$  – для четырех внутренних (рис. 2,в);  $C = 6,214$  пФ/м;  $\eta = 0,0085$  – для восьми жил вместе. Доля энергии, запасенной в твердой изоляции жил, составляет около 50 %. Следовательно, диэлектрические потери в изоляционных промежутках (типа «твердая фаза – воздух») тоже должны составлять около 50 % от потерь в собственно твердом диэлектрике.

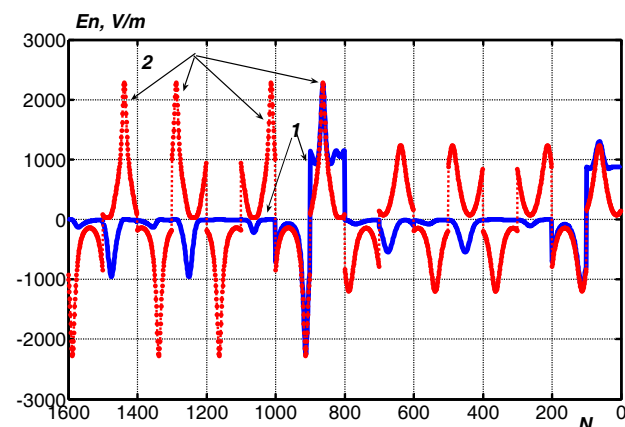


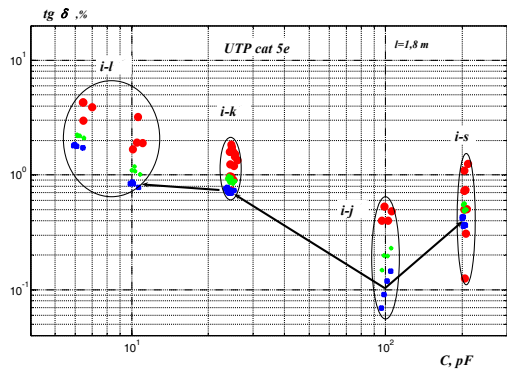
Рис. 3. Распределение напряженности электрического поля при подаче потенциала на одну (кривая 1) и четыре (кривая 2) внутренние жилы витых пар в UTP-кабеле (число основных узлов  $N = 2500$ , т.е. порядок системы линейных алгебраических уравнений)

**Динамика изменений параметров изоляционных промежутков в результате ускоренного старения.** Экспериментальные исследования выполнены на образце кабеля UTP категории 5е. длиной 1,8 м. Их целью является проверка устойчивости кабеля базовой конструкции с термопластичной сплошной полиэтиленовой изоляцией в защитной оболочке на основе поливинилхлоридного пластика к воздействию повышенной влажности и температуры. Цикл старения в условиях повышенной 100 % влажности в эксикаторе (гигроскопическое увлажнение образца – через не герметизированные торцы) выполнен в течение 336 часов. Затем образец находился в условиях естественной сушки на протяжении 1440 часов. Тепловое старение в термостате при 90 °С проведено в два этапа: первый – в течение 206 часов, второй – в течение 260

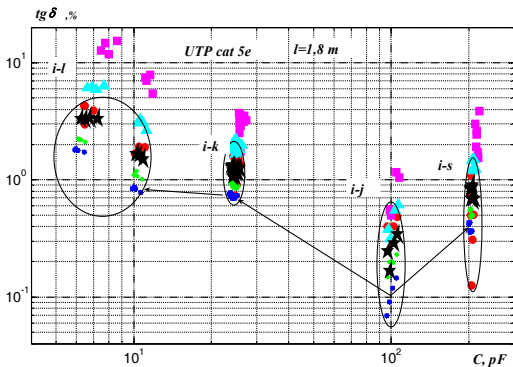
часов.

В исходном состоянии и после ускоренного старения выполнены измерения емкости и тангенса угла диэлектрических потерь всех изоляционных промежутков при частотах 100 Гц, 1 и 10 кГц.

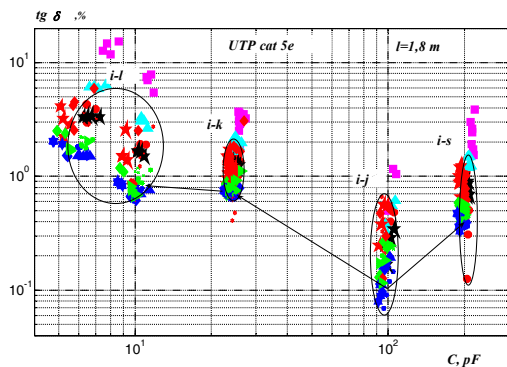
На рис. 4,а представлены параметры изоляционных промежутков образца кабеля UTP категории 5е в исходном состоянии. Для промежутков «жила – жила той же пары» наблюдаются наименьшие уровни  $\text{tg}\delta$ , причем с ростом частоты  $\text{tg}\delta$  падает.



