

СОЗДАНИЕ ЭЛАСТИЧНЫХ МЕТАЛЛОПЛАСТМАССОВЫХ ПОДПЯТНИКОВ ДЛЯ ОБРАТИМЫХ ГИДРОГЕНЕРАТОРОВ ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© 2009 Ю. И. Байбородов

Самарский государственный аэрокосмический университет

Приведено исследование работоспособности тяжело нагруженных эластичных металлопластмассовых (ЭМП) сегментов с нулевым окружным эксцентриситетом на гидроагрегате № 5 Усть-Илимской ГЭС. Предложенная и испытанная нами конструкция ЭМП сегментов была заложена НПО «Уралэлектротяжмаш» в конструкцию подпятников гидрогенераторов-двигателей Загорской гидроаккумулирующей электростанции, где они надежно работают по настоящее время.

Генератор-двигатель, подпятник, сегмент, гидродинамическое давление.

Создание мощных генераторов-двигателей несет за собой весьма большие технико-экономические выгоды, связанные с наибольшей эффективностью самих агрегатов, увеличением эффективности их воздействия на регулирование работы объединенных энергосистем, снижением затрат на изготовление единицы мощности и т. д. Однако, как известно, увеличение единичной мощности гидроагрегатов сопровождается увеличением нагрузки на подпятники и удельной нагрузки на сегменты подпятника. Если учесть, что в настоящее время подпятники обычных гидрогенераторов не всегда обладают требуемой надежностью, то в реверсивных машинах при одинаковых удельных нагрузках сегменты будут находиться в еще более тяжелых условиях и, естественно, их надежность значительно снизится.

Учитывая преимущества эластичных опор скольжения по сравнению с традиционно применяющимися баббитовыми опорами скольжения, их более высокую надежность и работоспособность, подтвержденную всесторонними исследованиями и широкой опытно-промышленной проверкой в эксплуатационных условиях на мощных гидроагрегатах крупнейших ГЭС страны, Госкомитетом СССР по науке и технике было принято постановление о проведении комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на

создание надежных и работоспособных реверсивных подпятников для гидроаккумулирующих электростанций на базе новых конструкций сегментов [1-4].

Было также принято решение о проведении натурных испытаний новых конструкций на гидроагрегатах Усть-Илимской ГЭС.

В результате выполнения данной работы поставленная проблема успешно решена, а полученные результаты дали основание заложить новые ЭМП опоры скольжения в конструкцию головного генератора-двигателя строящейся Загорской ГАЭС.

Как уже было сказано выше, в качестве аналога для натурных испытаний были взяты подпятники гидроагрегатов Усть-Илимской ГЭС, в соответствии с параметрами которых были взяты приведенные в таблице 1 исходные данные для расчета.

Отличие состояло лишь в том, что расчетная удельная нагрузка была увеличена до 6,0 МПа, а тангенциальный эксцентриситет был равен нулю. При такой постановке задачи вполне естественно была принята расчетная схема с симметричными наклонными участками в зоне входной и сбегавшей кромок.

С учетом опыта положительных результатов, полученных при испытании эластичных сегментов при удельной нагрузке 6,0 МПа на Волжской ГЭС имени В. И. Ленина (агрегат № 8), жесткость эластичного

Таблица 1. Исходные данные для гидродинамического расчета ЭМП сегментов А-5 УИГЭС

№ п/п	Наименование рабочих параметров	Величина	Размерность
1.	Осевое усилие	1,028	МН
2.	Ширина сегмента в радиальном направлении	0,475	м
3.	Длина сегмента в окружном направлении	0,45	м
4.	Отношение ширины к длине	1,03	-
5.	Окружная скорость на среднем радиусе	20,3	м/с
6.	Температура масла в ванне подпятника	35	°С
7.	Сорт масла УТ-30	-	-
8.	Тангенциальный эксцентриситет	0	%
9.	Удельная нагрузка	6,0	МПа

покрытия была принята такой же, как и в испытанных ранее эластичных сегментах.

Характерная и необходимая особенность в предложенной нами конструкции эластичного металлопластмассового подпятника заключается в специально выполняемой начальной макрогеометрии сегмента в его окружном сечении, которая позволяет компенсировать отрицательное влияние эластоэффекта на гидродинамику эластичных сегментов.

