

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Кафедра «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии»

**РЕЖИМЫ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОР-ДВИГАТЕЛЕЙ
ГИДРОАККУМУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
В СОСТАВЕ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

Практикум
для студентов, обучающихся по направлению
13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

ISBN 978-5-7046-2898-9

© Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

УДК 621.313.32
ББК 31.261.62
Р 33

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

*Подготовлено на кафедре гидроэнергетики и возобновляемых источников
энергии*

Рецензенты: профессор, докт. техн. наук М.Г. Тягунов;
канд. техн. наук, доцент, и.о. зав. кафедрой «ГГЭЭС» Саяно-
Шушенского филиала ФГАОУ ВО «СФУ» А.А. Ачитаев

**Авторы: А.Г. Васьков, Р.М. Габидулин, В.А. Хохлов, П.С. Шуркалов,
Н.А. Ярда**

Р 33 Режимы работы генератор-двигателей гидроаккумулирующих
электростанций в составе энергосистемы [Электронный ресурс]: практикум /
А.Г. Васьков, Р.М. Габидулин, В.А. Хохлов и др. – Электрон. дан. – М.:
Издательство МЭИ, 2023. – 1 электрон. опт. диск (DVD-R).

Рассмотрены основные вопросы эксплуатации электрической части
синхронных генератор-двигателей, процессы пуска, регулирования
активной и реактивной мощности, частоты энергосистемы в автоматическом
и ручном режимах, работа генератор-двигателей в генераторном и
двигательном режимах.

Дается описание теоретических основ гидроаккумулирующих
электростанций. Рассмотрены основное применяемое оборудование и его
компоновки, варианты пуска гидроагрегатов гидроаккумулирующих
электростанций в насосный режим.

Составлено на основе технической документации к лабораторному
стенду EUG 3 Pumped Storage Power Plant.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлению
«Электроэнергетика и электротехника».

Минимальные системные требования:

Тип ЭВМ: ПК на базе Pentium IV и выше.

ОС: Windows XP и выше.

Дополнительное программное обеспечение: Adobe Acrobat Reader, SCADA
for PowerLab.

ISBN 978-5-7046-2898-9

©Национальный исследовательский университет «МЭИ», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Обозначения и сокращения.....	4
Описание лабораторного стенда.....	5
Общие указания к лабораторным работам.....	7
Лабораторная работа № 1. Исследование основных характеристик генератор-двигателя ГАЭС при работе в энергосистеме в различных режимах.....	8
Теоретическая часть	8
Экспериментальная часть	14
Вопросы и задачи для самопроверки	17
Лабораторная работа № 2. Исследование алгоритма автоматического пуска в генераторный режим и набор нагрузки генератор-двигателя ГАЭС	18
Теоретическая часть	18
Экспериментальная часть	25
Вопросы и задачи для самопроверки	27
Лабораторная работа № 3. Исследование работы генератор-двигателя ГАЭС в режиме покрытия пиковой нагрузки энергосистемы и компенсации реактивной мощности.....	28
Теоретическая часть	28
Экспериментальная часть	30
Вопросы и задачи для самопроверки	33
Список рекомендуемой литературы.....	34
Приложение А	35
Приложение Б	37
Приложение В.....	41
Приложение Г	43

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

L_1, L_2, L_3	– фазные токи линии, соединяющей ГАЭС с энергосистемой, А
M	– вращающий момент на валу гидроагрегата, Н·м
n	– частота вращения гидроагрегата, об/мин
$P_{\text{зад}}$	– заданная мощность синхронной машины, Вт
$P_{\text{факт}}$	– фактическая мощность синхронной машины, Вт
ΣP	– активная мощность ГА, Вт
ΣQ	– реактивная мощность ГА, В·Ар
ΣS	– полная мощность ГА, В·А
ГА	– гидроагрегат
ГАЭС	– гидроаккумулирующая электростанция
ГРАМ	– система группового регулирования активной мощности
ГРАРМ	– система группового регулирования активной и реактивной мощности
ГРНРМ	– система группового регулирования напряжения и реактивной мощности
ГЭС	– гидроэлектростанция
КПД	– коэффициент полезного действия
ПЛК	– программируемый логический контроллер
ХХГ	– холостой ход генератора
ХХТ	– холостой ход турбины

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Лабораторный стенд «Гидроаккумулирующая электростанция» (EUG 3 Pumped storage power plant) изготовлен фирмой Lucas-Nülle Lehr und Meßgeräte GmbH в Германии, поэтому подписи на стенде и интерфейс программы “SCADA Designer” выполнен с использованием английского языка. Внешний вид стенда представлен на рис. 1, название каждого блока приведено в Приложении А.



Рис. 1. Лабораторный стенд «Гидроаккумулирующая электростанция»

Основные элементы стенда.

1. Трехфазная синхронная машина с цилиндрическим ротором (номинальное напряжение 400/230 В, 50 Гц; номинальный ток 1,5 А; номинальное число оборотов 1500 об/мин; номинальная мощность 0,8 кВт; $\cos\varphi$ 0,8-1,0).

2. Синхронизирующий блок имеет следующий состав: синхронизирующий дисплей (3 лампы) для индикации напряжения и фазового сдвига; измеритель нулевого напряжения; измеритель двойной частотности; измеритель двойного напряжения; цифровой синхроскоп.

3. Многофункциональное реле (рис. 2) пригодно для управления, защиты и контроля генераторов. Функции управления: автоматическая синхронизация; автоматическая регулировка мощности; автоматическое распределение эффективной и реактивной мощности; функции защиты).

4. Блок управления гидроаккумулирующей электростанцией позволяет осуществлять управление и наблюдение за учебной системой «Насосная аккумулирующая электростанция» с помощью программы SCADA, интерфейс которой представлен в Приложении Б.

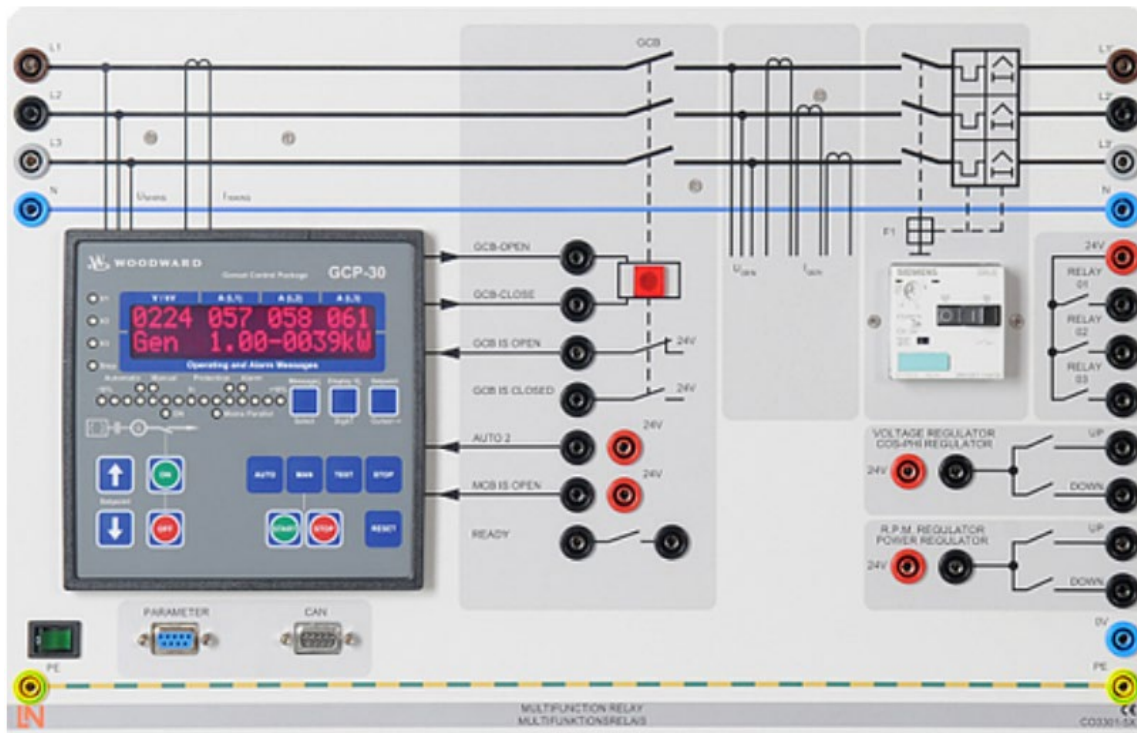


Рис. 2. Многофункциональное реле

Основные задачи, решаемые с помощью стенда.

1. Исследование задач эксплуатации гидроаккумулирующих электростанций.

2. Ознакомление с принципом действия гидроаккумулирующих электростанций:

- пуск и синхронизация синхронной электрической машины;
- ручное регулирование мощности: в генераторном и двигательном режиме;
- полуавтоматическое регулирование активной и реактивной мощности;
- режимы гидроаккумулирующих электростанций в интеллектуальных сетях;
- автоматическая компенсация колебаний активной и реактивной мощности.

3. Знакомство со системой SCADA для управления и регулирования установки.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

1. Все действия на стенде для проведения лабораторных работ должны выполняться в строгом соответствии с настоящими методическими указаниями и технической документацией к стенду, под контролем со стороны преподавателя. Выполнение любых операций на стенде без ведома преподавателя запрещено.

2. При проведении экспериментов с подключением электропитания на устройствах стенда возникает опасное для жизни напряжение. Поэтому используйте только защищенные провода и принимайте меры для недопущения случайного короткого замыкания.

3. Соблюдайте правильность соединения фаз (А, В, С). Помните: соединение проводов разных фаз друг с другом приводит к короткому замыканию.

4. Все устройства с элементами заземления или возможностью заземления должны быть обязательно заземлены.

5. Обязательно подключите нейтральную точку генератор-двигателя.

6. Ни в коем случае не допускайте асинхронного подключения генератор-двигателя к электросети.

7. Перед подключением устройств к электропитанию обязательно со всей тщательностью проверьте правильность соединения используемых модулей электрическими проводами. После остановки генератор-двигателя обязательно выключайте напряжение возбуждения.

8. Изменение схемы стенда допускается только после полного отключения от электропитания.

9. Не допускайте превышения предписанных значений номинального тока и номинального напряжения.

10. Конденсаторы могут сохранять электрический заряд и после выключения, т.е. их клеммы могут находиться под напряжением.

11. Не работайте с удаленными кожухами валов и сцеплений.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРАТОР-ДВИГАТЕЛЯ ГАЭС ПРИ РАБОТЕ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Цель работы: изучение основ работы генератор-двигателей ГАЭС в энергосистеме, приобретение навыков управления генератор-двигателем ГАЭС в процессе его пуска.

Теоретическая часть

Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС) представляют собой гидроэлектростанции (ГЭС), оборудованные агрегатами для гидроаккумулирования – для запасаания воды не простым накоплением воды в водохранилище, а перекачиванием ее с нижнего бьефа посредством силового оборудования станции [1]. Конструктивно ГАЭС включает как минимум два бассейна (бьефа)¹ – верхний и нижний, – между которыми устанавливается соединенное с ними системой водоводов и других гидротехнических сооружений здание ГАЭС, внутри которого размещается основное и вспомогательное оборудование станции (рис. 3). Возникающая разность высотных отметок (уровней) между бассейнами называется напором (измеряется в метрах) и используется для работы основного оборудования ГАЭС. Для строительства ГАЭС требуются хорошие напоры, для этого необходимо правильно выбирать площадки для строительства с существенными перепадами высот. Наибольший напор, достигнутый на ГАЭС, составляет 1403 м (ГАЭС Santa Fiorano, Италия). По состоянию на 2022 г., есть проекты ГАЭС с напорами до 1500 м (ГАЭС Sillahalla в Индии и Callio в Финляндии).

Главным силовым оборудованием на ГАЭС являются гидроагрегаты, каждый из которых состоит из гидравлической (турбина либо насос) и одной электрической (генератор либо двигатель соответственно) машин.

ГАЭС может работать в турбинном и насосном режимах, иначе эти режимы называются генераторным и двигательным соответственно:

- при работе ГАЭС в турбинном режиме включаются генератор и турбина. Активная мощность гидроагрегата – положительная (от агрегата в энергосистему). Вода подается из верхнего бассейна в нижний под действием силы тяжести, сбросом, и раскручивает турбину. Турбина вращает генератор, который выдает электроэнергию в энергосистему. Такой режим также называется разрядкой ГАЭС (редко) и используется обычно в дневные часы,

¹ Может включать и больше количество бассейнов (так называемые компенсационные бассейны).

когда электроэнергия, продаваемая на энергетических рынках, более дорогая по стоимости;

- при работе ГАЭС в насосном режиме включаются двигатель и насос. Активная мощность гидроагрегата – отрицательная (к агрегату со стороны энергосистемы). Электродвигатель включается в сеть и раскручивает насос, который перекачивает воду из нижнего бассейна в верхний. Такой режим также называется зарядкой ГАЭС (редко) и используется обычно в ночные часы, когда электроэнергия, продаваемая на энергетических рынках, имеет низкую стоимость. Энергия, используемая на закачку воды из нижнего бассейна в верхний, покупается из энергосистемы, и за счет того, что цена приобретения энергии на ГАЭС меньше, чем цена продажи, получается экономическая выгода при работе ГАЭС подобным образом.

