

Г.Н. Ниязова

Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, gulmira-n.86@mail.ru

К. Сатаркулов

Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, satarkulov46k@mail.ru

З.С. Кыдырмаева

ККТФ КГТУ им. И.Раззакова, г. Кара-Куль, Кыргызстан

E-mail: zoya74_74@mail.ru

А.М. Яблочников

КГТУ им. И.Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

E-mail: art.kazccp@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ТУРБИНЫ МИКРОГЭС НОВОГО ТИПА

Разработана компьютерная модель микроГЭС нового типа и выполнено ее исследование в программной среде MatLAB с расширением Simulink. Результаты моделирования показали высокую эффективность функционирования маховика с регулируемой массой и моментом инерции, которая обеспечивает устойчивую работу микроГЭС нового типа.

Ключевые слова: микроГЭС, гидротурбина, напорный трубопровод, стабилизация частоты вращения, момент инерции гидротурбины, маховик с автоматически регулируемой массой и моментом инерции

Обеспечение устойчивого энергоснабжения децентрализованных потребителей в энергодефицитных регионах может быть достигнуто использованием гидроэнергетического потенциала малых рек и ручьев и созданием высокоэффективного гидроэнергетического оборудования для малых и микроГЭС в этих регионах. В главе 10 «Развитие стратегических отраслей экономики» Национальной стратегии устойчивого развития Кыргызской Республики на период 2013 – 2017 гг. отмечено, что важными целями стратегии являются «...обеспечение энергетической безопасности Кыргызской Республики, развитие экспортного потенциала, энергосбережение, продвижение возобновляемых источников малой энергетики через создание благоприятных условий для инвестирования в данный сектор...» [1]. Несмотря на высокую потенциальную мощность гидроэнергии основных водотоков Кыргызской Республики, на сегодняшний день освоено лишь 3 % гидроресурсов малых рек. Общемировые тенденции перехода к устойчивому экологически чистому энергообеспечению, а также изменение макроэкономической ситуации в Кыргызской Республике, связанной с дефицитом и подорожанием энергоносителей, обуславливают целесообразность и высокую экономическую эффективность строительства больших и малых гидроэлектростанций, а также получения электроэнергии за счет эффективных конструкций гидроагрегатов малой мощности (микроГЭС).

Важной задачей, решаемой при создании микроГЭС, является обеспечение требуемой равномерности вращения вала гидротурбины. Неравномерность вращения связана с изменением в процессе работы движущих сил и сил сопротивления. Эти изменения вызваны как периодическим характером рабочего процесса, так и внешними изменени-

ями. Эти процессы вызывают неравномерность вращения, которая изменяется с периодичностью включения или отключения электроприемников. Для борьбы с этой неравномерностью при значительных колебаниях нагрузки использован новый способ стабилизации, основанный на изменении значения момента инерции гидротурбины, путем использования маховика с автоматически регулируемой массой и моментом инерции и регулирования энергии потока воды, поступающей на выходы напорного трубопровода [2]. В работе [2] проведен сравнительный анализ существующих способов стабилизации частоты микроГЭС и предложены новый способ стабилизации частоты микроГЭС и их конструктивные исполнения (КИ1, КИ2), на которые получены соответствующие патенты Кыргызской Республики [3, 6]. Получен патент и на способ стабилизации [4, 5], на основе которого функционируют микроГЭС КИ1 и КИ2. Рассмотрим способ стабилизации частоты микроГЭС КИ2, изложенный в работе [2].

