

# СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.3.048:621.315.61

*С. А. Агарков, А. Б. Власов, Ю. И. Юдин*

## СИСТЕМА ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА СУДАХ И ОБЪЕКТАХ БЕРЕГОВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Современное и перспективное развитие морского флота неразрывно связано с безопасностью мореплавания, которое обеспечивается безотказным и надежным функционированием систем жизнеобеспечения и судового оборудования. В связи с этим возникает необходимость в развитии современных методов оперативной диагностики для контроля технического состояния оборудования. Тепловизионная диагностика является признанным методом оценки технического состояния оборудования на энергетических предприятиях, однако на судах рыбопромыслового флота и береговых предприятиях систематическая тепловизионная диагностика практически не используется. Применение методов количественной термографии обусловлено необходимостью выявления дефектов электро- и теплоэнергетических устройств на ранней стадии непосредственно в режиме эксплуатации. Разрабатываемая система тепловизионных испытаний различных систем, объектов или материалов объединяет различные методы (электрофизические, оптические) и реализуется в комплексе с тепловыми, электрическими, химическими испытаниями. Представлены основные этапы применения системы технического контроля судовых устройств и средств на основе методов количественной термографии. Метод тепловизионного обследования электротехнического оборудования в целом представляет собой совокупность мероприятий, необходимых для проведения испытаний и выработки адекватной экспертной оценки. Рассмотрены примеры применения тепловизионной техники на морских судах, приведены результаты тепловизионных испытаний на примере анализа состояния судовых кабельных трасс. Представлены материалы испытаний кабельных трасс с учетом анализа твердости шланговой изоляции и изоляции жилы. Анализ результатов позволит определить срок службы кабельных трасс и выработать рекомендации при дефектации и замене оборудования.

**Ключевые слова:** морские суда, безопасность мореплавания, тепловизионная диагностика, энергоэффективность, техническое состояние, электрооборудование, кабельные трассы.

### **Состояние проблемы**

Электро- и теплоэнергетическое оборудование на судах и объектах береговой инфраструктуры предназначено для безотказного функционирования при многолетней непрерывной эксплуатации. Практика показывает, что накопление дефектов в электротехнических комплексах и системах электро- и теплоэнергетического оборудования сопровождается непрерывным изменением тепловых режимов и достижением критических и аномальных тепловых состояний.

С этой точки зрения актуальными являются развитие и применение методов тепловизионной диагностики, в рамках которых производится эпизодический или периодический контроль оборудования непосредственно под нагрузкой. Тепловизионная диагностика является признанным методом оценки технического состояния на энергетических предприятиях России, Украины и Белоруссии [1–5], однако на рыбопромысловых судах и береговых предприятиях флота систематическая тепловизионная диагностика практически не используется. Это связано с отсутствием опыта применения тепловизионной диагностики на судах, отсутствием специалистов и специализированной тепловизионной техники, которая, в условиях ограниченности судовых

помещений, должна обладать характерными особенностями. Применение методов количественной термографии связано с необходимостью выявления дефектов оборудования на ранней стадии их развития непосредственно в рабочем режиме эксплуатации, что позволяет избежать аварийных ситуаций, приводящих к значительным экономическим потерям.

Тепловизионная диагностика может выступать в качестве самостоятельного независимого испытания, особенно в тех случаях, когда другие виды испытаний невозможны, например непосредственно при работе с номинальной нагрузкой.

Научная новизна исследования заключается в обосновании эффективности методов применения тепловизионной техники на оборудовании, характерном для судовых устройств и механизмов.

Целью исследования является внедрение в практику системы организации технической диагностики на основе тепловизионных испытаний судовых систем, объектов или материалов, которая проводится в комплексе с традиционными испытаниями, регламентируемыми при техническом обслуживании.

### Методы и результаты исследования

Система организации и метод технической диагностики, рекомендуемые для применения на морских судах на основе методов количественной термографии (рис. 1), включают в себя ряд основных блоков, в процессе реализации которых осуществляется решение задач, главными из которых являются задачи диагноза и прогноза технического состояния, экспериментальное определение параметров надежности, выявление причин пониженной надежности, выработка мероприятий по повышению указанных показателей.