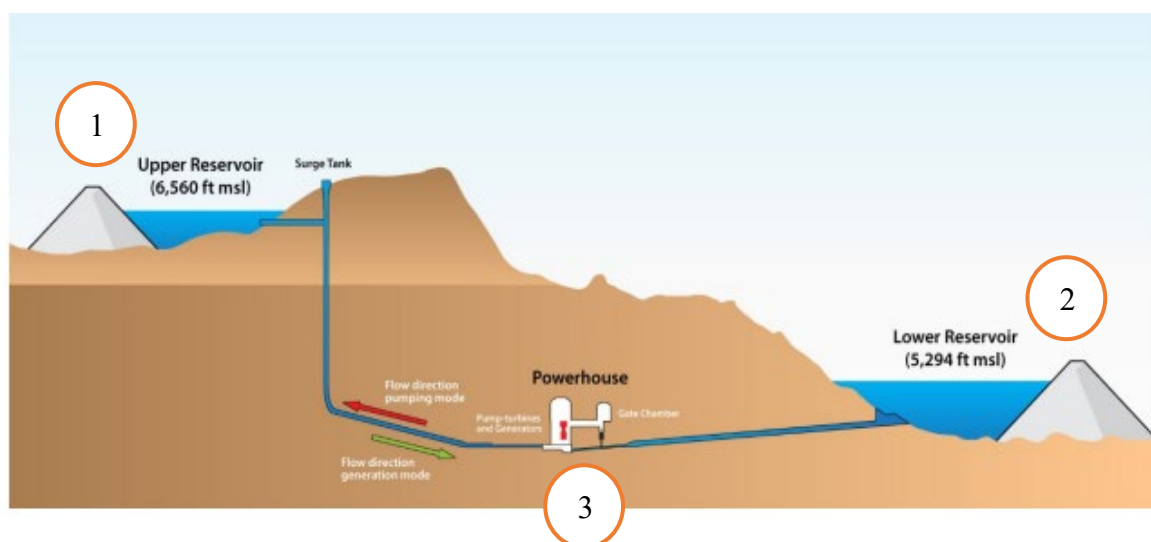


Рис. 3. Принципиальная схема ГАЭС Big Chino:

1 – верхний бассейн (24,3 млн м³); 2 – нижний бассейн (24,4 млн м³);
3 – подземное здание ГАЭС

Как показали исследования, проведенные на кафедре гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», характерна пиковая зависимость эффективности ГАЭС от отношения долей полезного объема – верхнего к нижнему (рис. 4). С повышением этого отношения в среднем повышается эффективность. При этом пик значения КПД ГАЭС наблюдается около значения отношения долей полезных объемов «1». Таким образом, наилучшим случаем является равенство долей полезных объемов верхнего и нижнего бассейнов относительно полных.

Генератор и турбина, электродвигатель и насос могут быть попарно объединены с выполнением одной машины нескольких функций (образуя

генератор-двигатель и насос-турбину), создавая режимы, характерные только для ГАЭС совмещенного типа:

- двигатель-генератор – это электрическая машина, которая может работать как электродвигатель, потребляя мощность из энергосистемы, либо как генератор, выдавая мощность в энергосистему. В этой и других лабораторных работах на стенде моделируется работа именно генератор-двигателя;
- насос-турбина – это гидравлическая машина, которая может работать как турбина либо насос, перекачивающий воду вверх за счет потребляемой из сети электроэнергии. Рабочие колеса насос-турбин имеют радиально-осевой или диагональный тип².

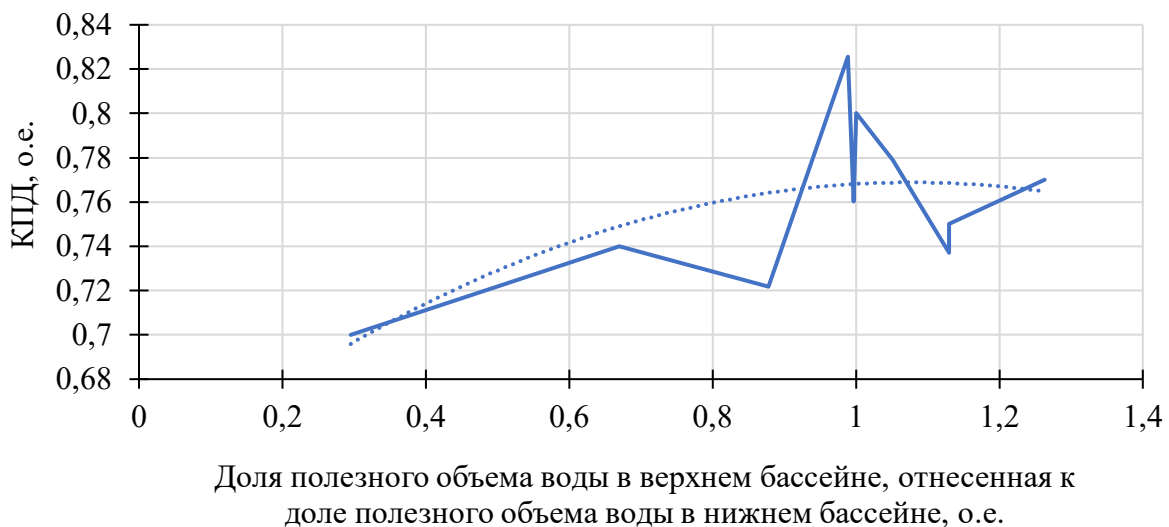


Рис. 4. Зависимость КПД ГАЭС от отношения долей полезного объема бассейнов

Такие машины называются обратимыми (реверсивными). Режим работы изменяется в зависимости от направления вращения (по часовой, либо против часовой стрелки). Для изменения направления вращения трехфазной электрической машины необходимо поменять две ее фазы местами (например, А и С).

На ГАЭС применяются различные компоновки описанного оборудования: двухмашинная (генератор-двигатель и насос-турбина), трехмашинная (генератор-двигатель, насос и турбина) и четырехмашинная (генератор, двигатель, насос и турбина). Двухмашинная компоновка является наиболее экономной и компактной, но не позволяет на одной гидравлической машине получать максимум КПД при работе и в режиме турбины, и в режиме насоса; применяется на многих ГАЭС. Трехмашинная схема лишена указанного недостатка и также часто применяется на ГАЭС, однако является более дорогой и менее

² На ГАЭС диагональные рабочие колеса используются только в качестве обратимых насос-турбин.

компактной. Четырехмашинная схема применяется крайне редко, поскольку является достаточно затратной, и включает четыре отдельные машины. Стоит отметить, что на одной ГАЭС могут быть гидроагрегаты различных компоновок. Примеры компоновок приведены на рис. 5.

Оборудование ГАЭС в большинстве случаев является синхронным, т.е. гидроагрегаты находятся в работе с поддержанием постоянной (синхронной) частоты вращения. Это необходимо для поддержания частоты переменного тока в энергосистеме в допустимых пределах³ для обеспечения баланса энергопотребления, надежности энергосистемы. Как известно, частота вращения электрической машины и частота выдаваемой ей напряжения напрямую связаны. Однако на ряде ГАЭС применяются асинхронные гидроагрегаты, которые могут работать в некотором диапазоне частот вращения: например, оборудование швейцарской ГАЭС, выполненное по двухмашинной схеме, работает с номинальной частотой вращения 428,6 об/мин и допустимыми отклонениями -10% ... +7%. Асинхронные машины применяются потому, что максимальный КПД турбины и насоса достигаются при разных частотах вращения.

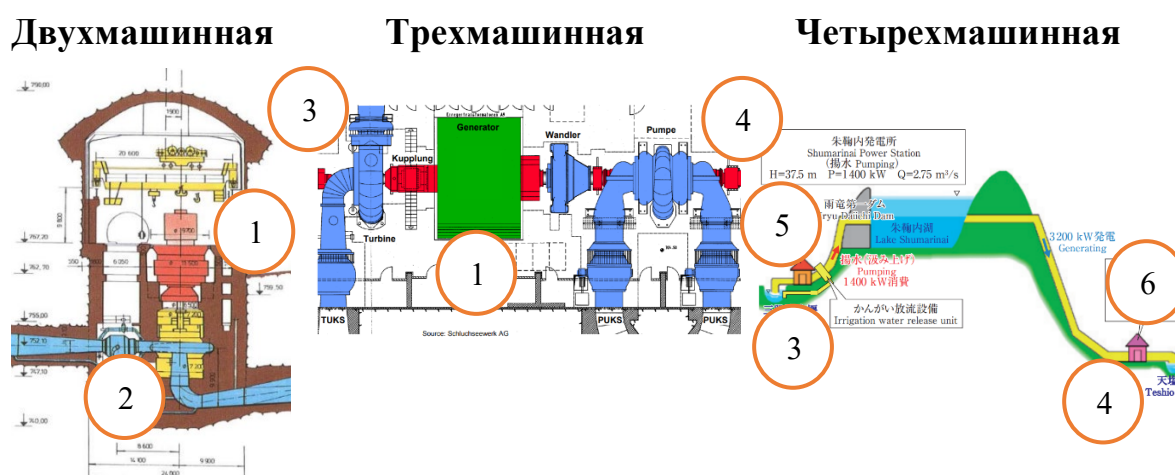


Рис. 5. Примеры компоновок оборудования ГАЭС:

1 – генератор-двигатель; 2 – насос-турбина; 3 – турбина; 4 – насос; 5 – генератор;
6 – электродвигатель

³ В России номинальная частота переменного тока составляет 50 Гц. В первой синхронной зоне Единой энергетической системы России значения частоты должны находиться в пределах $50 \pm 0,05$ Гц с допустимым отклонением значений частоты в пределах $50 \pm 0,2$ Гц. Во второй синхронной зоне Единой энергетической системы России, технологически изолированных территориальных электроэнергетических системах, в энергорайонах (энергоузлах), временно выделенных на изолированную работу от первой синхронной зоны Единой энергетической системы России, а также в первой синхронной зоне Единой энергетической системы России при ее работе в вынужденном режиме значения частоты должны находиться в пределах $50 \pm 0,2$ Гц [2].

Гидроагрегаты ГАЭС, в отличие от ГЭС, имеют два вида активной мощности – турбинную и насосную, которые обычно различаются. Как показали исследования, проведенные на кафедре гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», наиболее оптимальной в случае двухмашинной схемы основного оборудования является работа ГАЭС с небольшим различием в мощностях турбинного и насосного оборудования (превышение турбинной мощности над насосной в пределах до 10%). Существенные отличия насосной и турбинной мощностей (в ту или иную сторону) в среднем отрицательно влияют на эффективность эксплуатации ГАЭС (рис. 6, сверху). Для трехмашинной схемы оптимальной является работа с меньшими значениями насосной мощности по сравнению с турбинной (рис. 6, снизу).

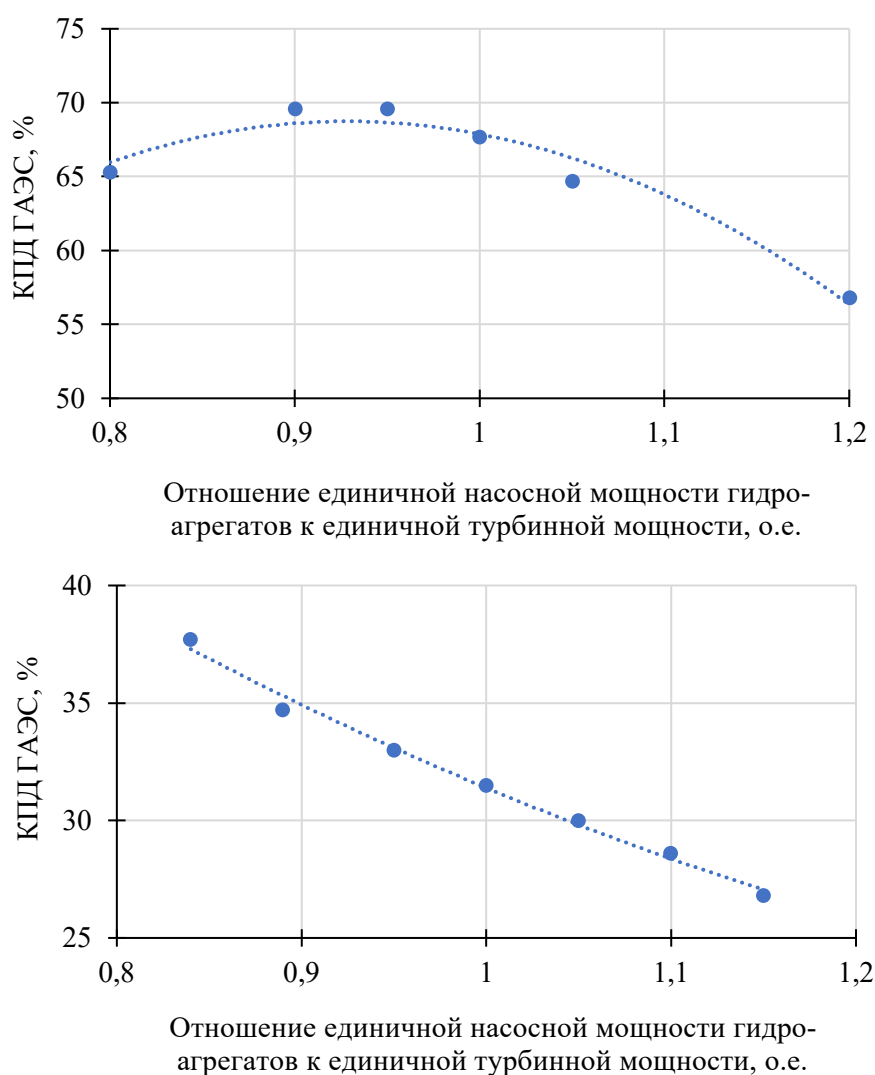


Рис. 6. Зависимость КПД ГАЭС с оборудованием, выполненным по двухмашинной (сверху) и трехмашинной (снизу) схемам, от отношения единичной насосной мощности к единичной турбинной мощности агрегатов

ГАЭС выполняют ряд функций, работая в составе энергосистемы:

- регулирование частоты и активной мощности (в особенности – в пиковой и полупиковой частях графика нагрузки энергосистемы);
- повышение системной надежности в результате выравнивания нагрузки низкоманевренных электростанций, для которых колебания нагрузки нежелательны (тепловых, атомных). ГАЭС используются как мобильные энергоустановки, которые могут быть включены в работу за время порядка двух минут (в турбинном либо насосном режиме) – при резком возрастании нагрузки ГАЭС включаются в генераторном режиме, при существенном провале нагрузки (особенно в ночное время) – в двигательном. Агрегаты ГАЭС многократно пускаются в работу в том или ином режиме в течение суток. Типовой график работы ГАЭС в течение суток представлен на рис. 7;
- работа в режиме синхронного генератора – осушение гидравлической машины от воды и работа электрической машины в качестве электродвигателя, только с реактивной мощностью, в целях поддержания нужного уровня напряжения в узлах энергосистемы путем поддержания нужной величины реактивной мощности;
- аварийный источник электроснабжения в энергосистеме (“black start”), используемый при внезапной потере генерирующих мощностей других станций (например, в результате аварии).

