

## Анализ параметров кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена, подверженного тепловому старению

С. А. Бувев

*Мурманский государственный технический университет, г. Мурманск, Россия;  
e-mail: buevsa@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>*

### Информация о статье

Поступила  
в редакцию  
18.11.2021

получена  
после доработки  
16.12.2021

### Ключевые слова:

изоляция из сшитого  
полиэтилена, тангенс  
диэлектрических  
потерь,  
электрооборудование  
морского судна,  
тепловое старение,  
аудит судового  
электрооборудования

### Реферат

Современные морские суда используют винторулевые колонки с электроприводом; круизные лайнеры, газовозы, танкеры оборудуются системами Azipod производства шведско-швейцарской компании АВВ. Винторулевые колонки гондольного типа позволяют при движении судна кормой разбивать льды, поэтому такие суда используются для работы на Северном морском пути, в частности при работе по проекту "Ямал СПГ". Движитель Azipod мощностью 22 МВт осуществляет вращение на 360° и обеспечивает выполнение сложного маневрирования судном без помощи буксиров. При эксплуатации подобных движителей на судне устанавливаются мощные дизель-генераторы. Для передачи электроэнергии используются судовые кабели, к которым предъявляются повышенные требования, соответствующие стандарту Международной электротехнической комиссии. Современные морские суда оборудуются кабельными линиями с изоляцией из сшитого полиэтилена или этиленпропиленовой резины; в Российской Федерации осуществляется промышленное производство этих кабелей. В процессе исследования рассмотрен метод аудита состояния изоляции на основе оценки изменения тангенса угла диэлектрических потерь в процессе теплового старения кабеля марки ПвБПнг(А)-HF. Измерения тангенса угла диэлектрических потерь выполнялись измерителем параметров изоляции Тангенс-2000.

### Для цитирования

Бувев С. А. Анализ параметров кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена, подверженного тепловому старению. Вестник МГТУ. 2021. Т. 23, № 4. С. 341–349. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-341-349>.

## Analysis of XLPE cable parameters subject to thermo aging

Sergey A. Buev

*Murmansk State Technical University, Murmansk, Russia;  
e-mail: buevsa@mstu.edu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>*

### Article info

Received  
18.11.2021

received  
in revised form  
16.12.2021

### Key words:

XLPE insulation,  
dielectric loss tangent,  
ship electrical  
equipment,  
thermo aging,  
audit of ship electrical  
equipment

### Abstract

Modern marine vessels use electrically driven rudders; cruise liners, gas carriers, tankers are equipped with Azipod systems manufactured by the Swedish-Swiss company ABB. Gondola-type propellers make it possible to break ice when the vessel is moving astern, therefore such vessels are used for work on the Northern Sea Route, in particular, when working on the Yamal LNG project. The 22MW Azipod propulsion system rotates 360° and enables difficult maneuvering without the assistance of tugs. When operating such propellers, powerful diesel generators are installed on the ship. For the transmission of electricity, ship cables are used, which are subject to increased requirements that meet the standard of the International Electrotechnical Commission. Modern marine vessels are equipped with XLPE or EPDM insulated cable lines; industrial production of these cables is carried out in the Russian Federation. In the course of the study, a method for auditing the state of insulation has been considered based on an assessment of the change in the tangent of the angle of dielectric losses in the process of thermal aging of the cable of the PvBPng(A)-HF brand. Measurements of the tangent of the dielectric losses' angle have been carried out with a Tangens-2000 insulation parameter meter.

### For citation

Buev, S. A. 2021. Analysis of XLPE cable parameters subject to thermo aging. *Vestnik of MSTU*, 23(4), pp. 341–349. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-4-341-349>.

## Введение

Современные морские суда используют винторулевые колонки с электроприводом. Системами Azipod (компания АВВ<sup>1</sup>) оборудуются круизные морские суда и танкеры. Винторулевые колонки гондольного типа позволяют при движении судна кормой разбивать льды, поэтому такие суда могут двигаться по Северному морскому пути без сопровождения ледокола (неэскортируемое плавание). В соответствии с Полярным кодексом<sup>2</sup> судам, предназначенным для плавания в районах Арктики и Антарктики, присваивается ледовый и полярный класс. Суда, обеспечивающие перевозки сжиженного природного газа проекта "Ямал СПГ", имеют ледовый класс Arc 7 согласно Российскому морскому регистру судоходства.

Суда полярного класса длительное время двигаются кормой, поэтому они оборудуются дополнительным навигационным постом в кормовой части судна. Такие суда в соответствии с правилами классификации и постройки морских судов Российского морского регистра судоходства<sup>3</sup> относятся к судам двойного действия (Double Acting Ship, DAS).

