

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

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_ М. В. Кочетков  
подпись                      инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**Разработка метода контроля радиального натяга между спицей и ободом ротора гидроагрегата**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	_____	ст. преподаватель	<u>А.А. Клюкач</u>
	подпись, дата	<u>Саяно-</u>	инициалы, фамилия
		<u>Шушенского</u>	
		<u>филиала СФУ</u>	
		должность	
Выпускник	_____		<u>К.С. Кравченко</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	<u>нач.отдела</u>	<u>А.В. Заздравных</u>
	подпись, дата	<u>ОЭСиА, ОП</u>	инициалы, фамилия
		<u>АО «СибВАМИ»</u>	
		должность	
Нормоконтролер	_____		<u>А.А. Чабанова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2019

## **АННОТАЦИЯ**

**Тема магистерской диссертации:** Разработка метода контроля радиального натяга между спицей и ободом ротора гидроагрегата.

**Объем диссертации:** составляет 47 страниц, содержит 6 иллюстраций. Список используемой литературы состоит из 21 наименования.

**Объектом исследования при написании работы послужили:** синхронные вертикальные гидроагрегаты.

**Целью работы** является внедрение новых датчиков измерения максимальных зазоров между спицей ротора и ободом, на основе анализа существующих методов диагностики гидроагрегатов и предложение инновационных решений по созданию высокотехнологичных систем автоматической диагностики.

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

- а) Изучение и анализ существующих систем диагностики;
- б) Описание методик и средств диагностики гидроагрегатов;
- в) Предложение по созданию системы автоматической диагностики.

**Научная новизна**

Предложена новая система диагностики и контроля за текущим состоянием гидроагрегатов, а именно внедрение датчиков измерения максимальных зазоров между спицей ротора и ободом, что позволит вести непрерывный контроль технического состояния гидроагрегатов и позволит выявлять дефекты на ранней стадии их развития.

**Ключевые слова:** гидроагрегат, гидрогенератор, ротор, обод, спица, натяг, вибрация, диагностика, зазор

## АВТОРЕФЕРАТ

### **Актуальность темы исследования:**

В ходе эксплуатации гидроагрегатов на гидроэлектростанциях основной задачей является обеспечение их надежной работы.

Задача обеспечения надежности решается путем профилактических мер контроля и испытания гидроагрегатов для раннего выявления и устранения дефектов развитие, которых может привести к аварийным отключениям агрегатов.

Однако, используемые в настоящее время методы и способы обнаружения дефектов, особенно в режиме реального времени, не имеют достаточно эффективности, так как в них не в полной мере используются современные возможности.

Целью технического обследования (индивидуального, комплексного) является диагностирование технического состояния оборудования (конструктивных узлов и других его отдельных элементов), на основании результатов проводимых при этом исследований и испытаний, своевременное выявление и анализ причин аварийно-опасных дефектов и повреждений, принятие технических решений по мерам, необходимым для обеспечения безопасной эксплуатации оборудования в период срока службы.

Специализированные измерительные системы для вращающихся объектов, несмотря на значительную потребность в них, отечественной промышленностью не освоены.

Одним из наиболее нагруженных в механическом отношении элементов конструкции гидрогенератора является ротор гидрогенератора. Ротор представляет собой вращающуюся часть гидрогенератора и является самым массивным элементом гидроагрегата.

При эксплуатации гидрогенератора ослабление расклиновки обода ротора наблюдается в результате действия центробежных сил, а также при выборке зазоров между сегментами обода и шпильками из-за неравномерной опрессовки

обода, что в свою очередь может привести к проседанию обода при подъеме ротора на тормозные домкраты, а также к повышенному биению вала, повреждению подпятников и подшипников, сколам уступов, выползанию клиновых частей и шпонок с их отгибом и повреждением обмотки статора.

Одним из прогрессивных решений является внедрение на гидроэлектростанции систем автоматической диагностики ротора гидрогенератора, которые смогут позволить выявить дефектность оборудования на ранней стадии развития.

Для получения информации о состоянии радиального натяга ротора гидрогенератора предложено установить адаптивные средства контроля технического состояния и, собственно, самого диагностирования, позволяющего определять зазор между спицей и ободом ротора.

Одной из главных и самых важных проблем установки адаптивных средств контроля измерения зазора между спицей и ободом ротора гидрогенератора, является передача данных с вращающейся на невращающуюся части гидроагрегата.

В связи с этим является актуальной задача разработки схемы передачи данных с вращающейся части гидроагрегата на невращающиеся и непосредственно самого диагностирования, позволяющего определять текущее состояние и выявлять дефекты на ранней стадии развития.

**Целью работы** является внедрение датчиков измерения максимальных зазоров между спицей ротора и ободом, на основе анализа существующих методов диагностики гидроагрегатов и предложение инновационных решений по созданию высокотехнологичных систем автоматической диагностики.

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

- а) Изучение и анализ существующих систем диагностики;
- б) Описание методик и средств диагностики гидроагрегатов;
- в) Предложение по созданию системы автоматической диагностики.

**Объект исследования:**

Синхронные вертикальные гидроагрегаты.

### **Предмет исследования:**

Системы контроля и диагностики гидроагрегатов.

### **Научная новизна**

Предложена новая система диагностики и контроля за текущим состоянием гидроагрегатов, а именно внедрение датчиков измерения максимальных зазоров между спицей ротора и ободом, а также схема, передающая данные с вращающейся части на невращающуюся часть, что позволит вести контроль технического состояния гидроагрегатов и выявлять дефекты на ранней стадии развития.

### **Апробация работы:**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, были представлены:

- на V Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке» Саяно-Шушенский филиал Сибирского Федерального университета (Саяногорск; Черемушки, 2018 г.).

- на VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке» Саяно-Шушенский филиал Сибирского Федерального университета в (Саяногорск; Черемушки, 2019 г.).

### **Публикации:**

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

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

Диссертация состоит из аннотации, автореферата, содержания, введения, семи глав, заключения и списка использованных источников. Объем диссертации составляет 47 страниц, содержит 6 иллюстраций. Список используемой литературы состоит из 21 наименования.

**Ключевые слова:** гидроагрегат, гидрогенератор, ротор, обод, спица, натяг, радиальный натяг, вибрация, диагностика, зазор, воздушный зазор, датчик, контроль.

## **ABSTRACT**

### **Relevance of the research topic:**

During the operation of hydraulic units at hydroelectric power plants, the main task is to ensure their reliable operation.

The task of ensuring reliability is solved by preventive measures of control and testing of hydraulic units for the early detection and elimination of development defects, which can lead to emergency shutdowns of the units.

However, currently used methods and tools for detecting defects, especially in real time, do not have enough efficiency, since they do not fully use modern capabilities.

Technical inspection (individual, complex) aims to diagnose the technical condition of the equipment (its individual elements, structural components) based on the results of tests and studies carried out at the same time, timely identification and analysis of the causes of accidentally dangerous defects and damages, subsequent technical decisions on the measures required to ensure the safe operation of the equipment within the service life.

Specialized measuring systems for rotating objects, despite the significant need for them, have not been mastered by the domestic industry.

One of the most mechanically loaded structural elements of a hydrogenerator is a hydrogenerator rotor. The rotor is a rotating part of the hydrogenerator and is the most massive element of the hydraulic unit.

During the operation of the hydrogenerator, weakening of the rim of the rotor rim is observed as a result of centrifugal forces, as well as when sampling gaps between the rim segments and studs due to uneven crimping of the rim, which in turn can lead to the rim subsidence when lifting the rotor on the brake jacks, as well as increased shaft beating, damage to the thrust bearings and bearings, chipping of ledges, creeping of wedge parts and keys with their bend and damage to the stator winding.

The most progressive solution is the introduction of automatic technical diagnostics of the rotor of a hydrogenerator at hydroelectric stations, which allow revealing defects and equipment malfunctions at an early stage of their development.

To obtain information on the state of the radial tension of the rotor of the hydrogenerator, it was proposed to install adaptive means of monitoring the technical condition and directly diagnosing itself, allowing to determine the gap between the spoke and the rotor rim.

One of the main and most important problems of installing adaptive means of monitoring the measurement of the gap between the needle and the rotor rim of a hydrogenerator is the transfer of data from the rotating part of a hydraulic unit to a non-rotating one.

In this connection, the task of developing a data transfer scheme from a rotating unit of a hydraulic unit to non-rotating and directly diagnosing itself is important, which allows determining the current state and detecting defects at an early stage of development.

The aim of the work is the introduction of sensors measuring maximum clearances between the rotor spoke and the rim, based on the analysis of existing diagnostic methods for hydraulic units and the proposal of innovative solutions for the creation of high-tech automated diagnostic systems.

**Tasks solved in the course of the work:**

- a) Study and analysis of existing diagnostic systems;
- b) Description of the methods and means of diagnostics of hydraulic units;
- c) Proposal for the creation of an automated diagnostic system.