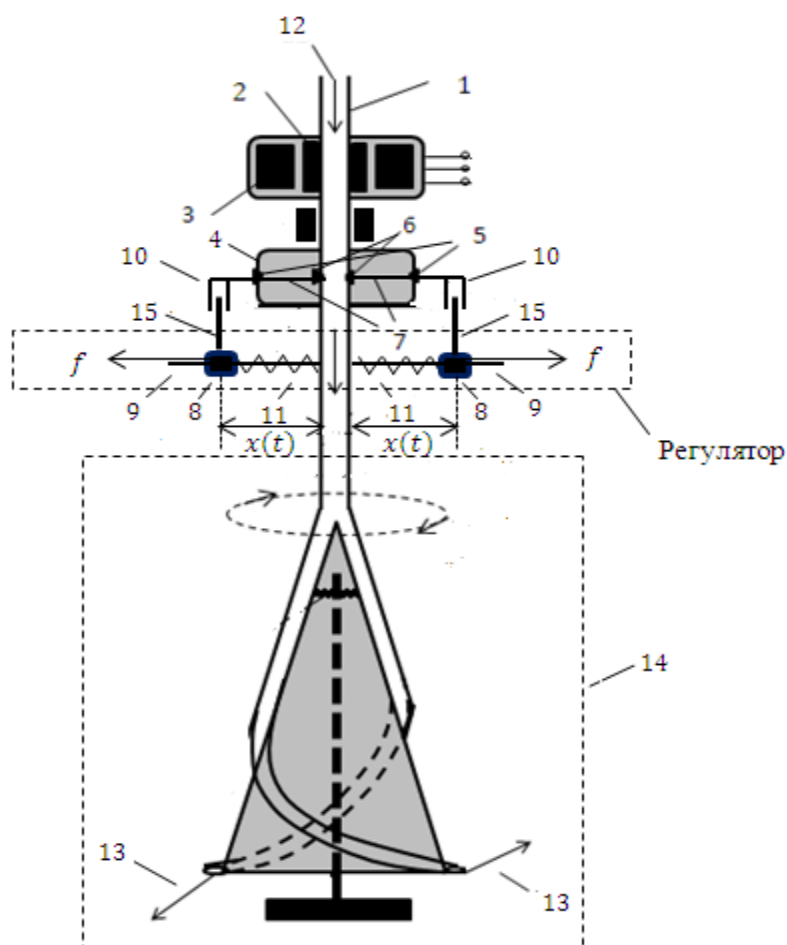


Рисунок 1. Конструкция микроГЭС

Конструктивное исполнение микроГЭС (рис.1): 1 - напорный трубопровод (НТ), одновременно выполняющий функцию вала гидротурбины (ГТ) 14; 2 – ротор генератора, жестко прикрепленный к валу ГТ; 3 – статор генератора; 4 – полый маховик для заполнения жидкостью, разделённый 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.

Способ стабилизации частоты микроГЭС реализуется следующим образом. Поток воды 12 проходит через НТ1 и преобразуется в поток воды 13 на выходе из ГТ, образуя реактивную отдачу. В результате ротор генератора 2 и маховик 4 жестко связанные с НТ, приводятся во вращательное движение. На металлические грузики 8 воздействует центробежная сила f , заставляющая их в момент времени t двигаться вдоль стержня, отклоняя массы на величину $x(t)$ от ненапряженного состояния пружины.

Пружины 11, жестко соединенные с грузиками 8, растягиваются, появляется обратная (центростремительная) сила натяжения, действующая на грузики 8, направленная вдоль стержня 9 к центру вращения. При превышении частоты вращения вала выше номинального из-за уменьшения нагрузки генератора, центробежная сила, действующая на грузики 8, превышает центростремительную и грузики 8 начинают движение вдоль стержня 9 от центра вращения. При этом выступы 15 грузиков 8 передают силу на цилиндрические трубки 10, приводя их в движение. Так как цилиндрические трубки 10 находятся на концах спиц 7, то клапаны 6, жестко соединенные с этими спицами, открываются. При открытых клапанах 6 клапаны 5 закрываются, а полость маховика наполняется водой. При этом, во-первых, момент инерции вращающейся части микроГЭС увеличивается, во-вторых, сила напора воды 13 уменьшается. В итоге угловая скорость $\omega(t)$ вала начинает уменьшаться.

Следует отметить, что между величинами x (перемещение грузиков) и u (перемещение спиц) существует некоторая функциональная зависимость $u(x)$.

Если угловая скорость $\omega(t)$ вала уменьшается, то центробежная сила, действующая на грузики, уменьшается, и пружины подтягивают грузики ближе к центру вращения вала. Спицы 7 перемещаясь, закрывают клапаны 6, а клапаны 5 открываются. Следовательно, вода не поступает в полость маховика, а находящаяся в ней до этого вода выбрасывается центробежной силой через открытые клапаны 5, уменьшая момент инерции маховика, тем самым увеличиваются сила напора 13 и угловая скорость $\omega(t)$.

Переходим к этапам построения математической модели микроГЭС [2].

Математическая модель системы «машина-регулятор». Если обозначить через $\omega(t)$ угловую скорость вращения вала 1 (рис. 1), то можно записать уравнение, связывающее силовой момент $(F - G)$ и угловую скорость $\omega(t)$ следующим образом [7]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F - G, \quad J \frac{d^2\theta}{dt^2} = F - G, \quad (1)$$

где F – механический момент, развиваемый ГТ; G – момент сопротивления генератора (электрический момент), $[Н \cdot м]$, действующий на вал; J – момент инерции вращающихся частей, $[кг \cdot м^2]$; θ – угол между валом и неподвижной осью, $[рад]$. Поскольку рассматриваемая синхронная машина является генератором, механический момент F является ускоряющим, а электрический момент G – тормозящим.

Предположим, что из некоторого количества автономных микроГЭС организована распределительная электрическая сеть на генераторном напряжении, тогда угол можно отсчитывать относительно синхронно вращающейся оси [8] с постоянной угловой скоростью. $\omega_{ном} (\omega_0)$, тогда

$$\theta = (\omega_0 t + \alpha) + \delta_{мех}, \quad (2)$$

где α – постоянный угол, определяемый сдвигом в пространстве синхронно вращающейся оси.