В данном случае при симметричном выполнении наклонных участков в зоне входной и сбегавшей кромок сегмента, даже при установке сегмента с нулевым тангенциальным эксцентриситетом, действительный эксцентриситет будет отличен от нуля.

Однако в отличие от жестких сегментов, которые также можно выполнить с симметричными наклонными участками, обеспечив этим появление действительного эксцентриситета, эластичные сегменты будут иметь большую грузоподъемность за счет деформаций, которые будут автоматически расширять зону гидродинамических давлений.

Начальная геометрия опытных сегментов приведена на рисунке 1, она была получена по уже проверенной и оправдавшей себя методике расчета.

В соответствии с полученными данными были изготовлены опытные сегменты, общий вид одного из них показан на рисунке 2.

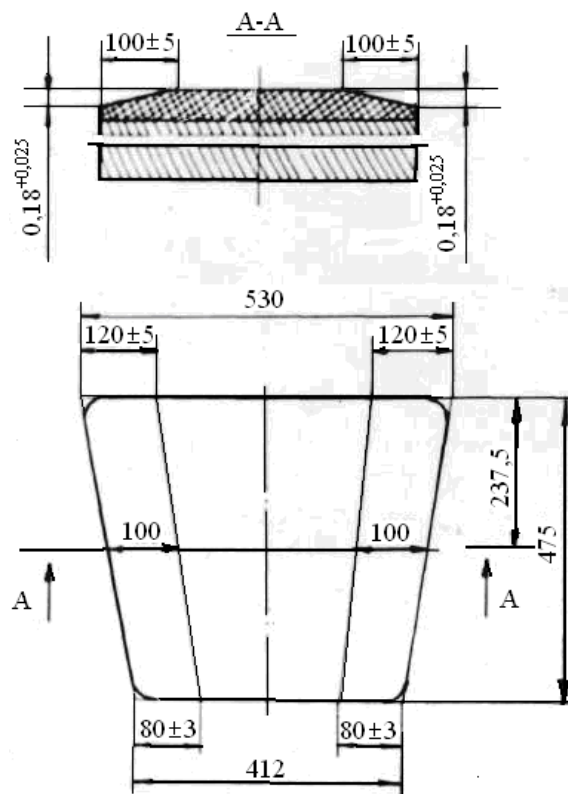


Рис. 1. Начальная макрогеометрия сегмента с нулевым тангенциальным эксцентриситетом

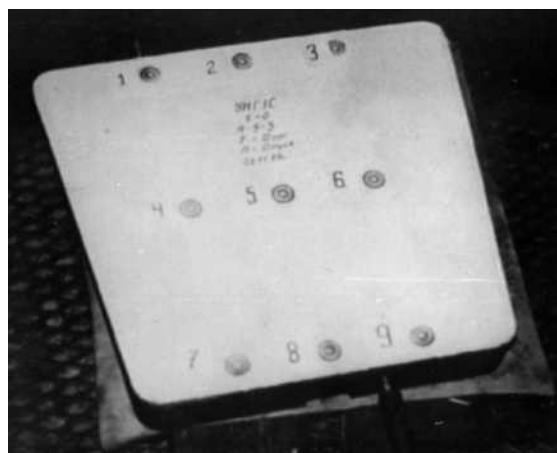


Рис. 2. Поверхность трения сегмента с нулевым тангенциальным эксцентриситетом до начала испытаний

На поверхности трения этого же сегмента отчетливо видны мерные базы для определения износа.

В процессе испытаний определялись следующие параметры:

- 1) температура на поверхности трения сегментов;
- 2) гидродинамические давления;
- 3) режим трения (граничное или жидкостное), с помощью контактных датчиков;
- 4) износ поверхностей трения с помощью мерных баз;
- 5) температура масла в ванне.

Схема расположения сегментов и датчиков в подпятнике гидроагрегата № 5 показана на рисунке 3. С целью получения более обширной информации о температурном режиме в сегменте № 4 было установлено 18 хромель-копелевых термопар, как показано на рисунке 4.

На рисунке 5 показано распределение температуры в среднем окружном сечении в зависимости от нагрузки агрегата.