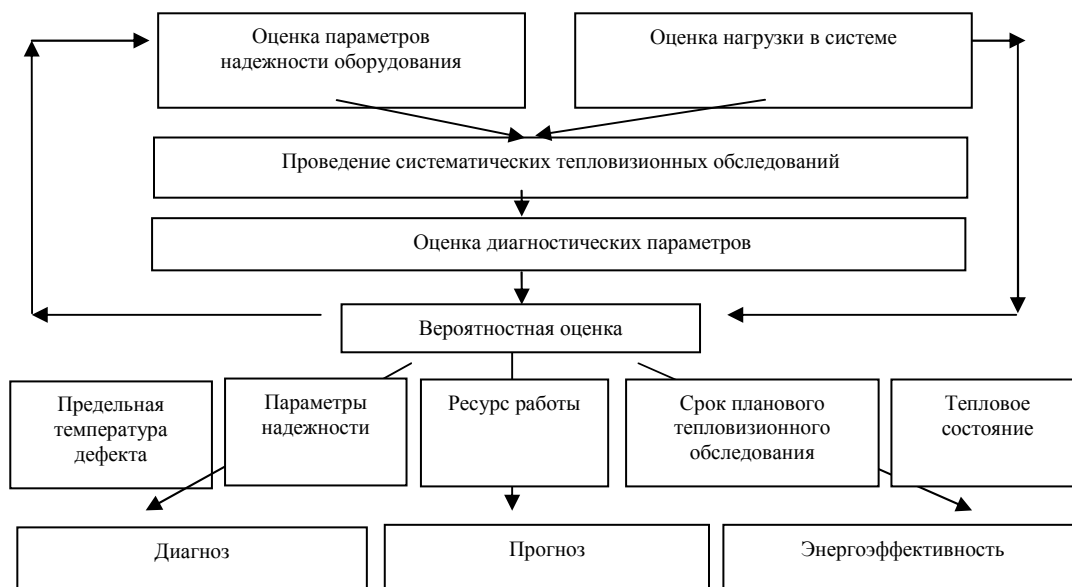


Рис. 1. Метод тепловизионного обследования

Тепловизионные испытания электротехнического и теплоэнергетического оборудования связаны с мероприятиями, включенными в общую систему сопровождения оборудования судна по определению реального технического состояния.

С одной стороны, для оценки текущего технического состояния объекта достаточно проведения испытаний при рабочей нагрузке, с другой – для достоверной оценки показателей надежности требуется периодический тепловизионный контроль, накопление и анализ экспериментальных данных при различных характеристиках токовой и тепловой нагрузки.

Таким образом, задача «прогноза» технического состояния требует периодических тепловизионных испытаний и обработки банка данных оборудования, подвергаемого контролю. Решение задачи прогноза технического состояния позволяет учесть, насколько вероятны появления значений максимальных или предельных температур (в том числе при пиковых нагрузках), возможны ли риски появления дефектов между интервалами плановых ремонтов.

Для выявления закономерностей накопления дефектов, показателей вероятности безотказной работы, величины потока повреждений, оценки гамма-процентных параметров эффективным является применение статистических методов оценки выборок данных, приведенных в [2]. Достоверность результатов статистического анализа позволяет определить показатели надежности оборудования, принять адекватное экспертное решение для оптимизации сроков ремонта судовых устройств, выявить причины и факторы, приводящие к повышенным рискам, рассчитать сроки испытаний, разработать мероприятия по организации обслуживания и ремонта оборудования судов и объектов береговой инфраструктуры флота.

Принцип организации и процедуры тепловизионного электрооборудования судов и объектов инфраструктуры флота с использованием тепловизионной техники в общем виде представлены на рис. 2.

