

УДК 621.224

**В. Н. Дедков**, канд. техн. наук**Е. С. Агибалов****Ю. В. Городецкий**Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: dedkov@ipmach.kharkov.ua)

## УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ АГРЕГАТОВ МИКРОГЭС

*Представлено описание установки для исследований агрегатов микрогэс, созданной на основе гидродинамических стендов лаборатории гидравлических машин Института проблем машиностроения НАН Украины. Приведены энергетические параметры гидродинамического стенда ЭКС-15 и характеристики модернизированного измерительно-вычислительного комплекса, которые обеспечивают возможность проводить энергокавитационные испытания моделей агрегатов микрогэс с высокой точностью. Это позволяет использовать полученные экспериментальные данные для верификации программных комплексов, моделирующих трехмерное течение жидкости с целью их использования при разработке новых проточных частей гидромашин.*

*Подано опис установки для досліджень агрегатів мікрогес, створеної на основі гідродинамічних стендів лабораторії гідралічних машин Інституту проблем машинобудування НАН України. Наведені енергетичні параметри гідродинамічного стенду ЕКС-15 і характеристики модернізованого вимірювально-обчислювального комплексу, які забезпечують можливість проводити енергокавітаційні випробування моделей агрегатів мікрогес з високою точністю. Це дозволяє використовувати отримані експериментальні дані для верифікації програмних комплексів, що моделюють тривимірні течії рідини з метою їх використання при розробці нових проточних частин гідромашин.*

### Введение

Разработка и совершенствование проточных частей гидромашин различных типов и улучшение показателей ранее разработанных в настоящее время основано на совместном применении расчетных методов компьютерного моделирования течения жидкости в элементах проточной части при помощи различных программных комплексов (CFD) и физического моделирования рабочего процесса на гидравлических стендах. Физическое моделирование, которое осуществляется путем проведения комплекса исследований характеристик модели гидромашин на экспериментальных стендах, при условии использования стендов, оборудованных высокоточной измерительной аппаратурой и отвечающих требованиям международного стандарта МЭК 60193 «Модельные приемо-сдаточные испытания гидравлических турбин, насосов, насосов гидроаккумулирующих станций и насос-турбин» [1], обеспечивает большую точность определения КПД и других параметров по сравнению с расчетными методами. Это позволяет получать необходимые характеристики моделей гидромашин с высокой степенью достоверности, что дает возможность проводить сопоставление результатов и совершенствовать программные комплексы за счет применения более эффективных алгоритмов, численных методов, методов оптимизации и более совершенных моделей турбулентности.

Лаборатория гидромашин Института проблем машиностроения НАН Украины располагает двумя универсальными энергокавитационными стендами, уникальность которых в Национальной академии наук Украины подтверждается присвоением им статуса «национального достояния». В работах [2,3] приведено описание выполненных работ по реконструкции и модернизации гидродинамических стендов ИПМаш НАН Украины, в результате которых эти стенды соответствуют требованиям МЭК 60193, что позволяет использовать их

для проведения исследовательских комплексных энергокавитационных и приемосдаточных испытаний моделей гидромашин.

В настоящей статье описаны технические характеристики установки для исследований агрегатов микрогЭС, созданной с использованием оборудования гидродинамических стендов лаборатории гидравлических машин ИПМаш НАН Украины.

### Постановка задачи

Одним из направлений внедрения в энергетику возобновляемых источников энергии в Украине является использование гидроресурсов малых рек. На сегодняшний день в нашей стране работают от 80 до 100 малых ГЭС общей мощностью до 120 МВт. Общий объем вырабатываемой ими электроэнергии не превышает 300–400 млн кВт·ч в год, что составляет 0,23% от всей производимой в стране. По расчетам Ассоциации «Укрэнерго», технически достижимый потенциал развития малой гидроэнергетики Украины составляет 8,3 млн МВт·ч в год, или 4,8% электроэнергии, выработанной объединенной энергосистемой в 2009 г. В ближайшие 20 лет, согласно Энергетической стратегии до 2030 г., государство намерено обеспечить выработку малыми ГЭС 4,3 млрд кВт·ч, или 2,5% общего объема производимой электроэнергии.