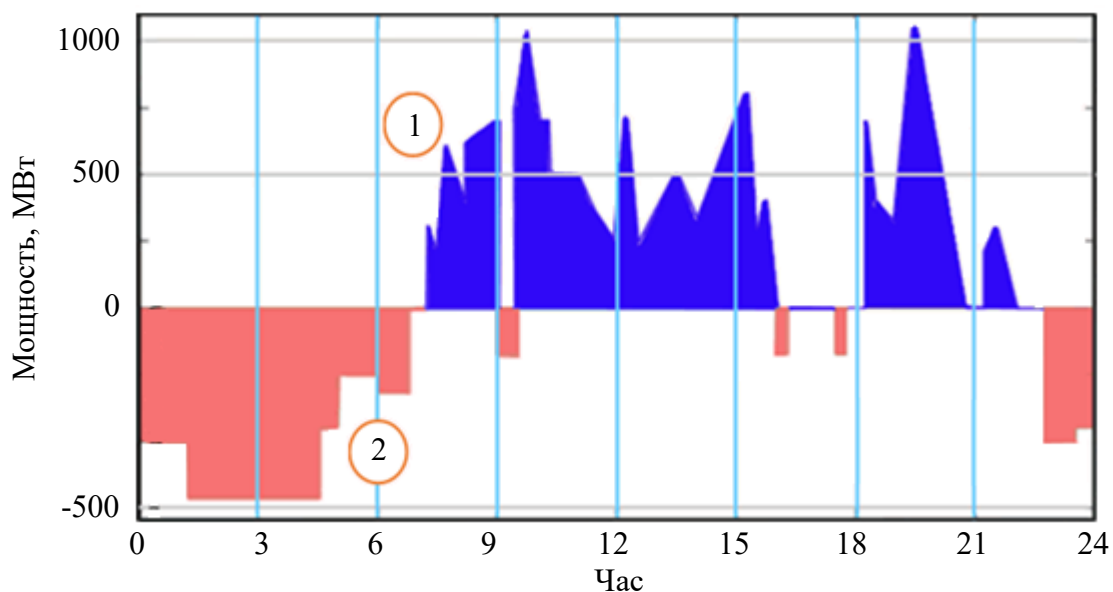


Рис. 7. Типовой график работы ГАЭС в течение суток:

1 – генераторный режим; 2 – насосный режим

Некоторые ГАЭС работают в составе водохозяйственных систем, к примеру, обеспечивая близлежащие территории водой от более полноводных источников в засушливые периоды (Кубанская ГАЭС).

Активная мощность на ГАЭС регулируется изменением расхода воды через гидроагрегаты, реактивная – изменением тока ротора электрической машины (т.е. регулированием возбуждения). При превышении током ротора некоторой величины электрическая машина работает в режиме перевозбуждения, выдавая в энергосистему реактивную мощность (положительная величина); при токе ротора, меньшей указанной величины, – в режиме недовозбуждения, т.е. потребления реактивной мощности из энергосистемы (отрицательная величина). Реактивная мощность гидроагрегатов ГАЭС ограничивается в соответствии с PQ -диаграммой электрической машины (Приложение Г).

Экспериментальная часть

1. Для проведения лабораторной работы необходимо собрать схему установки согласно рис. 8.

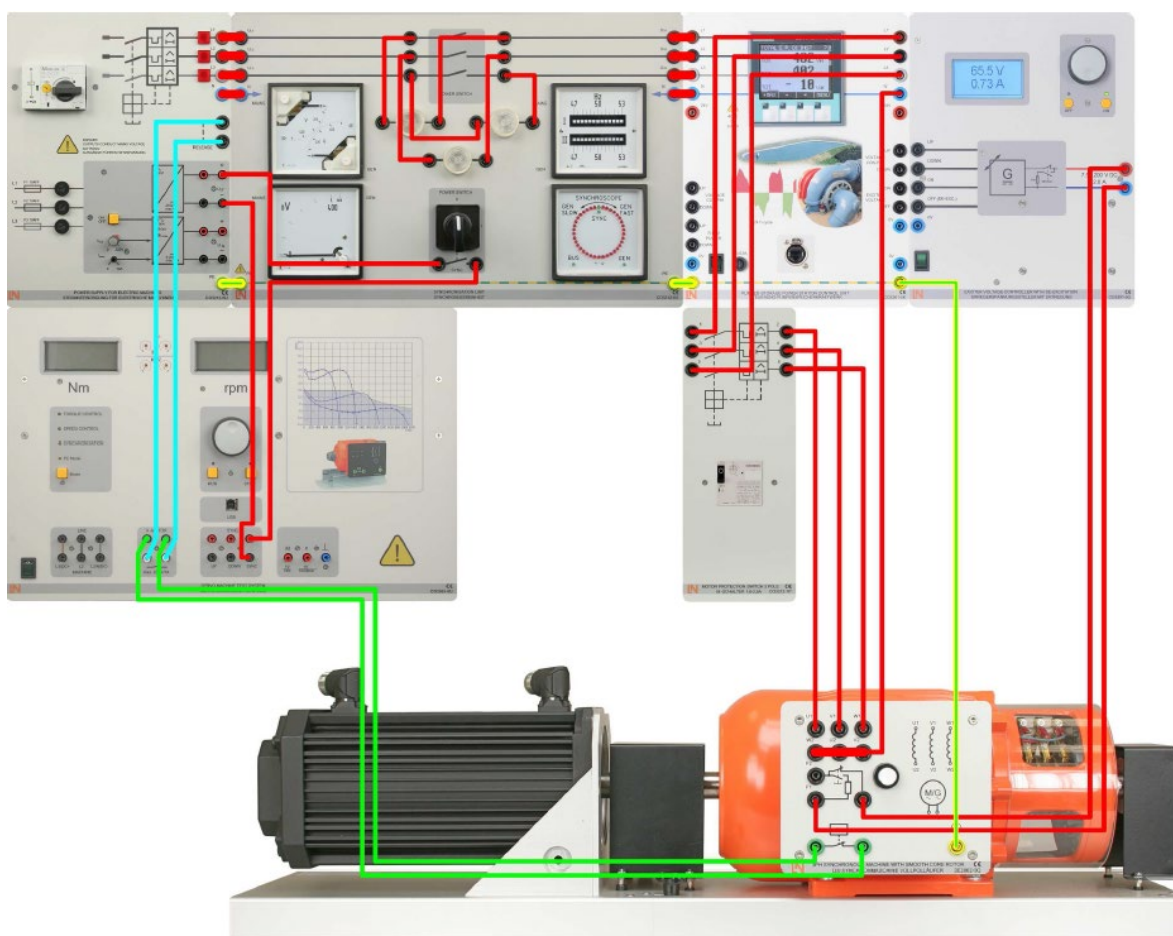


Рис. 8. Схема соединения модулей лабораторной установки проведения лабораторной работы №1

После сборки схемы необходимо, чтобы преподаватель проверил правильность выполненных соединений.

2. Включить испытательный серво-стенд (блок 10)⁴.
3. На испытательном серво-стенде для генератор-двигателя (блок 10) нажатием кнопки “Mode” необходимо выбрать режим регулирования скорости и синхронизации (отображается сигнализация “SPEED CONTROL” и “SYNCHRONISATION”).
4. Вращением колеса регулятора напряжения возбуждения (блок 11) выставить напряжение возбуждения равное 45 В.
5. Включить электропитание на блоке питания (блок 5).
6. Включить автоматический выключатель на блоке защит электродвигателя (блок 1).
7. Нажать и удерживать кнопку на синхронной электрической машине (блок 12). При этом ротор машины замыкается сопротивлением накоротко, и машина запускается в режиме асинхронного двигателя. Не отпуская кнопку, одновременно с этим:

- включить напряжение возбуждения нажав на кнопку “ON” на регуляторе напряжения возбуждения (блок 11);
- перевести ключ “POWER SWITCH” на блоке синхронизации (блок 9) в положение I, тем самым запустив синхронную электрическую машину в режиме электродвигателя.

Как только скорость вращения синхронной электрической машины прекратит возрастать, отпустить кнопку на машине (блок 12).

8. Включить испытательный стенд (блок 10) нажатием на кнопку “RUN”. При пуске двигателя испытательный стенд находится в режиме регулирования вращающего момента “TORQUE CONTROL”. Перемещением установочного колеса можно повышать или понижать вращающий момент (скорость вращения машины зависит от тока сети). Таким образом, при перемещении установочного колеса происходит прямое регулирование активной мощности синхронной электрической машины.

9. Реактивная мощность генератора регулируется напрямую путем повышения напряжения возбуждения.

10. Установить мощность машины сначала примерно на 0 В·А (возбужденный генератор в сети без нагрузки), что соответствует отсутствию как активной, так и реактивной мощности. Во всех экспериментах в качестве основного измерительного прибора необходимо использовать цифровой прибор системы управления ГЭС (блок 8) – пункт меню цифрового прибора № 7.0 “ ΣS , ΣP и ΣQ ” (полная, активная и реактивная мощности). Понаблюдать за данными измерений.

⁴ Здесь и далее – нумерация блоков приводится в соответствии с Приложением А.

11. Записать результаты измерений фазных токов линии электропередачи энергосистемы L_1, L_2, L_3 , мощностей $\Sigma S, \Sigma P, \Sigma Q$ (блок 8), вращающего момента M , частоты вращения n (блок 10) синхронной электрической машины в соответствующий столбец табл. 1.

12. Установить активную мощность синхронной электрической машины равной 500 Вт при $\cos\varphi = 1$ (реактивная мощность равна нулю). Понаблюдать за данными измерений. Результаты измерений занести в табл. 1.

13. Установить активную мощность синхронной электрической машины равной 500 Вт при $\cos\varphi = 0,8$ (индуктивная нагрузка, т.е. генерация реактивной мощности $\Sigma Q > 0$).

Если машина начнет работать нестабильно, установить $\cos\varphi = 1$.

Понаблюдать за данными измерений. Результаты измерений занести в табл. 1.

14. Установить активную мощность синхронной электрической машины равной 500 Вт при $\cos\varphi = 0,8$ (емкостная нагрузка, т.е. потребление реактивной мощности $\Sigma Q < 0$).

Если машина начнет работать нестабильно, установить $\cos\varphi = 1$.

Понаблюдать за данными измерений. Результаты измерений занести в табл. 1.

15. Установить активную мощность генератор-двигателя равной нулю. Понаблюдать за данными измерений. Результаты измерений занести в табл. 1.

16. Установить реактивную мощность генератор-двигателя равной нулю. Понаблюдать за данными измерений.

17. Понизить ток синхронной машины примерно до значения 0 А (блок 11).

18. Разомкнуть выключатель блока синхронизации (блок 9).

19. Отключить напряжение возбуждения нажатием на кнопку “Off” на блоке 11.

20. Для остановки синхронной электрической машины нажать на кнопку “Стоп” на испытательном стенде (блок 10).

21. Сообщить преподавателю о завершении работы и отойти от стенда, чтобы преподаватель отключил стенд.

Таблица 1

Результаты измерений, полученные в ходе лабораторной работы № 1

	$\Sigma S = 0$	$\Sigma P = 500 \text{ Вт}$			$\Sigma P = 0 \text{ Вт}$
		$\cos\varphi = 1$	$\cos\varphi = 0,8$		
			$\Sigma Q > 0$	$\Sigma Q < 0$	
$L_1, \text{ А}$					
$L_2, \text{ А}$					
$L_3, \text{ А}$					
$\Sigma S, \text{ В} \cdot \text{А}$					
$\Sigma P, \text{ Вт}$					
$\Sigma Q, \text{ В} \cdot \text{Ар}$					
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$					
$n, \text{ об/мин}$					

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Почему при работе генератор-двигателя на холостом ходу, без нагрузки вращающий момент не равен нулю?
2. Влияет ли реактивная мощность на вращающий момент генератор-двигателя? Если да, то указать, каким образом.
3. Что означает работа синхронной машины в режиме перевозбуждения и недовозбуждения?
4. Для чего частота вращения синхронной электрической машины поддерживается постоянной?
5. Каким образом регулируется реактивная мощность синхронной электрической машины?
6. В каком режиме работает синхронная электрическая машина при $\Sigma P = 350 \text{ Вт}$ и $\Sigma Q = -100 \text{ В} \cdot \text{Ар}$ – генераторном или двигательном?
7. Пусть $\Sigma P = -150 \text{ Вт}$ и $\Sigma Q = 100 \text{ В} \cdot \text{Ар}$. Чему равны полная мощность и коэффициент мощности синхронной электрической машины?
8. По данным Приложения В определите номинальный коэффициент мощности генератор-двигателей Загорской ГАЭС.
9. Чем с точки зрения электрической схемы отличаются генераторный и двигательный режимы работы синхронной электрической машины?
10. Что необходимо сделать для изменения направления вращения трехфазной электрической машины?
11. Какие режимные ограничения накладываются на реактивную мощность гидроагрегатов ГАЭС и где отражаются эти ограничения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПУСКА В ГЕНЕРАТОРНЫЙ РЕЖИМ И НАБОР НАГРУЗКИ ГЕНЕРАТОР-ДВИГАТЕЛЯ ГАЭС

Цель работы: изучение основ процессов при автоматическом пуске генератор-двигателей ГАЭС в генераторный режим и принципов регулирования активной нагрузки.

Теоретическая часть

Одним из основных преимуществ объектов гидроэнергетики является их маневренность – возможность быстрого пуска в течение нескольких минут в том или ином режиме работы. В отличие от тепловых, атомных станций, гидроагрегаты ГАЭС не требуют предварительного разогрева металла. Обобщенные данные по маневренным характеристикам гидроагрегатов ГАЭС представлены в табл. 2.

