

ПОДБОР ГИДРОТУРБИН ДЛЯ МАЛЫХ ГЭС С ПОМОЩЬЮ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Э.В. КОСТЮЧЕНКО, канд. техн. наук, доцент,
С.В. АРТЕМЧУК, канд. техн. наук., доцент,
С.Б. СЕМБУР, Л.В. ПИВОВАРЧИК, студенты.
БАТУ

В первые послевоенные годы получило широкое распространение строительство ГЭС на малых реках. В дальнейшем, когда была развита энергосистема Белоруссии, к ней были подключены сельские потребители, и эксплуатация малых ГЭС в большинстве случаев стала нерентабельной ввиду больших эксплуатационных затрат: зарплата, ремонт и т.п. Поэтому многие малые ГЭС были законсервированы либо демонтированы.

В 90-х годах произошло значительное увеличение цен на топливо и электроэнергию, поэтому вновь возникли экономические предпосылки для строительства ГЭС на малых реках. В настоящее время малые ГЭС восстанавливаются и намечается строительство новых.

При проектировании ГЭС одним из важнейших вопросов является подбор гидротурбин. В настоящее время они выбираются в основном с помощью главных универсальных характеристик (ГУХ) [1] и формул, вытекающих из условия подобия гидромашин:

$$Q_1' = \frac{Q}{D_1^2 \sqrt{H}} \quad (1)$$

$$n_1' = \frac{n D_1}{\sqrt{H}} \quad (2)$$

где
- величины, относящиеся к рассматриваемой турбине:

Q - расход, м³/с,

H - напор, м,

D_1 - диаметр рабочего колеса, м, n - частота вращения, мин⁻¹;

- величины, относящиеся к турбине подобной данной, работающей при напоре $H=1$ м и имеющей диаметр на входе в рабочее колесо $D_1=1$ м:

Q_1' - приведенный расход;

n_1' - приведенная частота вращения.

Единицы приведенных величин для удобства сравнения приняты такие же, как и для соответствующих натуральных.

На ГУХ нанесены линии равных КПД $\eta = \text{const}$, равных коэффициентов кавитации $\sigma = \text{const}$ и некоторые другие, которые не являются предметом рассмотрения в настоящей работе.

Подбор ведется по режимной точке, для которой расход Q и напор H являются расчетными. Расчетный расход ГЭС на малой реке принимается обеспеченностью порядка 75...90 % (в среднем 80 %). По отметке НПУ и кривой связи отметок нижнего бьефа с расходами воды в реке находится соответствующий расчетный напор.

Расчетный расход турбины зависит от числа турбин, которое принимается равным 1, 2 или 3. Одна турбина назначается для ГЭС малой мощности, естественно в этом случае расход турбины равняется расходу ГЭС.

В зависимости от напора с учетом эксплуатационно-экономических показателей намечаются типы возможных для применения гидротурбин в каждом конкретном случае.

Для равнинных условий Республики Беларусь напоры ГЭС только в редких случаях могут превышать 10 м. На таких небольших напорах применяются главным образом реактивные гидротурбины, в основном, с поворачивающимися или жесткозакрепленными лопастями, либо (для малых мощностей) некоторые радиально-осевые, например РО 45.

Из активных турбин для малых напоров предназначается двукратная, но в настоящее время она промышленностью не выпускается, так как по энергетическим показателям не может конкурировать с реактивными. Но следует отметить, что она простая по конструкции и может быть изготовлена в обычных ремонтных мастерских.

Основной недостаток двукратной турбины - малая частота вращения, что требует применения более дорогих генераторов или передающего момент устройства, например, клиноременной передачи либо редуктора.

Из реактивных турбин более простой конструкцией обладают радиально-осевые. Они отличаются хорошей надежностью и сравнительно небольшой стоимостью.

Наиболее сложными в конструктивном отношении турбинами являются поворотные-лопастные, особенно ПЛ 50, имеющие вместо обычных четырех 7 лопастей, а также капсульные агрегаты, у которых генератор находится под водой в специальном кожухе (капсуле). Это создает дополнительные трудности при эксплуатации.