Двигатель Azipod способен осуществлять вращение на 360°, что позволяет выполнять сложное маневрирование судном без помощи буксиров (например, в ходе постановки судна к причалу или при плавании в узкостях).

Мощность подобных установок достигает 5–22 МВт, поэтому для удовлетворения нужд подобных двигателей на судне устанавливаются несколько дизель-генераторов. Для передачи электроэнергии используются судовые кабели, к которым предъявляются повышенные требования согласно стандарту IEC 60092-360 (2021)<sup>4</sup> Международной электротехнической комиссии (МЭК)<sup>5</sup>.

Оборудование береговых энергосистем напряжением выше 33 кВ считается высоковольтным. Единые нормативные требования для судового высоковольтного электрооборудования в мировой практике не разработаны. Так, в США высоковольтными принято считать судовые системы напряжением выше 600 В, в России – выше 1 000 В (Голиков, 2016).

В настоящее время на современные морские суда устанавливаются кабельные линии с изоляцией из сшитого полиэтилена или этиленпропиленовой резины, которые были известны еще с 1980-х гг. Промышленное производство данных кабелей в России началось сравнительно недавно. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена или этиленпропиленовой резины приходят на смену масло- и газонаполненным кабелям.

Несмотря на преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, вопросы по совершенствованию существующих и разработке новых методов диагностирования судового оборудования остаются актуальными, так как согласно статистическим данным 25 % аварий в электроустановках (приводивших в итоге к пожарам) связано с повреждениями, дефектами и пробоями в кабельной сети судна (Власов и др., 2020).

В настоящей работе рассматривается метод аудита состояния изоляции на основе оценки изменения тангенса угла диэлектрических потерь в процессе теплового старения кабеля.

## Материалы и методы

### *Общие сведения о кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена*

Силовой кабель с изоляцией из полиэтилена напряжением 5 кВ впервые был применен в 1944 г. в США. Производители предполагали, что срок службы XLPE<sup>6</sup>-кабельных систем составит 20–30 лет, однако на практике кабельные линии "прослужили" половину от запланированного срока. Причина заключалась в несовершенстве кабельной конструкции, коррозии токопроводящих жил и возникновении водных трингов, приводящих к старению изоляции (Hampton et al., 1997). При этом роль электрического поля (прежде всего при больших значениях его напряженности) являлась доминирующей по сравнению с остальными факторами, способствующими ускоренному старению материала (например, с воздействием внешней среды) (Власов, 1980).

Современные производители кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена определяют срок службы не менее 30 лет<sup>7</sup>. Известно, что преимуществами полиэтилена являются высокая электрическая прочность;

<sup>1</sup> АВВ – шведско-швейцарская транснациональная компания, специализирующаяся в области электротехники и энергетического машиностроения.

<sup>2</sup> Международный кодекс для судов, эксплуатируемых в полярных водах (Полярный кодекс). СПб., 2016.

<sup>3</sup> Правила классификации и постройки морских судов. Часть 1. Классификация // Российский морской регистр судоходства. URL: [https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules\\_3&d=F8E4A2B8-FE00-42F8-A0DF-9FB49A377AB8&f=2-020101-138-1](https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules_3&d=F8E4A2B8-FE00-42F8-A0DF-9FB49A377AB8&f=2-020101-138-1).

<sup>4</sup> См. приложение.

<sup>5</sup> Правила классификации и постройки морских судов. Часть 11. Электрическое оборудование. // Российский морской регистр судоходства. URL: [https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules\\_3&d=62C73F52-3302-4ABC-AE93-1EC9D8153F27&f=2-020101-138-11](https://lk.rs-class.org/regbook/getDocument2?type=rules_3&d=62C73F52-3302-4ABC-AE93-1EC9D8153F27&f=2-020101-138-11).

<sup>6</sup> XPLE cross-linked polyethylene (англ.) – изоляция из сшитого полиэтилена.

<sup>7</sup> Настольная книга проектировщика. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 6–35 кВ. Пермь, 2013. 56 с.

низкие значения плотности, относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  и тангенса угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$ ; гибкость; стойкость к поглощению влаги (Ларина, 1996).

Сшитый полиэтилен является одним из лучших полимеров для изготовления изоляции, так как имеет пространственную структуру молекулярной решетки. Сравнительные характеристики изоляции из различных материалов представлены в табл. 1 и 2 (Ларина, 1996; Liu Xin-min, 2003). Указанные характеристики свидетельствуют о том, что сшитый полиэтилен, этилепропилен и кремнийорганическая резина имеют самую высокую температуру эксплуатации.

