

ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ
OPERATION OF FACILITIES
NUCLEAR INDUSTRY

УДК 621.311.25 :620.179.13
DOI 10.26583/gns-2023-01-06
EDN ONHQIC

МЕТОДИКА АНАЛИЗА ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
РЕЗЕРВНОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ АЭС
СОВМЕСТНО С ПОКАЗАНИЯМИ ШТАТНЫХ ПРИБОРОВ

© 2023 Елена Александровна Абидова¹, Прохор Владимирович Поваров²,
Владимир Михайлович Попов³, Дарья Александровна Прыткова⁴,
Ольга Юрьевна Пугачева⁵

^{1,2,4,5}Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского
ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия

³Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Ростовская атомная станция»

¹e-abidova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0258-5543>

²nii_energomash@mail.ru

³info@vdpnp.rosenergoatom.ru

⁴nii_energomash@mail.ru

⁵OYPugacheva@mephi.ru

Аннотация. В рамках НИОКР по разработке комплексной автоматизированной системы тепловизионного контроля (КАС ТВК) выполнены аналитические исследования результатов тепловизионного контроля с использованием КАС ТВК совместно с соответствующими значениями результатов контроля температур, полученными в штатной системе контроля состояния ДГУ. Апробация КАС ТВК в условиях АЭС проводилась путем термографирования резервных дизель-генераторных установок АЭС типа 12zv40/48+S2445-12. Одновременно проводилась измерения параметров дизеля и генератора с помощью штатной системы контроля. Предложена методика, обеспечивающая анализ равномерности работы цилиндров дизеля, состояния подшипников коленчатого вала, состояния и качества вырабатываемой электроэнергии генератора, а также анализ работы систем смазки и охлаждения. Практическое применение методики демонстрирует соответствие температуры, измеренные штатной системой и КАС ТВК. Совместный анализ результатов, полученных штатной и разрабатываемой системой обеспечивает повышение глубины диагностического обследования и подтверждает информативность термографических параметров и качество работы измерительных каналов штатных систем. Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

Ключевые слова: тепловизионный контроль, равномерность работы дизеля, диагностика подшипников коленчатого вала, контроль качества электроэнергии, диагностика систем смазки и охлаждения.

Для цитирования: Абидова Е.А., Поваров П.В., Попов В.М., Прыткова Д.А., Пугачева О.Ю. Методика анализа тепловизионных параметров резервной дизельной электростанции АЭС совместно с показаниями штатных приборов // Глобальная ядерная безопасность. – 2023. – № 1(46). – С. 67-78 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-06>.

Поступила в редакцию 16.12.2022

После доработки 17.02. 2023

Принята к публикации 21.02.2023

Актуальность разработки КАС ТВК

Комплексная автоматизированная система хранения и анализа результатов термографического контроля оборудования АЭС (КАС ТВК), структура которой представлена на рисунке 1, разрабатывается в рамках договора между НИЯУ МИФИ и ЧУ «Наука и Инновации» с испытаниями и внедрением на Ростовской АЭС. Разработка КАС ТВК направлена на повышение качества диагностики оборудования и снижение вероятности внезапного отказа оборудования за счёт совершенствования процессов тепловизионного контроля [1].

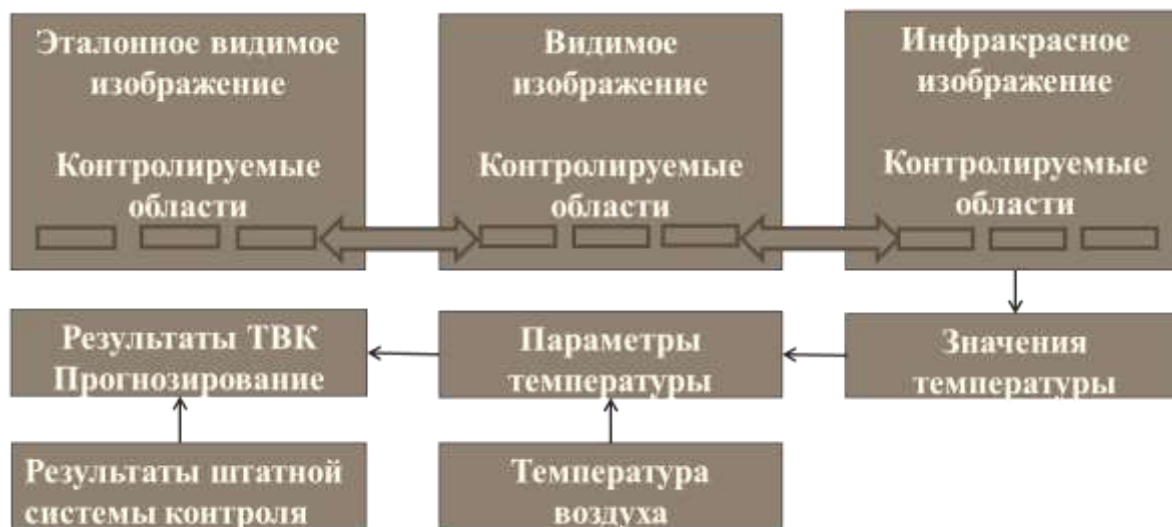


Рисунок 1 – Структура КАС ТВК [Structure of a complete automated thermal imaging control system]

Оптимизация процессов термографического обследования оборудования АЭС достигается путём максимального исключения ручной обработки и методически обоснованной алгоритмизации анализа полученных термографических данных, что соответствует стратегической цели снижения себестоимости выработки электроэнергии. Для формирования заключения о техническом состоянии обследуемой единицы оборудования разрабатываемая КАС ТВК должна на основе базы диагностических признаков, сформированной для разных видов оборудования, автоматически выявлять на термограмме место возможного дефекта.

