



Научная статья

УДК 621.22-226

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-415-425>

Применение адаптивного регулятора скорости вращения гидрогенератора с учетом технологического состояния турбины Каплана

Андрей Александрович Ачитаев^{1✉}, Анастасия Ивановна Валецкая²,
Михаил Фёдорович Носков³, Василий Иванович Татарников⁴

¹⁻⁴Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, Россия

¹aachitaev@shf-sfu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3225-2558>

²polezhaeva.nastya2011@yandex.ru

³egg1@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4514-7925>

⁴tvi_ger@inbox.ru

Резюме. Цель – оценка влияния протечек масла в турбине на основные параметры энергосистемы. Объектом исследования послужили реактивные гидравлические турбины с поворотными лопастными рабочими колесами (турбины Каплана), установленные на гидроэлектростанциях Майнская, Нижне-Бурейская, Вилюйская. Основные теоретические соотношения и выводы получены методами математического моделирования и интегрального исчисления с использованием программного комплекса MATLAB. В данной работе предложен способ контроля над протечками в корпусе поворотно-лопастного рабочего колеса, внедрение которого сглаживает колебания изменений различных параметров (амплитуда, скорость вращения, фазовый угол, активная мощность, ток генератора) энергосистемы в случае протечек масла. Данный контроль предлагается сделать с помощью датчика, установленного в рабочем колесе, оптоволоконного кабеля и оптико-электрического преобразователя, расположенных от лопастей рабочего колеса вверх по валу и выведенных в маслоприемник соответствующего гидроагрегата. Проведенный анализ составленной математической модели (построены амплитудно-частотные и амплитудно-фазовые характеристики) относительно основных параметров вырабатываемой гидроагрегатом электрической энергии показал, что предложенный способ контроля протечек масла способствует повышению устойчивости работы гидроагрегата. При разработке модели были учтены следующие параметры гидроагрегата: угол поворота лопастей рабочего колеса и угол открытия направляющего аппарата гидротурбины. Разработанная блок-схема позволяет провести сравнение изменения параметров без контроля над протечками масла и с учетом автоматизированной системы контроля, предложенной авторами. Показано, что с помощью логарифмической амплитудно-фазовой характеристики, полученной в результате применения математической модели, можно проследить изменение и сглаживание амплитуды в нормальных условиях и с учетом наличия расхода масла в корпусе гидротурбины.

Ключевые слова: гидротурбина, синхронизация электрической сети, механическая мощность, параметры энергосистемы

Финансирование: Исследование проводилось в рамках гранта Президента Российской Федерации по проекту МК-3371.2022.4.

Для цитирования: Ачитаев А. А., Валецкая А. И., Носков М. Ф., Татарников В. И. Применение адаптивного регулятора скорости вращения гидрогенератора с учетом технологического состояния турбины Каплана // iPolytech Journal. 2022. Т. 26. № 3. С. 415–425. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-415-425>.

Application of an adaptive controller for controlling the rotational velocity of hydrogenerators taking into account the technological state of a Kaplan turbine

Andrey A. Achitaev^{1✉}, Anastasia I. Valetskaya²,
Mikhail F. Noskov³, Vasily I. Tatarnikov⁴

¹⁻⁴Siberian Federal University, Sayano-Shushensky branch, Cheremushki settlement, Russia

¹aachitaev@shf-sfu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-3225-2558>

²polezhaeva.nastya2011@yandex.ru

³egg1@rambler.ru, <http://orcid.org/0000-0002-4514-7925>

⁴tvi_ger@inbox.ru

Abstract. The impact of oil leakages in a turbine on the main power system parameters is investigated in reactive hydraulic turbines with adjustable-blade runners (Kaplan turbines) installed at Maynskaya, Nizhne-Bureiskaya and Vilyuyskaya hydroelectric power plants. The main theoretical relations and conclusions were obtained by the methods of mathematical simulation and integral calculations in the MATLAB software environment. A method is proposed for monitoring leakages in the housing of an adjustable-blade runner and smoothing the fluctuations of various parameters (amplitude, rotational velocity, phase angle, active power and generator current) of the power system in the case of oil leakages. The control is performed by means of a sensor installed in the runner, a fiber-optic cable and an optical-electrical converter located along the shaft from the runner blades to the oil receiver of the corresponding hydraulic unit. The performed analysis of the obtained mathematical model (frequency response and Nyquist plots were built) relative to the basic parameters of the electrical energy generated by a hydraulic unit showed that the proposed method of monitoring oil leakages contributes to an increase in the operational stability of a hydraulic unit. When constructing the model, the following parameters of the hydraulic unit were taken into account: rotational angle of runner blades and opening angle of hydraulic turbine guide vanes. The developed block diagram can be used to compare variations in the parameters both without oil leakage control and taking into account the automated control system proposed by the authors. It is shown that the obtained logarithmic Nyquist plot can be used to monitor variations in the amplitude, as well as its smoothing, both under normal conditions and taking into account oil leakages in the hydraulic turbine housing.

Keywords: hydraulic turbine, power grid synchronization, mechanical power, power system parameters

Funding: The study was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation under the project MK-3371.2022.4.

For citation: Achitaev A. A., Noskov M. F., Valetskaya A. I., Tatarnikov V. I. Application of an adaptive controller for controlling the rotational velocity of hydrogenerators taking into account the technological state of a Kaplan turbine. *iPolytech Journal*. 2022;26(3):415-425. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-3-415-425>.

