

УДК 621.22-56

А.М. Чернюк

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

## АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ МАЛЫХ ГЭС ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ВОЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ИНФРАСТРУКТУРЫ

*В статье проведен анализ состава основного малых и микро гидроэлектростанций используемых в качестве источников питания объектов военной инфраструктуры, определены перспективы оптимизации состава оборудования электростанций данного типа, рассмотрены технико-экономические вопросы создания и работы малых и микро гидроэлектростанций.*

**Ключевые слова:** малые и микро ГЭС, оптимизация состава оборудования, технико-экономические показатели, выбор генераторов, система управления и регулировки.

### Введение

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** К источникам питания объектов военной инфраструктуры помимо традиционных требований (надёжность, экономичность, безопасность и т.д.) предъявляются такие требования как стабильная работа совместно с сетью и в автономном режиме, простора и неприхотливость эксплуатации, максимальная унификация состава оборудования и эксплуатационно-расходных материалов. Географические особенности Украины обуславливают возможность широкого применения в качестве источников питания военных объектов малых и микро гидроэлектростанций.

Однако массовое применение такого типа электростанций ограничивается значительными затратами на оборудование и сложностью построения систем управления и регулирования данных объектов. Поэтому актуальной научно-технической практической задачей является оптимизация состава основного, коммутационного и регулировочного оборудования малых и микро ГЭС, способных осуществлять автономное электроснабжение военных объектов и инфраструктуры.

Эффективность работы гидроэлектростанции определяется, главным образом, ее гидротурбинным оборудованием. Гидротурбины преобразуют водную энергию рек, каждая из которых имеет свои отличительные особенности, в механическую энергию вращения ротора, необходимую для выработки генератором электроэнергии.

При проектировании гидротурбин учитываются конкретные значения напоров нетто, расходов, высот отсасывания.

Удельная стоимость гидротурбинного оборудования в общем объеме капитальных затрат на строительство ГЭС на малых станциях существенно выше, чем на крупных, и достигает 25÷30% [1].

Повторение сложных конструктивных решений, традиционных для больших гидротурбин, в малых

гидротурбинах, не всегда оправдано, а иногда, в виду малости размеров, и физически невыполнимо.

Поэтому одной из главных задач, решаемых при разработке малых турбин, является поиск оптимального решения для условий конкретной станции с учетом фактора стоимости, эксплуатационных качеств, энергетических, кавитационных и других показателей.

Введение обоснованных упрощений в конструкцию, например, широко принятое в малых гидротурбинах исполнение направляющих аппаратов и рабочих колес с фиксированными лопатками и лопастями, требует от разработчиков высокого профессионального мастерства, поскольку даже незначительные ошибки в выборе углов установки направляющих лопаток и лопастей могут привести к снижению КПД, недобору мощности, изменению расчетного расхода, кавитационным разрушениям.

Еще одной особенностью, которую следует учитывать при проектировании, является стремление к применению, по возможности, серийных генераторов либо асинхронных электродвигателей, работающих в генераторном режиме. Т.е. при выборе типоразмера гидротурбины конструктор ориентируется на уже имеющуюся номенклатуру электромашин по частоте вращения, мощности, конструктивному исполнению.

Отличием от крупных гидротурбин является и необходимость восприятия в малых турбинах осевых гидравлических усилий собственными подшипниковыми узлами, а не генераторными подшипниками, как в традиционном гидротурбостроении. Такой подход позволяет снизить стоимость генераторов и сократить сроки их изготовления.

Стремление использовать безредукторную схему в диапазоне низких напоров, т.е. схему прямого соединения турбины с серийным генератором, привело к созданию новых конструкций быстроходных пропеллерных гидротурбин с осевым направляющим аппаратом и вынесенным за пределы проточной части гори-

зонгальным генератором (рис. 1). Именно такие полу-прямоточные трубные пропеллерные гидротурбины нашли широкое распространение в малом гидротурбостроении в последние годы и практически вытеснили из низконапорного диапазона другие виды турбин, такие как радиально-осевые, традиционные пропеллерные со спиральной камерой и радиальным направляющим аппаратом, горизонтальные капсюльные, прямоточные типа Страффо.