Таблица 2

Усредненное время перевода гидроагрегатов ГАЭС между водноэнергетическими режимами (в формате «мм:сс»)

Схема гидроагрегата ГАЭС	Время перехода					
	О→ТР	НР→ТР	ТР→НР	ТР→О	НР→О	О→ХХ
2М	01:20	01:45	10:30	02:40	01:20	01:09
3М	01:20	00:50	00:50	02:40	01:20	01:09
Способ пуска в насосный режим	О→НР					
	2М	3М				
Прямой асинхронный	00:40	00:18				
Асинхронный от пониженного напряжения сети	03:00	02:00				
Вспомогательным электродвигателем	08:00	07:00				
Частотный пуск	05:00	05:00				
«Спина к спине»	02:30	01:30				

Примечание: 2М – двухмашинная схема; 3М – трехмашинная схема; О – останов; ТР – турбинный режим; НР – насосный режим; ХХ – холостой ход генератора.

Процесс пуска гидроагрегата представляет собой комплекс операций как в электрической (возбуждение генератора, включение выключателя и др.), так и в гидравлической части (подача воды, открытие

направляющего аппарата либо осушение в случае пуска в режиме синхронного компенсатора и др.). На современных ГАЭС все указанные операции реализуются автоматически, с минимальным участием персонала. Некоторые ГАЭС управляются полностью дистанционно из диспетчерских центров (например, ГАЭС Kisenyuama мощностью 466 МВт в турбинном режиме и 480 МВт в насосном режиме, Япония).

Последовательность переходов между режимами работы гидросилового оборудования ГАЭС визуально можно отразить на оборотно-расходной характеристике $n = f(Q)$ обратимого гидроагрегата (рис. 9). Стрелками показаны непосредственно направления изменения состояния гидроагрегата – из начального состояния в целевое. При этом важно отметить, что в некоторых случаях перевода между режимами требуется переход через промежуточные эксплуатационные состояния. Так, в классических двухмашинных схемах, при которых насосный и турбинный режим отличаются, в том числе направлением вращения гидроагрегата (по часовой стрелке/против часовой стрелки), при переводе гидроагрегата из турбинного режима в насосный промежуточным режимом работы оборудования является его останов.

Интересной особенностью обладает процесс останова обратимого гидроагрегата из насосного режима, как показано на рис. 9. Поскольку вода в естественном состоянии движется под действием гравитации от больших высотных отметок к меньшим, то при отключении гидроагрегата, работающего в насосном режиме, от электрической сети, пока открыт направляющий аппарат, спустя небольшое время исчезает тяга насоса и вода под действием тяжести устремляется в нижний бассейн, раскручивая гидроагрегат, меняя направление его вращения и, таким образом, переводя гидроагрегат турбинный режим без электрической нагрузки.

В большинстве случаев мощность гидроагрегатов ГАЭС в насосном режиме не регулируется – гидроагрегат работает в насосном режиме с постоянным открытием направляющего аппарата порядка 50% от полного. Такая особенность связана с возникающей при регулировании открытия направляющего аппарата кавитацией в насосном режиме и возникающими вибрациями. Поэтому в течение работы гидроагрегата в насосном режиме постепенно увеличивается напор (уровень нижнего бьефа при откачке снижается, а верхнего – повышается) и снижается расход в соответствии с напорно-расходной характеристикой насоса. Также по указанной причине в насосном режиме гидроагрегаты ГАЭС не работают в режимах регулирования частоты в энергосистеме.

Однако в турбинном режиме регулирование активной мощности и связанной с ней частоты осуществляется, так же, как и у гидроагрегатов ГЭС – изменением открытия направляющего аппарата. При необходимости повышения активной мощности лопатки направляющего

аппарата разворачиваются таким образом, чтобы увеличилась величина просвета между ними (т.е. открытия), что приводит к повышению расхода воды через гидроагрегат; аналогично осуществляется закрытие направляющего аппарата при необходимости снижения активной мощности гидроагрегата. Таким образом, мобильность гидроагрегата в турбинном режиме определяется временем отклика системы регулирования (контроллеров), разворота лопаток направляющего аппарата и инерционными характеристиками гидроагрегата. К примеру, скорость изменения нагрузки гидроагрегатов проектной ГАЭС Gordon Butte (США) установленной мощностью гидроагрегата 134 МВт (в турбинном и насосном режимах) достигает 20 МВт/с, а для автоматического набора номинальной нагрузки в турбинном режиме гидроагрегатов Загорской ГАЭС (турбинная мощность гидроагрегата – 200 МВт, насосная – 220 МВт) требуется одна минута, в насосном режиме – 50 секунд.

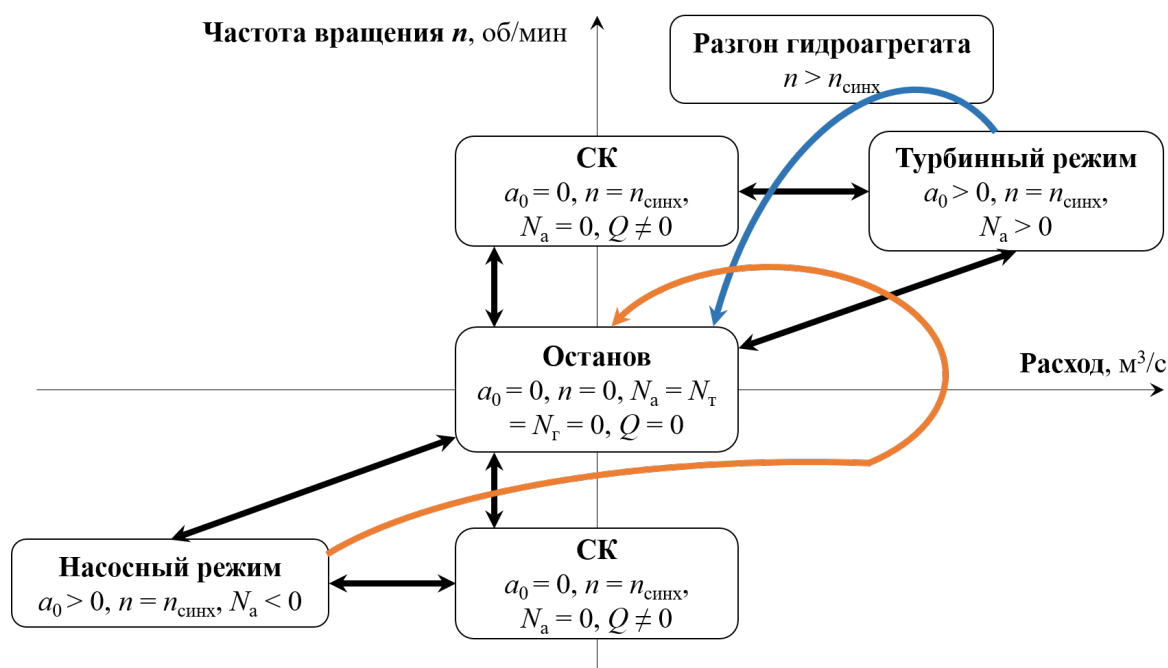


Рис. 9. Оборотно-расходная характеристика $n = f(Q)$ обратимого гидроагрегата: СК – режим синхронного компенсатора; a_0 – открытие направляющего аппарата, мм; n – частота вращения, об/мин; N – активная мощность, Вт; Q – реактивная мощность, В·Ар
(«а» – гидроагрегата; «г» – генератора; «синх» – синхронный; «т» – турбины)

Примечание: Положительное значение частоты вращения n соответствует направлению вращения гидроагрегата в турбинном режиме, отрицательное значение – в насосном режиме. Положительное значение расхода соответствует турбинному расходу в нижний бассейн, отрицательное значение – насосному расходу в верхний бассейн.

Алгоритм системы управления синхронной электрической машиной лабораторного стенда включает следующие последовательные этапы, выполняемые после подачи импульса на автоматический пуск:

1. Включение привода (серво-стенда) генератор-двигателя.

Сервопривод в данном стенде используется для разгона генератор-двигателя от нулевой частоты вращения до синхронной. Для этого необходимо одновременное выполнение следующих условий:

- наличие импульса на синхронизацию генератор-двигателя с энергосистемой;
- выключатель генератора отключен, т.е. генератор отключен от энергосистемы;
- частота в энергосистеме превышает 45 Гц;
- синхронная машина остановлена ($M = 0$, $n = 0$).

Коэффициент мощности $\cos\varphi = 1$ (реактивная мощность отсутствует).

Сервопривод управляется по величине вращающего момента. В системе предусмотрена защита от разгона генератор-двигателя сверх допустимой частоты вращения: при превышении частоты вращения на 0,5% относительно номинальной система считает, что произошла потеря синхронизации. В противном случае машина может стать неуправляемой.

На действующих ГАЭС гидроагрегаты могут быть пущены в работу в том или ином режиме одним из следующих способов:

- асинхронный пуск от пониженного напряжения сети;
- пуск вспомогательным электродвигателем;
- посредством применения пускового частотного преобразователя;
- пуск от соседнего агрегата («спина к спине»);
- пуск вспомогательными турбинами;
- прямой пуск;
- асинхронно-синхронный пуск.

Способ пуска гидроагрегатов ГАЭС в насосный режим и выполняемые при этом переключения оборудования влияют на показатели маневренности ГАЭС при работе в энергосистеме. Усредненные показатели времени пуска гидроагрегатов, выполненных по двух- и трехмашинной схемам, в насосный режим представлены в табл. 2.

2. Разгон генератор-двигателя (при выполнении условий п. 1).

Сервопривод раскручивает генератор-двигатель с плавным повышением частоты вращения. Перед синхронизацией с энергосистемой разгон генератор-двигателя осуществляется до частоты, несколько превышающей сетевую (на 3 об/мин). Делается это потому, что многофункциональное реле синхронизирует генератор с сетью с опережением.

После выхода на сетевую частоту выполняется п. 3 (если машина должна быть синхронизирована с сетью) либо п. 4 (если импульс на синхронизацию отсутствует).

3. Синхронизация (при наличии импульса на синхронизацию).

При синхронизации электрических машин ГАЭС с энергосистемой необходимо, чтобы выполнялись условия:

- равенства частот выдаваемого генератором напряжения и сети;
- равенства величин напряжений генератора и сети (при проверке условий синхронизации на генератор уже подано возбуждение);
- совпадение по фазе напряжений генератора и сети.

После выполнения условий синхронизации генератор может быть включен в сеть замыканием генераторного выключателя.

В лабораторном стенде в части синхронизации проверяется соответствие частот. По остальным условиям различия отсутствуют.

Если генераторный выключатель не включен, в программируемый логический контроллер (ПЛК) при необходимости поступает импульс от многофункционального реле на изменение частоты вращения (каждые 200 мс – импульс на снижение либо повышение частоты вращения на 0,3 об/мин). В алгоритме установлен приоритет снижения частоты перед повышением – в первую очередь проверяется информация от многофункционального реле, не превышает ли частота вращения генератор-двигателя заданную уставку, и при превышении производится снижение частоты на 0,3 об/мин.

Сразу после получения от многофункционального реле информации о включении генераторного выключателя сервопривод начинает работать с вращающим моментом -0,7 Н·м в режиме управления по вращающему моменту – при таком значении синхронная машина работает на холостом ходу, т.е. с синхронной частотой вращения, с отключенной нагрузкой.

4. Регулирование активной мощности $\cos\varphi$ генератор-двигателя.

После включения в сеть активная мощность регулируется через каждые 200 мс, $\cos\varphi$ – каждые 2 с. Также $\cos\varphi$ может настраиваться вручную через SCADA каждые 200 мс.

Активная мощность генератор-двигателя регулируется изменением вращающего момента сервопривода, которое прямо пропорционально зависит от разницы заданной и фактической мощностей $|P_{\text{зад}} - P_{\text{факт}}|$:

- при отсутствии импульса на синхронизацию нагрузка генератора устанавливается равной 0 Вт, генераторный выключатель отключается при снятом возбуждении;
- при ручном вводе $P_{\text{зад}}$ в SCADA активная мощность регулируется по введенному значению;
- при работе синхронной машины в режиме компенсации нагрузки постоянно отслеживается мощность в узле учета (в нагрузке), а

активная мощность синхронной машины регулируется в соответствии с этими изменениями для создания встречного потока мощности.

Регулирование реактивной мощности в ПЛК производится способом простого сравнения – при превышении реактивной мощностью в узле учета некоторой заданной величины многофункциональное реле каждые две секунды увеличивает или уменьшает $\cos\varphi$ на 0,01, аналогичным образом регулируя встречный поток мощности.

При размыкании генераторного выключателя привод останавливается.

Приведенная последовательность операций позволяет имитировать процессы, характерные для действующего оборудования ГАЭС. Так, при переводе в турбинный режим гидроагрегат (ГЭС, ГАЭС) последовательно проходит следующие режимы (при останове гидроагрегата – в обратной последовательности), как показано на рис. 10:

- холостой ход турбины (ХХТ) – вращение гидроагрегата с номинальной частотой при открытии направляющего аппарата, соответствующего открытию холостого хода (около 10% от полного), но без подключенной электрической нагрузки;
- холостой ход генератора (ХХГ) – то же, после синхронизации⁵ и подключения генератор-двигателя к электрической сети включением выключателя и при отсутствии электрической нагрузки ($P = 0$ МВт, $Q = 0$ МВ·Ар);
- набор электрической нагрузки до требуемой величины.

Технологические процессы, происходящие при переводе гидроагрегата ГАЭС в различные эксплуатационные режимы, и затрачиваемое на их осуществление время приведены в Приложении В на примере Загорской ГАЭС.

⁵ Выполнения условий равенства частоты, напряжения и угла комплексной величины напряжения генератора и энергосистемы (электрической сети).

