

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«**СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ А. А. Ачитаев  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЁТА ИНДЕКСОВ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОВ САЯНО-  
ШУШЕНСКОЙ ГЭС СРЕДСТВАМИ АСУ ТП НА ПРИМЕРЕ  
ГЕНЕРАТОРНОГО ПОДШИПНИКА**

13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника  
13.04.02.06 – Гидроэлектростанции

Научный Руководитель	_____	Инженер по наладке и испытаниям службы мониторинга оборудования филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного»	<u>Д.А. Калугин</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность	
Выпускник	_____	Инженер 2 кат. по измерениям и испытаниям службы мониторинга оборудования филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного»	<u>С.С. Осипова</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность	
Рецензент	_____	Инженер 2 кат. по измерениям и испытаниям службы мониторинга оборудования филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного»	<u>Н.А. Иванов</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность	
Нормоконтролер	_____		<u>К.П. Синельникова</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата		

Саяногорск; Черемушки 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

АВТОРЕФЕРАТ .....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	8
1. Основные дефекты генераторных подшипников, зарегистрированные в филиалах ПАО «РусГидро» в период 2019-2021 гг .....	10
2. Требования, предъявляемые к подшипнику генератора.....	16
2.1. Устройство направляющего подшипника гидрогенератора СШГЭС .....	16
2.2. Требования к контролю состояния подшипника согласно руководству по эксплуатации генератора СВФ1-1285/275-42 УХЛ4 СШГЭС .....	18
2.3. Требования к контролю состояния подшипника согласно СТО 17330282.27.140.001-2006 .....	19
2.4. Требования к контролю состояния подшипника согласно другим распорядительным документам.....	21
2.5. Требования, предъявляемые к генераторному подшипнику.....	22
3. Расчет индекса технического состояния оборудования согласно Методике .	27
4. Контроль технического состояния генераторного подшипника на СШГЭС .	30
4.1.1. Стационарная система вибрационного контроля .....	31
4.1.2. Стационарные системы теплового контроля .....	32
4.2. Измерения, выполняемые периодически.....	33
4.2.1. Тепловизионный контроль.....	33
4.2.2. Физико-химический анализ масла .....	34
4.2.3. Вибрационные измерения передвижным виброкомплексом .....	35
4.2.4. Измерения сопротивления изоляции сегментов подшипника .....	36
5. Определение контролируемых параметров генераторного подшипника и их критериев оценки для расчета ИТС .....	36
5.1. Зазор между сегментами и втулкой вала генератора .....	38
5.2. Зазор между вал-надставкой и изолирующим кольцом.....	40
5.3. Глубина смятия поверхности опоры сегмента и диаметр смятия поверхности опорного болта .....	41
5.4. Состояние поверхностей трения сегментов .....	42
5.5. Сопротивление изоляции сегментов подшипника .....	43
5.6. Температура уплотнения между валом и корпусом маслованны генераторного подшипника.....	44
5.7. Дефекты уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника ..	45
5.8. Фланцевые и стыковые соединения маслованны подшипника и его крышки .....	46
5.9. Уровень масла в ванне подшипника и тенденция отклонения значения уровня масла по сравнению с предыдущим значением $\Phi_{пред}$ .....	47
5.10. Течь масла из-под маслованны подшипника .....	48
5.11. Поступление охлаждающей воды в маслоохладители .....	49
5.12. Физико-химические параметры масла.....	50
6. Определение весовых коэффициентов контролируемых параметров генераторного подшипника.....	53

7. Пример расчета индекса технического состояния генераторного подшипника по определенным контролируемым параметрам.....	56
8. Предложения для реализации разработанной методики в верхний уровень АСУ ТП СШГЭС для расчета ИТС в режиме реального времени .....	60
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	62
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ А Балльная шкала оценки, весовые коэффициенты для групп параметров и узлов для определения ИТС ГП СШ ГЭС .....	67
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Пример расчета ИТС ГП СШ ГЭС.....	71

## АВТОРЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа в форме магистерской диссертации на тему «Разработка методики оперативного расчёта индексов технического состояния гидроагрегатов Саяно - Шушенской ГЭС средствами АСУ ТП на примере генераторного подшипника» включает в себя 71 страницу, состоит из автореферата, введения, 7 иллюстраций, 24 таблиц, 2 приложений, в которых приведены 2 таблицы, заключения, списка использованных источников из 15 наименований.

### **Актуальность:**

В настоящее время оценка технического состояния оборудования является довольно затруднительным процессом, вызванным наличием множества параметров, которые необходимо анализировать и контролировать одновременно. Наряду с этим, одним из главных направлений в энергетических предприятиях является переход к виду ремонта по техническому состоянию. Для осуществления перехода к данному типу ремонта необходимо как можно более точно определять фактическое состояние оборудования.

Для ускорения процесса к применению этого типа ремонта предлагается внедрить методику оперативного расчета технического состояния оборудования с помощью универсального показателя – индекса технического состояния, рассчитываемого онлайн программными средствами. Индекс технического состояния характеризует состояние объекта как степень соответствия его текущих параметров номинальным значениям, установленным нормативной и технической документацией.

**Целью:** является разработка методики оперативного расчёта технического состояния направляющего генераторного подшипника для определения его фактического состояния.

Определение состояния оборудования по разработанной методике в режиме реального времени приблизит переход к ремонту оборудования гидроэлектростанций по техническому состоянию. Также разработка методики

позволит определять развивающиеся дефекты оборудования на их начальной стадии развития, соответственно, снизить расходы на ремонт, а также повысить надежность эксплуатируемого оборудования.

**Задачи, решаемые в ходе выполнения работы:**

- рассмотрение общих требований, предъявляемых к генераторному подшипнику;
- оценка существующих средств измерения оборудования на СШГЭС;
- разработка методики определения технического состояния в режиме реального времени;
- формирование предложений по реализации разработанной методики в верхнем уровне АСУ ТП СШГЭС.

**Научная новизна:** в мире отсутствуют системы, позволяющие оценить индекс технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций в режиме реального времени. Планируемая к разработке методика оценки технического состояния является уникальной и позволит определять фактическое состояние оборудования в режиме реального времени.

**Объект исследования:** направляющий подшипник гидрогенератора Саяно-Шушенской ГЭС.

**Предмет исследования:** техническое состояние направляющего подшипника гидрогенератора СШГЭС, расчет индексов технического состояния в режиме онлайн.

**Используемые методы:** изучение и анализ методической и справочной литературы; анализ; оценка; расчет и измерения.

**Апробация результатов работы:**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены:

- на IV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов и школьников «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI ВЕКЕ» (рп. Черемушки, 2022 г.);

– на XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективны — 2022» (рп. Черемушки, 2022 г.).

#### **Публикации:**

Основные положения и выводы изложены в 2 публикациях в научных журналах и изданиях, которые включены в перечень реализуемых научных изданий, определенных РИНЦ, ISBN.

#### **Структура и объем диссертации:**

В магистерскую диссертацию входят: введение, восемь глав и заключение.

Во введении раскрывается актуальность выбранной к исследованию тему, а также то, почему данная тема важна в настоящее время.

Первая глава посвящена обзору основных дефектов, выявленных в генераторных подшипниках восемнадцати филиалов ПАО «РусГидро» в период 2019-2021 гг.

Во второй главе рассмотрено устройство направляющего подшипника генератора Саяно-Шушенской ГЭС и рассмотрены общие требования, предъявляемые к генераторным подшипникам, указанные различных в нормативных и технических документациях.

В третьей главе рассмотрен современный метод оценки технического состояния основного оборудования ГЭС согласно методике Министерства энергетики России.

В четвертой главе рассмотрены средства измерения, позволяющие контролировать техническое состояние генераторного подшипника Саяно-Шушенской ГЭС.

В пятой главе определены контролируемые параметры генераторного подшипника Саяно-Шушенской ГЭС и критерии их оценки для дальнейшего расчета индекса технического состояния.

В шестой главе произведен выбор весовых коэффициентов групп выбранных параметров функционального узла.

В седьмой главе рассчитаны значения индекса технического состояния генераторного подшипника Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от

отклонения некоторых контролируемых параметров от нормативных значений в процессе эксплуатации и продемонстрирована его наглядность.

В восьмой главе представлены предложения для реализации разработанной методики в верхний уровень АСУ ТП СШГЭС для расчета ИТС в режиме реального времени.

Заключение посвящено основным выводам, определенным в ходе настоящего исследования, а также представлены преимущества внедрения системы определения индекса технического состояния генераторного подшипника в режиме реального времени.

**Ключевые слова:** оценка технического состояния, индекс технического состояния, генераторный подшипник, мониторинг, оперативный расчет состояния, параметры состояния, ремонт по техническому состоянию, надежность оборудования.

## ВВЕДЕНИЕ

Надежная и безопасная эксплуатация оборудования является одной из главных задач электростанций. Для поддержания оборудования в работоспособном состоянии его с определенной периодичностью выводят в ремонт. Техническое обслуживание и ремонт — комплекс технологических операций и организационных действий, направленных на поддержание исправности оборудования при его использовании по назначению.