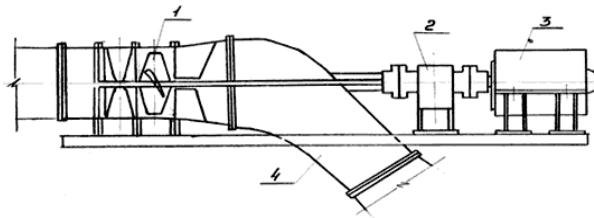


Рис. 1. Гидроагрегат мини ГЭС

1 – осевая гидромашинка серии ПЛ-Г; 2 – мультипликатор; 3 – генератор переменного тока; 4 – "S"-образная отсасывающая труба.

В Украине, специалисты фирмы «Минигидро» для низконапорных малых ГЭС разработали и внедрили в производство три типоразмера трубных пропеллерных гидротурбин с рабочими колесами диаметром до 800 мм единичной мощностью от 15 до 250 кВт с частотой вращения от 500 до 1000 об/мин. Все изготовленные турбины напрямую, через муфту, соединяются с генераторами – асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Зачастую это турбины с различным расчетным расходом и мощностью для лучшего, более экономичного использования воды на ГЭС. Пуск и остановка турбин осуществляются предтурбинными дисковыми затворами.

В области малой и нетрадиционной энергетики разрабатываются гидроагрегаты: с ортогональными турбинами для напоров 1 – 5 м; с пропеллерными турбинами для напоров 5 – 20 м; с турбинами типа «Банки» для напоров 20 – 50 м.

Заслуживают внимания разработки Санкт-Петербургской фирмы "ИНСЭТ". Гидроагрегаты для малых и микроГЭС, выпускаемые МНТО "ИНСЭТ", предназначены для эксплуатации в широком диапазоне напоров и расходов с высокими энергетическими характеристиками и выпускаются с пропеллерными, радиально-осевыми и ковшовыми турбинами.

Определённый интерес представляют разработки Санкт-Петербургской фирмы "Энерго-Альянс", специализирующейся на проектировании и производстве современных поперечно-струйных или двукратных турбин. Упомянутый тип турбин для агрегатов микро- и малых ГЭС может быть использован при напорах от 1,5 до 180 метров. Максимальный коэффициент полезного действия таких турбин, достигает порядка 90 %.

Учитывая неравномерность стока малых рек и отсутствие на МГЭС водохранилищ сезонного регулирования, следует ограничить единичную мощность агрегата величиной 4 – 5 МВт. Для низконапорных турбин потребуются ввести ограничение на диаметр рабочего колеса, обусловленное условиями транспортировки, поскольку желательно иметь агрегаты полной заводской готовности [2].

За основу построения номенклатуры приняты проточные части турбин, представленные в ОСТ 108.023.15-82 и ОСТ 108.023.107-85. Необходимо обеспечить возможность покрытия всего диапазона напоров МГЭС наименьшим числом серий. Следует установить ряд стандартных значений номинальных диаметров рабочего колеса таким образом, чтобы для любой комбинации напора и мощности агрегата можно было выбрать турбину с высокими энергетическими показателями. В [3] авторы показали, что для каждой серии турбин можно назначить диапазон работы по расходу, в котором будут обеспечены высокие энергетические показатели.

Имеющаяся номенклатура проточных частей гидротурбин позволяет обеспечить покрытие диапазона мощностей и напоров малых ГЭС 8 сериями рабочих колес. Ряд номинальных диаметров для РО турбин может быть составлен с  $KD = 1,17$ , а для ПЛ турбин он может быть увеличен до  $KD = 1,38$ . Предельный напор реактивных гидротурбин, обеспечивающий получение положительной высоты отсасывания, составляет 180 м. Максимальный диаметр рабочего колеса по условиям модульной транспортировки агрегата на должен превышать 190 см.

