

УДК 621.316.72

# МАХОВИК С АВТОМАТИЧЕСКИ РЕГУЛИРУЕМЫМИ МАССОЙ И МОМЕНТОМ ИНЕРЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ МИКРОГЭС

**А.Б. Бакасова**

*Институт автоматики и информационных технологий  
Национальной академии наук Кыргызской Республики  
Кыргызская Республика, 720071, Бишкек, Чуй пр., 265  
E-mail: [bakasoaaaina@mail.ru](mailto:bakasoaaaina@mail.ru)*

**К. Сатаркулов**

*Институт автоматики и информационных технологий  
Национальной академии наук Кыргызской Республики  
Кыргызская Республика, 720071, Бишкек, Чуй пр., 265  
E-mail: [satarkulov46k@mail.ru](mailto:satarkulov46k@mail.ru)*

**Г.Н. Ниязова**

*Институт автоматики и информационных технологий  
Национальной академии наук Кыргызской Республики  
Кыргызская Республика, 720071, Бишкек, Чуй пр., 265  
E-mail: [gulmira-n.86@mail.ru](mailto:gulmira-n.86@mail.ru)*

**А.М. Яблочников**

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова  
Кыргызская Республика, 720044, Бишкек, Мира пр., 66  
E-mail: [art.kazccp@mail.ru](mailto:art.kazccp@mail.ru)*

**Г.К. Усубалиева**

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова  
Кыргызская Республика, 720044, Бишкек, Мира пр., 66  
E-mail: [gulnara.u@mail.ru](mailto:gulnara.u@mail.ru)*

**Ключевые слова:** микроГЭС, маховик с автоматически регулируемой массой и моментом инерции (АРМИ), стабилизация частоты вращения гидротурбины, регулятор Уатта, моделирование

**Аннотация:** В данной статье представлены результаты исследования эффективности работы маховика с автоматически регулируемой массой и моментом инерции, используемый в микроГЭС для повышения качества стабилизации частоты вращения гидротурбины. Дано описание способа стабилизации частоты микроГЭС с маховиком и центробежным регулятором. Выведена математическая модель системы «гидротурбина-центробежный регулятор-генератор», на основе которой были проведены численные эксперименты в среде визуального моделирования MatLab/Simulink.

## 1. Введение

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: надежность, экологичность, компактность и быстрая окупаемость [1-4].

В работах [5, 6] предложены устройства микроГЭС малой мощности с описанием нового способа стабилизации частоты вращения гидротурбин и их динамические модели. Стабилизация частоты основана на использовании полого маховика с автоматически регулируемой массой и моментом инерции (АРМИ) путем заполнения или удаления воды из полости и регулированием потока воды, который подается на вход гидротурбины. Заполнение или удаление воды из полости и регулирование потока воды, поступающего на вход гидротурбины, осуществляется под управлением центробежного регулятора (ЦР).

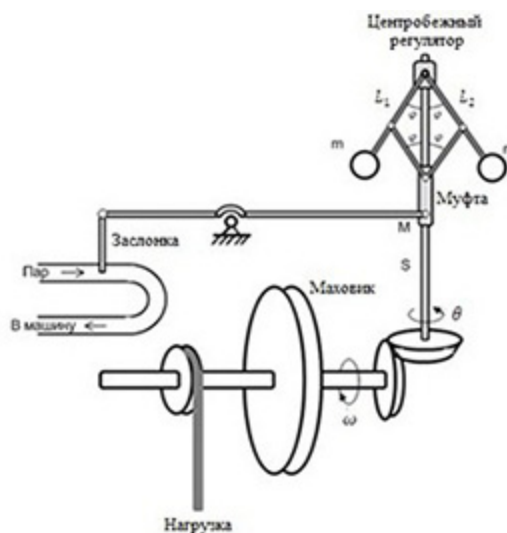
### 1.1. Цель работы

Целью работы являются:

- разработка компьютерной модели системы «гидротурбина-ЦР-генератор» в среде MatLab/Simulink;
- исследование на основе разработанной модели влияния АРМИ маховика на его способность сглаживать и подавлять возможные хаотические колебательные движения вала гидротурбины микроГЭС.

