

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-103-115
УДК 621.314.2+629.5.064.5

И.М. Калинин , О.В. Савченко, М.Ю. Хмель
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИСПЫТАНИЯ, ПРОВЕРКИ И ДИАГНОСТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СУДОВЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

Объект и цель научной работы. В работе исследуются вопросы диагностического обеспечения судовых силовых трансформаторов среднего напряжения на разных стадиях: от заводских приемо-сдаточных испытаний до швартовных испытаний. Целями исследования являются анализ требований и перспективных диагностических приборов для контроля технического состояния указанных трансформаторов, а также обзор проблемных моментов проверки данных устройств на электродинамическую стойкость.

Материалы и методы. Рассмотрены стадии (операции), которые проходит судовой силовой трансформатор от заводских приемо-сдаточных до швартовных испытаний. Выполнен анализ требований к данным устройствам. Произведено сравнение промышленных трансформаторов отечественного и зарубежного производства с целью проверки и измерения их параметров и требований к испытаниям на электродинамическую стойкость.

Основные результаты. Показано, что с учетом высоких эксплуатационных рисков, связанных с авариями и неисправностями установленных на судне трансформаторов, контролируемых характеристик и параметров данных устройств, измеренных после транспортирования или хранения (перед установкой на судно) для обеспечения высокой надежности недостаточно.

Представлены результаты анализа функциональных возможностей приборов контроля отечественного и зарубежного производства и определены направления по совершенствованию российских приборов в интересах судостроения.

Показано, что испытания трансформаторов на электродинамическую стойкость особенно важны, когда применяются новые конструктивные и технологические решения, надежная проверка которых невозможна ни расчетом, ни моделированием, а введение больших запасов «на незнание» экономически не выгодно.

Заключение. В случае выхода из строя силовых элементов системы электродвижения (СЭД) на судне дополнительными существенными затратами могут стать расходы на работы по постановке судна в док и демонтажу исправного оборудования и корпусных конструкций с целью выгрузки неисправного.

В руководящих документах отсутствуют требования по необходимому объему проверок элементов СЭД после транспортирования или хранения. К техническим мероприятиям обеспечения надежности СЭД относится диагностирование элементов системы перед установкой их на заказ и в процессе пуско-наладочных работ.

Зарубежные устройства технического диагностирования имеют больше функциональных возможностей по сравнению с отечественными. Выбор конкретного прибора или затраты по доработке отечественных приборов должны основываться на технико-экономической базе. Необходимы новые требования к методам испытаний силовых преобразовательных трансформаторов на электродинамическую стойкость при коротком замыкании, а также к созданию или модернизации региональных межотраслевых ударных испытательных стендов.

Ключевые слова: судовой силовой трансформатор, параметры силовых трансформаторов, диагностирование, электродинамическая стойкость, короткое замыкание.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-103-115
UDC 621.314.2+629.5.064.5

Для цитирования: Калинин И.М., Савченко О.В., Хмель М.Ю. Испытания, проверки и диагностическое обеспечение судовых силовых трансформаторов среднего напряжения. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 2(400): 103–115.

For citations: Kalinin I.M., Savchenko O.V., Khmel M.Yu. Tests, checks and diagnostics of ship medium voltage transformers. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 2(400): 103–115 (in Russian).

I.M. Kalinin^{id}, O.V. Savchenko, M.Yu. Khmel
 Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

TESTS, CHECKS AND DIAGNOSTICS OF SHIP MEDIUM VOLTAGE TRANSFORMERS

Object and purpose of research. The study deals with the diagnostic Issues of ship MV transformers from factory acceptance tests to harbor trials. The purpose is to analyse the requirements and advanced diagnostic tools for status monitoring of ship power transformers, as well as to overview the Issues of electrodynamic withstand checks on transformers.

Materials and methods. Stages (operations) are considered that ship power transformers undergo from the stage of factory acceptance tests to harbor trials. Requirements of ship transformers are analyzed. Foreign and Russian tools to check and measure power transformer parameters in industry as well as requirements for electrodynamic withstand testing are compared.

Main results. It is shown that in view of high operational risks associated with accidents and failures of on-board transformers it is not enough to check transformer characteristics after transportation or storage (prior to onboard installation) for ensuring their high reliability. Functional analysis of foreign and Russian diagnostic instruments is presented, and vectors for improvement of the Russian tools are defined for the interest of shipbuilding industry. It is shown that the electric withstand tests are particularly important when new designs and technologies are used where reliable verification is impossible neither through calculations nor through modeling, while large safety margins are economically not viable.

Conclusion. If some power units in the electric propulsion system (EPS) fail, extra costs would be spent on docking the vessel, dismantling of good equipment and hull structures to remove out-of-order equipment. Regulatory documentation does not specify the scope of EPS components' checkup after transportation or storage. Technical measures to ensure reliability of EPS elements include diagnostics of EPS elements prior to their installation on board the ship and during commissioning trials. Diagnostic tools of foreign make have more functional capabilities as compared to Russian instruments. Choice of specific devices and decisions to go for extra costs to further develop the Russian instruments should be based on feasibility studies. New regulations are required for testing rectifier transformers for electrodynamic withstand at short-circuit fault, as well as development and modernization of regional inter-industry shock test facilities.