а



б



в

Рис. 4. Динамика изменений частичных емкостей и тангенса угла диэлектрических потерь в процессе ускоренного старения в условиях повышенной влажности и температуры

Внешнее воздействие – гигроскопическое увлажнение – приводит к сильному изменению параметров только некоторых областей – рис. 4,б (экспериментальные точки лежат за пределами выделенных областей). Это следствие появления влаги в капиллярах, образованных соприкасающимися изолированными жилами [5]. На рис. 5,б представлены параметры изоляционных промежутков в исходном состоянии и по-

сле двухнедельной выдержки (336 часов) в эксикаторе. Емкости промежутков возросли мало, зато  $\text{tg}\delta$  вырос значительно сильнее, причем в большей степени для удаленных друг от друга жил (область малых частичных емкостей, левая часть рис. 4,б). После извлечения из эксикатора и естественной сушки на протяжении двух месяцев (1440 часов) наблюдается уменьшение  $\text{tg}\delta$  из-за удаления влаги с поверхности изолированных жил и уменьшение частичных емкостей из-за набухания изоляции (диффузия влаги в толщу изоляции).

В результате теплового старения при температуре 90 °С продолжается уменьшение  $\text{tg}\delta$  из-за удаления влаги из толщи изоляции и рост частичных емкостей из-за усадки изоляции. Сушка кабеля при температуре 90 °С в течение 260 часов привела к почти полному восстановлению электрических характеристик всех его изоляционных промежутков (см. рис. 4,в). При этом ПВХ оболочка несколько изменилась в цвете, потеряла блеск, но сохранила эластичность.

Наблюдается положительная корреляция, как для частичных емкостей, так и для тангенса угла диэлектрических потерь (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты взаимной парной корреляции между емкостью в исходном состоянии и емкостью после ускоренного старения ( $r_C$ ), между тангенсом угла диэлектрических потерь в исходном состоянии и после ускоренного старения ( $r_{\text{tg}\delta}$ )

Частота измерений $f$ , кГц	Условия ускоренного старения			
	336 часов в условиях 100 % влажности	1440 часов в естественных условиях	206 часов теплового старения при температуре 90 °С	456 часов теплового старения при температуре 90 °С
0,1	$r_C$			
	0.9998	0.9998	0.9999	0.9998
	<b>0.9001</b>	<b>0.8176</b>	<b>0.8578</b>	<b>0.7876</b>
1	$r_C$			
	1.0000	0.9999	0.9999	0.9999
	$r_{\text{tg}\delta}$			
0.9810	0.9909	0.9876	0.9622	
10	$r_C$			
	1.0000	1.0000	0.9999	0.9999
	$r_{\text{tg}\delta}$			
0.9111	0.9966	0.9942	0.9904	

Значения выборочного линейного парного коэффициента корреляции К. Пирсона  $r$  большие для частичных емкостей и, практически, мало изменяются при разных частотах (см. табл. 1). Для тангенса угла диэлектрических потерь характерна более выраженная частотная зависимость  $r_{\text{tg}\delta}$ : коэффициент парной корреляции имеет большие значения при частоте 1 кГц и 10 кГц, что связано как с процессами поляризации, так и электропроводности в изоляции.

В качестве адекватного срока эксплуатации образца кабеля принимается расчётный срок эксплуатации, полученный на основании параметров режима ускоренного старения, адекватного старению кабелей в условиях эксплуатации (рис. 5). Время нормальной эксплуатации кабеля составляет 1,14 года и 6,8 года при рабочей температуре 60 °С и 40 °С

соответственно.

