

*А.Б. Бакасова, Т.К. Сатаркулов, Г.Н. Ниязова*  
*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МИКРОГЭС НОВОГО ТИПА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Приведено описание трех запатентованных вариантов микроГЭС, отличающихся конструктивным исполнением маховика с автоматически регулируемой массой и моментом инерции (АРМИ). Рассмотрены результаты компьютерного моделирования (КМ) микроГЭС при заданных параметрах математической модели. Даны рекомендации по определению параметров микроГЭС на основании полученных результатов КМ, проведенного с помощью пакетов программ MatLab/Simulink.

**Ключевые слова:** микроГЭС, маховик, моделирование, гидротурбина, стабилизация частоты вращения, регулятор Уатта, MatLab/Simulink.

**Введение и постановка задачи.** Проблему электроснабжения мобильных локальных маломощных потребителей, находящихся в труднодоступных районах, отрезанных от центрального электроснабжения, можно решить, используя гидроресурсы малых рек.

В таких случаях для производства электроэнергии возможно использование микроГЭС малой мощности, так как она обладает рядом преимуществ: надёжность, экологичность, компактностью и быстрой окупаемостью [1–4].

В работах [5–8] нами предложены конструкции и приведено описание принципов работы различных вариантов микроГЭС нового типа, в которых стабилизация частоты основана на использовании полого маховика [8] с АРМИ и потоком воды, который подается на вход гидротурбины. При заполнении или удалении воды из полости маховика изменяются масса маховика и его момент инерции (рис. 1 а, б).

На рис. 1 а): 1 – напорный трубопровод, выполняющий функцию вала гидротурбины (ГТ) 13; 2 – ротор генератора, жестко прикрепленный к валу ГТ, 3 – статор генератора; 4 – маховик со следующими элементами (5, 6 – клапаны, 7 – спица, 8 – рычаг, шарнирно связанный с корпусом маховика, 9 – металлический шар жестко закрепленный к рычагу); 10 – подшипник; 11 – поток воды, выходящий из ГТ; 12 – поток воды, поступающий в ГТ.

На рис. 1 б): 1 – напорный трубопровод, одновременно выполняющий функцию вала ГТ 14; 2 – ротор генератора, жестко прикрепленный к валу ГТ; 3 – статор генератора; 4 – полый маховик для заполнения жидкостью, разделенный на две части перегородкой и жестко прикрепленный к валу ГТ. Маховик состоит из следующих элементов: 5, 6 – внешние и внутренние клапаны; 7 – спицы, к которым с одного конца жестко прикреплены цилиндрические трубки (закрытые сверху) 10, а с другой стороны клапаны 5 и 6, 9 – стержни, жестко закрепленные к валу 1, на которые насажены

грузики 8 с массой  $m$ , притянутые пружинами 11; 12 – поток воды, поступающий в напорный трубопровод ГТ; 13 – поток воды, выходящий из ГТ.

