

УДК 621.313

А.Л. МАИЛЯН, М.А. САГАТЕЛЯН, Г.Х. КАЗАРЯН

**СОГЛАСОВАНИЕ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ ГИДРОТУРБИНЫ И
ГЕНЕРАТОРА МАЛОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

В малых гидроэлектростанциях (МГЭС), которые охватывают диапазон мощностей от 1...10 *MВт*, применяются турбины с низкими скоростями вращения. Генераторы с такими низкими скоростями вращения имеют большие массогабаритные параметры, сравнительно низкий коэффициент полезного действия (КПД) и, соответственно, высокую стоимость. В работе рассмотрено применение в МГЭС генераторов с высокой скоростью вращения. Проведен анализ серийно производимых синхронных генераторов. Получены зависимости, показывающие целесообразность применения генераторов с высокой скоростью вращения, и тем самым обосновано применение мультипликатора в гидроагрегатах МГЭС.

Ключевые слова: малые гидроэлектростанции, гидротурбина, синхронный генератор, мультипликатор, скорость вращения, маховой момент.

Введение. МГЭС, как правило, отличаются требованиями к массогабаритным параметрам. В зависимости от мощностей и расхода воды, скорости вращения синхронных гидроагрегатов колеблются. Высокие скорости вращения соответствуют высоконапорным МГЭС с маломощными турбинами, низкие скорости вращения – низконапорным МГЭС с турбинами большой мощности, которые имеют частоты вращения 125...300 *об/мин*. В МГЭС, которые охватывают диапазон мощностей от 1...10 *MВт*, применяются турбины с низкими скоростями вращения. При таких низких скоростях вращения синхронные генераторы имеют большие массогабаритные параметры.

Гидротурбина характеризуется напором воды перед входом в турбину, частотой вращения, которая соответствует номинальному КПД, и соответствующим им расходом воды. Мощность гидротурбины выражается через напор и расход воды и должна быть больше, чем мощность генератора с учетом потерь в генераторе. Частота вращения, соответствующая оптимальным условиям работы гидротурбины, зависит от геометрии ее проточной части (быстроходности гидротурбины) и определяется по коэффициенту быстроходности, который по своему физическому смыслу представляет частоту вращения геометрически подобной гидротурбины мощностью 1 *кВт* при напоре

1 м, работающей с номинальным КПД. Коэффициент быстроходности не является постоянным и зависит от типа гидротурбины. Ограничением к применению гидротурбин высокой быстроходности является их кавитация: образование пузырьков пара в зоне высоких скоростей воды в проточной части гидротурбины с последующим их захлопыванием и разрушением металла гидротурбины. Поэтому с ростом напора оптимальный коэффициент быстроходности уменьшается [1,2].

Серийные горизонтальные гидрогенераторы имеют частоты вращения 250, 500, 750, 1000, 1500 об/мин. Как известно, массогабаритные параметры синхронного генератора зависят от его скорости вращения. Генераторы с большей скоростью вращения компактны и дешевы. Главные размеры генератора (диаметр якоря D и его длина l) определяют все остальные размеры машины. От них зависят вес машины, стоимость и технико-экономические характеристики. Главные размеры машины зависят от мощности, скорости вращения и электромагнитных нагрузок. Выбор главных размеров для генераторов производится с учетом необходимости получения заданного махового момента GD^2 . Связь между параметрами синхронной машины показывает машинная постоянная C_A [3-5]:

$$\frac{D^2 l_{\delta} n}{P'} = \frac{6,1 \cdot 10^{11}}{\alpha_{\delta} k_B k_0 A B_{\delta}} = C_A, \quad (1)$$

где k_B – коэффициент, зависящий в основном от формы кривой поля (при синусоидальном поле $k_B=1,11$); k_0 – обмоточный коэффициент для первой гармонической кривой электродвижущей силы (ЭДС); α_{δ} – расчетный коэффициент полюсного перекрытия; l_{δ} – расчетная длина якоря; B_{δ} – индукция в воздушном зазоре; n – скорость вращения; D – внутренний диаметр статора; A – значение линейной нагрузки; P' – расчетная мощность машины.

