

Научная статья
УДК [621.315.28:621.317.333]:629.5
doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-98-106

Повышение эффективности дефектации судовых кабелей

*Сергей Владимирович Головки¹, Юлия Александровна Головки²,
Максим Альмансурович Надеев³, Николай Геннадьевич Романенко⁴*

*^{1, 2, 3, 4} Астраханский государственный технический университет,
Астрахань, Россия, g_s_v_2007@mail.ru*

Аннотация. Рассматривается система электроснабжения судна как сложная система, выполненная с помощью проводов и кабелей, которая обеспечивает подачу электрической энергии к различным механизмам и устройствам. Надежность электроснабжения во многом зависит от технического состояния кабельных линий. Во время эксплуатации кабельные линии регулярно подвергаются механическому воздействию как со стороны внешних факторов, так и со стороны людей. Среди самых частых причин повреждения кабеля отмечаются следующие факторы: старение изоляции, перенапряжение, тепловая нагрузка, вибрация судна, а также коррозия и увлажнение. Выход из рабочего состояния кабельной линии может привести к появлению аварийных ситуаций. Кабель с поврежденной изоляцией может вызвать электрическую дугу с металлическим предметом. Если повреждена изоляция нескольких фаз кабеля, то при их соприкосновении происходит междуфазное короткое замыкание, в результате чего выделяется большое количество теплоты, от которого может воспламениться изоляция кабелей и другие ближайшие горючие материалы. Рассматривается принцип работы устройства для диагностирования судовых кабелей «Дипсэл», и представлены его основные недостатки по определению показателей старения и увлажнения изоляции кабеля. Предложено использовать коэффициент абсорбции для повышения эффективности измерения увлажнения изоляции судового кабеля. Для изоляционных материалов, в которых ток абсорбции уменьшается быстро, необходимо провести измерения сопротивлений через 15 и 60 с. Коэффициент абсорбции определяется отношением шестидесятисекундного измерения сопротивления изоляции к пятнадцатисекундному значению. Если значение полученного коэффициента меньше 1,25, то получаем неудовлетворительное состояние изоляции; если значение от 1,25 до 1,6 – нормальное состояние изоляции; если более 1,6 – отличное состояние.

Ключевые слова: кабель, сопротивление изоляции, диагностика, увлажнение изоляции, коэффициент абсорбции

Для цитирования: Головки С. В., Головки Ю. А., Надеев М. А., Романенко Н. Г. Повышение эффективности дефектации судовых кабелей // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 4. С. 98–106. doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-98-106.

Original article

Increasing efficiency of ship cables defectation

Sergey V. Golovko¹, Julia A. Golovko², Maksim A. Nadeev³, Nikolay G. Romanenko⁴

*^{1, 2, 3, 4} Astrakhan State Technical University,
Astrakhan, Russia, g_s_v_2007@mail.ru*

Abstract. The ship power supply system is a complex system that supplies electrical energy to various mechanisms and devices using wires and cables. The reliability of power supply largely depends on the technical condition of the cable lines. During operation, cable lines are regularly exposed to mechanical stress, both from external factors and from people. Some of the most common causes of cable damage are: aging insulation, overvoltage, thermal stress, boat vibration, and corrosion and moisture. Leaving the operating state of the cable line can lead to emergencies. A cable with damaged insulation can cause an electric arc with a metal object. If several phases of a ca-

ble with damaged insulation, then when they touch, a phase-to-phase short circuit occurs, as a result of which a large amount of heat is released, from which the cable insulation and other nearby combustible materials can ignite. There is considered the principle of operation of DIPCEL (a device for diagnosing ship cables) and shown its main disadvantages in determining the aging and moisture indicators of cable insulation. It is proposed to use the absorption coefficient for increasing the efficiency of measuring the ship's cable insulation moisture. For insulating materials, in which the absorption current decreases rapidly, resistance measurements should be taken after 15 sec and 60 sec. The absorption coefficient is defined by measuring the ratio of a sixty-second insulation resistance to a fifteen-second resistance. If the value of the obtained coefficient is less than 1.25, then the insulation is unsatisfactory; if the value is within 1.25 - 1.6, then the insulation is normal, if more than 1.6 - the insulation is excellent.