КАС ТВК при регистрации термограмм извлекает из них термографическую информацию с сопутствующими данными (условиями тепловизионной съемки и параметрами настроек тепловизионного прибора) и сохраняет в своей внутренней базе данных [2]. В процессе регистрации данных обеспечивается визуализация процесса тепловизионного контроля и возможность корректировки данных в случае необходимости. КАС ТВК работает с термографическими снимками, полученными с помощью приборов тепловизионного контроля различных типов. Термограммы могут быть переданы в КАС ТВК как непосредственно с тепловизора, так и из удаленного сетевого хранилища.

По итогам третьего этапа база данных КАС ТВК заполнена результатами тепловизионного контроля оборудования Ростовской АЭС. Тестовые версии программного обеспечения и база данных КАС ТВК переданы на Ростовскую АЭС для испытаний и использования в работе. Объектами обследования является разнообразное оборудование. На данном этапе апробация КАС была проведена при диагностике РДЭС РоАЭС. Особенностью апробации была возможность сравнения результатов термографирования с показаниями штатных приборов. Совместный анализ термографических параметров и показаний штатных приборов позволил обосновать РИД.

Существующие методы тепловизионного контроля

Для диагностики поршневых двигателей широко используются комплексы аппаратно-программных средств на основе сопоставления контролируемых параметров с нормативными с учетом типа оборудования [3, 4]. Общим для всех анализируемых систем является возможность мониторинга и достоверной оценки состояния оборудования в процессе его эксплуатации без вывода из работы. Анализ достоинств и недостатков методов контроля дизель-генераторного оборудования и используемых для этого устройств, приведенных в отобранных патентах, показал, что ни один из них не удовлетворяет в полной мере требованиям [5, 6] оценки качества электроэнергии вырабатываемой генератором и проверки достоверности измерительных каналов системы контроля. С учетом указанных требований представляется целесообразной разработка методики диагностирования резервной дизельной электростанции АЭС, позволяющая:

- проверить информативность термографических параметров и качество работы измерительных каналов штатной системы;
- уточнить техническое состояние дизель-генератора;
- обеспечить дополнительный контроль качества генерируемой электрической энергии.

Следует отметить, что полноценная реализация методики диагностирования резервной дизельной электростанции возможна только при наличии постоянно пополняемой базы данных результатов оперативного контроля технического состояния и диагностики ответственного оборудования АЭС.

Методика анализа диагностических параметров КАС ТВК совместно с показаниями штатных приборов РДЭС

1. Методика анализа равномерности работы цилиндров по показаниям штатной системы контроля и КАС ТВК

В результате термографирования с помощью Системы должны быть получены температуры выхлопных патрубков. Одновременно штатной системой регистрируют температуры выхлопных газов по цилиндрам. Вычисляются средние значения температуры выхлопных газов [7].

Температуры выхлопных патрубков и средние значения температуры выхлопных газов не должны превышать 625°C , а разброс значений не более 120°C . При большем разбросе работа дизеля может считаться неравномерной.

Между выборками температуры, которые зарегистрированы тепловизором и штатной системой, должна быть положительная корреляция. Разность среднего значения температуры газов и температуры патрубка не должна превышать 30%. Если не наблюдается соответствия между выборками температуры, которые зарегистрированы тепловизором и штатной системой, то возможна ошибка регистрации при термографировании, либо сбой в одном из каналов измерения температуры штатной системы.

2. Методика анализа работы генератора по показаниям штатной системы контроля и КАС ТВК

При диагностике генератора проект методики КАС ТВК подразумевает термографирование подшипников генератора и щеточно-коллекторного аппарата [8].

Температура подшипника, зарегистрированная при термографировании, не должна превышать 70°C . Штатной системой измеряется температура воды на входе в подшипник генератора и температура воды на выходе из подшипника генератора. Температура воды на выходе из подшипника генератора должна положительно коррелировать с частотой вращения дизеля.

Температура щеточных механизмов генератора, зарегистрированная при термографировании, не должна превышать 100°C . В моменты изменения мощности, которые определяются исходя из показаний штатной системы, допустимо превышение температуры щеточных механизмов генератора.

Штатной системой также контролируются следующие показатели работы генератора:

- частота генератора;
- активная и реактивная мощности генератора;
- напряжение фазы А, В, С;
- ток фаз А, В, С;
- мощность генератора.

Данные показатели позволяют обеспечить дополнительный контроль качества генерируемой электрической энергии [9].