Большим преимуществом поворотных-лопастных турбин является высокий КПД в широком

диапазоне режимов работы, а также высокая в сравнении с другими турбинами частота вращения, позволяющая напрямую соединять валы турбины и генератора.

Для режимной точки, используя ГУХ, а также формулы (1) и (2), определяются оптимальные диаметр и частота вращения. Выбираются ближайшие (большее и меньшее) стандартные значения диаметра и частоты вращения турбины. Таким образом, для каждого подходящего по напору типа турбины возникают 4 возможных для применения варианта турбин, из которых выбирается вариант, обеспечивающий наибольший КПД.

Основной недостаток данного метода - отсутствие наглядности. Это не позволяет визуально, без многочисленных расчетов, существенно ограничить количество сравниваемых вариантов турбин. Кроме того, необходимо проверить эффективность турбин в периоды, отличающиеся от расчетного, то есть в маловодные и многоводные. Это также требует большой вычислительной работы при использовании рассмотренного метода.

А.А. Башкиров [2] еще в 1944 году предложил для подбора турбин применять эксплуатационные характеристики, построенные в логарифмических координатах. Его метод обладает большой наглядностью, позволяет быстро наметить 2 или 3 лучших типоразмера турбин и выбрать вариант, обеспечивающий наибольшую выработку электроэнергии.

В основе рассматриваемого метода лежит применение накладочной сетки, которая представляет собой семейство линий равных диаметров D_1 и частот вращения n (рис. 1). Сетка построена в логарифмических координатах, при этом по оси абсцисс отложен расход Q , а по оси ординат напор H .

В качестве постоянных параметров при по-

строении сетки приняты стандартные диаметры рабочих колес турбин и синхронные частоты вращения. Точки пересечения линий $D_1 = \text{const}$ и $n = \text{const}$ являются привязочными. Одной из них является точка с координатами $Q=1 \text{ м}^3/\text{с}$, $H=1 \text{ м}$, которая также является привязочной для построения эксплуатационных характеристик гидротурбин. Поэтому через эту точку проводятся прямые при $D_1=1 \text{ м}$ и $n=75 \text{ мин}^{-1}$.

Уравнения линий $D_1 = \text{const}$ и $n = \text{const}$ вытекают из (1) и (2), если подставить в них параметры привязочной точки.

В этих уравнениях D_1 и n рассматриваются как постоянные параметры, при этом диаметры рабочих колес турбин принимаются равными стандартным значениям, а частоты вращения - синхронным.

В логарифмических координатах обе системы линий будут прямыми, но с разными углами наклона.

Преимущество логарифмической сетки состоит в том, что характеристика гидротурбины при перемещении ее в разные области сетки не меняет своей формы ввиду того, что при логарифмировании умножение заменяется сложением.

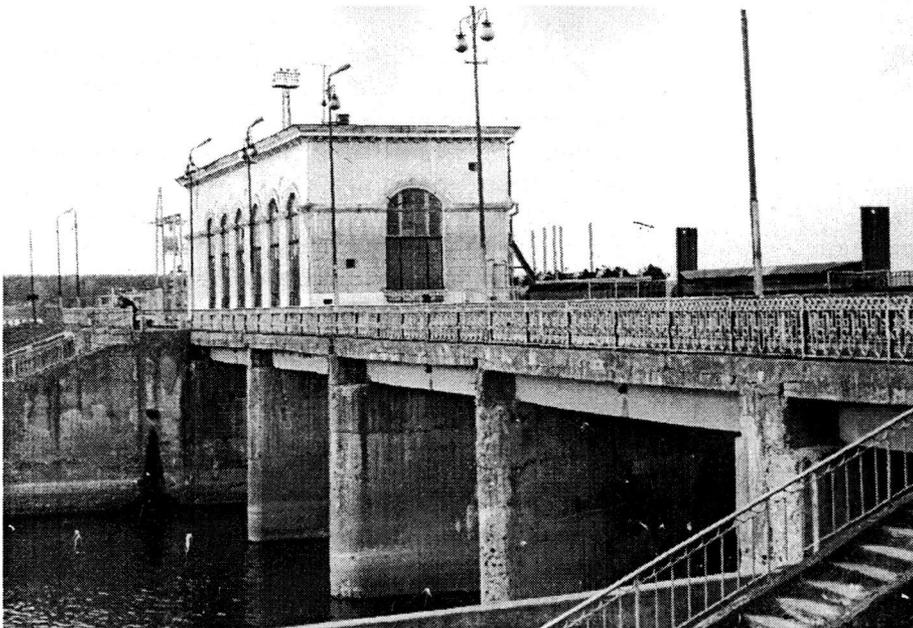
Для наложения на логарифмическую сетку главные универсальные характеристики турбин с помощью формул (1) и (2) пересчитываются в эксплуатационные, которые представляют собой семейство линий равных КПД в координатах Q - H .