Keywords: cable, insulation resistance, diagnostics, insulation moisture, absorption coefficient

For citation: Golovko S. V., Golovko Ju. A., Nadeev M. A., Romanenko N. G. Increasing efficiency of ship cables defectation. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies.* 2021;4:98-106. (In Russ.) doi: 10.24143/2073-1574-2021-4-98-106.

Введение

Согласно документации и международным требованиям электрические кабели необходимо проверять регулярно. Так, на основании требований Российского морского регистра судоходства (пункт 20.4.2) при очередном освидетельствовании, которое проводится раз в 5 лет, осуществляется проверка электрооборудования на соответствие его состава, места установки и технических характеристик [1].

В настоящее время для оценки состояния изоляции кабельной линии применяют планово-профилактические испытания [2]. Для этого разработаны методы диагностики и контроля. Методы можно разделить на две группы:

1. Условно разрушающие методы контроля состояния изоляции:

- испытания импульсным напряжением;
- испытания повышенным напряжением промышленной частоты;
- испытания повышенным выпрямленным напряжением;

2. Неразрушающие методы контроля и диагностики технического состояния изоляции кабельных линий:

- измерение сопротивления изоляции;
- измерение частичных разрядов;
- измерение диэлектрических потерь;
- метод рефлектометрии;
- снятие частотных характеристик.

Измерение сопротивления изоляции токопроводящих жил проводится мегаомметром или специальными установками. Суть метода заключается в подаче напряжения от постоянного или переменного источника питания с постепенным увеличением его значения до максимально допустимого для конкретного типа кабеля. Использование мегаомметра позволяет зафиксировать снижение качества изоляции без ее разрушения. Существуют различные модификации данных устройств, которые можно разделить на две категории: электромеханические и электронные.

Для диагностики изоляции кабеля на судах используется прибор «Дипсэл», единственный прибор, который имеет сертификат одобрения Российского морского регистра судоходства и Российского речного регистра. Аналогичных и других приборов для диагностики кабеля, имеющих подобный сертификат, не существует.

Принцип работы прибора «Дипсэл» и его недостатки

Данный прибор работает по принципу сравнения замеров сопротивления изоляции в течение времени [3]. Частыми причинами неисправности изоляции судового кабеля могут служить электрические нагрузки, связанные с отклонением рабочего напряжения, механические нагрузки, связанные с транспортировкой кабеля, химические воздействия, связанные с попаданием масел, пыли или агрессивных веществ, резкие колебания температуры и работа при экстремальных температурах, загрязнение окружающей среды вследствие появления плесени и по-

сторонних частиц, а также влаги. Замер сопротивления изоляции производится мегаомметром, метод которого базируется на законе Ома. С помощью импульсного блока питания, а также фильтра сетевое переменное напряжение 220 В преобразуется в постоянное напряжение 500 В. Далее измеряются токи утечки путем измерения тока в цепи. Так, для сопротивления в 100 кОм ток будет равен 5 мА. В соответствии с полученными показаниями прибор иллюстрирует сопротивление изоляции в кОм или МОм. Эти показатели характеризуют качество изоляции кабеля между двумя проводниками или кабелем и корпусом. Прибор «Дипсэл» осуществляет четыре замера сопротивления изоляции с разными промежутками времени T_1 – T_4 :

– в процессе первого замера за самый короткий промежуток времени ($T_1 = 0,2$ с) прибор измеряет сопротивление изоляции;

– за второй промежуток времени ($T_2 = 1$ с) прибор получает значение сопротивления изоляции, которое сравнивает с предыдущим, и в случае его отличия до 10 % ($T_2 > T_1$) указывает на наличие геометрической емкости, что свидетельствует об отсутствии механических повреждений;

– третий замер длится 1 мин ($T_3 = 1$ мин), и если в результате замера показания больше, чем при втором на 5 % и более, это указывает на наличие поляризации, а следовательно, теплового старения;

– четвертый замер самый длительный ($T_4 = 15$ мин), и если значение при четвертом замере больше, чем при третьем на 10 % и более, это указывает на наличие увлажнения изоляционного слоя.