### 1.2. Описание способа стабилизации частоты микроГЭС

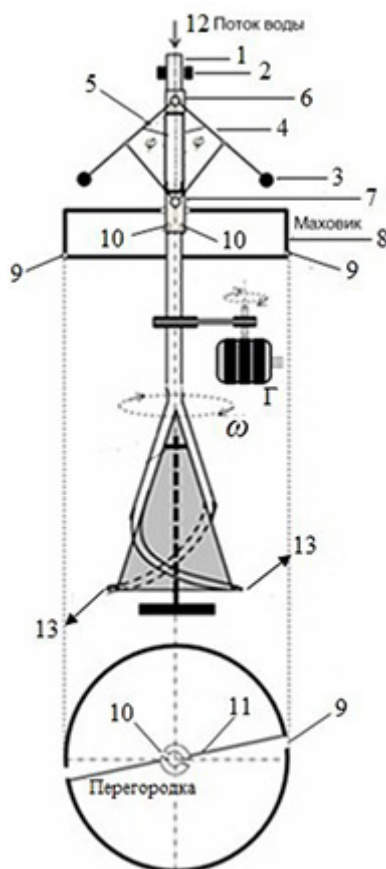
Конструкция ЦР микроГЭС такая же, как у паровой машины Уатта (рис. 1).



**Рис. 1.** Паровая машина с центробежным регулятором:  $S$  – вертикальный стержень, вращающийся с угловой скоростью  $\theta$ ;  $L_1, L_2$  – два одинаковых стержня, шарнирно прикрепленных к стержню  $S$ , с одинаковыми грузами  $m$  на концах;  $M$  – подвижная муфта, надетая на стержень  $S$ .

Упрощенная функциональная схема микроГЭС представлена на рис. 2. Это устрой-

ство представляет собой генератор с постоянными магнитами, приводимый во вращательное движение гидротурбиной с ЦР.



**Рис. 2.** Упрощенная схема микроГЭС с центробежным регулятором и с АРМИ маховиком.

Поддержание равномерного вращательного движения гидротурбины с помощью ЦР аналогично функционированию паровой машины Уатта и реализуется следующим образом.

При прохождении потока воды 12 (рис. 2) по напорному трубопроводу 1 и выходе из гидротурбины, напорный трубопровод 1, а также жестко соединенные с ним маховик 8 и неподвижная втулка 6 приводятся во вращательное движение.

При вращении вала 1 на каждый из грузов 3 действует центробежная сила, под воздействием которой стержни 4 и 5, отклоняясь от своего вертикального положения на некоторый угол, при помощи шарниров приводят в движение муфту 7. При отклонении значения угловой скорости вращения вала от номинального (из-за изменения нагрузки генератора), происходит изменение центробежной силы, и подвижная втулка 7 приоткрывает или закрывает сквозные отверстия на внутренней образующей маховика, регулируя поступление воды в него.

При номинальной скорости вращения гидротурбины отверстия 10 закрыты муфтой 7. При увеличении скорости вращения выше номинальной за счет уменьшения нагрузки генератора, муфта 7 приоткрывает отверстия 10 и поток воды поступает в полости маховика, увеличивая его массу и момент инерции, а также уменьшая напор потока воды 13 за счет уменьшения давления в трубопроводе 1 (часть потока воды поступает в полость маховика и тем самым уменьшает напор на выходе 13

гидротурбины). Все это приводит к понижению скорости вращения вала 1. Когда скорость вращения вала приближается к номинальной, муфта 7 начинает прикрывать сквозные отверстия 10, уменьшая поступление воды в него и увеличивая напор на выходе 13 гидротурбины. Накопившаяся в маховике вода выбрасывается через отверстия 9, обеспечивая поддержание равномерного вращательного движения гидротурбины микроГЭС.

## 2. Разработка компьютерной модели системы «гидротурбина-ЦР-генератор»

### 2.1. Математическая модель системы «гидротурбина-ЦР-генератор»

Математическую модель системы «гидротурбина-ЦР-генератор» (рис. 2) можно получить из системы обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих динамику парового двигателя в сочетании с ЦР (рис. 1) [7, 8]:

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

где  $\varphi$  – угол отклонения от вертикали стержней  $L_1, L_2$  ЦР;  $\tau$  – время;  $\psi$  – скорость изменения  $\varphi$  (определена первым уравнением);  $n$  – передаточное число редуктора;  $\omega$  – угловая скорость вращения маховика (ведущего вала);  $n\omega$  – угловая скорость вращения ЦР,  $g$  – ускорение свободного падения;  $b$  – постоянная трения;  $l$  – длина стержней  $L_1, L_2$ ;  $m$  – масса каждого из грузов, закрепленных на концах стержней  $L_1, L_2$  (рис. 1).