Keywords: ship power transformer, parameters of power transformers, diagnostics, electrodynamic withstand, short-circuit fault.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

С целью удовлетворения потребности внутреннего рынка России до 2035 г. необходимо строительство около 250 морских транспортных судов и более

1500 транспортных судов класса «река-море», 1640 судов рыбопромыслового флота, более 250 судов и единиц морской техники вспомогательного и технического флотов, 90 научно-исследовательских судов, 24 ледоколов, а также около 150 судов и морской техники для освоения шельфовых место-

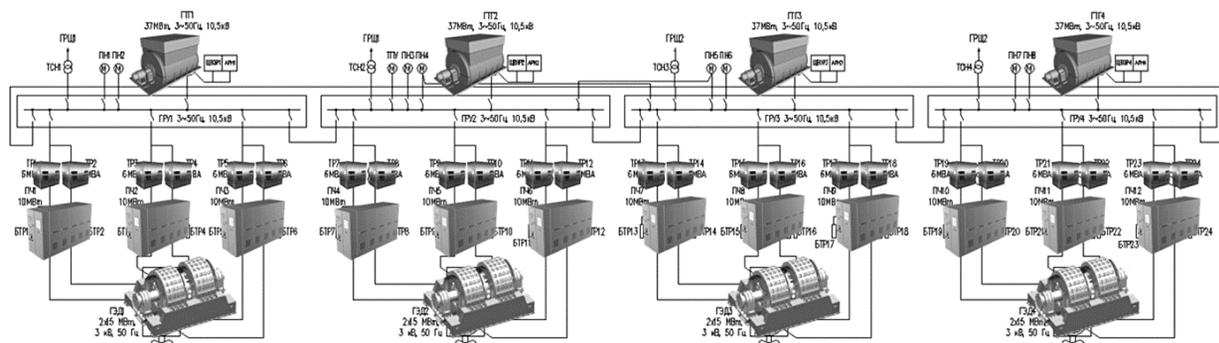
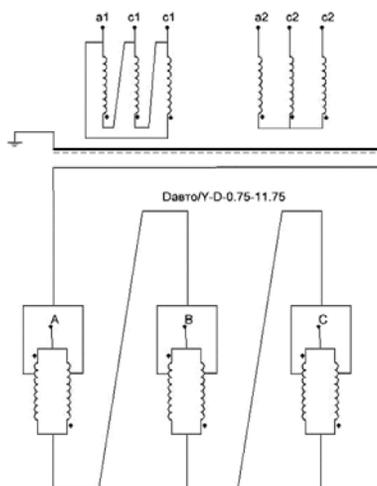


Рис. 1. Упрощенная схема единой электроэнергетической системы ледокола-лидера

Fig. 1. Simplified block diagram of integrated electric power system of icebreaker-leader

Рис. 2.
Принципиальная
схема, внешний вид
магнитопровода
и обмотки
согласующего
трансформатора

Fig. 2. Block diagram,
external view
of magnetic conductor
and winding of matching
transformer



рождений [1]. Все ледоколы и суда ледового плавания проектируются с системами электродвижения.

Наиболее характерным перспективным проектом, создаваемым для повышения скорости транспортировки грузов по Северному морскому пути [2], является ледокол-лидер проекта 10510 с суммарной мощностью на винтах 120 МВт. Планируемая скорость движения данного судна во льдах толщиной 2 м составит 10–12 уз.

Возможный вариант схемы силовой части единой электроэнергетической системы (ЕЭЭС) ледокола-лидера имеет вид, приведенный на рис. 1.

Электроэнергия в ЕЭЭС вырабатывается четырьмя главными турбогенераторами ГТГ1-ГТГ4 и подается на главные распределительные устройства ГРУ1-ГРУ4.

СЭД ледокола состоит из четырех гребных электроприводов (ГЭП) с восемью гребными электродвигателями (ГЭД) асинхронного типа с тремя трехфазными обмотками статора мощностью по 15 МВт, попарно соединенных в тандем. Управление ГЭД осуществляется преобразователями частоты ПЧ1-ПЧ12.

Для обеспечения электромагнитной совместимости СЭД с судовой сетью применяются трехобмоточные сетевые трансформаторы ТР1-ТР24 с вторичными обмотками, соединенными в «звезду» и «треугольник» (рис. 2).

Успех строительства и дальнейшей эксплуатации данного ледокола и других судов с системой электродвижения во многом зависит от качества проектирования, производства и пуско-наладки СЭД и ее составных частей.

В данной статье рассматриваются общие вопросы диагностического обеспечения СЭД на при-

мере силовых трансформаторов. Для примера, на ледоколе-лидере их количество составляет 28 единиц: 24 согласующих трансформатора и 4 – для собственных нужд.

Вопросы надежности силовых трансформаторов

Issues of reliability of power transformers

Надежность рассматривается как способность объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования [3]. Причины, приводящие к снижению надежности технических систем, можно разделить на четыре типа [4]:

- *конструктивные*: низкая надежность элементной базы, неправильный выбор элементов, неудачное схемно-компоновочное решение, недостаточная унификация элементов, недостаточная отработка технологий на этапах испытаний;
- *производственные*: нарушение качества материалов, недостаточный контроль входных параметров, недостаточная отработка технологии производства и сборки устройств, общая низкая культура производства;
- *эксплуатационные*: низкая квалификация технического персонала, низкая эффективность контрольно-проверочной аппаратуры, нарушение условий эксплуатации;
- *организационные*: отсутствие требований по поддержанию заданных показателей надежности, несоответствие заводских испытаний реальным условиям эксплуатации, неритмичность эксплуатации.