**Object of study:**

Synchronous vertical hydraulic units.

**Subject of study:**

Control systems and diagnostics of hydraulic units.

**Scientific novelty**

A new system for diagnosing and monitoring the current state of hydraulic units, namely the introduction of sensors measuring maximum clearances between



the rotor spoke and the rim, as well as a scheme transmitting data from the rotating part to the non-rotating part, which will allow monitoring the technical condition of hydraulic units and detecting defects at an early stage. development.

#### **Approbation of work:**

The main results of the research presented in the thesis were presented:

- at the V All-Russian scientific-practical conference of young scientists, specialists, graduate students and students "Hydroelectric power plants in the XXI century" Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal University (Sayanogorsk; Cheryomushki, 2018).

- at the VI All-Russian scientific-practical conference of young scientists, specialists, graduate students and students "Hydroelectric power plants in the XXI century" Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal University (Sayanogorsk; Cheryomushki, 2019).

#### **Publications:**

The main provisions and conclusions are set forth in two publications in scientific journals and publications, which are included in the list of scientific publications sold, defined by RSCI, ISBN.

#### **The structure and scope of the thesis:**

The thesis consists of abstracts, abstracts, contents, introduction, seven chapters, conclusion and list of references. The volume of the thesis is 47 pages, contains 6 illustrations. The list of used literature consists of 21 titles.

**Key words:** hydraulic unit, hydrogenerator, rotor, rim, spoke, tension, radial tension, vibration, diagnostics, clearance, air gap, sensor, control.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	11
1 Контроль и оценка состояния гидроагрегатов ГЭС .....	14
2 Эксплуатация гидрогенератора. Конструктивный узел – ротор гидрогенератора .....	18
3 Стальные конструкции ротора.....	21
4 Контроль параметров гидроагрегата и применяемые меры .....	24
4.1 Смещение ротора гидрогенератора.....	24
4.2 Контроль за величиной оборотной вибрации .....	25
4.3 Применяемые меры.....	25
4.4 Горячая расклиновка обода ротора .....	25
5 Предотвращение появления зазоров .....	30
5.1 Оценка симметрии воздушного зазора.....	30
5.2 Определение статической формы ротора .....	30
5.3 Определение динамической формы ротора .....	30
5.4 Определение максимального зазора .....	31
6 Датчики, применяемые для определения величины зазора.....	32
6.1 Вихретоковые датчиковые системы.....	32
6.2 Принцип работы вихретоковых датчиковых систем.....	32
6.3 Конструкция вихретоковых датчиковых систем .....	33
6.4 Частотные характеристики вихретоковых датчиков .....	33
6.5 Входные и выходные параметры вихретоковых датчиков.....	34
6.6 Области применения вихретоковых датчиков.....	34
6.7 Системная конфигурация вихретоковых датчиков.....	35
6.8 Установка датчиков .....	35
7 Датчики, элементы измерения и контроля. Схема передачи данных.....	37
7.1 Контроль технического состояния радиального натяга между спицей и ободом ротора гидроагрегата.....	37
7.2 Схема передачи данных через воздушный зазор.....	38

Заключение .....	44
Список использованных источников .....	45

## ВВЕДЕНИЕ

**Название работы:** Разработка метода контроля радиального натяга между спицей и ободом ротора гидроагрегата.

**Объект исследования:**

Синхронные вертикальные гидроагрегаты.

**Актуальность:**

В ходе эксплуатации гидроагрегатов на гидроэлектростанциях основной задачей является обеспечение их надежной работы.

Задача обеспечения надежности решается путем профилактических мер контроля и испытания гидроагрегатов для раннего выявления и устранения дефектов, развитие которых может привести к аварийным отключениям агрегатов.

Однако применяемые в настоящее время методы и средства обнаружения дефектов, особенно в режиме реального времени, не имеют достаточно эффективности, так как в них не в полной мере используются современные возможности.

Наиболее прогрессивным решением является внедрение на ГЭС систем автоматической технической диагностики гидроагрегатов, которые позволяют выявить дефекты и неисправности оборудования на ранней стадии их развития. Для получения информации о состоянии гидроагрегата предложено установить датчики контроля за величиной зазора между спицей и ободом ротора гидрогенератора, тем самым выявляя агрегаты, где ослабление обода ротора привело к критическому снижению натяга.

На сегодняшний день на некоторых станциях уже работают аналоговые системы контроля с использованием индукционных датчиков для измерения вибрации агрегатов. Недостатком этих систем можно считать несовершенные технологии сбора и обработки информации.

В связи с этим является актуальной задача разработки адаптивных средств непрерывного контроля технического состояния и непосредственно

самого диагностирования, позволяющих определять текущее состояние гидроагрегата и выявлять дефекты на ранней стадии развития.

**Целью:**

Является внедрение датчиков измерения максимальных зазоров между спицей ротора и ободом, на основе анализа существующих методов диагностики гидроагрегатов и предложение инновационных решений по созданию элемента, дополняющего высокотехнологичные системы автоматической диагностики.

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

- а) Изучение и анализ существующих систем диагностики;
- б) Описание методик и средств диагностики гидроагрегатов;
- в) Предложение по созданию системы автоматической диагностики.

**Научная новизна**

Предложена новая система диагностики и контроля за текущим состоянием гидроагрегатов, а именно внедрение датчиков измерения максимальных зазоров между спицей ротора и ободом, что позволит вести непрерывный контроль технического состояния гидроагрегатов и выявлять дефекты на ранней стадии развития.

## **1 Контроль и оценка состояния гидроагрегатов ГЭС**

Для современного гидротурбостроения характерна тенденция ужесточения условий работы гидроагрегатов, заключающихся в увеличении межремонтных периодов и сроков эксплуатации. В связи с этим повышаются общие требования к надежности энергомашиностроительного оборудования в целом, и, следовательно, к отдельным конструкционным элементам.

Контроль и оценка технического состояния оборудования ГЭС охватывают следующие цели и задачи:

- повышение безопасности эксплуатации оборудования посредством выявления и своевременного устранения возникших повреждений (дефектов);
- определение возможности и целесообразности продолжения эксплуатации выработавших срок службы единиц оборудования, их элементов и конструктивных узлов, определяющих безопасность эксплуатации гидроагрегата;
- выработку рекомендаций по ремонтному обслуживанию и продолжению эксплуатации оборудования, имеющего повреждения (дефекты), включая введение при необходимости специальных эксплуатационных мер (дополнительный контроль, режимные ограничения, внеплановый ремонт и т.п.);
- обоснование для модернизации единиц оборудования в целом, их элементов и конструктивных узлов.

Оценку технического состояния технических систем производят на основе анализа работы обслуживаемого ими оборудования. Техническая система является работоспособной, если она обеспечивает работу гидроагрегата с нормативными (паспортными) параметрами. Состояние отдельных элементов технической системы определяется их соответствием паспортным данным, технической документации и нормативным документам.

Техническое состояние оборудования ГЭС оценивают как:

- «Работоспособное», если контролируемые параметры, характеризующие способность оборудования выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативной и/или конструкторской (проектной) документации, и при контроле технического состояния дефекты не выявлены или выявлены малозначительные легко устранимые дефекты на ранней стадии развития;

- «Частично неработоспособное», если при контроле технического состояния выявлены значительные, но устранимые дефекты, при которых оборудование способно частично выполнять требуемые функции, и продолжение работы оборудования требует временного введения ограничений (снижения эксплуатационных нагрузок, сокращения межремонтного периода и т.п.);

- «Неработоспособное», если контролируемые параметры, характеризующие способность оборудования выполнять заданные функции, не соответствуют требованиям нормативной и/или конструкторской (проектной) документации, и при контроле технического состояния выявлены критические или значительные, трудно устранимые дефекты, и восстановление работоспособности оборудования требует его немедленного вывода в ремонт;

- «Предельное», если при контроле технического состояния выявлены критические дефекты, и дальнейшая эксплуатация оборудования недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Для обеспечения безопасной работы оборудования и предотвращения повреждений, которые могут быть вызваны дефектами конструктивных узлов и деталей оборудования при изготовлении, монтаже и ремонте, а также развитием процессов эрозии, коррозии, снижением прочностных характеристик при эксплуатации, должен быть организован эксплуатационный контроль.

Оценка состояния по результатам комплексного технического обследования гидрогенератора должна охватывать следующие конструктивные узлы:

- обмотка статора;

- стальные конструкции статора, включая активную часть статора (сердечник);

- стальные конструкции ротора;

- обмотка возбуждения и демпферная обмотка ротора;

- щеточно-контактный аппарат.

Оценку технического состояния принимают на основе анализа всех результатов контроля и технических обследований для каждого конструктивного узла гидрогенератора с учетом возможности и результатов устранения выявленных дефектов и/или замены изношенных узлов.

