

**З.М. ХАЧИКЯН**

**АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ СИСТЕМЫ  
ГИДРОГЕНЕРАТОР-ТРАНСФОРМАТОР**

Изучены схемы замещения синхронных машин с явновыраженными полюсами, в результате чего выбрана та схема, которая позволяет исследовать режимы работы гидрогенератора. На основе выбранной схемы разработана схема замещения системы гидрогенератор-трансформатор и построена векторная диаграмма.

*Ключевые слова:* гидрогенератор, трансформатор, схема замещения, векторная диаграмма, явнополюсная синхронная машина.

**Z.M. KHACHIKYAN**

**ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF THE EQUIVALENT CIRCUIT OF  
THE SYSTEM HYDROGENERATOR-TRANSFORMER**

The equivalent circuits of salient-pole synchronous machines are studied. As a result, a scheme, allowing to investigate the operation modes of the hydrogenerator is selected. Based on the chosen equivalent circuit, the equivalent circuit of the system hydrogenerator-transformer is developed, and the vector diagram is designed.

*Keywords:* hydrogenerator, transformer, equivalent circuit, vector diagram, salient-pole synchronous machine.

УДК 621.313

**М.А. САГАТЕЛЯН, Г.Х. КАЗАРЯН**

**ВОПРОСЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ  
ГОРНЫХ РЕК**

Рассмотрены вопросы преобразования энергии водных ресурсов горных рек Республики Армения. Проведен анализ водных ресурсов Армении. Рассмотрены вопросы применения гидротурбин различных типов, что позволяет увеличить энергетический потенциал малых гидроэлектростанций и технико-экономические показатели всего комплекса.

*Ключевые слова:* малые гидроэлектростанции, технико-экономические показатели, гидротурбина, напор воды, расход воды.

Малая гидроэнергетика является одним из быстро развивающихся направлений нетрадиционной энергетики во всем мире, в том числе и в Армении, что обусловлено числом малых рек.

Правильный выбор конструктивных решений основных узлов малых гидроэлектростанций (МГЭС) дает возможность получить сравнительно большую энергоэффективность и энергобезопасность всей системы, а правильный технико-экономический анализ МГЭС дает представление об ожидаемых затратах и сроках окупаемости. Особое значение имеет правильный выбор типа и системы гидротурбины и электрогенератора. Для выбора гидроагрегата необходимо сопоставить параметры турбины и генератора. Основным параметром, от которого зависят все остальные параметры, размеры и цена гидроагрегата, является скорость вращения. С этой целью проведен анализ водных ресурсов Республики Армения (РА) и даны технико-экономические показатели по применению гидротурбин в МГЭС РА.

Территориальное месторасположение водного объекта играет важную роль при решении вопроса о целесообразности использования МГЭС в качестве альтернативного источника электроэнергии. Удаленность водного объекта от потребителя более чем на 5 км является определяющим фактором при оценке рентабельности использования МГЭС, поскольку требуются значительные затраты на строительство и эксплуатацию воздушных линий (ВЛ) электропередач.

При расположении водных объектов до 5 км от потребителя стоимость реализации проекта определяется стоимостью гидроагрегата, а также строительного и вспомогательного оборудования, затратами на переустройство гидротехнических сооружений и монтаж оборудования, стоимостью на строительство ВЛ. В качестве определяющего фактора стоимости строительства МГЭС выступает стоимость агрегата, обусловленная только параметрами водных объектов и их гидротехнических сооружений.

В процессе выбора водного объекта для размещения МГЭС необходимо знать напор и расход воды, которые являются основными параметрами при выборе типа агрегата и его установленной мощности.

Таким образом, зная параметры водохранилища, гидротехнических сооружений, а также выбрав тип устанавливаемого агрегата (в соответствии с его установленной мощностью), можно установить конечного потребителя электрической энергии и рентабельность реализации проекта. Аналогичным образом, имея значение необходимой выработки электрической энергии (для обеспечения отдельно взятого потребителя), можно определить параметры гидроагрегата и сопоставить возможность его установки на данном водном объекте [1].