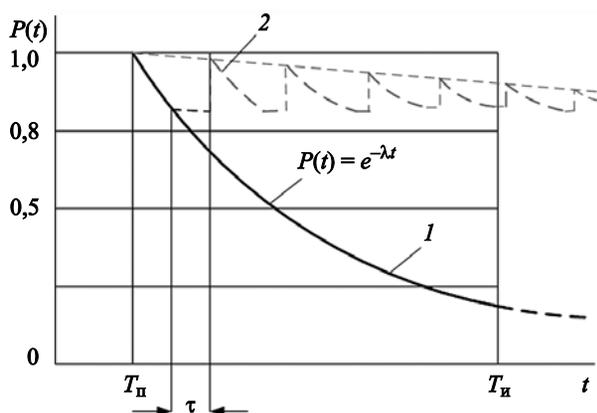


Рис. 3. Иллюстрация влияния технического диагностирования оборудования на вероятность его безотказной работы

Fig. 3. Illustration of diagnostics effect on fail-free operation

Основная характеристика надежности объекта – безотказность, имеющая в качестве показателя вероятность безотказной работы $P(t)$.

Качественное изменение информационной компоненты при определении технического состояния оборудования без разборки и демонтажа в процессе его использования позволяет удерживать вероятность безотказной работы последнего на требуемом высоком уровне в период всего цикла использования. Иллюстрацией к сказанному являются кривые на рис. 3, где 1 – стандартная кривая экспоненциального распределения отказов; 2 – изменение стандартной кривой при регулярной оценке технического состояния изделия и при восстановлении за

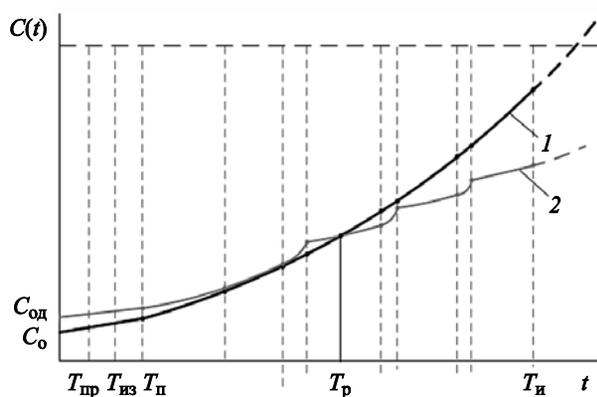


Рис. 4. Стоимость жизненного цикла судового оборудования

Fig. 4. Cost of ship equipment life cycle

время $\tau \ll (T_{и} - T_{п})$, где $T_{и}$ – время использования, $T_{п}$ – время приработки [5].

Экспоненциальный закон распределения отказов удовлетворительно характеризует надежность изделий в процессе их нормальной эксплуатации, и в этом смысле выражение $P(t) = e^{-\lambda t}$ называют основной формулой надежности, а интенсивность отказов (λ -характеристика) – основной определяемой (искомой) величиной. λ -характеристики изделий или их составных частей получают путем статистической обработки экспериментальных данных в процессе стендовых или эксплуатационных целевых испытаний.

Качественно подобную картину стоимости жизненного цикла судового оборудования $C(t)$, включая проектирование (с временем проектирования $T_{пр}$), изготовление (с временем изготовления $T_{из}$) и эксплуатацию, можно представить характеристиками на рис. 4.

Сравнительно низкая дополнительная стоимость создания системы и проведения процедур технического диагностирования, регламентного обслуживания и обслуживания по техническому состоянию обеспечивает меньшую суммарную стоимость жизненного цикла оборудования $C_{од}(t)$ (кривая 2) по сравнению со стоимостью жизненного цикла оборудования $C_0(t)$, не обеспеченного техническим диагностированием и подверженного большим рискам отказов и дорогостоящих ремонтов (кривая 1).

Рациональное распределение средств на повышение надежности технических систем на этапе проектирования, изготовления, испытаний и эксплуатации может привести к существенной экономии суммарных расходов обеспечения функционирования системы.

Для судовых технических систем, в отличие от систем общепромышленного исполнения, вопросы обеспечения надежности наиболее актуальны. Очевидно, что затраты на эксплуатацию для судовых технических систем зависят от надежности в большей степени. В случае выхода из строя мощного судового оборудования, особенно силовых элементов СЭД, помимо недополученной выгоды при использовании судна по назначению, в затраты на замену неисправных элементов может войти стоимость работ по постановке судна в док, демонтажу исправного оборудования и корпусных конструкций с целью выгрузки неисправного и т.д.

Если конструктивные и производственные причины низкой надежности выявляются при завод-

ских испытаниях, то после этого этапа на передний план выступают процессы обеспечения высокой надежности через исключение эксплуатационных и организационных причин ее снижения.

Рассмотрим стадии (операции), которые, как правило, проходит судовой силовой трансформатор от заводских приемо-сдаточных испытаний до швартовных испытаний:

- хранение на заводе изготовителе;
- погрузка и транспортировка с завода-изготовителя;
- выгрузка на судостроительном заводе;
- хранение перед погрузкой на заказ на территории судостроительного завода;
- погрузка на заказ;
- хранение на заказе;
- расконсервация;
- осмотр перед монтажом и подключением: проверка комплектности, оценка технического состояния после транспортирования или хранения (особое внимание уделяют целостности обмоток и магнитопровода, затяжке болтов в местах контактных соединений, опрессовке обмоток и магнитопровода);
- предмонтажная проверка: контроль изоляции на отсутствие замыканий на магнитопровод, изменение сопротивления изоляции обмоток (при необходимости проводят сушку);
- монтаж;
- наладочные работы: проверка оборудования, не входящего в состав трансформатора, системы собственных нужд трансформатора без подачи высокого напряжения и системы водяного охлаждения;
- стыковка;
- испытания после монтажа: электрические испытания высоковольтных цепей (испытания электрической прочности изоляции 90 % от номинального напряжения, измерение сопротивления обмоток постоянному току на всех ответвлениях, проверка коэффициента трансформации на всех ответвлениях);
- пуск (опробование): прослушивание и наблюдение за работой, включения трансформатора толчком для проверки отстройки защиты от бросков намагничивающего тока;
- швартовные испытания в соответствии с программой и методикой.