Первые два уравнения системы (1) соответствуют динамике ЦР. Так как регулятор микроГЭС (рис. 2) подобен ЦР паровой машины (рис. 1), то мы можем воспользоваться первыми двумя уравнениями системы (1) для описания динамики регулятора микроГЭС, учитывая, что во втором уравнении системы  $n = 1$ , так как ЦР и полый маховик находятся на одном валу.

Третье уравнение системы (1) получается из дифференциального уравнения паровой машины [7]:

$$(2) \quad J \frac{d\omega}{d\tau} = P_1 - P,$$

где  $J$  – момент инерции маховика;  $P_1$  – момент силы, создаваемый паровой машиной, а  $P$  – момент силы, вызванный нагрузкой. Момент силы  $P_1$  зависит от того, насколько приоткрыта заслонка (рис. 1), пропускающая пар к цилиндрам паровой машины. Поэтому  $P_1$  является функцией угла  $\varphi$ , точнее, линейной функцией  $\cos \varphi$ , так как при изменении угла  $\varphi$  вертикальное перемещение муфты регулятора, а следовательно, и сдвиг клапана, регулирующего поступление пара в машину, пропорциональны  $\cos \varphi$ , с коэффициентом  $k_1$ . Поэтому можно записать [8]:

$$(3) \quad P_1(\varphi) = P_1(\tilde{\varphi}) + k_1(\cos \varphi - \cos \tilde{\varphi}),$$

где  $P_1(\tilde{\varphi})$  – составляющие момента силы  $P_1(\varphi)$  при некотором угле  $\tilde{\varphi}$ , вблизи которого меняется  $\varphi$ , а  $k_1 > 0$  коэффициент пропорциональности.

Как видно из (3), при увеличении угла  $\varphi$  подача пара (а вместе с ней и сила воздействия пара  $P_1(\varphi)$ ) уменьшается, т.е. регулятор воздействует обратно на паровую машину. Поэтому константа  $F$  в системе (1) имеет вид [8]:

$$F = P - P_1(\tilde{\varphi}) + k_1 \cos \tilde{\varphi}.$$

Угол  $\varphi^*$ , при котором  $d\omega/d\tau = 0$ , можно получить из третьего уравнения системы (1) следующим образом:

$$(4) \quad \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{k_1}{J} \cos \varphi^* - \frac{F}{J} = 0, \quad k_1 \cos \varphi^* - F = 0, \quad \cos \varphi^* = \frac{F}{k_1}, \quad \varphi^* = \arccos\left(\frac{F}{k_1}\right).$$

Уравнение (2) для системы «гидротурбина-генератор» будет иметь следующий вид

$$(5) \quad J(\varphi) \frac{d\omega}{d\tau} = P_{\text{мех}}(\varphi) - P_{\Gamma},$$

где  $J(\varphi)$  – момент инерции вращающихся частей системы, значение которого зависит от угла  $\varphi$ ;  $P_{\Gamma}$  – момент силы, вызванный электрической нагрузкой генератора;  $P_{\text{мех}}(\varphi)$  – момент силы, создаваемый реактивной отдачей напора воды 13 (рис. 2), который имеет вид, аналогичный (3), т.е.

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

Структуру функции  $J(\varphi)$  можно установить из следующих соображений. При устойчивой работе гидротурбины с номинальной скоростью вращения  $\omega_n$  стержни 4 и 5 (рис. 2) отклонены от своего вертикального положения на такой угол (4), при котором муфта 7, надетая на вал  $T$ , закрывает отверстие 10, и поэтому в полость маховика вода не поступает. Поэтому момент инерции системы  $J(\varphi)$  при условии ( $\varphi = \tilde{\varphi} = \varphi^*$ ) равен моменту инерции всех вращающихся частей  $J_1$ , включая момент инерции не заполненного водой маховика. При скорости вращения гидротурбины  $\omega > \omega_n$  муфта 7, перемещаясь по валу  $T$  вверх ( $\varphi > \tilde{\varphi}$ ), открывает отверстие 10, и полость маховика начинает заполняться водой с некоторой интенсивностью, зависящей от диаметра отверстия 10 (рис. 2), увеличивая массу и соответственно момент инерции системы. Следовательно, структура функции  $J(\varphi)$  аналогично (6), но при двух условиях: отрицательность коэффициента пропорциональности и величины  $M \cos \tilde{\varphi}$ ,  $M \geq 1$ :