Из (2) видно, что в (1) $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ можно заменить на $\frac{d^2\delta_{мех}}{dt^2}$, в результате чего это выражение принимает вид:

$$J \frac{d^2\delta_{мех}}{dt^2} = F - G, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{мех}}$ – механический угол по отношению к синхронно вращающейся оси, [рад].

Умножив обе части выражения (3) на $\omega_{\text{мех}}$, получим:

$$J\omega_{\text{мех}} \frac{d^2\delta_{\text{мех}}}{dt^2} = F - G. \quad (4)$$

Из курса переходных процессов в электрических системах [9] известно, что можно записать (4) через электрический угол и в относительных единицах:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0(F_* - G_*),$$

где T_J – в секундах; δ – в радианах; ω_0 – синхронная скорость 1/сек; t – в секундах; F_* и G_* – в относительных единицах.

Обозначив F_* через P_0 и учитывая, что $G_* = P_M \sin \delta$, получим:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0(P_0 - P_M \sin \delta). \quad (5)$$

Прделаем некоторые преобразования над параметром T_J в уравнении (5), чтобы учесть его зависимость от угла δ и времени t в математической модели микроГЭС с новым способом управления и стабилизации частоты.

$$T_J = T_{J_1} + T_{J_2}(\delta(t), t), \quad (6)$$

где T_{J_1} – неизменная составляющая механической постоянной маховика и остальных элементов конструкции микроГЭС, которые находятся во вращательном движении, когда полость маховика не заполнена водой; $T_{J_2}(\delta(t), t)$ – переменная составляющая, зависящая от угла $\delta(t)$ и времени t . Значение $T_{J_2}(\delta(t), t)$ изменяется от нуля, когда полость маховика пуста и до максимального значения связанная с объемом полости маховика.

Качественное изменение G , δ , T_{J_2} , F от времени t можно схематично показать в виде диаграммы (рис. 2).

Подставляя (6) в выражение (5), получим:

$$(T_{J_1} + T_{J_2}(\delta(t), t)) \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = \omega_0(P_0 - P_M \sin \delta(t)). \quad (7)$$

Конкретный вид функции $T_{J_2}(\delta)$ зависит от конструкции маховика.

Из курса механики известно, что величины $x(t)$ и f (рис.2) связаны следующими соотношениями [10]:

$$f = \beta m(x + r)\omega^2, \quad (8)$$

$$m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + \gamma x = f. \quad (9)$$

Здесь α, β, γ, r – некоторые положительные числа. Величина γx соответствует упругой восстанавливающей силе пружины (закон Гука), величина $\alpha\dot{x}$ соответствует силе трения. Здесь мы принимаем, что справедлив закон вязкого трения: сила трения пропорциональна скорости $\dot{x}(t)$ и число α является коэффициентом пропорциональности. Другими видами трения, кроме вязкого, мы здесь пренебрегаем. Числу r соответствует длина пружины в ненапряженном состоянии.