ВВЕДЕНИЕ

В ходе эксплуатации гидроагрегатов на гидроэлектростанциях основной задачей является обеспечение их надежной работы, решаемой путем профилактических мер контроля и испытаний гидроагрегатов для раннего выявления и устранения дефектов, развитие которых может привести к аварийным отключениям агрегатов. Однако применяемые в настоящее время методы и средства обнаружения дефектов, особенно в режиме реального времени, не имеют достаточной эффективности, так как в них не в полной мере используются современные возможности. Основным вопросом, осложняющим экс-

плуатацию, является возможность протечек масла из рабочего колеса в воду. Устранение возникающих в межремонтный период недопустимых протечек масла требует внепланового вывода агрегатов из эксплуатации для осушки проточной части турбин и проведения ремонтных работ [1–20]. Простой гидроагрегатов из-за неудовлетворительной герметизации узлов снижают технико-экономические показатели работы оборудования, и изменение этой ситуации возможно при условии создания более эффективных и надежных уплотнений, а также в результате глубокой модернизации эксплуатируемых уплотнительных устройств.

Автоматизацию системы контроля над протечками предлагается выполнить на основе оптоволоконного кабеля, по которому передается сигнал с оптического датчика, установленного в корпусе рабочего колеса, на оптико-электрический преобразователь, находящийся в маслоприемнике (рис. 1 а), после чего сигнал отображается на щите управления гидроагрегатом (рис. 1 б). Эта система позволит моментально определить даже незначительные протечки в корпусе поворотно-лопастного (ПЛ) рабочего колеса.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема загрязнения деталей генератора из-за потерь масла через уплотнения масляных ванн направляющих подшипников и упорного подшипника до сих пор не полностью решена заводами-изготовителями [5]. В

то же время следует отметить, что причина неудовлетворительной работы уплотнений и смазки деталей и узлов не всегда является результатом ошибок в расчетах конструктора. Как правило, причиной является совокупность дефектов, возникающих в результате несовершенства конструкции, низкого качества изготовления, сборки, технического обслуживания или несоблюдения проектных требований.

Типы и характеристики конструкций уплотнительных элементов. На заводах используют несколько типов уплотнительных элементов для герметизации крышек и отсеков масляных ванн подшипников:

– лабиринтные уплотнения, состоящие из набора металлических колец, а также сегментов из тканевого ламината или фторопласта, создают эффект уплотнения за счет

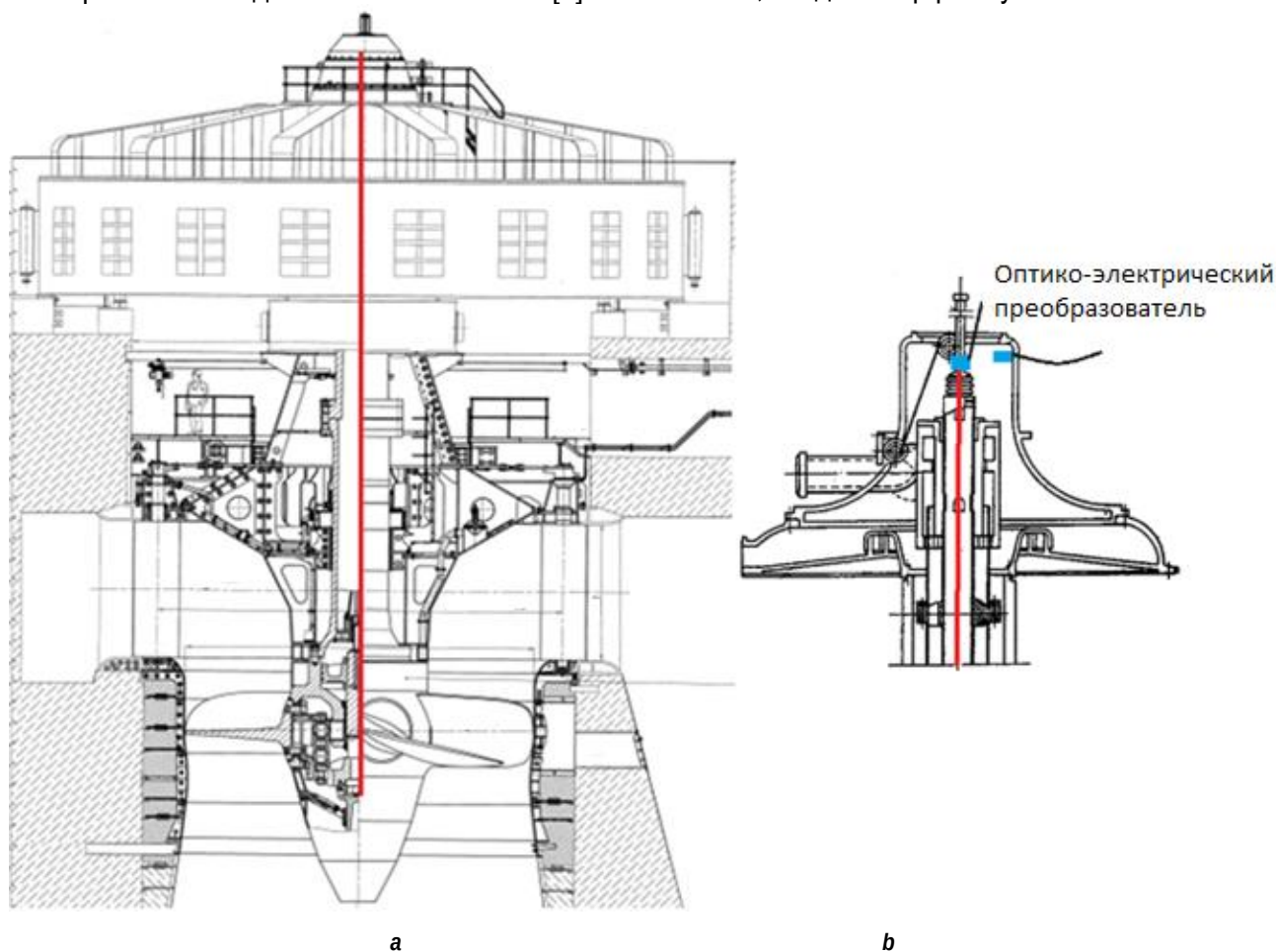


Рис. 1. Способ прокладки кабеля на разрезе гидроагрегата (а); установка оптико-электрического преобразователя в маслоприемнике (б)