Наиболее распространенным методом организации ремонтов в энергетической отрасли является система планово-предупредительного ремонта. В конце 2017 года приказом Министерства энергетики [1] утверждены новые правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики, в которых введено новое понятие в сфере ремонтов – ремонт по техническому состоянию, а также определены условия, при которых данный вид организации ремонта может применяться.

В настоящий момент на Саяно-Шушенской ГЭС применяется планово-предупредительный вид ремонта, который проводится с установленной заводом-изготовителем и нормативно-технической документацией периодичностью, сроками и объемом работ. Общее техническое состояние оборудования при определении периодичности и сроков ремонтов зачастую не учитывается, а объем работ уточняется лишь после вывода оборудования в ремонт. В то же время существует перспектива перехода от планово-предупредительного ремонта на ремонт по техническому состоянию оборудования.

Ремонт оборудования по состоянию основан [2] на том, что все работы производятся в зависимости от реального текущего технического состояния узлов оборудования, контролируемого в процессе эксплуатации на основании измерения соответствующих параметров. По результатам проведенного анализа определяют и сроки, и объемы планируемого ремонта. Важное отличие вышеуказанных видов ремонта заключается в том, что в системе планово-предупредительного ремонта основанием для вывода оборудования в ремонт



является его наработка, а при ремонте по техническому состоянию – его фактическое состояние.

Данная технология позволяет:

- проводить оперативную диагностику узлов оборудования;
- контролировать фактическое состояние оборудования;
- обоснованно планировать проведение ремонтов, их сроки и объемы;
- сократить потребность в запасных частях, материалах;
- повысить надежность оборудования, продлить межремонтный период и срок службы.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, что применяемая система планово-предупредительного ремонта требует оптимизации.

Существующая методика расчета индекса технического состояния, разработанная Минэнерго Российской Федерации [3], позволяет оценить техническое состояние оборудования и определить необходимость технических воздействий. Методика основана на идее деления основного оборудования на функциональные узлы. Для оценки группы параметров функциональных узлов используются измеряемые параметры с однозначными критериями их оценки. Но, согласно методике, расчет индекса технического состояния должен проводиться 1 раз в год, что не позволяет объективно оценить состояние оборудования. Именно поэтому предлагается разработать методику по определению индекса технического состояния в режиме онлайн, что позволит более точно определять фактическое состояние оборудования в текущий момент времени и приблизит переход к ремонту по техническому состоянию.

## **1. Основные дефекты генераторных подшипников, зарегистрированные в филиалах ПАО «РусГидро» в период 2019-2021 гг**

В целях обеспечения безопасной, надежной и эффективной работы основного оборудования гидроэлектростанций, аналитическим центром ПАО «РусГидро» в филиале АО «Институт Гидропроект» - «НИИЭС» ежегодно формируются технические отчеты [4], [5], [6] по определению основных дефектов технологического оборудования, оценке технического состояния и производственной эксплуатации основного технологического оборудования, анализа работы устройств релейной защиты и автоматики гидроэлектростанций 18 филиалов ПАО «РусГидро».

За анализируемый период 2019-2021 гг при проведении планового технического обслуживания, а также плановых текущих и капитальных ремонтов гидроагрегатов в филиалах ПАО «РусГидро» зарегистрировано 4740 дефектов гидрогенераторов и их вспомогательных систем, которые не привели к изменению нормальной работы оборудования (вывод оборудования во внеплановый или аварийный ремонты). Из всего количества выявленных дефектов 3973 дефекта относятся на генератор и 767 дефектов на вспомогательные системы.

Из 3973 дефектов генераторов 850 приходится на генераторный подшипник, что составляет 21,4 % от числа дефектов генераторов и 17,9 % от общего числа дефектов оборудования.

Сводная информация о распределении дефектов по узлам и вспомогательным системам гидрогенераторов за 2019-2021 годы приведена в таблице 1 и на рисунке 1.

Таблица 1 – Распределение дефектов гидрогенераторов, выявленных в процессе планового технического обслуживания, а также плановых текущих и капитальных ремонтов гидроагрегатов за 2019-2021 годы

Оборудование	Узел	Количество дефектов		
		шт.	% от числа дефектов генераторов	% от общего числа дефектов
Гидрогенератор	подпятник	942	23,7	19,9
	ротор	302	7,6	6,4
	крестовина	57	1,4	1,2
	генераторный подшипник	850	21,4	17,9
	щеточно-контактный аппарат	455	11,5	9,6
	статор	948	23,9	20
	система торможения	419	10,5	8,8
Итого по генератору		3973	—	83,8
Итого по вспомогательным системам		767	—	16,2

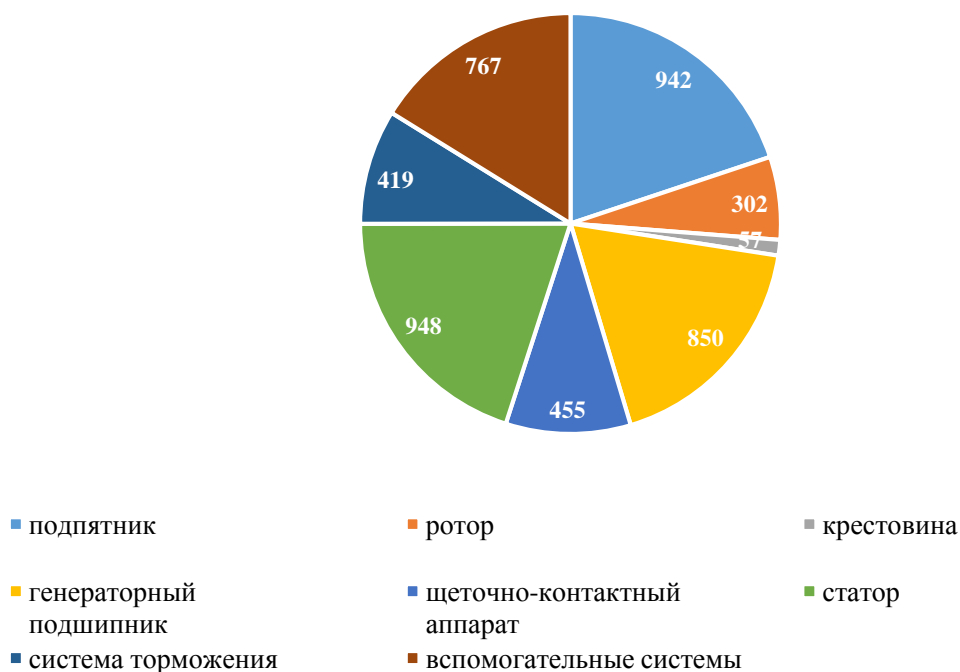


Рисунок 1 – Распределение дефектов гидрогенераторов за 2019-2021 годы, которые не привели к изменению нормальной работы оборудования

Основными дефектами генераторных подшипников, выявленными в процессе планового технического обслуживания гидрогенераторов филиалов ПАО «РусГидро» за 2019-2021 гг являются следующие:

- снижение изоляции отдельных сегментов подшипников;
- повышенный нагрев отдельных сегментов;
- отклонения уровня масла в маслованне от нормированного значения;
- дефекты датчиков термоконтроля, измерительных приборов и сигнализации;
- нарушение герметичности сварных швов и уплотнений маслованн, сопровождающиеся протечками масла;
- дефекты уплотнений фланцевых соединений маслоохладителей, сопровождающиеся протечками воды.

Основными дефектами генераторных подшипников, выявленными в процессе плановых ремонтов гидрогенераторов филиалов ПАО «РусГидро» за 2019-2021 гг являются следующие:

- дефекты изоляции сегментов подшипников;
- износ, механические повреждения баббитового покрытия сегментов;
- выработка сферической поверхности опорных болтов сегментов;
- механический износ маслоохладителей;
- повреждение и износ уплотняющих элементов маслованны и маслоохладителей;
- нарушение зазоров между сегментами и втулкой вала генератора;
- загрязнение маслованн и маслоохладителей иловыми отложениями, дрейсенной и другим мусором, механический и коррозионный износ маслованны и маслоохладителей;
- неудовлетворительное состояние опорных конструкций по результатам вибрационных испытаний;

- нарушение зазоров в процессе эксплуатации между опорным болтом и сегментом подшипника;
- риски и натирывания на рабочей поверхности фторопластовых сегментов;
- износ рабочей поверхности вкладышей подшипников;
- дефекты на рабочей поверхности сухарей сегментов, а также наличие микротрещин на сухарях, повреждение изоляционных шайб сухарей сегментов, повреждение прижимных шайб сухарей сегментов.

В 2019-2021 гг на филиалах ПАО «РусГидро» зафиксировано 228 дефектов основного оборудования, которые привели к изменению нормальной работы оборудования. Из них 159 дефектов привели к внеплановым остановам, 69 – к аварийным. Из 159 дефектов 16 приходится на генераторный подшипник, из 69 дефектов 8 относится к генераторному подшипнику.