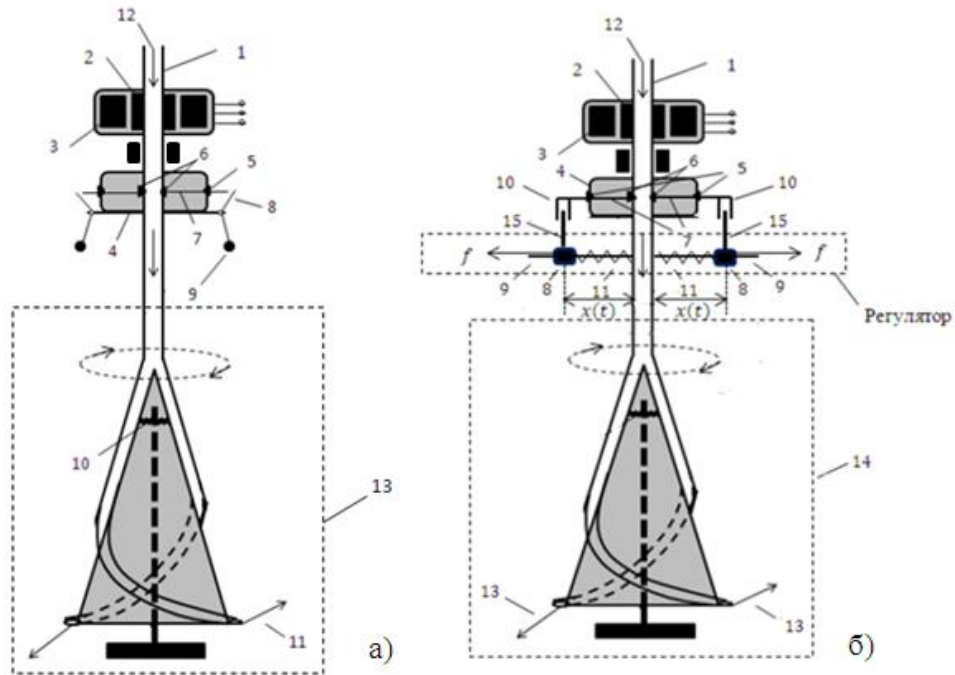


Рисунок 1 – Упрощённые схемы микроГЭС [5, 6]

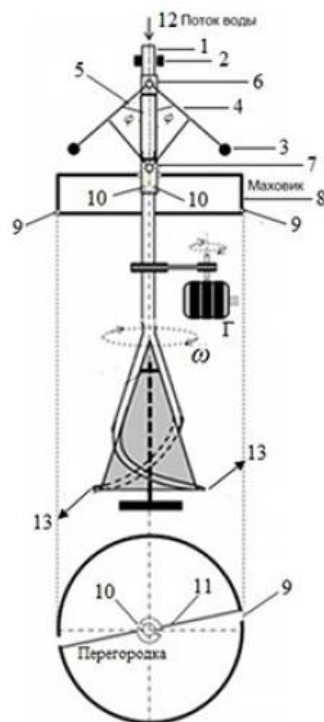


Рисунок 2 – Упрощённая схема микроГЭС [7]

На рис. 2: напорный трубопровод 1, который одновременно используется в качестве вертикального вала гидротурбины и вала центробежного регулятора; полый маховик 8 с моментом инерции  $J_M$ , полость которого разделена перегородкой 11 на два

участка. На цилиндрической поверхности полого маховика, просверлены сквозные отверстия 9 для выброса воды. На участке вала, находящегося внутри полого маховика, просверлены сквозные отверстия 10 для поступления воды в полость маховика. При номинальной скорости вращения  $\omega$  гидротурбины отверстия 10 закрыты муфтой 7, а полость маховика не заполнена водой. Гидротурбина приводится во вращательное движение силой реактивной отдачи напора воды 13 и способна совершать полезную работу, вращая с помощью ременной передачи ротор генератора Г.

Конструкция центробежного регулятора (ЦР) такая же, как у паровой машины Уатта. 4, 5 – два одинаковых стержня, шарнирно прикрепленных к напорному трубопроводу 1, с одинаковыми грузами  $m$  на концах; 6 – неподвижная втулка; 7 – подвижная муфта, надетая на напорный трубопровод 1.

Важными элементами в конструкциях АРМИ маховиков (рис. 1 а, б) являются пружины, от которых зависит работа клапанов, управляющих поступлением потока воды в полости маховика.

Испытания действующих макетов микроГЭС (рис. 3) выявили следующие недостатки в конструкциях (рис. 1 а, б): несинхронизированные действия пружин, а следовательно и клапанов; снижение качества стабилизации частоты из-за старения материала пружины.