Анализ показывает, что характер распределения температуры при нулевом эксцентриситете, как показано на рисунке 5, аналогичен характеру распределения температуры в сегментах, установленных с поло-

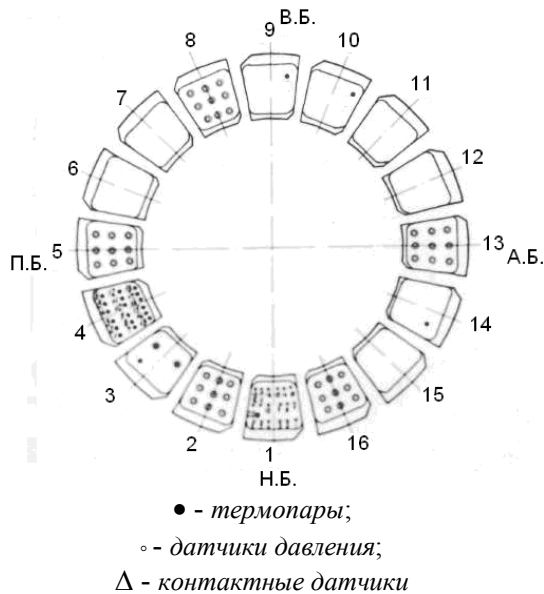
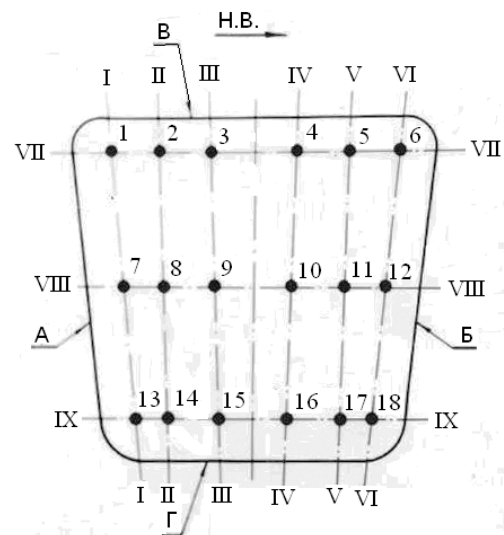
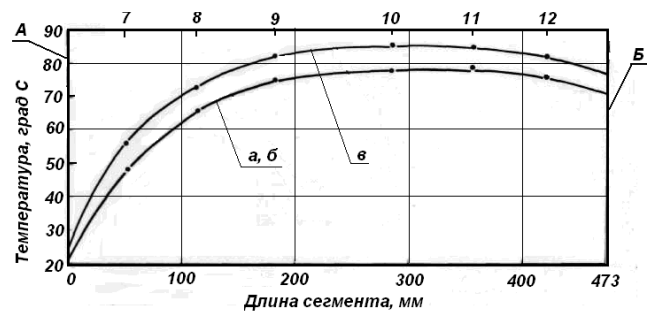


Рис. 3. Схема расположения ЭМП сегментов с нулевым тангенциальным эксцентриситетом и датчиков в подпятнике гидроагрегата А-5 Усть-Илимской ГЭС



Н.В. – направление вращения диска пяты;
 А – входная кромка сегмента; Б – выходная кромка сегмента; В – наружная кромка сегмента; Г – внутренняя кромка сегмента; • - термопара; 1,2,3 ... 18 – номера термопар; I, II ... VI – радиальные сечения; VII, VIII, I – окружные сечения

Рис. 4. Схема расположения термопар в ЭМП сегменте № 4 подпятника гидроагрегата А-5 Усть-Илимской ГЭС



А – входная кромка сегмента; Б – выходная кромка сегмента; а – холостой ход; б – мощность 120 МВт; в – мощность 245 МВт; 7,8,9,10,11,12 – номера термопар

Рис. 5. Распределение температуры в окружном сечении ЭМП сегмента № 4 гидроагрегата №5 Усть-Илимской ГЭС

