

САВЧЕНКО Ю.В., инженер, нач. ПТО, Днепровская ГЭС,

## О ПОДПЯТНИКАХ ГИДРОАГРЕГАТОВ ДНЕПРОВСКОЙ ГЭС-1



**Н**а Днепровской ГЭС-1 эксплуатируются девять гидроагрегатов: три – установленной мощностью 65 МВт (Г1–Г3) и шесть – 72 МВт (Г4–Г9).

Компоновка гидроагрегатов – вертикальные, подвесного типа, трехвальные, с радиально – осевыми турбинами.

Гидроагрегаты Г1–Г3 с гидротурбинами F-193 Newport News и генераторами AT-1 General Electric (США) были введены в эксплуатацию в 1947 г., Г4–Г9 с гидротурбинами РО-123 Ленинградского металлического завода и генераторами СВ 1160/180-72 Ленинградского ПО "Электросила" введены в эксплуатацию в 1948 – 1950 г.г.

В ходе послевоенного восстановления ДнепроГЭС гидроагрегаты Г1–Г3 монтировались первыми и изначально имели подпятники дискового типа с неподвижным диском на пружинном основании. Опыт последующей эксплуатации показал их крайнюю ненадежность (за период 1947 – 1954 гг. зафиксировано неоднократное разрушение баббитового слоя дисков, требовавшее длительного восстановительного ремонта).

На гидроагрегатах Г4–Г9 были применены подпятники на жестком опирании с десятью сегментами, имевшими баббитовую поверхность трения, разработанные ПО "Электросила". В конструкции таких подпятников (Рис. 1) вес вращающихся частей гидроагрегата и гидравлические усилия турбины передаются на фундамент генератора через разрезную кольцевую шпонку, расположенную в канавке вала ротора, цельную втулку подпятника, посаженную с определенным натягом на вал, зеркальный диск, сегменты и упругие опоры, установленные на сферических поверхностях болтов. В 1954–1955 гг. такие подпятники были установлены и на Г1–Г3, что существенно увеличило эксплуатационную надежность гидроагрегатов.

С учетом прогрессивных тенденций в разработке гидроэнергетического оборудования, имеющих в СССР в начале 1980-х годов, на подпятниках гидроагрегатов ДнепроГЭС-1 сегменты, имевшие баббитовую поверхность трения, были заменены сегментами с металлофторопластовым покрытием, что значительно повысило эксплуатационные качества и надежность гидроагрегатов.

В мае 1983 г. на гидроагрегате № 7 (эксплуатируется с 1949 г.) персоналом ДГЭС была выяв-

лена трещина вала ротора с раскрытием по периметру на 130° в сечении шпоночной канавки втулки подпятника. Отломок вала впоследствии был закреплен с помощью высокопрочных болтов; отремонтированный гидроагрегат в таком виде эксплуатируется в настоящее время [2]. Аналогичный дефект проявился в 1990-х годах и на гидроагрегате Усть-Каменогорской ГЭС, имеющем сходную конструкцию и ресурс.

Продолжением энергетической политики СССР начала 90-х годов явилась реализация предложений НПО "ЦКТИ" по увеличению мощности гидроагрегатов ДнепроГЭС-1 путем подрезки сбегających кромок лопастей рабочих колес гидротурбин, при этом максимальная мощность гидроагрегатов Г4, Г8, Г9 увеличивалась с 72 до 80 МВт. Работы по форсировке гидротурбин проводились в условиях ГЭС, без последующей балансировки рабочих колес.

