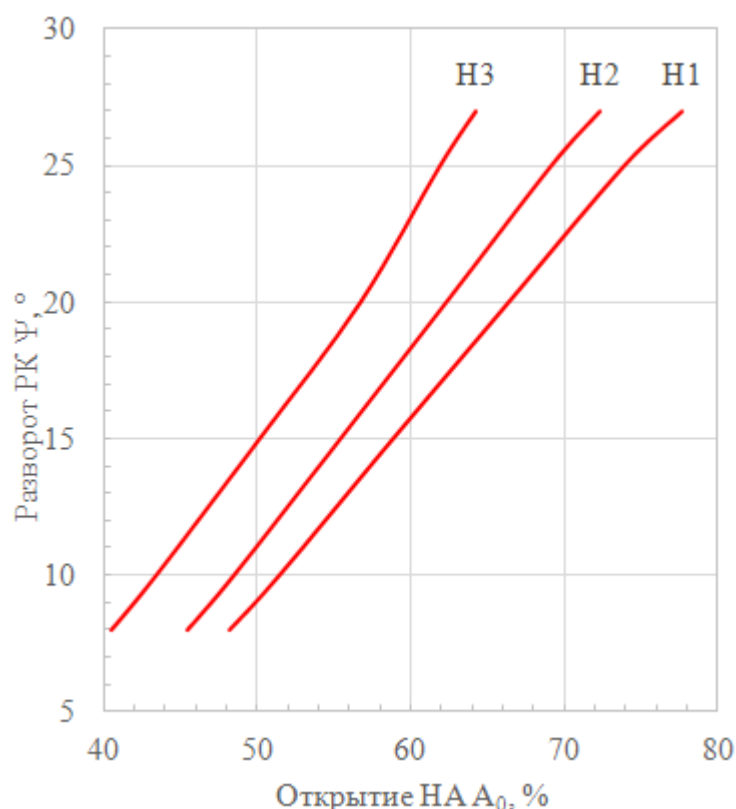


# Комбинаторный механизм поворотнолопастных турбин, параметризованный сигналом эл. мощности ( $P$ -комбинатор)

## Напор нетто

Для турбомашин любой конструкции актуальной проблемой является минимизация потери, связанной с выходной скоростью. Если для высоконапорных машин доля этой потери относительно невелика, то для низконапорного ГА, пропускающего большие расходы воды и работающего при изменяющемся в широких пределах низком напоре, организация потока в проточной части имеет первостепенное значение для достижения высокой экономичности. Высокая экономичность таких ГА обеспечивается применением поворотнолопастных гидротурбин, в которых требуемая для того или иного режима геометрия проточной части организуется согласованным изменением углов установки лопаток направляющего аппарата и лопастей рабочего колеса — комбинаторным механизмом.

Комбинаторный механизм, несмотря на простоту выполняемой функции, требует к себе повышенного внимания, так как от него зависят коэффициент полезного действия турбины и техническое состояние агрегата. Хорошо известны недостатки, присущие классическим комбинаторным механизмам, формирующим величину угла разворота лопастей рабочего колеса по значениям открытия направляющего аппарата и напора нетто агрегата (см. рис.). Ведь согласно определению, напор нетто является разностью полных удельных энергий воды на входе и выходе гидротурбины. Эту величину не только невозможно получить напрямую, но и для этого требуется множество сложных измерений во время всего периода эксплуатации.



Классические комбинаторные зависимости

К недостаткам комбинаторных механизмов, использующих сигнал напора нетто, можно отнести

также сложность методик идентификации закладываемых в них комбинаторных зависимостей в натурном эксперименте. Это и необходимость ожидания подходящего значения действующего напора, и сложность измерения расхода, и большая вероятность ошибки в определении связи между статическим напором ГЭС и напором нетто агрегата.

Измерение величины напора-нетто невозможно вести с высокой точностью, а, следовательно, и ошибка классического комбинаторного механизма может приводить к потерям к. п. д. (величины потерь можно точнее оценить по характеристикам гидротурбины, режиме работы и напора гидроустановки).