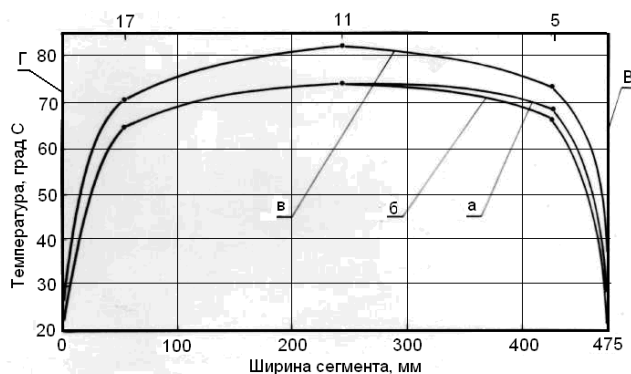
жительным эксцентриситетом. Однако в зоне сбегавшей кромки примерно в 40–50 мм от края сегмента наблюдается незначительное снижение температуры на 3–4°С, свидетельствующее об изменении давлений и зазора в этом сечении.

Установлено, что увеличение нагрузки агрегата от 120 МВт до 245 МВт приводит к

относительно небольшому увеличению температуры на 7–8°C, т.е. на 10%.

Характер распределения температуры в окружном сечении косвенным образом указывает на работу сегментов в режиме жидкостного трения. Это соображение подтверждено также показаниями контактных датчиков.

Распределение температуры в радиальном направлении, как показано на рисунке 6, также характерно для ЭМП сегментов и подтверждает, что радиальный эксцентриситет выбран правильно. Об этом же наглядно свидетельствует распределение температуры по поверхности трения сегмента А-4, показанное на рисунке 7.



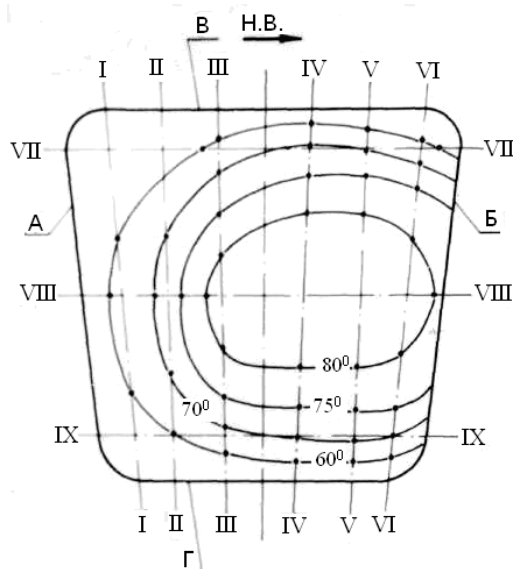
В – наружная кромка сегмента;
Г – внутренняя кромка сегмента;
а – холостой ход; б – мощность 120 МВт;
в – мощность 245 МВт; 5,11,17 – номера термомпар

Рис. 6. Распределение температуры в радиальном сечении ЭМП сегмента № 4 гидроагрегата № 5 Усть-Илимской ГЭС

Весьма интересным является результат измерения гидродинамических давлений, показанный на рисунке 8, и формы зазора, приведенной на рисунке 9.

Эпюра давлений в окружном среднем сечении, показанная на рисунке 8, имеет протяженность большую, чем это имеет место в жестком, недеформированном сегменте. Последнее обстоятельство убедительно свидетельствует о преимуществе эластичных сегментов с предложенной начальной геометрией по сравнению с жесткими сегментами, имеющими такую же начальную геометрию.

Кроме того, характер эпюры давлений также свидетельствует о работе эластичных



Н.В. – направление вращения диска пяты;
А – входная кромка сегмента;
Б – выходная кромка сегмента;
В – наружная кромка сегмента;
Г – внутренняя кромка сегмента;
60, 70, 75, 80° – изотермы;
I, II, III, IV, V, VI – радиальные сечения;
VII, VIII, IX – окружные сечения

Рис. 7. Распределение температуры по поверхности трения ЭМП сегмента № 4 гидроагрегата № 5 Усть-Илимской ГЭС

сегментов в режиме жидкостного трения. Картина распределения гидродинамических давлений по поверхности трения сегмента № 4, приведенная на рисунке 10, показывает, что в работе находится большая ее часть и подтверждает справедливость теоретических предположений о преимуществах эластичных сегментов по сравнению с жесткими в случае их применения в реверсивных подпятниках и установки с нулевым тангенциальным (окружным) эксцентриситетом.