Министерство топлива и энергетики рассматривает возможность строительства 58 гидро- и гидроаккумулирующих электростанций в бассейнах рек Днестр, Прут и Сирет. Проведенные Минтопэнерго исследования показали возможность создания на базе сухих горных емкостей Карпат 50 первоочередных противопаводковых энергетических комплексов, в составе которых будут 45 ГЭС и 13 ГАЭС. Их ввод в эксплуатацию позволит увеличить энергетическую мощность региона на 1 635 МВт, в том числе за счет ГЭС – на 55 МВт, ГАЭС – на 1 580 МВт. По расчетам министерства, окупаемость ГЭС с учетом установления в будущем «зеленых тарифов» на производимую ими электроэнергию составит 5–6 лет, а ГАЭС – 3–4 года.

Одной из ключевых проблем, сдерживающих дальнейшее развитие малой гидроэнергетики, является отсутствие гидротурбинного оборудования и комплектующих отечественного производства. Монополистом на сегодняшний день является ОАО «Турбоатом», который в состоянии производить малые гидротурбины, не уступающие в качестве продукции европейским производителям при несколько меньшей стоимости. Однако ассортимент малых и микрогидротурбин составляет три-четыре типоразмера, что не может удовлетворить все разнообразие имеющихся природных условий.

Анализ мирового рынка показывает, что данное направление получило широкое распространение. Сейчас известно около 300 фирм-производителей гидроэнергетического оборудования малой мощности с гидротурбинами разнообразных типов для широкого диапазона напоров и расходов воды. Диапазон напоров составляет  $H = 1\text{--}500$  м в. ст., расходов  $Q = 0.01\text{--}1,0$  м<sup>3</sup>/с, что обеспечивает диапазон мощностей малых и микрогидротурбин от 0,2 до 250 кВт, что удовлетворяет практически всем реальным условиям.

Поэтому разработка технических требований для создания нескольких новых типоразмеров малых и микрогЭС даже с учетом большого опыта ведущих мировых фирм, а также разработка новых типов гидротурбин является актуальной задачей. Ее решение вряд ли возможно без проведения комплекса расчетных и экспериментальных исследований для базовой гидротурбины каждого типоразмера с последующим определением основных параметров всего ряда турбин расчетным путем с использованием верифицированных экспериментально-программных комплексов.

Это вызывает необходимость создания установки для исследований агрегатов микрогЭС, которая позволила бы максимально использовать возможности применения высокоэффективного оборудования гидродинамических стендов лаборатории гидравлических машин ИПМаш НАН Украины.

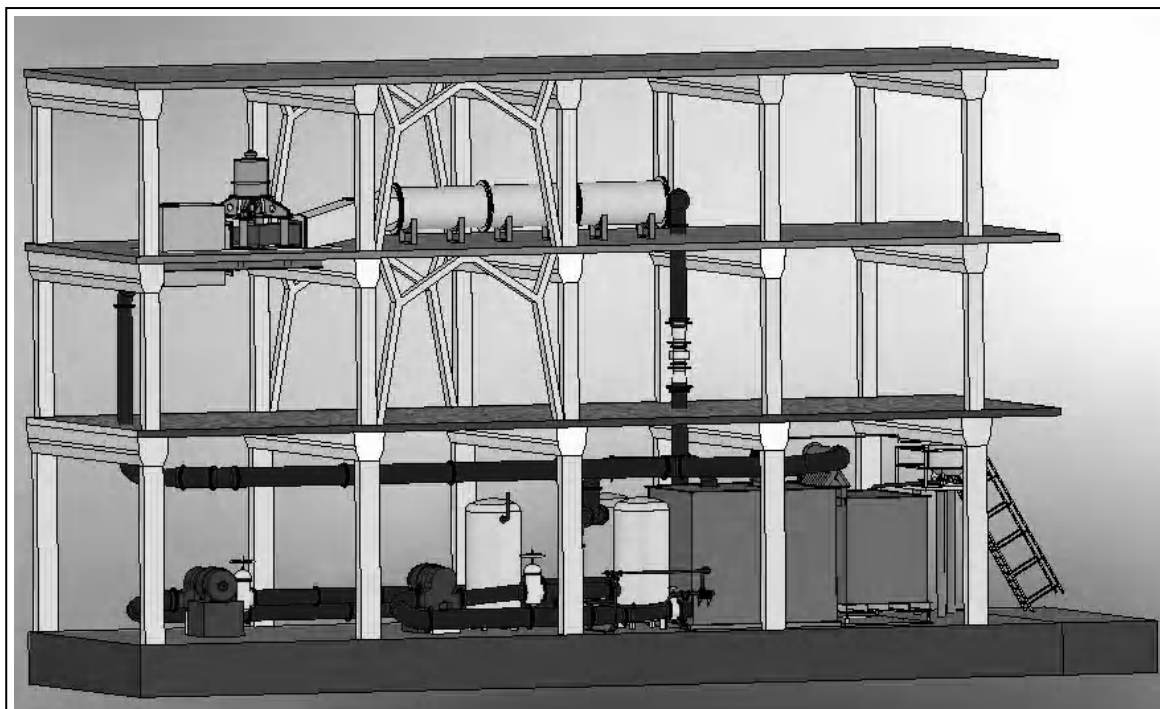
### Характеристика экспериментальных стендов лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины

В состав лаборатории гидромашин входят два энергокавитационных гидродинамических стенда – ЭКС-30 (для РО гидромашин) и ЭКС-15 (для ПЛ гидромашин), которые являются универсальными установками, обеспечивающими проведение комплексных экспериментальных исследований при создании проточных частей гидромашин. Гидросистема двух стендов выполнена общей и располагается на трёх этажах стендового корпуса ИПМаш НАН Украины. Это позволяет на каждом из стендов использовать оба циркуляционных насоса, которые могут быть включены как последовательно, так и параллельно для обеспечения требуемых испытательных параметров или подключаться для проведения градуировки расходомерных устройств стенда. В подвальном помещении расположено все силовое гидромеханическое и электротехническое оборудование. Расходомерные устройства установлены на вертикальных участках трубопроводов на уровне первого этажа. На втором этаже располагаются модельные блоки с балансирными динамометрами, напорные баки, баки нижнего бьефа, пульта управления и измерительно-вычислительный комплекс. Основные технические параметры гидродинамического стенда указаны в табл. 1, а общий вид стенда ЭКС-15 при подключении циркуляционных насосов в режиме градуировки расходомерных устройств – на рис. 1.

*Таблица 1. Параметры гидродинамического стенда ЭКС-15*

Маркировка стендов	Диаметр рабочего колеса модели, мм	Напор, м	Расход, м <sup>3</sup> /с	Мощность приводных двигателей циркуляционных насосов, кВт	Мощность балансирного динамометра, кВт
ЭКС-15 (для испытаний ПЛ гидромашин)	250–380	≤ 15	≤ 0,70	≤ 160	≤ 200

Применение датчиков дифференциального давления для измерения напора с погрешностью 0,04% фирмы Yokogawa (Япония), тензодатчика для системы измерения крутящего момента с погрешностью 0,1% фирмы НВМ (Германия), электромагнитного расходо-



*Рис. 1. Общий вид энергокавитационного стенда ЭКС-15 ИПМаш НАН Украины*

мера с относительной погрешностью 0,2% фирмы Yokogawa (Япония) позволило измерять такие параметры как напор, расход, крутящий момент с погрешностями, которые могут обеспечить среднеквадратичную суммарную погрешность определения КПД  $\pm (0,23...0,25)\%$ , что отвечает требованиям международного стандарта МЭК 60193 и соответствует уровню, достигнутому лучшими отечественными и зарубежными лабораториями.