По показаниям активной P и реактивной мощности Q генератора возможно вычисление коэффициента мощности, формула (1):

$$\varphi = \arctg \frac{Q}{P}. \quad (1)$$

Анализ тока в фазах (при работе генератора на постоянной мощности) позволяет сопоставить средние значения в каждой из фаз I_a , I_b , I_c между собой и таким образом вычислить различие силы тока по фазам. Для этого вычисляется максимальное $I_{\max}$, минимальное $I_{\min}$ значение в выборке $\{I_a, I_b, I_c\}$, их соотношение, формула (2):

$$\Delta_I = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\min}}. \quad (2)$$

Анализ тока в фазах (при работе генератора на постоянной мощности) также позволяет вычислить коэффициенты пульсации тока в фазах путем сопоставления средних значений тока в каждой фазе с разностью между наибольшим и наименьшим значениями ΔI_a , ΔI_b , ΔI_c , формулы (3):

$$K_{пIa} = \frac{\Delta I_a}{I_a}, \quad K_{пIb} = \frac{\Delta I_b}{I_b}, \quad K_{пIc} = \frac{\Delta I_c}{I_c}. \quad (3)$$

Аналогично реализуется сопоставление средних значений напряжений в каждой из фаз U_a , U_b , U_c между собой. Для вычисления различия напряжения по фазам определяется максимальное $U_{\max}$, минимальное $U_{\min}$ значение в выборке $\{U_a, U_b, U_c\}$ и их соотношение, формула (4):

$$\Delta_U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\min}}. \quad (4)$$

Аналогично путем сопоставления средних значений напряжения в каждой фазе с разностью между наибольшим и наименьшим значениями ΔU_a , ΔU_b , ΔU_c коэффициенты пульсации напряжения в фазах, формулы (5):

$$K_{пUa} = \frac{\Delta U_a}{U_a}, \quad K_{пUb} = \frac{\Delta U_b}{U_b}, \quad K_{пUc} = \frac{\Delta U_c}{U_c}. \quad (5)$$

Рекомендуется значения параметров генератора, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, – коэффициента мощности, различие силы тока по фазам, коэффициенты пульсации тока в фазах, различия напряжения по фазам, коэффициенты пульсации напряжения в фазах, – сохранять в базе данных с целью установления

тенденций изменения параметров при последующем диагностировании. Указанные параметры генератора также целесообразно учитывать при контроле оборудования той же конструкции.

3. Методика анализа работы подшипников коленчатого вала

Проект методики диагностирования предполагает оценку работы подшипников коленчатого вала по термограммам смотровых лючков, на которые отбрасывается масло при вращении подшипников коленчатого вала. Определяется максимальное $T_{\max}$ и минимальное $T_{\min}$ значение температур на лючках $\{T_{л1}, T_{л2} \dots T_{л12}\}$, по которым оценивается разброс, выражение (6) [10]:

$$\Delta_T = \frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\min}} * 100\% . \quad (6)$$

Разброс температур больше 10% может косвенно свидетельствовать об отклонении в работе подшипника.

4. Методика анализа работы системы смазки

При диагностике системы смазки дизеля КАС ТВК подразумевает термографирование масляного насоса. Температура насоса не должна превышать 80°C [11].

Штатной системой также контролируются следующие показатели работы системы смазки:

- температура масла на входе в дизель;
- температура масла на выходе из дизеля;
- давление масла на дизеле (на входе в дизель);
- давление масла на дизеле (в дизеле);
- уровень масла в циркуляционной цистерне.

Температура масла на входе дизель – 50-60°C. Разность температур масла на входе и выходе из дизеля не должна превышать 12-14°C.

Рекомендуется значения параметров системы смазки, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, сохранять в базе данных с целью установления тенденций изменения параметров при последующем диагностировании. Указанные параметры системы смазки также целесообразно учитывать при контроле оборудования той же конструкции.

5. Методика анализа работы системы охлаждения

При диагностике дизеля проект методики КАС ТВК подразумевает термографирование насосов внутреннего и промежуточного контуров охлаждения [12].

Температура насосов внутреннего и промежуточного контуров, зарегистрированная при термографировании, не должна превышать 80°C.

Штатной системой также контролируются следующие показатели работы системы охлаждения:

- температура воды внутреннего контура охлаждения на выходе из дизеля;
- уровень воды в расширительном баке внутреннего контура охлаждения;
- температура воды внутреннего контура охлаждения на входе в охладитель воды;
- температура воды промежуточного контура на входе в охладитель воды внутреннего контура;
- температура воды промежуточного контура на выходе из охладителя воды внутреннего контура.

Данные показатели позволяют обеспечить дополнительный контроль состояния работы системы охлаждения. Рекомендуется значения параметров системы охлаждения, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, – температура воды

внутреннего контура охлаждения на выходе из дизеля; уровень воды в расширительном баке внутреннего контура охлаждения; температура воды внутреннего контура охлаждения на входе охладителя воды; температура воды промежуточного контура на входе охладителя воды внутреннего контура; температура воды промежуточного контура на выходе охладителя воды внутреннего контура, – сохранять в базе данных с целью установления тенденций изменения параметров при последующем диагностировании. Указанные параметры системы охлаждения также целесообразно учитывать при контроле оборудования той же конструкции.

Результаты практического применения методики

Апробация КАС ТВК в условиях АЭС проводилась путём термографирования резервных дизель-генераторных установок АЭС типа 12zv40/48+S2445-12: 1РДЭС-3 (17.08.2022); 2РДЭС-3 (18.08.2022); 2РДЭС-2 (15.09.2022). Одновременно проводились измерения параметров дизеля и генератора с помощью штатной системы контроля.

1. Анализ работы цилиндров по показаниям штатной системы контроля и КАС ТВК

В результате термографирования получены температуры выхлопных патрубков $T_{\text{патр}}$, которые сопоставляются со средними значениями температур выхлопных газов $T_{\text{газ}}$ по цилиндрам, измеренным штатной системой. Как показывают данные на рисунке 2, температуры выхлопных газов соответствуют норме (абсолютные значения не более 450 °С, разброс не более 120 °С).

