

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК 621.311.26

*Бакасова А.Б., Асанов М.С., Сатаркулов К.
Институт машиноведения и автоматики НАН КР*

РАСШИРЕННЫЕ ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИДРО - ВЕТРЯНОЙ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКИ И АВТОМАТИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЕЕ РАБОТЫ

Предложен новый вариант конструкции микро-ГЭС (микроэлектростанции (МЭС) малой мощности, позволяющей эксплуатировать ее для выработки электроэнергии под воздействием ветрового потока воздуха, поступающего в приводной агрегат по напорному трубопроводу от диффузора с прямолинейно сужающимися каналами. Работоспособность МЭС подтверждена результатами компьютерного моделирования. Для сглаживания перепадов давления в объеме рабочего агрегата МЭС от порывов ветрового потока предложена конструкция демпфера. В результате этого стабилизируется режим работы МЭС. Предложена новая конструкция гидроагрегата большей мощности с центробежным регулятором частоты вращения вала МЭС, а также предложен вариант работы этой МЭС в сочетании с ветровой микроэлектростанцией, работающей и от восходящего потока горячего воздуха по трубопроводу.

Ключевые слова: ветровая микроэлектростанция; демпфер для сглаживания скачка давления в трубопроводе от порыва потока воздуха; математическое и компьютерное моделирование, стабилизация режима работы микро-ГЭС.

Введение. Как известно, в последние годы наблюдается общемировая тенденция по разработке альтернативных источников энергии, одна из групп которых включает возобновляемые источники энергии, способные извлекать энергию из постоянно протекающих природных процессов, включая солнечный свет, ветер, текущую воду и т.д. Все это связано в первую очередь с экологическими проблемами использования таких энергоресурсов, как уголь, нефть и природный газ, к тому же их доступность и природные запасы для многих стран ограничены.

Потенциальные запасы топливно-энергетических ресурсов Кыргызстана достаточно высоки. Однако на сегодняшний день используется лишь малая часть энергетического потенциала страны. При этом большими ресурсами возобновляемой энергии в Кыргызстане обладает именно гидроэнергетика, а значит, получение электрической энергии за счет эффективных конструкций гидроагрегатов малой мощности (микро-ГЭС) становится актуальным. Следующим шагом может стать введение автономных микро-ГЭС в энергобаланс страны, создав распределительные сети низкого напряжения, что в свою очередь благоприятно повлияет на стабилизацию энергетического рынка, развитие экономики, обеспечение благополучных экологических условий [1].

В Институте машиноведения и автоматики (ИМА) НАН КР разработаны ряд автономных микроэлектростанций (МЭС) с новыми типами приводных агрегатов с автоматически регулируемой частотой вращения и их математические модели. В этих агрегатах автоматическое регулирование частоты вращения обусловлено использованием маховика с автоматически регулируемой массой, моментом инерции и регулированием потока энергоносителя, поступающего в агрегат.

Используя предложенный в ИМА метод анализа надежности и диагностики состояний МЭС для автономного электроснабжения, в работе [2] обосновано, что среди разработанных МЭС наиболее приемлемым по надежности функционирования является конструкция, пред-

ставленная на рис.1 а, однако эти устройства имеют ряд ограничений: во-первых, они ограничены по мощности, и во-вторых, используемым для выработки электроэнергии энергоносителем является только поток воды.

В данной работе поставлены задачи по устранению выше отмеченных ограничений и расширению функциональных возможностей предлагаемых электроустановок, а также корректировка их математических моделей и рассмотрение способов по стабилизации режимов их работ.

Постановка задачи №1. Корректировка конструкции микро-ГЭС (рис.1а) с целью расширения используемого для выработки электроэнергии энергоносителя. При этом мощности электроустановок остаются небольшими.