В процессе проведения данных испытаний, так же как и во всех предыдущих, выполнялись горячие и холодные пуски, а так же выбег без торможения.

Измерения режима трения с помощью контактных датчиков показали, что эластичные сегменты даже при установке их с нулевым эксцентриситетом обеспечивают при пусках агрегата выход на режим жидкостного трения на первом обороте вала.

Более высокий уровень температуры поверхности трения по сравнению со всеми предыдущими испытаниями вполне закономерен, т.к. скорость скольжения в данном

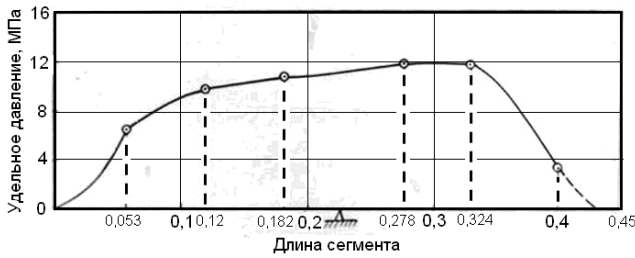


Рис. 8. Эюры гидродинамических давлений в среднем окружном сечении ЭМП сегмента гидроагрегата № 5 Усть-Илимской ГЭС

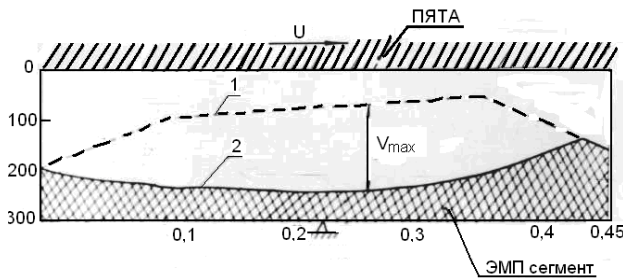
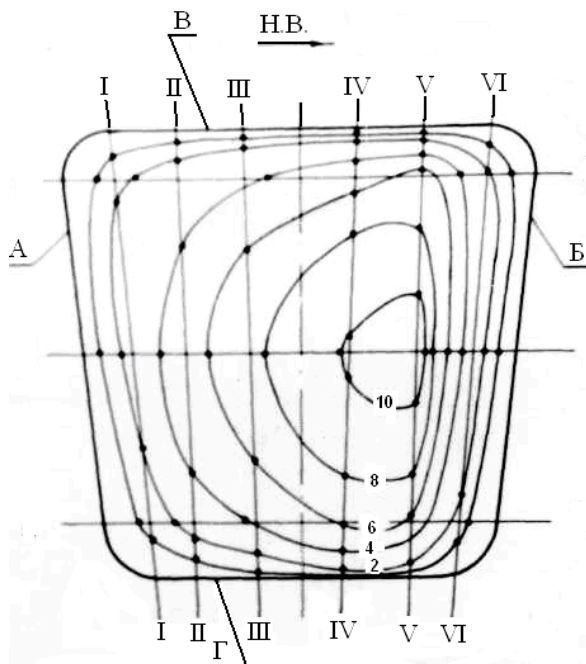


Рис. 9. Рабочий профиль зазора в ЭМП сегменте № 4, установленном с нулевым тангенциальным эксцентриситетом в подпятнике гидроагрегата № 5 Усть-Илимской ГЭС



Н.В. – направление вращения диска пяты;
 А – входная кромка сегмента;
 Б – выходная кромка сегмента;
 В – наружная кромка сегмента;
 Г – внутренняя кромка сегмента;
 2,4,6,8,10 – изобары, МПа;
 I, II, III, IV, V, VI – радиальные сечения;
 VII, VIII, IX – окружные сечения.

Рис. 10. Картина распределения гидродинамических давлений по поверхности трения ЭМП сегмента № 4 установленного с нулевым тангенциальным эксцентриситетом в подпятнике гидроагрегата № 5 Усть-Илимской ГЭС

случае в 1,5 раза больше, чем в подпятниках гидроагрегатов Волжской ГЭС имени В. И. Ленина. Однако абсолютные значения температуры не превышают уровень температуры баббитовых сегментов, работавших до установки эластичных сегментов на этом же агрегате.