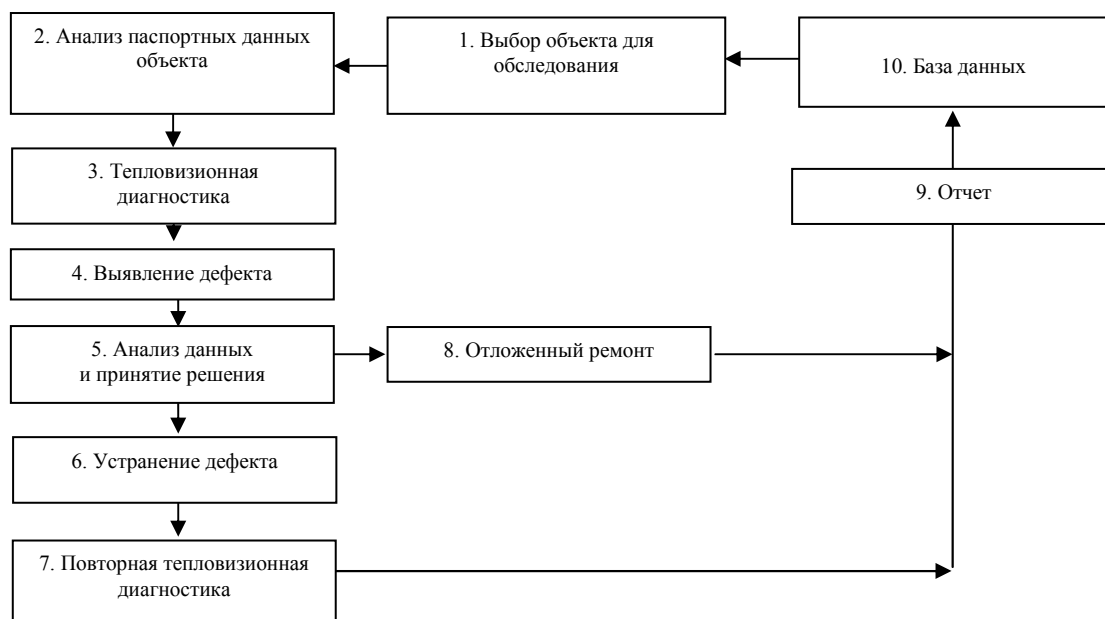


Рис. 2. Структура элементов системы тепловизионной диагностики электрооборудования

Объект, находящийся под непрерывной электрической или тепловой нагрузкой, подвергается периодическим или эпизодическим испытаниям. С учетом его паспортных данных оценивается информация о предшествующем состоянии: аварийность, условия эксплуатации, срок эксплуатации, допустимые и предельные температуры и пр.

Испытания, проводимые с помощью современных тепловизионных приборов, имеющих температурное разрешение до  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , позволяют с достаточной степенью точности выявлять дефекты оборудования, характеризующиеся аномальным температурным перегревом.

Как показывает практика, качество принятия решения в значительной степени определяется квалификацией экспертов, проводящих испытания. Именно от мнения эксперта зависит решение об отложенном ремонте оборудования или о немедленном устранении дефекта. В связи с этим следует отметить недостаточное изучение методов тепловизионных испытаний при подготовке соответствующих судовых специалистов, отсутствие необходимых регламентирующих документов.

Практика показывает, что повторная тепловизионная диагностика позволяет оценить качество ремонта, произведенного как в судовых условиях, так и на судоремонтных предприятиях.

Совокупность подготовительных мероприятий и проведенных тепловизионных испытаний позволяет создать отчеты и базу данных, провести паспортизацию электротехнического и теплоэнергетического оборудования на идентичных судах и эффективно использовать ее при дальнейших испытаниях. Банк данных содержит сведения, характерные для идентичных объектов испытаний, позволяющие провести анализ и решить задачу «диагноза» – определить техническое состояние однотипных объектов, спрогнозировать показатели эксплуатационной надежности электрооборудования.

**Комплексные испытания с применением тепловизионной диагностики.** Тепловизионная диагностика может выступать как самостоятельный метод технической диагностики [6, 7], однако, как показывает практика, наиболее эффективными являются комплексные испытания, в ходе которых исследуются многочисленные диагностические параметры, определяющие техническое состояние оборудования. Например, рекомендуемые методы диагностики кабельных сетей с помощью устройства для контроля качества изоляции типа ДИПСЭЛ [8] позволяют зафиксировать отклонения характеристик от номинальных параметров электрической изоляции. По результатам подобных испытаний Морским регистром судоходства РФ выдается предписание об устранении замечаний, в частности, о частичной или полной замене кабельной сети (фидера). Следует отметить, что в настоящее время не разработаны стандартные методы оценки качества изоляции кабелей и оценки ресурса работы, поэтому разработка экспресс-методов диагностики текущего технического состояния изоляции представляет научный и практический интерес. Применение комплексных методов испытаний совместно с тепловизионным контролем позволяет предложить подобный метод, в рамках которого на первом этапе проводятся тепловизионные испытания судовых кабельных трасс для выявления участков с повышенной температурой, наиболее подверженных старению. Следующим этапом испытаний является анализ качества изоляции на основе контроля диагностических параметров, объективно характеризующих износ изоляции и срок ее службы.