Распределение дефектов гидрогенераторов и их вспомогательных систем, которые привели к внеплановым остановам, приведено на рисунке 2, к аварийным остановам на рисунке 3.

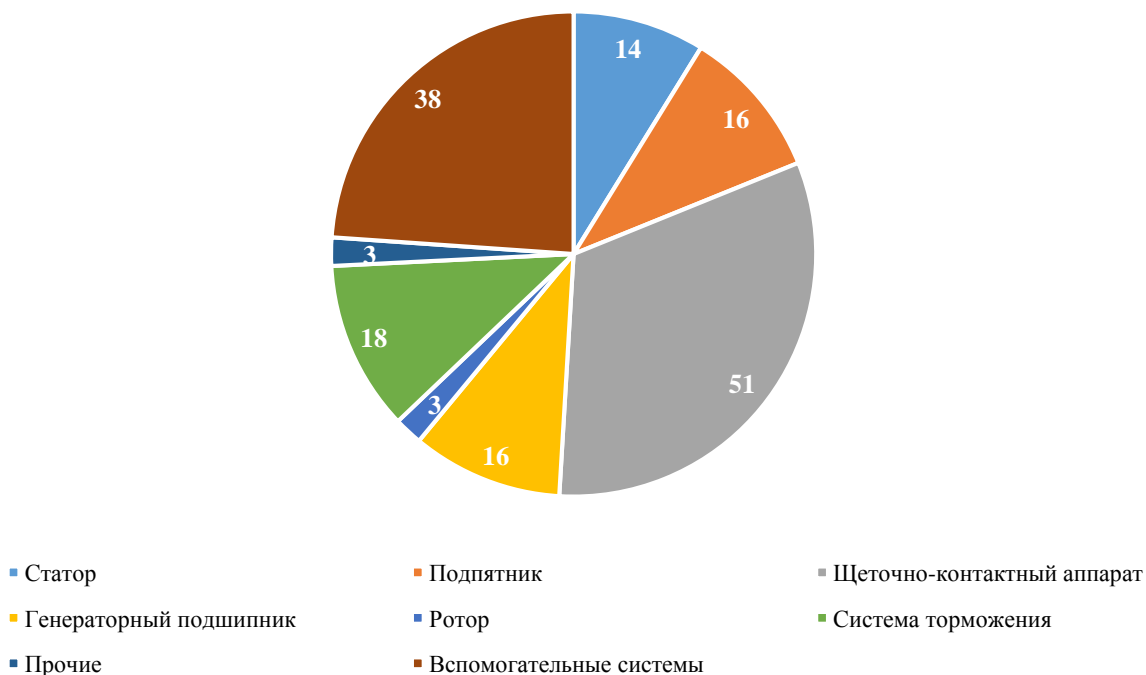


Рисунок 2 – Распределение дефектов гидрогенераторов и их вспомогательных систем, повлекших внеплановые остановки оборудования

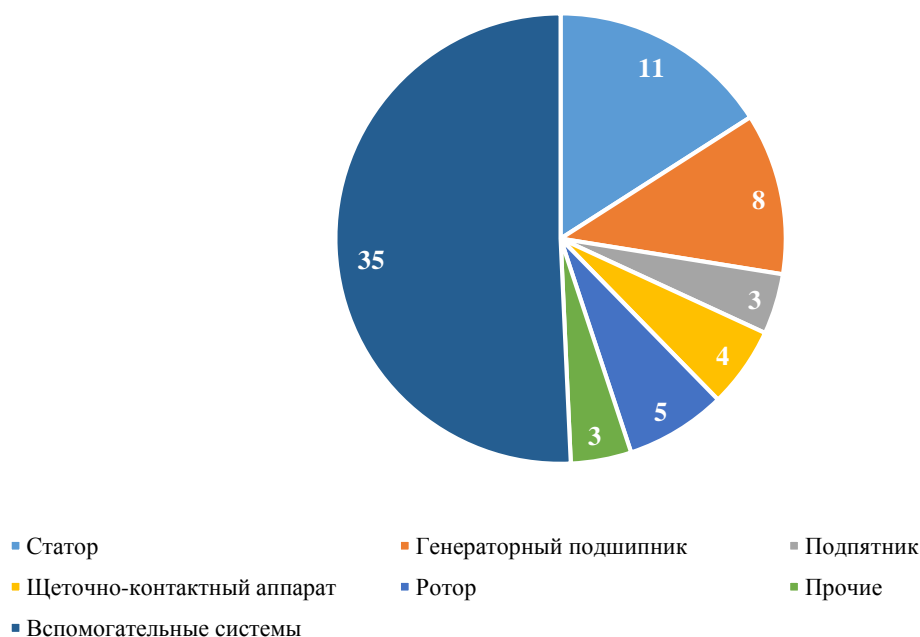


Рисунок 3 – Распределение дефектов гидрогенераторов и их вспомогательных систем, повлекших аварийные остановки оборудования

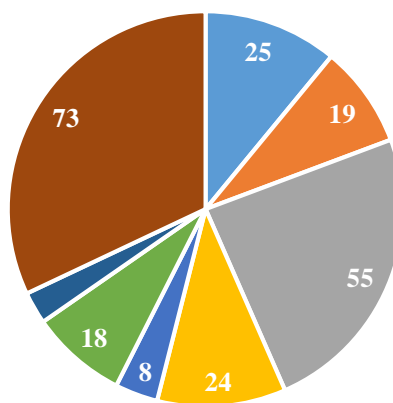
Основными дефектами генераторного подшипника, повлекшими за собой изменение нормального режима работы оборудования, являются:

- снижение уровня масла в маслованне генераторного подшипника;
- повышенная температура сегментов генераторного подшипника;
- неисправность насоса маслостанции;
- повышенная температура сегментов генераторного подшипника, в следствии уменьшения зазоров между валом и трущейся поверхностью сегментов;
- нагрев корпуса генераторного подшипника вследствие износа фторопластового слоя эластичного металлопластмассового покрытия сегментов;
- дефекты запорной арматуры маслованны генераторного подшипника;
- ошибочное действие защит, ложное срабатывание датчиков, неисправность датчиков.

Общее распределение дефектов гидрогенераторов и их вспомогательных систем, которые привели к изменению нормального режима работы основного и вспомогательного оборудования за 2019-2021 гг приведено в таблице 2 и на рисунке 4.

Таблица 2 – Распределение дефектов гидрогенераторов, повлекшим изменение нормально режима работы оборудования за 2019-2021 годы

Узел	шт.	% от числа дефектов генератора	% от общего числа дефектов
Статор	25	16,1	11
Подпятник	19	12,3	8,3
Щеточно-контактный аппарат	55	35,5	24,1
Генераторный подшипник	24	15,5	10,5
Ротор	8	5,2	3,5
Система торможения	18	11,6	7,9
Прочие	6	3,9	2,6
Вспомогательные системы	73	—	32
Всего по генератору	155	—	68
Всего по генератору и вспомогательным системам генератора	228	—	100



- Статор
- Подпятник
- Щеточно-контактный аппарат
- Генераторный подшипник
- Ротор
- Система торможения
- Прочие
- Вспомогательные системы

Рисунок 4 – Общее распределение дефектов гидрогенераторов и их вспомогательных систем, которые привели к изменению нормального режима работы основного и вспомогательного оборудования за 2019-2021 гг

По данным таблицы 2 видно, что на генераторный подшипник приходится 15,5% дефектов от числа дефектов генератора и 10,5% дефектов от общего числа выявленных дефектов, исходя из этого можно сделать вывод, что состояния генераторного подшипника значительно влияет на режим работы оборудования и требует контроля.

Определение основных дефектов генераторного подшипника, повлекшее за собой изменение режима работы основного оборудования – внеплановые остановки или возникновение аварий, в том числе, позволит далее распределить весовые коэффициенты групп параметров, выбранных для расчета индексов технического состояния генераторного подшипника.

## **2. Требования, предъявляемые к подшипнику генератора**

### **2.1. Устройство направляющего подшипника гидрогенератора СШГЭС**

Направляющий подшипник служит для обеспечения неизменного положения вала гидроагрегата во время его работы, воспринимает силы, вызванные несимметричностью подвода воды к рабочему колесу, недостаточно точной балансировкой рабочего колеса и ротора генератора, неравномерностью электрического поля генератора.

В настоящее время на Саяно-Шушенской ГЭС применяются сегментные, самосмазывающиеся подшипники на жидкой масляной смазке [7]. Направляющий подшипник – сегментный. В радиальном направлении сегменты опираются на сферическую поверхность винтовых регулируемых опор, снизу сегменты опираются на изоляционное кольцо, соединенное с центральной частью. Поверхность трения сегментов облицована эластичным металлопластмассовым покрытием.