### Изложение основного материала

В целях унификации номенклатуры оборудования малых и микро ГЭС следует рассмотреть возможность использования в качестве гидротурбин серийных осевых и центробежных насосов, промышленный выпуск которых в 1000 раз превышает выпуск гидротурбин. Насосы выпускаются в значительно большем диапазоне напоров и расходов. При этом в качестве генераторов можно использовать те же асинхронные двигатели, которыми комплектуются насосы.

Центробежные горизонтальные насосы, выпускаемые отечественной промышленностью, представлены на двух номограммах. Вертикальные центробежные насосы выплескиваются на напоры до 90 м и расход до  $20 \text{ м}^3/\text{с}$ .

При работе в обратной режиме (турбинном) насос будет иметь характеристики, отличающиеся от указанных в каталоге. Точная характеристика насоса в турбинном режиме может быть получена только на основе достаточно долгих модельных или натуральных испытаний. Для предварительных расчетов можно принимать для оптимального режима работы некоторые средние переходные коэффициенты в

зависимости от коэффициента быстроходности. При этом коэффициент быстроходности для насосного режима определяется по формуле

$$n_{SH} = n Q_H^{0,5} H^{-0,75}, \quad (1)$$

где  $n$  – частота вращения, об/мин;  $Q_H$  – подача насоса, м<sup>3</sup>/с;  $H$  – полный напор, м.

Переходные коэффициенты для пересчета насосных характеристик в турбинные для расхода  $Q_T = Q_H K_Q$ , для напора  $H_T = H_H K_H$  и для КПД  $\eta_T = \eta_H K_\eta$  принимают по табл. 1.

Таблица 1  
Переходные коэффициенты

$n_{SH}$	$K_Q$	$K_H$	$K_\eta$
24	1,42	1,24	0,926
14	2,20	2,02	0,940

Значение точек характеристики насоса в координатах  $Q$ - $H$  (рис. 2) для расчетной частоты вращения насоса умножают на эти коэффициенты. При отличающейся частоте вращения, что будет иметь место при использовании асинхронных двигателей в качестве генераторов, следует дополнительно пересчитывать характеристики насоса на частоту вращения гидротурбины. Так как нормальное скольжение асинхронных двигателей составляет 3%, то при переводе двигателя в генераторный режим необходимо для выдачи мощности в сеть поднять его расчетную частоту вращения примерно на 6%.

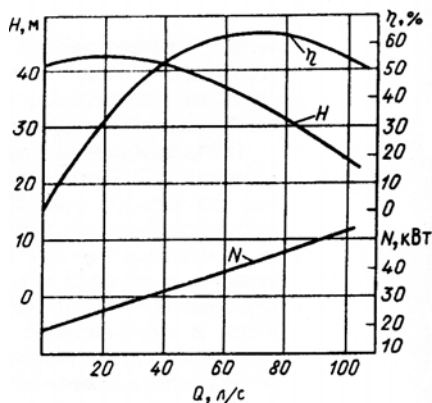


Рис. 2. Характеристики центробежного насоса

Пересчет характеристик насоса на другую частоту вращения производить по формулам:

– для напора

$$H_1 = n_1^2 n^{-2} H; \quad (2)$$

– для расхода

$$Q_1 = n_1 n^{-1} Q; \quad (3)$$

– для мощности

$$N_1 = n_1^3 n^{-3} N. \quad (4)$$

Применение асинхронных генераторов совместно с преобразователями частоты позволяет выбрать оптимальный турбинный режим насоса за счет изменения частоты вращения.

Регулирование установки с центробежными насосами вместо гидротурбин (если оно требует) представляет достаточно сложную задачу, так как насосы не имеют регулируемого направляющего аппарата.