Величина $D^2 l_{\delta}$ определяет объем ротора, и при данной скорости вращения от нее зависит объем статора. Следовательно, величина $D^2 l_{\delta} / P'$ приблизительно определяет объем машины на единицу мощности. Этот объем при неизменных A и B_{δ} обратно пропорционален скорости вращения n , т.е. размеры машины и ее вес уменьшаются с возрастанием n .

Расчетная мощность машины пропорциональна произведению ЭДС и тока $P' \equiv EI$. При данных частоте и скорости вращения: $E \equiv w\Phi$.

Заменив Φ через BS_c , где B – индукция в сечении S_c стального участка магнитной цепи, получим $E \equiv wBS_c$. Ток $I = \Delta s_{\Pi}$, следовательно, можно написать

$$P' \equiv wBS_c \Delta s_{\Pi}. \quad (2)$$

Если обозначить общее сечение меди всех витков через $S_M = wS_c$, то получим $P' \equiv w\Delta S_c S_M$.

Площади S_c и S_M пропорциональны квадрату линейного размера l . Отсюда при постоянных значениях B и Δ – $P' \equiv l^4$ или $l = P'^{\frac{1}{4}}$. Веса активных материалов (меди и стали) пропорциональны их объему, т.е. кубу линейных размеров: $G \equiv l^3$. Поэтому $G \equiv P'^{\frac{3}{4}}$. Следовательно, вес машины при увеличении ее линейных размеров растет медленнее, чем ее мощность.

Можно считать, что стоимость C активных материалов и потери ΣP в них при заданных индукции и плотности тока пропорциональны весу [3-5]:

$$C \equiv \Sigma P \equiv G \equiv l^3 \equiv P'^{\frac{3}{4}}. \quad (3)$$

Для уменьшения массогабаритных параметров гидроагрегата МГЭС необходимо увеличить скорость вращения, исходящую от турбины и передаваемую генератору. В таких случаях между гидротурбиной и генератором предлагается установка повышающей передачи – мультипликатора. При помощи мультипликатора частота вращения повышается. Исходя из этого, применяется генератор с большей скоростью вращения. Установка мультипликатора уменьшает размеры и стоимость генератора и, кроме того, позволяет выбрать оптимальную скорость вращения гидротурбины путем выбора рационального передаточного отношения. При расчете мощности гидротурбины в этих случаях необходимо учитывать потери в мультипликаторе, которые составляют 2...3% в зависимости от типа [1,6,7].

При выборе размеров и конструктивного исполнения генераторов следует ориентироваться в первую очередь на использование серийных генераторов, так как это позволяет получить освоенный генератор и снизить стоимость всего гидроагрегата.

Целью настоящей работы является согласование скоростей вращения гидротурбины и генератора МГЭС путем применения мультипликатора с соответствующим коэффициентом редукции, что позволит снизить массогабаритные параметры гидроагрегата, строймонтажные и экономические расходы, а также увеличить эффективность комплекса.

Результаты исследования. Для обоснования вышеизложенного подхода согласования скоростей вращения гидротурбины и генератора МГЭС проведен анализ серийно производимых синхронных машин серий СГСБ, БСГС, СГС, СГД2, СГД2М, СГ, СГД, СГД2. В результате анализа получены зависимости параметров синхронных гидрогенераторов [8-11].

В таблице приведены параметры серийно производимых синхронных машин, на основе которых были получены соответствующие зависимости.

