

УДК 621.224

**Волков А. В., д.т.н., профессор; Литвинов В. В., к.т.н.;
Волков В. А., к.т.н., Морозова К. Н., магистрант (Запорожская
государственная инженерная академия)**

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМА ПУСКА ГИДРОТУРБИНЫ

Предложены аналитические зависимости для расчета вращающего момента и момента сопротивления, скорости и коэффициента полезного действия гидротурбины в пусковом режиме. На основе этих зависимостей разработана имитационная модель для исследования гидравлических, механических и энергетических процессов в гидротурбине в указанном режиме.

Ключевые слова: гидротурбина, пусковой режим, имитационная модель.

Принимая во внимание, что гидроэлектростанции (ГЭС) Украины выполняют важную роль в автоматическом регулировании частоты напряжения и активной мощности объединенной энергетической системы Украины, существенно возрастает количество пуско-тормозных режимов для гидроагрегатов ГЭС [1]. В связи с этим становится очень актуальной задача исследования указанных режимов, направленная на повышение эксплуатационной надежности гидроагрегатов и оценку расхода воды в этих режимах.

К сожалению, подавляющая часть известных исследований энергетических, гидравлических и механических процессов гидротурбин (ГТ) относится к установившимся режимам в рабочем диапазоне изменения их скоростей. Результаты этих исследований представлены обычно графически в виде универсальных или эксплуатационных характеристик для применяемых ГТ [2]. Определение через них энергетических, гидравлических и механических параметров ГТ применительно к пуско-тормозным режимам оказывается на практике невозможным, так как универсальные и эксплуатационные характеристики ГТ не приводятся для малых значений расхода воды и скоростей ГТ, которые характерны для пуско-тормозных режимов.

Целью статьи является исследование гидравлических, механических и энергетических процессов в гидротурбине типа РО45, установленной на Днепровской ГЭС-1. Методика исследований состояла в следующем: на первом этапе получены экспериментальные осциллограммы разгона и торможения ГТ; на втором этапе – определен момент

сопротивления ГТ в пуско-тормозных режимах; на третьем этапе – разработана математическая модель ГТ, предназначенная для исследования гидравлических процессов ГТ в пусковом режиме; на четвертом этапе – получены аналитические зависимости для расчета энергетических и механических процессов ГТ при пуске; на пятом этапе – рассчитаны затрачиваемый объем воды при пуске турбины и усредненные параметры (вращающий момент и коэффициент полезного действия) гидротурбины.

Полученные на первом этапе экспериментально для гидротурбины типа РО45, установленной на ДнепроГЭС-1, осциллограммы переходных процессов изменения положения α направляющего аппарата (НА) и частоты вращения (скорости) n гидротурбины показаны: на рис. 1 – для режима пуска; на рис. 2 – для режима торможения. На этих осциллограммах по горизонтальной оси указано время (цена большого деления равна 2 с), а по вертикальной оси – относительные значения (в процентах от соответствующих номинальных значений) положения α НА и скорости n/n_n ГТ.

Рассматриваемой гидротурбине типа РО45 присущи следующие номинальные технические характеристики:

- а) активная мощность $N_n = 72 \text{ МВт}$;
- б) момент инерции гидрогенератора $J = 8400 \text{ т} \cdot \text{м}^2$;
- в) скорость $n_n = 83,3 \text{ об/мин}$;
- г) расход воды $Q_n = 240 \text{ м}^3/\text{с}$;
- д) рабочий напор $H = 39,6 \text{ м}$ (полагается неизменным значением при проводимых исследованиях).

При этом пуск и торможение ГТ осуществляется при отключенных от сети статорных обмотках гидрогенератора (то есть – на холостом ходу). Причем пуск осуществляется в три этапа (в зависимости от текущей скорости n ГТ):

- 1) для $0 \leq n < 0,6n_n$ – при $\alpha^* = 27\%$;
- 2) для $0,6n_n \leq n < n_n$ – при $\alpha^* = 20\%$;
- 3) для $n = n_n$ – при $\alpha^* = 10\%$,

где α^* и α – относительные значения заданного и фактического положения НА соответственно, %;

Q – текущее значение расхода воды через ГТ, $\text{м}^3/\text{с}$.