$$(7) \quad J(\varphi) = J_1 - k_2(\cos \varphi - M \cos \tilde{\varphi}),$$

где  $k_2$  – коэффициент пропорциональности, значение которого связано с интенсивностью заполнения водой полости маховика, а коэффициент  $M$  – с массой воды в полости. Из выражения (7) видно, что при любых изменениях угла  $\varphi$  значение момента инерции  $J(\varphi)$  не может быть меньше  $J_1$ . Масса воды в полости определяется ее объемом.

Итак, уравнение системы «гидротурбина-генератор» имеет вид (5), где  $P_{\text{мех}}(\varphi)$  и  $J(\varphi)$  определяются из выражений (6) и (7) соответственно.

Уравнение системы «гидротурбина-генератор» можно привести к подобному по виду третьему уравнению системы (1) следующим образом

$$\begin{aligned} J(\varphi) \frac{d\omega}{d\tau} &= P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi}) + k_1(\cos \varphi - \cos \tilde{\varphi}) - P_{\Gamma} = P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi}) + k_1 \cos \varphi - k_1 \cos \tilde{\varphi} - P_{\Gamma} = \\ &= k_1 \cos \varphi - (P_{\Gamma} - P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi}) + k_1 \cos \tilde{\varphi}). \end{aligned}$$

Обозначив сумму слагаемых, стоящих внутри скобки в правой части последнего уравнения, через  $F$ , получим

$$(8) \quad J(\varphi) \frac{d\omega}{d\tau} = k_1 \cos \varphi - F,$$

Тогда полная система уравнений системы «гидротурбина-генератор» с ЦР при  $n = 1$  примет следующий вид:

$$(9) \quad \left. \begin{aligned} \frac{d\varphi}{d\tau} &= \psi, \\ \frac{d\psi}{d\tau} &= \omega^2 \sin \varphi \cos \varphi - \frac{g}{l} \sin \varphi - \frac{b}{ml} \psi, \\ \frac{d\omega}{d\tau} &= \frac{k_1}{J(\varphi)} \cos \varphi - \frac{F}{J(\varphi)}. \end{aligned} \right\}$$

Уменьшим число независимых параметров заменой переменных [8]:

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

В результате (9) примет вид

$$(10) \quad \left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} &= (\sin x_1 \cdot \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{1}{J(x_1)} \cdot H \cdot (\cos x_1 - \rho), \end{aligned} \right\}$$

где

$$(11) \quad \begin{aligned} J(x_1) &= J_1 - k_2 (\cos x_1 - M \cdot \cos \tilde{\varphi}); \\ \gamma &= \frac{b}{m(gl)^{1/2}}; \quad H = \frac{k_1 \cdot l}{g}; \quad \rho = \frac{F}{k_1}. \end{aligned}$$

Полученная система (10) относится к детерминированным системам нелинейных дифференциальных уравнений (ДСНДУ).

Представление о том, что решение ДСНДУ при известных начальных условиях является предсказуемым на любом интервале времени, оказалось неправомерным, так как было найдено [9-13] хаотическое решение для таких систем [14, 15]. В ДСНДУ существует некоторый диапазон параметров модели, решения в котором хотя и оказываются ограниченными, но непериодическими и непредсказуемыми, то есть приобретают случайный характер [16, 17].

В параметрах  $\gamma$ ,  $H^* = H/J_1$ ,  $\rho$  критерий устойчивости Вышниградского для микроГЭС с маховиком без АРМИ запишется в виде [8]:

$$(12) \quad \gamma > \gamma_c(H, \rho) \equiv 2H\rho^{3/2},$$

где  $\gamma_c$  называется критическим значением параметра  $\gamma$ .

Выполнение этого неравенства, связывающего физические параметры (11), гарантирует постоянство: хода гидроагрегата, угловой скорости вращения регулятора, угла отклонения системы шаров [8]. Такое утверждение справедливо только для микроГЭС с маховиком без АРМИ.

В связи с вышесказанным необходимо проведение численных экспериментов с использованием математической модели микроГЭС; во-первых, для исследования влияния АРМИ маховика на его способность подавлять возможные хаотические колебания вращения вала гидротурбины микроГЭС; во-вторых, для проверки выполняемости кри-

теря устойчивости (12) в случае микроГЭС с АРМИ маховиком.