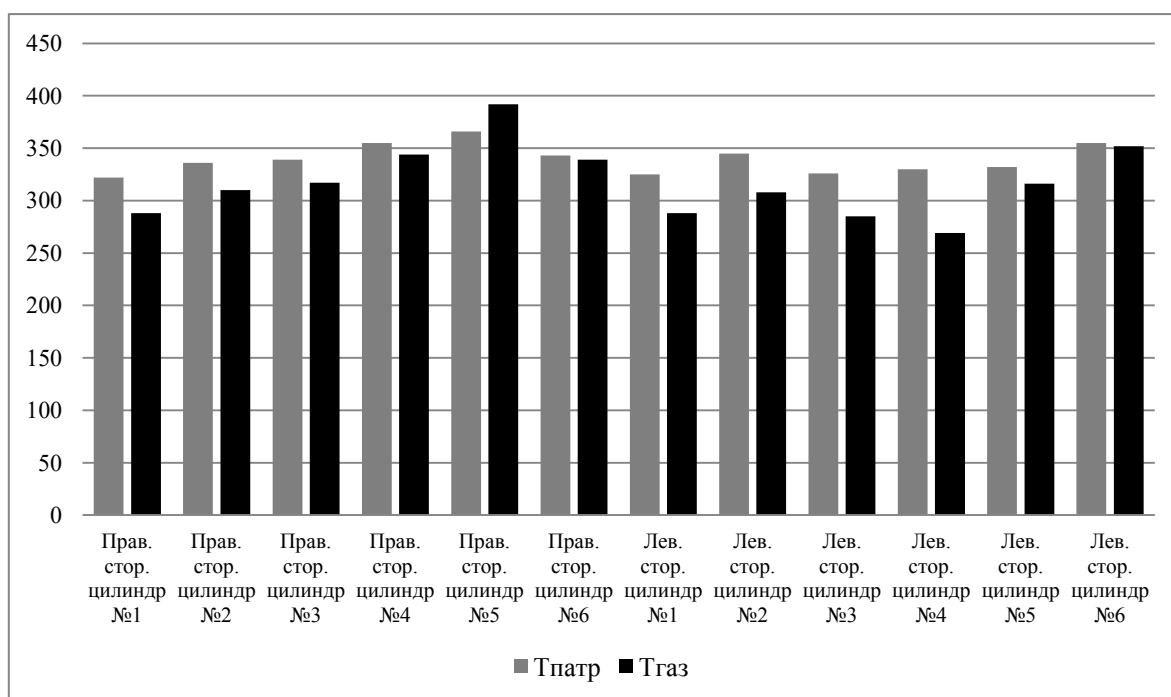


Рисунок 2 – Распределение температур выхлопных патрубков и температур выхлопных газов по цилиндрам 1РДЭС-3 Ростовской АЭС [Distribution of exhaust outlet temperatures and exhaust gas temperatures by cylinder 1 of the Rostov NPP RPP-3]

Наблюдается соответствие температуры, измеренные штатной системой и КАС ТВК.

2. Анализ работы генератора

В соответствии с проектом методики КАС ТВК выполнялось термографирование подшипников генератора S2445-12ДГУ 1РДЭС-3 2РДЭС-3, 2РДЭС-2 РоАЭС. Результаты представлены в таблице 1. Температура меньше предельно допустимой (70°С).

Таблица 1 – Температура подшипников генератора S2445-12 в составе ДГУ 12zv40/48 [Bearing temperature of S2445-12 alternator as part of 12zv40/48]

№	Объект	Дата	$T_{\text{подш}}, ^\circ\text{C}$
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	59
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	59
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	58

Анализ температуры воды на выходе подшипника генератора 2РДЭС-3, зарегистрированный штатной системой контроля, показал положительную корреляцию между температурой и частотой вращения дизеля: подшипник нагревается и остывает после повышения и снижения соответственно скорости вращения.

Также согласно проекту методики термографированию подвергался щеточно-коллекторный аппарат генераторов 1РДЭС-3 2РДЭС-3, 2РДЭС-2. Результаты представлены в таблице 2. Для сравнения приводятся результаты термографирования ДГУ того же типа на Нововоронежской и Смоленской АЭС. Как видно, наибольшая температура щеточного механизма наблюдается на установке 1РДЭС-3. Возможно, рост температуры связан с набросом частоты вращения дизеля и соответственно с ростом частоты напряжения генератора, которые зафиксировала штатная система в период.

Таблица 2 – Температура щеточных механизмов генератора [Temperature of the alternator brushes]

№	Объект	Дата	$T_{\text{щет}}, ^\circ\text{C}$
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	113
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	95
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	82
4	5ДГ-2 (НВ АЭС)	14.12.2020	50
5	1ДГ-3 (САЭС)	03.06.2019	69

Для контроля показателей качества электроэнергии генераторов 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 использовались измерительные центры MiCOM, с их помощью измерялись токи и напряжения в фазах, частота тока, активная и реактивная мощность.

По формуле (1) определены коэффициенты мощности 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 – 0,60; 0,66 и 0,66 соответственно.

Пульсация тока по формуле (2) составила 0,0227, 0,017, 0,017 для 1РДЭС-3; 0,093, 0,091, 0,092 для 2РДЭС-2; и 0,049, 0,047, 0,05 для 2РДЭС-3.