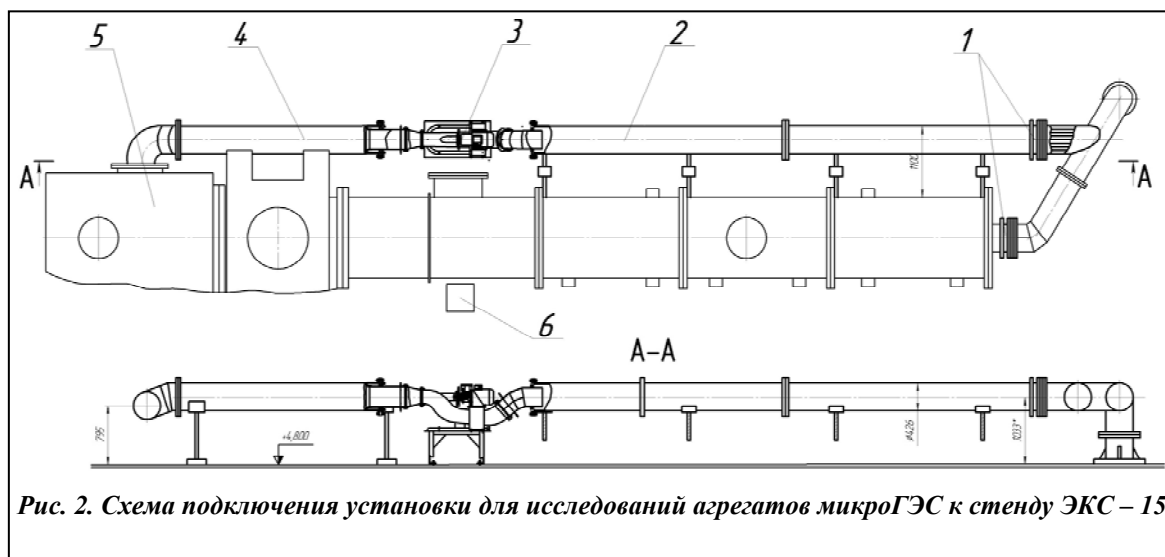
В табл. 2 приведены достигнутые значения погрешности определения основных параметров на стенде поворотлопастных гидромашин ЭКС-15 при испытании моделей гидромашин.

**Таблица 2. Сравнение погрешностей измерения параметров модельных гидротурбин**

Погрешность определяемых параметров	Погрешности измерения %	
	Рекомендации МЭК 60193, % (1999 г.)	Достигнутые значения, % (2008 г.)
систематическая погрешность измерения частоты вращения	$\pm 0,075$	$\pm 0,03$
систематическая погрешность измерения напора	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
систематическая погрешность измерения крутящего момента	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
систематическая погрешность измерения расхода	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$
систематическая погрешность измерения КПД	$\pm 0,25$	$\pm 0,23$
случайная погрешность определения КПД	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$
общая погрешность определения КПД	$\pm 0,27$	$\pm 0,25$

**Установка для исследований агрегатов микрогэс**

Основной особенностью разработанной установки является максимальное использование основного гидромеханического и электротехнического оборудования стенда ЭКС-15, к которому установка присоединяется при проведении исследований агрегатов микрогэс. Установка размещена на втором этаже стендового корпуса ИПМаш НАН Украины и представляет собой участок трубопровода диаметром  $D_y = 400$  мм, который проложен параллельно баку верхнего бьефа (рис. 2) и присоединен к напорному трубопроводу и баку ниж-



**Рис. 2. Схема подключения установки для исследований агрегатов микроГЭС к стенду ЭКС – 15**

него бьефа 5. При подключении установки к гидросистеме стенда бак верхнего бьефа отключается от гидросистемы при помощи заглушек 1 и поток воды проходит по трубопроводу установки 2,4 через проточную часть микрогЭС 3, попадая в бак нижнего бьефа 5.

В зависимости от конструкции микрогЭС гидротурбина с генератором устанавливается либо на прямолинейном участке трубопровода установки, либо на повороте в бак нижнего бьефа стенда. На рис. 2 показан пример размещения агрегата микрогЭС типа ПР-5-Г-20 мощностью 5 кВт производства ОАО «Турбоатом» на прямолинейном участке трубопровода.

В зависимости от величины генерируемой мощности в соответствии с международной классификацией мощность пикоГЭС составляет до 5 кВт, микрогЭС от 5 до 100 кВт, а малых ГЭС от 100 до 10000 кВт. Микро- и малые ГЭС могут работать как автономно на локальную сеть, так и отдавать энергию в энергосистему. Основными составными частями микрогЭС являются гидротурбина, электрический генератор и регулятор для стабилизации частоты и напряжения, параметры которых должны быть согласованы между собой для достижения максимальной эффективности использования водотока. В качестве генератора при мощности до 50 кВт обычно применяется электромашинка асинхронного типа или синхронного с возбуждением от постоянных магнитов, а для большей мощности – синхронного типа. От типа применяемого генератора зависит и тип регулятора, который может быть балластного типа, т. е. перераспределяющий нагрузку между потребителем и балластом или электрогидравлическим, т. е. регулирующим нагрузку за счет изменения вырабатываемой гидротурбиной мощности.