Выбор потребителя является одним из решающих факторов при подборе гидроагрегата (гидротурбины (ГТ) и гидрогенератора), поскольку его параметры могут не справиться с обеспечением требуемых нужд.

По принципу работы ГТ бывают двух типов: активные, которые работают от свободной струи при нормальном атмосферном давлении за счет кинетической энергии воды и применяются лишь при больших напорах, от 40 до 800 м, и реактивные, которые работают, главным образом, за счет энергии давления воды, сохраняют энергию в потенциальной форме и охватывают область напоров от 1,5...2 до 350 м. Основным рабочим органом ГТ, в котором происходит преобразование энергии, является рабочее колесо.

По способу регулирования мощности реактивные ГТ бывают одинарного и двойного регулирования. По расположению вала рабочего колеса ГТ делятся на вертикальные, горизонтальные и наклонные [2].

Существуют различные типы ГТ, которые отличаются мощностью и напором воды. Самыми распространенными типами ГТ, которые применяются в системах МГЭС, являются осевые (пропеллерная турбина Каплана), радиально-осевые (турбина Френсиса), ковшовые (турбина Пелтона), турбины Турго и поперечно-струйные турбины Банки-Митчелла.

1. В осевых или пропеллерных турбинах Каплана, которые рассчитаны на большой расход и малый напор, ось вращения турбины обычно располагают горизонтально. Во всех осевых турбинах лопасти рабочего колеса могут поворачиваться в соответствии с изменениями напора, что особенно ценно в условиях переменного напора. Расчётный диапазон напора для горизонтальных осевых турбин составляет 3...15 м. Вертикальные осевые турбины используются при напорах от 5 до 30 м. Лопатки направляющего аппарата поворачиваются на осях, параллельных валу. Турбина снабжена подводной камерой, к которой подходит водовод [3].

Пропеллерная турбина имеет самую высокую быстроходность среди всех типов турбин, что позволяет при малых скоростях потока получать более высокую скорость вращения. Высокие обороты турбины, в свою очередь, позволяют применять более быстроходные, а значит, более легкие и дешевые электрогенераторы или уменьшать расходы на мультипликаторы [4].

2. В радиально-осевых турбинах (турбина Френсиса) вода входит по радиусу и выходит в осевом направлении, поступая с наружной образующей ротора, и движется по радиусу к центру турбины. Пройдя между лопастями сложной пространственной изогнутой формы, вода отдает энергию ротору,

заставляя его вращаться. Эти турбины применительны при повышенных напорах (от 12 до 300 м) [3,4].

3. Ковшовая гидротурбина является активной и применяется для напоров, превышающих 300 м. В них есть от одного до шести сопел кругового сечения, создающих водяные струи, которые падают на лопасти рабочего колеса. Расход воды регулируется перекрытием проходного сечения сопел. Рабочее колесо работает не под водой, как в осевой и радиально-осевой турбинах, а в воздухе. Высокоскоростная свободная водяная струя бьет в лопасть рабочего колеса, которая имеет форму двойного ковша. Это наиболее распространенная разновидность активных ГТ, использующих кинетическую энергию потока воды и применяемых при больших напорах 200...1500 м и выше [3,4].

4. Диагональная турбина представляет собой пропеллерную турбину, оси лопастей которой расположены не перпендикулярно к оси ротора, а под углом 30, 45, 60 градусов. Такое расположение лопастей позволяет сделать более плавной траекторию движения воды по спиральной камере к отсасывающей трубе, что уменьшает потери. Диагональные турбины, как и пропеллерные, имеют широкий диапазон регулирования и приспособлены для работы при нестабильных расходах воды и переменной электрической нагрузке [5,6].

5. В турбине Турго кинетическая энергия струи воды преобразуется в работу за счет удара об лопасть. Струя воды ударяет по одной стороне ротора и выходит в противоположную сторону. Поскольку в турбине Турго используются фиксированные сопла, то и гидроэлектростанция должна работать на фиксированной скорости потока.