*Можно утверждать, что классический комбинатор устарел и не использует современные вычислительные мощности для повышения энергоэффективности. Разработанный для механических регуляторов еще в начале 20 века подход до сих пор используется и не был переработан, несмотря на свои существенные недостатки.*

## **Использование величины мощности**

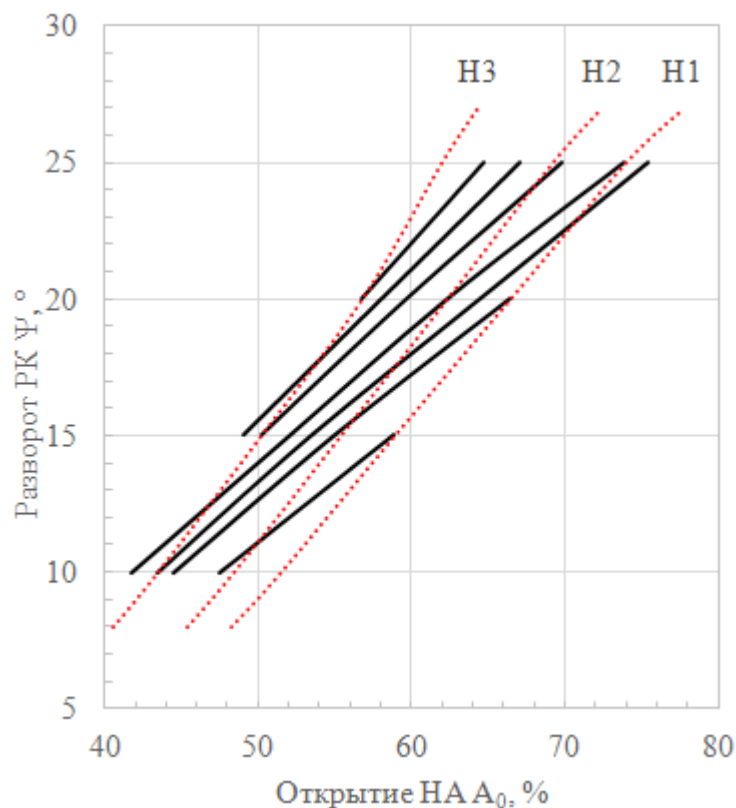
Включение в число параметров, позволяющих правильно выбрать взаимное положение регулирующих органов, сигнала мощности позволяет избежать ошибок в измерении напора нетто. Величина мощности, развиваемой турбиной, в отличие от напора нетто оказывает влияние на режим работы значительно большего числа факторов. Величина мощности является интегральным показателем параметров режима:

- напора нетто, как разности полных удельных энергий воды на входе и на выходе из турбины;
- расхода, зависящего от напора нетто и взаимного положения регулирующих органов.

Определение механической мощности из электрической мощности в нормальном эксплуатационном режиме трудности не составляет. Но нельзя просто начать использовать величину мощности вместо напора нетто. В настоящее время вычислительные ресурсы позволяют применить новые идеи, до этого неосуществимые на механической и аналоговой вычислительной базе, используемой в прошлом.

## **Комбинатор по мощности**

Комбинаторная зависимость строится совокупностью точек при различных напорах, где режим работы комбинаторный. Если добавить для каждой из этих точек величину мощности, развиваемую на тот момент, можно построить новую функцию в тех же координатах (открытие НА, разворот РК) — значения комбинаторной мощности. Соединив точки с одинаковыми значениями мощности на комбинаторных зависимостях для разных напоров, получим комбинаторные зависимости, параметризованные величиной мощности. Можно строго доказать, что данная функция непрерывная и монотонна. На рисунке представлены два семейства графиков комбинаторных зависимостей наложенных друг на друга: параметризованных напором (красными пунктирными линиями) и параметризованных мощностью (черные сплошные линии).



#### Используемые комбинаторные зависимости

Можно строго доказать, что во время эксплуатации в любой момент времени для заданной мощности найдётся лишь одна пара таких положений сервомоторов НА и РК, где текущая мощность совпадет с мощностью из комбинаторной зависимости, и **эта точка будет комбинаторной**. Иными словами нужно найти такое положение сервомотора НА, при котором соответствующее ему положение сервомотора РК (по классической зависимости) на выбранной изолинии комбинаторной мощности  $P_k = P_{\text{заданное}}$  обеспечит достижение турбиной мощности  $P_{\text{заданное}}$ . Такой комбинаторный механизм становится комбинатором по мощности, или *P*-комбинатор. Регулятор отходит от необходимости получать напор нетто извне, а определяет его самостоятельно через обратное преобразование.

Важно, что комбинаторный механизм, входящий в систему регулирования, должен иметь высокие динамические характеристики. Предлагаемое решение интегрировано в регулятор мощности, позволяя исполнять задание мощности не просто не хуже стандартном ПИ-регулятора, но и быстрее за счет использования структуры типа "feed-forward".