Fig. 1. Method of cable laying in the section of the hydraulic unit (a); installation of an optical-electrical converter in the oil receiver (b)

создания турбулентности потока в камерах уплотнительной манжеты, имеющей переменные зазоры между валом и уплотнением по высоте. Такие уплотнения установлены заводом в подшипниках на агрегатах Плявиньской, Усть-Илимской, Вилуйской и других гидроэлектростанций. Уплотнения такого типа эффективны при высоких скоростях потока в зазоре и малых радиальных зазорах между валом и неподвижной манжетой;

– сальниковые уплотнения с рабочим элементом из войлока применяются довольно часто. Этот тип уплотнения может быть использован для защиты от пыли, но он не может предотвратить выход паров масла из ванны в случае значительного перепада давления. Однако по сравнению с лабиринтными уплотнениями эффективность сальников значительно выше.

Уплотнения этого типа при правильном расположении кольца и качественном монтаже полностью предотвращают выброс масла и выход паров из ванны в зону низкого давления. Уплотнительные кольца хорошо работают при малых и средних перепадах давления, но они требуют наличия смазки или применения специальных материалов. Характерной и частой ошибкой является неправильное размещение кольца, когда изгиб кольца направлен в сторону более низкого давления. В этом случае кольцо не препятствует выходу масла и паров. Верным является размещение кольца с изгибом в сторону более высокого давления. В этом случае происходит дополнительное уплотнение зазора за счет прижатия кольца к валу под действием более высокого давления из ванны.

В статье [5] описана проблема протечки, проведен анализ причин, по которым возникают данные явления. Представлены методы диагностики и решения, позволяющие уменьшить масляный след. Но, как показывают выводы исследования, в ходе эксплуатации поворотных лопастных гидротурбин необходимо учитывать расход масла по причине утечки. Поэтому в данной статье ставится задача учета утечки масла при реализации автоматической настройки параметров регулятора скорости турбины в зависимости от величины утечки. Но чтобы понять, как это

сделать, принимается метод, который описан в статье [2]. Также в ней рассматривается принцип коррекции управления с учетом внешних факторов, в том числе изменения давления в сервоприводе. Но существует ряд особенностей поворотных лопастных гидротурбин. Специализированный источник [1] описывает потери масла в нижний бьеф, которые регулируются техническими условиями на турбину. Для агрегатов средней мощности утечка на лопатку не должна превышать 0,15 л/сут. Обследование состояния уплотнений рабочих колес поворотных лопастных турбин на 21 гидроэлектростанции, которое проводилось в 90-х гг. прошлого столетия показало, что на 11 станциях утечки масла составили 5–10 т/год на одну гидротурбину, т.е. в десять раз и более превышающую норму. Для каскада Волжских гидроэлектростанций утечки масла только через уплотнения лопаток составляют около 500 т/год без учета разовых утечек через поврежденные уплотнения [1]. Работа ПЛ турбин при частичных нагрузках и переменных напорах сопровождается потерей выработки электроэнергии, сужением регулируемого диапазона и повышенными вибрациями в переходных режимах, на холостом ходу и при частичных нагрузках. Однако в некоторых случаях (Рыбинская, Кегумская, Бухтарминская гидроэлектростанции) перевод турбин ПЛ на пропеллерные, по расчетам специалистов гидроэлектростанций, экономически оправдан за счет снижения эксплуатационных расходов на осушение водовода и замену уплотнений, которые превышают потери от недостаточной выработки электроэнергии.

Содержание и эксплуатация старых сооружений, особенно постоянная замена уплотнений лопастей, требуют больших затрат. Однако ряд авторов утверждают о том, что в случае улучшения динамики закрытия или открытия лопаток ПЛ турбины позволяют минимизировать величину расхода масла.

Данная статья отражает вопрос повышения качества управления с учетом наличия утечки масла в системе регулирования поворота лопасти ПЛ турбины.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ

Для исследования переходных режимов при работе турбины рассмотрена электрическая сеть, изображенная на рис. 2. Рассматривается управление поворотными лопастными турбинами. Современное развитие средств управления гидравлических турбин развивается с использованием различных способов воздействия. В мировых специализированных литературных источниках можно выделить три основных типа контроллеров скорости [3].

В пересчете на единицу измерения это соотношение выглядит следующим образом:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{[1 - h - h_i]}{T_w},$$

где h и h_i – напор на турбине и потери напора, м, соответственно, при этом h_{base} определяется как статический напор воды на турбину, м; T_w – постоянная времени воды или времени начала движения воды, определяется как

$$T_w = \left(\frac{L}{A}\right) \frac{q_{base}}{h_{base}g} \text{ secs},$$

где q_{base} выбирается как расход турбины при полностью открытых затворах (положение затвора $G = 1$), м³/с, и напоре на турбине равном h_{base} .