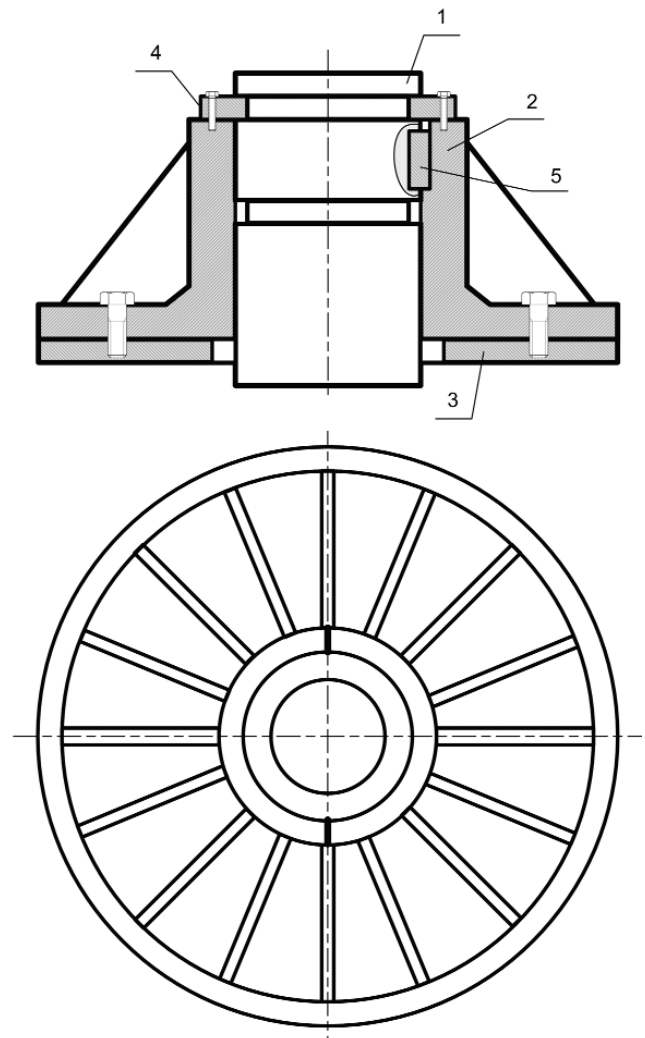
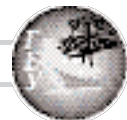


Рис. 1. Втулка подпятника конструкции ПО "Электросила",  
1 – вал ротора, 2 – втулка, 3 – диск,  
4 – кольцевая шпонка, 5 – шпонка



Приведенные выше факторы были учтены при подготовке первого этапа реконструкции ДнепроГЭС-1 (1997 — 2001 гг.), в объем которой входили замена гидротурбин и реконструкция генераторов Г4—Г9. Реконструкция генераторов включала в себя переизолировку полюсов ротора, замену системы возбуждения, защит, агрегатного контроля, замену сегментов подшипников и применение подпятника новой конструкции.

Исходя из требований Днепровской ГЭС, специалистами ГП "Электротяжмаш" была разработана оригинальная конструкция подпятника (Рис. 2), в которой фиксация втулки производилась не разрезной кольцевой шпонкой в верхней канавке вала (предполагалось, что величина остаточных напряжений в этом месте за период эксплуатации превысила допустимые пределы), а с помощью конструктивного элемента самой втулки — бурта, сопрягаемого с нижней канавкой вала ротора, используемой только при монтажных работах и не подвергавшейся эксплуатационным нагрузкам. При этом втулка подпятника выполнена разъемной в вертикальной плоскости.

Данное техническое решение теоретически позволяло продлить ресурс вала ротора, но в ходе последующей эксплуатации таких подпятников возник ряд проблем, без решения которых в ближайшей перспективе возрастала вероятность серьезных отказов в работе реконструированных гидроагрегатов ДнепроГЭС-1.

Впервые подпятник новой конструкции был применен на гидроагрегате № 5 ДнепроГЭС-1, введенном в эксплуатацию после реконструкции в июле 1998 г.

Через 18 месяцев работы, в феврале 2000 г. было выявлено разрушение восьми из десяти упругих опор подпятника (усталостные трещины), опоры были заменены. При этом, в ходе ремонта были обнаружены следы электроконтактной коррозии в местах посадки втулки на вал, свидетельствующие о неплотной фиксации втулки, и высказано предположение, что вероятной причиной усталостного разрушения опор является увеличенное осевое биение зеркальной поверхности диска вследствие деформации втулки под нагрузкой. Следует отметить, что части корпуса разъемной втулки подпятника Г-5 стягивались между собой с помощью тангенциальных шпилек, устанавливаемых в отверстия корпуса со значительным зазором, такая конструкция не могла обеспечить необходимую жесткость фиксации втулки на валу ротора и допускала взаимное перемещение частей корпуса втулки.