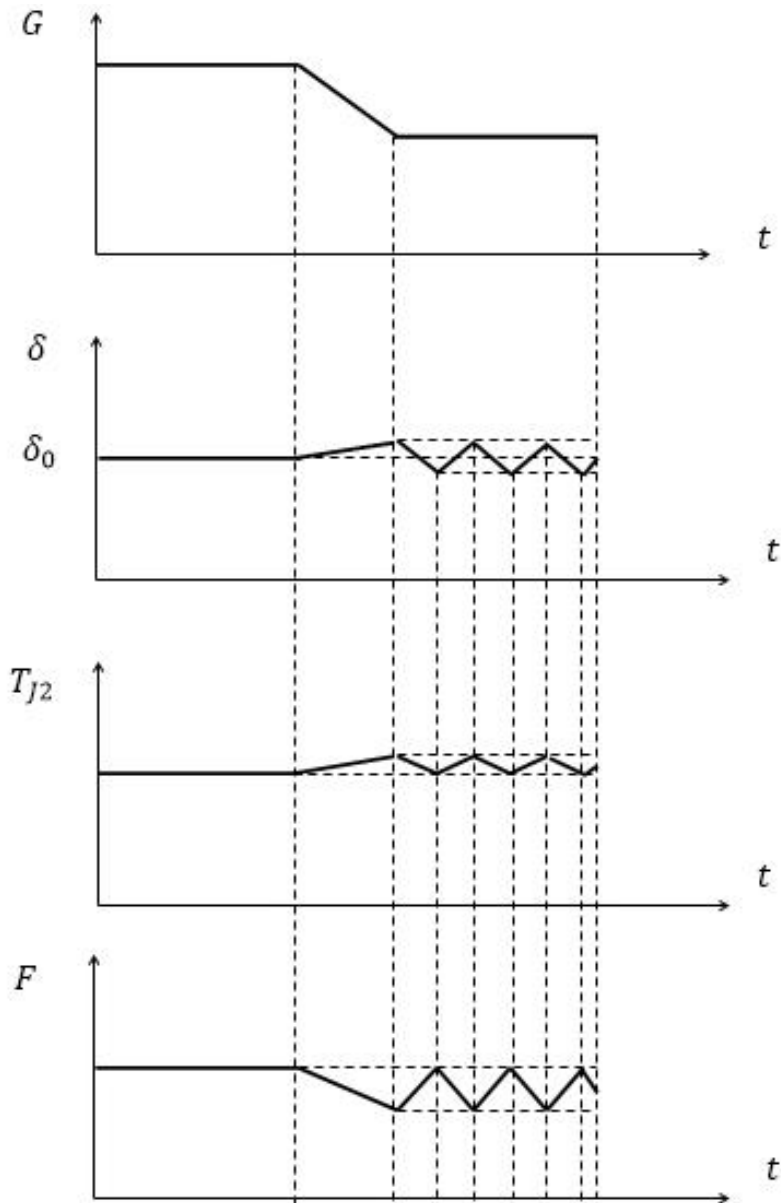


Рисунок 2. Качественные изменения G , δ , T_{j2} , F от времени t , где G – момент сопротивления генератора (электрический момент); δ – угол ротора; T_{j2} – переменная составляющая механической постоянной маховика; F – механический момент, развиваемый гидротурбиной

Принимая величину P_M постоянной, а величину P_0 функционально зависящей от x : $P_0 = P_0(x)$, получаем из уравнений (7)–(9) следующую систему (математическую модель), описывающую процесс регулирования величины $\omega(t)$:

$$\left. \begin{aligned} (T_{j1} + T_{j2}((\delta(t), \delta))) \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= \omega_0 (P_0(x) - P_M \sin \delta), \\ m\ddot{x} + a\dot{x} + \gamma x &= \beta m(x + r)\omega^2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Разработка компьютерной модели микроГЭС и ее исследование. Обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), применяемые для анализа динамической устойчивости микроГЭС (первое уравнение системы (10)), нелинейное. Второе уравнение описывает динамику регулятора. Обычно решение таких уравнений производят численными методами с помощью ЭВМ и таким же путем идут при анализе устойчиво-

сти работы микроГЭС. Вывод об устойчивости синхронных машин делается на основании анализа изменения углов δ_i их роторов [8].

Система MatLAB (Simulink) с огромными математическими возможностями программной среды в сочетании с простотой моделирования, на наш взгляд, идеально подходит для численного исследования и моделирования нелинейных систем электроэнергетики.

В данной работе для анализа динамической устойчивости генератора микроГЭС, работающей на систему неограниченной мощности, использованы классические алгоритмы [11]. Структурные схемы модели микроГЭС (рис. 3–6) реализованы в программной среде Simulink.

Структурная схема модели микроГЭС, приведенная на рис. 3, составлена для этого случая. Запишем математическую модель микроГЭС для случая, когда маховик не заполнен водой. Тогда первое уравнение системы (10) можно выразить следующим образом:

$$(T_{J1}) \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0(P_0(x_0) - P_M \sin \delta) \quad (11)$$

Запишем исходные данные модели (11) используемые для моделирования: $P_0(x_0) = 0.8$; $P_M = 0.9639204$; $T_{J1} = 10$ с; $\omega_0 = 314$ рад.

Для сравнительной оценки эффективности функционирования маховика с постоянными массой и моментом инерции и маховика с регулируемой массой и моментом инерции значения $P_0(x_0)$ и P_M подобраны таким образом, чтобы микроГЭС работала в критическом режиме, т.е. на границе потери устойчивости.