Агрегат микрогЭС выполняется чаще всего в виде моноблока, что не позволяет использовать штатный балансирный динамометр стенда для измерения величины полезной мощности агрегата микрогЭС. Это приводит к невозможности выделения из общего КПД агрегата КПД гидротурбины и генератора, т.к. отсутствуют зависимости крутящего момента и частоты вращения вала агрегата микрогЭС от величины напора и расхода. В разработанной установке предлагается для измерения величин крутящего момента и частоты вращения рабочего колеса микрогЭС применить современный торсионный датчик крутящего момента типа T10FS производства фирмы НВМ (Германия), метрологические характеристики которого превышают характеристики используемого на стенде ЭКС-15 системы измерения момента с использованием балансирного динамометра. Так, погрешность измерения крутящего момента составляет  $\pm 0,05\%$ , частоты вращения  $\pm 0,03\%$ . Установка датчика между валом гидротурбины и валом асинхронного генератора, как показано на рис. 3, позволяет устранить потери трения в подшипниках подвеса балансирных динамометров.

Датчик крутящего момента T10FS состоит из двух отдельных частей: ротора и статора. В состав ротора входит измерительный участок с установленными тензорезисторами и электронная система для бесконтактной передачи напряжения питания моста и измеренного сигнала через установленное на статоре сборное кольцо антенны с использованием электронной системы подачи напряжения и обработки сигнала, расположенной в корпусе статора. Измерение частоты вращения ротора производится с помощью оптического сенсора и кольца с количеством пазов  $z = 360$  шт.

Применение в качестве генератора микрогЭС ПР-5-Г-20 асинхронного двигателя АИР 112М4У2 позволяет использовать тиристорный регулятор частоты и напряжения 6 типа РНЧ-10, который устанавливается вместе с балластной нагрузкой вблизи агрегата микрогЭС (рис. 2), который предназначен для управления возбуждением генератора. Регулятор обеспечивает поддержание требуемых значений напряжения и частоты, защиту контролируемых электрических параметров по отклонениям от номинала, работу на автономную нагрузку или сеть, индикацию электрических параметров.

Торсионный датчик крутящего момента типа T10FS и регулятор напряжения РНЧ-10 могут быть использованы при проведении экспериментальных исследований на любых других типах микрогЭС, в том числе и серийных насосов [4], установленных на стенде и оснащенных асинхронными генераторами-двигателями мощностью до 15 кВт.