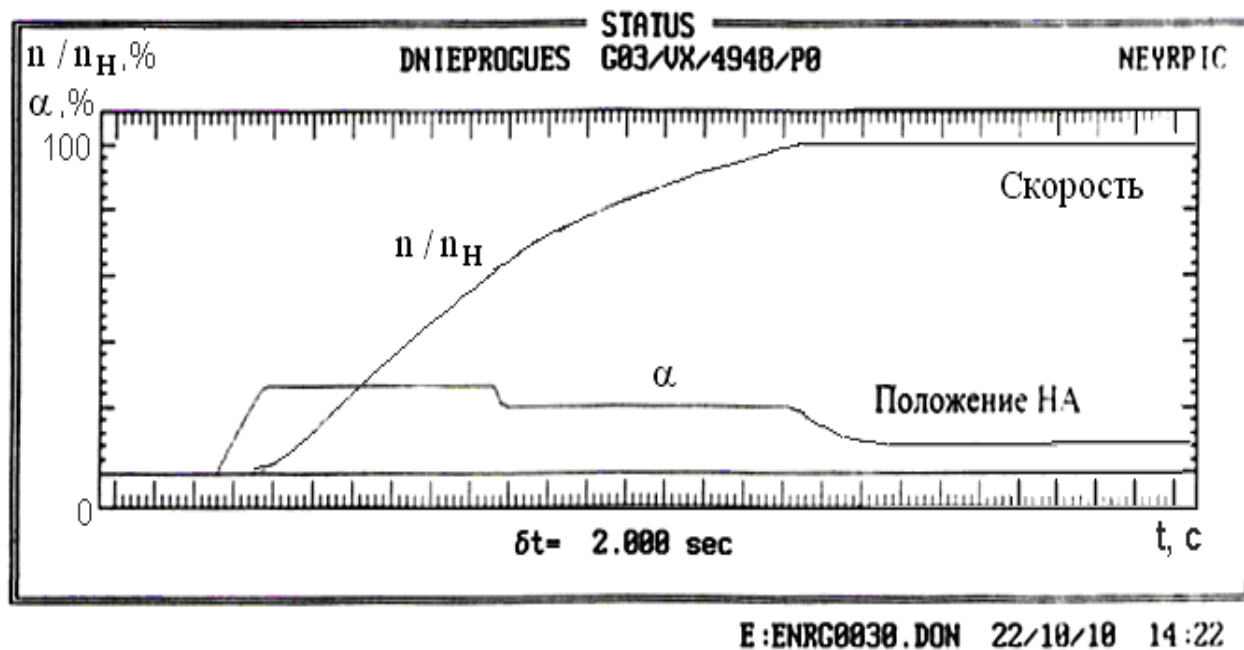


Рис. 1. Осциллограммы автоматического пуска гидроагрегата Г-3 ДнепроГЭС-1

$\alpha^*, \alpha, \%$
 $n, \text{об/мин}$

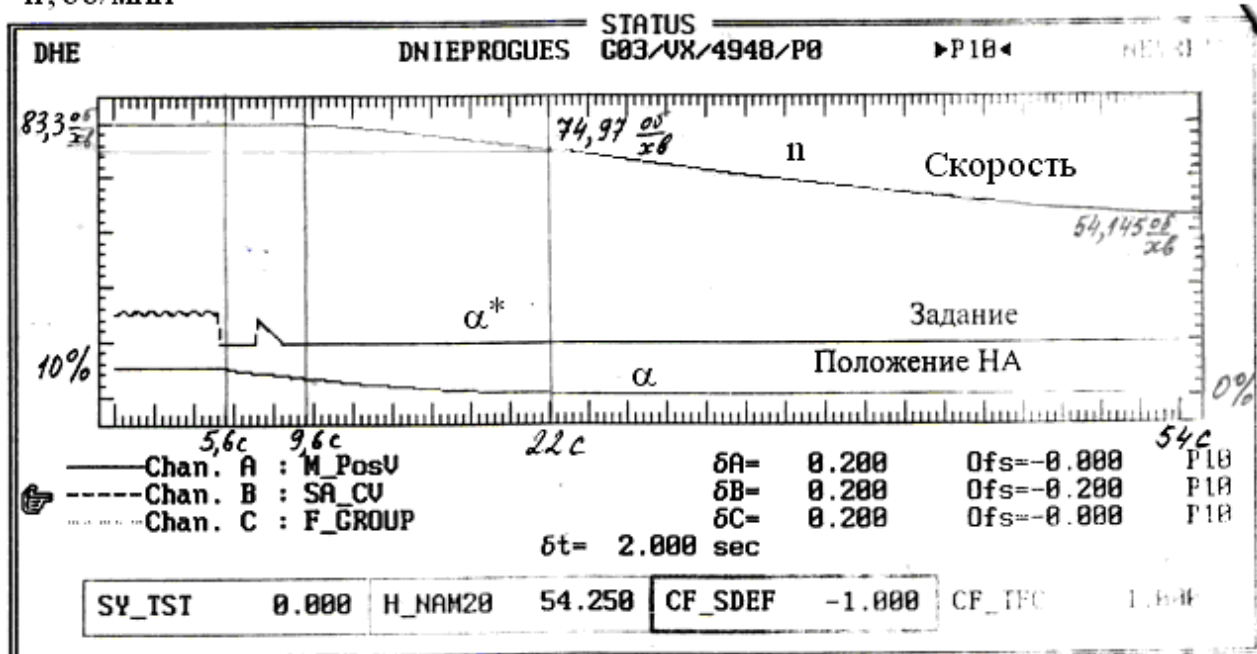


Рис. 2. Осциллограммы автоматического торможения гидроагрегата Г-3 ДнепроГЭС-1

При этом текущее значение ω скорости, измеряемое в *рад/с*, находится через соответствующее ему значение n этой скорости, измеряемое в *об/мин*, из известного соотношения.

$$\omega = \pi \cdot n / 30 = n / 9,55, \quad (1)$$

а номинальное значение указанной скорости ω_n равно $n_n / 9,55 = 8,72$ *рад/с*.

Торможение гидротурбины проводилось также в три этапа в зависимости от её скорости:

- 1) для $0,925n_n \leq n < n_n$ – при плавном закрытии НА от 10% до нуля;
- 2) для $0,25n_n \leq n < 0,925n_n$ – при нулевом положении НА ($\alpha = 0$);
- 3) для $0 \leq n < 0,25n_n$ – при включении пневматического тормоза, при котором турбина тормозится до полной остановки (до $\omega = 0$) за 5 секунд.

На втором этапе для режима торможения ГТ, наступившего при достижении нулевого значения расхода воды через турбину ($Q=0$), составим уравнение движения:

$$J\omega' = -M_c, \quad (2)$$

где $\omega' = \frac{d\omega}{dt}$ – производная скорости гидротурбины по времени, *рад/с²*; M_c – момент сопротивления холостого хода турбины (при моменте электрического генератора, равном нулю), *Н м*.

Данный режим работы ГТ наступает на осциллограмме на рис. 2, начиная с момента времени $t=22с$ (когда расход воды через турбину стал равным нулю), и заканчивается после наложения пневматических тормозов.

На участке режима торможения ГТ, наступающем с момента времени $t=9,6с$, когда при закрытом НА начинает снижаться скорость гидротурбины, экспериментальная кривая скорости с высокой точностью (при относительной погрешности менее 1,1%) аппроксимируется (при $t \geq 9,6с$) расчетной экспоненциальной зависимостью вида:

$$n(t) = n_n \cdot e^{-(t-9,6)/T_r} \quad (3)$$

или соотношением

$$\omega(t) = \omega_n \cdot e^{-(t-9,6)/T_r}, \quad (4)$$

где t – текущее время, *с*;

T_r – механическая постоянная времени, соответствующая режиму торможения рассматриваемой ГТ, с;

e – основание экспоненты.