Впоследствии, для гидроагрегатов Г4—Г9 конструкция разъемной втулки подпятника была

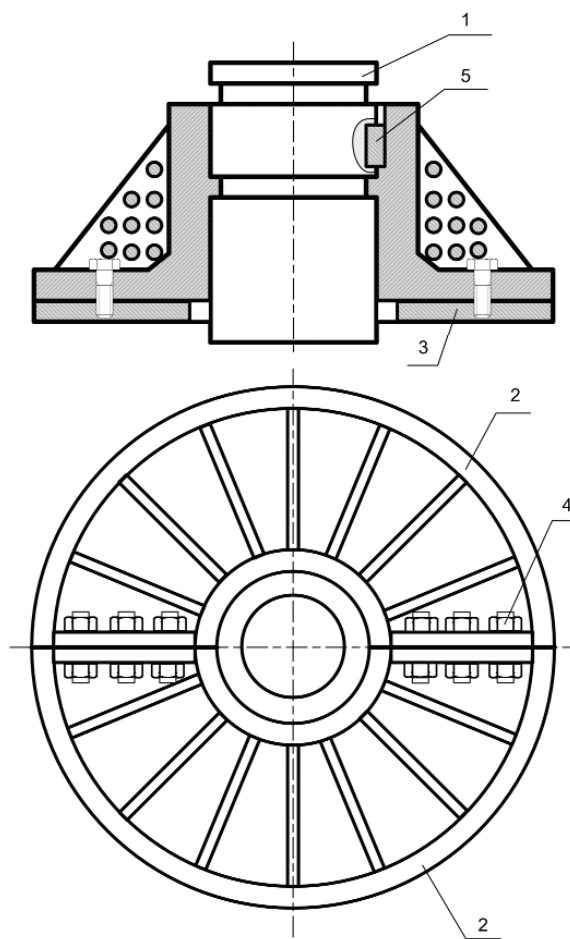


Рис. 2. Втулка подпятника конструкции ГП "Электротяжмаш", 1 — вал ротора, 2 — половины втулка, 3 — диск, 4 — стяжные шпилеки, 5 — шпонка

доработана — сборка частей корпуса втулки производится с применением призонных шпилек, затягиваемых в определенной последовательности, что в значительной степени увеличивает надежность посадки втулки на вал.

В июле 2001 г. было выявлено усталостное разрушение всех десяти опор подпятника Г-5. Анализ профиля поверхности втулки, сопрягаемой с диском, проведенный с помощью индикатора часового типа, показал наличие волнообразных макронеровностей с амплитудой до 0,29 мм, ориентированных вдоль плоскости разъема втулки. Для компенсации искажения поверхности диска в стеклотекстолитовой прокладке между диском и втулкой по рекомендации [1, с. 170] вдоль плоскости разъема была выполнена впадина, позволившая уменьшить "волну" зеркала до приемлемых 0,1 мм.

В июне 2006 г. при плановом капитальном ремонте гидроагрегата № 5 было выявлено разрушение двух опорных тарелок подпятника, разрушение стеклотекстолитовой прокладки диска, последующие замеры показали недопустимую величину макронеровностей поверхностей диска и втулки, ослабление посадки втулки на вал. По совместному решению ОАО "Укрэнерго" и