Таким образом, удельная мощность турбины P_m выражается как

$$P_m = A_t h(q - q_{ni}) - DG\Delta\omega,$$

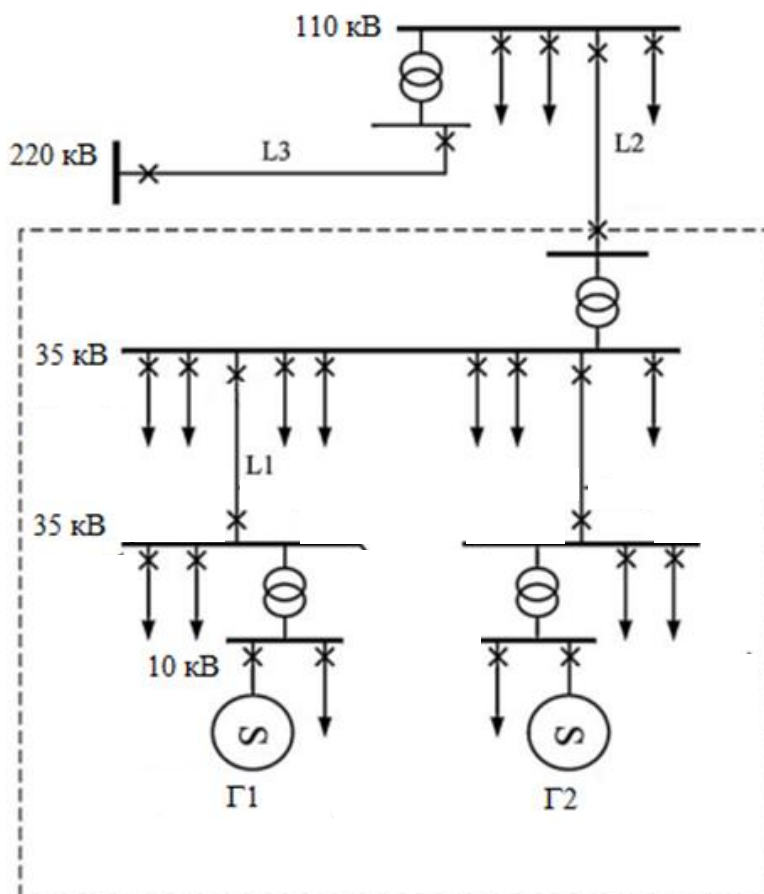


Рис. 2. Пример различных зон (областей) изолированного отключения, которые формируются при размыкании смежных автоматических выключателей

Fig. 2. Example of different zones (areas) of isolated tripping that are formed when adjacent automatic circuit breakers are open

где q_{ni} – удельный расход турбины на холостом ходу, учитывающий установленную мощность турбин, м³/с; A_t – коэффициент пропорциональности, который принимается постоянным. Он рассчитывается с использованием номинальной мощности турбины и мощности генератора в МВ·А.

Изменение механической мощности может быть выражено как

$$\Delta P_m = \frac{A_t(1-T_1s)\Delta G}{(1+T_2s)} - DG_0\Delta\omega,$$

где G_0 – угол поворота лопастей в рабочей точке, град.

$$T_1 = (a_0 - a_{ni})T_w;$$

$$T_2 = G_0 \frac{T_w}{2},$$

где a_0 – открытие лопаток в рабочей точке.

Гидротурбины, из-за их первоначальной обратной характеристики мощности на изменение угла поворота лопастей, требуют обеспечения функции снижения скорости регулятором скорости для стабильной работы управления [17, 19]. При быстрых отклонениях частоты регулятор демонстрирует высокое регулирование (низкий коэффициент усиления), в то время как при медленных изменениях и в устойчивом состоянии регулятор демонстрирует обычное низкое регулирование (высокий коэффициент усиления) [6–9].

С точки зрения анализа линейного управления случай гидрогенератора, питающего изолированную нагрузку, может быть представлен блок-схемой на рис. 3, включающей ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференцирующий).

С помощью логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) (рис. 4) можно проследить изменение и сглаживание амплитуды в нормальных условиях и с учетом наличия расхода масла в корпусе гидротурбины, а также область допустимой работы ГА (гидроагрегата).

Математические модели, используемые

для расчетов переходных процессов, должны учитывать все наиболее существенные факторы, имеющие место в натуре. Динамика процессов при сбросах нагрузки агрегатов с осевыми турбинами характеризуется высокой интенсивностью изменения вращающего момента турбины, связанного с гидравлическим ударом и крутильными колебаниями агрегата, который является двухмассовой системой, связанной упругим валом [10–15]. Параметры крутильных колебаний зависят не только от показателей инерции ротора и рабочего колеса, но и от участвующей в колебаниях массы воды. Характеристики крутильных колебаний используются при прочностных расчетах вала, определяют пульсационную составляющую давления в водоводах, влияют на показатели качества регулирования частоты и мощности. Соответственно, при учете всех вышеперечисленных параметров скорость вращения гидротурбины после пуска установится на номинальное значение с меньшими колебаниями, что видно из рис. 5.

Обычный анализ частотной характеристики и графика ЛАЧХ этой системы управления показывает, что чисто пропорциональный регулятор должен быть настроен с очень низким коэффициентом усиления для приемлемой стабильности, что дает очень низкое (или высокое) регулирование. Это видно из рис. 6, показывающего асимптотические графики коэффициента усиления и фазового угла в разомкнутом контуре, а также из рис. 7, показывающего реакцию на ступенчатое изменение электрической нагрузки для различных значений коэффициента пропорционального усиления K . Этот пример с использованием времени запуска воды T_w 2 с и постоянной инерции H 4 с показывает, что для приемлемой стабильности коэффициент пропорционального регулирования должен быть ограничен примерно 3 на единицу, что означает неприемлемо высокое регулирование 33%. Зависимость продольной составляющей тока генератора также представлена на рис. 8.