Таким образом, после проведения заводских испытаний трансформатор длительное время находится в условиях воздействия как климатических, так и человеческих факторов.

Требования к силовым трансформаторам

Requirements for power transformers

Требования к судовым трансформаторам регламентируются Российским морским регистром судоходства (РМРС) и Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [6].

РМРС установлены Правила классификации и постройки морских судов [7], в соответствии с которыми силовые трансформаторы должны отвечать требованиям стандарта МЭК 60076-11 [8], и Правила технического наблюдения за постройкой судов (ПТН) [9], определяющие объем испытаний и проверок судовых силовых трансформаторов. Результаты анализа требований указанных документов приведены в табл. 1.

В руководящих документах отсутствуют требования по необходимому объему проверок после транспортирования и хранения трансформаторов. Учитывая рассмотренные высокие эксплуатационные риски, связанные с авариями и неисправностями установленных на судне трансформаторов, контролируемых характеристик и параметров данных устройств, измеренных после транспортирования или хранения (перед установкой на судно), для обеспечения высокой надежности явно недостаточно. Практика показала, что недостатки конструкции обмоток и изоляции, технологические отклонения при изготовлении, а также изъяны хранения, монтажа и эксплуатации могут быть причиной повреждения трансформаторов.

В соответствии с [8] требования к стойкости при коротких замыканиях (КЗ) сухих трансформаторов должны соответствовать ГОСТу Р52719 «Трансформаторы силовые. Общие технические условия».

Согласно данному стандарту, приемка в части стойкости при КЗ и ударных толчках током (последнее – только для трансформаторов собственных нужд электростанций) должна проводиться в зависимости от мощности трансформатора посредством, по крайней мере, одного из перечисленных далее способов, который должен быть указан в нормативном документе (НД) на конкретные трансформаторы или оговорен при заключении контракта на его поставку:

- испытание на стойкость при коротких замыканиях по ГОСТу 20243;
- расчетное сравнение с трансформатором аналогичной конструкции (прототипом), выдержавшим испытания на стойкость при КЗ;

Таблица 1. Требования руководящих документов к испытаниям силовых трансформаторов

Table 1. Regulatory documentation requirements for tests of power transformers

Испытания и проверки	Руководящий документ		
	ПУЭ	МЭК 60076-11:2004	ПТН
Осмотр и проверки	+	+	+
Измерение сопротивления изоляции	+	+	+
Проверка работоспособности	+	–	+
Испытания электрической прочности изоляции	+	+	+
Испытания на соответствия эксплуатационным условиям (механическим и климатическим)	+	–	+
Испытания защитного исполнения оболочек	–	–	+
Испытания на нагревание	–	+	+
Испытания на перегрузку по току	–	–	+
Испытания на электродинамическую и термическую прочность при токе короткого замыкания	–	+	+
Измерение сопротивления обмоток постоянному току	+	+	+
Проверка коэффициента трансформации и группы соединений обмоток	+	+	+
Измерение потерь и напряжения короткого замыкания	+*	+	–
Измерение потерь и тока холостого хода	+	+	–
Испытание изоляции приложенным переменным напряжением промышленной частоты	+	+	–
Испытание изоляции индуктированным переменным напряжением промышленной частоты	+	+	–
Испытания изоляции напряжениями грозовых импульсов	–	+	–
Измерение характеристик частичных разрядов	–	+**	–

* для трансформаторов мощностью от 125 МВА

** для трансформаторов с литой изоляцией

- расчет (расчетное обоснование) по методике изготовителя для трансформаторов большой мощности (более 40 МВА), которые согласно НД не подлежат испытаниям на стойкость при КЗ, при отсутствии успешно испытанного прототипа.

Также требования и методы расчетов электродинамической и термической стойкости к КЗ определяются ГОСТом Р55188–012 (МЭК 60076-5:2006) «Трансформаторы силовые. Стойкость к коротким замыканиям».

Причины поломок силовых трансформаторов

Causes of breakdowns of power transformers

Анализ расследований выхода из строя трансформаторов за длительный период показывает, что при

расследовании устанавливается одна из нижеследующих причин [10]:

- увлажнение изоляции по разным причинам;
- загрязнение изоляции;
- некачественный ремонт;
- несоответствие электродинамической стойкости воздействию токам КЗ;
- превышение воздействий: механических (от токов КЗ), тепловых (перегрузок), электрических (перенапряжения, перевозбуждения магнитопровода);
- дефекты из-за недостатков конструкции и технологии изготовления;
- применение некачественного материала при изготовлении.

Анализ неисправностей и аварий силовых трансформаторов приведен в табл. 2.