Таблица

Параметры серийно производимых синхронных генераторов

Скорость вращения (n, об/мин)	Мощность (P, кВт)	Расчетный минимальный маховой момент (GD ² , Т·м ²)	Число пар полюсов (р)	КПД, %
375	630	3,58	8	93,7
375	800	4,55	8	96,0
375	800	4,55	8	94,0
500	400	1,28	6	92,5
500	500	1,60	6	94,1
500	630	2,02	6	95,0
500	1000	3,20	6	95,4
600	400	0,89	5	93,0
600	500	1,11	5	94,3
600	630	1,40	5	94,7
600	800	1,78	5	94,8
600	1000	2,22	5	95,0
600	1600	3,56	5	95,4
600	2000	4,44	5	96,1
750	800	1,14	4	95,2
750	1600	2,28	4	95,5
750	2000	2,84	4	96,3
1000	400	0,32	3	94,3
1000	500	0,40	3	94,5
1000	630	0,50	3	95,0
1000	800	0,64	3	95,5
1000	1000	0,80	3	96,0
1000	1000	0,80	3	96,0
1000	1600	1,28	3	96,5
1000	2000	1,60	3	97,0
1500	400	0,14	2	95,0
1500	500	0,18	2	96,0
1500	630	0,22	2	96,2
1500	800	0,28	2	96,3
1500	1000	0,36	2	96,5
1500	1600	0,57	2	97,0
1500	2000	0,71	2	97,2

На рис. 1 приведена зависимость махового момента генератора GD² от его скорости вращения n при разных мощностях P.

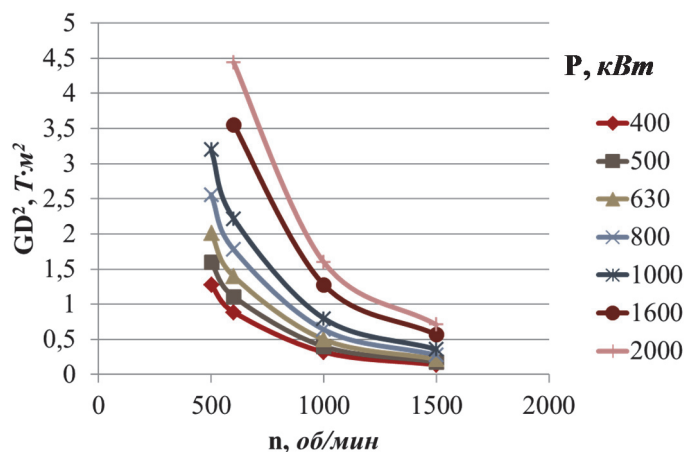


Рис. 1. Зависимость маховых моментов серийно производимых синхронных генераторов от скорости вращения

С ростом скорости вращения маховой момент снижается. На маховой момент имеет влияние также мощность генератора – значение махового момента у более мощных генераторов больше. Это также показывают графики рис. 2, представляющие собой зависимость махового момента GD^2 от мощности синхронного генератора P при разных скоростях вращения.

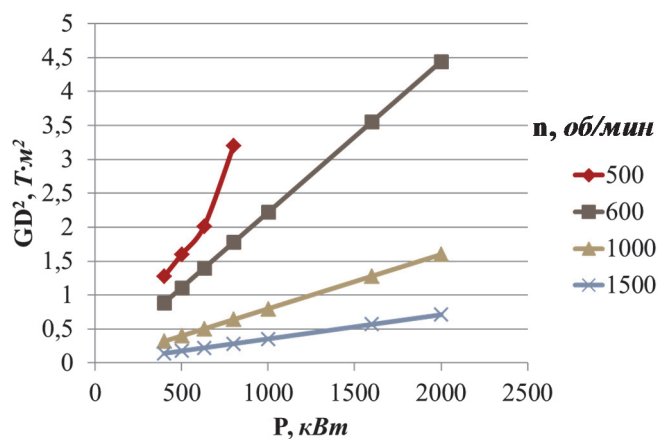


Рис. 2. Зависимость маховых моментов серийно производимых синхронных генераторов от мощности

Исследования показали, что маховой момент генератора GD^2 имеет непосредственное влияние на КПД машины. С возрастанием значения GD^2 снижается КПД машины (рис. 3).