## 2.2. Компьютерное моделирование системы «гидротурбина-ЦР-генератор» в среде MatLab/Simulink

Для интегрирования системы уравнений (10) составлен ее компьютерный аналог, структурная схема, которая в среде визуального моделирования MatLab/Simulink представлена (рис. 3).

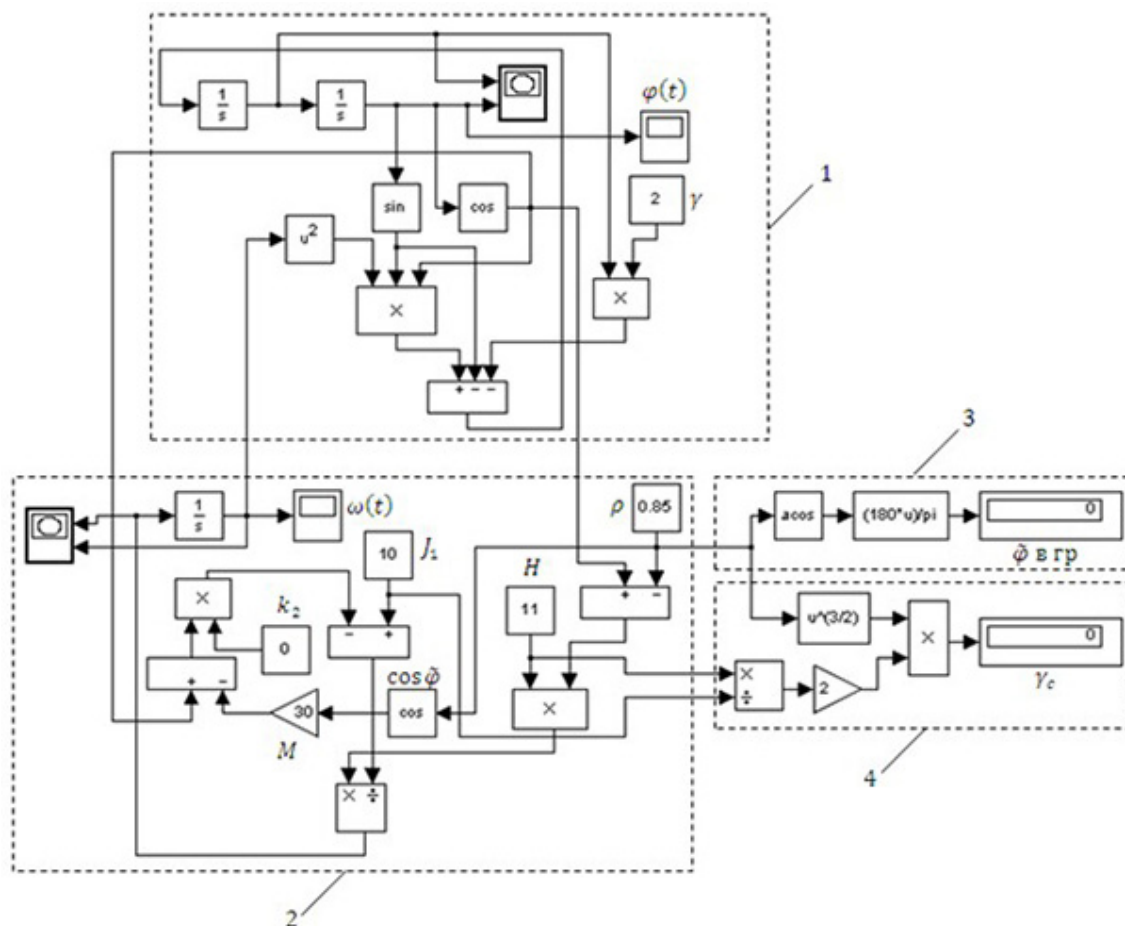


Рис. 3. Структурная схема модели микроГЭС

Она состоит из структурных схем: 1 – центробежного регулятора; 2 – системы «гидротурбина-генератор». А также производится вычисления: 3 – значение некоторого угла  $\tilde{\varphi}^\circ$  в градусах, вблизи которого меняется  $\varphi$ , по формуле (4, уравнение 1); 4 – критического значения параметра  $\gamma_c$  по формуле (12).