Таблица 2. Перечень неисправностей и аварий силовых трансформаторов

Table 2. Trouble shooting list of power transformers

Основные виды повреждений	Возможные причины повреждений	Способы выявления
Деформации и смещение обмоток под воздействием электродинамических сил токов КЗ	Конструктивные дефекты, которые не обеспечивают сбалансированное распределение потока рассеяния и отсутствие потока несимметрии, стабильность и равномерность сил прессовки обмоток. Неправильный расчет электродинамических сил, действующих на обмотку при КЗ. Нарушение технологии производства, сборки и пропитки обмоток	Испытания на электродинамическую стойкость к токам КЗ
Повреждения изоляции витков и межкатушечной изоляции	Частичные разряды при работе устройства	Измерения и локация частичных разрядов
Витковое замыкание в обмотке	Старение из-за длительных перегрузок, недостаточного охлаждения [10], загрязнения [9]. Нарушение изоляции витков вследствие механических повреждений. Дефекты изоляции провода, не замеченные при изготовлении обмоток. Дефекты провода (заусенцы, внутренние раковины, плохая пайка) [10]. Неплотная укладка витков, плохая прессовка обмотки [9]. Перетирание изоляции проводников из-за вибрации [9]	Замер сопротивления постоянному току. Опыт КЗ при пониженном напряжении с поочередным замыканием одной из фаз. Тепловизионный контроль. Поиск короткозамкнутых витков искателем Порозова
Обрыв обмотки	Отгорание выводных концов вследствие электродинамических усилий при КЗ, витковых КЗ или из-за плохих соединений. Плохая внутренняя пайка проводов. Выгорание части витков по причине виткового замыкания в обмотке [10]. Механическое смещение или перегрев проводника вызывает его обрыв или перегорание и соответствующее изменение сопротивления токоведущей цепи	Проверка показаний амперметров, включенных в отдельные фазы, или проверка токовыми клещами. Проверка мегаомметром при соединении обмоток в «звезду». Замер сопротивления обмоток постоянному току между линейными вводами при соединении в «треугольник» (при полном обрыве внутреннего «треугольника» результаты двух замеров равны, причем каждый равен сопротивлению фазы; третий замер фазы, где произошел обрыв, даст двойную величину; при неполном обрыве третий замер даст большую величину, чем два первых). Внешний осмотр
Пробой на корпус	Дефектность изоляции вследствие старения или наличие трещин, отверстий, изломов и т.д. Попадание сырости и грязи. Перенапряжения. Деформация обмоток при КЗ [10]	Проверка мегаомметром изоляции между обмотками и корпусом. Внешний осмотр активной части
Межфазное короткое замыкание	Причины те же, что и при пробое на корпус. Замыкание на отводах. Замыкание на вводах. Выход из строя силовых ключей преобразователей частоты	Внешний осмотр. Замер сопротивления изоляции

Таблица 2. Продолжение

Table 2. Continuation

Основные виды повреждений	Возможные причины повреждений	Способы выявления
Замыкания элементарных проводников в витке	Электродинамические силы, токопроводящие мостики, вибрация, дефекты обмоточного провода (заусенцы, задиры)	Измерение потерь от потока рассеяния (метод определения частотной зависимости в диапазоне частот 20–600 Гц [2, 7, 10]). Опыт короткого замыкания
Низкое значение сопротивления изоляции магнитопровода	Старение изоляции из-за перегрева или коррозии магнитопровода	Внешний осмотр. Измерение сопротивления изоляции между пластинами при постоянном токе. Опыт холостого хода (ХХ) при малом напряжении. Замер тока намагничивания
Местное замыкание листов стали	Попадание посторонних предметов с образованием контуров короткозамкнутых витков, сцепленных с основным потоком	Внешний осмотр. Тепловизионный контроль. Опыт ХХ при малом напряжении. Замер тока намагничивания
Увлажнение изоляции	Неправильное хранение. Неисправность системы противоконденсатного обогрева	Замер коэффициента абсорбции

Системная надежность обеспечивается рациональной организацией необходимых действий, в т.ч. использованием необходимых средств обеспечения надежности на всех уровнях управления ЭЭС в каждой зоне ответственности, включая диагностику и анализ состояния оборудования, оценку остаточного ресурса и обоснование ремонта оборудования по состоянию [12].

Контроль состояния и оценка работоспособности трансформатора должны обеспечивать выявление как можно большей части дефектов, опасных в эксплуатации. Многообразие видов этих недостатков, разные условия их развития, в т.ч. скорость развития, требуют применения многих средств и методов контроля состояния, используемых как во время работы оборудования (непрерывный или периодический контроль), так и в остановленном состоянии (обследование при ревизиях и ремонтах) [13].

Измерения перед погрузкой трансформатора на судно позволяют определить увлажнение и загрязнение изоляции, механические повреждения устройства. Своевременное обнаружение и устранение этих дефектов позволит существенно снизить риски обнаружения неисправностей на борту судна с последующим ремонтом, цена которого, очевидно, будет значительно превышать затраты на проверку трансформатора перед погрузкой. Измеренные

в этом случае параметры фиксируются в диагностической истории трансформатора.

Надежная работа трансформатора обеспечивается только при своевременном выявлении возникающих при его работе дефектов. Выявление недостатков на ранней стадии их развития позволяет перейти к стратегии обслуживания трансформатора в зависимости от его состояния и своевременно выводить его в ремонт при наличии дефектов, не давая им развиваться в повреждение. Соответственно, снижаются расходы на ремонт и увеличивается срок службы трансформатора. Решение этой задачи осуществляется при контроле состояния устройства во время работы.

Более подробную оценку состояния трансформатора дает обследование с отключением его от сети. Результаты такой проверки принципиально отличаются от полученных при контроле во время работы. В последнем случае, как правило, выявляется целый ряд существующих одновременно дефектов, и оценка носит интегральный характер. На отключенном же от сети трансформаторе возможно применение более сложных и чувствительных методов выявления дефектов, появляется возможность оценить их объем и опасность по отдельности.

Существенным для системы профилактики является сравнение результатов измерений в ра-

ботающем и отключенном трансформаторе с обнаруженными при разборке дефектами. Таким путем накапливается база данных о дефектах и эффективности их выявления разными методами. База данных может быть использована при количественной оценке риска выхода трансформатора из строя как основа стратегии профилактики оборудования по обоснованию его надежности [13].

С целью гарантирования высокой эксплуатационной надежности СЭД необходима расширенная программа обеспечения надежности системы и ее элементов на всех элементарных стадиях жизненного цикла судовых силовых трансформаторов, предусматривающая как организационные, так и технические мероприятия. К последним следует отнести, прежде всего, диагностирование элементов СЭД, в частности, силовых трансформаторов перед установкой на заказ и в процессе пусконаладочных работ.