Эксплуатационная характеристика, а также привязочная точка ($H=1 \text{ м}$, $Q=1 \text{ м}^3/\text{с}$) и пересекающиеся в ней отрезки линий $D_1=1 \text{ м}$ и $n=75 \text{ мин}^{-1}$ переносятся на прозрачную бумагу.

Для подбора турбин на логарифмическую сетку наносятся режимные точки, которые соответствуют предполагаемым условиям работы турбины.

В равнинных условиях Республики Беларусь напоры ГЭС в редких случаях могут превышать 10 м, поэтому объемы водохранилищ будут недостаточны, чтобы обеспечить хотя бы суточное регулирование работы ГЭС.

Для рассмотренных условий наиболее экономичным режимом работы ГЭС будет работа, при которой по возможности полностью используется мощность реки. Такой режим обеспечивается, когда ГЭС подключена к энергосистеме, в верхнем бьефе плотины поддерживается постоян-



Осиповичская ГЭС на р. Свислочь.

ный уровень воды, соответствующий отметке нормального подпертого уровня (НПУ), а в нижний бьеф вода сбрасывается мимо турбин только в случаях, когда расход воды в реке превышает их пропускную способность. Ее принимают, как и ранее, равной среднегодовому расходу 80 % обеспеченности.

Таким образом, в случаях, когда расходы воды в реке меньше пропускной способности турбин ГЭС, абсциссы режимных точек принимаются равными среднемесячным расходам реки в год 80% обеспеченности.

При больших расходах, в период паводка, абсциссы режимных точек равны пропускной способности турбин ГЭС.

Ординаты режимных точек, то есть напоры ГЭС, определяются для соответствующих расходов реки как разность геодезических отметок НПУ и уровней воды в нижнем бьефе, используя их связь с расходами реки.

Для примера рассмотрим подбор турбин для ГЭС на реке, среднемноголетний расход 80 % обеспеченности которой равен 6 м³/с. Проектируемая отметка НПУ составляет 110 м. Задана также зависимость уровня воды в нижнем бьефе от расходов воды в реке. Она обычно представляется в виде графика или таблицы (в данной работе не приводится).

В целях сокращения объема статьи ограничимся при расчете только четырьмя режимными точками для наиболее характерных периодов: апрель - максимум паводка, май - конец паводка, август - межень с наименьшим расходом, декабрь - наиболее напряженный по нагрузке месяц, расходы в реке близки к среднемеженным.

Ввиду отсутствия наблюдений на реке для определения расходов используем типовой гидрограф, где расходы воды в реке представлены в долях от среднегодового. В данном случае для рек бассейнов Припяти и Немана находим расходы для указанных выше месяцев, по кривой связи определяем отметки уровней воды в нижнем бьефе ГЭС и по разности уровней вычисляем напор. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Режимные точки в соответствии с табл. 1 наносим на накладочную сетку (рис. 1).