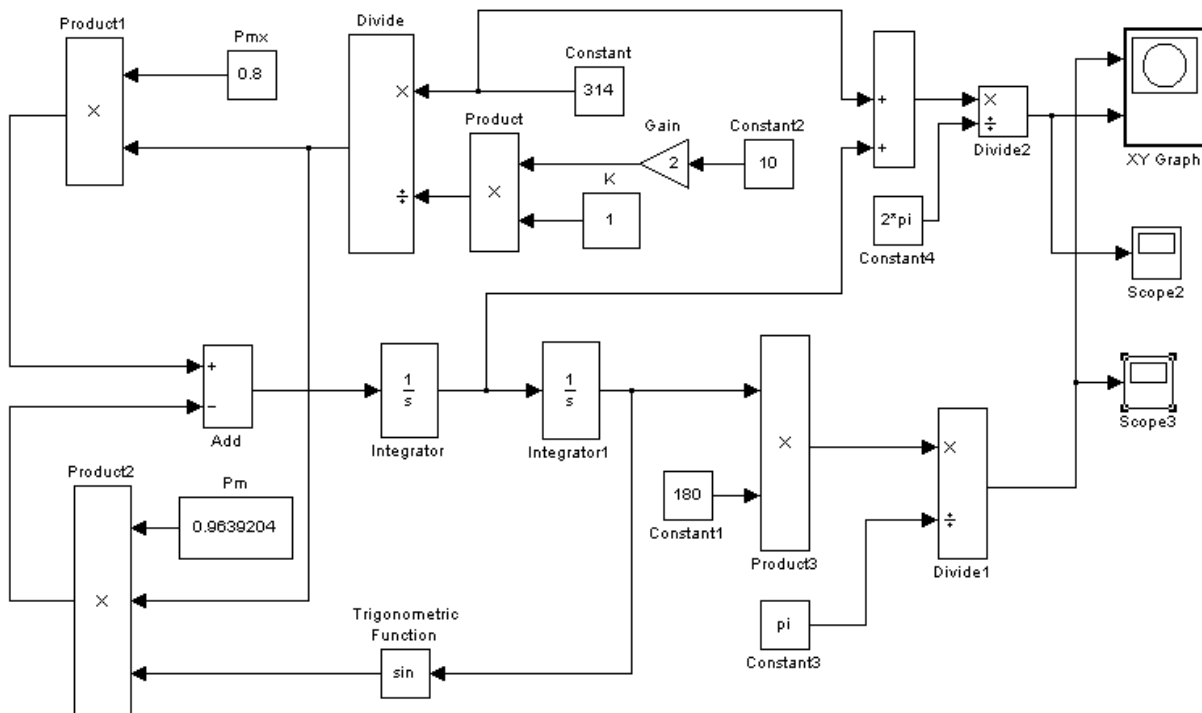


Рисунок 3. Структурная схема модели (11), описывающая работу микроГЭС при не заполненном водой маховике

На рис. 4 (а, б, в) приведены результаты моделирования микроГЭС (11) во временной области и в фазовом пространстве. Продолжительность моделирования составляет 20 секунд. Из рис. 4 (а, б) видно, что частота вращения генератора микроГЭС колеблется от 49,656 до 50,293 Гц, а угол ротора δ – от 21 до 117 градусов.