Более совершенная конструкция турбины позволяет работать ГЭС на более высоких скоростях потока, чем аналогичные по размерам ковшовые турбины Пелтона. При этом изготовление ротора и лопаток обходится значительно дешевле. Для малой энергетики большинство производителей изготавливают лопатки из нейлона, пластика или нержавеющей стали.

Использование малых ГЭС на базе турбин Турго имеет ряд преимуществ [7]: минимальная стоимость турбины, высокий коэффициент полезного действия (КПД), экологическая безопасность – турбина никоим образом не изменяет свойства и качество воды, за счет малого расхода воды для работы ГЭС небольшой мощности достаточно ручья или маленькой речки, высокий экономический эффект, низкая стоимость вырабатываемой электроэнергии, возможность подключения к сети, а также использование в качестве автономного источника электроснабжения.

6. Турбина Банки-Митчелла, или турбина с поперечным потоком относится к турбинам активного типа, поскольку при её работе давление в роторе остается постоянным. Если турбина будет применяться в замкнутом кожухе, дающем возможность использования энергии подсоса, и не менее 50% преобразованной турбиной энергии является энергией реакции потока, возникающей при расширении рабочего тела в каналах, образованных её лопатками, то такая турбина будет являться реактивной. Реактивная схема эксплуатации турбины поперечного потока может быть реализована лишь в том случае, если нижний бьеф воды находится много ниже нижнего края ротора. Эти турбины работают при напоре 3...200 м и расходе 0,03...13 м<sup>3</sup>/с и имеют мощность 5...3000 кВт.

Турбина состоит из цилиндрического колеса (ротор с горизонтальным валом) и прикрепленных к нему многочисленных (до 37) лопастей, расположенных радиально и тангенциально. Края лопастей заострены для уменьшения гидродинамического сопротивления. Лопатки сделаны в виде сегментов трубы, вырезанных по всей её длине.

Струя воды направляется к ротору турбины по направляющим соплам, обычно имеющим прямоугольную форму. Поперечное сечение потока регулируется узлом, имеющим форму лопатки или языка. Вода поступает в ротор под углом около 45 или 120 градусов в зависимости от использования одной из двух схем подачи воды, передавая кинетическую энергию лопаткам ротора. Вода в турбину поперечного потока течет сначала из её внешней стороны вовнутрь, передавая свою кинетическую энергию лопаткам с внешней стороны, и поступает к турбине по двум соплам, сечение которых изменяется путём вращения двух языкообразных направляющих лопаток. Это обеспечивает плавное изменение потока воды, протекающей через сопло при любой ширине открытия. Направляющие лопатки могут в крайнем положении вовсе закрыть сопло, выступая таким образом в качестве клапанов подачи воды к турбине. Обе направляющие лопатки могут вращаться посредством рычагов, управляемых вручную или посредством автоматики. Геометрия турбины (сопло–ротор турбины–вал) обеспечивает эффективное преобразование кинетической энергии воды в энергию вращения. Вода воздействует на лопатки два раза, но большая часть энергии воды преобразовывается на входе, когда вода попадает в ротор. Только треть мощности передается на ротор при выходе воды из турбины.

Вода проходит через каналы между лопастями турбины в двух направлениях: снаружи внутрь и изнутри наружу. Большинство турбин изготавли-

ваются для использования двух струй воды, направляемых таким образом, чтобы две струи воды в роторе не мешали течению друг друга. При этом, однако, также необходимо, чтобы скорость воды в двух турбинах и скорость вращения турбины были согласованы между собой.

Низкие эксплуатационные расходы турбин поперечного потока сочетаются с относительной простотой их конструкции. Максимальный КПД данной турбины составляет около 80%, что несколько меньше, чем у турбин Каплана, Фрэнсиса или Пелтона. Но, в отличие от них, турбина поперечного потока имеет плоскую кривую КПД при переменной нагрузке. При двоярном роторе и турбинной камере турбина поперечного потока сохраняет свою эффективность при нагрузке, меняющейся от 1/6 до максимума.

Ввиду небольшой стоимости и хорошей управляемости турбины с поперечным потоком в основном используются в энергоблоках малых ГЭС, имеющих мощность менее 2000 кВт и действующих при напорах менее 200 м.