Для очень малых гидроагрегатов мощностью до 50 кВт это регулирование в случае работы на изолированную нагрузку высоконапорных установок можно осуществлять стандартными регуляторами давления (для диаметров напорных трубопроводов до 400 мм) или стандартными клиновыми стальными задвижками с электроприводом, устанавливаемыми на отводе воды от гидротурбины (насоса). Для насосов большой емкости такое регулирование неэкономично из-за больших потерь на дросселирование напора. В этих случаях желательная установка регулятора нагрузки, который обеспечивает работу гидротурбины в оптимуме характеристики, а избыточная мощность при снижении нагрузки гасится балластной нагрузкой, например водонагревателями.

Применение АГ долгое время сдерживалось в основном по двум причинам: из-за отсутствия малогабаритных силовых конденсаторов, обеспечивающих возбуждение генератора и компенсацию реактивной мощности нагрузки, а так же из-за сложности стабилизации выходного напряжения.

В отличие от синхронных генераторов, которые применяются на мощных ГЭС, асинхронные генераторы не подвержены опасностям выпадения из синхронизма. Однако асинхронные генераторы не получили широкого распространения, что объясняется рядом их недостатков по сравнению с синхронными генераторами. Одним из существенных недостатков асинхронных генераторов является значительная реактивная мощность, потребляемая ими из сети. Величина этой мощности пропорциональна намагничивающему току  $I_0$  и может достигать 50% и более от номинальной мощности машины [4]. Из этого следует, что для работы 2 – 3 асинхронных генераторов необходимо использовать один синхронный генератор такой же мощности, что и мощность одного асинхронного генератора. Если же асинхронные генераторы работают параллельно на общую сеть с несколькими синхронными генераторами, то большая величина реактивной мощности возбуждения асинхронных генераторов значительно понизит коэффициент мощности всей электрической сети.

Асинхронный генератор может работать и в автономных условиях, т.е. без включения в общую сеть. Но в этом случае для получения реактивной мощности, необходимой для намагничивания генератора, используется батарея конденсаторов, включенных параллельно нагрузке на выводы генератора.

Наряду с техническими и эксплуатационными характеристиками генераторов, одним из основных критериев выбора типа генератора для гидроэлектростанции малой мощности является также и стоимостные показатели генераторов и сопутствующих их устройств (системы возбуждения и стабилизации напряжения и частоты). Особенно это актуально при реконструкции, модернизации и восстановлении существующих, но находящихся в аварийном состоянии мини и малых ГЭС. Так как затраты на реконструкцию гидротехнических сооружений, здания станции и главной электрической схемы, практически не отличаются и в малой степени зависят от типа гидрогенератора, то решающим значением при сравнении технико-экономических показателей, будет выбор типа гидрогенератора (синхронный, асинхронный или генератор постоянного тока).

В статье мы попытались выяснить, какой тип генератора будет наиболее экономически оправдан при различных мощностях агрегата.

При расчете стоимости генераторов был проведен анализ стоимостных показателей оборудования основных ведущих производителей России, Украины и ряда зарубежных фирм. Цены на генераторы определялись путем нахождения среднего значения для различных типов генераторов от различных производителей. Стоит заметить, что ценовая политика различных производителей отличается в пределах 3-5%, что делает нашу выборку репрезентативной.

При расчете стоимости учитывались системы возбуждения синхронных генераторов (СГ), конденсаторные батареи асинхронных генераторов (АГ), необходимых для самовозбуждения, а также генераторы постоянного тока (ГПТ) без учета инвертора, стоимость которого составляет, в зависимости от типа и мощности, порядка 50% стоимости ГПТ.

На рис. 3 представлена графическая зависимость рыночной стоимости генераторов различных типов в зависимости от их мощности. Цена электрических машин указана в относительных единицах, где 1о.е.=1000 грн.