Оценку технического состояния единицы (элемента) оборудования в целом производят по худшей из оценок технического состояния его конструктивных и функциональных узлов.

В системах управления технологическими процессами ГЭС, в том числе автоматизированных (АСУ ТП), должны быть реализованы информационные, аналитические и диагностические функции по контролю состояния основного оборудования.

Для получения информации о состоянии гидроагрегата широко используются различные системы, например такие как:

- контроль биений вала;

- вибрационный контроль;

- тепловой контроль

- системы контроля механических и электрических параметров.

Наиболее прогрессивным решением является внедрение на ГЭС систем автоматической технической диагностики ротора гидрогенератора, которые позволяют выявить дефекты и неисправности оборудования на ранней стадии их развития.

Для получения информации о состоянии радиального натяга ротора гидрогенератора предложено установить адаптивные средства контроля технического состояния и непосредственно самого диагностирования, позволяющих определять зазор между спицей и ободом ротора.



Одной из главных и самых важных проблем установки адаптивных средств контроля измерения зазора между спицей и ободом ротора гидрогенератора, является передача данных с вращающейся части гидроагрегата на невращающуюся.

В связи с этим является актуальной задача разработки схемы передачи данных с вращающейся части гидроагрегата на невращающиеся и непосредственно самого диагностирования, позволяющего определять текущее состояние и выявлять дефекты на ранней стадии развития.

## **2 Эксплуатация гидрогенератора. Конструктивный узел – ротор гидрогенератора**

При пуске и во время эксплуатации гидрогенераторов должен осуществляться контроль электрических параметров статора, ротора и системы возбуждения; температуры обмотки и стали статора, охлаждающих сред (в том числе и оборудования системы возбуждения), подшипников и подпятников; давления, в том числе перепада давлений на фильтрах, удельного сопротивления и расхода дистиллята через обмотки для гидрогенераторов с водяным охлаждением обмоток; давления и температуры масла, уровня масла в масляных ваннах подшипников и подпятников, герметичности систем жидкостного охлаждения; вибрации подшипников и крестовин гидрогенераторов.

При вращении ротора гидрогенератора производят:

- измерение электрических параметров - напряжений, токов, мощности (активной и реактивной), частоты - штатными системами с использованием в необходимых случаях приборов класса точности 0,2 или 0,5;

- контроль теплового состояния обмоток статора и ротора, стали статора - штатными системами с установкой при необходимости дополнительных термоэлектрических датчиков;

- контроль исправности ЩКА - штатными системами в сочетании со специальными средствами;

- измерение вибрации элементов статора и ротора, биения вала - штатными системами, дополнительными датчиками и измерительными средствами;

- измерение воздушного зазора с целью определения динамических форм ротора и статора и определение взаимного положения последних - специальными средствами;

- измерение частоты вращения ротора - штатной системой;

- измерение частичных разрядов в обмотке статора - по специальной методике;

- снятие характеристик холостого хода и короткого замыкания гидрогенератора.

При неподвижном роторе и отключении гидрогенератора от сети производят:

- измерение сопротивлений изоляции обмоток статора и ротора;
- испытания изоляции обмотки статора повышенным выпрямленным напряжением;

- испытания изоляции обмоток статора и ротора повышенным напряжением промышленной частоты;

- измерение интенсивности частичных разрядов;

- измерение сопротивлений обмоток статора и ротора постоянному току; на роторе, кроме того, измеряют сопротивления по полюсам или парам полюсов, а также сопротивления контактного соединения катушек полюсов;

- измерение сопротивлений обмоток полюсов или пар полюсов ротора переменному току промышленной частоты;

- измерение воздушного зазора, с целью определения статических форм ротора и статора, центровки статора и ротора;

- испытание стали сердечника статора методом высокочастотного сканирования расточки статора специальным датчиком;

- испытание сердечника статора при кольцевом намагничивании с индукцией  $(1,0 \pm 0,1)$  Тл при косвенном и  $(1,4 \pm 0,1)$  Тл при непосредственном охлаждении обмоток;

- проверку плотности водяной системы охлаждения обмотки статора;

- оценку плотности посадки обода на спицах ротора при подъеме его на тормозах - по величине аксиальных статических перемещений обода относительно спиц;

- проверку плотности прессовки сердечника (активной стали) статора - с применением тарировочного ножа.

В случае выявления при техническом обследовании быстро развивающихся дефектов гидрогенератор выводят из работы для внеочередного осмотра и принятия решения по корректировке межремонтного периода или по сокращению периодичности контроля.

### 3 Стальные конструкции ротора

Одними из наиболее нагруженных в механическом отношении элементов конструкции гидрогенератора являются статор и ротор гидрогенератора.

Ротор представляет собой вращающуюся часть гидрогенератора и является самым массивным элементом гидроагрегата, в составе которого: остова, спицы, обод и полюса с обмоткой возбуждения.

На внешней стороне обода ротора прикреплены полюсы ротора, состоящие из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки. Катушки полюсов соединены между собой и образуют обмотку возбуждения.

В эту обмотку подаётся постоянный ток - ток возбуждения генератора. При обтекании током на каждой паре катушек образуется постоянное электромагнитное поле с северным и южным полюсом, как у обычных магнитов.

Тормозное кольцо, крепится к ротору и служит для остановки агрегата.

Ротор, состоит из кольца большого диаметра, состоящего из внутренней части - остова, насаживаемого с помощью втулки на вал, и наружной части - обода, собранного из штампованных сегментов. На ободу располагаются полюсы с обмоткой возбуждения. Вращающий момент передается от вала к ротору в гидрогенераторе при помощи фланцевого соединения вала турбины с втулкой центральной части ротора.

Известные конструкции спиц роторов гидрогенераторов имеют прямоугольную форму в плоскости, проходящей через ось вала, и соединяются с ободом при помощи упорных ребер. Имеются различные модификации спиц ротора, но наиболее экономичная трапецеидальная спица, так как она имеет меньший вес, приходящийся на единицу вращающего момента.

Трапецеидальная спица показана на рисунке 1.

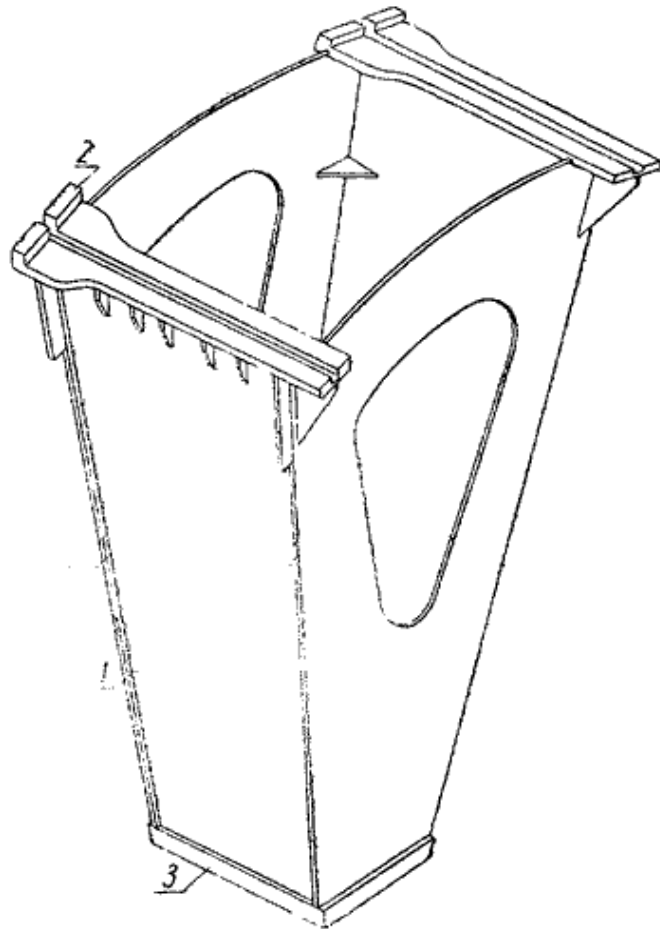


Рисунок 1 – Спица ротора гидрогенератора

Боковые стенки - 1 спицы расположены приблизительно по радиусам окружности обода. Для соединения спицы с ободом предусмотрены два упорных ребра - 2. Крепление спицы к втулке производится посредством широкой стыковой плиты - 3 шпильками и штифтами.

Шихтованный обод, применяемый во всех гидрогенераторах, за исключением самых быстроходных, собирается на калибрах и шпильках из отдельных сегментов, штампованных из листовой стали толщиной 3-4 мм. Обод является наиболее напряженным в механическом отношении узлом ротора, прочность обода определяет выбор окружной скорости и, следовательно, габаритов гидрогенератора.

С учетом того, что обод используется также в качестве вентилятора, возникает необходимость в правильном выборе длины сегмента, определяя

этим размеры многочисленных зазоров между их боковыми сторонами. Половина этих зазоров, располагаясь между полюсами, служит каналами для прохода охлаждающего воздуха и играет существенную роль в системе вентиляции гидрогенератора.