Для фиксации сегментов при регулировке зазоров в цилиндре центральной части крестовины имеются по два резьбовых отверстия на каждый сегмент для



отжимовки болтов. Циркуляция масла в ванне обеспечивается радиальными отверстиями во втулке подшипника, работающими при вращении как центробежные насосы. Для предотвращения выхода паров масла масляная ванна снабжена системой уплотнений. Охлаждение масла осуществляется маслоохладителями, расположенными внутри ванны.

Генераторный подшипник допускает:

- работу в течение 15 минут без подачи охлаждающей воды в маслоохладители при нормальной рабочей температуре сегментов;
- работу при одном удаленном маслоохладителе.

Конструкция подшипника представлена на рисунке 5. Технические данные направляющего подшипника генератора Саяно-Шушенской ГЭС представлены в таблице 3.

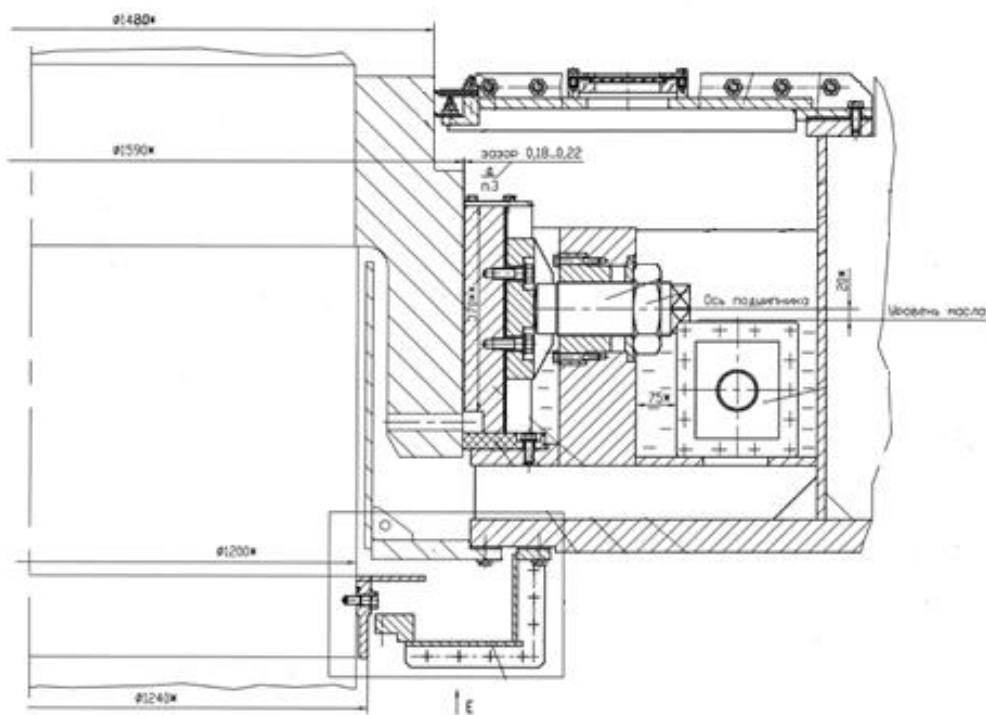


Рисунок 5 – Сегментный направляющий подшипник

Таблица 3 – Технические данные подшипника генератора СШГЭС

Технический параметр	Показатель
Суммарные потери, кВт	40
Количество сегментов	12
Объем масла в ванне, м <sup>3</sup>	2,3
Марка масла в ванне	Турбинное 30 ГОСТ 32-74

## 2.2. Требования к контролю состояния подшипника согласно руководству по эксплуатации генератора СВФ1-1285/275-42 УХЛ4 СШГЭС

Для нормальной работы гидроагрегата необходимо, чтобы параметры, определяющие его техническое состояние, имели значения, не превышающие допустимых.

При работе гидрогенератора необходимо следить за следующими параметрами [7]:

- за уровнем масла в ваннах подшипника;
- за поступлением охлаждающей воды в маслоохладители;
- за уровнем сопротивления изоляции подшипника;
- за биением вала у направляющих подшипников, уровень вибрации корпусов маслованн;
- за температурой вкладышей, сегментов, масла;
- за состоянием уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника.

Подшипник генератора Саяно-Шушенской ГЭС имеет масляную смазку. Масло проверяют по внешнему виду, на содержание воды, механических примесей. Сокращенный анализ масла включает в себя определение кислотного числа, реакцию водной вытяжки, вязкости, наличия механических примесей и воды, температуры вспышки масла.

Согласно руководству по эксплуатации генератора Саяно-Шушенской ГЭС [7] масло должно удовлетворять следующим нормам:

- кислотное число не выше 0,5 мг КОН/г;

- реакция водной вытяжки должна быть нейтральной;
- вязкость не должна отличаться от первоначального более, чем на  $\pm 25\%$ ;
- падение температуры вспышки не должно быть более 10 °С по сравнению с первоначальной;
- масло должно быть прозрачным;
- масло не должно содержать механических примесей и воды.

### **2.3. Требования к контролю состояния подшипника согласно СТО 17330282.27.140.001-2006**

Стандарт организации ОАО РАО «ЕЭС РОССИИ» «Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций» СТО 17330282.27.140.001-2006 [8] определяет требования к контролю состояния основного генерирующего оборудования ГЭС, объем контроля состояния основного оборудования, необходимый для оценки технического состояния эксплуатируемого оборудования. Также методика оценки технического состояния устанавливает методы измерений параметров, контролируемых в процессе эксплуатации, и испытания при комплексных технических обследованиях. Стандарт в том числе устанавливает требования к оценке технического состояния направляющих подшипников гидрогенераторов с масляной смазкой.

Оценку состояния направляющих подшипников с масляной смазкой на работающем гидроагрегате, согласно стандарту [8], производят по следующим признакам:

- биение вала у направляющих подшипников, уровень вибрации корпусов маслованн;
- температура вкладышей, сегментов, масла и ее изменение во время эксплуатации;

- повышение уровня масла в маслованне направляющего подшипника гидроагрегата;

- понижение уровня масла в маслованне направляющего подшипника гидроагрегата.

Настоящий стандарт определяет требования, предъявляемые к генераторному подшипнику, такие как:

- фланцевые и стыковые соединения масляных ванн подпятника и подшипников и их крышек должны быть плотными;

- протечки масла в местах их соединений не допускаются;

- уплотнительные элементы (резина, войлок, кожа) не должны иметь задиров;

- уплотнительные элементы должны обеспечивать плотный контакт с валом;

- уплотнение должно работать, не вызывая местный перегрев зоны контакта на валу гидроагрегата.

Также в качестве справочной информации для направляющего подшипника необходимо указать следующие данные:

- диаметр расточки сегментов (диаметр втулки вала);

- число сегментов и их размеры (высота, ширина);

- материал рабочей поверхности сегментов (баббит, фторопласт, др.);

- система опирания сегментов (на сферическую поверхность опорного болта или вкладыша, на цилиндрическую поверхность опорного сухаря);

- способ регулировки зазоров (болтовой, клиновой, прокладками);

- нормативная величина зазоров между сегментами и втулкой вала;

- нормативная величина эксцентриситета установки сегментов;

- способ выполнения втулки (откована заодно с валом или насажена на вал); указать, если направляющий подшипник находится в одной ванне с подпятником и его сегменты размещены вокруг цилиндрической поверхности втулки подпятника;

- способ смазки (самоциркуляция масла в ванне, принудительная циркуляция с помощью насоса и др.);
- система охлаждения масла (встроенными охладителями, внешними охладителями, через стенки маслованны без охладителей);
- тип масла в ванне подшипников.

#### **2.4. Требования к контролю состояния подшипника согласно другим распорядительным документам**

Помимо вышеуказанных требований, предъявляемых к контролю состояния направляющих подшипников, на основании иных распорядительных документов [9], [10], [11], [12] можно выделить следующие параметры состояния, за которыми также необходим контроль:

- состояние баббитовой поверхности сегментов;
- отставание баббита от стального основания сегмента;
- шероховатость поверхности втулки;
- смятие головок опорных болтов или опорных вкладышей;
- зазоры между втулкой и сегментами;
- соответствие смазки подшипника требованиям ГОСТов, технических условий.

Общие требования к конструкции подшипника генератора следующие:

- все детали подшипника должны быть прочными и жесткими;
- смазочный материал и способ его подачи должен соответствовать эксплуатационным требованиям;
- конструкция подшипника должна обеспечивать удобный монтаж и демонтаж узла;
- конструкция должна предоставлять возможность теплового расширения вала, не нарушая при этом нормальную работу подшипника;

– должна обеспечиваться надежная фиксация положения вала по направлению оси;

– подшипники гидрогенераторов всех исполнений должны иметь изоляцию, предотвращающую протекание электрического тока через поверхности скольжения.

## 2.5. Требования, предъявляемые к генераторному подшипнику

Перечень контролируемых параметров, планируемый к оценке при расчете индекса технического состояния генераторного подшипника Саяно-Шушенской ГЭС в режиме реального времени, представлен в таблице 4. Контролируемые параметры, предъявляемые к направляющему подшипнику гидрогенератора, определены на основании анализа различных нормативных и технических документов [9], [10], [11], [12].