На рис. 3 в качестве примера приведены фотография и термограмма судовой кабельной трассы, на основе анализа которой возможно с достаточной степенью точности определить локализацию участков, наиболее подверженных тепловому старению.

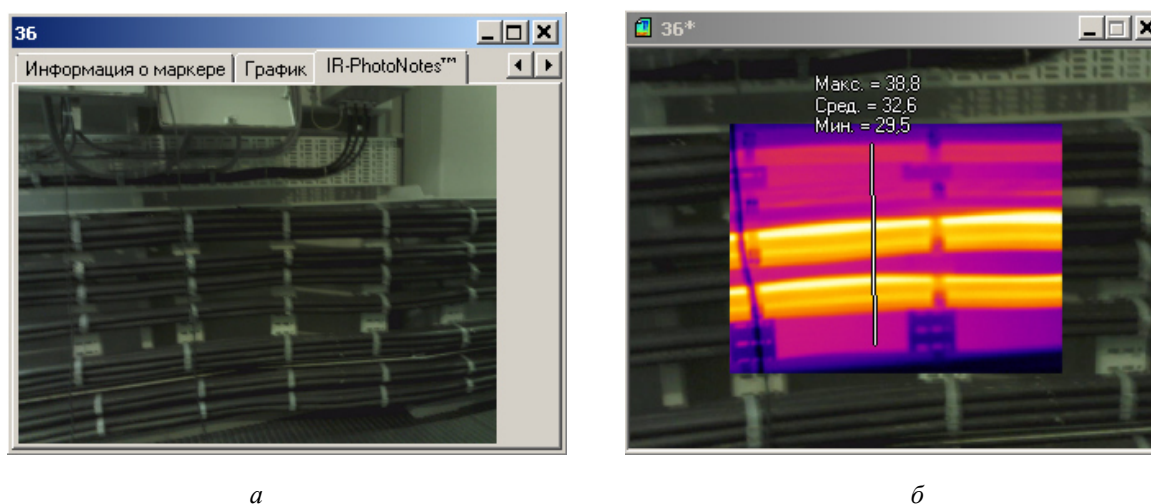


Рис. 3. Фотография (а) и термограмма (б) участка судовой кабельной сети

В [9] представлены методы оценки срока службы изоляции кабелей в зависимости от температуры старения, которые позволяют оценить остаточный ресурс и обосновать необходимость частичной или полной замены кабельных сетей фидера на основании результатов тепловизионных испытаний.

В работе [10] выдвинуто положение о возможности оценки параметра твердости  $H_f(HSA)$  изоляции жилы и шланговой изоляции как диагностического параметра, который существенно изменяется при старении изоляции вплоть до ее разрушения, что сопровождается появлением трещин на поверхности изоляции шланга или жилы.

Оценка качества и степени старения кабелей производится на основе измерения твердости  $H_f(HSA)$  материала изоляции по методу Шора, например, измерителями твердости типа ТН-200, NOVOTEST ТШ-Ц, ТШ-Д. Экспресс-методика определения качества резиновой изоляции кабелей заключается в том, что на исследуемом участке кабельной трассы проводят неоднократные испытания твердости  $H_{из.ш}$  шланговой изоляции или твердости  $H_{из.ж}$  изоляции жилы; с целью повышения достоверности определения качества изоляции оценивается выборка значений твердости в количестве 25–30 шт. В процессе обработки данных рассчитываются среднее значение

$H$ , абсолютная погрешность  $\Delta H$ . Предполагая, что экспериментальные данные описываются нормальным законом распределения, производится расчет функции распределения  $F(H)$  и плотности распределения  $f(H)$  стандартными методами [7, 10].

Рассмотрим результаты подобных испытаний при оценке качества изоляции кабелей в процессе их длительного старения (рис. 4).