В таблице приведены данные сравнения между собой скорости, рассчитанной из зависимости (3), и экспериментального значения скорости из осциллограммы на рис. 2.

Таблица

Сравнение экспериментальной и расчетной скоростей.

t, c	Скорость вращения, об/мин			$\delta = \frac{\Delta n}{n_s}, \%$
	экспериментальная n_s	расчетная n	$\Delta n = n - n_s $	
9,6	83,30	83,30	0	0
10,5	74,97	74,86	0,11	0,15
13,3	72,74	72,76	0,02	0,03
16,6	69,97	70,36	0,39	0,55
20,2	67,47	67,83	0,36	0,53
24,7	64,14	64,79	0,65	1,02
28,5	62,06	62,33	0,27	0,44
32,3	59,34	59,97	0,63	1,06
36,0	57,48	57,76	0,28	0,48
39,7	55,39	55,62	0,23	0,42
42,5	54,15	54,06	0,09	0,17

Из соотношения (4) определим производную по скорости ГТ в режиме торможения:

$$\omega'(t) = \frac{d}{dt} [\omega_n \cdot e^{-(t-9.6)/T_r}] = -\frac{\omega_n}{T_r} \cdot e^{-(t-9.6)/T_r} = -\frac{\omega(t)}{T_r}, \quad (5)$$

из которого с учетом (2) найдем зависимость для момента сопротивления турбины:

$$M_c = \frac{J}{T_r} \cdot \omega(t). \quad (6)$$

Эта зависимость показывает, что момент сопротивления ГТ изменяется в линейной зависимости от скорости $\omega(t)$, для которой коэффициент пропорциональности равен:

$$k = \frac{J}{T_r} = \frac{8400 \cdot 10^3}{98,3} = 85,45 \cdot 10^3 \text{ Нм} \cdot \text{с} / \text{рад}. \quad (7)$$

На рис. 3 показана рассчитанная из (6) графическая зависимость момента сопротивления M_c гидротурбины от ее скорости ω .

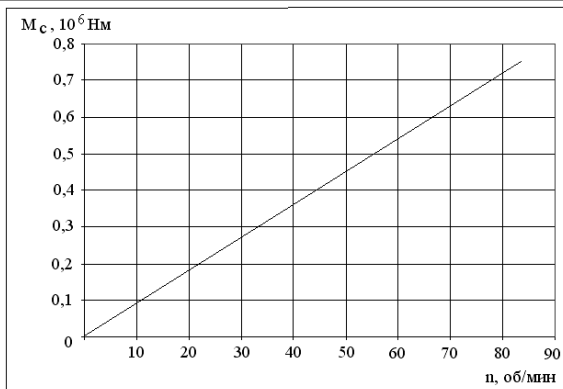


Рис. 3. Изменение момента сопротивления гидротурбины от скорости

Из соотношения (6) вычислим максимальное значение момента сопротивления турбины (развиваемое на осциллограмме на рис. 2 при времени $t=9.6$ с и скорости $\omega = \omega_n$):

$$M_{c.\max} \approx \frac{J \cdot \omega_n}{T_T} = \frac{8400 \cdot 10^3 \cdot 8,72}{98,3} = 0,745 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (8)$$

и кратность его по отношению к номинальному моменту M_n электрического генератора:

$$\lambda_T = \frac{M_{c.\max}}{M_n} = \frac{0,745 \cdot 10^6}{8,259 \cdot 10^6} = 0,090 \text{ о.е.}, \quad (9)$$

где

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{72 \cdot 10^6}{8,72} = 8,259 \cdot 10^6 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (10)$$

На третьем этапе на основании математической модели гидравлических процессов, протекающих в гидротурбине и описываемых зависимостями [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} Q &= C_1 \cdot a \cdot \sqrt{\Delta H}, \\ \frac{d(\Delta H)}{dt} &= \frac{2}{T_\epsilon} \cdot (H - \Delta H) - \frac{2}{T_{HA}} \cdot (a^* - a), \\ \frac{da}{dt} &= \frac{1}{T_{HA}} \cdot (a^* - a) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

составлена компьютерная имитационная модель указанных процессов. В модели (10) используются (кроме ранее примененных) следующие обозначения:

ΔH – падение напора на турбине, м;

α^* и α – заданное и фактическое значения положения НА, м;

$T_6 = 10$ с – постоянная времени водовода, с;

$T_{HA} = 0,8$ с – постоянная времени открытия НА, с.