Сверху на спицах обод запирается замками для предотвращения скольжения вверх относительно остова при подъеме на домкратах.

К нижней, торцевой, части ротора крепится тормозное кольцо, состоящее из отдельных сегментов. У гидрогенераторов большого диаметра тормозное кольцо укреплено непосредственно на ободе его стяжными шпильками. На роторах сравнительно небольшого диаметра сегменты тормозного кольца крепятся только к остову или к остову и ободу совместно.

Сопряжение обода с остовом ротора осуществляется парными клиновыми шпонками, забитыми в пазы клиновых полос и обода, а также при помощи уступов клиновых полос, причем первые передают момент вращения, а вторые воспринимают вес обода с полюсами.

Ротор гидрогенератора представлен на рисунке 2.

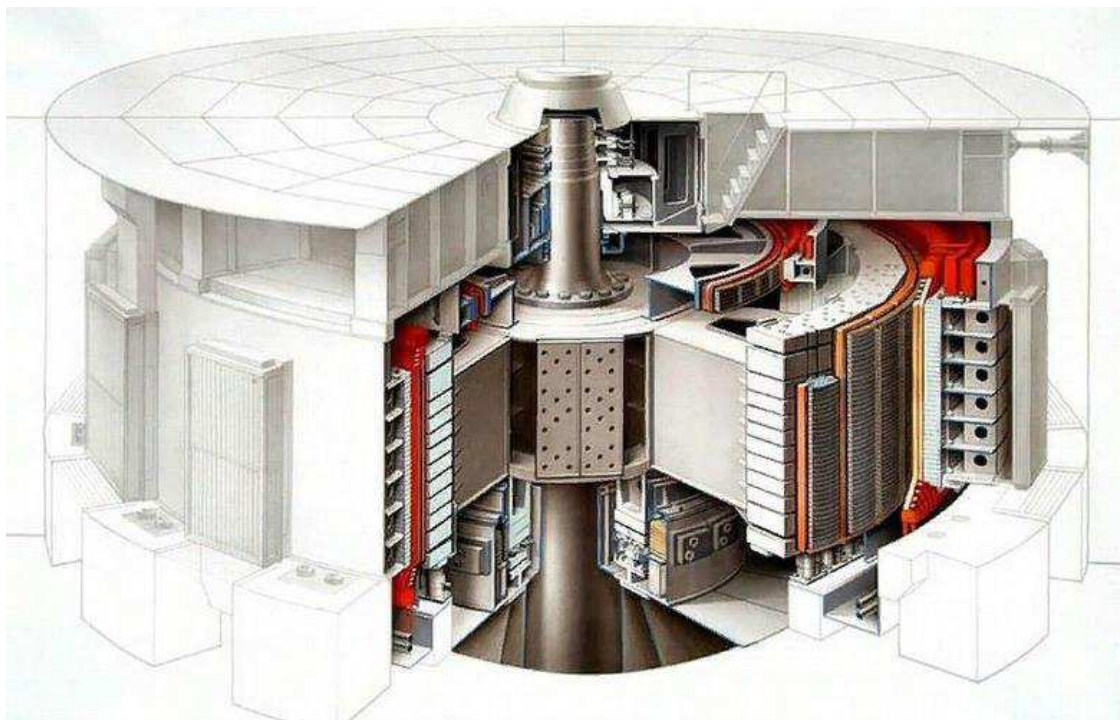


Рисунок 2 – Ротор гидрогенератора

## **4 Контроль параметров гидроагрегата и применяемые меры**

Небаланс вращающихся масс ротора является одним из самых наиболее распространенных дефектов вращающегося оборудования, обычно приводящим к резкому увеличению вибраций агрегатов. По этой причине вопросам диагностирования и способам устранения небалансов следует уделять большое внимание.

При небалансе масс ротора он стремится вращаться не относительно своей геометрической оси, а относительно оси центра масс, которые в этом случае не совпадают.

В современном мире существует ряд методов не разрушающего контроля, отвечающих за определенный вид дефекта. В нашем случае контроль состояния зазора между спицей и ободом ротора зависит от осевого смещения ротора, вибрации вала ротора относительно корпуса, при увеличении оборотной вибрации.

Контроль за величиной оборотной вибрации выявляет агрегаты, где ослабление обода ротора привело к критическому снижению натяга. Отмечено, что у генераторов, которые имеют проектную величину натяга обода ротора, увеличения оборотной вибрации после сброса полной нагрузки нет, а у агрегатов с ослабленной посадкой обода ротора наблюдается увеличение оборотной вибрации [4].

### **4.1 Смещение ротора гидрогенератора**

Собственные колебания роторов гидроагрегатов в осевом и поперечном направлении наблюдаются в спектре вибрации опорных углов на малых мощностях из-за несогласованности угла выхода потока из направляющего аппарата с углом входа потока на лопасти рабочего колеса.



## **4.2 Контроль за величиной оборотной вибрации**

Вибрации оборотной частоты  $f_{об}$  - эти колебания являются наиболее частой причиной повышенных вибраций направляющих подшипников машины. Они вызываются динамической неуравновешенностью ротора агрегата, которая может иметь механическую, электрическую и гидравлическую природу. Одной из причин возникновения сил механического происхождения может быть неуравновешенность масс ротора гидроагрегата. Диагностическим признаком механической неуравновешенности ротора агрегата является прямолинейная зависимость амплитуды оборотной вибрации корпусов подшипников от квадрата частоты вращения.

Расширение и сжатие обода при пусках и остановках могут вызвать его ползание по поверхности уступов клиновых полос и, как следствие, их разрушение.

## **4.3 Применяемые меры**

Мерой, предотвращающей возникновение зазоров, является создание радиального натяга между остовом и ободом. Для этого обод нагревают до получения заданного перепада температур между спицами и ободом и опускают клиновые шпонки (их забивные части) во всех спицах на необходимую расчетную величину. Величину натяга выбирают обычно из того расчета, чтобы разъединительная частота вращения при которой между ободом и спицами начинает образовываться зазор, была не ниже частоты вращения агрегата при сбросе полной нагрузки (обычно около 150 % номинальной частоты вращения).

## **4.4 Горячая расклиновка обода ротора**

В эксплуатации гидрогенераторов ослабление расклиновки обода происходит в результате действия центробежных сил, а также при выборке зазоров между сегментами шихтованного обода и стяжными шпильками из-за

слабой или неравномерной опрессовки обода, что в свою очередь может зависеть от степени отклонения от плоскостности использованных для сборки сегментов стали.

Визуальное ослабление расклиновки (уменьшение натяга между ободом и клиновыми частями шпонок обода, установленными на клиновые полосы спиц) проявляется в «проседании» обода при подъеме ротора на тормозные домкраты. Работа гидрогенератора с ослабленной расклиновкой обода приводит к повышенному биению вала и повреждению подпятника и подшипников, сколам заплечиков, выползанию клиновых частей и шпонок с их отгибом и повреждением обмоток статоров. Натяг обод — спицы для гидрогенераторов определяется габаритами обода, рабочей частотой вращения ротора и составляет 1— 2,5 мм на радиус и должен соответствовать требованиям чертежей предприятия-изготовителя. Натяг должен обеспечивать плотную посадку обода на спицы при угонной частоте вращения с учетом эксплуатационных температур, центробежных усилий от собственного веса обода и полюсов, а также удержания массы остова, вала ротора генератора, надставки вала (с якорем возбуждителя), вала рабочего колеса турбины при торможении.

Доведение ослабленного натяга до значений, указанных в чертежах предприятия-изготовителя, производится путем дополнительной подбивки клиновых частей шпонок обода при нагреве обода до расчетной температуры, что позволяет обеспечить необходимый натяг обода на спицы после остывания. Обе клиновые части шпонок должны после забивки располагаться по всей высоте обода, т. е. клинья, забиваемые сверху, должны выйти снизу своими тонкими концами. Обод нагревается различными методами (индукционным, активными потерями в обмотке ротора и статора или электрическими нагревателями) до температурного перепада обод — спицы 20—50 °С. Контроль температуры спиц, обода и токоведущих частей при нагреве производится ртутными термометрами, термопарами или термометрами сопротивления. Абсолютный нагрев катушек полюсов ротора и обмотки

статора не должен превышать номинальных значений. Увеличение радиуса обода при нагреве контролируется по показаниям индикаторов часового типа, закрепляемых на спицах с упором штока в обод. При достижении расчетного температурного перепада по показаниям индикаторов определяется остаточный натяг либо образование зазора между ободом и спицами. Допустимым является остаточный натяг (при указанном температурном перепаде) не менее 0,3 мм. Размер осадки верхних забивных клиновых частей шпонок определяется произведением дополнительного натяга (рассчитанного по показаниям индикаторов) и уклона клиньев (уклон обычно 1:200). При невозможности обеспечить натяг подбивкой клиновых частей из-за недостаточного вылета клиновых частей шпонок над клиновыми полосами спиц устанавливаются калиброванные прокладки на всю длину шпонок либо заменяются пары клиновых частей шпонок.

