

САВЧЕНКО Ю.В., начальник ПТС ДнепроГЭС



АНАЛИЗ РАБОТЫ МАСЛОНАПОРНЫХ УСТАНОВОК ГИДРОТУРБИН ДНЕПРОВСКОЙ ГЭС-1 В РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ

Маслонапорная установка (МНУ) является традиционным источником энергии гидравлического привода направляющего аппарата и механизма поворота лопастей гидравлической турбины.

В данной статье рассматривается работа МНУ радиально – осевой турбины, где энергия тратится только на управление направляющим аппаратом.

Классическая конструкция МНУ (Рис. 1) включает в себя гидрогазовый аккумулятор 2 ("котел", состоящий из одного или нескольких сосудов под давлением), масляный насос 1, создающий давление в аккумуляторе, сливной бак 5, запорно – регулируемую гидроаппаратуру 3, 4 устройства управления и мониторинга.

Рабочим телом аккумулятора, за счет упругих свойств которого создается давление в гидросистеме и компенсируется изменение объема масла, как правило, служит атмосферный воздух.

Общепринятая методика выбора параметров аккумулятора МНУ [1] – определение полного и воздушного объема, минимального давления – исходит из величины объема масла, расходуемого на нормальное и аварийное управление направляющим аппаратом (НА), минимального давле-

ния, необходимого для надежного закрытия НА в предположении, что пополнение объема масла в аккумуляторе за счет работы насоса не производится. Производительность насоса определяют по величине времени восстановления давления в аккумуляторе и допустимой частоте включения привода насоса.

Выбор параметров МНУ по такой методике, сформированной в 50 – 70 годах 20 века, в достаточной степени удовлетворял потребности обеспечения работы гидротурбины в режимах, близких к базовым, безопасности останова гидроагрегата при снижении давления в гидросистеме и позволял обеспечить пуск гидроагрегата в случае посадки станции "на ноль".

Современные тенденции мировой энергетики показывают, что наиболее ценным свойством гидравлических станций является их маневренность, возможность работы в пиковых режимах и в составе систем автоматического регулирования частоты и мощности (САРЧМ).

На примере Днепровской ГЭС-1, шесть гидроагрегатов которой постоянно работают в САРЧМ, рассмотрим, как влияет интенсивное регулирование гидротурбины на работу МНУ, рассчитанной по традиционной методике.

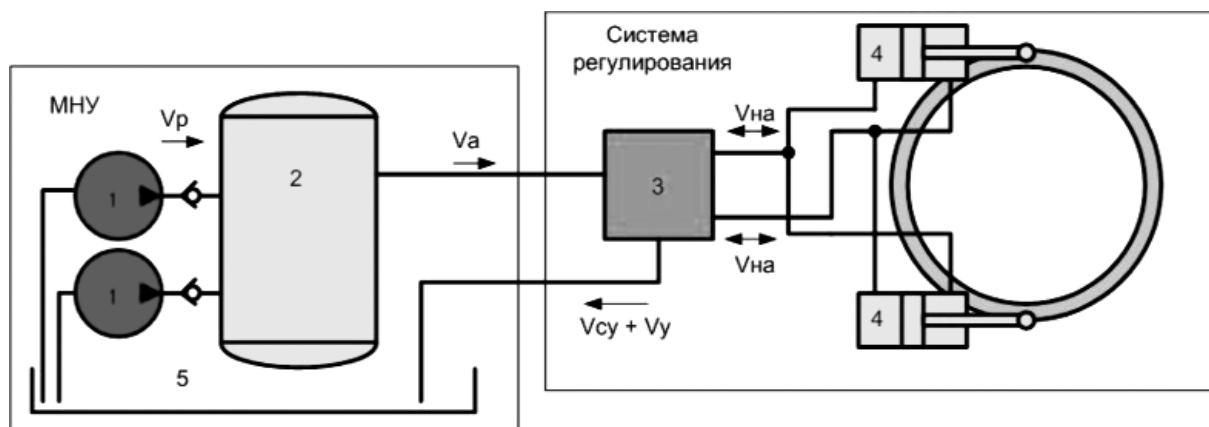


Рис. 1. Схема системы регулирования радиально-осевой гидротурбины; 1 – насос МНУ, 2 – аккумулятор, 3 – регулятор скорости, 4 – сервомотор, 5 – сливной бак.