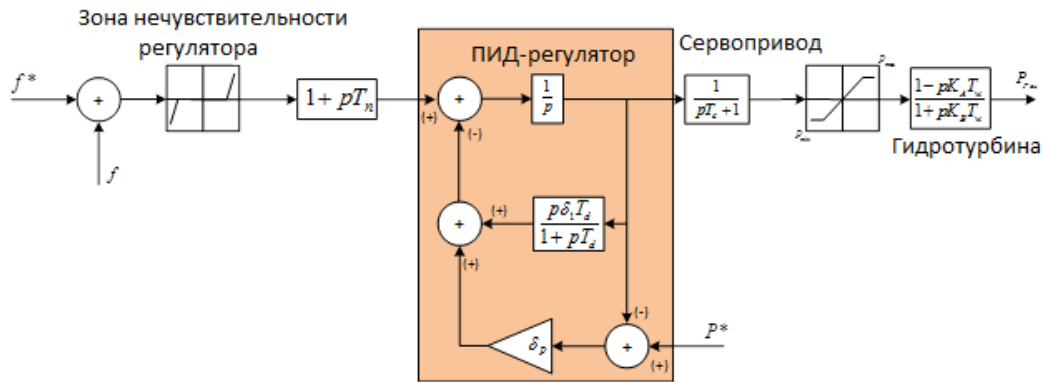


Рис. 3. Регулятор скорости и активной мощности (K – коэффициенты ПИД-регулятора, p – пропорциональная составляющая, δ – дифференциальная составляющая, T – постоянная времени): a – стандартный [4]; b – адаптивный
Fig. 3. Speed and active power controller (K – PID (proportional integral derivative controller) coefficients, p – proportional component, δ – derivative component, T – time constant): a – standard [4]; b – adaptive

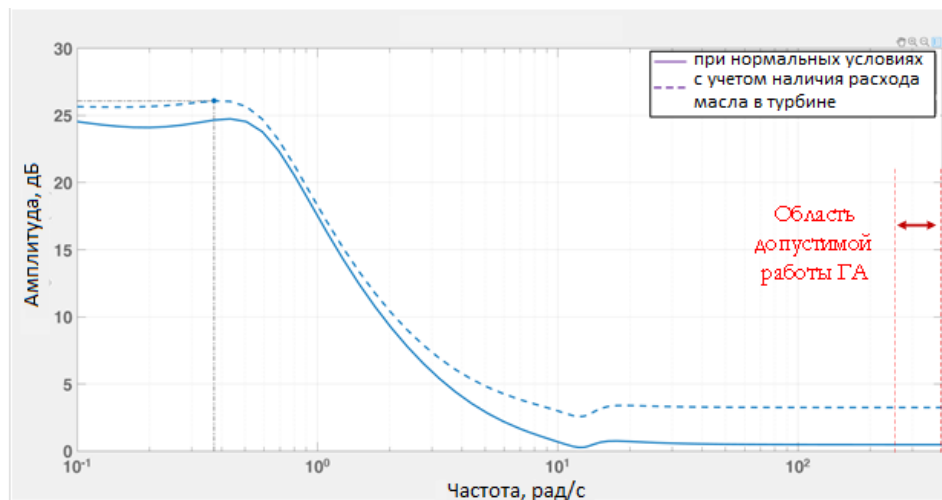


Рис. 4. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
Fig. 4. Logarithmic amplitude frequency response

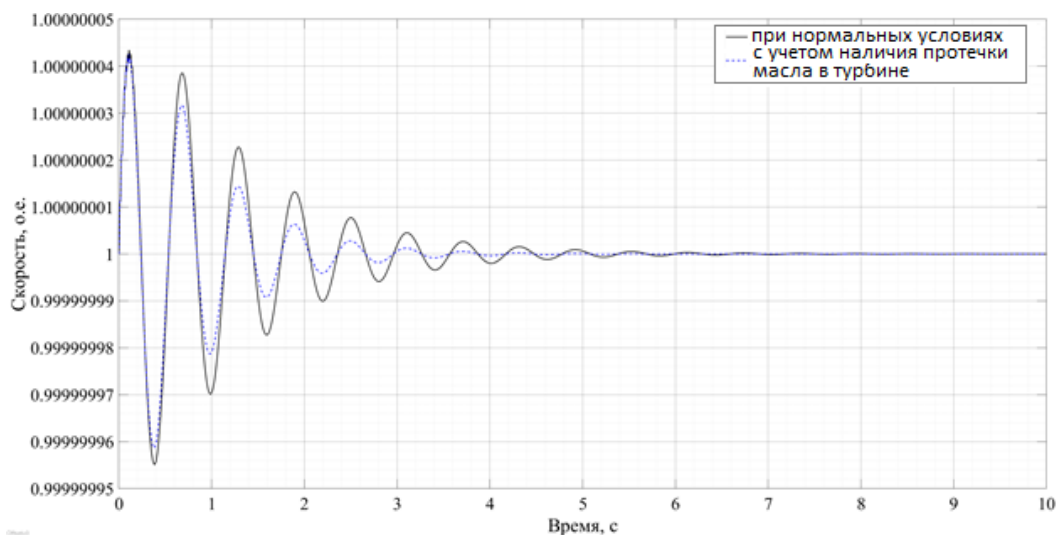


Рис. 5. Зависимость скорости вращения гидроагрегата от времени
Fig. 5. Dependence of the hydroelectric unit velocity on time