В частности, на небольших русловых ГЭС плоская кривая КПД турбины с поперечным потоком дает лучшие среднегодовые показатели выработки электроэнергии, чем другие системы турбин. Это тем более важно, что на небольших реках, на которых обычно используются турбины данного типа, в течение нескольких месяцев расход воды бывает, как правило, низким. Общую эффективность турбины на таких реках определяет электроэнергия, производимая в маловодные периоды. В таком случае, если будут использованы турбины, имеющие высокий КПД при максимальной нагрузке, но низкий при частичной нагрузке, их общая среднегодовая выработка электроэнергии оказывается ниже, чем у турбин с плоской кривой КПД.

Благодаря отличной эффективности при частичных нагрузках турбина поперечного потока хорошо подходит для автоматического производства электроэнергии. Ее простая конструкция делает обслуживание более легким, чем турбин других типов; требуются только два подшипника и только три вращающиеся детали. Механическая часть турбины весьма проста, поэтому её ремонт может быть выполнен местными механиками.

Еще одним преимуществом турбин поперечного потока является то, что они являются самоочищающимися: когда вода выходит из ротора, она, действуя вместе с центробежной силой, вымывает попавшие туда листья, траву и прочие мелкие предметы. Это предотвращает снижение эффективности турбины поперечного потока, что иногда происходит с турбинами других типов, когда они забиваются занесенным в них мусором. Ввиду этого, хотя максимальный КПД турбины поперечного потока несколько ниже, чем у

других систем, в работе он оказывается более надежным. Обычно нет необходимости специальной очистки ротора, например, подачей обратного потока, изменением скорости потока воды или числа оборотов турбины. Другие типы турбин легче забиваются мусором, поэтому их средняя выработка оказывается ниже, чем у турбин поперечного потока, несмотря на номинально более высокий КПД при максимальной нагрузке [7].

Каждому существующему типу турбины соответствуют оптимальные значения напора и расхода воды, при которых ГЭС может работать с возможной максимальной эффективностью. Эффективность турбины определяется как отношение мощности, подаваемой на вал, к мощности, взятой от потока воды:

$$\eta = \frac{BH\omega}{\gamma QH_0} = \frac{P}{\gamma QH_0},$$

где  $BH$  – вращающийся момент ( $H.m$ );  $P$  – мощность ( $Bm$ );  $\omega$  – угловая скорость ( $rad/c$ );  $Q$  – скорость потока ( $m^3/c$ );  $H_0$  – перепад (высота падения воды) на турбине. Эффективность разных типов турбин меняется вместе с расходом воды (рис. 1). Общая эффективность ГЭС зависит от эффективности турбины и электрогенератора. В современных ГТ полный КПД равен 0,85...0,91, а при благоприятных условиях работы лучших образцов ГТ он достигает 0,94...0,95 [7].

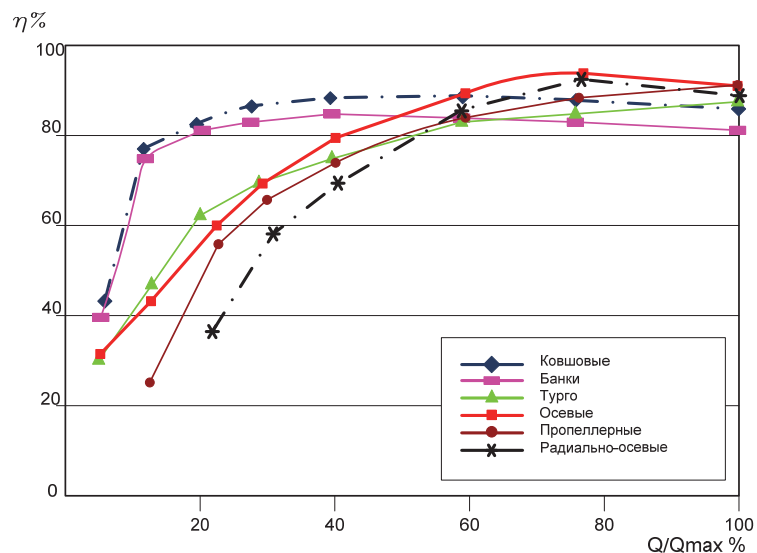


Рис.1. Зависимость эффективности от номинального расхода для разных турбин

С целью правильного выбора ГТ для водных ресурсов РА составлен график по средним годовым значениям напора и расхода воды, как представлено на рис. 2.