Таблица 1. Данные по температуре эксплуатации кабелей с различной изоляцией  
Table 1. Data of working temperatures for cables with different insulation

Материал изоляции	Обозначение изоляции	Длительная температура, °С	Предельно допустимая температура при коротком замыкании, °С
Полиэтилен	PE	70	150
Сшитый полиэтилен	XLPE	90	250
Поливинилхлорид	PVC	70	160
Этилепропилен	EPDM	90	250
Кремнийорганическая резина	HF S 95	95	Нет данных

Таблица 2. Параметры различных типов полимеров, используемых в изоляции кабелей  
Table 2. Parameters of some types of polymers used for cable insulation

Тип полимера	Удельное объемное сопротивление, Ом·см	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$	Удельное термическое сопротивление $\delta$ , К·м/Вт
Полиэтилен	$10^{17}$	2,25	$3 \cdot 10^{-4}$	3,8
Поливинилхлорид	$10^{15}$	4,0	$5 \cdot 10^{-2}$	7,0
Этиленпропилен	$7 \cdot 10^{15}$	2,6	$2 \cdot 10^{-3}$	6,1

В процессе эксплуатации в изоляции из сшитого полиэтилена могут возникать проводящие каналы – дендриты (триинги, древовидные образования). По способу происхождения выделяют три типа дендритов: дендриты электрического происхождения; водные триинги; дендриты химического происхождения.

При воздействии переменного тока и очень высоких значений импульсного напряжения развиваются триинги электрического происхождения. Электрические триинги связаны с процессом накопления в полимерном материале древовидных нарушений, обусловленных воздействием на диэлектрики ионизационных процессов при длительном электрическом старении кабеля (Власов, 1980). Химическое древообразование появляется при накоплении в объеме изоляции кристаллических продуктов химических реакций, протекающих между кислотами и металлической жилой.

При проникновении влаги в изоляцию кабеля развиваются водные триинги. Данный процесс может возникать в результате повреждения оболочки кабеля, а также вследствие процесса диффузии через оболочку из полиэтилена. Дальнейшее развитие дефекта связано с действием электростатических сил на молекулы влаги.

При развитии водных триингов происходит значительное уменьшение сопротивления изоляции, что в итоге приводит к пробое, поэтому разработка методов по диагностированию подобных дефектов является востребованной и актуальной задачей.

Современные производители кабелей применяют нанокompозиты на базе полиэтилена для совершенствования характеристик изоляции. Применение нанокompозитов позволяет улучшить термомеханические и электрические свойства изоляции и повысить экономические характеристики.

При эксплуатации кабелей переменного тока и их соединений полимерные композитные материалы должны демонстрировать низкую электропроводность; индивидуальную диэлектрическую проницаемость и низкий коэффициент потерь; высокую диэлектрическую прочность на пробой; сопротивление частичному разряду; отсутствие электрических и электрохимических триингов; стабильность при более высоких рабочих температурах и т. д. На высоковольтных линиях постоянного тока изоляционные материалы должны отвечать двум дополнительным важным требованиям: 1) малые изменения электропроводности при различной температуре и напряженности электрического поля; 2) малый объем накопления заряда (Plesa et al., 2018).

#### Методы диагностики XLPE-кабелей

В настоящее время все большую актуальность приобретают разработка и применение неразрушающих методов контроля кабельных линий. Среди современных методов можно выделить метод измерения возвратного напряжения в изоляции, метод измерения тока релаксации, метод измерения частичных разрядов, метод испытания кабеля напряжением сверхнизкой частоты (0,1 Гц) (Грешняков, 2018).

Неразрушающий метод оценки старения кабеля на основе анализа скорости распространения ультразвуковых волн и контроля твердости изоляции применяется для диагностики кабелей на атомных электростанциях (*Nishida et al., 1999*).

Испытание XLPE-кабелей повышенным переменным напряжением регламентируется различными нормативными документами, в частности стандартом организации ПАО "Россети" (СТО 34.01-23.1-001-2017).

Однако при испытаниях кабеля повышенным напряжением возможно повреждение кабельных линий, в связи с чем на нефтеперекачивающих станциях для диагностики применяют метод отклика напряжения, который доказал свою эффективность (*Акбердин и др., 2008*).

В работе (*Удовиченко, 2008*) рассмотрены мониторинговые комплексы, диагностика которых основана на методе контроля температуры вдоль всей длины кабельных линий с передачей информации о локальных перегревах на пульт оператора. Применение указанных комплексов позволяет получать статистические данные по температуре кабеля в процессе его эксплуатации и оценивать на основании этой информации остаточный срок службы кабеля.