Основные технологические операции при горячей расклиновке обода ротора:

- 1) демонтаж перекрытий верхней крестовины и воздухоотделительных щитов;
- 2) подъем ротора с установкой опор под спицы (в зависимости от конструкции крепления сегментов тормозного кольца);
- 3) снятие накладок на выходе клиновых частей шпонок из обода;
- 4) проверка опрессовки обода, холодная подклиновка обода, измерение длины выступающих концов клиньев, проверка формы ротора и заполнение формуляра;
- 5) чистка и продувка обода, спиц и полюсов ротора;
- 6) сборка схемы нагрева.

При индукционном нагреве на обод наматывается девять-десять витков кабеля и обод изолируется теплоизоляционным материалом, напряжение источника питания 35—40 В. Нагрев активными потерями в обмотке ротора производится с использованием резервного возбуждателя или соответствующей мощности мотор-генератора, ток при нагреве — не более 0,7 при

изолированном теплоизоляционным материалом обода. Нагрев обода активными потерями в обмотке статора и ротора производится при питании постоянным током не более 0,7 мм статора и ротора (при этом для статоров и роторов с водяным охлаждением обмоток системы заполняются водой и в соответствии с эксплуатационными инструкциями обеспечивается ее циркуляция). Затем устанавливаются дополнительные приборы для контроля температуры спиц, обода и катушек полюсов, индикаторы часового типа с натягом 3 мм штоков на обод ротора, проверяются сопротивления изоляции токоведущих частей схемы нагрева и обмоток, после чего включается источник питания.

Допустимая скорость нагрева обода и обмотки ротора — не более 10 °С в час, скорость нагрева регулируется подбором количества витков намагничивающей обмотки, изменением тока резервного возбуждателя или мотор-генератора.

Допустимая температура обмоток статора и ротора, а также конденсата у статоров и роторов с водяным охлаждением обмотки 80 °С, длительность нагрева для мощных гидрогенераторов — ориентировочно 36—48 ч.

В процессе нагрева производится контроль температуры и увеличения радиуса обода, при достижении температурного перепада обод — спицы 25—50 °С выполняется дополнительная расклиновка обода, установка калиброванных прокладок или замена клиньев на новые.

Если обод концентричен, то при расклиновке одновременно забиваются диаметрально противоположные клинья; если эксцентриситет обода превышает допуск, указанный в табл. 1, то расклиновкой клиньев на определенной стороне обода добиваются уменьшения эксцентриситета ротора до допустимого размера.

Заменяемые клинья вынимаются с применением скоб, привариваемых к ним, и крана. Клинья изготавливаются из горячекатаной стали квадратного или прямоугольного сечения.

Закладные клинья после заклиновки фиксируются с забивными клиньями электросваркой, затем устанавливаются накладки, разбираются схемы нагрева, разбираются приборы термоконтроля и измерения натяга, снимается теплоизоляционный материал.

Таблица 1 — Допустимые отклонения ротора гидрогенератора

Характер отклонения	Места измерений	Допустимые отклонения, мм, при диаметре ротора, м		
		4,5	9	14,5
Неконцентричность обода	По радиусу от вала или втулки до боковой поверхности обода (среднеарифметические данные измерений вверху и внизу обода)	0,6	0,8	1,2
Неконцентричность полюсов	По радиусу от вала или втулки до внешней поверхности полюса	0,6	1	1,5
Равномерность горизонтальных осей обода и полюсов	По разности высот средней линии обода и полюсов	Не более 1 % высоты обода		
Волнистость обода	По верхней плоскости обода			

Таблица 1 предназначена для гидрогенераторов, в заводской технической документации которых не приведены указанные допуски.

## **5 Предотвращение появления зазоров**

### **5.1 Оценка симметрии воздушного зазора**

Определение форм ротора и статора гидрогенераторов следует производить при каждом капитальном ремонте, но не реже, чем 1 раз в 5 лет, а также в случае возникновения при подаче возбуждения повышенных низкочастотной вибрации сердечника статора и крестовины, биения вала и температуры сегментов направляющих подшипников. Если предусматривается проведение работы по исправлению форм ротора и статора, то измерение их форм необходимо производить дважды: перед ремонтом и повторно после него.

Оценка симметрии воздушного зазора осуществляется с учетом статических и динамических форм, а также величин биения вала. При повышенном биении вала, связанном с наличием дефектов валопровода или узлов гидротурбинного оборудования («излом» вала, небалансы узлов в проточной части и др.), определение форм ротора и статора проводится после устранения причины биения вала.

### **5.2 Определение статической формы ротора**

Определение статической формы ротора возможно и при его вращении - в режиме холостого хода без возбуждения при минимальной частоте вращения ротора  $n = (0,1 - 0,2) n_{ном}$  на выбеге без торможения.

### **5.3 Определение динамической формы ротора**

Динамическая форма ротора определяется в режимах холостого хода без возбуждения и с возбуждением при изменении частоты вращения. При этом имеется возможность отдельной оценки влияния центробежных (при выбеге на холостом ходу без возбуждения) и электромагнитных сил (при подаче возбуждения) на форму ротора, а, следовательно, получить количественную оценку ослабления посадки обода на спицах работающего агрегата.

## 5.4 Определение максимального зазора

При сбросе нагрузки агрегата (отключении его от сети) гидроагрегат начинает ускоряться, число оборотов начинает расти. В этот момент требуется измерять зазор между спицей ротора и ободом, так как при этих условиях он будет максимальным. При этом необходимо знать максимальную скорость вращения ротора агрегата. Эта скорость определяется по штатным приборам агрегата.

Для того, чтобы выполнить правильный анализ и оценку технического состояния ротора гидрогенератора, необходимо также измерять зазор при номинальном числе оборотов – в режиме холостого хода.

Для решения задачи отслеживания, контроля и диагностирования появления зазоров в роторе необходима установка адаптивных средств контроля измерения зазора между спицей и ободом ротора гидрогенератора, а также передача данных с вращающейся части гидроагрегата на невращающуюся.

Для определения зазоров между спицей и ободом ротора, необходима следующая аппаратура:

1. Датчик, для измерения зазора (устанавливается на вращающуюся часть агрегата – спицу);
2. Схема передачи данных с вращающейся части на невращающуюся;
3. Приемник информации (устанавливается на доступные не вращающиеся конструкции агрегата).

## 6 Датчики, применяемые для определения величины зазора

В данной работе применяется вихретоковый датчик.

### 6.1 Вихретоковые датчиковые системы

Вихретоковая датчиковая система (eddy probe system / proximity sensor system) состоит из бесконтактного вихревого пробника, удлинительного кабеля и драйвера (рисунок 3).

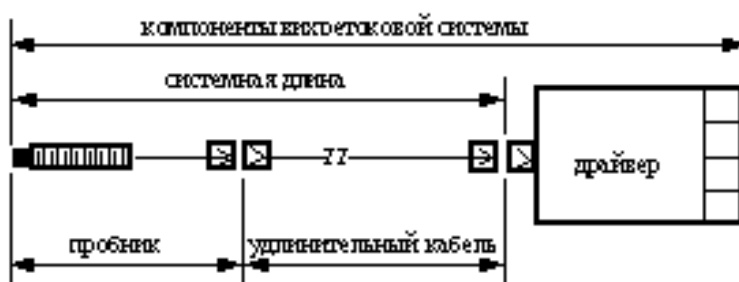


Рисунок 3 - Вихретоковая датчиковая система

Вихревой пробник представляет собой металлический зонд с диэлектрическим наконечником на одном конце и небольшим отрезком коаксиального кабеля на другом. С помощью коаксиального удлинительного кабеля пробник подключается к драйверу. Драйвер представляет собой электронный блок, который вырабатывает сигнал возбуждения пробника и осуществляет выделение информативного параметра.

Выходным сигналом драйвера является, электрический сигнал пропорциональный расстоянию от торца вихревого пробника до контролируемого объекта.

### 6.2 Принцип работы вихретоковых датчиковых систем

В торце диэлектрического наконечника вихревого пробника находится катушка индуктивности. Драйвер обеспечивает возбуждение высокочастотных колебаний в катушке, в результате чего возникает электромагнитное поле,



которое взаимодействует с материалом контролируемого объекта. Если материал обладает электропроводностью, на его поверхности наводятся вихревые токи, которые, в свою очередь, изменяют параметры катушки - ее активное и индуктивное сопротивление. Параметры, меняются при изменении зазора между контролируемым объектом и торцом датчика. Драйвер преобразует эти изменения в электрический сигнал, осуществляет его линеаризацию и масштабирование.