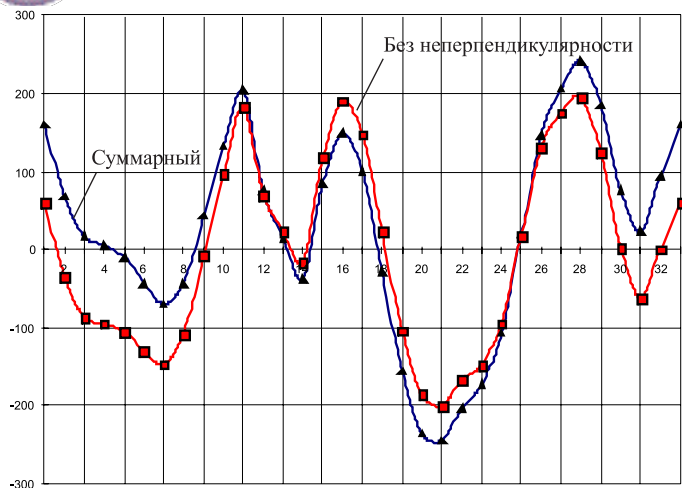


Рис. 3. Биение диска подпятника Г-5 при нагрузке P=53 МВт

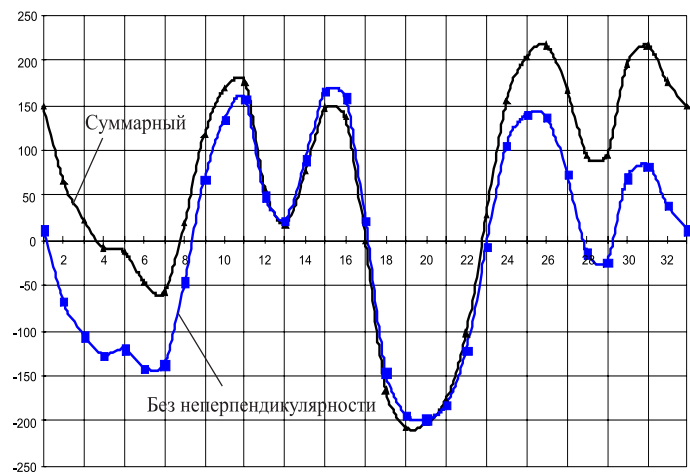


Рис. 4. Биение диска подпятника Г-5 в режиме СК

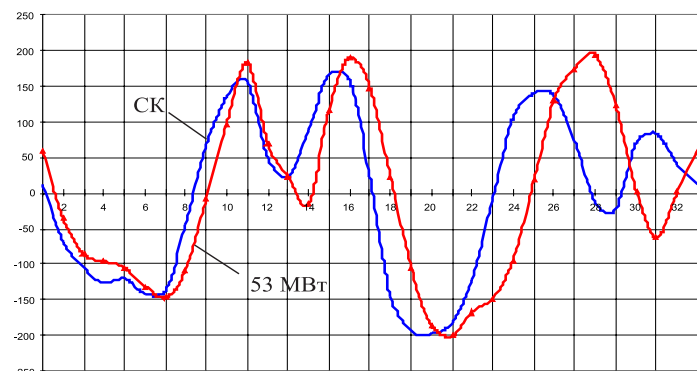


Рис. 5. Биение диска подпятника Г-5 (чистый профиль) в различных режимах

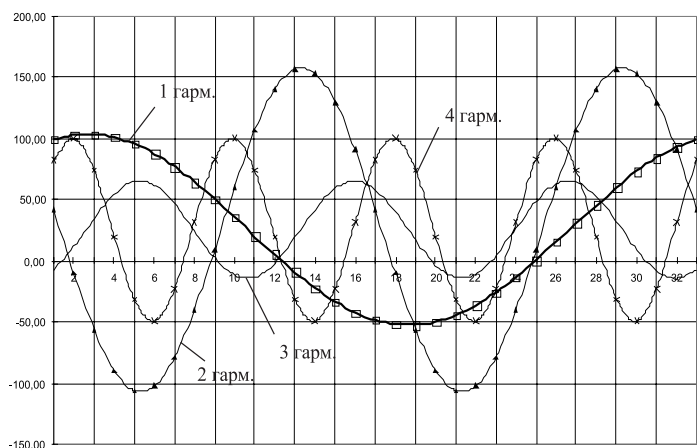


Рис. 6. Гармонические составляющие биения диска подпятника Г-5

ГП "Электротяжмаш" диск и втулка были подвергнуты восстановлению в заводских условиях, причем, втулка для обеспечения надежной посадки на вал и увеличения жесткости доработана путем наплавки и расточки посадочных поясков, а соединение частей корпуса выполнено на призонных шпильках. Для компенсации деформации диска вследствие неравномерной жесткости втулки между диском и втулкой по рекомендации [1, с. 169 – 170] проложена прокладка из калиброванного электрокартона с зазором вдоль разъема втулки. В результате проведенных мероприятий до настоящего времени гидроагрегат № 5 работает с приемлемыми показателями биения диска подпятника и вибрации опорных частей.