Сравнение трансформаторов отечественного и зарубежного производства

Comparison of transformers of domestic and foreign production

Авторы проанализировали следующие промышленные устройства отечественного и зарубежного

производства для проверки и измерения параметров силовых трансформаторов (рис. 5):

- измеритель параметров силовых трансформаторов [14];
- измеритель трехфазный CA540 [15];
- трехфазная испытательная система для комплексного тестирования силовых и распределительных трансформаторов [16];
- система тестирования трансформаторов и оборудования ПС [17];
- измеритель параметров трансформаторов «Коэффициент 3.3» [18];
- измеритель параметров силовых трансформаторов СЭИТ-4М-К540 [19].

Результаты сравнения приборов для проверки параметров трансформаторов приведены в табл. 3.

Устройства Tristrano-600 фирмы Omikron и TRAX компании Megger имеют больше функциональных возможностей по сравнению с отечественными приборами и, как следствие, большую стоимость. Предполагаем, что при достаточно большом количестве обслуживаемых трансформаторов их стоимость быстро окупится.

Выбор конкретного прибора или затраты по доработке отечественных приборов до потребностей эксплуатирующих суда организаций или заказчиков судовых силовых трансформаторов требуют дальнейшей детальной проработки и технико-экономического обоснования.



К-540
(Россия, Белгород)



Tristrano-600,
Omikron (Австрия)



TRAX, Megger
(Великобритания)



CA540 «Олест Русь»
(Россия, Москва)



«Коэффициент»,
НИИЭМП (Россия, Пенза)



СЭИТ-4М-к540, «Челэнерго-прибор» (Россия, Челябинск)

Рис. 5. Приборы для проверки параметров трансформаторов отечественного и зарубежного производства

Fig. 5. Instruments for checking the parameter of Russian and foreign transformers

Таблица 3. Сравнение приборов для проверки трансформаторов
Table 3. Comparison of tools for checking transformers

Прибор	Вид испытания					Сенсорный экран	Размагничивание	Удобство транспортировки
	Омическое сопротивление обмоток постоянному току	Опыт ХХ при малом напряжении	Коэффициент трансформации	Сопrotивление КЗ (опыт КЗ)	Сопrotивление КЗ в частотном диапазоне			
Tristrano-600	+ 30А	+	+	+	+	+	+	+
«Коэффициент 3.3»	-	+	+	+	-	-	-	-
К-540-4П	+	+	+	+	-	-	-	+
СА-540	-	+	+	-	-	-	-	-
СЭИТ-4М-К540	+ 5А	+	+	+	-	-	-	-
TRAX Megger	+ 100 А / 50 В	+	+	+	+	+	+	+

Рассматривая проверку трансформаторов на электродинамическую стойкость при КЗ, следует отметить, что экспертиза конструкции и расчетов не может являться единственной частью процесса приемки. Из всех трансформаторов, вышедших из строя при эксплуатации, треть прошла процедуру обзора проектной документации (но без подтверждения этих результатов испытаниями), в то же время ни один из вышедших из строя трансформаторов не был испытан. Опыт авторов по работе с трансформаторами, которые не прошли испытания с первого раза, но успешно выдержали их после доработок, демонстрирует, что путь к успешной разработке надежного оборудования состоит из использования расчетных методов и последующего подтверждения расчетным путем [20].

Особенно важны испытания для тех случаев, когда в трансформаторах применяются новые конструктивные и технологические решения, надежная проверка которых невозможна ни расчетом, ни моделированием, а введение больших запасов «на незнание» экономически не выгодно [21].

Испытания на стойкость при коротких замыканиях проводят согласно ГОСТу Р20243 «Трансформаторы силовые. Методы испытаний на стойкость при коротком замыкании». Испытания проводят на специализированных ударных стендах, имеющих источники кратковременной большой мощности – ударные генераторы (специальные устройства большой мощности, обладающие по-

вышенной динамической стойкостью при КЗ). На ударном стенде должен быть коммутационный аппарат – замыкатель цепи КЗ [21].

Еще в начале XXI в., в связи с резким сокращением испытаний трансформаторов и упадком испытательных стендов, специалисты отмечали: «Положение в России по проблеме стойкости трансформаторов при КЗ контрастирует с положением в развитых зарубежных странах, в которых проводится большое число испытаний, вводятся в работу испытательные стенды. А ведь в СССР проблеме стойкости при КЗ уделялось такое же внимание, как и в передовой в этом отношении Франции» [22].

Сегодня очевидно, что состояние дел стало еще хуже. Ударные стенды в России практически отсутствуют. Из-за больших издержек, связанных с испытаниями трансформаторов, требования действующих ГОСТов игнорируются.

При этом в настоящее время в промышленности все больше и больше внедряются силовые трансформаторы, преобразующие электроэнергию для выпрямительных установок (преобразовательные трансформаторы). В их числе – судовые силовые трансформаторы гребного электропривода, к безотказности которых должны предъявляться более жесткие требования.

Это требует совершенствования методов испытаний с учетом характера нагрузки трансформаторов, в особенности аварийных режимов преобразовательных трансформаторов, а также технико-

экономического обоснования создания (модернизации) в регионах ударных стендов по испытаниям силовых преобразовательных трансформаторов. Новые (модернизированные) ударные стенды целесообразно рассматривать как региональные межотраслевые центры коллективного пользования.

Выводы

Conclusions

В случае выхода из строя мощного судового оборудования, особенно силовых элементов СЭД, помимо недополученной выгоды при использовании судна по назначению в затраты на замену неисправных элементов входят работы по возможной постановке судна в док, демонтажу исправного оборудования и корпусных конструкций с целью выгрузки неисправного.