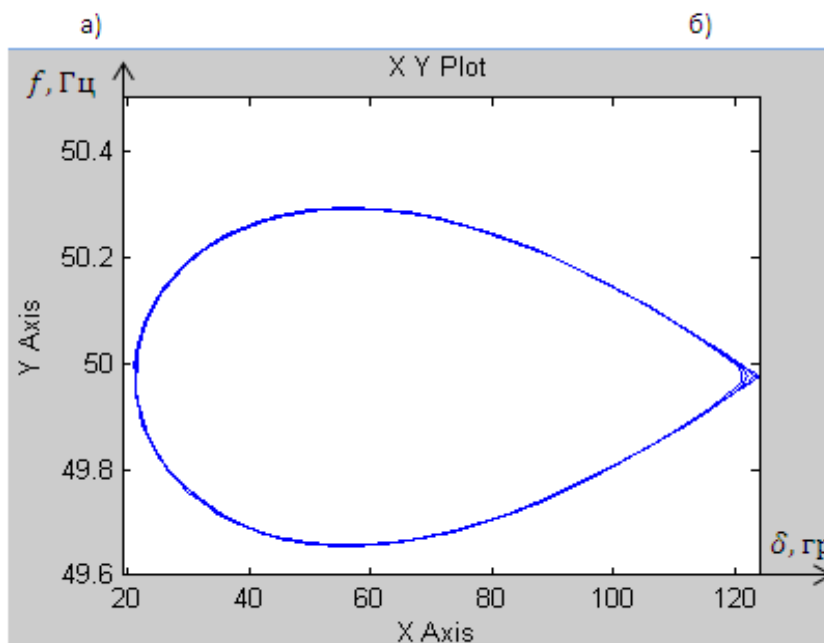
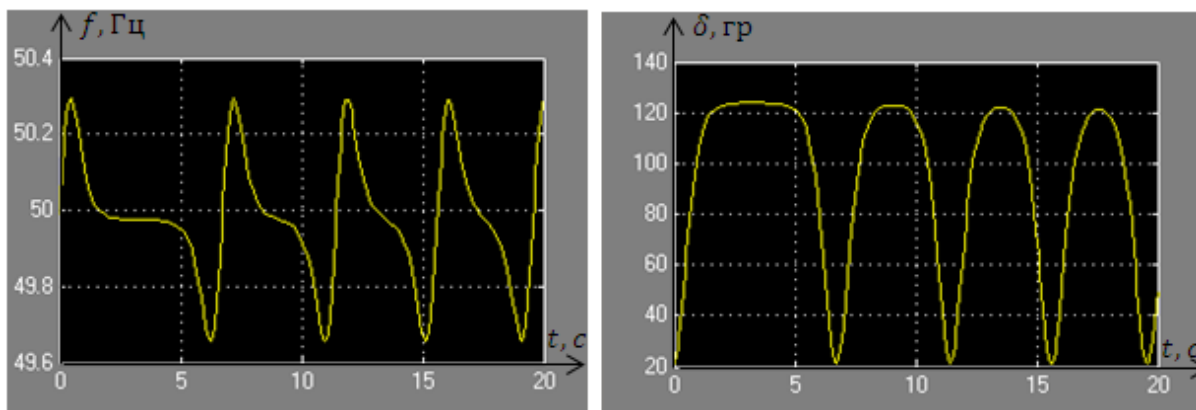
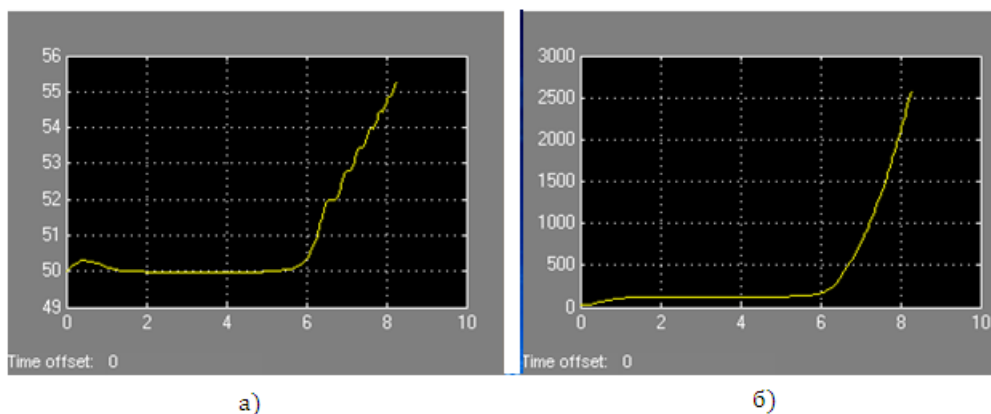
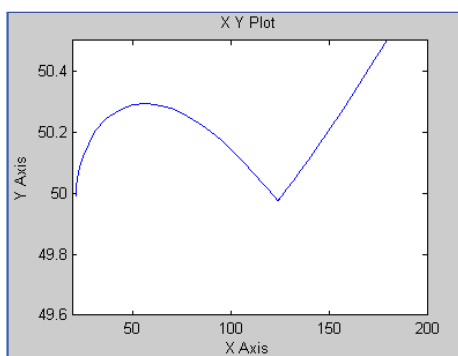


Рисунок 4. Поведение частоты вращения f и угла поворота ротора δ во временной области и в фазовом пространстве

Повторное моделирование работы микроГЭС с исходными данными модели (11): $P_0(x_0) = 0.8$; $P_M = 0.963920$; $T_{J_1} = 10$ с; $\omega_0 = 314$ рад, с отличающимся значением P_M на незначительную величину показало, что генератор теряет свою устойчивость. Поведение модели (11) для этого случая представлено на рис. 5 (а, б, в).





в)

Рисунок 5. Поведение частоты вращения f и угла поворота ротора δ во временной области и в фазовом пространстве (неустойчивая работа генератора)

Структурная схема модели, описывающая работу микроГЭС, при функционировании регулятора и маховика (когда маховик заполнен водой) показана на рис. 6.