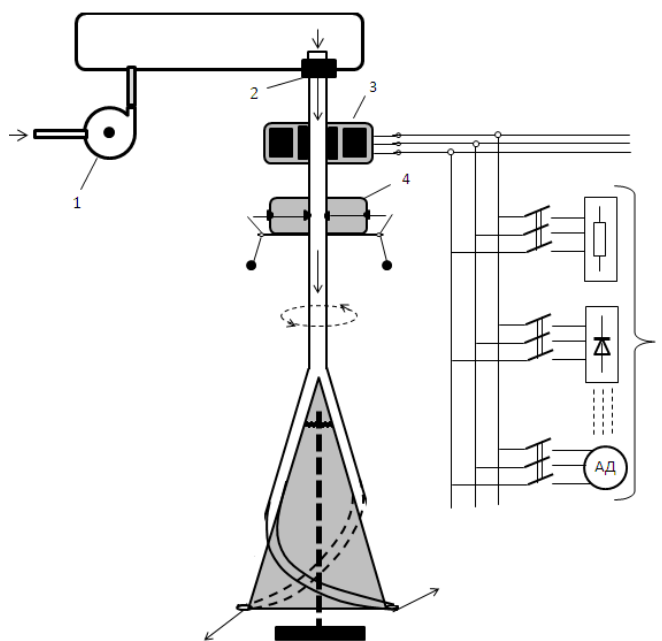


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки для физического моделирования микроГЭС: 1 – насосная установка; 2 – подшипник скольжения с уплотнением; 3 – генератор; 4 – АРМИ маховик; 5 – нагрузки [5]

В то же время конструкция микроГЭС, представленная на рис. 2, указанными недостатками не обладает.

В данной работе поставлена задача – выработать рекомендации по определению параметров микроГЭС (рис. 2) на основании результатов компьютерного моделирования.

**Общие сведения о математической модели микроГЭС**

Математическая модель устройства (рис. 2), разработанная в [7] имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\phi}{d\tau} &= \psi; \\ \frac{d\psi}{d\tau} &= \omega^2 \cdot \sin \phi \cdot \cos \phi - \frac{g}{l} \cdot \sin \phi - \frac{b}{m \cdot l} \cdot \psi; \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{k_1}{J(\phi)} \cdot \cos \phi - \frac{F}{J(\phi)} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где  $\phi$  – угол отклонения от вертикали стержней 4, 5 ЦР;  $\tau$  – время;  $\psi$  – скорость изменения  $\phi$  (определена первым уравнением);  $\omega$  – угловая скорость вращения маховика (ведущего вала) и ЦР;  $g$  – ускорение свободного падения;  $b$  – постоянная трения;  $l$  – длина стержней 4, 5;  $m$  – масса каждого из грузов, закрепленных на плечах ЦР (рис. 2).

Введением дополнительных переменных [7]

$$\phi = x_1, \quad \psi = \left(\frac{g}{l}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot x_2, \quad \omega = \left(\frac{g}{l}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot x_3, \quad \tau = \left(\frac{l}{g}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot t, \quad (2)$$

сокращено число независимых переменных. В результате (1) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= (\sin x_1 \cdot \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{1}{J(x_1)} \cdot H \cdot (\cos x_1 - \rho), \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где

$$J(x_1) = J_1 - k_2 \cdot (\cos x_1 - M \cdot \cos \tilde{\phi}); \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{b}{m(g l)^{1/2}}; \quad H = \frac{k_1 \cdot l}{g}; \quad \rho = \frac{F}{k_1}; \quad (5)$$

$$F = P_r - P_{\text{мех}}(\tilde{\phi}) + k_1 \cos \tilde{\phi}. \quad (6)$$

В формуле (6)  $P_r$  – момент силы, вызванный электрической нагрузкой генератора,  $P_{\text{мех}}(\tilde{\phi})$  – момент силы, создаваемый реактивной отдачей напора воды 13 (рис. 2) при некотором значении угла  $\tilde{\phi}$ , вблизи которого меняется угол  $\phi$ .

Система уравнений (3) относится к нелинейным «жестким» дифференциальным уравнениям и описывает динамику поведения микроГЭС. Компьютерное

моделирование режима его работы реализовано в среде Simulink [9], в соответствии со структурными схемами, представленными на (рис. 4): 1 – ЦР; 2 – система «гидротурбина-генератор»; 3 – вычисление значения некоторого угла  $\tilde{\varphi}$  в градусах, вблизи которого меняется  $\varphi$  (по формуле 4, уравнение 1 [9]); 4 – вычисление критического значения параметра  $\gamma_c$  (по формуле 12 [9]).