В данном приборе присутствует функция сушки кабеля. Режим сушки осуществляется с помощью электроосмотического высушивания электроизоляции, эффект которого основан на явлении электроосмоса, т. е. перемещения капиллярной воды или сорбированной влаги через микropоры изолированного слоя, в направлении от внутренних слоев к наружным, под воздействием электростатического поля. Электроосмотический перенос влаги происходит без повышения температуры изоляционного слоя. Производитель регламентирует время высушивания, которое зависит от объема изоляционного слоя и определяется минутами и часами.

В процессе разбора принципа действия прибора были сняты осциллограммы на разных этапах работы прибора. Для снятия осциллограмм использовался осциллограф АКПП, который имеет ограничение по входному напряжению до 400 В. Поскольку прибор «Дипсэл» проводит проверку напряжением 500 В, был сделан делитель напряжения, состоящий из двух резисторов 100 и 200 кОм.

На рис. 1 приведена осциллограмма первого этапа замера сопротивления изоляции при длительности 20 мс, на которой видно поданное напряжение 150 В с отсутствием каких-либо импульсов и искажений.

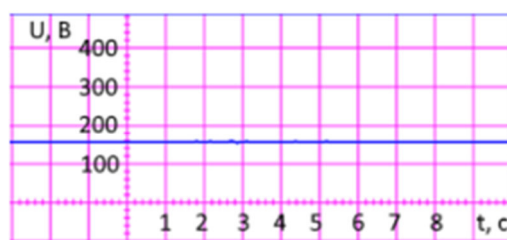


Рис. 1. Осциллограмма на первом этапе проверки

Fig. 1. Oscillogram at the first stage of verification

На втором и последующих этапах замера сопротивления изоляции были получены подобные осциллограммы, согласно которым можно сделать вывод, что данный прибор не посылает импульсы для активной диагностики кабеля, а также не снимает характеристики по току разряда от остаточной емкости кабеля. Таким образом, прибор «Дипсэл» в ходе работы измеряет только сопротивление изоляции. Практика свидетельствует, что полученные показания прибора, а именно показатели старения и увлажнения изоляции кабеля, зачастую являются недостоверными. Ниже представлены случаи, когда прибор «Дипсэл» делает неверный вывод о состоянии изоляции кабеля. В качестве испытываемого объекта был взят кабель КНР 4×6 длиной 3,5 м с

явными следами механических повреждений в связи со старением изоляции (внешняя изоляция имела трещины, а изоляция жил разрушалась при незначительном внешнем давлении). Рисунок 2 иллюстрирует внешний вид испытываемого кабеля.



Рис. 2. Внешний вид испытываемого кабеля

Fig. 2. Appearance of the tested cable

Процесс испытания изоляции прибором «Дипсэл» был проведен на всех четырех этапах диагностики. Рисунок 3 иллюстрирует процесс проверки кабеля. Однако в большей степени интересны выводы о техническом состоянии изоляции кабеля по истечении второго и третьего циклов проверки, а именно о наличии механических повреждений и старения изоляции.



Рис. 3. Определение технического состояния изоляции кабеля

Fig. 3. Determining the technical condition of cable insulation

В итоге испытания получаем значения сопротивления изоляции в МОм и выводы о состоянии изоляции. На рис. 4 приведены полученные показания, согласно которым дефектов не выявлено. В случае с механическими повреждениями это объясняется тем, что жилы, на которые были установлены щупы, не имели непосредственного контакта между собой в местах полного разрушения изоляции. Но в случае старения изоляции прибор сделал неверный вывод.



Рис. 4. Результаты замера сопротивления изоляции испытываемого кабеля № 1

Fig. 4. Results of measuring the cable insulation resistance No. 1

Далее был проведен второй опыт на наличие влаги в изоляции кабеля. В качестве испытываемого объекта был взят кабель КНР 2×2,5 длиной 0,5 м. Рисунок 5 иллюстрирует показания прибора при проверке исправного кабеля. По истечении всех циклов диагностики получаем результат: сопротивление изоляции – больше 30 МОм, о чем свидетельствуют знаки ***** на дисплее.



Рис. 5. Результаты замера сопротивления изоляции испытываемого кабеля № 2

Fig. 5. Results of measuring the cable insulation resistance No. 2

Далее испытываемый кабель был погружен в емкость с соленой водой на 20 мин и проведены повторные испытания. Рисунок 6 иллюстрирует показания прибора.