Таблиця 1. Краткая характеристика гидроагрегатов ДГЭС-1

	Г 1 – Г 3	Г 4 – Г 9
Тип гидротурбины	F-193, Newport News	PO-45-B-545, Турбоатом
Установленная мощность, МВт	65	72
Количество сервомоторов НА	2	2
Диаметр (площадь) поршня сервомотора, мм (м ²)	660 (0,342)	600 (0,283)
Диаметр (площадь) штока сервомотора, мм (м ²)	165 (0,021)	240 (0,045)
Ход поршня, мм	470	650
Тип маслonaпорной установки	Woodward	МНУ-7, ЛМЗ
Номинальное давление в системе регулирования, бар	21	20,5
Давление включения основного насоса, бар	18,5	18,5
Внутренний диаметр аккумулятора, м	1,91	1,94
Энергоемкость аккумулятора, кДж	587	621
Количество и тип насосов	2 x Woodward	2 x MBH-10
Паспортная производительность насоса, л/с	9,6	10

Краткая характеристика гидроагрегатов ДГЭС-1 приведена в Табл. 1.

Следует отметить, что на МНУ производства Woodward (Г1 – Г3) и ЛМЗ (Г4 – Г9) режим работы насосов – прерывистый, устройства разгрузки – перепускные клапаны – не предусмотрены.

1. Анализ перемещения направляющего аппарата в различных режимах работы гидроагрегатов.

Наибольшие величины перемещений поршней сервомоторов НА – до 100% полного хода – происходят при переводе г/а из генераторного режима (ГР) в режим синхронного компенсатора (СК) и из СК в ГР, среднее количество таких переводов – 30...35 в сутки.

Аналогичные перемещения происходят при сбросе нагрузки, но их частота крайне незначительна.

При нормальном пуске и останове гидроагрегата величина перемещений НА не превышает 30% хода, среднее количество пусков – остановов не превышает 7 в месяц.

При работе в режиме, близком к базовому

(нормальное регулирование частоты – мощности) перемещение НА составляет в среднем 3...5 % полного хода с частотой до 20 раз в час.

При работе г/а в САРЧМ в диапазоне регулирования активной мощности 43...72 МВт перемещение НА составляет порядка 30% хода, но количество таких перемещений может достигать 12...15 в час.

2. Анализ режимов работы насосов МНУ при различных режимах работы гидроагрегатов.

Информация о работе гидроагрегатов взята из станционной системы Централог.

Анализируя графики изменения уровня масла в аккумуляторах и перемещения направляющего аппарата Г-3 и Г-9 при работе с нормальным регулированием (Рис. 2), в режиме СК и в системе АРЧМ (Рис. 3), можно сделать следующие заключения:

- для МНУ Г-3, работающего с нормальным регулированием (режим, близкий к базовому), среднее время работы насоса – 120 с, среднее время стоянки насоса – 3600 с, что соответствует режиму 1:30, количество включений насоса в час – 1;