Таблица 4 – Контролируемые параметры направляющего подшипника гидрогенератора

№ п/п	Контролируемые параметры	Допустимые значения	Средства и методы контроля	Периодичность контроля
1	Уровень масла в ваннах подшипника	Уровень масла не должен выходить за максимальное и минимальное значение, установленное местной инструкцией по эксплуатации	Датчик уровня масла, визуально по масломерному стеклу	Постоянно
2	Масло в ваннах подшипника:	—	—	—
2.1	Кислотное число	не выше 0,5 мг КОН/г	Химический анализ	контроль — 1 раз в неделю; сокращенный анализ — 1 раз в год при полной прозрачности масла
2.2	Реакция водной вытяжки	нейтральная	Химический анализ	
2.3	Вязкость	±25% от первоначального	Химический анализ	
2.4	Падение температуры вспышки	более 10 °С по сравнению с первоначальной	Химический анализ	

Продолжение таблицы 4

№ п/п	Контролируемые параметры	Допустимые значения	Средства и методы контроля	Периодичность контроля
2.5	Внешний вид	прозрачный	Визуально	1 раз в неделю
2.6	Содержание механических примесей и воды	отсутствует	Визуально	1 раз в неделю
3	Сопротивление изоляции подшипника	не менее 1Мом при температуре от 10 до 30 °С	Мегаомметр	при каждом капитальном ремонте, если необходимость в этом не возникнет ранее
4	Биение вала у направляющих подшипников	не должно превышать значение, установленное заводом—изготовителем	Индикатор часового типа; Датчики биения вала	При обходах; Постоянный контроль
5	Вибрация корпусов маслованн, подшипника	не должна превышать значение, установленное заводом—изготовителем	Переносная виброизмерительная аппаратура. Стационарные датчики вибрации	Периодически; Постоянный контроль
6	Температура вкладышей, сегментов	Температура, установленная местной инструкции по эксплуатации	Термосопротивления, термосигнализатор	Постоянно
7	Температура масла в маслованне	Температура, установленная местной инструкции по эксплуатации	Термосопротивления, термосигнализатор	Постоянно
8	Состояние уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	Протечки масла через выгородки маслованн, фланцевые соединения и уплотнения недопустимы	Визуально	При обходах
9	Фланцевые и стыковые соединения масляных ванн подшипников и их крышек	Согласно заводским чертежам	Визуальный и измерительный контроль	При выводе в ремонт
10	Температура зоны контакта на валу гидроагрегата	Отсутствует превышение относительно установленных значений	Телевизионный контроль	При обходах

Окончание таблицы 4

№ п/п	Контролируемые параметры	Допустимые значения	Средства и методы контроля	Периодичность контроля
11	Зазор между втулкой и сегментами	устанавливается заводом—изготовителем. Допускаются отклонения $\pm 10\%$	Инструментально	При выводе в ремонт
12	Плотность сцепления баббита со стальным основанием	отставание не более 15% площади рабочей поверхности	Инструментально	При выводе в ремонт
13	Плотность посадки на вал втулки подшипника	Согласно заводским чертежам	Инструментально	При выводе в ремонт
14	Состояние баббитовой поверхности сегментов	не менее 1—2 пятен прилегания на 1 см <sup>2</sup> . Допустимы 2—3 небольших участка с меньшим числом пятен	Инструментально	При выводе в ремонт
15	Шероховатость поверхности втулки	не хуже 0,63 мкм. Допускается наличие отдельных царапин, края их должны быть заглажены	Инструментально	При выводе в ремонт
16	Смятие головок опорных болтов или опорных вкладышей	не более 0,05 мм	Инструментально	При выводе в ремонт

В таблице 5 представлены методы и средства измерения контролируемых параметров.

Таблица 5 – Контролируемые параметры генераторного подшипника

Перечень параметров функционального узла применяемых для расчета ИТС ГП	Параметр используется для онлайн - расчета ИТС (возможности АСУ ТП СШГЭС)	Внесение параметра по результатам обходов и осмотров, отборов проб масла	Внесение параметра по результатам визуально-измерительного контроля в ремонт
Температура масла в маслованне	+	—	—
Уровень масла в ваннах подшипника	+	—	—
Течь масла из-под маслованны	—	+	+



Продолжение таблицы 5

Перечень параметров функционального узла применяемых для расчета ИТС ГП	Параметр используется для онлайн - расчета ИТС (возможности АСУ ТП СШГЭС)	Внесение параметра по результатам обходов и осмотров, отборов проб масла	Внесение параметра по результатам визуально-измерительного контроля в ремонт
Биение вала у направляющих подшипников	+	—	—
Вибрация корпуса маслованны подшипника	+	—	—
Шероховатость поверхности втулки	—	—	+
Смятие головок опорных болтов или опорных вкладышей	—	—	+
Температура вкладышей, сегментов	+	—	—
Зазор между опорным болтом и сухарем сегментов генераторного подшипника	—	—	+
Зазор между вал-надставкой и изолирующим кольцом	—	—	+
Состояние поверхности сегментов	—	—	+
Сопrotивление изоляции сегментов подшипника	—	—	+
Состояние уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	—	—	+
Фланцевые и стыковые соединения масляных ванн подшипников и их крышек	—	—	+

Окончание таблицы 5

<b>Перечень параметров функционального узла применяемых для расчета ИТС ГП</b>	<b>Параметр используется для онлайн - расчета ИТС (возможности АСУ ТП СШГЭС)</b>	<b>Внесение параметра по результатам обходов и осмотров, отборов проб масла</b>	<b>Внесение параметра по результатам визуально-измерительного контроля в ремонт</b>
Температура кожи и зоны контакта на валу гидроагрегата	—	+	—
Плотность посадки на вал втулки подшипника	—	—	+
Поступление охлаждающей воды в маслоохладители	+	—	—
Кислотное число	—	+	—
Вязкость	—	+	—
Содержание механических примесей	—	+	—
Содержание воды	—	+	—
Реакция водной вытяжки	—	+	—
Падение температуры вспышки по сравнению с первоначальной	—	+	—
Температура вспышки	—	+	—

Указанные требования позволяют достоверно оценить техническое состояние направляющего подшипника в процессе эксплуатации, а система и обобщение требований позволит это делать более качественно.

Также необходимо найти возможность контролировать параметры, проверяемые при выводе в ремонт, с помощью косвенных признаков во время работы гидроагрегата.

### 3. Расчет индекса технического состояния оборудования согласно Методике

Оценка технического состояния оборудования согласно Методике [3] представляет собой определение его индекса технического состояния. Индекс технического состояния может принимать значения от 0 до 100, где 0 – наихудшее значение, а 100 – наилучшее. Процесс оценки технического состояния оборудования — это сопоставление фактических значений параметров с установленными нормативной документацией значениями, данными технической диагностики, данными испытаний, данных, полученных процессе эксплуатации, а также последующее определение индексов технического состояния. Зависимость технического состояния оборудования от значений его индексов технического состояния представлена в таблице 6.

Таблица 6 – Индексы технического состояния и соответствующее им техническое состояние

Индексы технического состояния	Техническое состояние
$\leq 25$	Критическое
$25 < и \leq 50$	Неудовлетворительное
$50 < и \leq 70$	Удовлетворительное
$70 < и \leq 85$	Хорошее
$85 < и \leq 100$	Очень хорошее

Каждый параметр, определяющий техническое состояние функционального узла оценивается в соответствии с балльной шкалой оценки отклонения фактических значений от допустимых значений.

Индекс технического состояния функциональных узлов определяется по следующей формуле:

$$\text{ИТСУ} = 100 \cdot \sum i(\text{КВ}_i \cdot \text{ОГП}_i) / 4, \quad (1)$$

где  $KB_i$  – значение весового коэффициента для  $i$ -ой группы параметров технического состояния;

$ОГП_i$  – балльная оценка  $i$ -ой группы параметров технического состояния, в соответствии с таблицей 4.

Индекс технического состояния основного оборудования согласно данной Методике вычисляется по следующей формуле:

$$ИТС = \sum(KBU_i \cdot ИТСУ_i), \quad (2)$$

где  $KBU_i$  – значение весового коэффициента для  $i$ -го функционального узла или обобщенного узла;

$ИТСУ_i$  – индекс технического состояния  $i$ -го функционального узла, рассчитанный по формуле (1).