Рис. 6. Результаты замера сопротивления изоляции увлажненного кабеля

Fig. 6. Results of measuring the cable insulation resistance

Согласно рис. 6 значения сопротивлений изоляции упали до кОм, но прибор не просигнализировал о ее увлажнении.

Повышение эффективности диагностики кабелей

Для повышения эффективности диагностики судовых кабелей предлагается использовать иной способ анализа, а именно учитывать коэффициент абсорбции. Появление влаги в изоляции приводит к резкому снижению сопротивления и росту тока утечки, т. к. во влаге содержатся растворенные примеси, т. е. свободные ионы. Вследствие этого снижается напряжение теплового пробоя и, кроме того, происходит дополнительный нагрев изоляции, что влечет за собой ускорение темпов теплового старения. Коэффициент абсорбции DAR определяет увлажнение изоляции:

$$DAR = \frac{R_{60}}{R_{15}},$$

где R_{60} – сопротивление изоляции спустя 1 мин после начала испытания; R_{15} – сопротивление изоляции спустя 15 с после начала испытания.

При подаче постоянного напряжения на две жилы кабеля в начальный момент времени проходит только ток заряда геометрической емкости $I_{емк}$, который определяется геометрическими размерами изоляции кабеля [4]. В этот момент времени материал, который находится между обкладками конденсатора, в нашем случае это токопроводящие жилы, не проявляется, как будто между ее границами находится вакуум. Ток заряда геометрической емкости быстро стремится к нулю, а отрицательные и положительные заряды, расположенные на границах изоляции, образуют в ней электрическое поле. Под действием электрического поля после завершения прохождения тока заряда возникает явление поляризации. Это явление связано с прохождением тока абсорбции $I_{абс}$, который начинает протекать после заряда геометрической емкости. Ток абсорбции определяется медленным поворотом диполей, характерных для изоляции, под влиянием электрического поля, а также зарядом отдельных конденсаторов, образующихся между слоями изоляции. Его значение зависит от увлажнения и дефектов изоляции.

Ток абсорбции, по сравнению с током заряда геометрической емкости, будет протекать дольше. Постоянная времени RC контура равна произведению их значений $T = RC$. Таким образом, при большем значении сопротивления R получаем длительное время заряда T абсорбционной емкости.

На величину сопротивления абсорбции $R_{абс}$ влияет увлажнение изоляции кабеля. Чем выше значение влажности, тем меньше $R_{абс}$, следовательно, увеличивается значение тока поляризации $I_{абс}$ и быстрее происходит его затухание:

$$I_{абс} = \frac{U}{R_{абс}} e^{\frac{t}{T}},$$

где U – приложенное напряжение; t – время приложения напряжений; T – постоянная времени; e – основание натуральных логарифмов – 2,71828.

При сухой изоляции кабеля имеем большее значение сопротивления абсорбции $R_{абс}$, в результате чего получаем меньшее значение тока абсорбции $I_{абс}$ и большее время заряда T абсорбционной емкости.

Коэффициент абсорбции DAR при сухой изоляции намного больше единицы, а при влажной – около единицы. Это обстоятельство связано с временем заряда абсорбционной емкости кабелей с сухой и увлажненной изоляциями. Для кабелей с сухой изоляцией получаем длительное время заряда и малое изменение величины тока абсорбции, а также сильно отличающиеся значения сопротивлений изоляции кабеля, измеренные при 15 и 60 с. Для кабеля с увлажненной изоляцией получаем малое время заряда и значительное изменение величины тока абсорбции, который до истечения первого измерения достигает установившегося значения. Поэтому значения $R_{из}$, соответствующие 15 и 60 с, после измерения почти не различаются.

На рис. 7 представлены значения сопротивлений изоляции.



Рис. 7. Значения сопротивления изоляции после 15 с

Fig. 7. Values of insulation resistance after 15 s

Согласно данным значениям вычисляем коэффициент абсорбции:

$$DAR = 25,96 / 24,11 = 1,07.$$

В таблице данное значение абсорбции соответствует неудовлетворительному качеству изоляции и указывает на наличие в ней влаги, а также на необходимость производить сушку.