Пульсация напряжения в соответствии с формулой (4) для 1РДЭС-3 составила 0,0037, 0,0035, 0,0035. Напряжение 2РДЭС-3 и 2РДЭС-2 контролировалась в одной фазе, пульсация составила 0,0033 0,0034 и соответственно.

Различие напряжения в фазах, вычисленное по формулам (5), для 1РДЭС-3 составило 0,0013.

Штатные системы контроля 2РДЭС-3, 2РДЭС-2 позволяют установить следующие показатели работы генератора:

- температура воды в подшипник генератора 2РДЭС-2 37,81 $^{\circ}\text{C}$, 2РДЭС-3 38,21 $^{\circ}\text{C}$;
- температура воды из подшипника генератора 2РДЭС-2 40,53 $^{\circ}\text{C}$, 2РДЭС-3 39,75 $^{\circ}\text{C}$.

Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

3. Анализ работы подшипников коленчатого вала

Для оценки работы подшипников коленчатого вала в соответствии с проектом методики было проведено термографирование смотровых лючков дизелей 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2.

Сопоставление температур лючков трех дизелей согласно формуле 6 не указывает на отклонения в работе подшипников. Распределение температур смотровых лючков (рисунок 3) демонстрирует, что данные температуры по правому борту выше, чем по левому, а также, что температуры лючков 1РДЭС-3 и 2РДЭС-2 в целом выше, чем 2РДЭС-3.

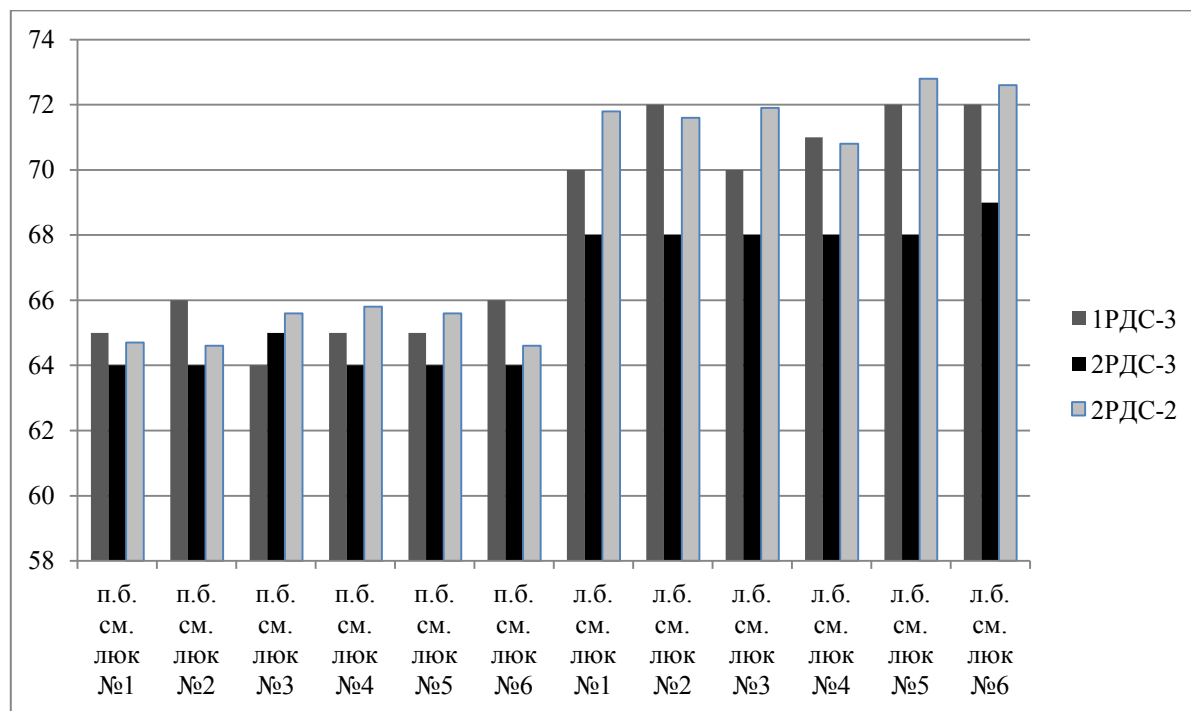


Рисунок 3 – Распределение температур смотровых лючков [Temperature distribution of inspection doors]

Большая температура на левом борте объясняется направлением вращения коленчатого вала.

4. Анализ работы системы смазки

Для оценки работы подшипников коленчатого вала в соответствии с проектом методики было проведено термографирование смотровых лючков дизелей 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2.

Температуры масляных насосов $T_{\text{м.насос}}$, зарегистрированные при испытании КАС ТВК приведены в таблице 3. Как показывают данные таблицы 3, температура масляных насосов соответствует норме.