В руководящих документах отсутствуют требования по необходимому объему проверок элементов СЭД после транспортирования или хранения.

С целью гарантирования высокой эксплуатационной надежности СЭД необходима расширенная программа обеспечения надежности СЭД и ее элементов на всех элементарных стадиях жизненного цикла, предусматривающая как организационные, так и технические мероприятия. К последним следует отнести, прежде всего, диагностирование элементов СЭД перед установкой на заказ и в процессе пуско-наладочных работ.

Зарубежные устройства технического диагностирования имеют больше функциональных возможностей и большую стоимость по сравнению с отечественными. Выбор конкретного прибора или затраты по доработке российских приборов до потребностей эксплуатирующих суда организаций или заказчиков судовых силовых трансформаторов требуют технико-экономического обоснования.

Использование в промышленности и на судах, не имеющих испытанных на электродинамическую стойкость прототипов, силовых преобразовательных трансформаторов предъявляет новые требования к методам испытаний и определяет необходимость создания или модернизации региональных межотраслевых ударных испытательных стендов.

Список использованной литературы

1. Стратегия развития судостроительной промышленности на период до 2035 года: утв. распоряжением Правительства Рос. Федерации от 29 окт. 2019 г. № 2553-р // Собрание законодательства РФ. 2019. № 44. Ст. 6258.
2. Калинин И.М. Компьютерная модель асинхронного гребного электропривода с тремя обмотками на статоре // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Вып. 1(395). С. 132–140. DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-132-140.
3. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. Москва : Стандартинформ, 2016. IV, 23 с.
4. Андреев А.В., Яковлев В.В., Короткая Т.Ю. Теоретические основы надежности технических систем. Санкт-Петербург : Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 221 с.
5. Мясников Ю.Н. Основы теории надежности и диагностического обеспечения судовых энергетических установок. Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский гос. ун-т водных коммуникаций, 2010. 182 с.
6. Правила устройства электроустановок : (в ред. приказов Минэнерго Рос. Федерации от 20 дек. 2017 г. № 1196 и № 1197). 7-е и 6-е изд. Санкт-Петербург : ДЕАН, 2018. 1164, [1] с.
7. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. XI. Электрическое оборудование : НД № 2-020101-152 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2022. 372 с.
8. ГОСТ Р 54827–2011 (МЭК 60076-11:2004). Трансформаторы сухие. Общие технические условия. Москва : Стандартинформ, 2013. V, 33 с.
9. Правила технического наблюдения за постройкой судов и изготовлением материалов и изделий для судов. Ч. IV. Техническое наблюдение за изготовлением изделий : НД № 2-020101-156 / Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2022. 551 с.
10. Могузов В.Ф. Обслуживание силовых трансформаторов : [В 2 ч.]. Москва : Энергопрогресс : Энергетик, 2002. 2 ч. (Библиотечка электротехника ; вып. 1(37), 2(38)).
11. Фарман С.А., Бун А.Ю. Ремонт и модернизация трансформаторов. 2-е изд., доп. Москва ; Ленинград : Энергия, 1966. 624 с.
12. Концепция обеспечения надежности в электроэнергетике / Н.И. Вороний, Г.Ф. Ковалев, Ю.Н. Кучеров [и др.]. Москва : Энергия, 2013. 301 с.
13. Алексеев Б.А. Крупные силовые трансформаторы. Контроль состояния в работе и при ревизии. Москва : Энергопрогресс : Энергетик, 2010. 87 с. (Библиотечка электротехника ; вып. 1(133)).
14. К5403-01-1.00.00.00РЭ. Измеритель параметров силовых трансформаторов К540-3. Руководство по эксплуатации. Белгород : Молния-Белгород, [2013]. 45 с.
15. Измеритель трехфазный CA540 // Олгест Русь : [сайт]. Екатеринбург, 2022. URL: <https://oltestrus.ru/ca540> (дата обращения: 10.03.2022).