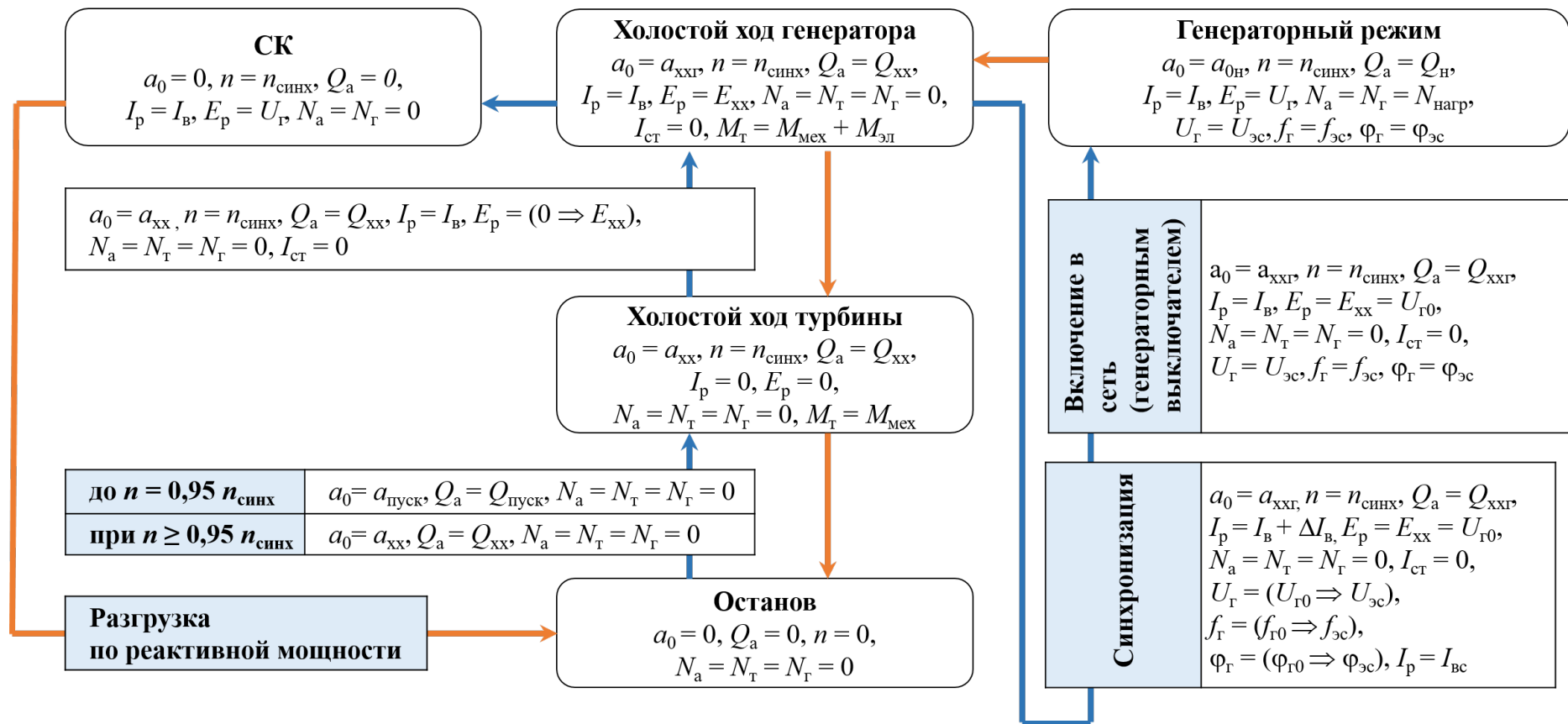


Рис.10. Промежуточные режимы работы гидроагрегата (ГЭС, ГАЭС) при пуске и останове:

→ – пуск; → – останов;

a_0 – открытие направляющего аппарата, мм; E – ЭДС, В; f – частота, Гц; I – ток, А; M – момент вращения, Н·м; n – частота вращения, об/мин; N – активная мощность, Вт; Q – расход воды, м³/с; U – напряжение, В; Φ – фаза, эл. град.

(«а» – гидроагрегата; «в» – возбуждения; «вс» – включения в сеть; «г» – генератора; «мех» – механический; «пуск» – пусковой; «р» – ротора; «синх» – синхронный; «ст» – статора; «т» – турбины; «хх» – холостого хода; «ххг» – холостого хода генератора; «эл» – электрический; «эс» – энергосистемы (электрической сети); «0» – начальный)

Экспериментальная часть

1. Для проведения лабораторной работы необходимо собрать схему установки согласно рис. 11.

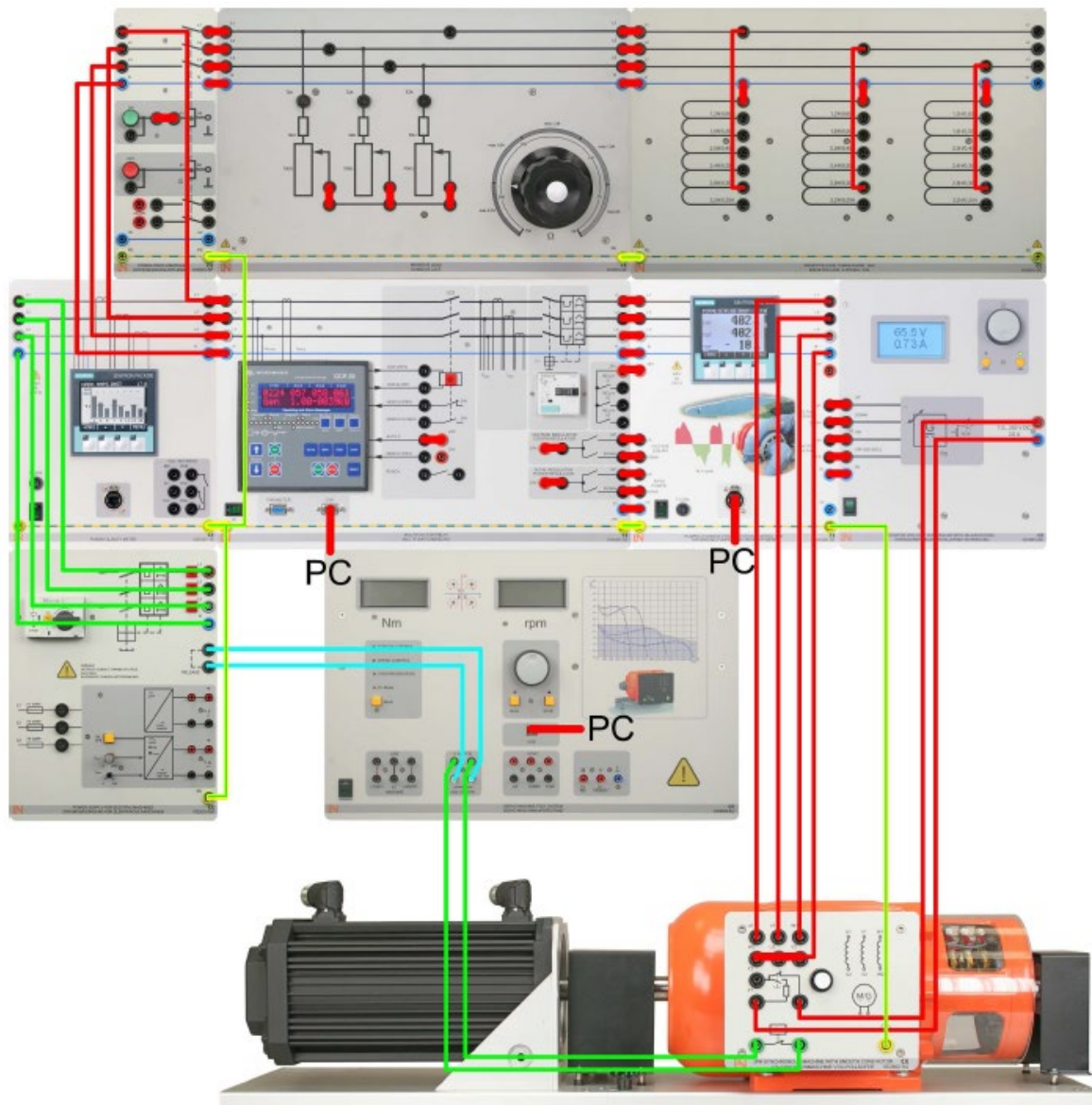


Рис. 11. Схема соединения модулей лабораторной установки проведения лабораторной работы № 2:

PC – соединение с компьютером

После сборки схемы необходимо, чтобы преподаватель проверил правильность выполненных соединений.

2. Включить испытательный серво-стенд (блок 10).
3. На испытательном серво-стенде для генератор-двигателя (блок 10) нажатием кнопки “Mode” необходимо выбрать режим регулирования скорости и синхронизации (отображается сигнализация

“SPEED CONTROL” и “SYNCHRONISATION”). Электрическая машина будет работать с синхронной частотой вращения.

4. Перевести многофункциональное реле (блок 7) в режим “AUTO”.

5. Вращением колеса регулятора напряжения возбуждения (блок 11) выставить напряжение возбуждения равное 45 В: установить выдержку времени для цифровых входов на 50 мс. Эта настройка вызывается путем длительного нажатия на кнопку “OFF”. После этого вращением поворотного колеса выбрать соответствующее меню и необходимый элемент, подтвердить выбор нажатием кнопки “ON” (либо отменить команду нажатием кнопки “OFF”).

6. Включить электропитание на блоке питания (блок 5).

7. Запустить SCADA и выбрать раздел “Pumped Storage Power Plant EUG3”, включить ПЛК.

В этой лабораторной работе нагрузка не требуется, поэтому модуль силового выключателя (блок 2) должен быть отключен.

8. Выполнить нормальный пуск в режим ручного регулирования мощности нажав на кнопку “Manual” (панель 2)⁶.

9. Понаблюдать за поведением многофункционального реле (блок 7).

10. Записать результаты измерений фазных токов линии электропередачи энергосистемы L_1, L_2, L_3 , мощностей $\Sigma S, \Sigma P, \Sigma Q$ (блок 8), вращающего момента M , частоты вращения n (блок 10) синхронной электрической машины в соответствующий столбец табл. 3.

11. Включить генераторный выключатель (панель 5).

12. Установить мощность в режиме ручного управления на значение -250 Вт (панель 3).

13. Понаблюдайте за изменением силы тока, мощности и вращающего момента синхронной электрической машины.

14. Записать результаты измерений фазных токов линии электропередачи энергосистемы L_1, L_2, L_3 , мощностей $\Sigma S, \Sigma P, \Sigma Q$ (блок 8 или панель 7), вращающего момента M , частоты вращения n (блок 10 или панель 1) синхронной электрической машины в соответствующий столбец табл. 3.

15. Для остановки синхронной электрической машины нажать на кнопку “Stop” (панель 2). ПЛК при необходимости понизит нагрузку и выполнит выключение машины.

16. Сообщить преподавателю о завершении работы и отойти от стенда, чтобы преподаватель отключил стенд.

⁶ Здесь и далее – нумерация панелей приводится в соответствии с Приложением Б.

Таблица 3

Результаты измерений, полученные в ходе лабораторной работы № 2

	$\Sigma S = 0$	$\Sigma P = -250 \text{ Вт}, \cos\varphi = 1$
$L_1, \text{ А}$		
$L_2, \text{ А}$		
$L_3, \text{ А}$		
$\Sigma S, \text{ В} \cdot \text{А}$		
$\Sigma P, \text{ Вт}$		
$\Sigma Q, \text{ В} \cdot \text{Ар}$		
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$		
$n, \text{ об/мин}$		

Вопросы и задачи для самопроверки

1. Что подразумевается под маневренностью объектов гидроэнергетики?
2. Чем обусловлена высокая маневренность объектов гидроэнергетики?
3. Какова последовательность этапов при пуске синхронной электрической машины лабораторного стенда?
4. Что используется для разгона генератор-двигателя от нулевой частоты вращения до синхронной?
5. Чему равен коэффициент мощности при нулевой реактивной мощности?
6. Чем опасен разгон генератор-двигателя сверх допустимой частоты вращения?
7. Какие способы пуска в работу гидроагрегатов на ГАЭС Вы знаете?
8. Зачем перед синхронизацией с энергосистемой разгон генератор-двигателя осуществляется до частоты, несколько превышающей сетевую?
9. Какие условия необходимо выполнить при синхронизации электрических машин ГАЭС с энергосистемой?
10. Как добиться того, чтобы синхронная электрическая машина выдавала в сеть индуктивную реактивную мощность?
11. Опишите промежуточные эксплуатационные режимы обратимого гидроагрегата при пуске из состояния останова до работы с номинальной мощностью.
12. Опишите процессы при пуске гидроагрегата в насосный режим (на примере Загорской ГАЭС).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГЕНЕРАТОР-ДВИГАТЕЛЯ ГАЭС В РЕЖИМЕ ПОКРЫТИЯ ПИКОВОЙ НАГРУЗКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ И КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Цель работы: изучение работы генератор-двигателя ГАЭС в режиме поддержки баланса потребления и генерации активной мощности и компенсации реактивной мощности в узле энергосистемы.

Теоретическая часть

Одними из основных задач, которые ГАЭС выполняет при работе в энергосистеме, являются поддержание баланса потребления и генерации активной мощности и необходимого уровня реактивной мощности для поддержания напряжения в узлах сети в требуемом диапазоне. ГАЭС являются достаточно ценным высокоманевренным энергообъектом для работы в пиковой и полупиковой частях графика нагрузки энергосистемы. Статистические данные о работе агрегатов ГАЭС в составе энергосистем приведены в табл. 4.

При снижении частоты ($\frac{d\omega}{dt} < 0$) в энергосистеме генерирующие мощности увеличиваются действием автоматики, а при повышении частоты ($\frac{d\omega}{dt} > 0$) – снижаются, в соответствии с уравнением:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T - M_c - M_0,$$

где J – момент инерции ротора, кг·м²; ω – изменение угловой частоты вращения ротора, рад/с; t – время, с; M_T – момент, развиваемый синхронной машиной, Н·м; M_c – момент, создаваемый нагрузкой синхронной машиной (сопротивления), Н·м; M_0 – момент сил трения синхронной машины, Н·м.