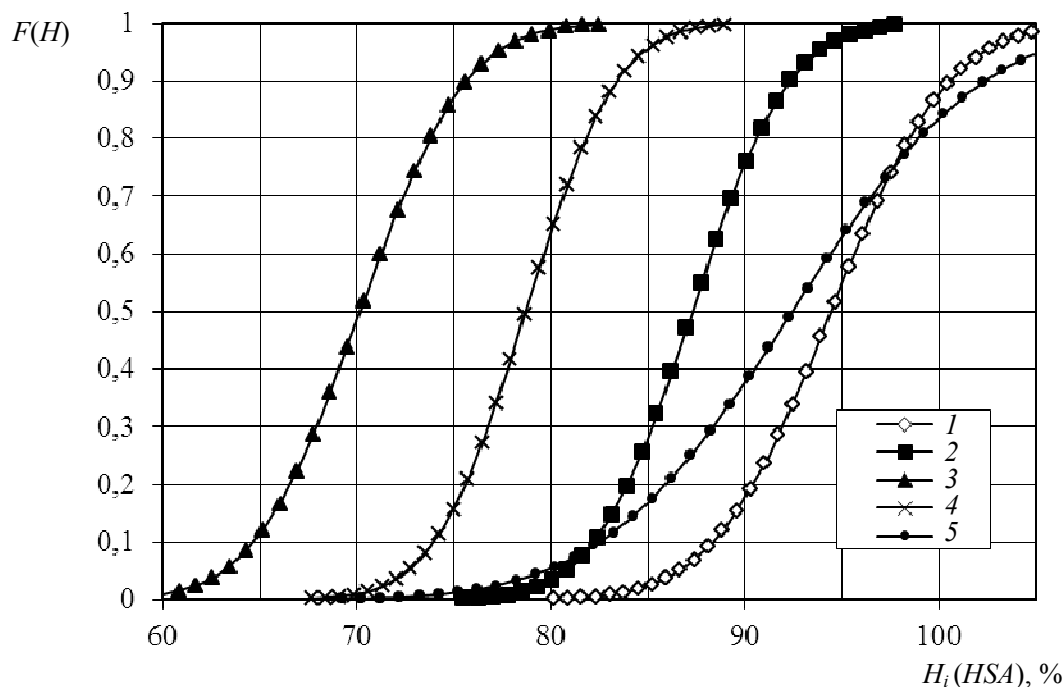


Рис. 4. Функция распределения  $F(H)$  твердости изоляции кабеля КНР:

- 1 – изоляция жилы (более 40 лет старения с трещинами); 2 – шланговая изоляция кабеля (без трещин);  
3 – изоляция жилы внутри шланга (без трещин); 4 – изоляция жилы вне шланга на воздухе (без трещин);  
5 – изоляция жилы вне шланга на воздухе (с трещинами)

Очевидно, что характер и значения функции распределения  $F(H)$  определяются длительностью старения и типом изоляции. Например, для полностью разрушенной резиновой изоляции жилы (кривая 1) более 50 % значений лежат в пределах  $H_{из.ж} > 95 HSA$ . Шланговая изоляция кабеля (кривая 2) после 25 лет хранения при комнатных условиях практически утратила упругость (95 % значений лежат в пределах  $H_{из.ш} < 92 HSA$ ), но видимых поперечных трещин не наблюдается. Изоляция жилы кабеля, находящаяся в ненарушенной шланговой изоляции (кривая 3), имеет относительно хорошую упругость при среднем значении твердости  $\underline{H}_{из.ж.ш} = 70 HSA$  (для исходной изоляции жилы  $\underline{H}_{из.ж} = 66,3 HSA$ ), а максимальные значения твердости не превышают  $H_{из.ж.мах} = 82 HSA$ . Изоляция жилы, находящаяся на воздухе вне шланга (кривые 4 и 5), потеряла упругость, причем 33 % изоляции жилы (одна жила из трех) приобрели выраженные поперечные трещины, при этом более 50 % значений характеризуются твердостью более  $H_{из.ж.в} = 92,5 HSA$  (кривая 5). Твердость состаренной изоляции жилы (без трещин), имеет 50 % значений выше среднего результата ( $\underline{H}_{из.ж} = 78,7 HSA$ ), при этом большинство значений твердости поверхности образцов из выборки лежит в пределах  $H < 92 HSA$ .

Для оценки влияния температуры и времени термического старения на твердость шланговой изоляции и изоляции жилы отрезки кабелей помещались в термостат и выдерживались при фиксированной температуре в течение длительного времени. Объективным критерием утраты изоляционных свойств является появление видимых трещин на изоляции при ее деформации.