Оборудования, индекс технического состояния которого имеет наименьшее значение, требует оперативных технических воздействий. Диапазоны индекса технического состояния и виды технического воздействия приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Диапазоны индекса технического состояния и виды технического воздействия

<b>Индекс технического состояния</b>	<b>Техническое состояния</b>	<b>Техническое воздействие</b>
$\leq 25$	Критическое	Вывод из эксплуатации, техническое перевооружение и реконструкция
$25 < и \leq 50$	Неудовлетворительное	Дополнительное техническое обслуживание и ремонт, усиленный контроль технического состояния, техническое перевооружение
$50 < и \leq 70$	Удовлетворительное	Усиленный контроль технического состояния, капитальный ремонт, реконструкция
$70 < и \leq 85$	Хорошее	По результатам планового диагностирования
$85 < и \leq 100$	Очень хорошее	Плановое диагностирование

Также на электростанциях следят за динамикой изменения значений параметров технического состояния оборудования, по которой определяют прогноз изменения индекса технического состояния и времени достижения критического состояния оборудования. При достижении оборудованием критического состояния его эксплуатация недопустима. Результат расчетов индексов технического состояния объединяют в карту возможных сценариев выбора вида технических воздействий со следующими данными:

- текущий индекс технического состояния оборудования;
- величину риска отказа оборудования;
- возможные технические воздействия на жизненный цикл оборудования;
- прогноз изменения индекса технического состояния оборудования;

Согласно сформированной карте планируются программы технического обслуживания и ремонта, технического перевооружения и реконструкции оборудования.

Расчет индексов технического состояния оборудования ПАО «РусГидро» в соответствии с методикой Минэнерго выполняется Аналитическим центром ПАО «РусГидро» в филиале АО «Институт Гидропроект» - «НИИЭС».

Процесс расчета индексов технического состояния оборудования следующий:

1. создание куратором заявки на заполнение электронной анкеты на расчет индекса технического состояния оборудования от электростанции;
2. заполнение электронной анкеты с внесением значений параметров, определяющих техническое состояние конкретного оборудования, с привязанием электронных документов, подтверждающих внесенные значения параметров;
3. проверка правомерности пересчета индексов технического состояния, корректности заполнения электронной анкеты и проверка

состояния уплотнений между валом и корпусом маслованны подшипника, в то же время расход охлаждающей жидкости снизился до 9 л/с вследствие засорения трубок охладителей.

Балльное значение группы параметров функционального узла было определено путем выбора минимальной балльной оценки параметра, который входит в данную группу. Результат расчета приведен в таблице 24.

Таблица 24 – Пример расчета индекса технического состояния генераторного подшипника при ухудшении некоторых параметров

<b>Функциональный узел</b>	<b>Группа параметров функционального узла</b>	<b>Параметр функционального узла</b>	<b>Балльная шкала оценки параметров</b>	<b>Балльная шкала оценки группы параметров</b>
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
Генераторный подшипник	Общее состояние	Уровень масла в ваннах подшипника	1	1
		Поступление охлаждающей воды в маслоохладители	2	
		Вибрация корпуса подшипника	4	
		Температура масла	4	
	Маслованна и маслоохладители	Течь масла из-под маслованны	0	0
		Фланцевые и стыковые соединения маслованны подшипника и его крышки	4	

Продолжение таблицы 24

Функциональный узел	Группа параметров функционального узла	Параметр функционального узла	Балльная шкала оценки параметров	Балльная шкала оценки группы параметров
1	2	3	5	6
Генераторный подшипник	Маслованна и маслоохладители	Нарушение герметичности маслоохладителей	4	0
		Загрязнение маслоохладителей иловыми отложениями, дрейсенной и другим мусором	1	
	Состояние сегментов	Температура сегментов	1	1
		Состояние поверхностей трения сегментов	4	
		Сопротивление изоляции сегментов подшипника	4	
		Зазор между опорным болтом и сухарем сегментов генераторного подшипника / сегментами и втулкой вала генератора	4	
	Состояние сегментов	Зазор между вал-надставкой и изолирующим кольцом	4	1
		Глубина смятия поверхности опоры сегмента	4	
		Диаметр смятия поверхности опорного болта	4	
	Состояние вала в зоне подшипника и его уплотнения	Бой вала	4	2
		Выработка рубашки вала	4	

Окончание таблицы 24

Функциональный узел	Группа параметров функционального узла	Параметр функционального узла	Балльная шкала оценки параметров	Балльная шкала оценки группы параметров
1	2	3	5	6
Генераторный подшипник	Состояние вала в зоне подшипника и его уплотнения	Дефекты уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	2	2
		Температура уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	4	
	Физико-химический анализ масла из ванны подшипника	Класс промышленной чистоты	4	4
		Общее содержание шлама	4	
		Содержание воды	4	

Индекс технического состояния функционального узла – генераторного подшипника, согласно методике [3] рассчитан по формуле (3).

$$ИТСУ = 100 \cdot \sum_i (КВ_i \cdot ОГП_i) / 4; \quad (3)$$

где  $КВ_i$  – это значение весового коэффициента, определенное в п. 6;  
 $ОГП_i$  – балльная оценка группы параметров, определенная ранее.

Рассчитаем индекс технического состояния генераторного подшипника:

$$ИТСУ = 100 \cdot (0,25 \cdot 1 + 0,19 \cdot 0 + 0,3 \cdot 1 + 0,15 \cdot 2 + 0,11 \cdot 4) / 4 = 32. \quad (4)$$

В рассмотренном случае индекс технического состояния получился равным 32.

В связи с тем, что рассчитанный индекс получился больше значения «26», а параметры, влияющие на снижение индекса технического состояния



генератора в рассматриваемом функциональном узле, отсутствуют, принимаем итоговый индекс технического состояния генераторного подшипника равным 32. Данное значение индекса показывает, что функциональный узел находится в неудовлетворительном состоянии, требуется усиленный контроль за его техническим состоянием в процессе эксплуатации, дополнительное техническое обслуживание или ремонт.

Полный расчёт индекса технического состояния генераторного подшипника при рассматриваемых изменениях представлен в приложении Б.

На основании рассмотренного примера ухудшения некоторых параметром можно сделать вывод о том, что применение расчета индекса технического состояния генераторного подшипника по разработанной методике возможно.

## **8. Предложения для реализации разработанной методики в верхний уровень АСУ ТП СШГЭС для расчета ИТС в режиме реального времени**

Для того, чтобы производить расчёт индекса технического состояния в режиме реального времени, необходимо разработанную методику внедрить в верхний уровень АСУ ТП с последующей разработкой алгоритмов, позволяющих выстраивать прогнозные значения контролируемых параметров. Прогнозирование значений позволит предсказывать техническое состояние оборудования в ближайшем будущем, выявлять отклонения в работе оборудования на ранней стадии их развития, в результате чего будут снижены аварийные остановки оборудования и аварии.

Предлагается сформировать в АСУ ТП страницу с двумя таблицами. В первой таблице должны быть указаны параметры, значения которых собираются и обрабатываются стационарными средствами измерений и автоматически передаются в АСУ ТП в режиме реального времени.

Во второй таблице должны быть указаны в том числе параметры, значения которых определяются периодически – по результатам обходов специалистов, по

результатам технического обслуживания генераторного подшипника, а также по результатам проведенных анализов. В данной таблице также предлагается указывать дату и время последнего обновления параметров и пересчета индекса технического состояния.

Данная страница в АСУ ТП Саяно-Шушенской ГЭС позволит определять фактическое значение технического состояния генераторного подшипника, выраженное всего в одной цифре, которую постоянно будет видеть перед собой персонал ГЭС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проанализированы общие требования из нормативных и технических документаций, предъявляемые к генераторному подшипнику, а также средства контроля за техническим состоянием генераторного подшипника на Саяно-Шушенской ГЭС.

Рассмотрены основные дефекты в филиалах ПАО «РусГидро», выявленные на генераторном подшипнике, в том числе дефекты, повлекшие за собой внеплановые и аварийные остановы оборудования, что являлось причиной значительных экономических потерь электростанций. Рассмотренные примеры демонстрируют важность оценки фактического технического состояния генераторного подшипника.

Были добавлены к рассмотрению дополнительные параметры, необходимые для более точного определения технического состояния генераторного подшипника. Методика определения индекса технического состояния адаптирована под конкретный генераторный подшипник Саяно-Шушенской ГЭС. Параметры групп функционального узла выбраны с учётом возможности их определения в режиме онлайн, на базе уже имеющихся на Саяно-Шушенской ГЭС систем мониторинга оборудования.

Выполнено оптимальное распределение весовых коэффициентов сформированных групп параметров функционального узла методом экспертной оценки.

Рассчитан индекс технического состояния генераторного подшипника при ухудшении некоторых параметров, возникающих в процессе его эксплуатации, что подтверждает возможность применения разработанной методики для определения фактического состояния генераторного подшипника.

Сформированы предложения по реализации разработанной методики в верхний уровень автоматизированной системы управления технологическими процессами Саяно-Шушенской ГЭС для расчета индекса технического состояния генераторного подшипника в режиме реального времени.