Из табл. 1 видим, что наибольший напор ГЭС равен 4,2 м, поэтому можно применить любую

лопастную гидротурбину. Возьмем хорошо себя зарекомендовавшую на практике турбину типа ПЛ 20. Предельный напор, для которого она может быть применена, составляет 20 м, то есть условие применимости турбины в рассматриваемых условиях выполняется.

Число агрегатов намечаем равным двум. Следовательно, пропускная способность каждой турбины равна 3 м³/с. Это обеспечит возможность ремонта агрегатов в маловодный период без прекращения выработки электроэнергии. Кроме того, увеличение числа агрегатов позволяет обеспечить работу ГЭС с большим КПД в широком диапазоне нагрузок.

Поскольку приняты две турбины, то на прозрачной бумаге необходимо построить суммарную характеристику ГЭС.

Для этого на дополнительном втором листе прозрачной бумаги, который будет использован для построения суммарной характеристики, копируется еще раз эксплуатационная характеристика турбины. Затем лист с характеристикой накладывается на сетку таким образом, чтобы привязочная точка характеристики совпала с точкой сетки, координаты которой, например, Q=1 м³/с, H=10 м.

Под него подкладывается первый лист с характеристикой таким образом, чтобы при том же напоре расход увеличился в 2 раза, в рассматриваемом примере это будет точка с координатами H=10 м, Q=2 м³/с, и на лист, предназначенный для суммарной характеристики, переносится характеристика второй турбины. При перемещении листов прозрачной бумаги необходимо следить, чтобы скрещивающиеся отрезки в привязочной точке оставались параллельными соответствующим линиям сетки. Аналогично строится суммарная характеристика и для большего числа турбин.

Если провести линию через точки, в которых пересекаются изолинии одинаковых КПД, то легко увидеть, что в области слева от линии раздела при работе одной турбины КПД будет выше, чем при выполнении этой нагрузки двумя турбинами. Очевидно, что при работе справа от линии раздела целесообразно нагрузку обеспечивать двумя турбинами. Для удобства работы линии равных КПД между точками пересечения внутри характеристики не показывают.

Затем эксплуатационная характеристика ГЭС накладывается на логарифмическую сетку таким образом, чтобы режимные точки попали в область высоких КПД и левая привязочная точка характеристики совпала с одним из перекрестий сетки. Линии соответствующего перекрестия определяют диаметр и частоту вращения выбранной турбины. В рассматриваемом примере D₁=120 см, n=250 мин⁻¹.

1. Параметры режимных точек ГЭС

| Месяц | 4 | 5 | 8 | 12 |
|--|-------|--------|-------|-------|
| Среднемесячные расходы в долях от среднегодового | 3,9 | 1,33 | 0,45 | 0,75 |
| Среднемесячные расходы реки Q, м ³ /с | 23,4 | 8,2 | 2,7 | 4,5 |
| Отметки уровней воды в нижнем бьефе, м | 107,9 | 106,85 | 105,8 | 106,2 |
| Напор ГЭС, м | 2,1 | 3,15 | 4,2 | 3,8 |
| Расход турбин ГЭС, Q м ³ /с | 6 | 6 | 2,7 | 4,5 |