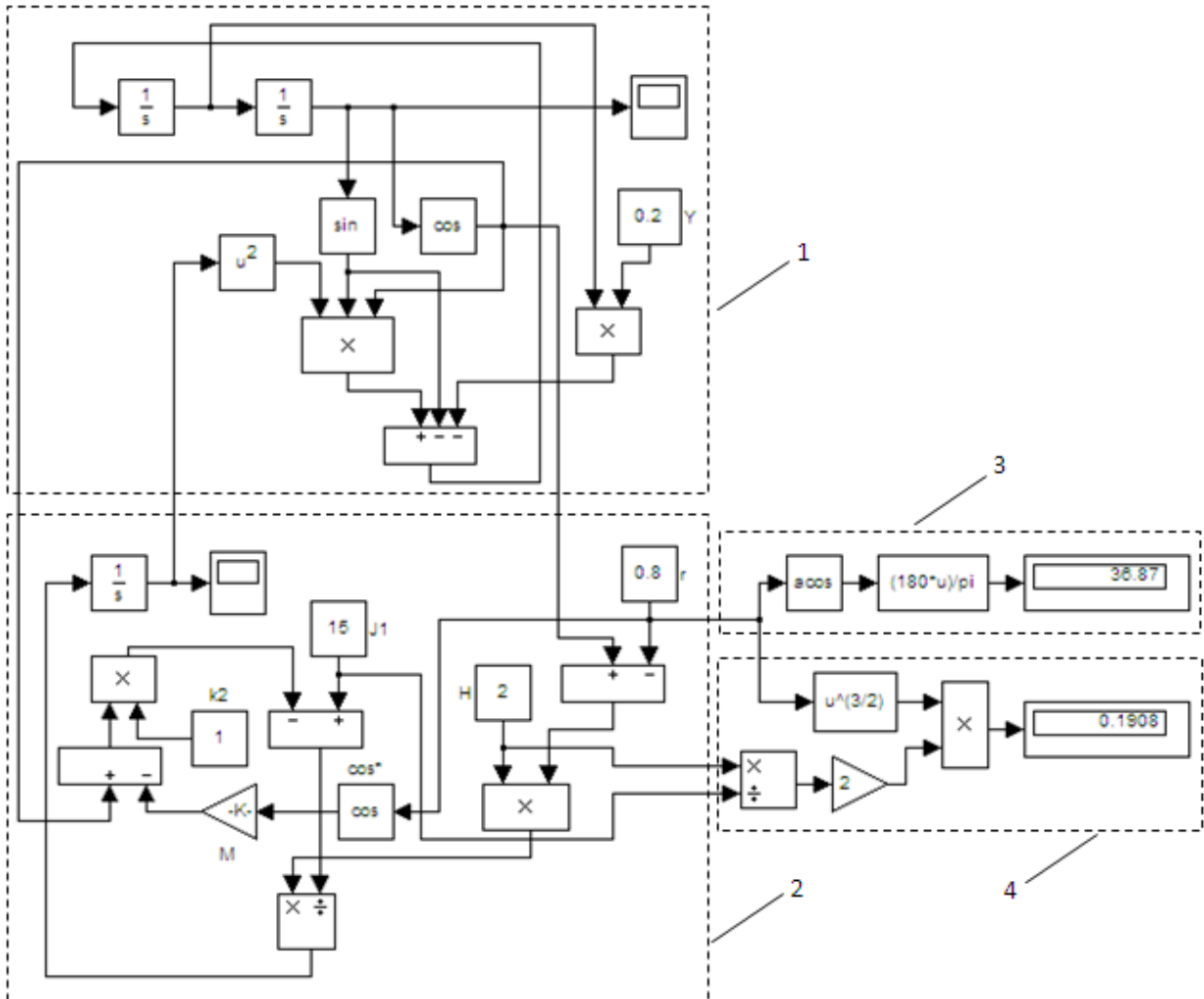


Рисунок 4 – Структурная схема модели микроГЭС

Визуализация результатов компьютерного моделирования в виде зависимостей  $\tilde{\varphi}(t)$  и  $\omega(t)$  осуществляется в соответствующих блоках.

Следует отметить, что уравнение (3) описывает динамику поведения микроГЭС с АРМИ маховиком при  $k_2 > 0$ ; с маховиком без АРМИ при  $k_2 = 0$ . При задании исходных параметров модели микроГЭС с АРМИ маховиком коэффициенту пропорциональности  $k_2$  присваивается значение, соответствующее интенсивности поступления воды в полость маховика. Задается также значение параметра  $M$ , связанное с объемом воды в полости. Чем выше интенсивность поступления воды и

объем воды в полости, тем больше и значение коэффициентов пропорциональности  $k_2$  и  $M$ .