Результаты испытаний твердости  $H_{из.ш}$  шланговой изоляции кабеля КНР при различных значениях функции распределения  $F(H)$  в процессе длительного старения при температуре 100 °С представлены на рис. 5.

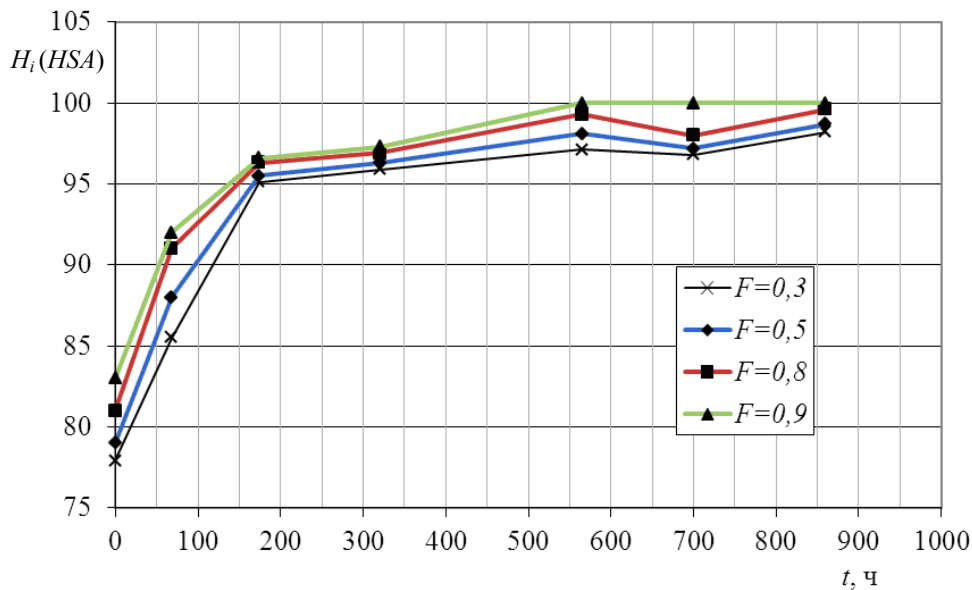


Рис. 5. Изменение твердости  $H_{из.ш}$  шланговой изоляции кабеля КНР при различных значениях функции распределения

Через 200 часов старения при  $T = 100$  °С среднее значение твердости  $H_{из.ш}$  шланговой изоляции возрастает с 80 HSA до 95 HSA, после чего остается относительно постоянным. При времени старения более 600 ч при  $T = 100$  °С твердость  $H_{из.ш.мах}$  шланговой изоляции возрастает до значений 100 HSA ( $F = 0,95$ ), что сопровождается появлением первых трещин на поверхности шланговой изоляции кабеля. Полное разрушение изоляции кабелей в процессе ускоренного старения при  $T = 100$  °С не превышает 800–850 ч.

Экспериментальные зависимости твердости изоляции  $H$  от времени (рис. 5), полученные при различных значениях функции распределения  $F$  и температурах, идентичны друг другу и связаны с характерными особенностями старения [6]. В связи с этим текущее качество изоляции может быть оценено по значениям твердости  $H$  изоляции, которые превышают величину 93–95 HSA. При этих предельных показателях твердости на шланговой изоляции и изоляции жилы появляется сетка трещин, что свидетельствует о потере эксплуатационных качеств кабеля и необходимости замены исследуемых участков кабельных трасс.

### Выводы

Тепловизионная диагностика – современный метод определения технического состояния электротехнического и теплоэнергетического оборудования в процессе эксплуатации под нагрузкой для определения эксплуатационной надежности, выявления накапливаемых дефектов аппаратов и конструкций. Применение тепловизионной диагностики, в совокупности с традиционными методами технического контроля на судах, позволяет выявить дефекты электрооборудования на ранней стадии их возникновения, избежать аварийных ситуаций, снизить риски пожароопасных ситуаций и нарушений техники безопасности и в конечном счете увеличить надежность судоходства.

Учет возникающих рисков при анализе результатов тепловизионных испытаний устраняет субъективные факторы при оценке технического состояния оборудования, а принятые экспертные решения, в целом, повышают значение показателей эксплуатационной надежности электротехнических и теплоэнергетических устройств. Использование предлагаемого способа оценки качества изоляции в рамках системы тепловизионной диагностики позволяет провести экспресс-анализ участков кабельных трасс, что приводит к увеличению эксплуатационной надежности, электро- и пожаробезопасности электрических сетей.