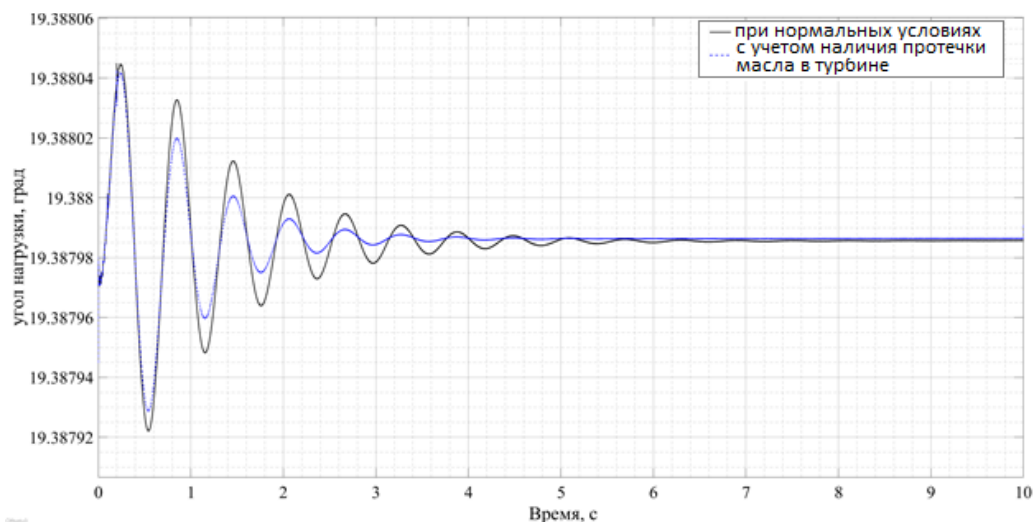


Рис. 6. Зависимость фазового угла в разомкнутом контуре от времени
Fig. 6. Dependence of the phase angle in the open loop on time

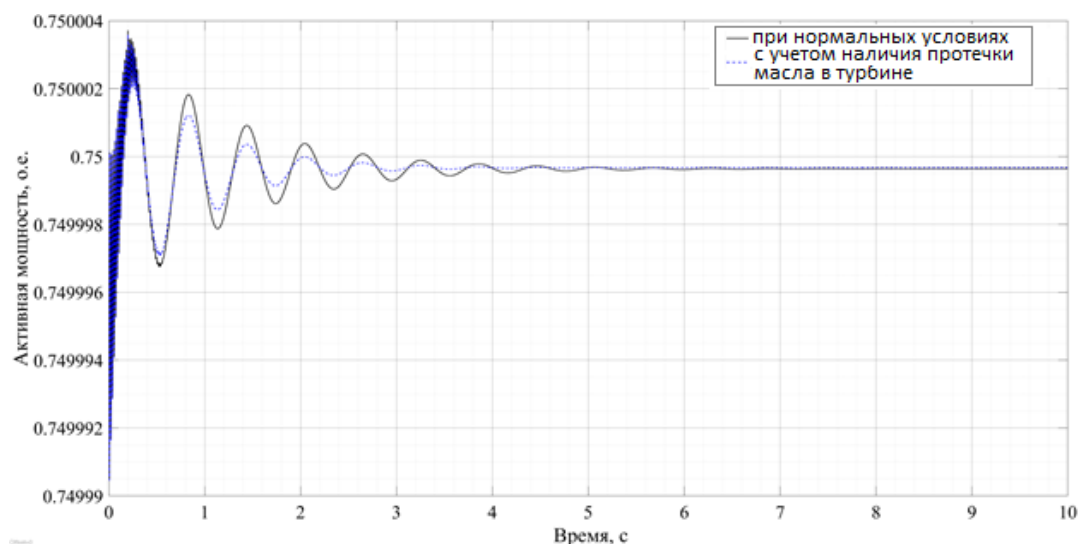


Рис. 7. Зависимость активной мощности от времени
Fig. 7. Dependence of the active power on time

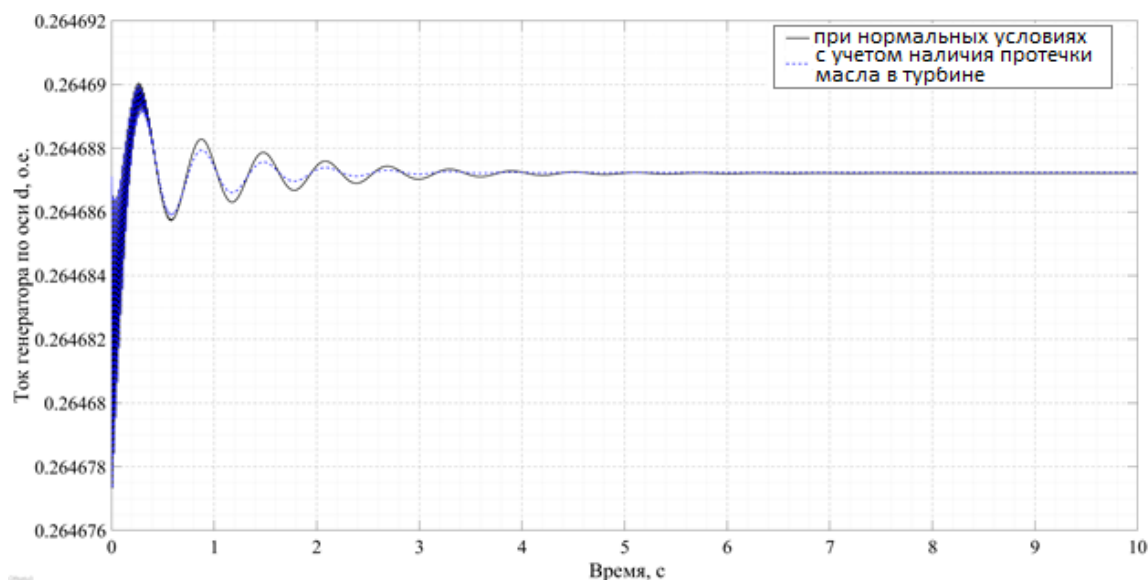


Рис. 8. Зависимость тока генератора I_d от времени
Fig. 8. Dependence of the generator current I_d on time

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный в работе способ автоматизации контроля над протечками позволит:

- повысить качество электрических параметров, а также устойчивость работы гидроагрегата;
- уменьшить трудозатраты на обслуживание и ремонт механических уплотнений в

корпусе рабочего колеса.