### **6.3 Конструкция вихретоковых датчиковых систем**

Наибольшее количество вариантов исполнения имеет пробник (зонд), поскольку его конструкция существенно зависит от места монтажа.

Использование соединительного кабеля, состоящего из двух частей - кабеля пробника и удлинительного кабеля выгодно с технологической точки зрения. С помощью типового набора удлинительных кабелей разной длины, удобно задавать общую длину системы. Для защиты от механического повреждения весь кабель или его отдельные части армируются.

Драйвер представляет собой герметичную металлическую коробку, на которой имеется коаксиальный соединитель для подключения кабеля, а также клеммы питания, земли, общего провода и выходного сигнала.

### **6.4 Частотные характеристики вихретоковых датчиков**

Вихретоковые датчики обладают хорошим частотным откликом (реакция на изменение расстояния между торцом пробника и объектом контроля). Обычно частотный диапазон составляет 0 - 10000 Гц. При этом неравномерность амплитудно-частотной характеристики не превышает 0,5 дБ.

## **6.5 Входные и выходные параметры вихретоковых датчиков**

Входным параметром вихретокового датчика является величина зазора между торцом пробника и электропроводящим объектом. Величина измеряемого зазора составляет несколько миллиметров и зависит от диаметра катушки, заключенной в торце диэлектрического наконечника. Выходной сигнал, пропорциональный измеряемому зазору, может быть представлен в виде напряжения, тока или в цифровом формате (определяется типом системы наблюдения).

Для драйверов с выходным сигналом в виде напряжения указывают чувствительность (коэффициент преобразования зазора в электрический сигнал), которая в большинстве случаев составляет 8 мВ/мкм. Часто для сопряжения вихретокового датчика с типовыми системами мониторинга необходимо дополнительное преобразование выходного напряжения в формат 4-20 мА токовой петли или в цифровой вид.

Устройства, сочетающие функции драйвера и дополнительного формирователя называют транзиттерами.

## **6.6 Области применения вихретоковых датчиков**

Приоритетной областью использования вихретоковых измерителей является контроль осевого смещения и поперечного биения валов больших турбин, компрессоров, электромоторов, в которых используются подшипники скольжения. Применение для этих целей датчиков скорости и ускорения, хотя и допустимо, но неоправданно, поскольку из-за слабого отклика на низких частотах ( $<10\text{Hz}$ ) и значительного поглощения вибрации массивным корпусом установки, результат будет иметь большую погрешность. Вихретоковый метод напротив обладает исключительной точностью, поскольку не только не имеет нижнего предела по частоте, но и не требует математической обработки результатов измерения ввиду прямого соответствия выходного сигнала текущему смещению вала или измерительного буртика относительно корпуса.

В малых турбинах, генераторах и компрессорах, где используются подшипники качения и масса корпуса относительно невелика, спектр колебаний смещен в высокочастотную область. В этом случае для измерения вибрации вала целесообразно использовать датчики скорости и ускорения, размещаемые на корпусе механизма.

### **6.7 Системная конфигурация вихретоковых датчиков**

Предлагается несколько основных конфигураций вихретоковых систем, отличающихся диаметром катушки пробника, длиной кабеля, параметрами выходного сигнала и характером измеряемой величины. Диаметр катушки пробника определяет диапазон измерения и площадь взаимодействия электромагнитного поля с контролируемым объектом. Считается, что площадь взаимодействия не выходит за пределы воображаемой окружности на поверхности объекта, диаметр которой равен двойному диаметру катушки пробника. Последнее обстоятельство необходимо учитывать при выборе места монтажа пробника, а также при контроле поперечной вибрации вала, поскольку в этом случае облучаемая поверхность цилиндрическая, что является причиной возникновения систематической погрешности, которая растет с увеличением диаметра катушки и уменьшением диаметра вала. Для каждой комбинации — «диаметр катушки + длина системного кабеля» калибруется собственный драйвер или трансмиттер, на который наносится соответствующая маркировка. Несоответствие длины системного кабеля или диаметра катушки пробника маркировке драйвера или трансмиттера приводит к увеличению погрешности.

### **6.8 Установка датчиков**

На рисунке 4 показан ротор зонтичного гидрогенератора средней частоты вращения. Обод ротора гидрогенератора - 3 представляет собой шихтованное и собранное на шпильках кольцо, состоящее из сегментов, а остов - 1 сварную или сварно-литую конструкцию. Датчик контроля натяга обода ротора - 5 устанавливается в верхней части спицы - 2. Соединительные провода - 6

передают информацию на запоминающее устройство - 7, а после данные поступают на приемник - 8.

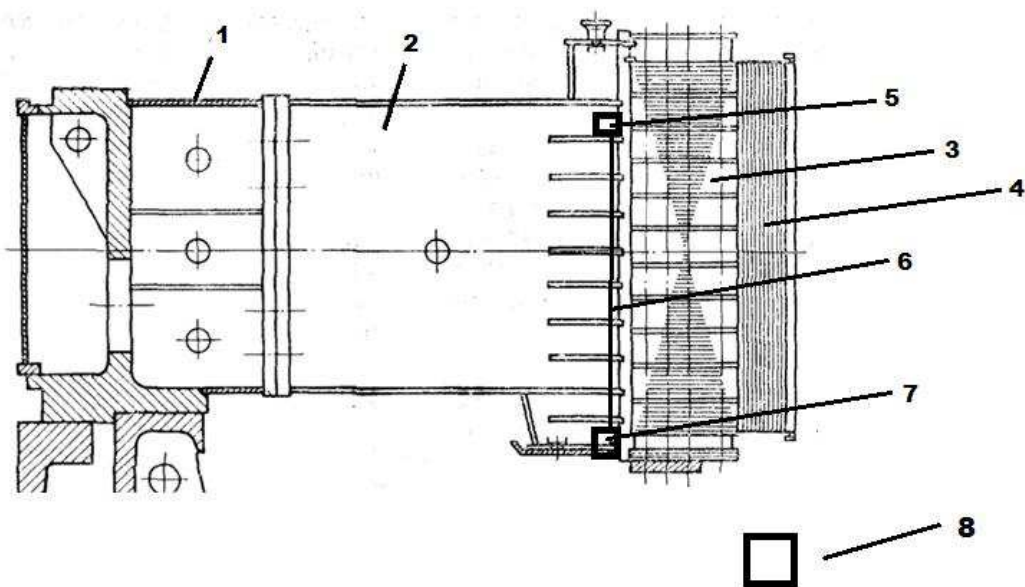


Рисунок 4 — Установка датчика контроля натяга обода ротора

1 - остов ротора; 2 - спица; 3 - обод ротора; 4 - полюс; 5 - вихретоковый датчик;  
6 - соединительный провод; 7 - передающее (или запоминающее устройство);

8 – приемник

## **7 Датчики, элементы измерения и контроля. Схема передачи данных**

Поскольку контроль состояния включает в себя наблюдение за трендом изменения параметров с определением скорости изменения этих параметров во времени, что особенно важно, чтобы рабочие условия, при которых получены данные последовательных измерений, оставались неизменными, так как только в этом случае вывод об изменении параметров измеряемых показателей, в данном случае – зазора, будет достоверным.

Чтобы правильно интерпретировать результаты полученных измерений, необходимо точно знать, какой именно параметр был измерен и какие условия измерения были в данный момент времени.

Основные требования, которые применяются к датчикам: высокая точность измерения и контроля перемещений, быстродействие, помехоустойчивость, малые нелинейные искажения.

### **7.1 Контроль технического состояния радиального натяга между спицей и ободом ротора гидроагрегата**

Дальнейшее улучшение эксплуатационных качеств устройств контроля, а также внедрение новой измерительной системы на гидроэлектростанцию, будет являться повышением качества измерений и диагностики гидроагрегата.

Предлагаемая система, на начальной стадии, будет являться переносной. Производство замеров зазоров в роторе будет осуществляться в период капитальных ремонтов гидроагрегатов, испытаниях, после ремонтов. Измерения будут проходить при отключении гидроагрегата от сети, и в режиме холостого хода.

Допустимые значения и нормы по величине зазоров в каждом конкретном случае, для каждого гидроагрегата и для каждой гидроэлектростанции сугубо индивидуальны, назначаются заводом-изготовителем.

В таблице 2 приведены основные данные по контролю за техническим состоянием гидроагрегата.

Таблица 2 - Контроль технического состояния радиального натяга между спицей и ободом ротора гидроагрегата

Уровень контроля	Наблюдаемые и контролируемые параметры	Способы и средства контроля	Режим контроля	Допустимые значения параметров	Способ регистрации результатов контроля
Периодический	Зазор спица-обод	Автоматизированный контроль	При отключении гидроагрегата от сети $n_1 = 1,15 \cdot n_{ном}$ При включении в сеть $n_2 = n_{xx}$	Требования завода изготовителя	Формуляры регистрации дефектов и повреждений

## 7.2 Схема передачи данных через воздушный зазор

Передать информацию с вращающегося ротора возможно используя схему предложенную [7]. Измерительная аппаратура при этом состоит из двух частей: блока вращающейся аппаратуры (БВА) и блока стационарной аппаратуры (БСА). Из БВА в БСА передается измерительная информация в обратном направлении передаются сигналы управления и сигналы электропитания БВА. Устройства связи между блоками определяют не только структуру измерительной системы, но и ее эксплуатационные характеристики.