Осмотр сегментов после испытаний показал, как это видно на рисунке 11, что поверхности трения находятся в хорошем состоянии, все мерные базы сохранились полностью, на поверхности трения отчетливо видны следы от обработки шлифовальным камнем, указывающие на то, что износ меньше 2–3 мкм. Механических повреждений эластичного металлопластмассового покрытия не обнаружено. Нарушения соединения фторопласта со спрессованными проволоочными спиралью и паяного соединения спиралью со стальным корпусом сегмента не обнаружено.

В дальнейшем эксплуатационные испытания были продолжены, и указанные сегменты с нулевым эксцентриситетом работают в подпятнике гидроагрегата № 5 по настоящее время.

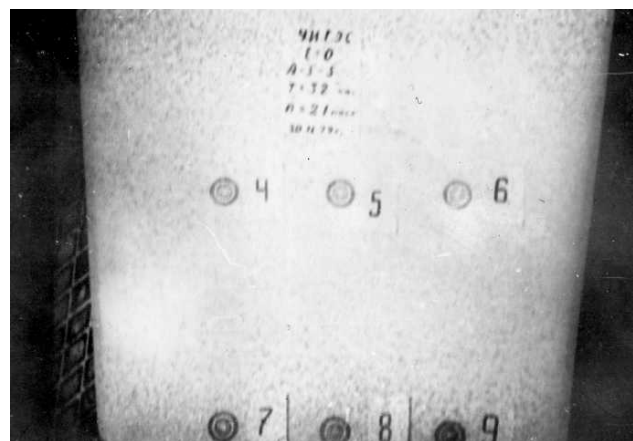


Рис. 11. Общий вид поверхностей трения ЭМП сегмента № 5 и мерных баз после первого испытания с нулевым тангенциальным эксцентриситетом в подпятнике гидроагрегата № 5 Усть-Илимской ГЭС

Выводы

1. ЭМП сегменты обладают высокой надежностью, пусковой и режимной работоспособностью при удельной нагрузке 6,2 МПа, скорости скольжения 20,3 м/с и установке их в подпятнике с нулевым тангенциальным эксцентриситетом.

2. Потери на трение при пусках в ЭМП сегментах в 2–3 раза меньше, чем в баббитовых сегментах.

3. ЭМП сегменты обеспечивают высокую надежность при температуре +80°C.

4. ЭМП сегменты не повреждаются при выбеге ротора без торможения.

5. ЭМП сегменты, установленные с нулевым тангенциальным эксцентриситетом, не требуют применения громоздких дорогостоящих и неудобных в эксплуатации систем принудительного впрыска.

6. ЭМП сегменты не требуют трудоемкой ручной операции шабровки поверхностей трения.

7. Эластоэффект, проявляющийся в ЭМП сегментах, оказывает существенное влияние на их работоспособность и требует изготовления сегментов со специальной начальной макрогеометрией профиля в окружном сечении.

8. Применение ЭМП сегментов в подпятниках гидроагрегатов Усть-Илимской ГЭС дало возможность снять ограничения по пускам и увеличить надежность и маневренность гидроагрегатов.

9. ЭМП сегменты позволяют осуществлять горячие пуски без повреждения подпятника с интервалом выстоя между пусками менее одной минуты.

10. Высокая надежность эластичных металлопластмассовых сегментов при их эксплуатации с нулевым тангенциальным эксцентриситетом обеспечивает возможность создания надежных реверсивных подпятников для обратимых генераторов-двигателей, проектируемых и строящихся гидроаккумулирующих электростанций.

11. Внедрение эластичных металлопластмассовых сегментов только на одном гидроагрегате № 5 Усть-Илимской ГЭС дает большой ежегодный технико-экономический эффект.

12. Всесторонние и глубокие исследования с проведением длительных эксплуатационных испытаний на Волжской имени В.И. Ленина, Саратовской имени Ленинского комсомола, Братской имени 50-летия Великого Октября, Усть-Илимской, Плявиньской имени В.И. Ленина, Саяно-Шушенской гидроэлектростанциях показали, что созданные нами принципиально новые конструкции эластичных металлопластмассовых опор скольжения обладают высокой надежностью и работоспособностью.