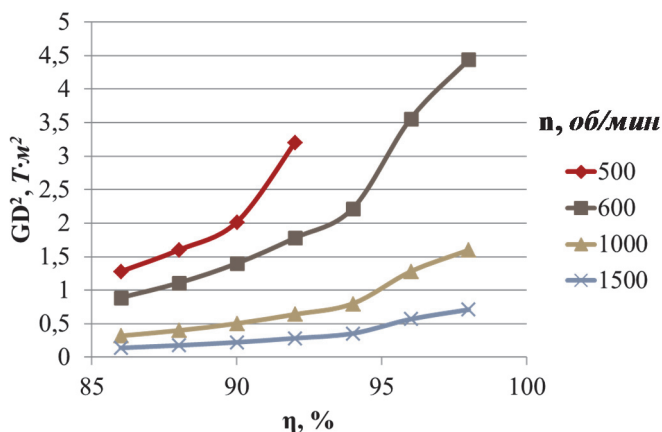


Рис. 3. Зависимость маховых моментов серийно производимых синхронных генераторов от КПД

Необходимое минимальное значение махового момента дается в технической документации и вытекает из полученных оценок с учетом влияния нового энергоблока на энергосистему и гидроресурсы проекта. Максимальные значения напора в напорном трубопроводе, высокая скорость вращения системы приводят к уменьшению GD^2 , что в гидроагрегатах в основном обусловлено ротором генератора. Большие значения махового момента приводят к увеличению стоимости генератора.

При увеличении скорости вращения КПД генератора увеличивается (рис. 4). Зависимость показывает, что в гидроагрегате МГЭС при замене генератора с низкой скоростью вращения генератором с большей скоростью вращения КПД значительно может увеличиться.

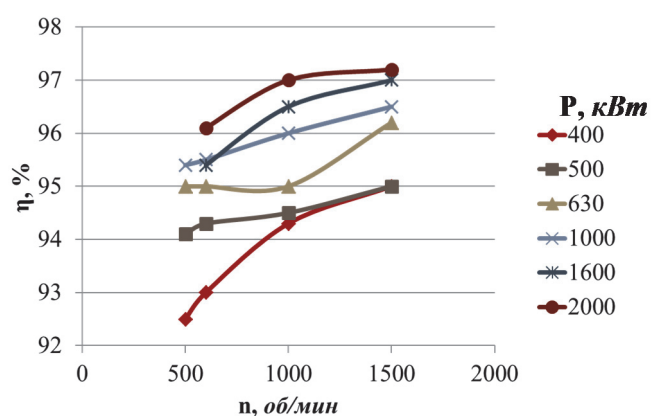


Рис. 4. Зависимость КПД серийно производимых синхронных генераторов от скорости вращения

Полученные зависимости позволяют утверждать, что применение генератора с большей скоростью вращения позволяет увеличить КПД всего комплекса. Целесообразно применение серийно производимого генератора, значение КПД которого учитывает все потери в нем. Потери в применяемом мультипликаторе не велики и могут быть покрыты мощностью выбранной турбины. При правильном выборе генератора, гидротурбины и мультипликатора возможно увеличение КПД всего гидроагрегата. Таким образом, применение мультипликатора в гидроагрегате МГЭС для согласования скоростей вращения гидротурбины и генератора целесообразно.

Выводы

1. Установка мультипликатора позволяет выбрать генератор с высокой скоростью вращения, тем самым уменьшить размеры и стоимость генератора, выбрать оптимальную скорость вращения гидротурбины.
2. Приведенный подход согласования скоростей вращения гидротурбины и генератора позволяет разработать или выбрать турбину с соответствующими параметрами, при которых может обеспечиваться максимальный КПД системы.
3. Анализ серийно производимых синхронных генераторов разных мощностей показал, что увеличение скорости вращения снижает маховой момент генератора и увеличивает его КПД.
4. Мощность гидротурбины должна приниматься большей, чем мощность генератора, с учетом потерь в генераторе и мультипликаторе. Это позволит спроектировать оптимальный гидроагрегат со сравнительно высоким КПД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михайлов Л.П., Фельдман Б.Н., Марканова Т.К.** Малая гидроэнергетика. – М.: Энергоатомиздат, 1989.-184 с.
2. Справочник по гидротурбинам/Под ред. **Н.Н. Ковалева.**- Л.: Машиностроение, 1984.-195 с.
3. **Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Горяинов Ф.А.** Проектирование электрических машин. Изд. 3-е, переработ. и доп.- М.: Энергия, 1969.-632 с.
4. **Копылов И.П.** Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов.- М.: Энергия, 2015.-496 с.
5. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов.-М.: Энергия, 1980.-928 с.
6. **Сагателян М.А.** Предпосылки разработки компактного гидроагрегата для малых гидроэлектростанций // Вестник Инж. академии Армении.-Ереван, 2018.-Т.15, №2.- С. 240-244.
7. Արտոնագիր № 3068 А Հիդրոէներգետիկ / **Մ. Սաղաթեյան, Ա. Մալիյան.**-2016.
8. **Копылов И.П., Клокова Б.К.** Справочник по электрическим машинам. Т. 1 .- М.: Энергоатомиздат, 1988.-456 с.