Средства связи измерительных систем для вращающихся объектов подразделяются на две группы: контактные и бесконтактные.

Контактные токосъемные устройства имеют ряд недостатков: они сохраняют достоверность измеряемой информации ограниченный промежуток времени, не могут использоваться при длительных испытаниях. Также возникают трудности при установке контактных токосъемников.

Для длительных испытаний в сложных условиях окружающей среды более перспективными являются бесконтактные средства съема информации.

В качестве простого и надежного устройства бесконтактной передачи сигналов с вращающейся аппаратуры может быть применен воздушный трансформатор. Именно через него передаются кодовые посылки сигналов от датчиков, расположенных на рабочих органах вращающегося объекта, в стационарную аппаратуру, а с нее во встречном направлении поступают сигналы электропитания вращающейся с объектом аппаратуры.

К достоинствам такого устройства необходимо отнести слабую зависимость качества передачи измерительных сигналов от состояния окружающей среды и от механических нагрузок. Обмотки воздушного трансформатора вместе с RC-элементами образуют индуктивно связанные контуры (ИСК). Для названной цели используются ИСК с низкой добротностью (порядка единицы). Это позволяет передавать сигналы в импульсной форме.

Передача данных через воздушный зазор осуществляется в виде импульсных сигналов. Вид данного импульсного сигнала будет иметь прямоугольную форму.

В качестве входного сигнала выступает формируемый вращающейся частью аппаратуры скачок тока  $I$  амплитудой  $I_0$ , за которым следует резкий спад. Под его воздействием на первичном контуре возникает напряжения  $U_1(t)$ , а на вторичном контуре –  $U_2(t)$ .

Исследуем первую полуволну реакции, вторая полуволна будет рассматриваться в качестве помехи.

Пример импульсного сигнала приведен на рисунке 5.

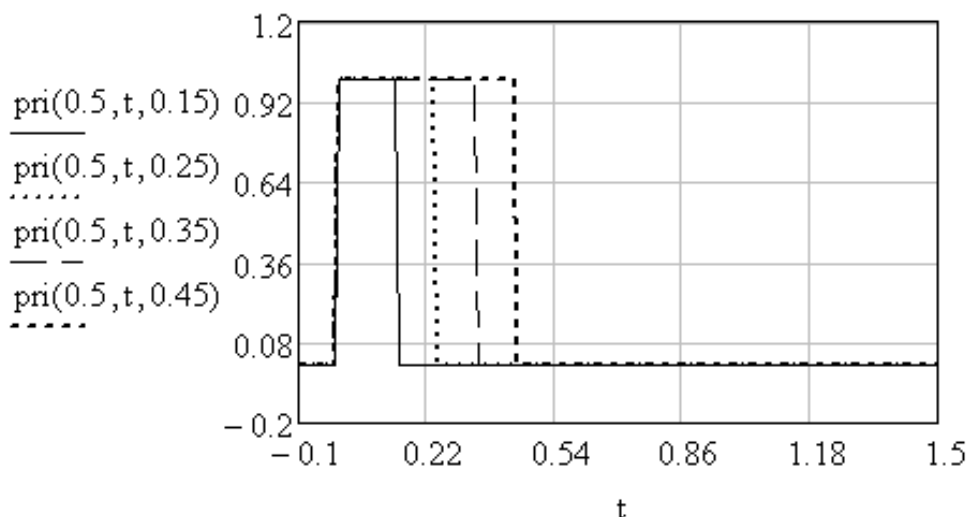


Рисунок 5 - Импульсный сигнал

Скачкообразное изменение тока  $I$  происходит не мгновенно, а за некоторый конечный интервал времени. Назовем такой интервал длительностью  $\tau$  фронта входного сигнала. Способ передачи, реализованный в устройстве, предполагает формирование на вращающейся части импульсов тока, возбуждающих первичный контур индуктивно связанных контуров, образованных вращающейся и неподвижной обмотками воздушного трансформатора, параллельно которым включены RC-элементы. Для получения сигналов с датчиков задается номинальная частота. Если длительность импульсов выше нормированного значения, то амплитудное значение реакции не меняется. Если же длительность импульсов короче нормированного значения, то пропорционально с уменьшением длительности возбуждающего импульса уменьшается амплитуда передаваемого сигнала, сокращается его длительность.

Принципиальная схема передачи данных с датчика через воздушный зазор изображена на рисунке 6.



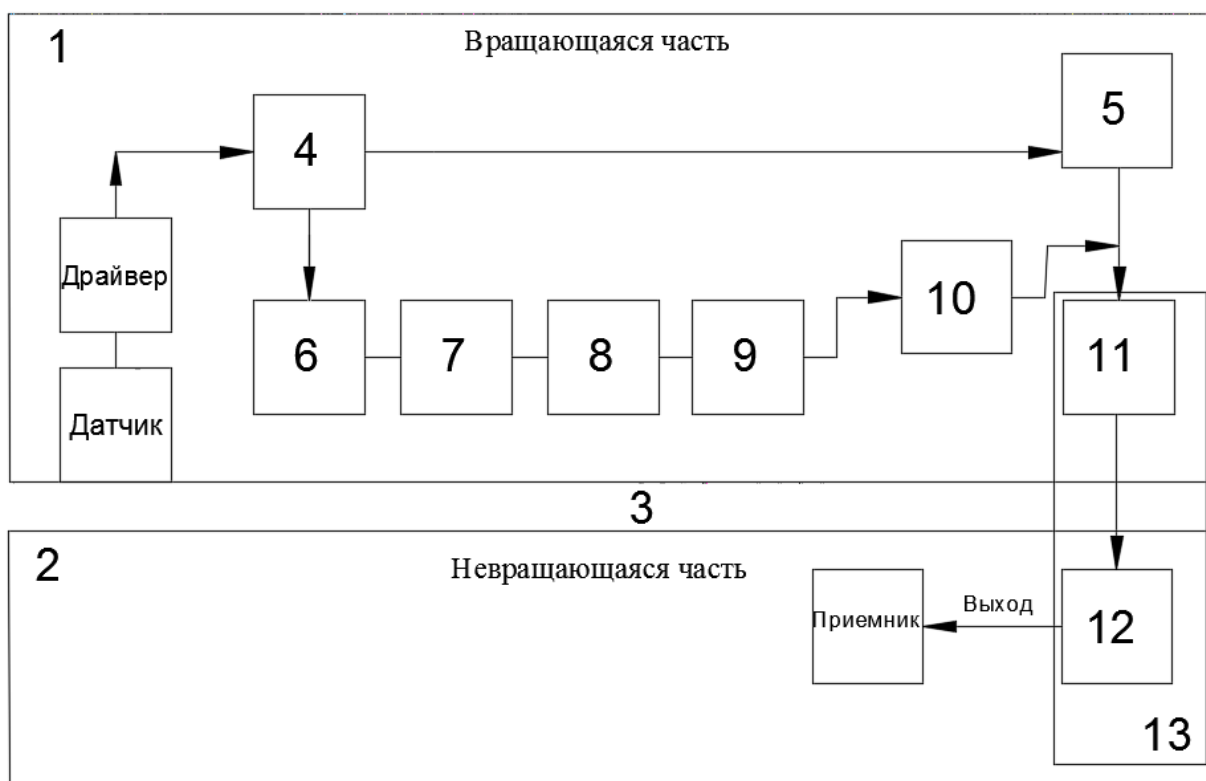


Рисунок 6 - Принципиальная схема передачи данных через воздушный зазор:

- 1 - вращающаяся часть; 2 - неподвижная часть; 3 - воздушный зазор;  
 4 - формирователь укороченных импульсов; 5 - первый формирователь;  
 6 - расширитель длительности импульса; 7 - дифференцирующая цепь;  
 8 - ограничитель; 9 - масштабирующий усилитель; 10 - второй формирователь;  
 11 - первичный контур; 12 - первичный контур; 13 - индуктивно связанные контуры

Согласно [7], устройство для реализации предложенного способа передачи данных через воздушный зазор содержит вращающуюся часть - 1, неподвижную часть - 2 и воздушный зазор - 3. Вращающаяся часть 1 содержит формирователь укороченных импульсов - 4, первый формирователь - 5 возбуждающего сигнала, расширитель длительности импульса - 6, дифференцирующую цепь 7, ограничитель 8, масштабирующий усилитель - 9, второй формирователь - 10 возбуждающего сигнала, первичный контур - 11 индуктивно связанных контуров - 13.