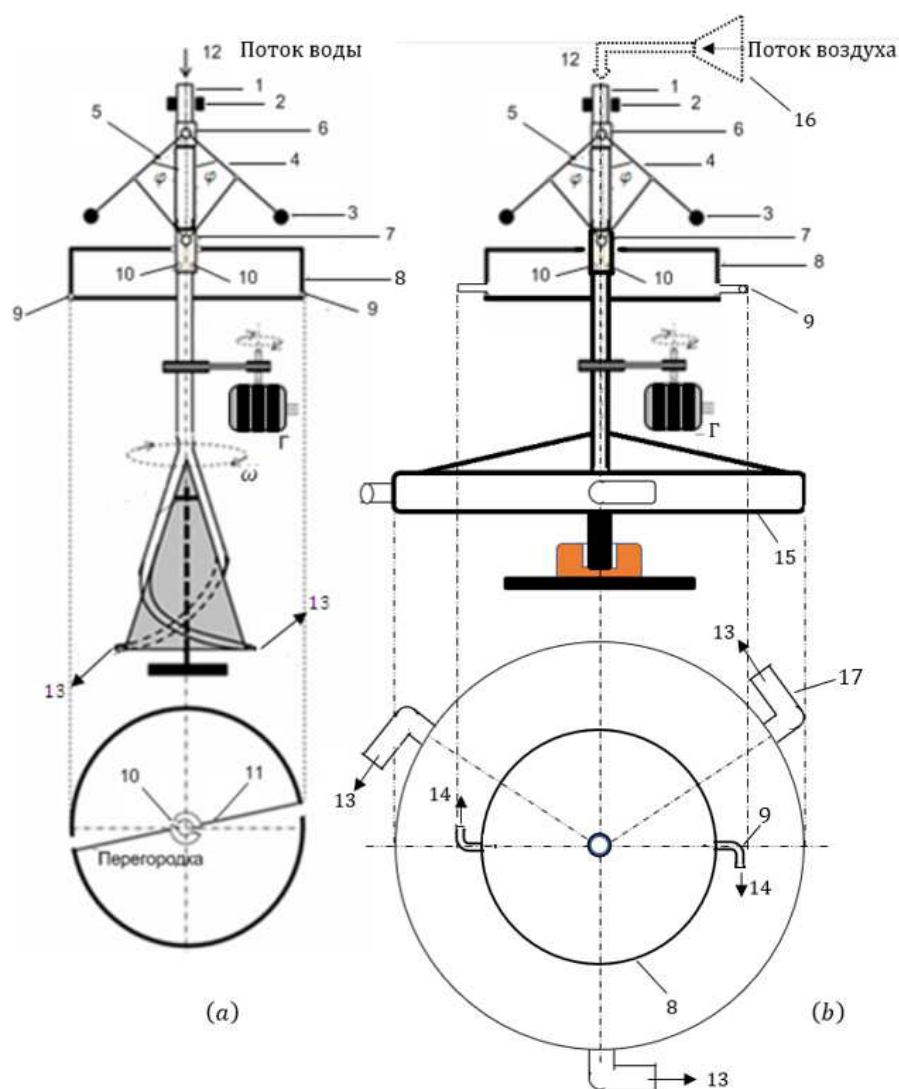


Рисунок 1 – Упрощенные схемы микроэлектростанций наибольших мощностей с центробежными регуляторами (ЦР): (а) – микро-ГЭС [2], (б) – микроветроэлектростанция (МЭС)

На рис. 1*b*: 15 – ветроколесо; 16 – диффузор [4], с помощью которого ветровой поток воздуха поступает в напорный трубопровод 1; 17 – три изогнутые под девяносто градусов трубки, расположенные по периметру ветроколеса с интервалами в 120° для выброса потока воздуха 13, играющего роль реактивного сопла; Г – генератор с постоянными магнитами.

Решение задачи №1 и описание МЭС

Результаты решения поставленной задачи показаны на рис.1*b*, где МЭС может функционировать не только под воздействием потока воздуха (ветра), но и от потока воды. При этом принцип автоматической регулировки частоты вращения агрегатов сохраняется.

При сравнительном описании упрощенных схем МЭС (рис. 1*a*, *b*) будем рассматривать только функционально важные элементы.

В обеих схемах: 1 – напорный трубопровод, выполняющий функцию вертикального вала и вала центробежного регулятора, с элементами (3, 4, 5, 6, 7); 8 – полый маховик, полость которого разделена перегородкой на две части; 9 – два симметрично расположенные сквозные отверстия для выброса воды, (рис.1 *a*), а на рис. 1 *b* две изогнутые под девяносто градусов трубки для выброса потока воздуха 14, играющие роль реактивного сопла; 10 – два сквозные отверстия на участке вала, симметрично расположенные внутри полого маховика, для поступления воды в случае рис.1*a* и в случае рис. 1*b* для поступления напора воздуха; 7 – подвижная муфта, закрывающая отверстия 10 при номинальной скорости вращения гидротурбины в случае рис.1*a* и ветротурбины для рис. 1*b*; 13 – напор воды для рис.1 *a* и напор потока воздуха в случае рис. 1*b*, которые приводят во вращательное движение из-за реактивных отдач соответственно потоков воды и воздуха.

В окончательном варианте действующий макет микроветровой электростанции с диффузором с прямолинейными сужающимися каналами (рис.2) имеет следующий вид:

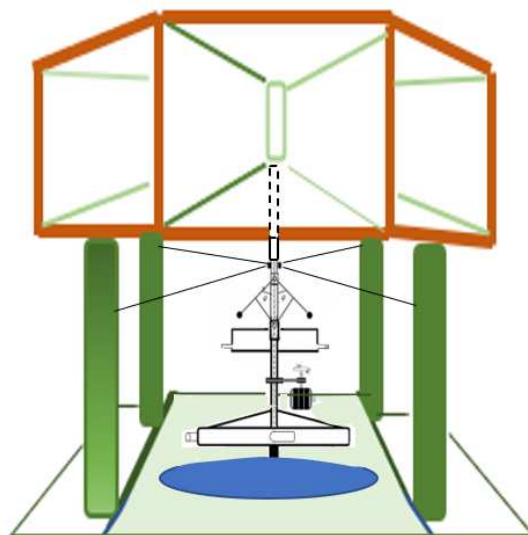


Рисунок 2 – Макет микроветровой электростанции с диффузором с прямолинейно сужающимися каналами

Алгоритм функционирования МЭС (рис.1). В рассматриваемых вариантах МЭС производства электроэнергии реализуется генераторами с постоянными магнитами, приводимыми во вращательное движение агрегатами с центробежным регулятором (ЦР). На

рис. 1а функцию приводного агрегата выполняет гидротурбина, а на рис. 1б – ветровая турбина. Так как алгоритмы функционирования МЭС, представленные на рис.1, одинаковые, то рассмотрим работу только одной МЭС, показанной на рис. 1б.