Следует отметить, что во всех случаях разрушение упругих опор подпятника Г-5 не сопровождалось каким – либо существенным изменением вибрационного состояния гидроагрегата.

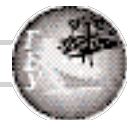
С момента проявления нарушений в работе подпятника Г-5 предпринимались шаги для выявления и устранения их причин.

Так, в 2001 г., после замены упругих опор, силами ООО "Элта-Инжиниринг" было проведено исследование работы подпятника гидроагрегата № 5, при этом напряженное состояние упругих опор оценивалось тензометрическим методом в различных режимах работы гидроагрегата. По результатам исследования было установлено наличие четырех максимумов механических напряжений в опорах подпятника за один оборот ротора, причем, наибольшую амплитуду напряжений имела четвертая гармоника оборотной частоты, а пульсирующая составляющая нагрузки на опоры составляла порядка 6,5...8% полной нагрузки.

В марте 2006 г. персоналом ДГЭС при участии автора статьи была произведена запись биения поверхности трения диска подпятника с последующим разложением на гармонические составляющие по методу Фурье, обработкой и анализом результатов. Запись производилась с помощью стационарной системы вибромониторинга Bently Nevada.

Исследования проводились при двух нагрузочных режимах гидроагрегата – генераторном с P=53 МВт (Рис. 3) и режиме синхронного компенсатора с рабочим колесом гидротурбины, освобожденным от воды (Рис. 4).

В результате обработки полученных данных путем вычитания из суммарной функции биения диска первой гармоники (биения от неперпендикулярности диска) удалось выделить "чистую" профилограмму поверхности трения диска подпятника и сопоставить профили диска в различных режимах (Рис. 5).



Анализ профиля диска для различных нагрузочных режимов показывает его незначительное изменение по амплитуде и фазе колебаний, что позволяет сделать вывод о минимальном влиянии упругой деформации системы "втулка — диск — опоры" под действием реакции воды в гидротурбине на характер искажения профиля диска.

Анализ амплитудных и фазовых характеристик гармонических составляющих "чистого" профиля поверхности диска подпятника показывает, что наибольшую двойную амплитуду имеют вторая и четвертая гармоники оборотной частоты гидроагрегата (Рис. 6), сдвиг фазы второй гармонической составляющей относительно точки начала отсчета составляет около 45°, что соответствует расположению плоскости разъема втулки, а разность фаз в 30° между нисходящими ветвями второй и четвертой гармоник показывает, что поверхность диска имеет сложную пространственную форму, конфигурация которой определенным образом связана с неравномерной жесткостью втулки по горизонтальным осям.

Полученные данные вполне корреспондируются с результатами исследования ООО "Элта-Инжиниринг" в части спектрального состава возмущающих воздействий на опоры подпятника.

По нашему мнению, одной из причин формирования такого профиля поверхности трения диска могла быть пластическая деформация диска при первоначальном нагружении подпятника после его замены вследствие неравномерной жесткости втулки.

Причиной деформации опорной поверхности втулки может также служить нарушение круглости посадочного отверстия втулки вследствие неполного смыкания частей корпуса при затяжке крепежных шпилек.