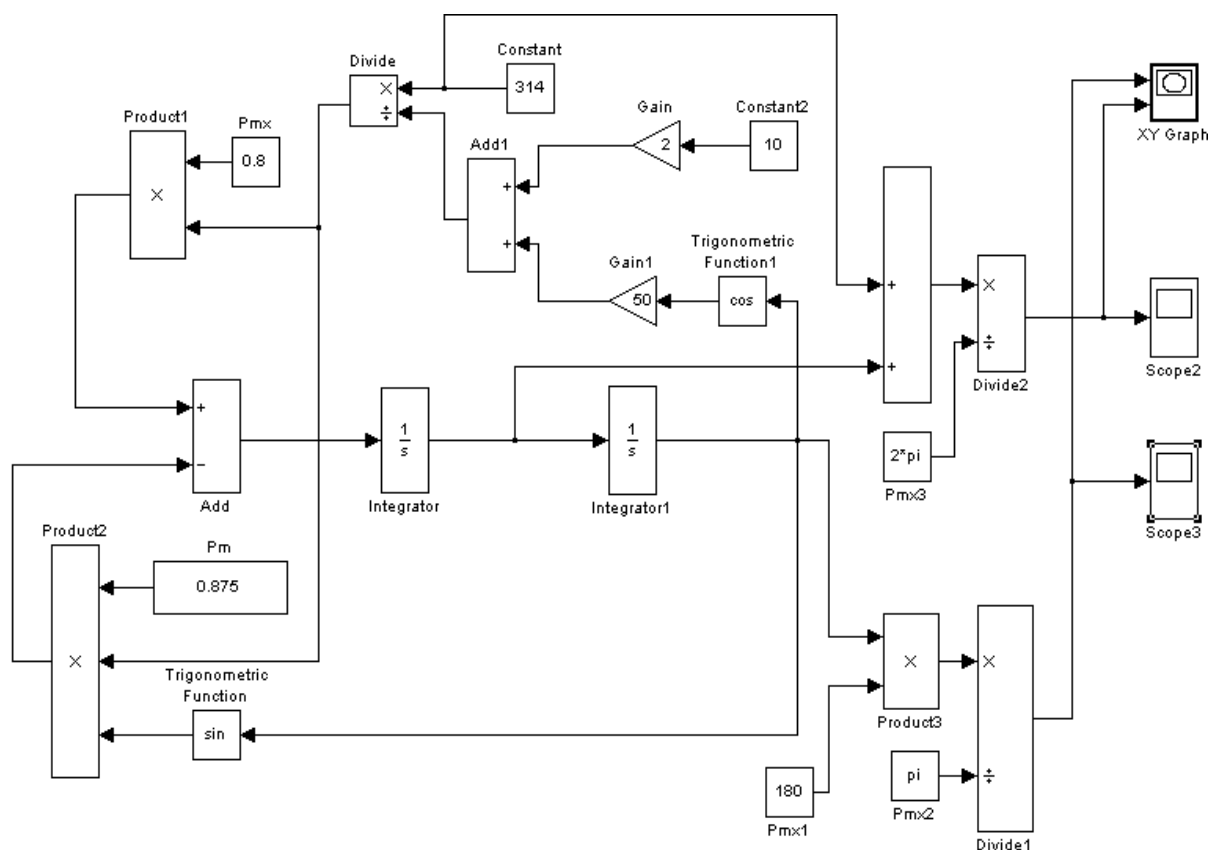


Рисунок 6. Структурная схема модели (11), описывающая работу микроГЭС, при функционировании регулятора и маховика

Запишем исходные данные модели (11) используемые для моделирования: $P_0(x_0) = 0.8$; $P_M = 0.875$; $T_{J_1} = 10$ с; $\omega_0 = 314$ рад.

Результаты моделирования предложенной структурной схемы микроГЭС показаны на рис. 7 (а, б, в), из которой видно, что диапазон колебания частоты сузился, а устойчивая работа генератора значительно возросла. Это говорит о том, что маховик с регулируемой массой и моментом инерции обеспечивает устойчивую работу даже тогда, когда генератор работает в критическом режиме.