Визуализация результатов моделирования в виде фазовых портретов и зависимостей  $\varphi^\circ(t)$  и  $\omega(t)$  осуществляется в соответствующих блоках (рис. 3).

Следует отметить, что (10) описывает динамику поведения микроГЭС с АРМИ маховиком, в этом случае  $k_2 > 0$ ; с маховиком без АРМИ, тогда  $k_2 = 0$ .

При задании исходных данных 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



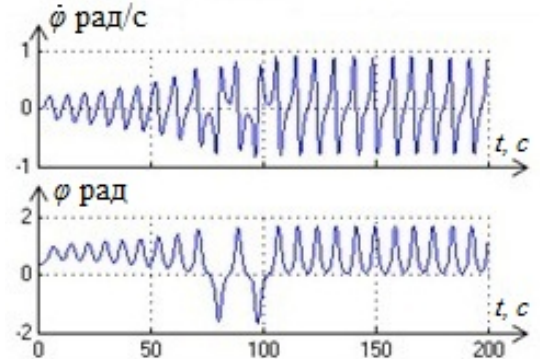
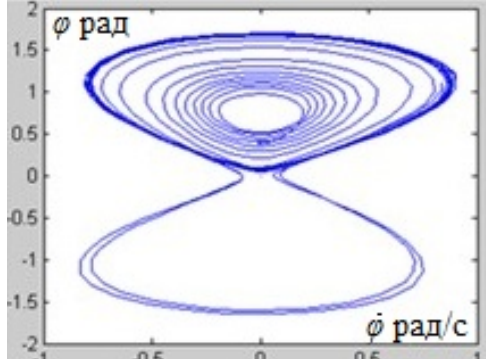
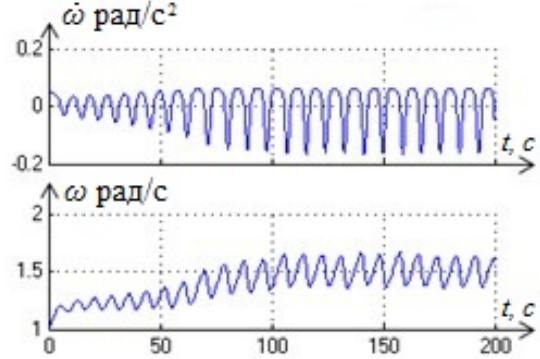
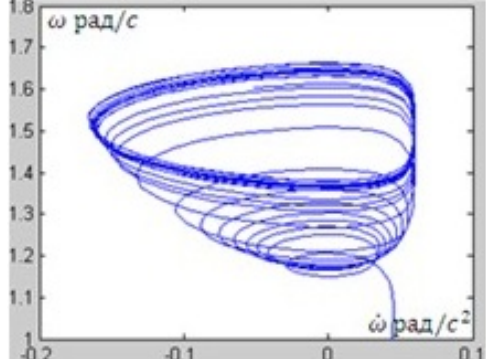
и объем воды в полости, тем больше и значения коэффициентов пропорциональности  $k_2$  и  $M$ . В нашем эксперименте принято  $k_2 = 1$ ,  $M = 100$ .

### 2.3. Результаты численного эксперимента и выводы

Согласно [8], параметром, оценивающим степень демпфирования на ЦР паровой машины (для нашего случая микроГЭС с маховиком без АРМИ), является величина  $\gamma$  и поэтому этот параметр назван коэффициентом демпфирования, играющим роль бифуркационного параметра. В этом случае критерий устойчивости записывается в виде  $\gamma > \gamma_c$  [8], где  $\gamma_c$  – критическая величина демпфирования, являющаяся функцией остальных параметров системы.

Результаты численного эксперимента представлены в виде таблиц. В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента для микроГЭС с маховиком без АРМИ, при параметрах моделирования, равных  $\gamma = 0.2$ ;  $\rho = 0.7$ ;  $H = 2$ ;  $J_1 = 10$ . Так как рассматриваем случай, для микроГЭС с маховиком без АРМИ, то  $k_2 = 0$ .