**Заключение.** Последовательность действий пользователя для определений параметров микроГЭС (рис. 2). Возможны два варианта:

- 1) пользователь интересуется параметрами микроГЭС без АРМИ маховика;
- 2) пользователь интересуется параметрами микроГЭС с АРМИ маховиком.

В обоих случаях алгоритм действий таков: запускается MatLab/Simulink, далее в окне Simulink Library Browser, с помощью навигации File→New→Model осуществляется команда для получения новой модели с названием untitled.mdl. В появившемся окне перетаскиваются по порядку нужные блоки из библиотеки стандартных блоков (Simulink Library Browser) и соединяются между собой по линиям связи в нужной последовательности в соответствии с рис. 4. Полученная модель является структурной (S-моделью, mdl-моделью) и соответствует математической модели микроГЭС (3). Её нужно сохранить под определенным именем, например: File→Save→MkrGes.

Для первого варианта значения коэффициентов  $k_2$  и  $M$  равны нулю. Пользователю необходимо задать значения остальных параметров  $J_1$ ,  $\gamma$ ,  $H$ ,  $\rho$  модели (3). Например:  $\gamma = 0,2$ ;  $\rho = 0,7$ ;  $H = 2$ ;  $J_1 = 10$ . Для этих параметров модели результаты моделирования представлены на рис. 5.

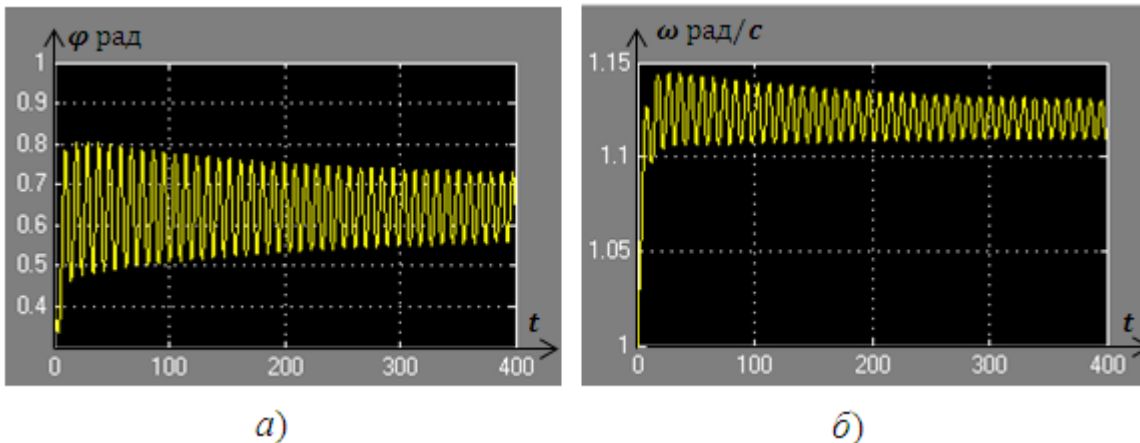


Рисунок 5 – Диаграмма зависимостей  $\varphi(t)$  и  $\omega(t)$

Из рис. 5, видно, что при этих параметрах происходит потеря устойчивости, но рождаются устойчивые периодические колебания угловой скорости вращения  $\omega$  микроГЭС (рис. 5 б). Если пользователь удовлетворен полученным результатом, устраивает, то по заданным параметрам, используя формулы (5), определяются параметры микроГЭС без АРМИ маховика.

Если полученный результат не соответствует ожиданиям пользователя, то он может выбрать конструкцию микроГЭС с АРМИ маховиком, например, при значениях  $k_2 = 1$ ,  $M = 100$ , а значения остальных параметров оставить неизменным и проверить режим работы. В этом случае, как видно из рис. 6, режим работы микроГЭС устойчив в вследствие демпфирующего свойства маховика, у которого регулируются масса и момент инерции в зависимости от скорости вращения.