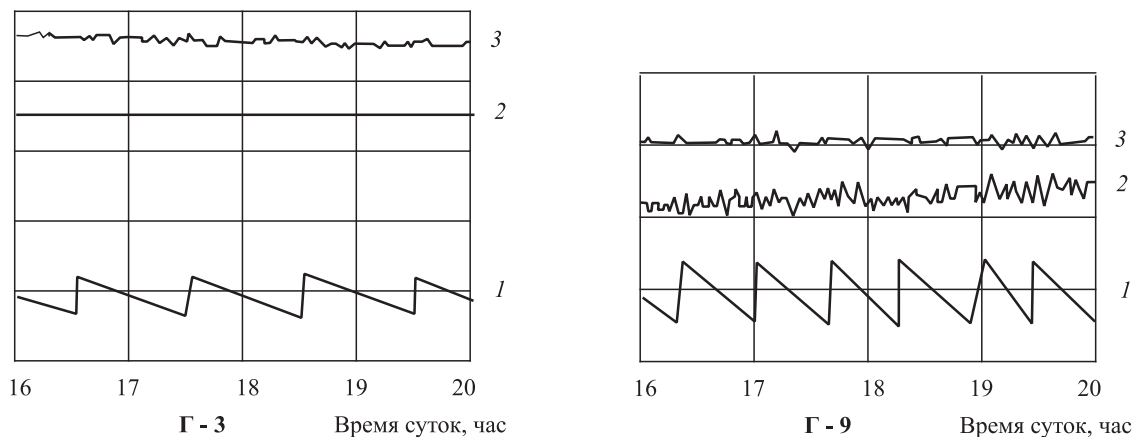


Рис. 2. Работа гидроагрегатов в режиме нормального регулирования 1 – уровень масла в аккумуляторе, 2 – положение направляющего аппарата, 3 – активная мощность



- для МНУ Г-9, работающего с нормальным регулированием, среднее время работы насоса – 120 с, среднее время стоянки насоса – 2400 с, что соответствует режиму 1:20, количество включений насоса в час – 1,5;

- для МНУ Г-3, работающего в САРЧМ в диапазоне регулирования 0...65 МВт, среднее время работы насоса – 115 с, среднее время стоянки насоса – 610 с, что соответствует режиму 1:5, количество включений насоса в час – от 4 до 6;

- для МНУ Г-9, работающего в САРЧМ в диапазоне регулирования 43...72 МВт, среднее время работы насоса – 128 с, среднее время стоянки насоса – 1178 с, что соответствует режиму 1:9, количество включений насоса в час – 3;

- для МНУ Г-3, работающего в режиме СК, среднее время работы насоса – 110 с, среднее время стоянки насоса – 4500 с, что соответствует режиму 1:41;

- для МНУ Г-9, работающего в режиме СК, среднее время работы насоса – 120 с, среднее время стоянки насоса – 7200 с, что соответствует режиму 1:60.

С учетом рекомендаций [1, с. 176], нормаль-

ным режимом работы насосов МНУ считается 1:12 ... 1:20 и более.

3. Анализ баланса расхода масла в системе регулирования радиально – осевой гидротурбины.

3.1 Баланс расхода масла в системе регулирования гидротурбины определяется объемом масла, поступающим в аккумулятор при работе насосов V_p , и изменением этого объема вследствие работы системы регулирования V_a :

$$V_p = V_a.$$

При этом,

$$V_p = \sum_{i=1}^n Q_{ni} T_{ni} n,$$

где Q_{ni} – фактическая производительность насосов; T_{ni} – время работы насосов на зарядку аккумулятора; n – количество циклов зарядки аккумулятора за анализируемый период.

Изменение объема масла в аккумуляторе МНУ V_a в пределах времени цикла стоянки насоса T затрачивается на:

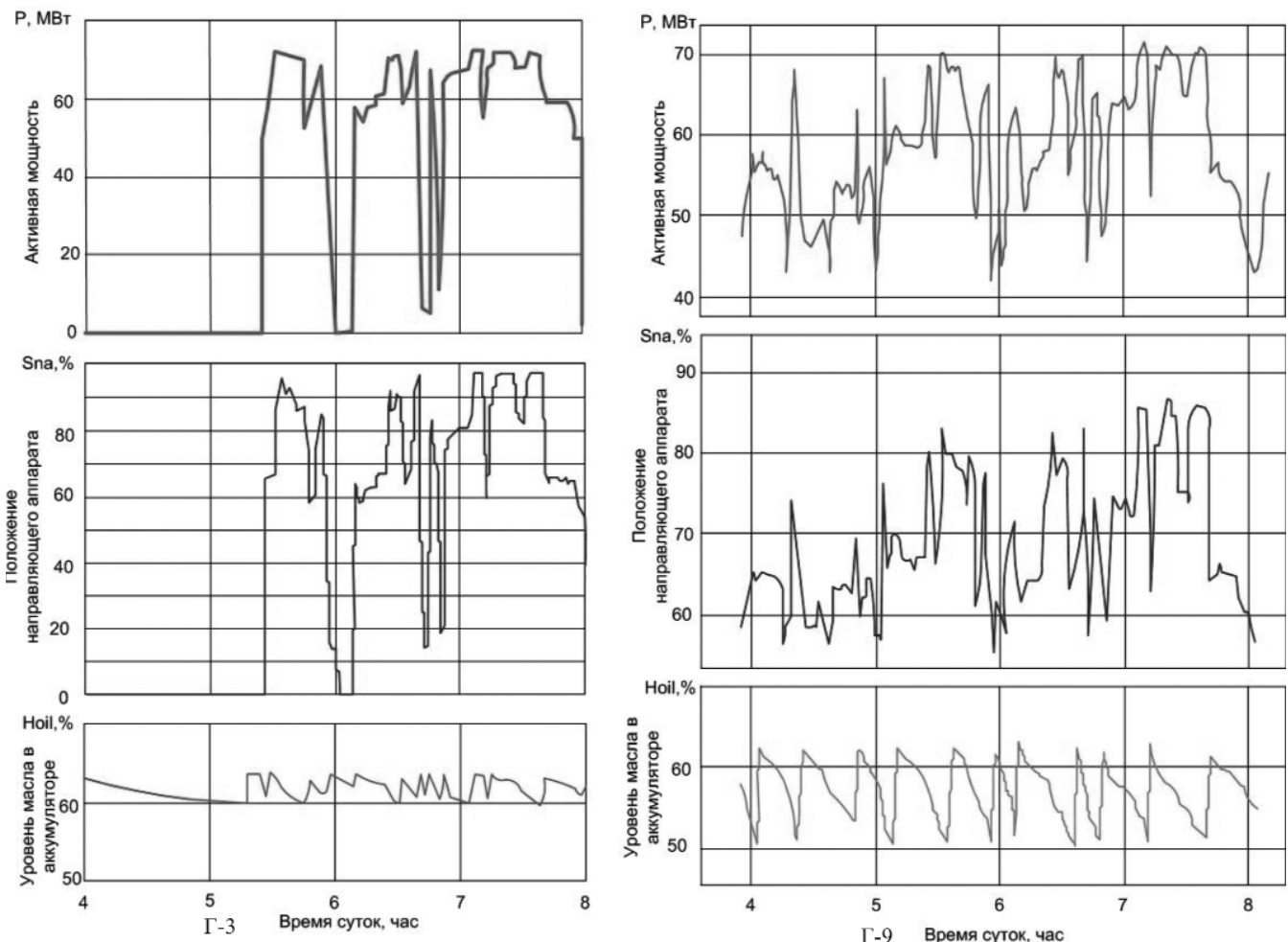


Рис. 3. Работа гидроагрегатов в режиме СК и в системе АРЧМ

- перемещение поршней сервомоторов направляющего аппарата в ходе регулирования — $V_{на}$;

- расход масла в системе управления регулятора скорости V_{cy} ;

- компенсацию внутренних перетечек масла в системе регулирования V_y ;

$$V_a = V_{на} + V_{cy} + V_y,$$

и определяется из выражения

$$V_{на} = \sum V_i,$$

где $V_i = (2F_{п} - F_{шт}) S$ — объем масла, затрачиваемый на одно перемещение направляющего аппарата (открытие или закрытие), $F_{п}$ — площадь поршня сервомотора, $F_{шт}$ — площадь штока сервомотора, S — ход поршня сервомотора.

Средний расход масла на перемещение НА за определенный временной интервал определяется из выражения

$$Q_{на} = \sum_{i=1}^n V_i / T,$$

где n — количество ходов сервомоторов; T — временной интервал расчета.

Объем и расход масла, затрачиваемый на систему управления регулятора скорости и компенсацию внутренних перетечек, можно косвенно определить, анализируя режим насосов МНУ гидротурбины, работающей в режиме СК:

$$V_{cy} + V_y = S_a \Delta H_a,$$

$$Q_{yt} = \sum (V_{cy} + V_y) / T_{ск},$$

где $T_{ск}$ — временной интервал между двумя включениями насоса МНУ гидротурбины, работающей в режиме СК; S_a — площадь сечения аккумулятора; ΔH_a — изменение уровня масла в аккумуляторе за время $T_{ск}$.

Для гидротурбин Г1 — Г3 расход на систему управления РС и утечки ориентировочно составляет 0,07 л/с, Г4 — Г9 — 0,05 л/с.