Таблица 3 – Температуры масляных насосов дизелей 12zv40/48 [Oil pump temperatures for 12zv40/48 diesel engines]

№	Объект	Дата	$T_{\text{м.насос}}, ^\circ\text{C}$
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	71
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	69
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	72

Контроль работы системы смазки 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 осуществлялся штатной системой. Усредненные параметры системы смазки, – температура масла на входе в дизель $T_{\text{мд1}}$, температура масла на выходе из дизеля $T_{\text{мд2}}$, давление масла на

входе в дизель Рмд1, давление масла в дизеле Рмд2, уровень масла в циркуляционной цистерне Лц, – при близком значении мощности дизеля представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры системы смазки дизелей 12zv40/48 [Параметры системы смазки дизелей 12zv40/48]

Объект	P, кВт	Q, кВт	T _{мд1} , °C	T _{мд2} , °C	P _{мд1} , кгс/см ²	P _{мд2} , кгс/см ²	Лц, см
1РДЭС-3	2547	1770	53,7	57,8	5,1	5,1	1526,6
2РДЭС-2	2784	2098	53,9	52,1	6,0	6,1	1460,1
2РДЭС-3	2722	2153	52,9	57,3	6,1	6,1	1530,0

Как видно из данных таблицы, температура масла на входе в дизель не выше предельно допустимой (60°C), разность температур масла на входе и выходе из дизеля также ниже предельно допустимых значений (12-14°C);

Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

5. Анализ работы системы охлаждения

Для оценки работы системы охлаждения в соответствии с проектом методики было проведено термографирование насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2.

Температуры масляных насосов, зарегистрированные при испытании КАС ТВК, приведены в таблице 5. Для сравнения приведены температуры насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 12zv40/48, зарегистрированные при предыдущем термографировании, а также результаты термографирования дизелей 12zv40/48 на Нововоронежской и Смоленской станциях.

Таблица 5 – Температуры насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 12zv40/48 [Температуры насосов внутреннего и промежуточного контуров дизелей 12zv40/48]

№	Объект	Дата	T _{насос в.к.} , °C	T _{насос п.к.} , °C
1	1РДЭС-3 (РоАЭС)	17.08.2022	59	41
2	2РДЭС-3 (РоАЭС)	18.08.2022	53	36
3	2РДЭС-2 (РоАЭС)	15.09.2022	67	38
4	2РДЭС-2 (РоАЭС)	20.05.2015	64	42
5	2РДЭС-3 (РоАЭС)	15.06.2015	60	43
4	5ДГ-2 (НВ АЭС)	14.12.2020	54	42
5	1ДГ-3 (САЭС)	03.06.2019	58	

Как показывают данные таблицы 5, температура насосов внутреннего и промежуточного контуров 1РДЭС-3, 2РДЭС-3, 2РДЭС-2 в 2022 не превышает предельно допустимого значения.

Контроль работы системы охлаждения 1РДЭС-3, 2РДЭС-2 и 2РДЭС-3 осуществлялся штатной системой. Усредненные параметры системы охлаждения, – температура воды внутреннего контура охлаждения на выходе из дизеля Твкд., уровень воды в расширительном баке внутреннего контура охлаждения Лрб, температура воды внутреннего контура охлаждения на входе охладителя воды Твко, температура воды промежуточного контура на входе охладителя воды внутреннего контура Тпк1, температура воды промежуточного контура на выходе охладителя воды внутреннего контура Тпк2, – при близком значении мощности представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Параметры системы охлаждения дизелей 12zv40/48 [Cooling system parameters for 12zv40/48 diesel engines]

Объект	P, кВт	Q, кВт	Твк.д., °С	Lpб, см	Твк.о, °С	Тпк1, °С	Тпк2, °С
1РДЭС-3	2547	1770	59,24	596,64	53,23	74,50	36,50
2РДЭС-2	2784	2098	57,91	685,12	46,79	42,72	38,00
2РДЭС-3	2722	2153	55,22	593,18	45,55	46,06	33,81

Значения параметров, полученные при анализе показателей штатной системы контроля, зарегистрированных при установившемся значении мощности, будут использованы при последующем диагностировании для установления тенденций изменения данных параметров.

Таким образом, совместный анализ результатов, полученных штатной и разрабатываемой системой, подтверждает информативность термографических параметров и качество работы измерительных каналов штатных систем.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Белов, О.А. Методология оценки технического состояния электрооборудования при развитии параметрических отказов / О.А. Белов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. – 2015. – № 3. – С. 96-102.
2. Семенцов, С.Г. Тепловизионные методы оценки влияния температурных режимов на надежность электронной аппаратуры / С.Г. Семенцов, В.Н. Гріднев, Н.А. Сергеева // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2016. – № 1(106). – С. 3-14.
3. Гевлич, С.О. Оценка технического состояния оборудования методом тепловизионного контроля / С.О. Гевлич, Д.С. Гевлич, Т.Г. Бабяк, К.А. Васильев, С.С. Коновалов, Н.В. Макарова, М.В. Мирзонов // Технические науки – от теории к практике. – 2015. – № 9(45). – С. 86-94.
4. Абидова, Е.А. Разработка автоматизированной системы хранения и обработки результатов тепловизионного контроля оборудования АЭС / Е.А. Абидова, Е.В. Воробьев, М.В. Калашников, Д.А. Прыткова // Наука и инновации в современном мире: Сборник научных статей. Ч. IX / Научный ред. канд.филол.н. Е.Н. Муратова. – Москва: Издательство «Перо», – 2021. – С. 62-65.
5. Енюшин, В. Н. О влиянии излучательной способности поверхности исследуемого объекта на точность измерения температур при тепловизионном обследовании / В.Н. Енюшин, Д.В. Крайнов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1(23). – С. 99-103.
6. Ещенко, Д.В. Практическое применение методов тепловизионного анализа и контроля / Д.В. Ещенко, А.Т. Никитин, О.А. Белов // Вестник Камчатского государственного технического университета. – 2020. – № 54. – С. 6-19. – DOI 10.17217/2079-0333-2020-54-6-19.
7. Yuanbin W., Yang Y., Jieying R. Research on thermal state diagnosis of substation equipment based on infrared image // Advances in Mechanical engineering, 2019 №4(11). P. 1-14.
8. Цаплин, А.Е. Совершенствование контроля узлов механической части электрического подвижного состава применением интеллектуальной системы тепловизионного контроля / А.Е. Цаплин, В.А. Васильев, С.А. Фомин // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 268-274. – DOI 10.20295/1815-588X-2019-2-268-274.
9. Teju V., Bhavana D. An efficient object detection using OFSA for thermal imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education, 2020 №1(22). P. 1-22
10. Концепция создания комплексной автоматизированной системы тепловизионного контроля / Д. В. Швец, Е. А. Абидова, М. В. Калашников [и др.] // Глобальная ядерная безопасность. – 2022. – № 1(42). – С. 60-66. – DOI 10.26583/gns-2022-01-06.
11. Виброакустический мониторинг и тепловизионный контроль при диагностировании дизеля 12ZV40/48 / Е.А. Абидова, В.И. Соловьев, О.Ю. Пугачева, Р.И. Ремизов // Глобальная ядерная безопасность. – 2016. – № 2(19). – С. 70-76.
12. Абидова, Е.А. Результаты диагностирования дизеля 15Д-100 посредством виброакустического мониторинга и тепловизионного контроля / Е.А. Абидова, О.Ю. Пугачева, В.И. Соловьев // Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XI Междунар. науч.-