Идеальным случаем является отсутствие необходимости регулирования при совпадении нагрузки и генерации ($\frac{d\omega}{dt} = 0$).

Регулирование реактивной мощности на ГАЭС осуществляется как в генераторном режиме (с генерацией либо потреблением реактивной мощности), так и в режиме синхронного компенсатора. Изменение производится управлением возбуждением электрической машины. При снижении напряжения в энергосистеме необходимо повышать генерируемую реактивную мощность, при превышении – снижать. В России нормативной документацией регулируются возможные диапазоны поддержания напряжения оборудования различных классов напряжения в

нормальном и аварийном режимах работы, с допустимыми кратностями и длительностями перенапряжений.

Таблица 4

Частота пусков и продолжительность работы гидроагрегатов ГАЭС при работе в энергосистеме

Название ГАЭС	Продолжительность работы в режиме, ч/сут.			Количество пусков оборудования
	ТР	НР	СК	
Владимирская (Россия, проект)	6	8	—	—
Волоколамская (Россия, проект)	4	7	—	—
Загорская (Россия)	-	-	—	до 30 раз/сут. (Т – 170 раз/мес., Н – 140 раз/мес., СК – 27 раз/мес.)
Кармановская (Россия, проект)	4	5	—	—
Курская (Россия, проект)	4,5	7	—	—
Лабинская (Россия, проект)	6	8	—	—
Ленинградская (Россия, проект)	5,6	7	—	—
Ростовская (Россия, проект)	6	8	—	—
Средневожская 2 (Козловская) (Россия, проект)	5	6	—	—
Уральская (Россия, проект)	6	8	—	—
Центральная (Россия, проект)	6	7	—	—
<i>Abdelmouten</i> (Марокко, проект)	—	-	—	до 20 раз/сут.
<i>Capljina</i> (Босния и Герцеговина)	12 – 14 (зима)			Н – 125 раз/год
	5 – 6 (лето)	6 (лето)	—	
<i>Gandikota 2</i> (Индия, проект)	6	-	—	—
Goldendale (США, проект)	8	10	—	—
<i>Tai'an</i> (Китай)	—	—	—	Т – 1878 раз/год; Н – 1384 раз/год
<i>Vianden</i> (Люксембург)	7,5 ... 9,25	6,5 ... 8,25	—	—

Примечание: ТР – турбинный режим; НР – насосный режим; СК – режим синхронного компенсатора.

Для работы в таких режимах гидроагрегаты российских ГАЭС функционируют в составе систем ГРАМ, ГРАРМ, ГРНРМ электростанции, которые автоматически распределяют задания по мощности между гидроагрегатами ГАЭС.

На лабораторном стенде после включения синхронной машины в сеть активная мощность регулируется через каждые 200 мс, $\cos\varphi$ – каждые 2 с. Также $\cos\varphi$ может настраиваться вручную через SCADA каждые 200 мс.

Активная мощность генератор-двигателя регулируется изменением вращающего момента сервопривода, которое прямо пропорционально зависит от разницы заданной и фактической мощностей $|P_{\text{зад}} - P_{\text{факт}}|$:

- при отсутствии импульса на синхронизацию нагрузка генератора устанавливается равной 0 Вт, генераторный выключатель отключается при снятом возбуждении;
- при ручном вводе $P_{\text{зад}}$ в SCADA активная мощность регулируется по введенному значению;
- при работе синхронной машины в режиме компенсации нагрузки постоянно отслеживается мощность в узле учета (в нагрузке), а активная мощность синхронной машины регулируется в соответствии с этими изменениями для создания встречного потока мощности.

Регулирование реактивной мощности в ПЛК производится способом простого сравнения – при превышении реактивной мощностью в узле учета некоторой заданной величины многофункциональное реле каждые две секунды увеличивает или уменьшает $\cos\varphi$ на 0,01, аналогичным образом регулируя встречный поток мощности.

Экспериментальная часть

1. Для проведения лабораторной работы необходимо собрать схему установки согласно рис. 12.
2. Включить испытательный серво-стенд (блок 10).
3. На испытательном серво-стенде для генератор-двигателя (блок 10) нажатием кнопки “Mode” необходимо выбрать режим регулирования скорости и синхронизации (отображается сигнализация “SPEED CONTROL” и “SYNCHRONISATION”). Электрическая машина будет работать с синхронной частотой вращения.
4. Перевести многофункциональное реле (блок 7) в режим “AUTO”.
5. Вращением колеса регулятора напряжения возбуждения (блок 11) выставить напряжение возбуждения равное 45 В.

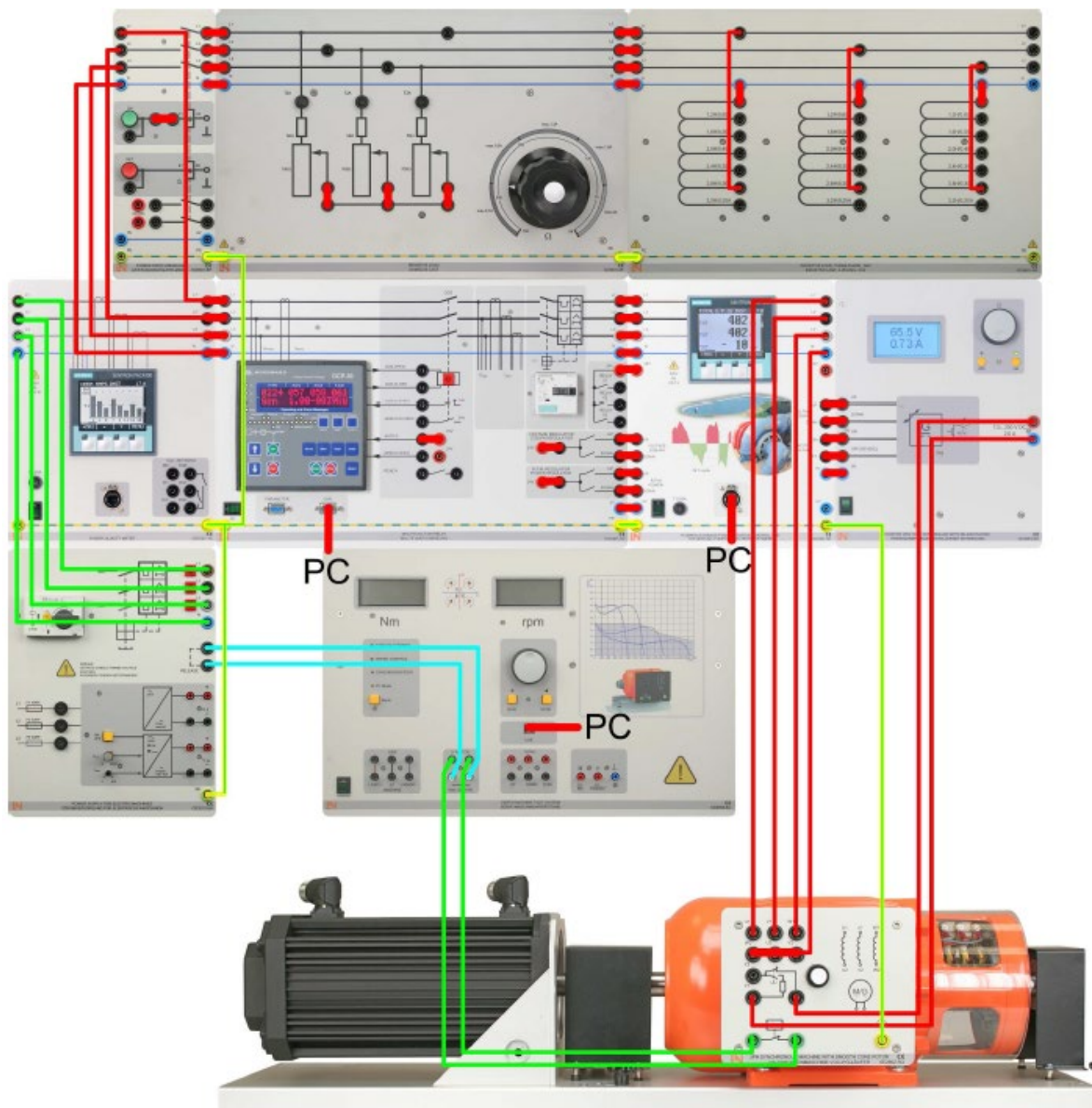


Рис. 12. Схема соединения модулей лабораторной установки проведения лабораторной работы № 3:
PC – соединение с компьютером

После сборки схемы необходимо, чтобы преподаватель проверил правильность выполненных соединений.

6. Включить электропитание на блоке питания (блок 5).
7. Установить переменную трехфазную нагрузку на максимальное значение (блок 3).
8. Запустить SCADA и выбрать раздел “Pumped Storage Power Plant EUG3”, включить ПЛК.
9. Выполнить нормальный пуск в режим автоматического регулирования мощности нажав на кнопку “Automatic” (панель 2).
10. Понаблюдать за поведением многофункционального реле (блок 7).

Если величина мощности P на узле учета будет превышать 50 Вт в течение 5 с, то произойдет автоматическое включение генератор-двигателя.

Если мощность P будет ниже 50 Вт в течение 5 с, то произойдет автоматическое выключение генератор-двигателя.

Активная мощность, проходящая через узел учета, компенсируется синхронной электрической машиной.

Реактивная мощность, проходящая через узел учета, компенсируется синхронной электрической машиной дополнительно с компенсацией активной мощности.

11. Записать результаты измерений фазных токов линии электропередачи энергосистемы L_1, L_2, L_3 , мощностей $\Sigma S, \Sigma P, \Sigma Q$ (блок 8), вращающего момента M , частоты вращения n (блок 10) синхронной электрической машины в соответствующий столбец табл. 5.

12. Включить с помощью силового выключателя индуктивно-омическую нагрузку (блок 2).

13. Понаблюдать за поведением многофункционального реле (блок 7).

14. Записать результаты измерений фазных токов линии электропередачи энергосистемы L_1, L_2, L_3 , мощностей $\Sigma S, \Sigma P, \Sigma Q$ (блок 8), вращающего момента M , частоты вращения n (блок 10) синхронной электрической машины в соответствующий столбец табл. 5.

15. Нажать на аварийный останов “Emergency Stop” (панель 2).

16. Для остановки синхронной электрической машины нажать на кнопку “Stop” (панель 2). ПЛК при необходимости понизит нагрузку и выполнит отключение машины.

17. Сообщить преподавателю о завершении работы и отойти от стенда, чтобы преподаватель отключил стенд.

Результаты измерений в ходе лабораторной работы № 3

	$\Sigma P = 1000 \text{ Вт}, \Sigma Q = 0$	$\Sigma P = 1000 \text{ Вт}, \Sigma Q = 1000 \text{ В} \cdot \text{Ар}$
$L_1, \text{ А}$		
$L_2, \text{ А}$		
$L_3, \text{ А}$		
$\Sigma S, \text{ В} \cdot \text{А}$		
$\Sigma P, \text{ Вт}$		
$\Sigma Q, \text{ В} \cdot \text{Ар}$		
$M, \text{ Н} \cdot \text{м}$		
$n, \text{ об/мин}$		