Разработанная методика оценки технического состояния генераторного подшипника Саяно-Шушенской ГЭС в режиме реального времени приблизит переход на ремонт по техническому состоянию оборудования, позволит определять развивающиеся дефекты оборудования на их начальной стадии развития, снизить расходы на ремонт, а также повысить надежность эксплуатируемого оборудования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок «Правила организации технического обслуживания и ремонта объектов электроэнергетики»: дата введения 25.10.2017 г. – Москва: Министерство энергетики Российской Федерации, 2017. – 433 с.;
2. Ремонт и наладка устройств электроснабжения // Ожерельевский железнодорожный колледж. – 2020. – 7 с. – URL: <http://ojerelie.pgups.ru/wp-content/uploads/2020/12/MDK.02.01-Remont-i-naladka-ustrojstv-elektrosnabzheniya-8.pdf> (дата обращения 10.04.2022);
3. Приказ Минэнерго России от 26.07.2017 № 676 «Об утверждении методики оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей» // Официальный интернет-портал правовой информации: [сайт]. – 2017. – URL: [http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003#:~:text=Приказ%20Министерства%20энергетики%20Российской%20Федерации,сетей%22.%20\(Зарегистрирован%2005.10.2017%20№%2048429\)](http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001201710060003#:~:text=Приказ%20Министерства%20энергетики%20Российской%20Федерации,сетей%22.%20(Зарегистрирован%2005.10.2017%20№%2048429)) (дата обращения 10.04.2022);
4. Оказание информационно-аналитических услуг по обеспечению безопасности, надежности и эффективности основного технологического оборудования, РЗА филиалов ПАО «РусГидро»: технический отчет за 2021 г. (этап 2) / АО «Институт Гидропроект»; рук.: Рубин О.Д.; Исполн.: Антонов А.С. [и др.].- Москва, 2022. – 254 с.;
5. Оказание информационно-аналитических услуг по обеспечению безопасности, надежности и эффективности основного технологического оборудования, РЗА филиалов ПАО «РусГидро» за 2020 г.: технический отчет (этап 2) / АО «Институт Гидропроект»; рук.: Рубин О.Д.; Исполн.: Антонов А.С. [и др.].- Москва, 2021. – 197 с.;

6. Оказание информационно-аналитических услуг по обеспечению безопасности, надежности и эффективности основного технологического оборудования, РЗА филиалов ПАО «РусГидро» за 2019 г.: технический отчет (этап 2) / АО «Институт Гидропроект»; Исполн.: Антонов А.С. [и др.].- Москва, 2020. – 181 с.;
7. Гидрогенератор типа СВФ1-1285/275-42 УХЛ4 для Саяно-Шушенской ГЭС. Руководство по эксплуатации: дата введения 27.07.2010. – ОБС.461.134 РЭ. 2010 – 57 л.;
8. СТО 17330282.27.140.001 – 2006. Гидроэлектростанции. Методики оценки технического состояния основного оборудования: дата введения 01.08.2006. – ОАО РАО «ЕЭС России», 2006. – 378 с.;
9. Гальперин, М. И. Подшипники гидротурбин / М. И. Гальперин, Б. К. Андриенко, Ю. П. Майзель. — Вып.83. — Москва: Энергоатомиздат, 1986. — 112 с.;
10. Надточег В. М. Справочник по ремонту и модернизации гидрогенераторов / В. М. Надточег, Я. С. Уринцев. — Москва: Энергоатомиздат, 1987. — 272 с.;
11. Технология ремонтов оборудования по состоянию, 14.12.2017 г. // Студопедия URL: [https://studopedia.ru/19\\_264367\\_tehnologiya-remontov-oborudovaniya-po-sostoyaniyu.html](https://studopedia.ru/19_264367_tehnologiya-remontov-oborudovaniya-po-sostoyaniyu.html) (дата обращения 10.04.2022);
12. М. А. Байдюк, Г. В. Комарова. Оценка технического состояния и надежности электрических машин // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». - 2019. - С. 78-83. URL: [https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-3\\_2019\\_p078-084.pdf](https://izv.etu.ru/assets/files/izvestiya-3_2019_p078-084.pdf) (дата обращения 10.04.2022);
13. Инструкция по эксплуатации гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС. Индивидуальный номер 6.36: дата введения 2017. – Филиал ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного», 2017. – 51 с.;
14. В.А. Русов. Диагностика дефектов подшипников скольжения, 2012 г. // Вибро-центр URL: <https://vibrocenter.ru/book5.htm> (дата обращения 14.06.2022);

15. ГОСТ 31873-2012. Нефть и нефтепродукты. Методы ручного отбора проб: дата введения 01.03.2014. – Москва: ФГУП «ВНИИР», 2014. – 35 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ А**

**Балльная шкала оценки, весовые коэффициенты для групп параметров и узлов для определения ИТС генераторного подшипника СШ ГЭС**

Таблица А.1 – Балльная шкала оценки, весовые коэффициенты для групп параметров и узлов для определения ИТС генераторного подшипника СШ ГЭС

Группа параметров функционального узла	Параметр функционального узла	Единица измерения параметра	Фактическое значение параметра	Нормативное значение параметра/предельно допустимые значения	Балльная шкала оценки отклонения фактических значений параметров (далее - Ф) от предельно допустимых значений, а также соответствия требованиям, установленным нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией организаций-изготовителей (далее - значения, установленные НТД (Н))					Параметр, влияющий на снижение индекса технического состояния (да/нет)		Весовой коэффициент группа параметров функционального узла
					0	1	2	3	4	критический	ресурсопределяющий	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Общее состояние	Уровень масла в ваннах подшипника	мм		310	$240 \leq \Phi < 270$ $-70 \leq (\Phi - Н) < -40$ и $390 < \Phi \leq 420$ $80 < (\Phi - Н) \leq 110$	$270 \leq \Phi < 310$ $-40 \leq (\Phi - Н) < 0$	$310 < \Phi \leq 390$ $0 < (\Phi - Н) \leq 80$	—	$\Phi = 310$ $(\Phi - Н) = 0$	нет	нет	0,30
	Поступление охлаждающей воды в маслоохладители	л/с		10 ÷ 12	$\Phi < 8$	—	$8 \leq \Phi < 10$	—	$10 \leq \Phi \leq 12$	нет	нет	
	Вибрация корпуса подшипника	мкм			$1 < \Phi / Н$	$0,8 < \Phi / Н \leq 1$	$0,65 < \Phi / Н \leq 0,8$	$0,5 < \Phi / Н \leq 0,65$	$\Phi / Н \leq 0,5$	нет	нет	
	Тенденция изменения вибрации корпуса подшипника по сравнению с исходным значением $\Phi_0$ в сопоставимых условиях (в соответствии с применяемой НТД)	мкм		—	—	$1 < (\Phi - \Phi_0) / 50$	$0,2 < (\Phi - \Phi_0) / 50 \leq 1$	—	$(\Phi - \Phi_0) / 50 \leq 0,2$	нет	нет	
	Температура масла	°С		+10 ÷ +44	$1 < \Phi / Н$	$\Phi / Н = 1$	—	—	$\Phi / Н < 1$	нет	нет	
	Тенденция отклонения значений температуры масла по сравнению с исходным значением $\Phi_0$ (в соответствии с применяемой НТД)	°С		—	—	$2 < (\Phi - \Phi_0) / 5$	$1 < (\Phi - \Phi_0) / 5 \leq 2$	—	$(\Phi - \Phi_0) / 5 \leq 1$	нет	нет	
Маслованна и маслоохладители	Течь масла из-под маслованны	—		Отсутствует	Имеется	—	—	—	Отсутствует	нет	нет	0,20
	Фланцевые и стыковые соединения маслованны подшипника и его крышки	—		Отсутствует	Протечки масла через выгородки маслованн, сварные швы, фланцевые соединения и уплотнения.	Фланцевые и стыковые соединения допускают повышенный выход масляных паров	—	Незначительные повреждения фланцевых и стыковых соединений, повышенный выход масляных паров отсутствует	Отсутствует	нет	нет	



Продолжение приложения А

Продолжение таблицы А.1

Группа параметров функционального узла	Параметр функционального узла	Единица измерения параметра	Фактическое значение параметра	Нормативное значение параметра/предельно допустимые значения	Балльная шкала оценки отклонения фактических значений параметров (далее - Ф) от предельно допустимых значений, а также соответствия требованиям, установленным нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией организаций-изготовителей (далее - значения, установленные НТД (Н))					Параметр, влияющий на снижение индекса технического состояния (да/нет)		Весовой коэффициент группа параметров функционального узла
					0	1	2	3	4	критический	ресурсопределяющий	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Маслованна и маслоохладители	Нарушение герметичности маслоохладителей	—		Отсутствует	Повреждение трубок охладителей; механический износ крепежа маслоохладителей или износ уплотняющих элементов маслоохладителей с протечками рабочей жидкости	—	Механический износ крепежа маслоохладителей или износ уплотняющих элементов маслоохладителей без протечек рабочей жидкости	—	Отсутствует	нет	нет	
	Загрязнение маслоохладителей иловыми отложениями, дрейсенной и другим мусором;	—		Отсутствует	Загрязнение трубок охладителей приводит к значительному увеличению гидравлического сопротивления, снижению поступающего расхода	Загрязнение трубок охладителей снижающее эффективность охлаждения	—	Незначительное загрязнение трубок охладителей не снижающее эффективность охлаждения	Отсутствует	нет	нет	
Состояние сегментов	Температура сегментов	°С		не более 74	$1 < \Phi/\text{H}$	$\Phi/\text{H} = 1$	—	—	$\Phi/\text{H} < 1$	нет	нет	0,20
	Тенденция изменения значений температуры сегментов по сравнению с исходным значением $\Phi_0$ (в соответствии с применяемой НТД)	°С		—	—	$2 < (\Phi - \Phi_0)/5$	$1 < (\Phi - \Phi_0)/5 \leq 2$	—	$(\Phi - \Phi_0)/5 \leq 1$	нет	нет	
	Тенденция изменения температуры сегментов по сравнению с предыдущим замером $\Phi_{\text{пред}}$	°С		—	—	—	$1 < (\Phi - \Phi_0)/5$	—	$(\Phi - \Phi_0)/5 \leq 1$	нет	нет	