**Таблица 1.** Результаты численного эксперимента для микроГЭС с маховиком без АРМИ.

1	$\gamma = 0.2$ ; $\rho = 0.7$ ; $H = 2$ ; $J_1 = 10$ ; $k_2 = 0$	
2	Зависимость угла отклонения $\varphi$ и скорости $\dot{\varphi}$ груза $m$ от $t$	Фазовый портрет
3		
4	Зависимость угловой скорости вращения $\omega$ и ускорения $\dot{\omega}$ гидротурбины от $t$	Фазовый портрет
5		

В первой строке каждой из таблиц содержатся значения параметров моделирования, в третьей и пятой строках результаты численного эксперимента в виде графических зависимостей  $\varphi(t)$ ,  $\dot{\varphi}(t)$ ,  $\omega(t)$ ,  $\dot{\omega}(t)$ , от продолжительности модельного времени и фазовые портреты процесса при заданных параметрах моделирования. Здесь  $\varphi(t)$ ,  $\dot{\varphi}(t)$



соответственно зависимости угла отклонения груза  $m$  от вертикального положения и скорости изменения этого угла от  $t$  ЦР;  $\omega(t)$ ,  $\dot{\omega}(t)$  – соответственно угловая скорость вращения гидротурбины и ее ускорение от  $t$ .

Численный эксперимент показал, что в этом режиме возникают хаотические колебания и в фазовых пространствах, соответствующих ЦР, и в гидротурбине, траектории развиваются непрерывно во времени без самопересечения и постепенно заполняют некоторую его область в окрестности предельного цикла таким образом, что любую сколь угодно малую зону фазового пространства в окрестности предельного цикла пересекает бесконечно большое количество отрезков траектории. Это и создает в каждой зоне случайную ситуацию – хаос [19].

Графическое представление режима работы микроГЭС при тех же параметрах моделирования  $\gamma = 0.2$ ;  $\rho = 0.7$ ;  $H = 2$ ;  $J_1 = 10$ , но с АРМИ маховиком, т.е. при  $k_2 = 1$  и  $M = 100$ , показано в таблице 2.

**Таблица 2.** Результаты численного эксперимента для микроГЭС с АРМИ маховиком.

1	$\gamma = 0.2$ ; $\rho = 0.7$ ; $H = 2$ ; $J_1 = 10$ ; $k_2 = 1$ ; $M = 100$	
2	Зависимость угла отклонения $\varphi$ и скорости $\dot{\varphi}$ груза $m$ от $t$	Фазовый портрет
3		
4	Зависимость угловой скорости вращения $\omega$ и ускорения $\dot{\omega}$ гидротурбины от $t$	Фазовый портрет
5		

В этом режиме фазовые портреты уже существенно отличаются от предыдущих и характерны для установившегося режима, при котором угловая скорость вращения гидроагрегата неизменна. Такое качественное изменение режима связано со способностью АРМИ маховика из-за его демпфирующих свойств подавлять хаотические колебания гидротурбины.

В таблицах 3, 4 представлены результаты численного эксперимента при моделировании динамического поведения соответственно, микроГЭС с маховиком без АРМИ

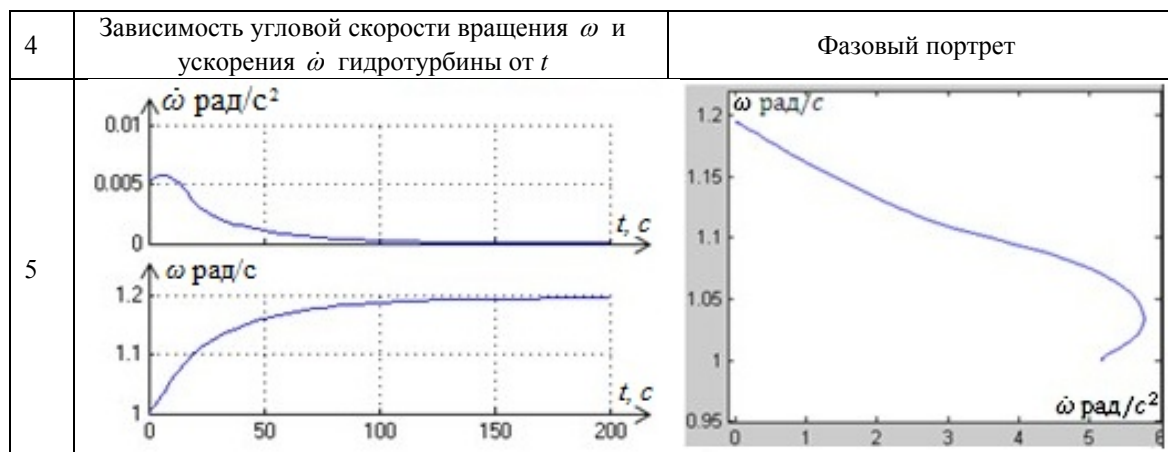
( $k_2 = 0$ ) и с АРМИ маховиком ( $k_2 = 1, M = 100$ ), при новом значения параметра  $\gamma = 1$ , при неизменности остальных.