3.2. Расчет изменения объема масла в аккумуляторе при работе насоса.

Поскольку управление насосом МНУ производится по величине давления в аккумуляторе, изменение объема воздуха в аккумуляторе (и соответственно, масла) при изменении давления можно рассчитать с применением уравнения состояния газа [2]:

$$p_n V_n^k = p_k V_k^k,$$

где p_n — давление в аккумуляторе, при котором включается насос; p_k — давление в аккумуляторе, при котором насос отключается; V_n — объем воздуха в аккумуляторе в начале цикла закачки масла; V_k — объем воздуха в аккумуляторе в конце цикла закачки масла; k — показатель политропы. Ввиду непродолжительности процесса закачки масла и незначительного теплообмена с окружающей средой, термодинамические процессы в аккумуляторе можно считать близкими к адиабатическим и принять $k = 1,4$ [1, с. 19].

Таким образом, величину изменения объема воздуха в аккумуляторе за цикл закачки масла можно определить из выражения:

$$\Delta V = V_n \left[1 - (P_n / P_k)^{\frac{1}{k}} \right],$$

Подставив известные величины, получаем, что для МНУ Г-3 и МНУ Г-9 изменение объема масла в аккумуляторе при работе насоса составляет порядка 0,3 м³, а изменение уровня масла — 0,1 м, что подтверждается данными натурных замеров.

Энергоемкость аккумулятора L можно определить из выражения [1, с. 14]:

$$L = \frac{P_k V_k}{k-1} \left[1 - (P_n / P_k)^{\frac{k-1}{k}} \right],$$

Для аккумулятора Г-3 $L = 587$ кДж, для Г-9 $L = 621$ кДж.

Таблица 2. Баланс объемов и расход масла в системах регулирования

Величина	Обозначение	Г-3	Г-9
Объем масла, поступивший в аккумулятор при работе насоса, м ³	V_p	3,9	2,4
Средний расход на зарядку аккумулятора, л/с	Q_3	0,36	0,22
Объем масла, затраченный на перемещение НА, м ³	$V_{на}$	2,94	1,46
Объем масла, затраченный на питание системы управления и компенсацию утечек, м ³ (% от $V_{на}$)	V_{yt}	0,65 (22%)	0,65 (44,5%)
Объем масла, затраченный на работу системы регулирования, м ³	$V_a = V_{на} + V_{yt}$	3,59	2,11
Расход на работу системы регулирования, л/с	Q_a	0,33	0,20
Небаланс объемов, м ³	$\Delta V = V_p - V_a$	0,31	0,29
Среднее перемещение поршня сервомотора, % от полного хода		33	10



3.3. Фактический баланс объемов масла в системах регулирования гидротурбин.

Проанализировав графики работы гидроагрегатов Г3 и Г-9 в составе системы АРЧМ за 3 часа утреннего максимума — с 5-00 до 8-00, получаем следующий баланс объемов и расход масла в системах регулирования Табл. 2.

Наличие небаланса объемов объясняется тем, что интервал замеров параметров состояния системы регулирования не совпадает с моментом начала работы насоса и окончанием перемещения НА.

Также следует отметить, что на исследуемом интервале времени направляющий аппарат Г-3 имел значительно больший диапазон перемещений вследствие разгрузки гидроагрегата до холостого хода и перевода в режим СК.

4. Возможные способы улучшения режима работы насосов МНУ.

Приняв за основу предпочтительный режим работы насосов МНУ 1:30 и включение 2 раза в час, проанализируем возможность реализации различных методов для обеспечения режима регулирования в диапазоне 0 ... 100% нагрузки с использованием данных для МНУ Г-3: время работы насоса ≈ 60 с, время стоянки насоса ≈ 1800 с, суммарное изменение объема масла в аккумуляторе $\Delta V = 0,6 \text{ м}^3$ за 1 час.

4.1. Увеличение энергоемкости аккумулятора за счет увеличения изменения объема масла в аккумуляторе МНУ.