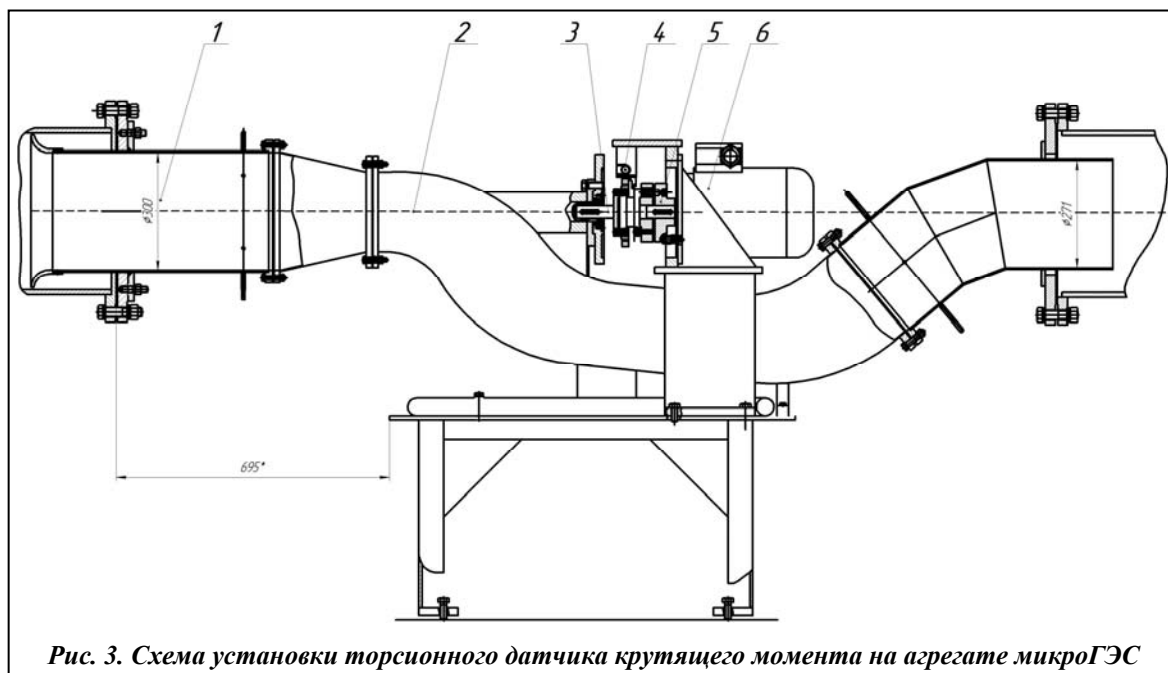


Рис. 3. Схема установки торсионного датчика крутящего момента на агрегате микроГЭС

#### Модернизация измерительно-вычислительного комплекса

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) стенда ЭКС-15, в состав которого входит комплект первичных датчиков, комплект РМЕ-модулей для обработки и преобразования сигналов первичных датчиков стенда и персональный компьютер (ПК), создан в соответствии с рекомендацией МЭК 60193. Основную задачу управления комплексом выполняет персональный компьютер, на базе которого создана система автоматизированного сбора и обработки информации при испытаниях моделей гидромашин, а прикладное программное обеспечение (ПО) позволяет реализовать следующие функции:

- генерацию базы данных датчиков стенда;
- получение градуировочных характеристик первичных датчиков стенда;
- коррекцию нулевых значений первичных датчиков;
- осреднение полученных значений и преобразование их в физические величины для получения протокола испытаний и построения характеристик;
- градуировку расходомерных устройств стендов;
- построение энергетических и кавитационных характеристик;
- хранение полученных данных эксперимента.

При создании установки для испытаний микрогэс, в связи с использованием новых первичных датчиков момента и частоты вращения и отключения старых, модернизации подверглись элементы схемы подключения и прикладное программное обеспечение комплекса. На рис. 4 приведена схема подключения датчиков установки для исследования агрегатов микрогэс, а на рис. 5 – структурная схема модернизированного измерительно-вычислительного комплекса стенда.

Создание на базе стенда поворотлопастных гидротурбин ЭКС-15 установки для исследований микрогэс позволит проводить энергокавитационные испытания микрогэс различных типов для получения отсутствовавшие ранее данных о значениях КПД и гидравлических параметрах гидротурбин микрогэс с минимально возможной в настоящее время погрешностью.

#### Выводы

Выполненная модернизация первичных датчиков и измерительно-вычислительного комплекса стенда ЭКС-15 обеспечила возможность проводить исследовательские энергока-