- практ. конф., 27-29 мая 2015 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2015. – 1 электрон. опт. диск (CD).
13. Абидова, Е.А. Диагностирование дизель-генераторного оборудования АЭС по результатам виброконтроля и теплотерии / Е.А. Абидова, О.Ю. Пугачева, В.И. Соловьев [и др.] // Безопасность ядерной энергетики [Электронный ресурс] : тез. докл. XII Междунар. науч.-практ. конф., 1-3 июня 2016 г. / ВИТИ НИЯУ МИФИ [и др.]. – Волгодонск: [Б. и.], 2016. – 1 электрон. опт. диск (CD).

REFERENCES

- [1] Belov O.A. Metodologiya ocenki tekhnicheskogo sostoyaniya elektrooborudovaniya pri razvitiy parametricheskikh otkazov [Methodology of Evaluation the Technical Condition of Electrical Equipment in the Development of Parametric Failures], Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya [Bulletin of Astrakhan State University. Series: Marine Engineering and Technology], 2015, No. 3, pp. 96-102 (in Russian).
- [2] Sementsov S.G., Gridnev V.N., Sergeeva N.A. Teplovizionnye metody ocenki vliyaniya temperaturnykh rezhimov na nadezhnost' elektronnoy apparatury [Infrared Thermography Methods of Assessing Temperature Effect on Reliability of Electronic Equipment], Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya Priborostroenie [Bulletin of Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrumentation series], 2016, No. 1, pp. 3-14. DOI: 10.18698/0236-3933-2016-1-3-14 (in Russian).
- [3] Gevlich S.O., Gevlich D.S., Babyak T.G., Vasil'ev K.A., Konovalov S.S., Makarova N.V., Mirzonov M.V. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya oborudovaniya metodom teplovizionnogo kontrolya [Assessment of Technical Condition of Equipment by Thermal Imaging Control], Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike [Technical sciences - from Theory to Practice], 2015, No. 9(45), pp. 86-89 (in Russian).
- [4] Abidova E.A., Vorobyev E.V., Kalashnikov M.V., Prytkova D.A. Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy hraneniya i obrabotki rezul'tatov teplovizionnogo kontrolya oborudovaniya AES [Development of Automated System for Storing and Processing the Results of Thermal Imaging Control of NPP Equipment], Nauka i innovatsii v sovremennom mire: Sbornik nauchnykh statej. CH. IX [Science and Innovation in the Modern World: Collection of scientific articles. Part IX]. Moscow: Pero Publishing House, 2021, pp. 62-65 (in Russian).
- [5] Enyushin V.N., Krajnov D.V. O vliyani izluchatel'noy sposobnosti poverhnosti issleduemogo ob'ekta na tochnost' izmereniya temperatur pri teplovizionnom obsledovanii [Influence of the Emissivity of the Surface of Object under Study on the Accuracy of Temperature Measurement during Thermal Imaging Examination], Izvestiya KGASU [News of the KSUAE], 2013, No. 1(23), pp. 99-103 (in Russian).
- [6] Eshchenko D.V., Nikitin A.T., Belov O.A. Prakticheskoe primeneniye metodov teplovizionnogo analiza i kontrolya [Practical Application of Thermal Imaging Analysis and Control Methods]. Vestnik KSTU [Bulletin of KSTU], 2020, No. 54, pp. 6-19 (in Russian).
- [7] Yuanbin W., Yang Y., Jieying R. Research on Thermal State Diagnosis of Substation Equipment Based on Infrared Image // Advances in Mechanical engineering, 2019, No. 4(11), pp. 1-14 (in English).
- [8] Caplin A.E., Vasil'ev V.A., Fomin S.A. Sovershenstvovanie kontrolya uzlov mekhanicheskoy chasti elektricheskogo podvizhnogo sostava primeneniem intellektual'noy sistemy teplovizionnogo kontrolya [Improving Control of Components of Mechanical Part of Electric Rolling Stock by Using an Intelligent Thermal Imaging Control System], Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshchenij [News of the St. Petersburg University of Railway Communications], 2019, No. 2(16), pp. 268-274 (in Russian).
- [9] Teju V., Bhavana D. An Efficient Object Detection Using OFSA for Thermal Imaging // International Journal of Electrical Engineering & Education, 2020, No. 1(22), pp. 1-22 (in English).
- [10] Shvets D.V., Abidova E.A., Kalashnikov M.V., Cooks P.V. [et al] Kontseptsiya sozdaniya kompleksnoy avtomatizirovannoy sistemy teplovizionnogo kontrolya [The concept of creating an integrated automated system for thermal imaging control], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2022, No. 1(42), p. 60-66 (in Russian).
- [11] Abidova E.A., Solovev V.I., Pugacheva O.Yu., Remizov R.I. Vibroakusticheskij monitoring i teplovizionnyj kontrol' pri diagnostirovani dizelya 12ZV40/48 [Vibroacoustic Monitoring and Thermal Imaging Control in the Diagnosis of Diesel 12ZV40/48], Global'naya yadernaya bezopasnost' [Global Nuclear Safety], 2016, No. 2(19), pp. 70-76 (in Russian).
- [12] Abidova E.A., Pugacheva O.Yu., Solovyov V.I. Rezul'taty diagnostirovaniya dizelya 15D-100 posredstvom vibroakusticheskogo monitoringa i teplovizionnogo kontrolya [The Results of Diagnosing a Diesel Engine 15D-100 by Means of Vibroacoustic Monitoring and Thermal Imaging