Применяя выражение

$$V_n = \frac{\Delta V}{\left[1 - (P_n / P_k)^{1/k}\right]}$$

определим, что для обеспечения удовлетворительного режима работы насосов начальный объем воздуха в аккумуляторе должен составлять $6,8 \text{ м}^3$. Этого можно добиться путем установки дополнительно к имеющемуся масловоздушному аккумулятору воздушного сосуда емкостью $3,4 \text{ м}^3$ и увеличения объема масла в аккумуляторе. При производительности насоса 10 л/с время зарядки аккумулятора составит порядка 60 с, время стоянки — 1740 с, что соответствует режиму 1:29.

В условиях действующей ГЭС размещение дополнительного воздушного аккумулятора МНУ крайне затруднительно ввиду стесненного расположения имеющегося оборудования.

4.2. Увеличение энергоемкости аккумулятора за счет увеличения рабочего давления масла в

системе регулирования и уменьшения объема воздуха в имеющемся аккумуляторе.

Для оценки величины рабочего давления P_k , получаемого в системе регулирования при изменении объема масла в аккумуляторе на $0,6 \text{ м}^3$ и начальном давлении $P_n = 18 \text{ Бар}$ применим выражение

$$P_k = \frac{P_n}{(1 - \Delta V / V_n)^k}$$

Для аккумулятора МНУ Г-3 оно составит 23 Бар, для Г-9 — порядка 22 Бар. Для применения такого метода необходимо проведение поверочного прочностного расчета аккумулятора, трубопроводов и корпусов сервомоторов с учетом их остаточного ресурса.

Также следует отметить, что согласно [3] минимальное рабочее давление современных МНУ $P_k = 40 \text{ Бар}$, а начальное давление $P_n = 37 \text{ Бар}$.

4.3. Применение постоянно работающего дополнительного насоса небольшой производительности при существующих размерах аккумулятора и неизменном рабочем давлении.

Средний суммарный расход, необходимый для работы системы регулирования Г-3 в заданном режиме $Q_a = 0,33 \text{ л/с}$. Для обеспечения желаемого режима работы основного насоса при двух включениях в час средний расход насоса

$$Q_3 = 600 \text{ л} / 3600 \text{ с} = 0,17 \text{ л/с}$$

Тогда производительность дополнительного насоса должна быть

$$Q_d = Q_a - Q_3 = 0,16 \text{ л/с (около 10 л/мин)},$$

а режим работы основного насоса — 1: 29.

Исходя из величины расхода в режиме СК $Q_{ск} = 0,14 \text{ л/с}$, для минимизации холостого сброса избытка масла производительность насоса может быть уменьшена.

Так, при непрерывной работе дополнительного насоса с $Q_d = 0,13 \text{ л/с}$ и работе с интенсивным регулированием частота включения основного насоса — 2,4 раза в час, а режим работы — 1:24.

Применение третьего дополнительного насоса допускается ГОСТ 8339-84, небольшие размеры и минимум гидравлической аппаратуры позволяют удачно встраивать дополнительный насос в существующую МНУ.



5. Выводы.

- режим работы насосов МНУ радиально — осевой гидротурбины существенно зависит от режима работы гидроагрегата, наиболее тяжелым режим работы насоса бывает при работе гидроагрегата в системе АРЧМ с диапазоном регулирования нагрузки 0...100%;

- среди рассмотренных методов улучшения режима работы насоса МНУ наиболее технички и экономически оправданным является использование дополнительного, постоянно работающего насоса небольшой производительности, такую модернизацию МНУ целесообразно провести на гидротурбинах Г4 — Г9;

- в случае применения дополнительного насоса, при условии использования в электроприводе основных насосов устройств плавного пуска, отпадает необходимость в перепускных клапанах с гидравлическим управлением;

- в ходе планируемой реконструкции гидроагрегатов Г1 — Г3 ДнепроГЭС-1 предусматривается реконструкция МНУ. При этом представляется целесообразным рассмотреть и вариант увеличения рабочего давления в системе регулирования, и применение дополнительного насоса.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабин К.Н. и др.* Маслонапорные установки. — Ленинградское отд. изд-ва Энергия, 1968.
2. *Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е.* Техническая термодинамика. — М.: Энергия, 1974.
3. *Установки* маслонапорные для гидравлических турбин. Технические условия. ГОСТ 8339-84. — М.: Стандартинформ, 2006.

© Савченко Ю.В., 2012