Вопросы влияния неровности зеркальной поверхности диска подпятника на надежность и долговечность работы подпятника подробно рассмотрены в работе [1, С. 146 — 174]. Помимо создания пульсирующих нагрузок на сегменты и опоры подпятника при работе гидроагрегата, приводящих к преждевременному износу поверхностей трения сегментов и накоплению усталостных напряжений в упругих опорах, наличие макронеуровностей поверхности трения диска существенно ухудшает качество распределения нагрузки на опоры [1, С. 212 — 218]. Ввиду значимости данной проблемы параметры неровности зеркальной поверхности диска жестко регламентируются в нормативных документах: в соответствии с действующими на Украине РД 34.31.501-88 [3] и в Российской Федерации — РД 34.31.501-97 макронеуровность зеркальной поверхности диска в на-

правлении вращения, вызванная совместным влиянием профиля поверхности и неперпендикулярности диска для подпятников с ЭМП-сегментами не должна превышать 0,12 мм.

В настоящее время специалистами ОАО "Укргидроэнерго" обсуждаются возможные направления реконструкции гидроагрегатов Г1—Г3 с целью продления их ресурса и увеличения номинальной мощности с 65 МВт до 72 МВт. Ввиду длительного срока службы — более шестидесяти лет — эти гидроагрегаты эксплуатируются в щадящем режиме.

В объем реконструкции гидроагрегата предполагается включить:

- замену гидротурбины (прорабатывался вариант использования гидротурбины типа РО-45-В-545, аналогичной установленным на Г4—Г9);
- замену обмотки статора генератора (как вариант — замена статора с применением неразъемной конструкции сердечника и волновой обмотки);
- реконструкцию полюсов ротора с восстановлением демпферной обмотки;
- реконструкцию механической части генератора, в частности, замену подшипников и системы торможения.

В этой связи особенно актуальным является вопрос реконструкции узлов подпятников Г1—Г3.

Срок эксплуатации подпятников этих гидроагрегатов превышает 55 лет, при этом, конструкция оголовка вала ротора General Electric (Рис. 7) отличается от вала ПО "Электросила" большей толщиной стенки вала и, следовательно, меньшими эксплуатационными напряжениями.

В результате проведения реконструкции ресурс Г1—Г3 может быть продлен на 20...30 лет, мощность увеличена до 72 МВт и эти гидроагрегаты могут быть активно использованы в системе АРЧМ. Следствием этого будет значительное увеличение динамических нагрузок на вал рото-