Качество изоляции кабеля в зависимости от величины показателей поляризации и абсорбции
Quality of cable insulation depending on the value of polarization and absorption indicators

Коэффициент абсорбции	Качество изоляции
< 1,25–1,5	Увлажненная
> 1,5	Сухая

Таким образом, для более качественной оценки состояния изоляции кабеля необходимо добавить к методике дефектации судовых кабелей расчет коэффициента абсорбции.

Заклучение

Вызывают сомнения алгоритмы обнаружения старения изоляции, а также увлажнения судовых кабелей прибором «Дипсэл». При проверке на практике абсолютно новых кабелей, доведенных к нам по всей технологии, т. е. с изолированными концами, покрытых специальной мастикой для защиты от попадания влаги в кабель, данный прибор показывал значения влажности кабеля. Согласно полученным осциллограммам можно сделать вывод, что данный прибор не посылает импульсы, а подает постоянное напряжение, тем самым измеряя потребляемый ток, выдает значение сопротивления изоляции, т. е. работает, как мегаомметр. Полученные результаты диагностики, а именно показатели старения и увлажнения изоляции кабеля, зачастую являются недостоверными. Добавляя к методике дефектации судовых кабелей расчет коэффициента абсорбции, получаем итоговые заключения о реальном техническом состоянии изоляции кабеля. Так, при проведении теста на наличие увлажнения в изоляции был получен коэффициент абсорбции $DAR = 1,07$, который указывает на большой ток поляризации в начальный момент диагностики (5–15 с), что свидетельствует о наличии влаги. О наличии старения изоляции кабеля можно судить по изменению тока, протекающего во время заряда и разряда изоляции. Если установившийся режим во время разряда наступает быстрее, чем во время заряда, то потери произошли в емкости заряда кабеля, т. к. токи емкости поляризации во время разряда не протекают. Потеря в емкости заряда кабеля возможна лишь при наличии старения или механического повреждения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Правила* Российского морского регистра судоходства. URL: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (дата обращения: 18.05.2021).
2. *ГОСТ 3345-76*. Кабели, провода и шнуры. Метод определения электрического сопротивления изоляции. М.: Изд-во стандартов, 2003. 4 с.
3. *Описание* устройства работы «Дипсэл». URL: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/56310-14.pdf> (дата обращения: 15.05.2021).
4. *Аванесян Вачаган*. Структура и диэлектрическая поляризация. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 120 с.

REFERENCES

1. *Pravila Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* [Rules of the Russian Maritime Register of Shipping]. Available at: <https://lk.rs-class.org/regbook/rules> (accessed: 18.05.2021).
2. *GOST 3345-76. Kabeli, provoda i shnury. Metod opredeleniia elektricheskogo soprotivleniia izoliatsii* [GOST 3345-76. Cables, wires and cords. Method for determining the electrical resistance of insulation]. Moscow, Izd-vo standartov, 2003. 4 p.
3. *Opisanie ustroistva raboty «Dipsel»* [Description of the device of operation DIPCEL]. Available at: <https://www.ktopoverit.ru/prof/opisanie/56310-14.pdf> (accessed: 15.05.2021).
4. *Avanesian Vachagan. Struktura i dielektricheskaia poliarizatsiia* [Structure and dielectric polarization]. LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 120 p.

Статья поступила в редакцию 04.10.2021; Одобрена после рецензирования 15.10.2021; Принята к публикации 26.10.2021
The article was submitted 04.10.2021, Approved after reviewing 15.10.2021, Accepted for publication 26.10.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сергей Владимирович Головкин – кандидат технических наук; доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; g_s_v_2007@mail.ru

Юлия Александровна Головка – кандидат технических наук; доцент кафедры электрооборудования и автоматике судов; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; pjulia2014@yandex.ru

Максим Альмансурович Надеев – кандидат технических наук; доцент кафедры электрооборудования и автоматике судов; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; nadeev_maxim@mail.ru

Николай Геннадьевич Романенко – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой электрооборудования и автоматике судов; Астраханский государственный технический университет; 414056, Астрахань, ул. Татищева, 16; nikolayrom@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Golovko – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; g_s_v_2007@mail.ru

Julia A. Golovko – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; pjulia2014@yandex.ru

Maksim A. Nadeev – Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; nadeev_maxim@mail.ru

Nikolay G. Romanenko – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation; Astrakhan State Technical University; 414056, Astrakhan, Tatishcheva St., 16; nikolayrom@yandex.ru