13. На базе выполненных исследований и полученных уникальных результатов ПО «Уралэлектротяжмаш им. В.И. Ленина» спроектировало и изготовило обратимые гидрогенераторы для Загорской ГАЭС, в подпятниках которых были применены созданные нами и изготовленные по нашей технологии [5], [6] на Чебоксарском ОЭЗ «Энергозапчасть» ЭМП сегменты по А.С. № 649898 СССР [7], которые работают с нулевым эксцентриситетом надежно более 25 лет.

Библиографический список

1. Обращение производственного объединения «УРАЛЭЛЕКТРОТЯЖМАШ» им. В.И. Ленина № 75/7-521-233 от 30 июня 1978 г. к Куйбышевскому авиационному институту.

2. Постановление Государственного Комитета СССР по науке и технике № 21 от 24 января 1979 г.

3. Приложение к постановлению Государственного комитета по науке и технике от 24 января 1979 г. № 21.

4. Решение Научного Совета ГКНТ СССР по проблеме «Развитие электроэнергетики и электротехники» № 1-8 от 05.04.1984 г.

5. А.С. № 1321958 СССР. Способ изготовления упругодемпфирующегося антифрикционного покрытия подпятника / Байбородов Ю.И., Ежов А.Н., Коднир Д.С. и др.

6. А.С. № 1352103 СССР. Способ изготовления упругодемпфирующегося покрытия подпятника / Байбородов Ю.И., Литвинов Е.В., Маненков Ю.А. и др.

7. А.С. № 649898 СССР. Упругий самоустанавливающийся сегмент подшипника / Байбородов Ю.И., Коднир Д.С., Савинов А.П. и др.

References

1. Address of the production association "Uralelectrotyazhmash" named after V. I. Lenin No. 75/7-521-233 of June 30, 1978 to Kuibyshev Aviation Institute.

2. Resolution of USSR State Committee on science and technology No. 21 of January 24, 1979.

3. Record of proceedings at the Institute "Gidroproect" on the problem of producing thrust bearings of hydroelectric units for Yenisey hydroelectric power stations for the load of up to 7000 t of January 23-25, 1980.

4. Resolution of the Scientific Council of USSR State Committee on science and

technology on the problem "Development of electrical engineering and electrical power engineering" No. 1-8 of April 5, 1984.

5. Author's Certificate No. 1321958, USSR. Technique for producing elastic damping antifriction thrust bearing coating / Baiborodov Yu. I., Yezhov A. N., Kodnir D. S. et al.

6. Author's Certificate No. 1352103, USSR. Technique for producing elastic damping thrust bearing coating / Baiborodov Yu. I., Litvinov Ye. V., Manenkov Yu. A. et al.

7. Author's Certificate No. 649898, USSR. Elastic self-aligning bearing segment / Baiborodov Yu. I., Kodnir D. S., Savinov A. P. et al.

ELASTIC METAL-PLASTIC THRUST BEARINGS FOR COMBINED HYDRAULIC UNITS OF PUMPED STORAGE HYDROELECTRIC POWER STATIONS

© 2009 Yu. I. Baiborodov

Samara State Aerospace University

The paper presents an analysis of serviceability of heavily-loaded elastic metal-plastic (EMP) segments with zero circular eccentricity at hydroelectric unit No. 5 of Ust-Ilim hydroelectric power station. The design of EMP segments suggested and tested by the authors was used in the thrust bearing design of hydraulic-turbine generators by the "Uralelectrotyazhmash" research-and-production association at the Zagorsk pumped storage hydroelectric power plant where they proved to be completely reliable and are still successfully used.

Generator-motor, thrust bearing, segment, hydrodynamic pressure.

Информация об авторе

Байбородов Юрий Иванович, доктор технических наук, доцент кафедры основ конструирования машин, Самарский государственный аэрокосмический университет. Область научных интересов: контактная гидродинамика, опоры скольжения. E-mail: byui@ssau.ru.

Baiborodov, Yuri Ivanovitch, candidate of technical science, associate professor of the department of machine design foundations, Samara State Aerospace University. Area of research: contact hydrodynamics, sliding bearings. E-mail: byui@ssau.ru.