Неподвижная часть 2 устройства, отделенная от вращающейся части - 1 воздушным зазором - 3, содержит вторичный контур - 12 индуктивно связанных контуров - 13. На вращающейся части - 1 на вход устройства поступают кодовые посылки данных. Формирователь - 4 укороченных импульсов преобразует сигналы единичных разрядов кода в прямоугольные импульсы. Импульс поступает на расширитель - 6 и на вход первого формирователя - 5 возбуждающего сигнала, выходной, сигнал которого подается на первичный контур - 11 индуктивно связанных контуров - 13. Этот возбуждающий импульс вызовет на выходе вторичного контура - 12, расположенного на неподвижной части - 2 устройства и отделенного от первичного контура 11 индуктивно связанных контуров - 13 воздушным зазором - 3, импульсный сигнал. Этот сигнал создан двумя полуволнами: положительной и отрицательной. Расширенный импульс, имеющий длительность, равную длительности первой полуволны сигнала, поступает на вход дифференцирующей цепи - 7. Импульсы с ее выхода поступают на ограничитель 8, который отсекает импульс, соответствующий переднему фронту расширенного импульса. Сигнал, соответствующий заднему фронту расширенного импульса, с выхода ограничителя поступает на масштабирующий усилитель - 9. Его коэффициент масштабирования выбирается для конкретных значений длительности укороченного импульса и коэффициента связи между контурами так, чтобы амплитуда второй полуволны в сигнале на выходе устройства при возбуждении комбинированным сигналом совпадала по абсолютной величине с амплитудой его первой полуволны. С выхода усилителя 9 сигнал поступает на вход второго формирователя - 10 возбуждающего сигнала. Выходной сигнал формирователя - 10 масштабированного возбуждающего сигнала воздействует на первичный контур - 11 индуктивно связанных контуров - 13. В результате работы двух формирователей 5 и 10 возбуждения на первичный контур - 11 будет воздействовать комбинированный возбуждающий сигнал. Реакцией на него станет формируемый на выходе вторичного контура - 12 биполярный

импульсный сигнал. Наличие биполярного сигнала на выходе вторичного контура - 12 будет свидетельствовать о передаче данных на стационарное устройство.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, предложен метод диагностики состояния натяга обода ротора гидроагрегата, найдено решение по передаче информации (канал) с вращающейся части гидроагрегата на невращающуюся часть.

Была разработана схема, дополненная информационно-измерительной системой, и описано как она будет работать в целом. Такая схема позволит определять состояние оборудования, а именно данные измерений зазоров между спицей ротора и ободом ротора при помощи датчиков перемещения объекта относительно стационарных частей.

Внедрение датчиков измерения зазоров между спицей ротора и ободом, позволит вести непрерывный контроль технического состояния гидроагрегата и выявлять дефекты на ранней стадии развития.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, о необходимости контроля натяга между ободом и спицами, что является важнейшим параметром, для решения задач своевременного выявления дефектов во время работы гидроагрегата и обеспечения безопасного режима работы всей гидроэлектростанции.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. СТО РусГидро 02.03.69-2011 Гидрогенераторы. Общие технические условия на капитальный ремонт. Нормы и требования [Электронный ресурс]. – Режим доступа:  
[http://www.rushydro.ru/upload/iblock/314/064\\_STO-RusGidro-02.03.69-2011\\_Gidrogeneratori-TU-na-kapremont.pdf](http://www.rushydro.ru/upload/iblock/314/064_STO-RusGidro-02.03.69-2011_Gidrogeneratori-TU-na-kapremont.pdf).
2. ГОСТ Р ИСО 13373-1-2009 Контроль состояния и диагностика машин. Вибрационный контроль состояния машин. Часть 1. Общие методы. – Введ. 01.01.2011. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 12 с.
3. Гидрогенераторы/ И. А. Глебов, В. В. Домбровский, А. А. Дукштау и др.- Л.; Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982. – 368 с., ил.
4. Проектирование гидрогенераторов. В 2-х частях. В. В. Домбровский и др. Л.: Энергия, 1965 (ч.1), 1968 (ч.2).
5. Брызгалов В. И. Контроль за оборотной вибрацией как метод распознавания технического состояния ротора гидрогенератора / Брызгалов В. И., Ключах А. А. // Электрические станции. – 1997. - № 3.
6. Пат. 116695 Российская Федерация, МПК H02K 1/30. Спица ротора гидрогенератора/ М Я. Каплан, Н. П. Иванов, А. С. Орлов и Е Н. Виноградов; заявитель и патенто-обладатель Типография Комитета по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР. – № 594055; заявл. 07.03.58 ; опубл. 01.01.58, Бюл. № 30. – 2 с.
7. Пат. 2565527 Российская Федерация, МПК G 08 C 19/16 (2006.01). Способ формирования биполярных сигналов для передачи данных через воздушный зазор и устройство для его осуществления/ М. А. Зилотова, В. В. Карасев, А. В. Николаева ; заявитель и патенто-обладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Рязанский государственный радиотехнический университет". – № 2014147961/08; заявл. 27.11.14 ; опубл. 27.10.15, Бюл. № 30. – 2 с.

8. К. С. Кравченко, И. О. Волкова, А. А. Клюкач Разработка метода контроля радиального натяга между спицей и ободом ротора гидрогенератора // Гидроэлектростанции в XXI веке : сборник материалов V Всероссийской научно-практической конференции / V Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов "Гидроэлектростанции в XXI веке" (2018 ; 26.04 - 27.04 ; Саяногорск-Черемушки) : Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, 2018. - С. 217-220 . - ISBN 978-5-7638-3905-0
9. К. С. Кравченко, Т. Е. Минжуренко Контроль радиального натяга между спицей и ободом ротора гидрогенератора через воздушный зазор // Гидроэлектростанции в XXI веке : сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции / VI Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов "Гидроэлектростанции в XXI веке" (2019 ; 25.04 - 26.04 ; Саяногорск-Черемушки) : Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, 2019. - С. 217-220 . - ISBN 978-5-7638-3905-0
10. А. Г. Алиомаров Повышение эффективности эксплуатации оборудования ГЭС за счет введения автоматизированной системы контроля и оперативной диагностики состояния агрегатов: Автореф. дисс. канд. тех. Наук.-Москва: МЭИ, 2005.
11. Б. А. Алексеев Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2002.– 144 с.
12. Lewis P., Grant J. and Evens J. Experience with Hydro Generator Expert. Systems // Iris Rotating Machine Conference, June 2008, Long Beach, Ca, 6 P.
13. Potter C., Negnevitsky M. An Expert System for Hydro Electric Generator Scheduling In Tasmania // Journal of Electric & Electronic Engineers, Australia. 2003. Vol. 22. №3.– P. 167 – 171.

14. Современная система контроля и диагностики турбо- и гидрогенераторов СТК– ЭР // Энергетика и промышленность России. № 12 (152) июнь 2010 года. – С. 17.
15. Владиславцев Л.А. Вибрации гидроагрегатов гидроэлектрических станций / Л.А. Владиславцев 2-е изд. перераб. и доп. – М. : Энергия, 1972. -176 с.
16. Жданович А.А. Контроль и мониторинг эксплуатационного состояния гидроагрегатов на основе теории нечетких множеств // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – Новосибирск, 2010. – 23 с.
17. Ниязов Н.Т. Разработка экспертной системы контроля состояния вертикальных гидрогенераторов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – Бишкек , 2006. – 19 с.
18. В.В. Карасев, А.А. Михеев, Г.И. Нечаев Измерительные системы для вращающихся узлов и механизмов // Под ред. Г.И. Нечаева. – М.: Энергоатомиздат, 1996. 176 с.
19. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных гидрогенераторов / Б.А. Алексеев. – М. : Науч.-техн. центр ЭНАС, 1998. – 144с.
20. Глазырин Г.В. Вибрационная диагностика вертикальных гидроагрегатов на базе АСУ ТП / Г.В. Глазырин, Т.А. Филиппова // Докл. АН ВШ РФ. – 2006. - № 1 (6).- 122-131.
21. Белоглазов А.В. Разработка адаптивных средств выявления неисправностей и стратегии обслуживания гидроагрегатов // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. – Новосибирск, 2011.– 22 с.

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

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических  
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 М. В. Кочетков

подпись      инициалы, фамилия


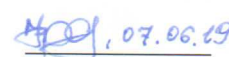


« 13 »      06      2019 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**Разработка метода контроля радиального натяга между спицей и  
ободом ротора гидроагрегата**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.03.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	 подпись, дата	ст. преподаватель Саяно- Шушенского филиала СФУ должность	<u>А.А. Ключач</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>К.С. Кравченко</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 подпись, дата	нач.отдела ОЭСиА, ОП АО «СибВАМИ» должность	<u>А.В. Заздравных</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 подпись, дата		<u>А.А. Чабанова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2019