Это подтверждает высокую эффективность предложенного способа стабилизации частоты благодаря изменению конструкции микроГЭС: в результате

параметры микроГЭС такие же, что в первом случае, но в конструкцию введем АРМИ маховик.

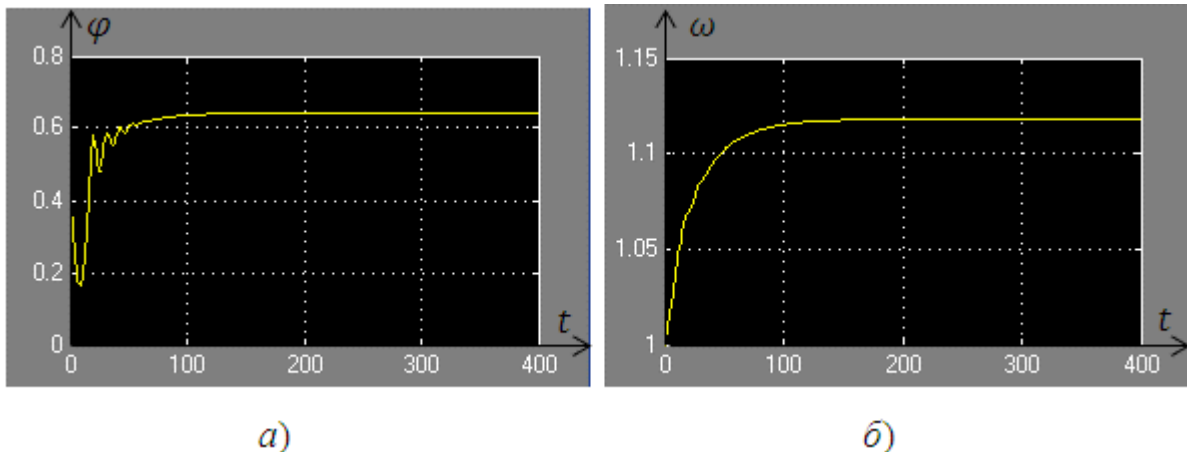


Рисунок 6 – Диаграмма зависимостей  $\varphi(t)$  и  $\omega(t)$

### Литература

1. Кушнир В.Г., Кошкин И.В., Глушко Д.В. Обоснование установки мини-ГЭС для электроснабжения системы освещения моста // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2018. – № 1. – Т. 14. – С. 13–18.
2. Крылов А.П., Бакштанин А.М. Новые концепции в развитии микро-гидроэнергетики. Гидравлика в напорных водоводах микроГЭС // Строительство и архитектура. – 2017. – № 5. – С. 8–14.
3. Спиринов Е.А., Никитин А.А., Головин М.П., Карпенко В.В. О выборе типа микроГЭС и ее оптимальной мощности в зависимости от гидрологических параметров // Всероссийская конференция «Актуальные проблемы машиностроения». – 2014. – С. 543–547.
4. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: СТУ, 2001. – 120 с.
5. Сатаркулов К., Бакасова А.Б., Иманакунуова Ж.С., Ниязова Г.Н. Способ стабилизации частоты автономной микроГЭС // Проблемы автоматизации и управления. – 2014. – № 1 (26). – С. 20–23.
6. Ниязова Г.Н., Сатаркулов К., Кыдырмаева З.С., Яблочников А.М. Разработка компьютерной модели системы стабилизации и управления частотой вращения турбины микроГЭС нового типа // Проблемы автоматизации и управления. – 2017. – № 2 (33). – С. 43–51.
7. Бакасова А.Б., Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. «Моделирование микроГЭС малой мощности с маховиком, автоматически регулирующим момент инерции». Информатика и системы управления. Благовещенск (РФ). 2019. – №1(59). – С. 36–45.
8. Шаршеналиев Ж.Ш., Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н. Саморегулирующийся адаптивный маховик для генераторов автономных микроГЭС // Патент Кыргызской Республики № 1743. 2015. 20140113.1 Бюл. №5 (71) (73).
9. Бакасова А.Б., Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. Маховик с автоматически регулируемой массой и моментом инерции для повышения качества стабилизации частоты микроГЭС // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: Труды [Электронный ресурс] / Под общ. ред. Д.А. Новикова. – М.: ИПУ РАН, 2019. – 3286 с.