При проведении испытаний рекомендуется руководствоваться существующими стандартами (ГОСТ 10518-88, ГОСТ 12179-76).

*Метод анализа параметров изоляции кабеля из сшитого полиэтилена в процессе ускоренного теплового старения*

В процессе эксплуатации в изоляции кабеля происходят изменения, накапливаются дефекты, появляются трещины, разрушается оболочка кабеля и изоляция жилы. Для наблюдения за изменениями в изоляции в процессе старения применяют метод ускоренного теплового старения, когда кабель помещается на длительное время в термостат с температурой, превышающей температуру эксплуатации.

В ходе анализа параметров изоляции кабеля из сшитого полиэтилена в процессе его ускоренного теплового старения использовался кабель марки ПвБПнг(А)-HF длиной 2 м, имеющий пять медных жил сечением 35 мм<sup>2</sup> с изоляцией, изготовленной из сшитого полиэтилена. Броня кабеля состояла из стальных лент; оболочка выполнена из ПВХ-пластиката.

В выбранном в качестве объекта исследования кабеле ПвБПнг(А)-HF для изолирования жил реализована силановая сшивка; данный кабель использовался на напряжение до 1 кВ.

Кабели ПвБПнг(А)-HF по конструктивному исполнению и техническим характеристикам соответствуют международному стандарту IEC 60502-2(2014) МЭК<sup>8</sup> и гармонизированным документам Европейского комитета по электротехнической стандартизации<sup>9</sup> (HD 605 S2 и HD 620 S2).

В ходе исследования кабель ПвБПнг(А)-HF помещался в термостат с температурой 120 °С, где выдерживался в течение длительного времени. Периодически для оценки параметров изоляции кабель вынимался из термостата и кондиционировался до комнатной температуры (20–22 °С); затем проводились замеры тангенса угла диэлектрических потерь измерителем параметров изоляции Тангенс-2000 по схеме, изображенной на рис. 1.

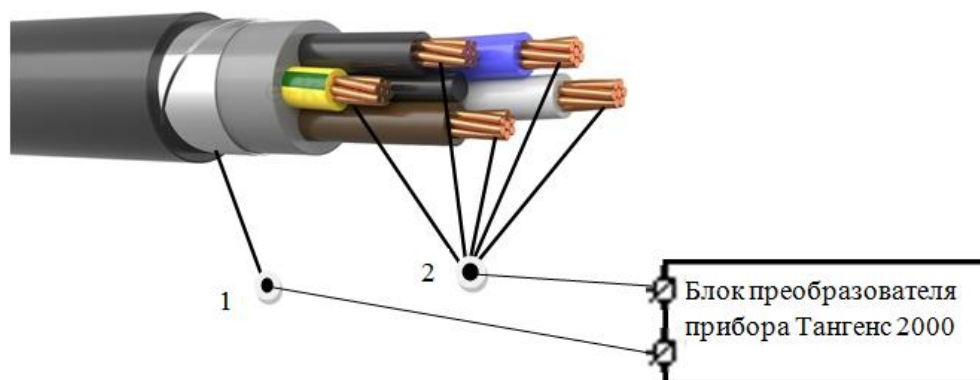


Рис. 1. Схема измерения  $\text{tg}\delta$  и емкости изоляции  $C$  кабеля с использованием прибора Тангенс-2000:

- 1 – фиксирование клеммы высоковольтного кабеля на броне исследуемого объекта;
- 2 – фиксирование клеммы измерительного кабеля на месте соединения оголенных жил кабеля

Fig. 1. Measurement scheme of  $\text{tg}\delta$  and  $C$  of the XLPE cable by the Tangent-2000 device:

- 1 – fixing the terminal of high voltage cable to the armour of the under study object;
- 2 – fixing the measurement cable to the connection of all core together

<sup>8</sup> Международная электротехническая комиссия (МЭК) – международная некоммерческая организация по стандартизации в области электрических, электронных и смежных технологий (Россия является членом организации с 1911 г.).

<sup>9</sup> Европейский комитет по электротехнической стандартизации (CENELEC), отвечающий за европейские стандарты в области электротехники (РФ не является членом организации).

Измерения параметров кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена проводились при испытательном напряжении 500 В после охлаждения кабеля до комнатной температуры (18–22 °С).

### Результаты и обсуждение

Результаты измерений параметров  $\text{tg}\delta$  и емкости изоляции  $C$  кабеля ПвБПнг(А)-НФ с помощью прибора Тангенс-2000 при тепловом старении кабеля представлены на рис. 2 и 3.