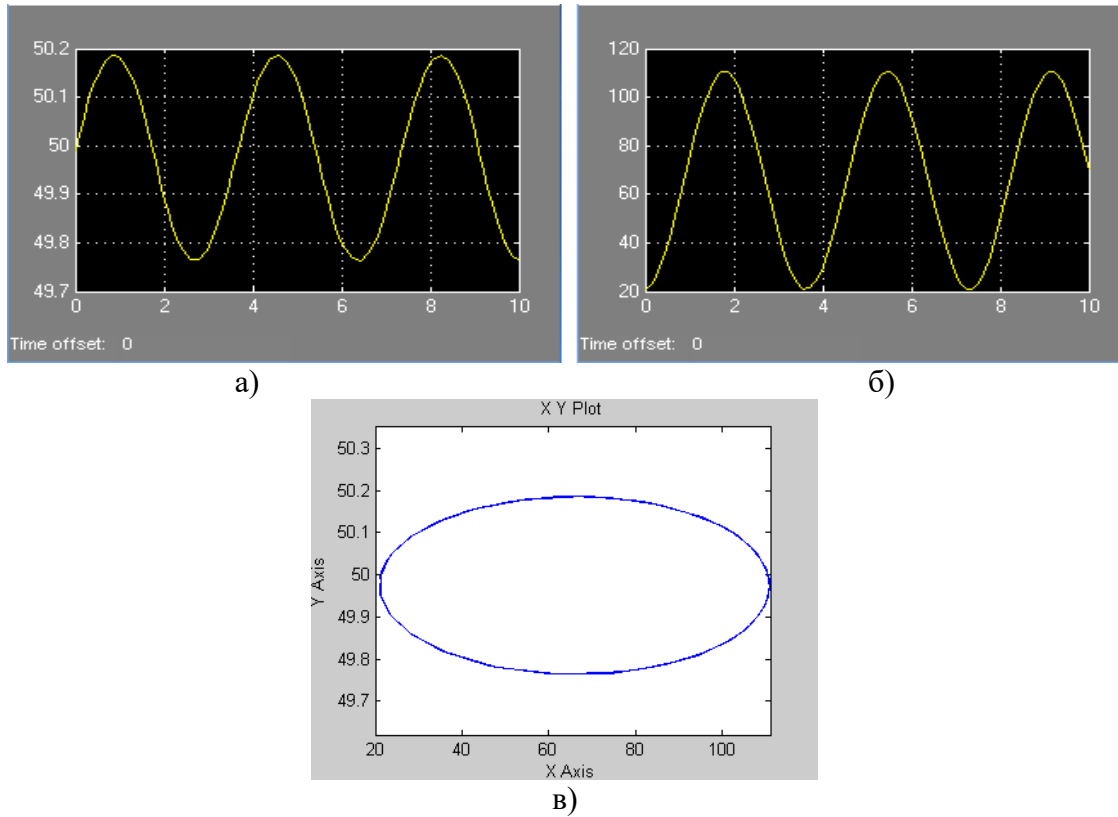


Рисунок 7. Поведение частоты вращения f и угла поворота ротора δ во временной области и в фазовом пространстве

Выбор и обоснование технических решений при разработке нового способа стабилизации частоты микроГЭС. Из анализа системы НДУ (10) ясно, что для нормального функционирования рассматриваемой системы важно поддержание требуемой частоты вращения вала ω , что, в свою очередь, достигается специальной конструкцией регулятора, а в качестве управляющего воздействия в данном случае используется жесткость пружины:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega(t) \equiv \omega_0, \quad x(t) \equiv x_0. \quad (12)$$

Здесь ω_0 требуемая частота вращения вала; x_0 – некоторое число, для которого выполнены равенства

$$\left. \begin{aligned} P_0(x_0) &= P_M \sin \delta_0, \\ \gamma x_0 &= \beta m(x_0 + r)\omega_0^2. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Исходя из физических соображений, понятно, что первое уравнение системы (13) имеет некоторый корень x_0 , а второе уравнение системы (13) можно удовлетворить, например, при фиксированном x_0 , за счет выбора жесткости пружины. Чувствительность, а значит, и точность работы маховика зависят от скорости реагирования клапана 6, управляющего подачей воды, на движение грузиков 8. Очевидно, что равенства (13) необходимы и достаточны для того, чтобы соотношения (12) определяли решение системы (10). Как правило, получения этих соотношений добиваются за счет специальной конструкции регулятора [10].

Выводы

- При разработке математической модели микроГЭС нового типа предположено, что несколько автономных микроГЭС работают в распределительной электрической сети на генераторном напряжении.

- На основе проведенного качественного анализа изменения параметров микроГЭС нового типа и режимов ее работы скорректирована математическая модель «машина – регулятор», позволяющая определить параметры конструктивных элементов микроГЭС и водотока.
- Разработана компьютерная модель микроГЭС нового типа и проведено ее моделирование в программной среде MatLAB (Simulink). Результаты моделирования микроГЭС показали высокую эффективность функционирования маховика с регулируемой массой и моментом инерции, которая обеспечивает устойчивую работу микроГЭС нового типа.

Литература

1. Национальная стратегия устойчивого развития Кыргызской Республики на период 2013 – 2017гг., утв. Указом Президента КР от 21 января 2013 года №11.
2. Ниязова Г.Н., Яблочников А. М., Сатаркулов К. Принцип стабилизации частоты микроГЭС нового типа // Известия ВУЗов Кыргызстана.– Бишкек: – 2016. – №.6. – С. 30–33.
3. 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).
4. Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н. Способ стабилизации частоты вращения ротора автономной микроГЭС // Патент Кыргызской Республики №1744. 2015. 20140114.1 Бюл. №5 (71)(73).
5. Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Ниязова Н.Г. Способ стабилизации частоты автономной микроГЭС // Проблемы автоматики и управления – 2014. –№1(26) – С. 20–23.
6. Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Бакасова А.Б., и др. Саморегулирующийся адаптивный маховик для генераторов автономных микроГЭС // Заявка на изобретение. Кыргызпатент. № 534.
7. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск, 2001. - 104 с.
8. Андерсон П.М., Фуад А.А. Управление энергосистемами и устойчивость, пер. с англ. под ред. Лугинского Я.Н. – М.: Энергия, 1980. – 568 с. ил.
9. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях; под редакцией Веникова В.А. Изд. 2-е, доп., – М.–Л.: Энергия, 1967. – 456 с. ил.
10. Леонов Г.А. Лекции по курсу теории управления. I (анализ) http://www.studmed.ru/leonov-ga-lekcii-po-kursu-teorii-upravleniya-i-analiz_8d9d707b83f.html. (дата обращения: 20.07.17)
11. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе; пер. с англ; под ред. Б.М. Наймарка. – М.: Мир, 1977. – 579 с., ил.