Применение тепловизионной диагностики в комплексе с испытаниями по оценке твердости изоляции кабельных трасс позволяет выявить участки, требующие замены или периодического наблюдения, обнаружить повреждения и дефекты электрического и технологического оборудования, требующие планового или аварийного ремонта.

Проведение тепловизионных испытаний совместно с анализом степени старения изоляции актуально для разбора аварийных ситуаций, в преддверии проверок Морского регистра РФ, планового и внепланового ремонта, ходовых испытаний и т. п.

Анализ результатов испытаний оборудования методами термографии доказывает эффективность метода, в том числе, для повышения количественных и качественных показателей работы судовой компании за счет совокупных результатов, которые могут быть охарактеризованы как энергосберегающий, социально-экономический эффекты.

Например, снижение эксплуатационных затрат на ремонт, убытки от аварий обеспечивает реальные экономические эффекты. На судостроительных и судоремонтных предприятиях актуальными мероприятиями являются предотвращение аварийных ситуаций за счет раннего обнаружения дефектов, исключение внеплановых затрат для ликвидации последствий аварий, разработка плановых мероприятий для замены или ремонта дефектного оборудования, раннее планирование закупки запчастей и т. п.

Внедрение системы тепловизионной диагностики на судах и объектах береговой инфраструктуры флота требует расширения нормативной базы, подготовки соответствующих методических материалов, включения новой научно-технической информации в программы подготовки соответствующих судовых специалистов в процессе их обучения и повышения квалификации.

Термографическое обследование электрооборудования судов и анализ состояния кабельных трасс, контроль технического состояния разнообразного электрооборудования испытано на рыбопромысловых судах, объектах инфраструктуры флота в Мурманской области.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. РД 34.45-51.300-97. Объем и нормы испытаний электрооборудования.
2. РД 13-04-2006. Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических средств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах.
3. Гобрей Р., Чернов В., Удод Э. Диагностирование электроустановок 0,4–750 кВ средствами инфракрасной техники. Киев: КВЦ, 2007. 375 с.
4. СОУ-Н ЕЕ 20.577: 2007. Техническое диагностирование электрооборудования и контактных соединений электроустановок и воздушных линий электропередачи средствами инфракрасной техники. 2007.
5. СПП 09110.20.366-08. Нормы и объем испытаний электрооборудования Белорусской энергосистемы. 2009.
6. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. М.: ИД Спектр, 2009. 544 с.
7. Власов А. Б. Модели и методы термографической диагностики объектов энергетики. М.: Колос, 2006. 280 с.
8. Малышев Л. А. Основы теории, методы и средства технического диагностирования судовых кабелей. СПб.: Рос. мор. регистр судоходства, 2002. 273 с.
9. Власов А. Б. К вопросу о сроке службы кабелей с резиновой изоляцией // Судостроение. 2003. № 1. С. 45–47.
10. Власов А. Б., Мухалев В. А. Экспресс-анализ технического состояния кабелей с резиновой изоляцией // Судостроение. 2015. № 6. С. 65–67.

Статья поступила в редакцию 01.06.2016

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Агарков Сергей Анатольевич** – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; г-р экон. наук, профессор кафедры управления производством; AgarkovSA@mstu.edu.ru.

**Власов Анатолий Борисович** – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; г-р техн. наук, профессор; профессор кафедры электрооборудования судов; vlasovab@mstu.edu.ru.

**Юдин Юрий Иванович** – Россия, 183010, Мурманск; Мурманский государственный технический университет; д-р техн. наук, профессор; зав. кафедрой судовождения; udinyui@mstu.edu.ru.