Посредством разработанной имитационной модели рассчитаны для режима пуска гидротурбины РО45 на ДнепроГЭС-1 кривые изменения: расхода воды Q через турбину, падения напора ΔH на турбине и положения a направляющего аппарата, – которые показаны на рис. 4,а.

На четвертом этапе составлено уравнение энергетического баланса для ГТ [3]:

$$9810 \cdot Q \cdot \Delta H \cdot \eta_T = M_T \cdot \omega, \quad (12)$$

где M_T – вращающий момент турбины, Н м;

η_T – коэффициент полезного действия (КПД) турбины, о.е.

Из уравнения движения ГТ в режиме пуска [5]:

$$M_T - M_c = J \cdot \omega' \quad (13)$$

определим с учетом (6) и (7) вращающий момент турбины:

$$M_T = J \cdot \omega' + M_c = J \cdot \omega' + k\omega. \quad (14)$$

После подстановки последнего соотношения в (12) найдем зависимость для текущего значения КПД гидротурбины при ее пуске:

$$\eta_T = \frac{\omega(J\omega' + k\omega)}{9810 \cdot Q \cdot \Delta H}. \quad (15)$$

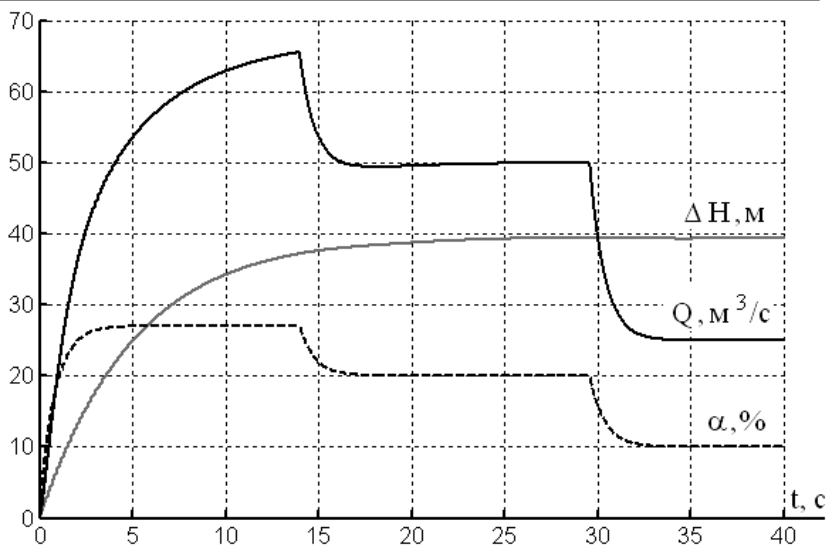
По окончании пуска гидротурбины (когда наступил установившийся режим её работы на холостом ходу) КПД турбины определяется (из условия $\omega' = 0$ и $\Delta H = H$) из соотношения:

$$\eta_T = \frac{k\omega_n^2}{9810 \cdot Q \cdot H} = \frac{85,45 \cdot 10^3 \cdot 8,72^2}{9810 \cdot 24 \cdot 39,6} = 0,697. \quad (16)$$