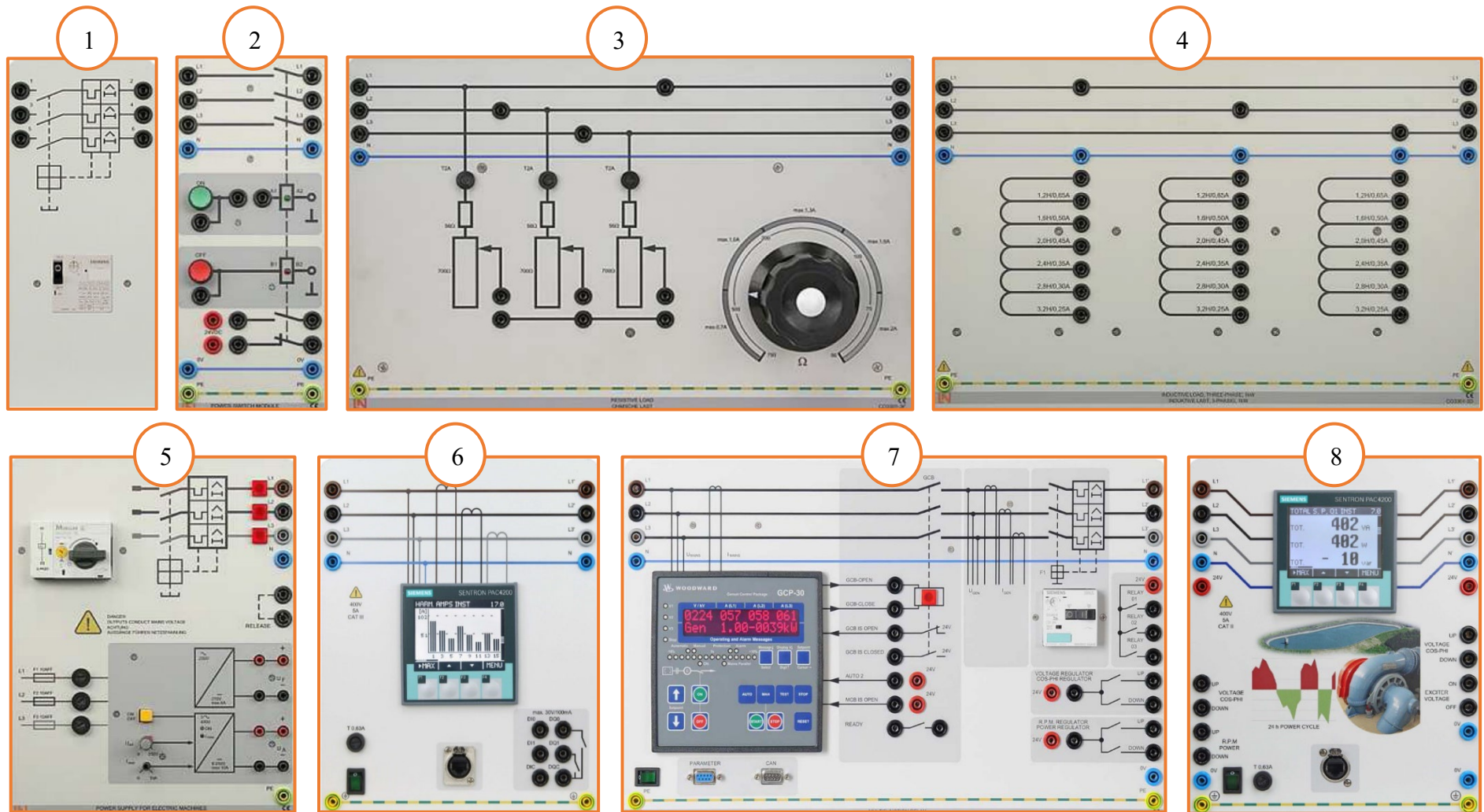
Вопросы и задачи для самопроверки

1. Зачем необходимо поддержание баланса потребления и генерации активной мощности?
2. Для чего требуется поддержание необходимого уровня реактивной мощности?
3. В каких частях графика нагрузки энергосистемы работает ГАЭС? Почему?
4. Опишите последовательность действий на ГАЭС при снижении частоты в энергосистеме?
5. В каких режимах происходит регулирование реактивной мощности на ГАЭС?
6. В каких системах функционируют гидроагрегаты российских ГАЭС для поддержания напряжения оборудования различных классов напряжения в нормальном и аварийном режимах работы?
7. От чего зависит изменение вращающего момента сервопривода генератор-двигателя?
8. Что происходит с генератор-двигателем после включения активной нагрузки при нормальном пуске в режим автоматического регулирования мощности?
9. Что происходит с генератор-двигателем после включения активно-индуктивной нагрузки?
10. Что происходит с генератор-двигателем при аварийном останове “Emergency Stop”?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 19185-73 Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения (утв. постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 31.10.1973 г. № 2410).
2. Постановление Правительства РФ от 13.08.2018 № 937 (ред. от 30.01.2021) «Об утверждении Правил технологического функционирования электроэнергетических систем и о внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации».
3. Аршеневский, Н.Н. Обратимые гидромашины гидроаккумулирующих электростанций / Н.Н. Аршеневский. – М.: Энергия, 1977.
4. Гидроаккумулирующие электростанции. Строительство и эксплуатация Загорской ГАЭС / Н.И. Серебряников, В.Г. Родионов, А.П. Кулешов и др. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2000.
5. Синюгин, В.Ю. Гидроаккумулирующие электростанции в современной электроэнергетике / В.Ю. Синюгин, В.И. Магрук, В.Г. Родионов. – М. : ЭНАС, 2008.
6. Гидроаккумулирующие электростанции / Б.Л. Бабурин, М.Д. Глезин, М.Ф. Красильников и др.; под ред. Л.Б. Шейнмана. – М.: Энергия, 1978.
7. Gentner, C. Challenges in the Design of Pump Turbines / Dr.-Ing. Christof Gentner Golden, CO, USA, November 2012.
8. Pumped Storage Hydropower Valuation Guidebook. A Cost-Benefit and Decision Analysis Valuation Framework / U.S. Department Of Energy. March 2021.
9. Wasser, P. EUG 3 Pumpspeicherkraftwerk.

ПРИЛОЖЕНИЕ А



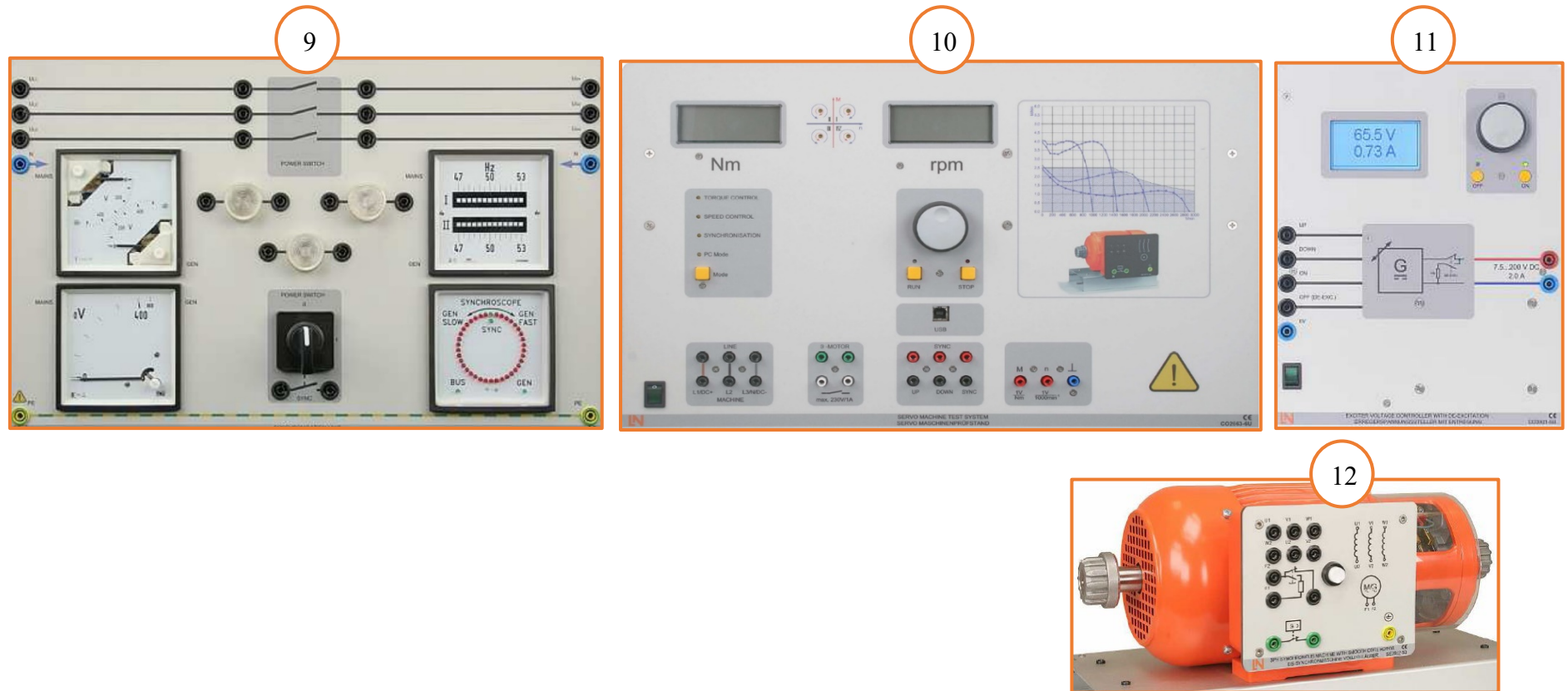


Рис. А.1. Состав оборудования лабораторного стенда EUG3 «Гидроаккумулирующая электростанция»:

- 1 – блок защит электродвигателя; 2 – модуль силового выключателя; 3 – переменная трехфазная активная нагрузка 1 кВт;
 4 – переменная трехфазная индуктивная нагрузка 1 кВт; 5 – блок питания для электрических машин; 6 – анализатор качества электроэнергии с графическим дисплеем и долговременным запоминающим устройством; 7 – многофункциональное реле, регулятор мощности, регулятор функции $\cos\phi$, синхронизатор; 8 – система управления ГАЭС; 9 – блок синхронизации; 10 – испытательный серво-стенд для машины 1 кВт с программным обеспечением “ActiveServo”; 11 – регулятор возбуждения с выключателем в цепи возбуждения; 12 – трехфазная синхронная электрическая машина 1 кВт

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

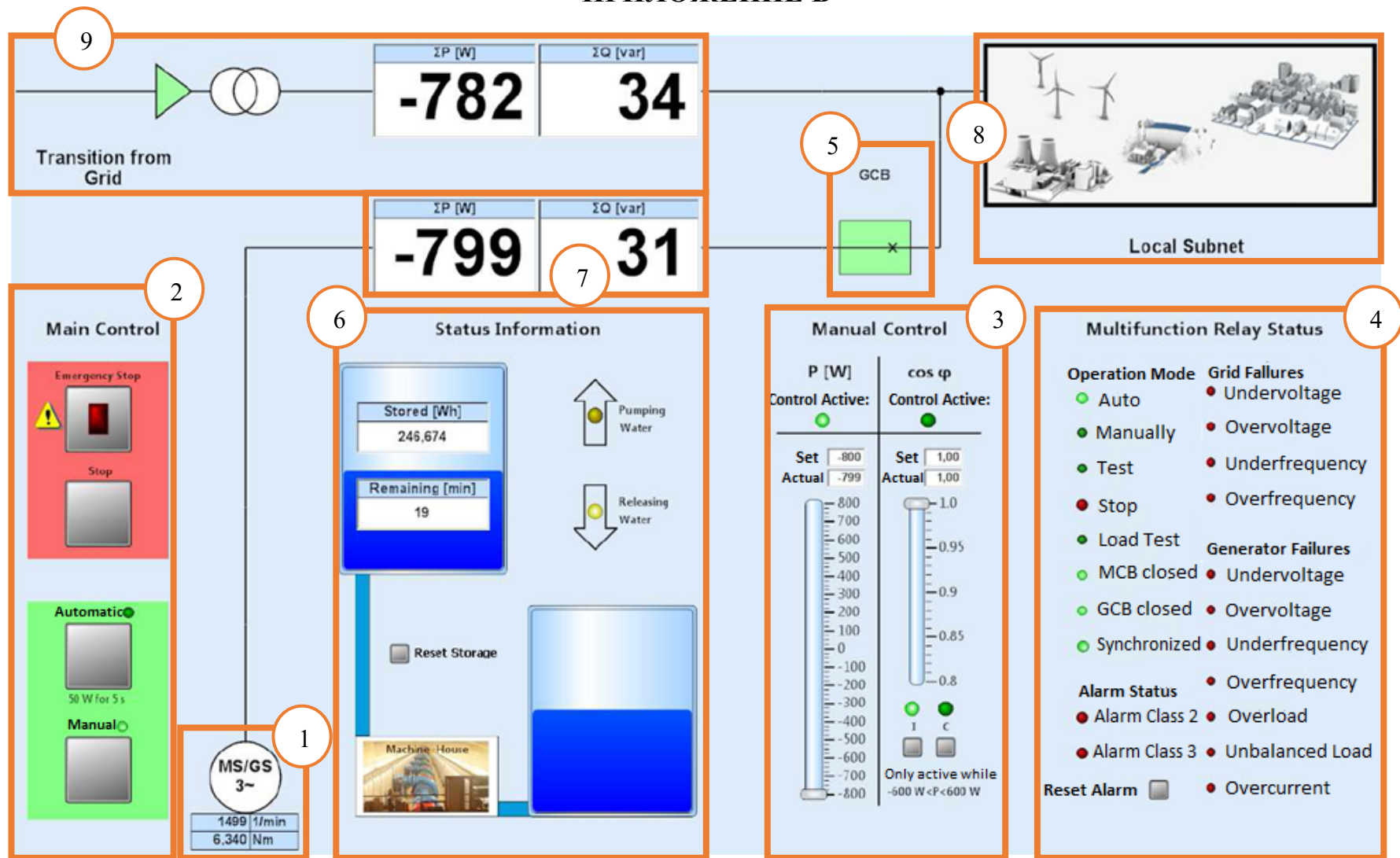


Рис. Б.1. Интерфейс программы “SCADA Designer”

На рис. Б.1 показаны:

1. Трехфазная синхронная электрическая машина (генератор-двигатель ГАЭС):

- **1/min** – частота вращения генератор-двигателя, об/мин;
- **Nm** – механический момент генератор двигателя, Н·м.

2. Панель управления трехфазной синхронной электрической машиной:

- **Emergency Stop** – аварийный останов;
- **Stop** – нормальный останов;
- **Automatic** – нормальный пуск в режим автоматического регулирования мощности (автоматический пуск и останов генератор-двигателя, если регистрируется отклонение нагрузки в сторону увеличения или уменьшения от значения 50 Вт в течение 5 с);
- **Manual** – нормальный пуск в режим ручного регулирования мощности.

3. Панель ручного управления параметрами генератор-двигателя (активная мощность P [Вт], коэффициент мощности $\cos\varphi$ [о.е.]):

- **Control Active** – сигнализация работы система управления в режиме регулирования P или $\cos\varphi$ ⁷;
- **Set** – заданное значение;
- **Actual** – фактическое значение;
- **I** – работа электрической машины в индуктивном квадранте (генерация реактивной мощности);
- **C** – работа электрической машины в емкостном квадранте (потребление реактивной мощности).

При величине активной мощности свыше 600 Вт устанавливается значение $\cos\varphi = 1$, ручное регулирование $\cos\varphi$ блокируется.

4. Панель индикации:

- 1) **Operation Mode** – режим работы генератор двигателя:
 - **Auto** – автоматическое регулирование мощности (покрытия пиковой нагрузки энергосистемы);
 - **Manually** – ручное регулирование мощности;
 - **Test** – тестовый режим;
 - **Stop** – останов;
 - **Load Test** – тестовая нагрузка;
 - **MCB closed** – выключатель в цепи двигателя включен (замкнут);

⁷ Регулирование реактивной мощности выполняется только вместе с активной мощностью. При значении реактивной мощности $-200 \text{ В}\cdot\text{Ар}$ или меньше регулирование активной мощности не производится в целях обеспечения устойчивости работы генератор-двигателя в энергосистеме.