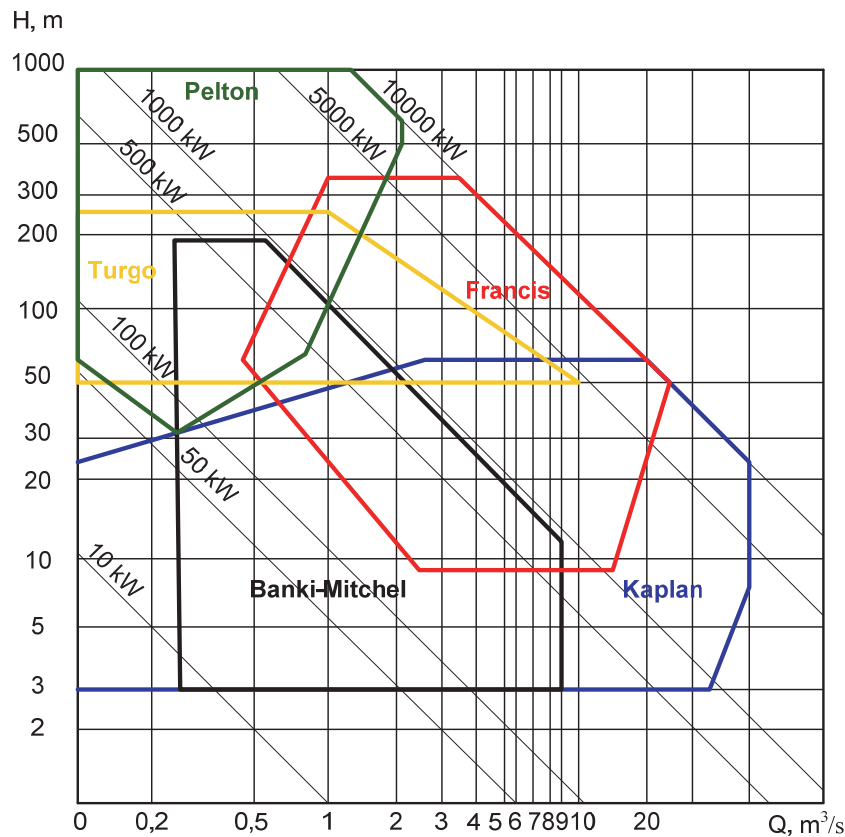


Рис. 2. График выбора турбины для МГЭС, исходя из напора (H) и расхода (Q) воды

Развитие гидроэнергетики в Армении дает возможность снабжать электроэнергией отдаленные населенные места, вблизи которых находится какой-либо водный объект. В РА существует множество успешно работающих МГЭС и планируется строительство новых. С целью обоснования экономичности и эффективности МГЭС Армении был проведен анализ 41 существующей МГЭС РА мощностью 1...5 МВт, которые принадлежат разным речным бассейнам.

Напор воды рассмотренных МГЭС лежит в диапазоне 51,2...575 м, а расход – 0,45...6 м³/с. Средние годовые значения МГЭС РА: напор воды – 167 м, расход воды – 2 м³/с, мощность МГЭС – 2200 кВт, выработанная электроэнергия – 8,15 млн.кВтч. В данных диапазонах расхода и напора воды применяются гидротурбины, указанные в таблице.