Продолжение приложения А

Продолжение таблицы А.1

Группа параметров функционального узла	Параметр функционального узла	Единица измерения параметра	Фактическое значение параметра	Нормативное значение параметра/предельно допустимые значения	Балльная шкала оценки отклонения фактических значений параметров (далее - Ф) от предельно допустимых значений, а также соответствия требованиям, установленным нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией организаций-изготовителей (далее - значения, установленные НТД (Н))					Параметр, влияющий на снижение индекса технического состояния (да/нет)		Весовой коэффициент группа параметров функционального узла
					0	1	2	3	4	критический	ресурсопределяющий	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Состояние сегментов	Состояние поверхностей трения сегментов	—		Повреждения на поверхности трения отсутствуют	Повреждения на поверхности трения имеются	—	—	—	Повреждения на поверхности трения отсутствуют	нет	нет	0,20
	Сопротивление изоляции сегментов подшипника	МОм		1	$\Phi < 1$	$1 \leq \Phi < 10$	$10 \leq \Phi < 20$	$20 \leq \Phi < 40$	$40 \leq \Phi$	нет	нет	
Состояние сегментов	Зазор между сегментами и втулкой вала генератора	мм		0,18 - 0,22	$0,18 > \Phi$ или $\Phi > 0,22$	—	—	—	$0,18 \leq \Phi \leq 0,22$	нет	нет	
	Зазор между вал-надставкой и изолирующим кольцом	мм		0,5	$\Phi < 0,5$	$\Phi = 0,5$	—	—	$\Phi > 0,5$	нет	нет	
	Глубина смятия поверхности опоры сегмента	мм		не более 25 мм	$1 \leq \Phi/H$	—	—	—	$\Phi/H \leq 1$	нет	нет	
	Диаметр смятия поверхности опорного болта	мм		не более 17	$1 \leq \Phi/H$	—	—	—	$\Phi/H \leq 1$	нет	нет	
Состояние вала в зоне подшипника и его уплотнения	Бой вала	мм		0,44	$1 < \Phi/H$	$0,8 < \Phi/H \leq 1$	$0,65 < \Phi/H \leq 0,8$	$0,5 < \Phi/H \leq 0,65$	$\Phi/H < 0,5$	нет	нет	0,20
	Тенденция увеличения боя вала по сравнению с предыдущим замером Фпред	мм		—	—	—	$1 < (\Phi - \Phi_{пред})/10$	—	$(\Phi - \Phi_{пред})/10 \leq 1$	нет	нет	
	Выработка рубашки вала	мм		Количественная оценка при нормировании заводом-изготовителем. В других случаях качественная оценка.	$1 < \Phi/H$ или Неравномерный износ, риски, задиры на рубашке вала	$0,5 < \Phi/H < 1$	$0 < \Phi/H \leq 0,5$ или Незначительный износ, допустимый заводом-изготовителем	—	$\Phi/H = 0$ или Износ рубашки вала отсутствует	нет	нет	

Окончание приложения А

Окончание таблицы А.1

Группа параметров функционального узла	Параметр функционального узла	Единица измерения параметра	Фактическое значение параметра	Нормативное значение параметра/предельно допустимые значения	Балльная шкала оценки отклонения фактических значений параметров (далее - $\Phi$ ) от предельно допустимых значений, а также соответствия требованиям, установленным нормативно-технической документацией и (или) конструкторской (проектной) документацией организаций-изготовителей (далее - значения, установленные НТД (Н))					Параметр, влияющий на снижение индекса технического состояния (да/нет)		Весовой коэффициент группа параметров функционального узла
					0	1	2	3	4	критический	ресурсопределяющий	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Состояние вала в зоне подшипника и его уплотнения	Дефекты уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	—		Отсутствуют	—	Имеются с протечками или повышенным выходом масляных паров	Имеются без протечек и повышенного выхода масляных паров	—	Отсутствуют	нет	нет	0,20
	Температура уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	°С		70	$120 < \Phi$	$100 < \Phi \leq 120$	$90 < \Phi \leq 100$	$80 < \Phi \leq 90$	$\Phi \leq 80$	нет	нет	
Физико-химический анализ масла из ванны подшипника	Класс промышленной чистоты	кпч		не более 14	$14 < \Phi$	$\Phi = 14$	$\Phi = 13$	—	$\Phi \leq 12$	нет	нет	0,10
	Общее содержание шлама	% масс		не более 0,01	$0,01 < \Phi$	—	$0,004 < \Phi \leq 0,01$	$0,001 < \Phi \leq 0,004$	$\Phi \leq 0,001$	нет	нет	
	Содержание воды	% масс		не более 0,03	$0,03 < \Phi$	$0,01 < \Phi \leq 0,03$	$0,005 < \Phi \leq 0,01$	$0,002 < \Phi \leq 0,005$	$\Phi \leq 0,002$	нет	нет	

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

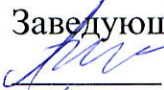
**Пример расчета индекса технического состояния генераторного подшипника СШ ГЭС**

Таблица Б.1 - Пример расчета ИТС генераторного подшипника СШ ГЭС

Функциональный узел	Группа параметров функционального узла	Параметр функционального узла	Балльная шкала оценки отклонения	Минимальное фактическое значение группы параметров	Весовой коэффициент	Итоговый ИТС генераторного подшипника, %
1	2	3	4	5	6	7
Генераторный подшипник	Общее состояние	Уровень масла в ваннах подшипника	1	1	0,3	32
		Поступление охлаждающей воды в маслоохладители	2			
		Вибрация корпуса подшипника	4			
		Температура масла	4			
	Маслованна и маслоохладители	Течь масла из-под маслованны	0	0	0,2	
		Фланцевые и стыковые соединения маслованны подшипника и его крышки	4			
		Нарушение герметичности маслоохладителей	4			
		Загрязнение маслоохладителей иловыми отложениями, дрейсенной и другим мусором;	1			
	Состояние сегментов	Температура сегментов	1	1	0,2	
		Состояние поверхностей трения сегментов	4			
		Сопrotивление изоляции сегментов подшипника	4			
		Зазор между опорным болтом и сухарем сегментов генераторного подшипника / сегментами и втулкой вала генератора	4			
		Зазор между вал-надставкой и изолирующим кольцом	4			
		Глубина смятия поверхности опоры сегмента	4			
		Диаметр смятия поверхности опорного болта	4			
	Состояние вала в зоне подшипника и его уплотнения	Бой вала	4	2	0,2	
		Тенденция увеличения боя вала по сравнению с предыдущим замером Фпред	4			
		Выработка рубашки вала	4			
		Дефекты уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	2			
		Температура уплотнения между валом и корпусом маслованны подшипника	4			
Физико-химический анализ масла из ванны подшипника	Класс промышленной чистоты	4	4	0,1		
	Общее содержание шлама	4				
	Содержание воды	4				

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ



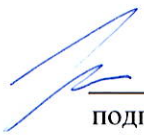

Кафедра гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
 А. А. Ачитаев  
«16» июня 2022 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПЕРАТИВНОГО РАСЧЁТА ИНДЕКСОВ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОАГРЕГАТОВ САЯНО-  
ШУШЕНСКОЙ ГЭС СРЕДСТВАМИ АСУ ТП НА ПРИМЕРЕ  
ГЕНЕРАТОРНОГО ПОДШИПНИКА**

13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника  
13.04.02.06 – Гидроэлектростанции

Научный Руководитель	 15.06.22 подпись, дата	Инженер по наладке и испытаниям службы мониторинга оборудования филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного» должность	<u>Д.А. Калугин</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 - 15.06.22 подпись, дата	Инженер 2 кат. по измерениям и испытаниям службы мониторинга оборудования филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного» должность	<u>С.С. Осипова</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 15.06.22 подпись, дата	Инженер 2 кат. по измерениям и испытаниям службы мониторинга оборудования филиала ПАО «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного» должность	<u>Н.А. Иванов</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 - 15.06.22 подпись, дата		<u>К.П. Синельникова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2022