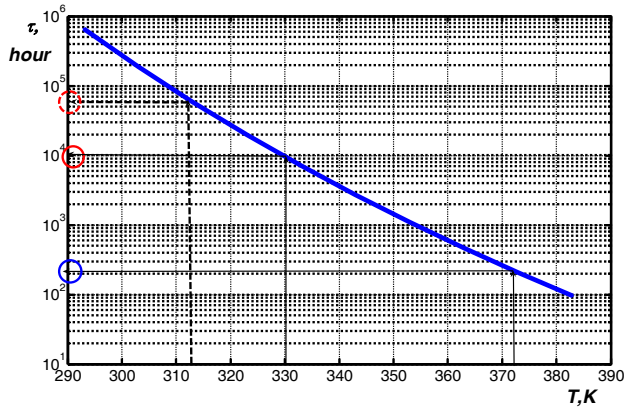


Рис. 5. К оценке срока службы кабеля при нормальных условиях эксплуатации

**Выводы.** Результаты ускоренного старения неэкранированного кабеля на основе неэкранированных витых пар с термопластичной полиэтиленовой изоляцией в защитной оболочке на основе ПВХ-пластиката в условиях повышенной влажности и температуры показывают, что конструкция устойчива к внешним воздействующим факторам. Длительная выдержка при температуре 90 °С эквивалентна эксплуатации при температуре 40 °С в течение 6,8 лет. При более высоких рабочих температурах срок эксплуатации кабеля существенно сокращается.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IEC 60092-359:2014, Electrical Installations In Ships – Part 359: Sheathing Materials For Shipboard Power And Telecommunication Cables By IEC TC/SC 18A. – 50 p.
2. IEC 60332-1-2:2004, Tests on electric cables under fire conditions – Part 1: Test on a single vertical insulated wire or cable.
3. Безпрозванных А.В., Набока Б.Г., Морозова Е.В. Радиационная стойкость кабелей общепромышленного назначения // Электротехніка і електромеханіка. – 2006. – №3. – С. 82-86. doi: 10.20998/2074-272X.2006.3.16.
4. Безпрозванных А.В., Набока Б.Г., Москвитин Е.С. Обследование изоляции трехфазных кабелей в металлической оболочке // Электричество. – №1. – 2010. – С. 48-54.
5. Безпрозванных А. В. Диэлектрическое сканирование поперечной структуры многожильных кабелей методом совокупных измерений // Технічна електродинаміка. – 2008. – №3. – С. 30-36.

#### REFERENCES

1. IEC 60092-359:2014, Electrical Installations In Ships – Part 359: Sheathing Materials For Shipboard Power And Telecommunication Cables By IEC TC/SC 18A. 50 p.
2. IEC 60332-1-2:2004, Tests on electric cables under fire conditions – Part 1: Test on a single vertical insulated wire or cable.
3. Bezprozvannyh G.V., Naboka B.G., Morozova E.V. Radiating resistance of common commercial cables of internal laying. *Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.3, pp. 82-86. doi: 10.20998/2074-272X.2006.3.16. (Rus).
4. Bezprozvannyh A.V., Naboka B.G., Moskvitin E.S. Examination of the three-phase insulation of cables in a metal shell. *Electricity*, 2010, no.1, pp. 48-54. (Rus).

5. Bezprozvannyh A.V. The electrical scanning of the transverse structure by multicore cables by the method of cumulative measurements. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2008, no.3, pp. 30-36. (Rus).

Поступила (received) 25.08.2017

Безпрозванных Анна Викторовна<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,  
Мирчук Игорь Анатольевич<sup>2</sup>, аспирант,

<sup>1</sup> Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,  
тел/phone +38 057 7076010,  
e-mail: bezprozvannyh@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Приватное акционерное общество  
«Украинский научно-исследовательский институт  
кабельной промышленности»,  
71101, Запорожская обл., Бердянск, ул. Промышленная, 2-Р,  
тел/phone +38 066 8288554,  
e-mail: garik710@ukr.net

G.V. Bezprozvannyh<sup>1</sup>, I.A. Mirchuk<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> Private Joint Stock Company «Ukraine Scientific-Research  
Institute of Cable Industry»,  
2-P, Promychnennaya Str., Berdyansk, Zaporozhye Region,  
71101, Ukraine.

**The evaluation of possibility of normal operation of cables based on twisted pairs with PVC jacket under the conditions of high humidity and temperature.**

**Introduction.** Development of cables for structured cabling systems based on twisted pairs for shipbuilding is carried out in two main directions: increasing the fire safety of cables and increasing the long-term permissible operating temperature by using new, more heat-resistant, electrical insulating materials.

**Purpose.** Substantiation of the possibility of unshielded cables on the basis of unshielded twisted pairs with thermoplastic polyethylene insulation in PVC protective jacket in conditions of high humidity and high operating temperatures on the basis of the results of accelerated aging. **Methodology.** The cycle of aging under conditions of increased humidity is performed for 336 hours. Then the sample was under natural drying conditions for 1440 hours. Thermal aging in a thermostat at 90 °C was carried out in two stages: first – for 206 hours, the second – for 260 hours. In the initial state and after accelerated aging, measurements of the capacitance and tangent of the dielectric loss angle of all the insulating gaps at frequencies of 100 Hz, 1 and 10 kHz were performed. **Results.** According to the results of accelerated aging under conditions of high humidity and temperature, it is established that the design of an unshielded cable based on unshielded twisted pairs with thermoplastic polyethylene insulation in a protective coating based on PVC-plastic is resistant to external influencing factors. **Practical value.** The prolonged holding at temperature of 90 °C is equivalent to operation at temperature of 40 °C for 6.8 years. At higher operating temperatures, the lifetime of the cable is significantly reduced. References 5, tables 1, figures 5.

**Key words:** cables based on twisted pairs for shipbuilding, accelerated aging, hygroscopic moistening, thermal aging, partial capacitance, tangent of the dielectric loss angle, service life.