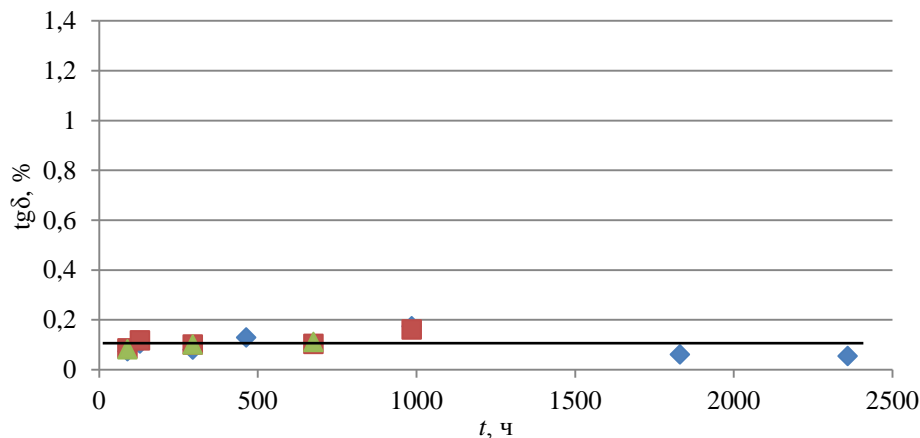


Рис. 2. Экспериментальные данные измерений параметра  $\text{tg}\delta$  кабеля ПвБПнг(А)-НФ  
Fig. 2. Experimental data of  $\text{tg}\delta$  of XLPE cable PvBPng (A)-HF

Значение тангенса угла диэлектрических потерь на протяжении всего проведения эксперимента изменялось незначительно: параметр  $\text{tg}\delta$  находился в пределах 0,1 %. Показания емкости изоляции при первом измерении выросли на 5 %, далее в течение 1 800 ч теплового старения не изменялись; после 2 000 ч наблюдений незначительно понизились по сравнению с начальными данными.

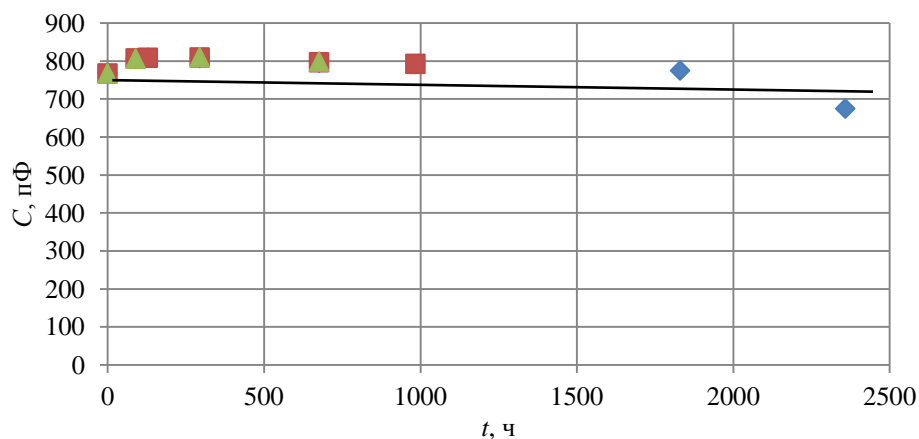


Рис. 3. Экспериментальные данные измерений емкости изоляции кабеля ПвБПнг(А)-НФ  
Fig. 3. Experimental data of capacity measurement of XLPE cable PvBPng(A)-HF

Полученные данные свидетельствуют о стойкости изоляции к повышенным температурам. Для определения дополнительных данных выполнены измерения  $\text{tg}\delta$  и емкости изоляции между жилами кабеля. Для этого схема измерений (рис. 1) была изменена: клемма высоковольтного кабеля подключалась к одной из жил кабеля; клемма измерительного кабеля фиксировалась на другой жиле кабеля; результаты измерений представлены на рис. 4 и 5.