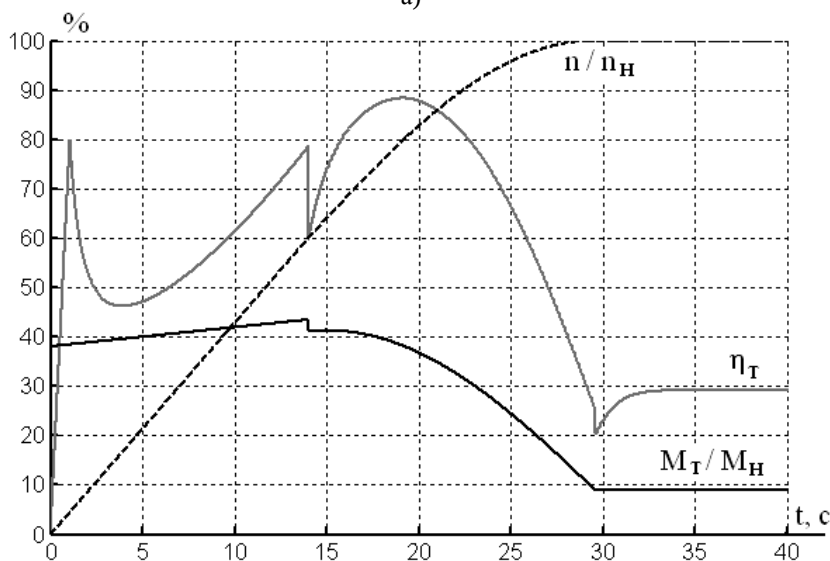
Заметим, что из уравнения движения ГТ для ее режима работы с электрическим генератором, статорные обмотки которого подключены к сети:

$$M_T - (M_c + M_r) = J \cdot \omega', \quad (17)$$

аналогичным путем можно получить для установившегося режима такой турбины (при $\omega' = 0$ и $\Delta H = H$) следующее соотношение для расчета ее КПД:



а)



б)

Рис. 4. Результаты моделирования гидравлических (а) и электромеханических (б) процессов гидротурбины при пуске

$$\eta_T = \frac{\omega(k\omega + M_T)}{9810 \cdot Q \cdot \Delta H}, \quad (18)$$

где M_T – составляющая момента нагрузки на валу турбины, вызванная электрическим генератором.

Далее аппроксимируем (с относительной погрешностью менее 3% от номинального значения скорости) экспериментальную кривую скорости n , показанную на осциллограмме пуска на рис. 1, следующими аналитическими зависимостями:

$$\left. \begin{aligned} 1) \quad n(t) &= 3,5714 \cdot t - \text{для } n \in [0; 0,6 n_H]; \\ 2) \quad n(t) &= 33,3 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{31,2}(t-14)\right] + 50 - \text{для } n \in [0,6 n_H; n_H]. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Подставив для текущего времени t в зависимости (14) и (15) значения скорости ω и её производной ω' , вычисленные из (19), рассчитаем вращающий момент M_T и КПД η_T турбины от времени, которые показаны в виде соответствующих им графиков на рис. 4, б.

Исходя из соотношений (1), (6), (7) и (14), через полученную зависимость для вращающего момента M_T рассчитана текущая скорость n гидротурбины из соотношения:

$$n = 9,55\omega = \frac{9,55}{J} \cdot \int_0^t (M_T - k\omega) dt, \quad (20)$$

график которой показан на рис. 4, б. Сравнение этого графика с экспериментальной кривой (из осциллограммы на рис. 1) скорости n свидетельствует о хорошем совпадении (с отличием менее 3%) экспериментальных и расчетных результатов.

На пятом этапе рассчитаем объем воды, затрачиваемый при пуске турбины от нулевой до номинальной скорости:

$$V = \int_0^{T_H} Q dt = 1517 \text{ м}^3, \quad (21)$$

где $T_H = 29,6$ с – время пуска ГТ, определенное из рис. 4, б.