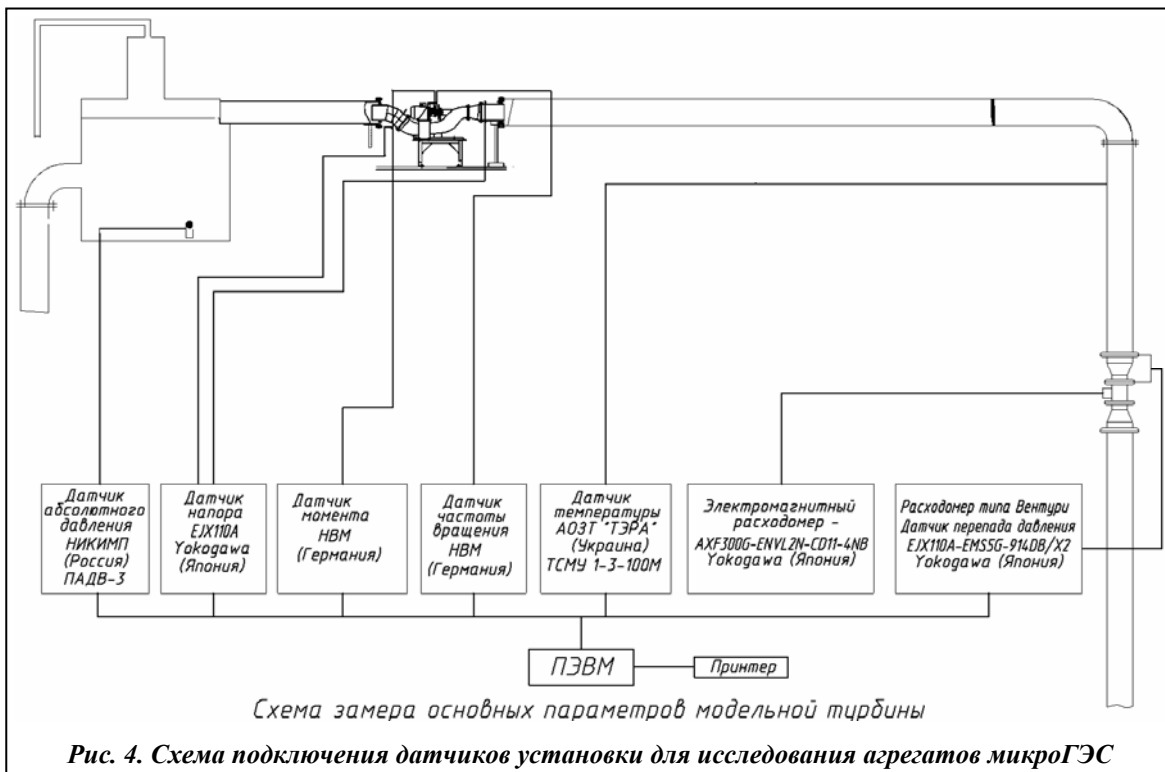


Рис. 4. Схема подключения датчиков установки для исследования агрегатов микроГЭС

витационные испытания агрегатов микрогэс с возможностью получения гидравлических и энергетических параметров моделей с высокой точностью.

Это позволяет использовать полученные экспериментальные данные для верификации программных комплексов, моделирующих трехмерное течение жидкости с целью их использования при разработке новых типоразмеров микрогэс и новых типов микротурбин без проведения экспериментальных исследований.