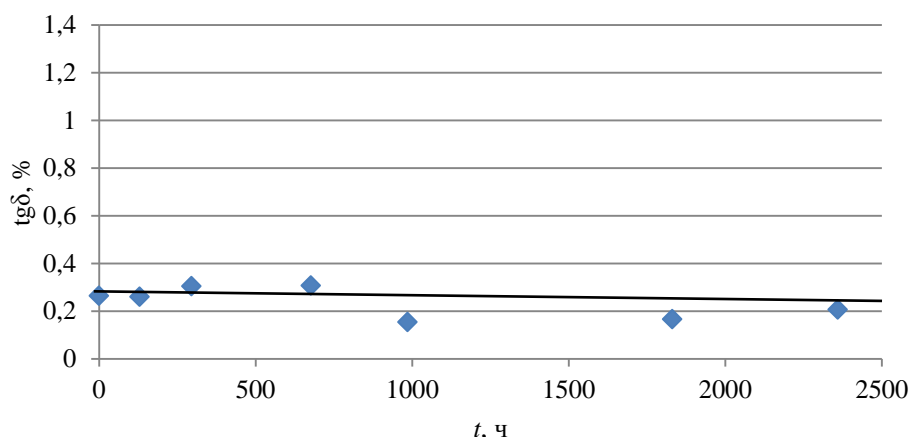


Рис. 4. Значения  $\text{tg}\delta$  изоляции при измерении между жилами кабеля ПвБПнг(А)-НФ в различные периоды теплового старения

Fig. 4. Data of  $\text{tg}\delta$  when measured between cores of the PvBPng (A)-HF cable in different periods of thermal aging

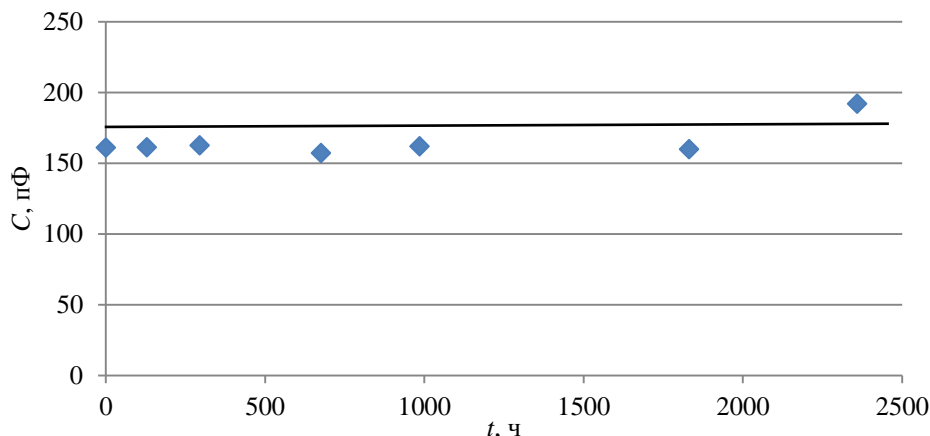


Рис. 5. Значения емкости изоляции при измерении между жилами кабеля ПвБПнг(А)-НФ в различные периоды теплового старения

Fig. 5. Insulation capacitance values when measured between conductors of PvBPng (A)-HF cable in different periods of heat aging

Таким образом, в течение времени теплового старения значения тангенса угла диэлектрических потерь XLPE-изоляции жилы изменялись в пределах 0,2–0,3 %; параметры емкости XLPE-изоляции жилы – в пределах 150–200 пФ (рис. 4 и 5).

### Заключение

Согласно требованиям международного электротехнического стандарта IEC 60092-360 (2021) максимальная рабочая температура изоляционных материалов, применяемых на морских силовых установках, не должна превышать 90 °С. Исследуемый XLPE-кабель сохраняет свои характеристики при температуре 120 °С в течение длительного времени, что свидетельствует о стойкости изоляции к повышенным температурам, поэтому данный кабель может сохранять свои свойства при аномальном локальном температурном перегреве.

Диагностирование судовых кабелей методом измерения параметров его изоляции (контроля значений тангенса угла диэлектрических потерь и емкости) целесообразно применять при аудите судового оборудования.

Учитывая сложность доступа к месту прокладки кабельных линий, разнообразие марок и типов кабелей, используемых на судне, необходимо использовать различные методы диагностики, не ограничиваясь традиционным измерением сопротивления изоляции и проверки кабеля на пробой повышенным напряжением,

что регламентируется различными нормативными документами. Так, правилами Российского речного регистра предусмотрена проверка нового кабеля напряжением 0,7–1,0 кВ испытательным переменным напряжением 3 кВ в течение 5 мин<sup>10</sup>.

Перспективным направлением совершенствования судового оборудования является комплексный подход к его диагностике с использованием устройств контроля параметров изоляции и тепловизоров методом количественной инфракрасной термографии в закрытых комплектных установках с передачей данных оператору посредством спутниковых каналов связи (Власов и др., 2019; Устройство..., 2019).