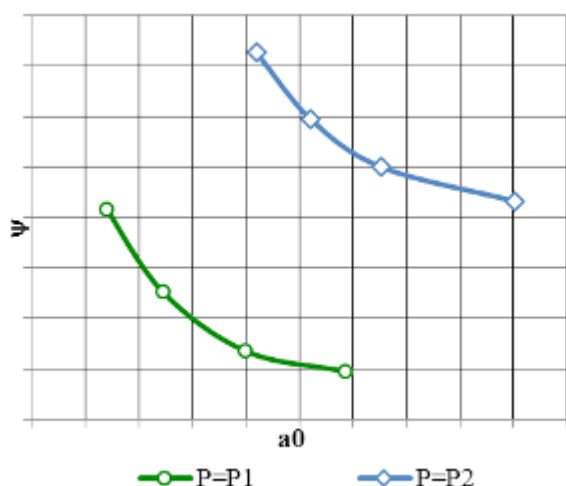
### Закладываемые характеристики

Также, как и классическому комбинаторному механизму, *P*-комбинатору требуются исходные данные для параметризации. Существующие методы обладают множеством недостатков в связи с неточностью измерений.

Завод-изготовитель гидротурбины предоставляет комбинаторную зависимость в классическом виде, но её недостаточно: необходимо знание величины мощности в каждой из точек. Однако у завода-изготовителя есть все данные, чтобы предоставлять их в полном виде. Другим классическим вариантом является проведение энергетических испытаний (с измерением расхода абсолютным методом) — это требует привлечение сторонней организации и фактический вывод агрегата из нормальной работы.

В первом случае, для турбин, эксплуатируемых долгое время, отклонение от модели может быть значительно или характеристика вовсе утеряна в архивах. Для второго случая, задача измерения расхода слишком дорога, а в случае ГЭС руслового типа (без длинного прямого водовода) сложна

и недостаточно точна.



Линии равной мощности

Предлагается рассмотреть новый метод, не требующий измерения расхода и подходящий только для  $P$ -комбинатора. Это собственный метод постоянной мощности, основанный на фундаментальном свойстве поворотнолопастных гидротурбин: достижении одной и той же мощности за счет разного соотношения открытия НА и разворота лопастей РК (см. рис). Лишь одна точка на линии для текущего режима является комбинаторной, а метод осуществляет её поиск. В основе лежит специальный способ извлечения информации, заложенной в форму изолинии. Методология выведена математически и проверена в ходе вычислительного эксперимента на значимом числе цифровых моделей гидроагрегатов, а также в ходе серии натурных испытаний на Новосибирской ГЭС совместно с НПО ЦКТИ. Эксперименты показали ошибку **не более 0,1% по к. п. д.**

Актуальным является не только соблюдение комбинаторных зависимостей, но и контроль их изменения во времени из-за износа проточной части турбин при эксплуатации. Поэтому необходимо располагать средствами по оперативной ее идентификации. Важно, что метод автоматизирован и может быть использован эксплуатационным персоналом без изменения режима ГЭС и без участия сторонних организаций и проведения специальных испытаний в течение всего срока эксплуатации гидротурбины.

Таким образом, предлагаемое решение инвариантно относительно наличия модельных и актуальных эксплуатационных характеристик.