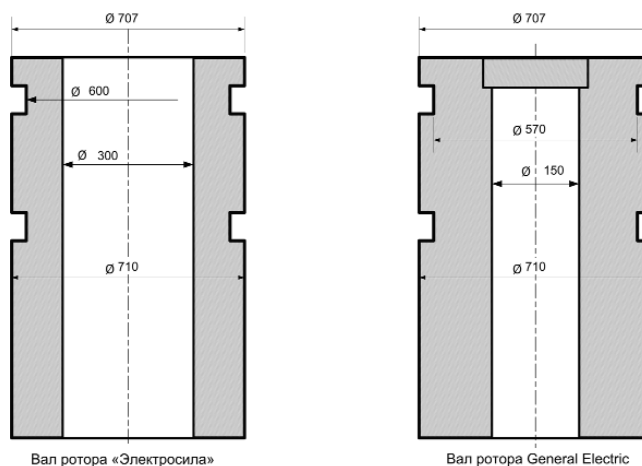


Рис. 7. Сравнение конструкции вала ротора ПО "Электросила" и General Electric

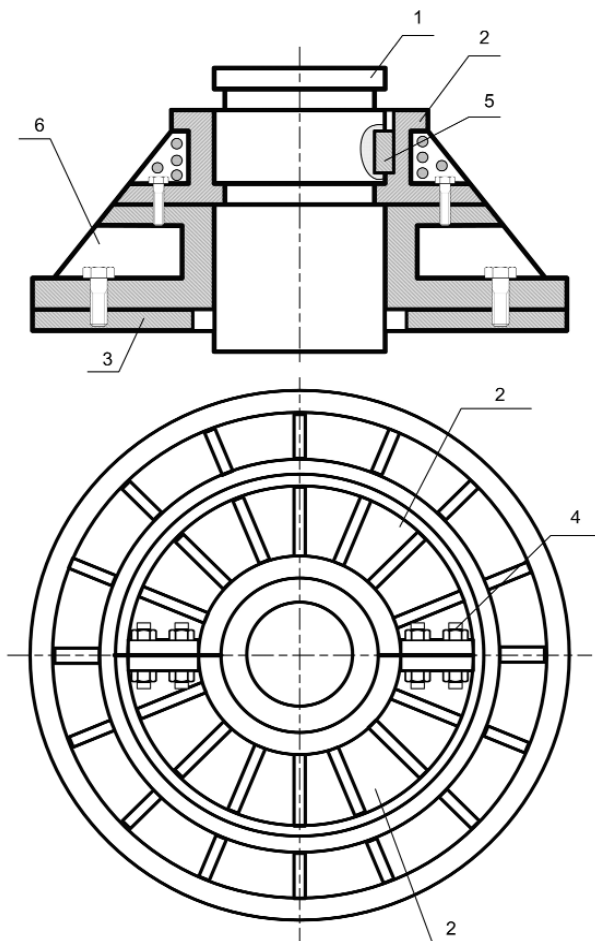


Рис. 8. Возможный вариант конструкции втулки подпятника ДнепроГЭС-1: 1 – вал ротора, 2 – половины втулка, 3 – диск, 4 – стяжные шпильки, 5 – шпонка, 6 – большая втулка

ра, что повлечет за собой накопление остаточных напряжений в материале вала и увеличит вероятность его разрушения.

При этом видится несколько возможных подходов к решению проблемы подпятников Г1–Г3:

1. **Радикальный** – полная замена ротора и подпятника генератора с сохранением конструкции подпятника, аналогичной существующей.

2. **Минимальный** – используются существующие подпятники с заменой опорных тарелок и сегментов (применяется двухслойная конструкция сегментов), при необходимости, заменяется диск подпятника.

3. **Оптимальный** – после обследования сохраняется существующий вал ротора, в подпятнике применяется втулка новой конструкции (Рис. 8) с замыканием на монтажную канавку вала, конструкция опорных частей подпятника аналогична примененной на Г4–Г9.

Особенностью рассматриваемого возможного варианта конструкции втулки подпятника яв-

ляется применение неразъемной литой втулки 6, посаженной с натягом на вал ротора 1, и разъемной малой втулки 2, посадка которой обеспечивается за счет стягивания половин втулки шпильками, причем, бурт малой втулки входит в монтажную канавку вала ротора и воспринимает вертикальную нагрузку на подпятник.

Такая конструкция за счет повышенной жесткости неразъемной втулки существенно уменьшает вероятность деформации диска подпятника и, в то же время, обеспечивает нагружение вала через ранее не использовавшуюся монтажную канавку. В этом случае реализуются преимущества и конструкции подпятника ПО "Электросила", и ГП "Электротяжмаш".

Очевидно, что рассматриваемые варианты подходов к замене подпятников при реконструкции Г1–Г3 требуют детальной технико-экономической проработки.

### Выводы

1. Опыт эксплуатации различных конструкций подпятников гидрогенераторов Днепровской ГЭС позволяет выработать оптимальный подход к выбору конструкции подпятника при последующей модернизации генератора.

2. Превышение величины макронеровности опорных поверхностей втулки и диска подпятника по сравнению с нормативными значениями помимо возникновения пульсирующих нагрузок на сегменты и опоры, вызывающих преждевременные усталостные разрушения деталей, приводит к снижению точности распределения нагрузки на опоры подпятника.

3. Подпятники с традиционной конструкцией неразъемной втулки имеют более высокие показатели надежности и долговечности.

4. При реконструкции гидрогенераторов АТ-1 General Electric ДнепроГЭС-1 существует несколько вариантов решения проблемы замены подпятников.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А.Е. Подпятники гидроагрегатов.–М.: Энергия, 1975. – 289 с.

2. Попов А.И., Вайн В.А. О влиянии плотности посадки опорной втулки подпятника подвесного агрегата на его работоспособность//Гидротехническое строительство. – 1990 – № 6. – С. 31–33.

3. Методические указания по эксплуатации подпятников вертикальных гидротурбинных агрегатов (гидроагрегатов) РД 34.31.501-88. М. : – Союзтехэнерго, 1989. – 24 с.