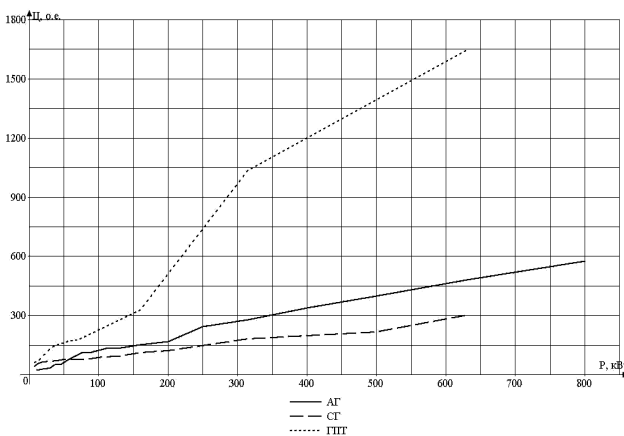


Рис. 3. Зависимость стоимости генераторов от их мощности

Анализ данного экономического сравнения показывает, что применение ГПТ является наименее оправданным и подтверждается отсутствием данных генераторов на станциях рассматриваемого типа. Особенно это будет проявляться, если учесть стоимость инверторов и дополнительных сглаживающих фильтров для обеспечения необходимого качества электроэнергии.

На рис. 4 показан фрагмент выше показанной зависимости для диапазона малых мощностей. Отсюда видно, что использование АГ экономически оправдано при мощности генератора до 50 кВт, при большей мощности экономически оправдан СГ. В литературе [2] наиболее целесообразным по технико-экономическим соображениям рекомендуется применять асинхронные генераторы мощностью не более 20 кВт. По нашему мнению данная разница в мощностях АГ, рекомендуемых к применению связана с тем, что в последнее время проблема с громоздкими и дорогими конденсаторами возбуждения отошла на второй план, поскольку созданы высокоэффективные пленочные самовосстанавливающиеся конденсаторы серии К78-17, которые по своим технико-экономическим показателям превосходят конденсаторы предыдущих серий. Такое качественное улучшение характеристик конденсаторов создало предпосылки для расширения области применения АГ с конденсаторным самовозбуждением.

Данный график подтверждает тенденцию использования АГ на ветроэнергетических установках, где при малых мощностях ветроагрегата АГ превосходят СГ по ряду технико-экономических показателей.

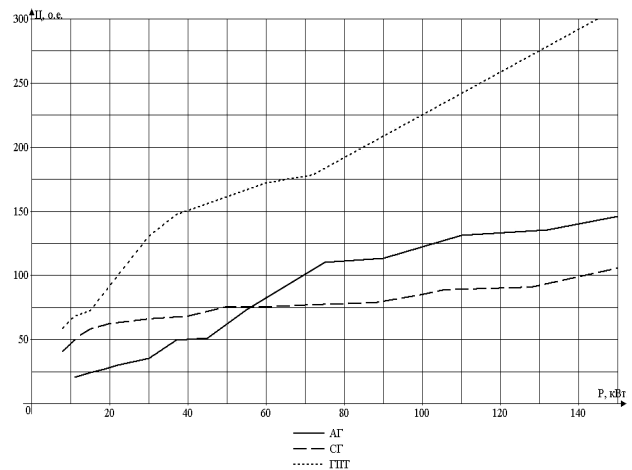


Рис. 4. Фрагмент зависимости стоимости генераторов от их мощности

Характер зависимости стоимости генераторов от мощности объясняется зависимостью массы генераторов от мощности (рис. 5.). На малых мощностях массы СГ больше, т.к. якорь СГ на этих мощностях больше ротора АГ по причине полюсности. На больших мощностях площадь рамки ротора АГ

должна быть большой для создания необходимого магнитного потока, обеспечивающего заданную мощность.

В связи с этим размеры ротора АГ значительно превышают размеры якоря СГ, где такой зависимости нет, а размеры машины определяются токами статора.

Значение мощности, при которой массы СГ и АГ равны, составляет порядка 90 кВт.