Рассмотренная математическая модель позволила проанализировать влияние возникновения и изменения переходных процессов, что подтверждает ее корректность. Такой анализ позволил доказать значимый с точки зрения безопасности и улучшения качества выдаваемой электроэнергии эффект.

Список источников

1. Markin V. N., Tomilin V. I., Il'in A. Yu. Operation of units with adjustable-blade turbines converted to a propeller regime // *Hydrotechnical Construction*. 1988. Vol. 22. Iss. 7. P. 430–436. <https://doi.org/10.1007/BF01432355>.
2. Karabegovic A., Hinteregger M., Christoph J., Mohl W., Gföhler M. Closed-loop helium circulation system for actuation of a continuously operating heart catheter pump // *International Journal of Artificial Organs*. 2017. Vol. 40. Iss. 6. P. 272–281. <https://doi.org/10.5301/ijao.5000593>.
3. Mohamad H., Mokhlis H., Bakar A. H. A., Ping Hew Wooi. A review on islanding operation and control for distribution network connected with small hydro power plant // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. Iss. 8. P. 3952–3962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.010>.
4. Mover W. G. P., Supply E. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies // *IEEE Transactions on Power Systems*. 1992. Vol. 7. Iss. 1. P. 167–179. <https://doi.org/10.1109/59.141700>.
5. Ustalov V. A., Ustalova T. P. Technical developments to prevent fouling of generator parts with oil // *Hydrotechnical Construction*. 1995. Vol. 29. Iss. 8. P. 438–442. <https://doi.org/10.1007/BF02446368>.
6. Xu Haoming, Wang Deyi, Liu Jiajun. Process control optimization for hydroelectric power based on neural network algorithm // *AMSE Journals-AMSE IIETA*. 2017. Vol. 72. No. 2. P. 155–166. https://doi.org/10.18280/ama_c.720204.
7. Андерсон П., Фуад А. Управление энергосистемами и устойчивость / пер. с англ., под ред. Я. Н. Лугинского. М.: Изд-во «Энергия», 1980. 569 с.
8. Ding Tao, Lin Yanling, Bie Zhaohong, Chen Chen. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration // *Applied Energy*. 2017. Vol. 199. P. 205–216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.012>.
9. Heong Oon Kheng, Tan Chia Kwang, Bakar A. H. B. A., Che Hangseng. Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 92. P. 478–488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.001>.
10. Ekonomou L., Vita V., Fotis G. P., Mladenov V. Distributed generation islanding effect on distribution networks and end user loads using the master-slave islanding method // *Journal of Power and Energy Engineering*. 2016. Vol. 4. Iss. 10. P. 1–24. <https://doi.org/10.4236/jpee.2016.410001>.
11. Maina D. K., Sanjari M. J., Nair N.-K. C. Voltage and Frequency Response of Small Hydro Power Plant in Grid Connected and Islanded Mode // *Australasian Universities Power Engineering Conference*. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2018.8757944>.
12. Mohamad H., Laghari J. A., Bakar A. H. A., Salim N. A., Yasin Z. M. A New centralized controller for islanding operation of distribution network connected with rotating type DG // *IEEE International Conference in Power Engineering Application*. <https://doi.org/10.1109/ICPEA51500.2021.9417754>.
13. Shafique N., Raza S., Bibi S., Farhan M., Riaz M. A simplified passive islanding detection technique based on susceptible power indice with zero NDZ // *Ain Shams Engineering Journal*. 2021. Vol. 13. Iss. 4. P. 101637. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.006>.
14. Borkute R., Malwar N. Control for Grid Connected and Intentional Islanding of Distributed Power Generation // *Trend in Scientific Research and Development*. 2019. Vol. 3. Iss. 4. P. 333–336. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd23679>.
15. Wei Liangliang, Nakamura T., Imai K. Development and optimization of low-speed and high-efficiency permanent magnet generator for micro hydro-electrical generation system // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 147. Part 1. P. 1653–1662. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.049>.
16. Paiva S., Ribeiro R. L. A., Alves D., Costa F. B. A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to AC microgrids // *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020. Vol. 121. Iss. 4. P. 106032. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106032>.
17. Kumar A., Riyaz S., Mahanty R. N. A Comprehensive review of conventional and computational islanding diagnosis of distributed generator in distribution network // *Recent Advances in Power Systems* / eds. O. H. Gupta, V. K. Sood. Vol. 699. Singapore: Springer, 2021. P. 509–520. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7994-3_47.
18. Lima R. L., Vieira J. C. M. Performance indices for assessing the power quality of islanded operation of distributed generators // *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2021. Vol. 32. P. 747–755. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00698-w>.
19. Lim SungHoon, Choi Donghee, Lee Soo Hyung, Kang Chongqing, Park Jung-Wook. Frequency stability enhancement of low-inertia large-scale power system based on grey wolf optimization // *IEEE Power & Energy Society Section*. 2022. Vol. 10. Iss. 1-1. P. 11657–11668. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146710>.
20. Gracino R., Hansen V., Goia L., Campos A.,

Campos B. System Identification of a Small Hydropower Plant // 14th IEEE International

Conference on Industry Applications. 2021. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529511>.