Гидротурбины, применяемые в малых ГЭС

Параметр	Название турбины				
	Турбина Френсиса	Турбина Пелтона	Турбина Каплана	Турбина Турго	Турбина Банки
Мощность ГЭС, <i>MВт</i>	1...5	1...5	1...5	1...5	1
Напор воды, <i>м</i>	12...300	300...1000	3...60	50...270	3...200
Расход воды, <i>м<sup>3</sup>/с</i>	0,5...20	0,1...2	2...30	0,5...10	0,3...9

На территории РА существует множество МГЭС с установленными мощностями 100...5000 *кВт*. Согласно рис.1, можно сказать, что при нагрузках 30...100% КПД меняется незначительно (~ 5%), что позволяет спроектировать гидроагрегат с установившейся мощностью, соответствующей энергии воды рек в весенний период. Это позволяет эффективно использовать МГЭС за весь год эксплуатации.

В соответствии с энергетическими параметрами реки, выбрав оптимальную скорость узлов гидроагрегата, можно повысить рентабельность МГЭС и уменьшить экономические расходы при ее реализации.

#### **Выводы**

1. Эффективное использование гидроресурсов Армении обеспечивается при мощностях МГЭС 1...5 *MВт*.
2. Применение турбин Турго или Банки-Митчелла в гидроагрегатах мощностью до 5 *MВт* позволяет повысить технико-экономические показатели МГЭС.
3. Стоимость и эффективность гидроагрегата определяются выбором скоростных характеристик генератора и гидротурбины.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щавелев Д.С., Губин М.Ф., Куперман В.Л., Федоров М.Ф. Экономика гидротехнического и водохозяйственного строительства: Учеб. для вузов.-М.: Стройиздат, 1986.-423 с.
2. [dic.academic.ru/dic.nsf/bse/79246/Гидротурбина](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/79246/Гидротурбина)
3. **Авилов В.Д., Серкова Л.Е.** Малая гидроэнергетика и энергетическая стратегия Сибирского региона // Научный журнал “Национальные приоритеты России”.- 2009.-N 1(1).
4. Малая гидроэнергетика.– межотраслевое научно-техническое объединение “ИНСЭТ”, Санкт-Петербург, [www.inset.ru/r/predm.htm](http://www.inset.ru/r/predm.htm)
5. [www.krugosvet.ru](http://www.krugosvet.ru)
6. [dic.academic.ru/dic.nsf/bse/96455/Ковшовая](http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/96455/Ковшовая)
7. **Helena Ramos, A. Betâmio de Almeida, M. Manuela Portela, H. Pires de Almeida.** Guidelines for Design of Small Hydropower Plants.-2000.-190 p.

## Մ.Ա. ՍԱԴԱԹԵԼՅԱՆ, Գ.Խ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ

### ԼԵՆՆԱՅԻՆ ԳԵՏԵՐԻ ԶՐԱՅԻՆ ՌԵՍՈՒՐՍՆԵՐԻ ԷՆԵՐԳԻԱՅԻ ԿԵՐՊԱՓՈՒՄԱՆ ՀԱՐՑԵՐ

Ուսումնասիրվել են Հայաստանի Հանրապետության լեռնային գետերի ջրային ռեսուրսների էներգիայի կերպավորման հարցերը: Ներկայացված է Հայաստանի ջրային ռեսուրսների վերլուծությունը, ուսումնասիրված են տարբեր տիպի հիդրոտուրբինների կիրառման հարցերը, որոնք հնարավորություն են տալիս մեծացնելու փոքր հիդրոէլեկտրակայանների էներգետիկական պոտենցիալը և ամբողջ համալիրի տեխնիկատնտեսական ցուցանիշները:

**Առանցքային բաներ.** փոքր հիդրոէլեկտրակայաններ, տեխնիկատնտեսական ցուցանիշներ, հիդրոտուրբին, ջրի ճնշում, ջրի ծախս:

## M.A. SAGHATELYAN, G.KH. GHAZARYAN

### ISSUES ON CONVERTING THE POWER OF THE MOUNTAIN RIVER WATER RESOURCES

Issues on the energy conversion of the mountain river water resources of Republic of Armenia (RA) are considered. The analysis of water resources of Armenia is given. The issues on the use of applying different hydro-turbines are considered, allowing to increase the energetic potential of small hydropower plants (SHPP) and technical and economic indices of the whole complex.

**Keywords:** small hydropower plants, technical and economic indices, hydroturbine, head of water, water discharge.