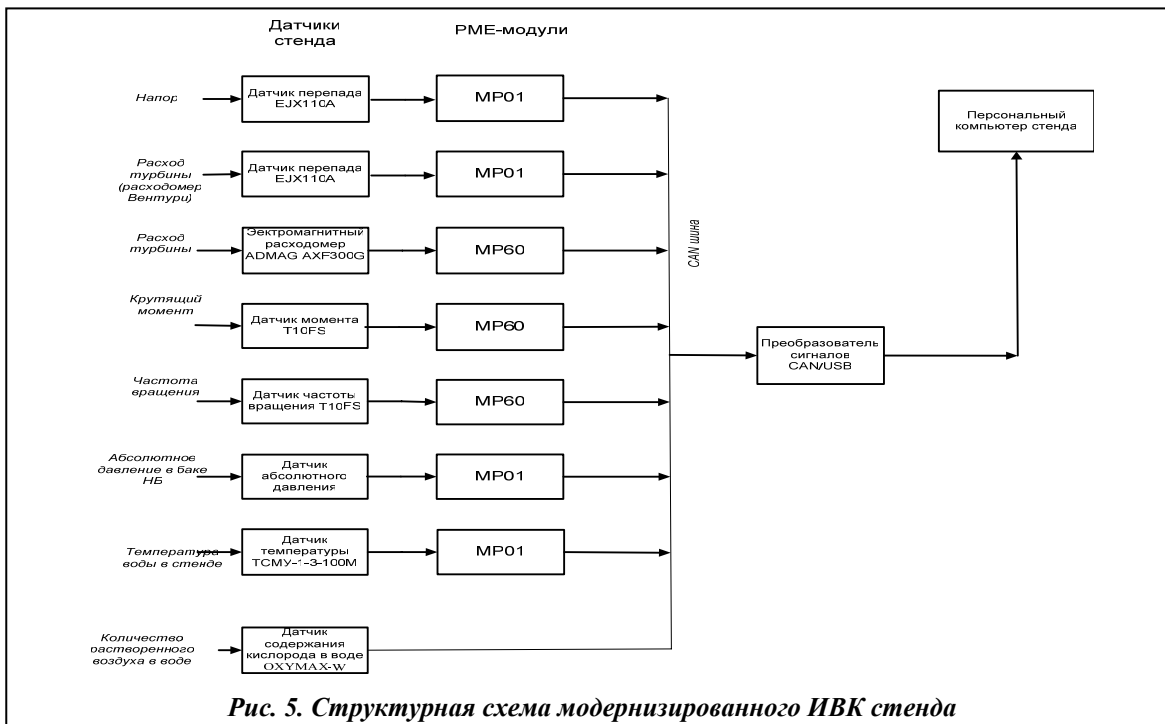


Рис. 5. Структурная схема модернизированного ИВК стенда

**Литература**

1. МЭК 60193. Модельные приемо-сдаточные испытания гидравлических турбин насосов, гидроаккумулирующих станций и насос-турбин. – 1999. – 567 с.
2. Установка УГ-1 для градуировки расходомеров энергокавитационных стендов / И. С. Веремеенко, С. В. Гладышев, В. Н. Дедков и др. // Метрологія та прилади. – 2010. – № 2. – С. 42–47.
3. Модернизация энергокавитационных стендов лаборатории гидромашин ИПМаш НАН Украины / И. С. Веремеенко, С. В. Гладышев, В. Н. Дедков и др. // Пробл. машиностроения. – 2010. – Т. 13, № 5. – С. 24–31.
4. Дедков В. Н. Применение серийных насосов в качестве гидротурбин для малой энергетики / В. Н. Дедков // Пробл. машиностроения. – 2011. – Т. 14, № 4. – С. 24–30.

Поступила в редакцию  
27.01.12

УДК 621.165

**Ю. М. Мацевитый**, акад. НАН Украины

**Ю. П. Антипцев**, канд. техн. наук

**В. Н. Голощапов**, канд. техн. наук

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины  
(г. Харьков, e-mail: matsevit@ipmach.kharkov.ua)

## **ВЫБОР ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПИКОВОЙ ТУРБИНЫ ДЛЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НАДСТРОЙКИ ЭНЕРГОБЛОКА К-300-240**

*Представлена концепция использования пиковой турбины в качестве высокотемпературной надстройки к энергоблоку мощностью 300 МВт. Получены ее начальные и конечные термодинамические параметры. Выполнено расчетное исследование термогазодинамических и конструктивных параметров активных и реактивных пиковых турбин в диапазоне изменения частот вращения ротора  $n = 50 \div 200 \text{ с}^{-1}$ . Выбран оптимальный вариант пиковой турбины с частотой вращения ротора  $n = 100 \text{ с}^{-1}$ . Приведена оценка прочностных характеристик рабочих лопаток указанной турбины.*

*Подана концепція використання пікової турбіни як високотемпературної надбудови до енергоблоку потужністю 300 МВт. Отримано її початкові та кінцеві термодинамічні параметри. Виконано розрахункове дослідження термогазодинамічних та конструктивних параметрів активних та реактивних пікових турбін у діапазоні змінення частот обертання ротора  $n = 50 \div 200 \text{ с}^{-1}$ . Обрано оптимальний варіант пікової турбіни з частотою обертання ротора  $n = 100 \text{ с}^{-1}$ . Наведена оцінка міцнісних характеристик робочих лопаток вказаної турбіни.*

Устойчивое функционирование энергетического комплекса Украины является важнейшей составляющей национальной безопасности государства. Одна из главных проблем энергетики Украины – несбалансированность электрогенерирующих мощностей с существенным дефицитом высокоманевренной составляющей. В настоящее время для покрытия пиков и провалов потребления электроэнергии в энергосистеме Украины используют непригодные для этого энергоблоки ТЭС мощностью 150–300 МВт, которые создавались в 50–60-е годы прошлого столетия для работы в базовом режиме. Для этого их переводят на функционирование при пониженных нагрузках, вплоть до 30–35 % номинальной, зачастую отключая в ночные часы, удерживая в горячем резерве и маневрируя нагрузкой в дневные часы по указаниям диспетчерской службы энергосистемы.