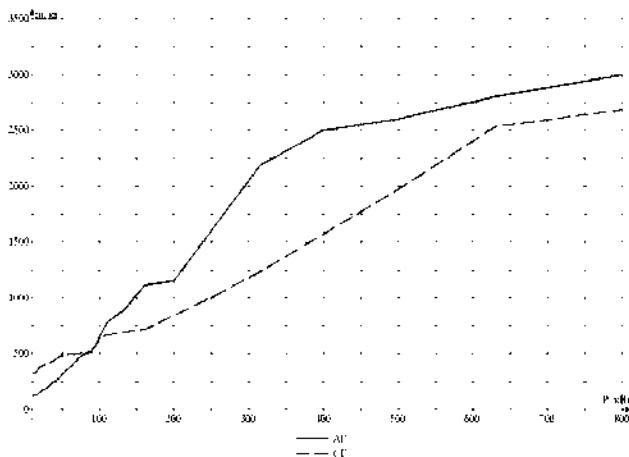


Рис. 5. Залежність маси генераторів від їхньої потужності

Даний розрахунок носить чисто економічний характер і не враховує технічних особливостей роботи АГ і СГ в автономному режимі і на мережу, що необхідно враховувати при повному техніко-економічному аналізі.

Для остаточного відповіді на питання про доцільність застосування АГ для малих ГЕС, необхідно провести повне порівняння технічних характеристик АГ і СГ в різних режимах роботи генераторів. Сюди належить зміна напруги і частоти на виході генератора при пульсаціях витрати і тиску на МГЭС, а також при режимних змінах витрати.

#### АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ УСТАТКУВАННЯ МАЛИХ ГЕС ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ І ІНФРАСТРУКТУРИ

А.М. Чернюк

У статті проведений аналіз складу основного устаткування малих і мікро гідроелектростанцій використовуваних в якості джерел живлення об'єктів військової інфраструктури, визначені перспективи оптимізації складу устаткування електростанцій даного типу, розглянуті техніко-економічні питання створення і роботи малих і мікро гідроелектростанцій.

**Ключові слова:** малі і мікро ГЕС, оптимізація складу устаткування, техніко-економічні показники, вибір генераторів, система управління і регулювання.

#### ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF COMPOSITION OF EQUIPMENT SMALL HPS FOR THE AUTONOMOUS ENERGY SUPPLY OF MILITARY OBJECTIVES AND INFRASTRUCTURE

A.M. Chernyuk

In the article the analysis of composition is conducted basic small and micro the hydroelectric power stations utilized in sources of feed of objects of military infrastructure, the prospects of optimization of composition of equipment of power-stations of this type are certain, the technique and economy questions of creation and work are considered small and micro the hydroelectric power stations.

**Keywords:** small and micro GES, optimization of composition of equipment, technique and economy indexes, choice of generators, control the system and regulation.

Этот вопрос требует тщательной проработки, т.к. на МГЭС малой мощности может быть использован упрощенный регулятор, в связи с чем, точность поддержания частоты вращения гидроагрегата и его мощности ниже, чем у крупных ГЭС.

#### Выводы

1. Выбор типа генератора, а следовательно и стоимость капитальных вложений, является определяющим при проектировании, реконструкции и восстановлении малых и микро ГЭС.

2. Генераторы постоянного и их системы стабилизации напряжения и частоты являются наиболее дорогостоящими и являются экономически неоправданными для применения на малых и микро ГЭС.

3. Использование АГ экономически оправдано при мощности генератора до 50 кВт, при большей мощности экономически оправдан СГ.

4. Значение мощности, при которой массы СГ и АГ равны, составляет порядка 90 кВт.

#### Список литературы

1. Бумарсков С.А. Опыт создания малых гидротурбин / С.А. Бумарсков // Энергетика и электрификация. – 2005. – № 7. – С. 41.

2. Орахелашвили Б.М., к.т.н. МЭИ (ТУ), Маркин В.Н., гл. спец. РАО «ЕЭС России»; «Гидротехническое строительство», 2003 г.

3. Орахелашвили Б.М. Состояние и пути развития энергетического оборудования малых ГЭС / Б.М. Орахелашвили, С.Б. Фоткин, А.П. Ливинский // Горный журнал. – 2004. – С. 47-52.

4. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектростанции / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003. – 400 с.

Поступила в редколлегию 2.09.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.