References

1. Markin V. N., Tomilin V. I., Il'in A. Yu. Operation of units with adjustable-blade turbines converted to a propeller regime. *Hydrotechnical Construction*. 1988;22(7):430-436. <https://doi.org/10.1007/BF01432355>.
2. Karabegovic A., Hinteregger M., Christoph J., Mohl W., Gföhler M. Closed-loop helium circulation system for actuation of a continuously operating heart catheter pump. *International Journal of Artificial Organs*. 2017;40(6):272-281. <https://doi.org/10.5301/ijao.5000593>.
3. Mohamad H., Mokhlis H., Bakar A. H. A., Ping Hew Wooi. A review on islanding operation and control for distribution network connected with small hydro power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(8):3952-3962. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.010>.
4. Mover W. G. P., Supply E. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies. *IEEE Transactions on Power Systems*. 1992;7(1):167-179. <https://doi.org/10.1109/59.141700>.
5. Ustalov V. A., Ustalova T. P. Technical developments to prevent fouling of generator parts with oil. *Hydrotechnical Construction*. 1995;29(8):438-442. <https://doi.org/10.1007/BF02446368>.
6. Xu Haoming, Wang Deyi, Liu Jiajun. Process control optimization for hydroelectric power based on neural network algorithm. *AMSE Journals-AMSE IIETA*. 2017;72(2):155-166. https://doi.org/10.18280/ama_c.720204.
7. Anderson P. M., Fouad A. Power system control and stability, 1980. 569 p. (Russ. ed.: *Upravlenie energosistemami i ustojchivost'*. Moscow, Energiya; 1980, 569 p.)
8. Ding Tao, Lin Yanling, Bie Zhaohong, Chen Chen. A resilient microgrid formation strategy for load restoration considering master-slave distributed generators and topology reconfiguration. *Applied Energy*. 2017;199:205-216. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.012>.
9. Heong Oon Kheng, Tan Chia Kwang, Bakar A. H. B. A., Che Hangseng. Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018;92:478-488. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.001>.
10. Ekonomou L., Vita V., Fotis G. P., Mladenov V. Distributed generation islanding effect on distribution networks and end user loads using the master-slave islanding method. *Journal of Power and Energy Engineering*. 2016;4(10):1-24. <https://doi.org/10.4236/jpee.2016.410001>.
11. Maina D. K., Sanjari M. J., Nair N.-K. C. Voltage and frequency response of small hydro power plant in grid connected and islanded mode. In: *Australasian Universities Power Engineering Conference*. <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2018.8757944>.
12. Mohamad H., Laghari J. A., Bakar A. H. A., Salim N. A., Yasin Z. M. A New centralized controller for islanding operation of distribution network connected with rotating type DG. In: *IEEE International Conference in Power Engineering Application*. 10.1109/ICPEA51500.2021.9417754.
13. Shafique N., Raza S., Bibi S., Farhan M., Riaz M. A simplified passive islanding detection technique based on susceptible power indice with zero NDZ. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;13(4):101637. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.11.006>.
14. Borkute R., Malwar N. Control for grid connected and intentional islanding of distributed power generation. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*. 2019;3(4):333-336. <https://doi.org/10.31142/ijtsrd23679>.
15. Wei Liangliang, Nakamura T., Imai K. Development and optimization of low-speed and high-efficiency permanent magnet generator for micro hydro-electrical generation system. *Renewable Energy*. 2020;147(1):1653-1662. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.049>.
16. Paiva S., Ribeiro R. L. A., Alves D., Costa F. B. A wavelet-based hybrid islanding detection system applied for distributed generators interconnected to AC microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2020;121(4):106032. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106032>.
17. Kumar A., Riyaz S., Mahanty R. N. A comprehensive review of conventional and computational islanding diagnosis of distributed generator in distribution network. In: Gupta O. H., Sood V. K. (eds.). *Recent Advances in Power Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol. 699. Singapore: Springer, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7994-3_47.
18. Lima R. L., Vieira J. C. M. Performance indices for assessing the power quality of islanded operation of distributed generators. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*. 2021;32:747-755. <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00698-w>.
19. Lim SungHoon, Choi Donghee, Lee Soo Hyung, Kang Chongqing, Park Jung-Wook. Frequency stability enhancement of low-inertia large-scale power system based on grey wolf optimization. *IEEE Power & Energy Society Section*. 2022;10(1-1):11657-11668. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3146710>.
20. Gracino R., Hansen V., Goia L., Campos A., Campos B. System identification of a small hydropower plant. In: *14th IEEE International Conference on Industry Applications*. 2021. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529511>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ачитаев Андрей Александрович,
кандидат технических наук,
заведующий кафедрой гидроэнергетики,
гидроэлектростанций,
электроэнергетических систем и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального
университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Валецкая Анастасия Ивановна,
старший преподаватель кафедры гидроэнергетики,
гидроэлектростанций, электроэнергетических систем
и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского
федерального университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Носков Михаил Фёдорович,
доктор технических наук,
профессор кафедры гидроэнергетики,
гидроэлектростанций, электроэнергетических систем
и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального
университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Татарников Василий Иванович,
доцент кафедры гидроэнергетики,
гидроэлектростанций,
электроэнергетических систем и электрических сетей,
Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального
университета,
655619, г. Саяногорск, рп. Черёмушки, 46, Россия

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 30.03.2022; одобрена после рецензирования 11.05.2022; принята к публикации 23.08.2022.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey A. Achitaev,
Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Hydropower, Hydroelectric
Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Anastasia I. Valetskaya,
Senior Lecturer of the Department of Hydropower,
Hydroelectric Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Mikhail F. Noskov,
Dr. Sc. (Eng.),
Professor of the Department of Hydropower,
Hydroelectric Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Vasily I. Tatarnikov,
Associate Professor of the Department of Hydropower,
Hydroelectric Power Plants,
Electric Power Systems and Electric Networks,
Sayano-Shushensky branch of the Siberian Federal
University,
46, Cheryomushki settlement, Sayanogorsk 655619,
Russia

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 30.03.2022; approved after reviewing 11.05.2022; accepted for publication 23.08.2022.