Дальнейшая работа по разработке диагностической модели кабеля предусматривает изучение условий эксплуатации судового электрооборудования, определение диагностических параметров и выявление основных воздействующих факторов, оценку показателей надежности, прогнозирование состояния объекта.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Акбердин А. М., Павлова З. Х. Определение технического состояния силовых кабелей ПС в процессе эксплуатации // Нефтегазовое дело. 2008. Т. 6, № 2. С. 88–105.
- Власов А. Б., Аллояров К. Б. Особенности реализации метода количественной термографической диагностики при внедрении цифровых технологий // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 484–495. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495>.
- Власов А. Б. Старение неполярных полимерных диэлектриков при одновременном воздействии переменного электрического напряжения и электролитов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.09.02. М., 1980. 19 с.
- Власов А. Б., Подобед Н. Е., Подобед В. А. Профилактика чрезвычайных ситуаций в электроустановках морских объектов методом тепловизионной диагностики // Труды Крыловского государственного научного центра. 2020. Специальный выпуск 2. С. 172–176. DOI: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-2-s-i-172-176>.
- Голиков С. П. Судовая техника высоких напряжений и высоковольтное электрооборудование. Керчь : КГМТУ, 2016. 187 с.
- Грешняков Г. В. Комплексная оценка технических и эксплуатационных характеристик XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.09.02. СПб., 2018. 31 с.
- Ларина Э. Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии. М. : Энергоатомиздат, 1996. 464 с.
- Удовиченко О. В. Температурный мониторинг кабельных линий высокого напряжения на основе кабелей из сшитого полиэтилена // 3-я Рос. с междунар. участием науч.-практ. конф. "Линии электропередачи-2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс" : материалы конф. Новосибирск : ЛЭП, 2008. С. 301–304.
- Устройство для непрерывного контроля теплового состояния электрического оборудования : полезная модель № 196894 Рос. Федерация / А. Б. Власов, В. В. Ерещенко, В. В. Ерещенко. № 2019133421 ; заявл. 21.10.2019 ; опубл. 19.03.2020. Бюл. № 8.
- Hampton N., Hartlein R., Lennartsson H., Orton H. [et al.]. Long-life XLPE-insulated power cable // Proceedings of The Jicable International Conference on Insulated Power Cables, Versailles, 2007. URL: [https://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07\\_C\\_5\\_1\\_5.pdf](https://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf).
- Liu Xin-min. Cross-linked polyethylene experimental study. 2003. Ocean University of China, 18.
- Nishida Y., Itagaki K., Yamaji Y., Konishi M. [et al.]. Non-destructive diagnosis technique for aging of cables used in nuclear power plants // Proceedings of The 7th International conference on nuclear engineering, Tokyo, 1999.
- Pleşa I., Notingher P., Stancu C., Wiesbrock F. [et al.]. Polyethylene nanocomposites for power cable insulations // Polymers. 2018. Vol. 11, Iss. 1. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11010024>.

### References

- Akberdin, A. M., Pavlova, Z. Ch. 2008. Determination of the technical condition of power cables of substations during operation. *Neftgazovoe delo*, 6(2), pp. 99–104. (In Russ.)

---

<sup>10</sup> Российский речной регистр. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов (ПТНП), 2019. URL: <https://www.rivreg.ru/assets/Uploads/rulesrrr2019.pdf>.