9. Технический каталог – <https://docplayer.ru/48478327-Tehnicheskij-katalog-generatory.html> \
10. Генераторы синхронные серии СГ2 и 2СГ 74/35-80М4 – <https://electro.mashinform.ru/generatoriy-moshchnostyu-svyshe-100-kvt/generatoriy-sinhronnye-serii-sg2-i-2sn-74-35-80m4-obj4086.html>
11. Каталог по электрическим машинам, 2014.-148 с.

Մ.Ա. ՍԱՂԱԹԵԼՅԱՆ, Գ.Խ. ՂԱԶԱՐՅԱՆ, Ա.Լ. ՄԱՅԻԼՅԱՆ

ՓՈՔՐ ՀԻՊՐՈԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆԻ ՀԻՊՐՈՏՈՒՐԲԻՆԻ ԵՎ ԳԵՆԵՐԱՏՈՐԻ ՊՏՏՄԱՆ ԱՐԱԳՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՀԱՄԱՁԱՅՆԵՑՈՒՄ

Փոքր հիդրոէլեկտրակայաններում (ՓՀԷԿ), որոնք ընդգրկում են 1...10 ՄՎտ հզորության տիրույթը, կիրառվում են պտտման ցածր արագությամբ հիդրոտուրբիններ: Նման ցածր պտտման արագություններ ունեցող գեներատորներն ունեն մեծ զանգվածագաբարիտային պարամետրեր, համեմատաբար ցածր օգտակար գործողության գործակից և համապատասխանաբար բարձր արժեք: Դիտարկված է ՓՀԷԿ-երում բարձր պտտման արագություն ունեցող գեներատորների կիրառությունը: Կատարված է սերիական արտադրության գեներատորների վերլուծություն: Ստացված են բարձր պտտման արագություն ունեցող գեներատորների կիրառության նպատակահարմարությունը հավաստող կախվածություններ, հիմնավորված է ՓՀԷԿ-երի հիդրոագրեգատներում մուլտիպլիկատորի կիրառությունը:

Առանցքային բառեր. փոքր հիդրոէլեկտրակայաններ, հիդրոտուրբին, սինխրոն գեներատոր, մուլտիպլիկատոր, պտտման արագություն, թափքի մոմենտ:

M.A. SAGHATELYAN, G.Kh. GHAZARYAN, A.L. MAYILYAN

OPTIMAL MATCHING OF SMALL HYDROPOWER PLANT HYDRO TURBINE AND THE GENERATOR ROTATION SPEEDS

Low speed hydro turbines are used in small hydropower plants (SHPP) which cover 1...10 MW range of power. Generators with such a low value of rotation speed have a high value of weight and size parameters, a relatively low value of efficiency and respectively high cost. The usage of high speed generators in SHPP is considered. The analysis of mass-produced synchronous generators is given. Dependencies are obtained, showing the feasibility of using generators with a high rotation speed and thereby the use of the multiplier in the hydropower units of SHPPs is justified.

Keywords: small hydropower plants, hydro turbine, synchronous generator, multiplier, rotation speed, flywheel action.