16. Testrano 600 : Трехфазная испытательная система для комплексного тестирования силовых трансформаторов // Omicron : [сайт]. S.l., 2022. URL: www.omicronenergy.com/testrano-600 (дата обращения: 10.03.2022).
17. Трах : Система тестирования трансформаторов и оборудования ПС : [проспект] / Megger. Москва, [б.г.]. 5 с.
18. Коэффициент-3 – измеритель коэффициента трансформации // НПФ «Приборы» : [сайт]. Санкт-Петербург, 2021. URL: http://pribory-spb.ru/pribor_KOEFFITSIENT-3-izmeritel-koeffitsienta-transformatsii (дата обращения: 10.03.2022).
19. Измеритель параметров силовых трансформаторов СЭИТ-4М-К540 / Челэнергоприбор // Прибор-Энерго : [сайт]. Екатеринбург, [б.г.]. URL: <https://pribor-energy.ru/product/12218> (дата обращения: 10.03.2022).
20. *Смитс Р.П.П., Тэ Пасхе Л.Х.* Испытания трансформаторов большой мощности на стойкость при КЗ // Энергоэксперт. 2009. № 4. С. 104–114.
21. *Лурье А.И.* Электродинамическая стойкость трансформаторов при коротких замыканиях // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях : сборник статей. Москва : Знак, 2005. С. 8–48.
22. *Левцкая Е.И., Лурье А.И., Панибратец А.Н.* Проблема электродинамической стойкости трансформаторов при коротких замыканиях // Электродинамическая стойкость трансформаторов и реакторов при коротких замыканиях : сборник статей. Москва : Знак, 2005. С. 477–489.
6. Regulations for electrical installation: (in edition of Ministry of Energy Orders of 20 Dec. 2017 No. 1196 and No. 1197). 7 and 6 editions St. Petersburg. DEAN 2018. 1164, [1] p. (*in Russian*).
7. Rules of classification and construction of sea-going ships. Part XI. Electric equipment. НД No. 2-020101-152 // Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022. 372 p. (*in Russian*).
8. GOST R 54827–2011 (IEEC 60076-11:2004). Dry transformers. General Technical Conditions. Moscow : Standartinform, 2013. V, 33 p. (*in Russian*).
9. Rules for survey of ship construction and manufacturing of materials and items for ships. Part IV. Survey of parts manufacturing items. НД No. 2-020101-156 // Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2022. 551 p. (*in Russian*).
10. *Moguzov V.F.* Maintenance of power transformers: [in 2 parts]. Moscow : Energoprogress: Energetik, 2002. 2 parts (Library of electric engineer; vol. 1(37), 2(38)) (*in Russian*).
11. *Farman S.A., Bun A.Yu.* Repair and modernization of transformers. 2nd ed. supplemented, Moscow, Leningrad : Energia, 1966. 624 p. (*in Russian*).
12. Concept of reliability in electric power engineering / *N.I. Voropai, G.F. Kovalev, Yu.N. Kuchеров* [et al.]. Moscow : Energia, 2013. 301 p. (*in Russian*).
13. *Alekseev B.A.* Large power transformers. Control in service and inspection. Moscow : Energoprogress : Energetik, 2010. 87 p. (Library of electric engineer; vol. 1(133)) (*in Russian*).
14. К5403-01-1.00.00.00ПЭ. Power transformer tester K540-3. Operation Manual. Belgorod : Moknya-Belgorod, [2013]. 45 p. (*in Russian*).
15. Three-phase tester CA540 // Oltest Rus : (site). Yekaterinburg, 2022. URL: <https://oltestrus.ru/ca540/> (Accessed on 10.03.2022) (*in Russian*).
16. Testrano 600: Three-phase test system of comprehensive testing of power transformers // Omicron : [site]. S.l., 2022. URL: www.omicronenergy.com/testrano-600 (Accessed: 10.03.2022) (*in Russian*).
17. Трах : test system for transformers and substation equipment: [booklet] / Megger. Moscow, 5 p. (*in Russian*).
18. Coefficient-3 – device for measuring transformation ratio// НПФ Приборы : [site]. St. Petersburg, 2021. URL: http://pribory-spb.ru/pribor_KOEFFITSIENT-3-izmeritel-koeffitsienta-transformatsii (Accessed: 10.03.2022) (*in Russian*).
19. Tester for power transformer СЭИТ-4М-К540 / Челэнергоприбор/Прибор-Энерго : [site]. Yekaterinburg. URL: <https://pribor-energy.ru/product/12218/> (Accessed: 10.03.2022) (*in Russian*).

References

1. Strategy of shipbuilding industry development until 2035: approved by decree of the Russian Federation Government dated 29 October 2019 No. 2553-p // Collection of Legislation of the Russian Federation. 2019. No. 44. Article 6258 (*in Russian*).
2. *Kalinin I.M.* Computer model of induction propeller drive with three windings on stator // Transactions of the Krylov State Research Centre. Vol. 1(395). P. 132–140. DOI 10.24937/2542-2324-2021-1-395-132-140 (*in Russian*).
3. GOST 27.002-2015. Reliability in Technology. Terms and definitions. Moscow : Standartinform, 2016. IV, 23 p. (*in Russian*).
4. *Andreev A.V., Yakovlev V.V., Korotkaya T.Yu.* Theoretical basics of technical system reliability St. Petersburg : Izd-vo Polytechnical Univeristy, 2018, 221 p. (*in Russian*).
5. *Myasnikov Yu.N.* Basic principles of the reliability theory and diagnostic support. St. Petersburg : St. Petersburg University of Waterway Communications (*in Russian*), 2010. 182 p.

20. *Smits R.P.P., Paskhe L.H.* Tests of high-power transformers for resistance to short-circuit fault // *Energexpert*. 2009. No. 4. P. 104–114 (*in Russian*).
21. *Lurie A.I.* Electrodynamic resistance of transformers at short-circuit faults // *Electrodynamic resistance of transformers and reactors at short-circuit faults: collection of articles*. Moscow : Znak, 2005. P. 8–48 (*in Russian*).
22. *Levitskaya E.I., Lurie A.I., Panibratets A.N.* Problem of Electrodynamic resistance of transformers at short-circuit faults // *Electrodynamic resistance of transformers and reactors at short-circuit faults: collection of articles*. Moscow : Znak, 2005. P. 477–489 (*in Russian*).

Сведения об авторах

Калинин Игорь Михайлович, д.т.н., начальник отдела перспективного развития и инновационных разработок ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: kaigmi@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1532-4449>.

Савченко Олег Владиславович, к.т.н., генеральный директор ФГУП «Крыловский государственный научный

центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Хмель Михаил Юрьевич, инженер-наладчик филиала ЦНИИ «СЭТ» ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196128, Россия, Санкт-Петербург, Благодатная ул., д. 6. E-mail: t89095838912@yandex.ru.

About the authors

Igor M. Kalinin, Dr. Sci. (Eng.), Head of the Prospective Development and Innovative Developments Department, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: kaigmi@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1532-4449>.

Oleg V. Savchenko, Cand. Sci. (Eng.), Director General, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-46-23. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Mikhail Yu. Khmel, Maintenance Engineer, TSNII SET branch, Krylov State Research Centre. Address: 6, Blagodatnaya st., St. Petersburg, Russia, post code 196128. E-mail: t89095838912@yandex.ru.

Поступила / Received: 14.02.22

Принята в печать / Accepted: 28.04.22

© Калинин И.М., Савченко О.В., Хмель М.Ю., 2022