Найдем из рис. 4, б максимальное мгновенное значение момента турбины, развиваемое при пуске:

$$M_{T, \max} = 3,59 \cdot 10^6 \text{ Нм} = 0,435 M_H \text{ при } t = 14 \text{ с}, \quad (22)$$

а также – максимальное значение КПД турбины:

$$\eta_{T, \max} = 88,3\% \text{ при } n = 67 \text{ об/мин.} \quad (23)$$

Рассчитаем средние значения (за время пуска) вращающего момента и КПД турбины:

$$M_{\text{т.ср}} = \frac{1}{T_{\text{п}}} \int_0^{T_{\text{п}}} M_{\text{т.}} dt = 2,917 \cdot 10^6 \text{ Нм} = 0,353 M_{\text{н.}}, \quad (24)$$

$$\eta_{\text{т.ср}} = \frac{1}{T_{\text{п}}} \int_0^{T_{\text{п}}} \eta_{\text{т.}} dt = 64,0 \% . \quad (25)$$

По результатам проведенных исследований сделаем следующие выводы:

1. Посредством разработанной компьютерной имитационной модели гидротурбины осуществляется с достаточной для инженерных задач точностью (с погрешностью менее 3%) расчет гидравлических, механических и энергетических процессов в гидротурбине во время пускового режима.

2. Полученная аналитического вида зависимость (6) для расчета момента сопротивления гидротурбины позволяет установить линейное изменение этого момента от скорости турбины и определить максимальное мгновенное значение указанного момента сопротивления.

3. Предложенная аналитическая зависимость (15) позволяет рассчитать мгновенное значение КПД гидротурбины, исходя из текущих значений её скорости, расхода воды через неё и падения напора на турбине.

4. Выполненными в статье исследованиями дана количественная оценка гидравлическим (расходу, напору и объему расходуемой воды), механическим (вращающему моменту и моменту сопротивления) и энергетическим (в виде коэффициента полезного действия) процессам при пуске гидротурбины типа РО-45, эксплуатируемой на ДнепроГЭС-1.

1. Редин В. И. Принципы построения и организация взаимодействия системы SCADA-ACG – «Centralog» ГЭС / В. И. Редин, А. Г. Баталов, Ю. Н. Бондаренко, Д. А. Олефир, А. Г. Денисенко // Электрические сети и системы. – 2004. – № 3. – С. 3–8. 2. Кривченко Г. И. Гидравлические машины. Турбины и насосы / Г. И. Кривченко. – М. : Энергия, 1978. – 320 с. 3. Лурье З. Я. Динамика системы управления гидротурбиной с ПИД-регулятором / З. Я. Лурье, В. Н. Дмитерко // Вестник СумДУ. Серия техники и науки. – 2003. – № 13 (59). – С. 144–150. 4. Лукашов Э. С. Математическое моделирование электроэнергетической системы для расчета электромеханических переходных процессов при больших небалансах мощности и изменении частоты / Э. С. Лукашов, Н. Н. Лизалек, А. Н. Лукин // Тезисы VII всесоюзной конференции по моделированию электроэнергети-

ческих систем. – Таллин. – 1977. 5. Первозванский А. А. Курс теории автоматического управления / А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1986. – 616 с.

Рецензент: д.т.н., профессор Качан Ю. Г. (Запорожская государственная инженерная академия)

**Volkov A. V., Doctor of Engineering, Professor, Litvinov V. V.,
Candidate of Engineering, Volkova V. A., Candidate of Engineering,
Morozova K. M., Graduate Student (Zaporozhye State Engineering
Academy)**

STUDY OF HYDRO TURBINES STARTING REGIME

Analytical dependences for the calculation of hydraulic turbine rotating torque, resistance torque, speed and efficiency in start regime are proposed. At the base of these dependences, the simulation model for the hydraulic, mechanic and energy transient conditions in hydraulic turbine is developed.

Keywords: turbine, start mode, the simulation model.

Волков А. В., д.т.н., професор; Литвинов В. В., к.т.н.; Волков В. А., к.т.н., Морозова К. М., магістрант (Запорізька державна інженерна академія)

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМУ ПУСКУ ГІДРОТУРБИНИ

Запропоновано аналітичні залежності для розрахунку моменту обертання та моменту опору, швидкості та коефіцієнта корисної дії гідротурбіни у пусковому режимі. На основі цих залежностей розроблено імітаційну модель для дослідження гідравлічних, механічних та енергетичних процесів у гідротурбіні при вказаному режимі.

Ключові слова: гідротурбіна, пусковий режим, імітаційна модель.