- Control] Bezopasnost' yadernoj energetiki [Elektronnyj resurs] : tez. dokl. HI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 27-29 maya 2015 g [Safety of Nuclear Energy [Electronic resource]: abstract report of XI International Scientific Practical conference, May 27-29, 2015 / VETI NRNU MEPhI Volgodonsk, 2015, 1 electron. opt. disc (CD) (in Russian).
- [13] Abidova E.A., Pugacheva O.Yu., Solovyov V.I. [et al] Diagnostirovanie dizel'-generatornogo oborudovaniya AES po rezul'tatam vibrokontrolya i teplometrii report [Diagnostics of NPP Diesel Generator Equipment Based on the Results of Vibration Monitoring and Thermal Measurements] Bezopasnost' yadernoj energetiki [Elektronnyj resurs]: tez. dokl. HI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 1-3 iyunya 2016g [Safety of Nuclear Energy [Electronic resource]: abstract report of XII International Scientific Practical conference, June 1-3, 2016 / VETI NRNU MEPhI Volgodonsk, 2016, 1 electron. opt. disc (CD) (in Russian).

Methodology of Analysis of Thermal Vision Parameters of NPP Standby Diesel Together with Standard Instrument Readings

Elena A. Abidova¹, Prokhor V. Povarov², Vladimir M. Popov³, Daria A. Prytkova⁴, Olga Yu. Pugacheva⁵

¹²⁴⁵Volgodonsk Engineering Technical Institute the branch of National Research Nuclear University «MEPhI», Lenin St., 73/94, Volgodonsk, Rostov region, Russia 347360

³«Rostov nuclear power plant» branch of Rosenergoatom Concern JSC

¹e-abidova@mail.ru, ORCID iD: 0000-0003-0258-5543, WoS Researcher ID: O-1870-2018

²nii_energomash@mail.ru

³info@vdpnp.rosenergoatom.ru

⁴nii_energomash@mail.ru

⁵OYPugacheva@mephi.ru

Received by the editorial office on 12/16/2022

After revision on 02/17/2023

Accepted for publication 02/21/2023

Abstract. Analytical studies of the results of thermal imaging control using IAS TIK together with the corresponding values of the temperature control results obtained in the standard DGS condition monitoring system were carried out within the framework of R&D for the development of an integrated automated system for thermal imaging control (IAS TIK). Approbation of IAS TIK in NPP conditions was carried out by thermography of standby diesel generator sets of NPP type 12zv40/48+S2445-12. At the same time, the parameters of the diesel engine and the generator were measured using the standard control system. The methodology is proposed that provides an analysis of the uniformity of the operation of diesel cylinders, the condition of the crankshaft bearings, the condition and quality of the generated electricity of the generator, as well as the analysis of the operation of lubrication and cooling systems. The practical application of the technique demonstrates the correspondence between the temperatures measured by the standard system and the IAS TIK. A joint analysis of the results obtained by the standard and developed systems provides an increase in the depth of the diagnostic examination and confirms the information content of the thermographic parameters and the quality of the measurement channels of the standard systems. The parameter values obtained from the analysis of the indicators of the standard control system, recorded at a steady power value, will be used in subsequent diagnostics to establish trends in these parameters.

Keywords: thermal imaging control, uniformity of diesel operation, diagnostics of crankshaft bearings, power quality control, diagnostics of lubrication and cooling systems.

For citation: Abidova E.A., Povarov P.V., Popov V.M., Prytkova D.A., Pugacheva O.Yu. Methodology of Analysis of Thermal Vision Parameters of NPP Standby Diesel Together with Standard Instrument Readings // Global Nuclear Safety. 2023. No. 1(46). P. 67-78 <http://dx.doi.org/10.26583/gns-2023-01-06>.