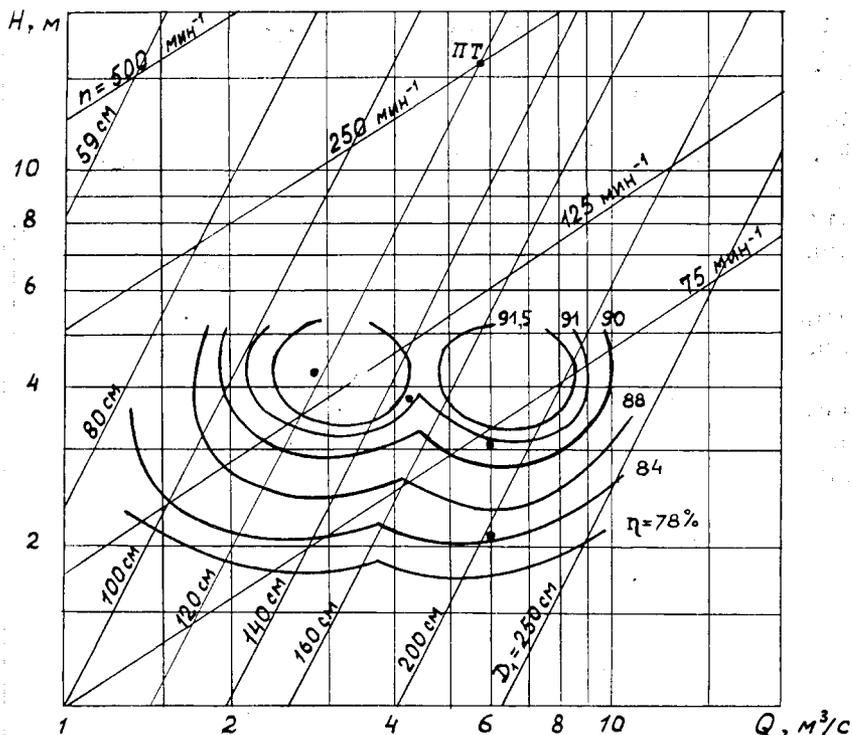


Рис. 1. Фрагмент накладочной сетки с нанесенными на нее режимными точками и эксплуатационной характеристикой ГЭС. ПТ - привязочная точка характеристики ГЭС.

Вычисляем выработку энергии по формулам:

$$N = \gamma Q H \eta \quad (3),$$

$$\mathcal{E}_i = N t \quad (4),$$

$$\mathcal{E} = \sum \mathcal{E}_i \quad (5),$$

где

N - мощность ГЭС в режимной точке, кВт;

Q, H - расход, m^3/s , и напор, м, ГЭС в режимной точке;

η - КПД турбины в режимной точке, определяемый по эксплуатационной характеристике;

t - время работы ГЭС в данной режимной точке, ч;

$\gamma = 9,81 \text{ кН/м}^3$ - удельный вес воды;

\mathcal{E}_i - выработка энергии турбиной в рассматриваемой точке.

Результаты расчетов представляем в виде таблицы 2.

Имея набор характеристик на прозрачной бумаге, можно легко визуально выбрать турбину, обеспечивающую наибольшую выработку электроэнергии.

В спорных случаях отбирается 2 - 3 варианта турбин и аналогично вычисляется выработка энергии для каждого варианта.

2. Показатели работы ГЭС

| Месяц | 4 | 5 | 8 | 12 |
|----------------------------|------|-------|------|-------|
| $\eta, \%$ | 83,0 | 90,7 | 91,8 | 91,8 |
| $N, \text{кВт}$ | 103 | 168 | 102 | 154 |
| $t, \text{ч}$ | 720 | 744 | 744 | 744 |
| $\mathcal{E}, \text{МВтч}$ | 74,2 | 125,0 | 75,9 | 114,6 |

Выбирается вариант, обеспечивающий наибольшую выработку.

Если ГЭС имеет водохранилище, достаточное для суточного регулирования, то уровень воды в верхнем бьефе при работе ГЭС по суточному графику нагрузки будет меняться в широких пределах, поэтому однозначной зависимости напора от расхода не будет. В этом случае при подборе турбин режимные точки наносятся на три горизонтальные прямые, соответствующие максимальному, среднему и минимальному напорам.

В случаях, когда ГЭС обладает возможностью суточного регулирования, исходными данными для подбора турбин будут напор и мощность, соответствующая суточному графику нагрузки. При этом среднесуточная мощность ГЭС определяется мощностью водотока и вычисляется по формуле (3), в которую подставляются расчетные расход и напор ГЭС (рассмотрены в предыдущем параграфе) и средний КПД турбин ($\eta=0,9$).

Поскольку суточным графиком нагрузки задаются мощности ГЭС, нами предлагается для подбора гидротурбин использовать также эксплуатационные характеристики, но в отличие от ранее рассмотренного метода по оси абсцисс откладывать мощность, а не расход (на оси ординат сохраняется напор).