- Vlasov, A. B., Alloyarov, K. B. 2019. Features of implementing the quantitative thermographic diagnostics method while introducing digital technology. *Vestnik of MSTU*, 22(4), pp. 484–495. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-4-484-495.
- Vlasov, A. B. 1980. Aging of non-polar polymer dielectrics under the simultaneous action of alternating electric voltage and electrolytes. Abstract of Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Vlasov, A. B., Podobed, N. E., Podobed, V. A. 2020. Prevention of emergencies with marine electric plants by means of thermal monitoring. *Transactions of the Krylov State Research Centre, Special Issue 2*, pp. 172–176. DOI: <https://doi.org/10.24937/2542-2324-2020-2-s-i-172-176>. (In Russ.)
- Golikov, S. P. 2016. Ship high voltage technique and high voltage ship electrical equipment. Kerch. (In Russ.)
- Greshnyakov, G. V. 2018. Comprehensive assessment of the technical and operational characteristics of XLPE – medium and high voltage cable systems. Abstract of Ph.D. dissertation. Moscow. (In Russ.)
- Larina, E. T. 1996. Power cables and cable lines. Moscow. (In Russ.)
- Udovichenko, O. V. 2008. Temperature monitoring of high voltage cable lines based on XLPE cables. Proceedings of *The third Russian with international participation scientific and practical conference "Power transmission lines 2008: Design, construction, operating experience and scientific and technical progress"*, Novosibirsk, 2008, pp. 301–304. (In Russ.)
- Vlasov, A. B., Ereshchenko, V. V., Ereshchenko, V. V. 2019. Device for continuous monitoring of the thermal state of electrical equipment, Russian Federation, Pat. 196894. (In Russ.)
- Hampton, N., Hartlein, R., Lennartsson, H., Orton, H. et al. 2007. Long-life XLPE-insulated power cable. Proceedings of *The Jicable International Conference on Insulated Power Cables*, Versailles. URL: [https://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07\\_C\\_5\\_1\\_5.pdf](https://www.neetrac.gatech.edu/publications/jicable07_C_5_1_5.pdf).
- Liu, Xin-min. 2003. Cross-linked polyethylene experimental study. Ocean University of China, 18.
- Nishida, Y., Itagaki, K., Yamaji, Y., Konishi, M. et al. 1999. Non-destructive diagnosis technique for aging of cables used in nuclear power plants. Proceedings of *The 7th International conference on nuclear engineering*, Tokyo.
- Pleşa, I., Noţingher, P., Stancu, C., Wiesbrock, F. et al. 2018. Polyethylene nanocomposites for power cable insulations. *Polymers*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.3390/polym11010024>.

#### Сведения об авторе

**Бувев Сергей Александрович** – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, канд. техн. наук; e-mail: [buevsa@mstu.edu.ru](mailto:buevsa@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>

**Sergey A. Buev** – 13 Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Cand. Sci. (Engineering); e-mail: [buevsa@mstu.edu.ru](mailto:buevsa@mstu.edu.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7279-1065>



Список нормативных документов, используемых в статье

IEC 60092-360 (2021)	Установки электрические на судах. Часть 360. Материалы для изоляции и оболочек силовых, контрольных, инструментальных и телекоммуникационных кабелей для судов и морских применений. URL: <a href="https://webstore.iec.ch/publication/66151">https://webstore.iec.ch/publication/66151</a> .
СТО 34.01-23.1-001-2017	Объем и нормы испытаний электрооборудования. URL: <a href="https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_standart/doc/34.01-23.1-001-2017.pdf">https://www.rosseti.ru/investment/standart/corp_standart/doc/34.01-23.1-001-2017.pdf</a> .
ГОСТ 10518-88	Системы электрической изоляции и другие полимерные системы. Общие требования к методам ускоренных испытаний на нагревостойкость. URL: <a href="https://allgosts.ru/29/035/gost_10518-88">https://allgosts.ru/29/035/gost_10518-88</a> .
ГОСТ 12179-76	Кабели и провода. Метод определения тангенса угла диэлектрических потерь. URL: <a href="https://allgosts.ru/29/060/gost_12179-76">https://allgosts.ru/29/060/gost_12179-76</a> .
HD 605 S2:2008	Электрические кабели. Дополнительные методы испытаний. URL: <a href="https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CENELEC:110:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:45319,1257155&amp;cs=13D6AFC8F954A8ECBC235DA7C3DA80FF5">https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CENELEC:110:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:45319,1257155&amp;cs=13D6AFC8F954A8ECBC235DA7C3DA80FF5</a> .
HD 620 S2:2010	Распределительные кабели с экструдированной изоляцией на номинальное напряжение от 3,6/6 (7,2) кВ до 20,8/36 (42) кВ включительно. URL: <a href="https://standards-iteh-ai.translate.google/catalog/standards/clc/1fe7b18c-b7c3-4037-88f5-739b9805a58f/hd-620-s2-2010?_x_tr_sl=en&amp;_x_tr_tl=ru&amp;_x_tr_hl=ru&amp;_x_tr_pto=sc">https://standards-iteh-ai.translate.google/catalog/standards/clc/1fe7b18c-b7c3-4037-88f5-739b9805a58f/hd-620-s2-2010?_x_tr_sl=en&amp;_x_tr_tl=ru&amp;_x_tr_hl=ru&amp;_x_tr_pto=sc</a> .
IEC 60502-2(2014)	Кабели силовые с экструдированной изоляцией и кабельная арматура на номинальное напряжение от 1 кВ ( $U_m = 1,2$ кВ) до 30 кВ ( $U_m = 36$ кВ). Часть 2. Кабели на номинальное напряжение от 6 кВ ( $U_m = 7,2$ кВ) до 30 кВ ( $U_m = 36$ кВ). URL: <a href="https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5322637">https://www.gostinfo.ru/catalog/Details/?id=5322637</a> .