*S. A. Agarkov, A. B. Vlasov, Yu. I. Yudin*

## SYSTEM OF THERMAL IMAGING DIAGNOSTICS OF POWER AND HEAT ENGINEERING EQUIPMENT ONBOARD THE VESSELS AND COASTAL INFRASTRUCTURE

**Abstract.** Modern and perspective development of navy is inseparably connected with safety of the navigation provided with trouble-free and reliable functioning of life support systems and the ship equipment. In this regard the development of modern methods of expeditious diagnostics for control of technical condition of the equipment is actual. Thermal diagnostics is a recognized method of technical condition assessment of the equipment at the power plants, but the systematic IR-diagnostics is almost never used on the vessels of fishing fleet and shore facilities. The application of the methods of quantitative thermal imaging is conditioned with the necessity of detection of defects of power and heat engineering apparatus at the initial stage directly in the operating modes of exploitation. The developed system of thermal imaging tests of different systems, objects or materials combines different methods (electrophysical, optical) and is actualized as a complex with thermal, electrical and chemical tests. The major stages of using the system of technical control of marine equipment and apparatus based on the methods of quantitative thermal imaging technology. The method of thermal imaging inspection of electrical equipment is considered as a complex of the measures necessary for the tests and proper expert assessment. The examples of the use of the thermal imaging technology for vessels are considered, the results of thermal testing on the example of the analysis of the marine cable routing are given. The results of the tests of cable routing based on the analysis of the hardness of the hose and core insulation are presented. The analysis of the results will help define the lifetime of cable routing and give recommendations while inspecting and replacing the equipment.

**Key words:** marine vessels, safety of navigation, thermal imaging diagnostics, energy efficiency, technical condition, electric equipment, cable trays.

### REFERENCES

1. RD 34.45-51.300-97. *Ob'em i normy ispytanii elektrooborudovaniia* [Volume and standards of testing the electric equipment].
2. RD 13-04-2006. *Metodicheskie rekomendatsii o poriadke provedeniia teplovogo kontroliia tekhnicheskikh sredstv i sooruzhenii, primeniaemykh i ekspluatiruemykh na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh* [Methodical recommendations on the order of thermal control of technical means and constructions applied and operated at the dangerous industrial objects].
3. Gobrei R., Chernov V., Udod E. *Diagnostirovanie elektroustanovok 0,4–750 kV sredstvami infrakrasnoi tekhniki* [Diagnostics of power plants 0,4–750 kV using IR equipment]. Kiev, KVITs Publ., 2007. 375 p.
4. SOU-N EE 20.577: 2007. *Tekhnicheskoe diagnostirovanie elektrooborudovaniia i kontaknykh soedinenii elektroustanovok i vozdukhnykh linii elektropredachi sredstvami infrakrasnoi tekhniki* [Technical diagnostics of electric equipment and contact combinations of power plants and overhead transmission line using IR equipment]. 2007.
5. STP 09110.20.366-08. *Normy i ob'em ispytanii elektrooborudovaniia Belorusskoi energosistemy* [Standards and volume of testing the electric equipment of the Belorussian power system]. 2009.
6. Vavilov V. P. *Infrakrasnaia termografiia i teplovoi kontrol'* [IR thermography and thermal control]. Moscow, ID Spektr Publ., 2009. 544 p.
7. Vlasov A. B. *Modeli i metody termograficheskoi diagnostiki ob'ektov energetiki* [Models and methods of thermographic diagnostics of power engineering objects]. Moscow, Kolos Publ., 2006. 280 p.
8. Malyshev L. A. *Osnovy teorii, metody i sredstva tekhnicheskogo diagnostirovaniia sudovykh kabelei* [Bases of the theory, methods and means of technical diagnostics of marine cables]. Saint-Petersburg, Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva Publ., 2002. 273 p.



9. Vlasov A. B. K voprosu o stroke sluzhby kabelei s rezinovoi izoliatsiei [To the issue of lifetime of the cables with rubber insulation]. *Sudostroenie*, 2003, no. 1, pp. 45–47.

10. Vlasov A. B., Mukhalev V. A. Ekspres-analiz tekhnicheskogo sostoianiia kabelei s rezinovoi izoliatsiei [Express analysis of technical state of the cables with rubber insulation]. *Sudostroenie*, 2015, no. 6, pp. 65–67.

The article submitted to the editors 01.06.2016

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Agarkov Sergey Anatolievich** – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Doctor of Economics, Professor of the Department of Business Management; AgarkovSA@mstu.edu.ru.

**Vlasov Anatoliy Borisovich** – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Electrical Equipment of Ships; vlasovab@mstu.edu.ru.

**Yudin Yuriy Ivanovich** – Russia, 183010, Murmansk; Murmansk State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Professor; Head of the Department of Shipping; udinyui@mstu.edu.ru.