Эксплуатационные характеристики в координатах $N-H$, строятся, как и в предыдущем случае, но, кроме напора H и расхода Q , дополнительно по формуле (3) вычисляется мощность N турбины.

Накладочная сетка строится в тех же координатах, что и эксплуатационные характери-

ки. Как и ранее, сетка представляет собой систему пересекающихся линий $D_1 = \text{const}$ и $n = \text{const}$, уравнения которых получаются из предыдущих заменой расхода на мощность по уравнению (3). В качестве постоянных параметров также применяются стандартные значения диаметра рабочего колеса турбины и синхронные частоты вращения. В логарифмических координатах эти линии являются прямыми.

Для подбора турбин на накладочной сетке проводятся прямые горизонтальные линии, соответствующие максимальному, среднему и минимальному напорам. На эти линии наносятся режимные точки, определяемые графиком нагрузки. Остальные действия по подбору гидротурбин аналогичны рассмотренным выше: на сетку накладывается характеристика намеченной турбины, выполненная на прозрачной бумаге таким образом, чтобы режимные точки оказались в области наибольших КПД, и по привязочной точке определяются стандартный диаметр и синхронная частота вращения турбины (частота вращения турбины может отличаться от синхронной, если между турбиной и генератором предусмотрена механическая передача, например, редуктор, что допускается при малой мощности турбины).

Можно сделать следующие выводы:

1. При наличии графического обеспечения (накладочные сетки и эксплуатационные характеристики гидротурбин) рассмотренные методы подбора ввиду большой наглядности позволяют достаточно просто из большого количества вариантов выбрать турбину, обеспечивающую наибольшую выработку электроэнергии.

2. В случае, когда ГЭС не имеет возможности из-за малого объема водохранилища обеспечивать суточное регулирование, рекомендуется для подбора гидротурбин применять сетку и эксплуатационные характеристики в координатах Q-N.

3. Если объем водохранилища позволяет обеспечить работу ГЭС по суточному графику нагрузки, то для подбора гидротурбин целесообразно применить сетку и эксплуатационные характеристики в координатах N-N.

Литература

1. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций: Справочное пособие: в 2 т./ Под ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Щавелева. - т.1. Основное оборудование гидроэлектростанций. - М.: Энергоатомиздат, 1988. - 400 с.: ил.

2. А.А. Башкиров. Рациональный метод выбора турбин для гидроэлектрической установки, ГЭС N 8/9, 1944.

3. Н.М. Шапов. Турбинное оборудование гидроэлектростанций. Госэнергоиздат, М.-Л., 1955, 272 с.

Закрытое акционерное общество

“Агромашимпекс”

Предлагаем со склада
в г. Минске и г. Слуцке

Плуги (производство г. Одесса):

- ПЛП-3-35;
- ПНЛ-8-40;
- ПКГ-5-40.

Разбрасыватели минеральных удобрений:

- МВУ-0.5 Г;
- МВУ-6.

Прицеп:

- 2ПТС-4, ПСЕ-12.5.

Косилка:

- КРН-2.1.

Запасные части к режущим аппаратам зерноуборочной и кормоуборочной техники:

- сегмент 6602 Нива;
- сегмент 6614 Дон;
- сегмент В-10 (Е-280, 301).

Запасные части к плугам:

- долото ПГЦ (литье);
- лемех П-701;
- лемех П-702;
- лемех П-702 с наплавкой (Одесса);
- отвал ПГЦ;
- отвал 401.

Запасные части к ходовой части трактора:

- палец гусеницы;
- трак гусеницы;
- комплект гусеницы ДТ-75.

ГПГ Д-240:

- гильза;
- поршень;
- комплект колец на двигатель.

Двигатель Д-243.91

Насосы НШ, запчасти к МТЗ в ассортименте, аккумуляторы (производство США, РФ)

Контактные телефоны:

В г. Минске
тел. (017) 245-31-92,
тел./факс (017) 246-45-60

В г. Слуцке
(295) 91-6-44