- **GCB closed** – генераторный выключатель включен (замкнут);
- **Synchronized** – синхронизирован (не горит, если реле выключено; горит в синхронизированном состоянии; мигает при переходных состояниях);
- 2) **Alarm Status** – аварийная сигнализация:
 - **Alarm Class 2** – перегрузка генератора по мощности с отключением выключателя;
 - **Alarm Class 3** – перегрузка двигателя по мощности с отключением выключателя.
- 3) **Grid Failures** – авария в сети:
 - **Undervoltage** – сниженное напряжение;
 - **Overvoltage** – перенапряжение;
 - **Underfrequency** – сниженная частота;
 - **Overfrequency** – превышение частоты.
- 4) **Generator Failures** – авария на генераторе:
 - **Undervoltage** – сниженное напряжение;
 - **Overvoltage** – перенапряжение;
 - **Underfrequency** – сниженная частота;
 - **Overfrequency** – превышение частоты.
 - **Overload** – перегрузка по мощности;
 - **Unbalanced Load** – несимметричная нагрузка;
 - **Overcurrent** – перегрузка по току.
- 5) **Reset Alarm** – сброс сигнализации.
- 5. Генераторный выключатель (включен).
- 6. Информация о бассейнах ГАЭС:
 - **Stored** – запасенная энергия в верхнем бассейне, Вт·ч;
 - **Remaining** – остаточное время, в течение которого ГАЭС может работать с текущей мощностью (по условию наличия воды в бассейнах), мин;
 - **Pumping Water** – закачивание воды в верхний бассейн (наполнение верхнего бассейна, насосный/двигательный режим);
 - **Releasing Water** – попуск воды в нижний бассейн (срабатывание верхнего бассейна, турбинный/генераторный режим);
 - **Machine House** – машинный зал;
 - **Reset Storage** – перезапуск расчета (верхний и нижний бассейны наполняются до половины объема).
- 7. Перетоки мощности от (к) генератор-двигателя (-ю):

- ΣP [W] – активная мощность (положительная – генерация (генераторный режим), отрицательная – потребление (двигательный режим)), Вт;
- ΣQ [var] – реактивная мощность (положительная – генерация (индуктивный квадрант, перевозбуждение), отрицательная – потребление (емкостной квадрант, невозбуждение)), В·Ар.

8. Локальная энергосистема.

9. Крупная энергосистема:

- ΣP [W] – активная мощность (положительная – выдача мощности от генератор-двигателя в сеть, отрицательная – потребление мощности генератор-двигателем из сети), Вт;
- ΣQ [var] – реактивная мощность (положительная – выдача мощности от генератор-двигателя в сеть, отрицательная – потребление мощности генератор-двигателем из сети), В·Ар.

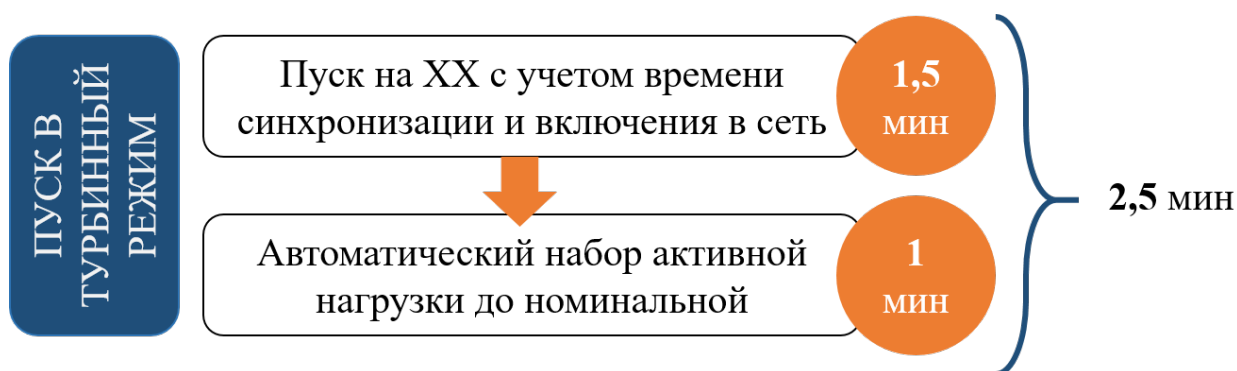
ПРИЛОЖЕНИЕ В

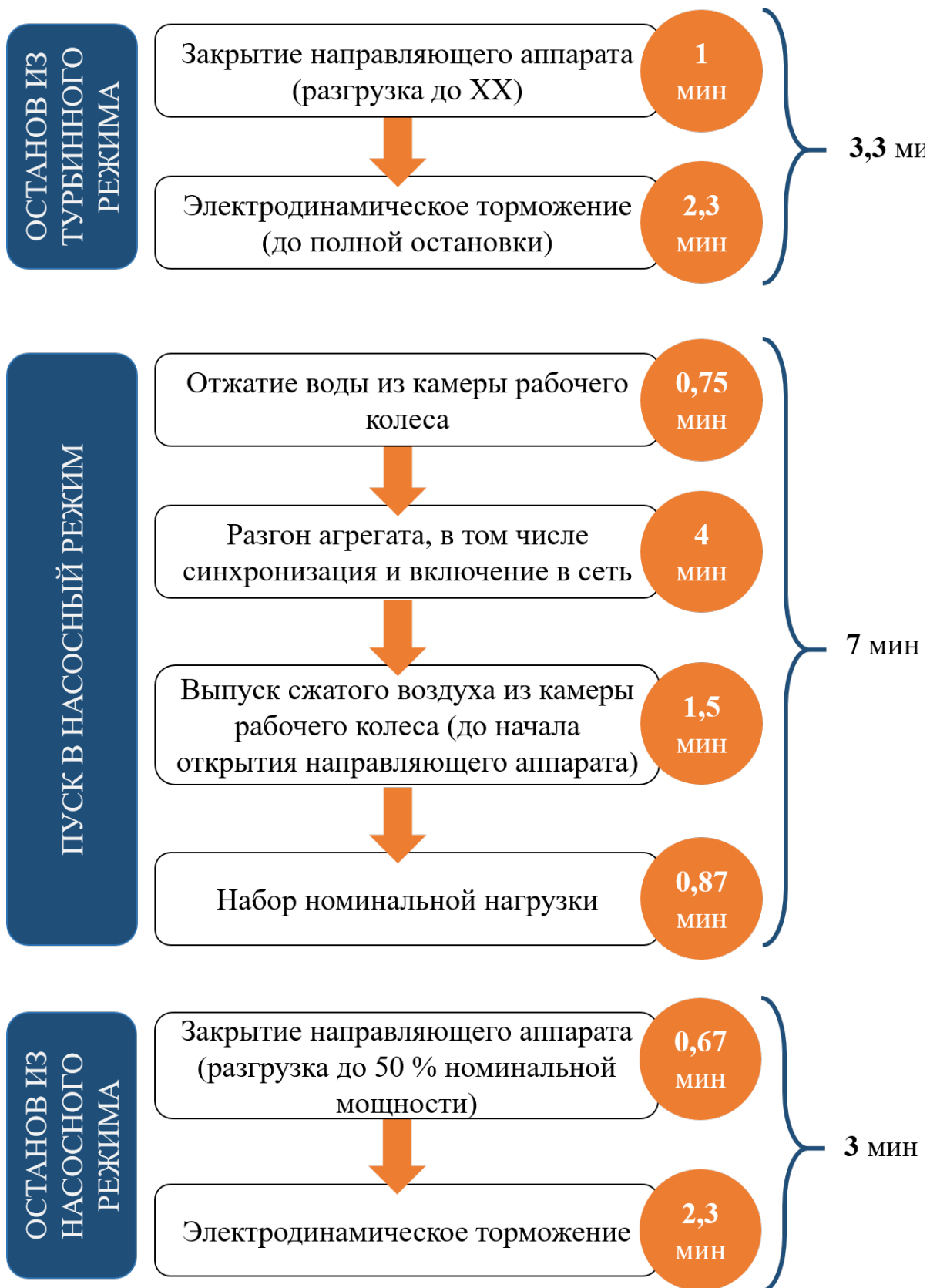
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ПЕРЕВОДЕ ГИДРОАГРЕГАТА ЗАГОРСКОЙ ГАЭС В РАЗЛИЧНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ РЕЖИМЫ

Основные параметры Загорской ГАЭС:

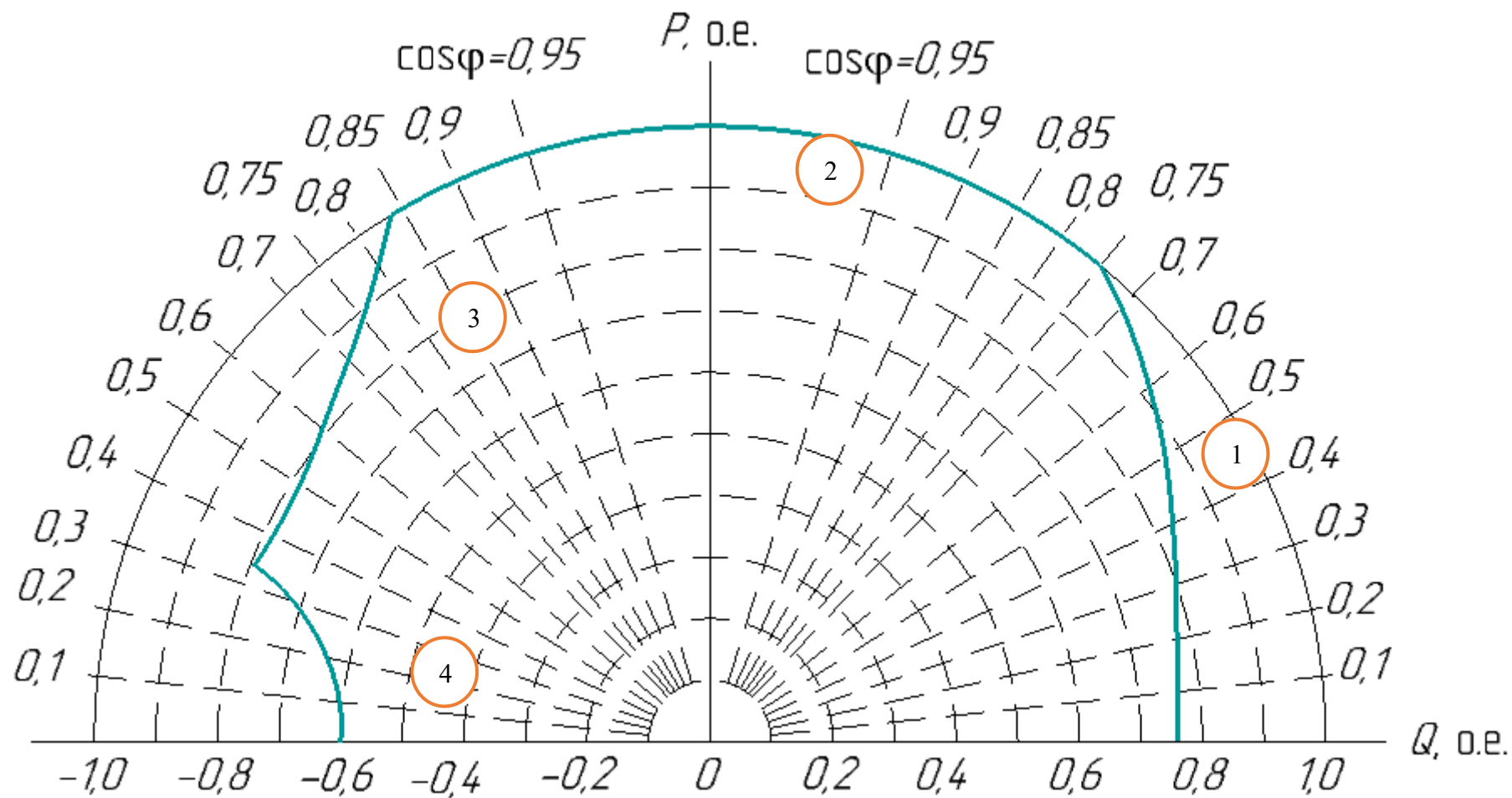
- схема основного оборудования – двухмашинная;
- тип гидросилового оборудования гидроагрегата – обратимые радиально-осевые насос-турбины;
- тип электрического оборудования гидроагрегата – синхронный генератор-двигатель;
- номинальная активная мощность гидроагрегата в турбинном режиме – 200 МВт;
- номинальная активная мощность гидроагрегата в насосном режиме – 220 МВт;
- номинальная полная мощность генератор-двигателя – 236 МВ·А;
- частота вращения гидроагрегата – 150 об/мин;
- расчетный напор в турбинном режиме – 100 м;
- расчетный напор в насосном режиме – 105 м;
- способ пуска в насосный режим – с применением пускового преобразователя частоты (20 МВт).

Технологические процессы при переводе гидроагрегата Загорской ГАЭС в различные эксплуатационные режимы [5, с. 57-58]:





ПРИЛОЖЕНИЕ Г
 PQ -ДИАГРАММА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ГАЭС EL HIERRO (GORONA DEL VIENTO, ИСПАНИЯ) В ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЕДИНИЦАХ (О.Е.)



Ограничения на PQ -диаграмме:

1. По току ротора. Обусловлена условиями термической стойкости генератора. При увеличении реактивной мощности повышается ток ротора, соответственно – полный ток генератора и его нагрев.

2. По току статора. Соответствует работе генератора с номинальной активной мощностью. Аналогично току ротора, ток статора ограничивается по условиям нагрева.

3. По нагреву концевых частей статора.

4. По условиям устойчивости работы генератора в электроэнергетической системе.

Также на PQ -диаграммах генераторов выделяют линию ограничения по мощности турбины (насос-турбины), если номинальная мощность гидросилового оборудования менее номинальной мощности генератора (генератор-двигателя).

Учебное электронное издание

Васьков Алексей Геннадьевич
Габидулин Роман Михайлович
Хохлов Владимир Александрович
Шуркалов Петр Сергеевич
Ярда Николай Андреевич

Редактор Е.Б. Бурдюкова

Для выполнения лабораторных работ используется специальное программное обеспечение лабораторного стенда “EUG 3 Pumped Storage Power Plant” (SCADA for PowerLab).

Программное обеспечение не подлежит установке на персональных компьютерах обучающихся и используется только в лаборатории для проведения учебных занятий.

Дата подписания – 20.11.2023

Объем издания – 3,50 Мбайт

Тираж – 14 электронных оптических дисков DVD-R

Издательство МЭИ
111250, Москва, Красноказарменная, д. 14, стр.1
izdatmpei@gmail.com