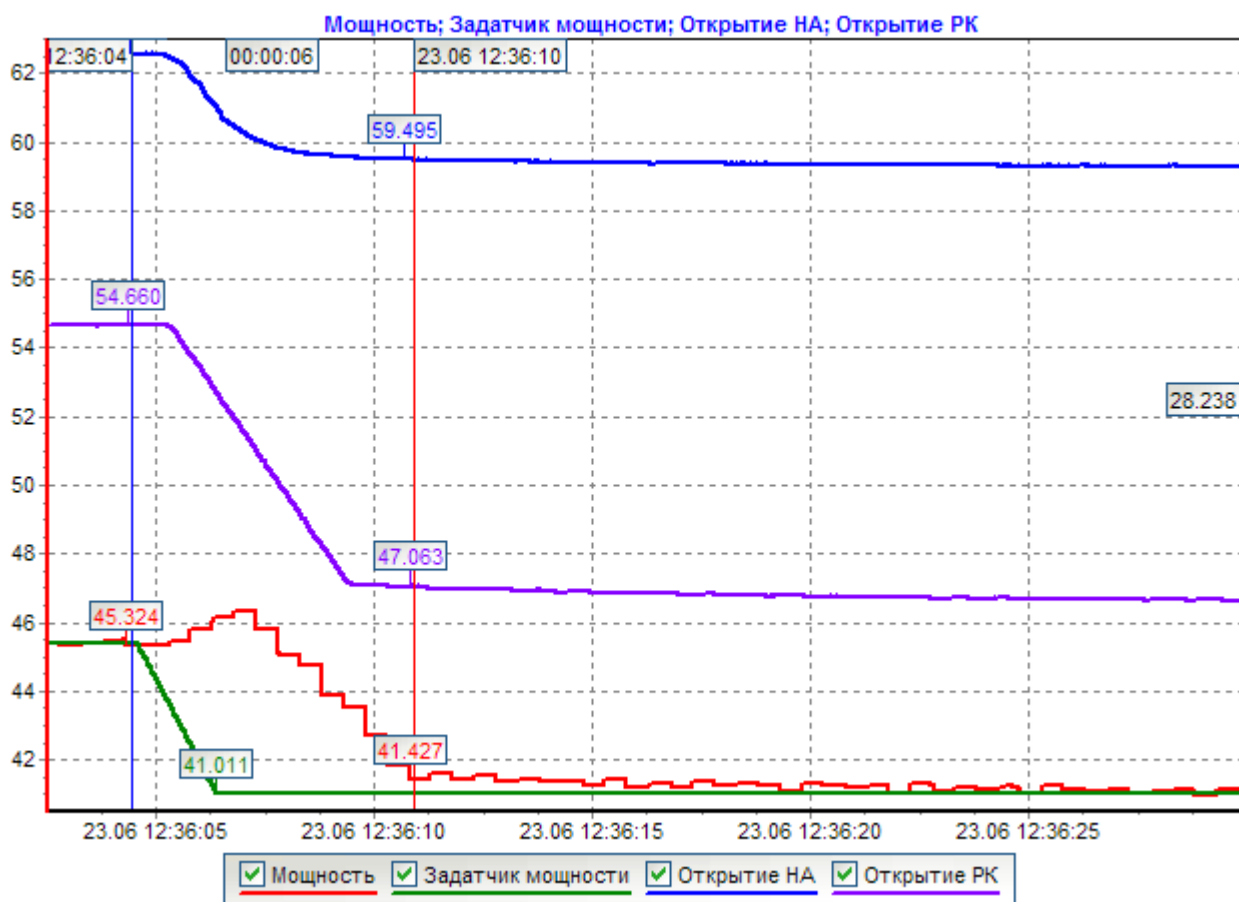
## Преимущества решения

Преимущества комбинаторного механизма, использующего сигнал мощности являются:

- высокая точность формирования комбинаторной зависимости — максимальная эффективность для режима работы ГА
- исключительная простота реализации для режима работы на мощную энергосистему;
- сохранение динамических характеристик с сохранением возможности участия в АВРЧМ и НПРЧ;
- регулятор мощности типа «feed-forward» с предрасчетом положения регулирующих органов (особенно с учетом нелинейности моментных и расходных характеристик)
- безопасное и надежное отключение в ненормальных режимах;
- определение напора нетто гидротурбины;
- уточнение комбинаторных зависимостей в течение всего срока эксплуатации без привлечения дорогостоящих специализированных организаций.

## Метод уже апробирован на серии натурных испытаниях и готов к промышленному применению

В течение 2015 года на агрегате №6 Новосибирской ГЭС специалистами компании «Ракурс-инжиниринг» выполнялись экспериментальные исследования с целью проверки и доведения алгоритмов идентификации комбинаторного режима и наладка работы комбинаторного механизма, использующего для точной настройки сигнал мощности. В процессе испытаний была определена окончательная методика нахождения комбинаторной зависимости собственным методом постоянной мощности в режиме полуавтоматического выполнения поискового движения.



Переходный процесс по мощности

В 2016 году на агрегате №4 Шульбинской ГЭС проводились экспериментальные исследования метода идентификации

В 2016 и 2017 г. вышеуказанный регулятор прошел натурные испытания на модернизированных ГА ст. №3,4 Новосибирской ГЭС. Результаты подтвердили, что регулятор корректно решает поставленные перед ним задачи.

**Научно-исследовательские и экспериментальные работы, выполненные компанией «Ракурс-инжиниринг» в процессе модернизации агрегатных систем управления Новосибирской ГЭС позволяют реализовать современное решение регулятора мощности поворотнлопастной гидротурбины с корректором комбинаторной зависимости по мощности, а также обеспечить поддержку высокой эффективности предложенного решения экспресс контролем комбинаторных зависимостей, выполняемым с использованием аппаратных и программных средств штатных ПТК ЭГР.**

## Награды

- Лучшая научно-исследовательская работа в области гидро\энергетики в 2016 г. (ПАО "РусГидро")

- Первое место среди потенциальных научных проектов AES Казахстан в 2017 г.
- Russian Startup Tour 2015. 3 место в треке «Энергоэффективность и энергосбережение, разработка инновационных энергетических технологий».
- Вторая Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В XXI веке». 1 место в секции «Модернизация и реконструкция ГЭС».
- Конкурс лучших инновационных проектов в сфере науки и высшего профессионального образования Санкт-Петербурга в 2015 году. Лауреат премии «Лучший инновационный продукт».