**Таблица 3.** Результаты численного эксперимента динамического поведения микроГЭС с маховиком без АРМИ.

1	$\gamma = 1; \rho = 0.7; H = 2; J_1 = 10; k_2 = 0$	
2	Зависимость угла отклонения $\varphi$ и скорости $\dot{\varphi}$ груза $m$ от $t$	Фазовый портрет
3		
4	Зависимость угловой скорости вращения $\omega$ и ускорения $\dot{\omega}$ гидротурбины от $t$	Фазовый портрет
5		

**Таблица 4.** Результаты численного эксперимента динамического поведения микроГЭС с АРМИ маховиком.

1	$\gamma = 1; \rho = 0.7; H = 2; J_1 = 10; k_2 = 1; M = 100$	
2	Зависимость угла отклонения $\varphi$ и скорости $\dot{\varphi}$ груза $m$ от $t$	Фазовый портрет
3		



Как видно из таблиц, при этих параметрах микроГЭС, независимо от наличия АР-МИ маховика, всегда работает устойчиво, но при наличии АРМИ маховика качество стабилизации выше, так как АРМИ маховик сглаживает резкие изменения скорости вращения гидротурбины при возникновении переходных процессов. И все это подтверждает высокую эффективность предложенного способа стабилизации частоты и конструкцию микроГЭС.

## Список литературы

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. Т. 14, № 1. С. 13-18.
2. Крылов А.П., Бакштанин А.М. Новые концепции в развитии микро-гидроэнергетики. Гидравлика в напорных водоводах микро-ГЭС // Строительство и архитектура. 2017. № 5. С. 8-14.
3. Спиринов Е.А., Никитин А.А., Головин М.П., Карпенко В.В. О выборе типа микро-ГЭС 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: STT, 2001. 120 с.
5. Сатаркулов К., Бакасова А.Б., Иманакунова 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. Понтрягин Л.С. Обыкновенные дифференциальные уравнения / 4-е изд., М.: Наука, 1974. 331 с.
8. Хэссард Б., Казаринов Н., Вэн И. Теория и приложения бифуркации рождения цикла / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 280 с.
9. Чуа Л.О. Машинный анализ электронных схем: алгоритмы и вычислительные методы. М.: Энергия, 1980, 640 с.
10. Chiang H.D. Chaos in simple power system // IEEE Trans. Power Syst. 1993, Vol. 8, No. 4. P. 1407-1417.
11. Wiggins S. Introduction to Applied Nonlinear Dynamical Systems and Chaos. Springer, Telos, 1997, 336 p.
12. Schuster H.G., Just W. Deterministic Chaos: An Introduction, 4th edition. Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005. 296 p.
13. Sprott J.C. Elegant Chaos: Algebraically Simple Chaotic Flows. Singapore: World Scientific, 2010. 332 p.
14. Федоров В.К. Детерминированный хаос в нелинейных электрических цепях и системах. Омск: ОмГТУ, 2006, 130 с.
15. Сидоров С.В. Структура решений и динамический хаос в нелинейных дифференциальных уравнениях // Вестник РУДН. Серия Математика. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Информатика. Физика. 2013. № 2. С. 45-63.
16. Imanakunova Zh.S., Satarkulov K., Baibagysova D.Zh., Kadieva A.K. Using LabView environment for the demonstration of generator dynamic behavior // Rudenko International Conference "Methodological prob-

- lems in reliability study of large energy systems” (RSES 2018) Irkutsk, Russia, July 2-7, 2018 / <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2018/33/con-tents/contents.html>
17. Иманакунова Ж.С., Сатаркулов К., Байбагысова Д.Ж., Кадиева А.К. Применение среды LabView для демонстрации динамического поведения генератора // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 69. Надежность развивающихся систем энергетики. В 2-х книгах. Кн. 2 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2018, 440 с.
  18. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнов Е.Н. МАТЛАБ 7. СПб.: БХВ–Петербург, 2005. 1104 с.
  19. Федоров В.К. Детерминированный хаос в нелинейных электрических цепях и системах. Омск: ОмГТУ, 2006, 130 с.