Поддержание равномерного вращательного движения ветровой турбины реализуется следующим образом.

Поток ветра поступает от диффузора 16 в напорной трубопровод 1 и при выходе потока ветра 13 из сопла 17 ветроколеса 15, 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 вале, находящимся во внутренней области маховика, регулируя поступление воздуха в него.

При номинальной скорости вращения ветровой турбины отверстия 10 закрыты муфтой 7. При увеличении скорости вращения выше номинальной за счет уменьшения нагрузки генератора муфта 7 приоткрывает отверстия 10, и поток воздуха поступает в полости маховика. При этом в отличие от варианта МЭС, показанного на рис.1 (а), масса и момент инерции не меняются, но за то уменьшается напор потока воздуха 13 за счет спада давления в трубопроводе 1 (часть потока воздуха поступает в полость маховика и тем самым уменьшает напор на выходе 13 ветровой турбины) и к тому же поток воздуха 14, вырываясь из сопла 9, создает механический момент, направленный на торможение ветровой турбины. 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 воздуха в него и увеличивая напор на выходе 13 ветровой турбины, тем самым обеспечивая поддержание равномерного вращательного движения ветровой турбины МЭС.

Для определения оптимальных параметров системы «ветровая турбина-ЦР-генератор», обеспечивающих их устойчивую работу с поддержанием номинальной частоты вращения генератора, необходима их математическая модель.

Математическая модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор». Математическую модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор» можно получить из математической модели системы «гидротурбина-ЦР-генератор», имеющей следующий вид [2]:

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

где φ – угол отклонения от вертикали стержней 4, 5 ЦР; τ – время; ψ – скорость изменения φ (определена первым уравнением); ω – 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.1а);

$$F = (P_{\Gamma} - P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi}) + k_1 \cos \tilde{\varphi}),$$

где P_{Γ} – момент силы, вызванный электрической нагрузкой, $P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi})$ – составляющие момента силы $P_{\text{мех}}(\varphi)$, создаваемые реактивной отдачей напора воды 13 (рис. 1а) при некотором угле ($\tilde{\varphi}$), вблизи которого меняется φ , $k_1 > 0$ коэффициент пропорциональности.

Первые два уравнения системы (1) соответствуют динамике ЦР.

Для уменьшения числа независимых параметров проведем замену переменных [5]:

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

В результате (1) примет вид

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

где

$$\begin{aligned} J(x_1) &= J_1 - k_2(\cos x_1 - M \cdot \cos \tilde{\varphi}); \\ \gamma &= b/m(gl)^{\frac{1}{2}}; \quad H = (k_1 \cdot l)/g; \\ \rho &= F/k_1; \end{aligned} \quad (3)$$

J_1 – момент инерции всех вращающихся частей, включая момент инерции не заполненного водой маховика.

Полученная система (2) относится к жестким нелинейным дифференциальным уравнениям, которая не имеет аналитического решения, поэтому для исследования его устойчивости необходимы численные исследования на компьютерной модели. Для системы уравнений (2) такая компьютерная модель разработана в [2].

Чтобы получить из аналитических выражений (2) и (3) математическую модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор», достаточно приравнять в выражении (3) k_2 нулю и учесть дополнительным слагаемым в правой части третьего уравнения системы (2) функцию $P(x_1)$ определяющий момент силы торможения от вырывающийся из сопла 9 (рис. 1b) потока воздуха 14. Тогда математическая модель системы «ветровая турбина-ЦР-генератор» примет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} = (\sin x_1 \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{J(x_1)} \cdot H \cdot (\cos x_1 - \rho) + P(x_1) \end{cases} \quad (4)$$

$$J(x_1) = J_1;$$

$$\gamma = b/m(gl)^{1/2};$$

$$H = (k_1 \cdot l)/g;$$

$$\rho = F/k_1. \quad (5)$$

Логично предположить, что функция $P(x_1)$ имеет следующий вид:

$$P(x_1) = -k_3 \cdot \cos x_1,$$

где $k_3 > 0$, коэффициент пропорциональности.

С учетом выше сказанного окончательная математическая модель МЭС (рис. 1 b) примет вид:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2; \\ \frac{dx_2}{dt} = (\sin x_1 \cos x_1) \cdot x_3^2 - \sin x_1 - \gamma \cdot x_2; \\ \frac{dx_3}{dt} = \frac{1}{J_1} \cdot H \cdot (\cos x_1 - \rho) - k_3 \cdot \cos x_1, \end{cases} \quad (6)$$

где

$$\begin{aligned} \gamma &= b/m(gl)^{1/2}; \\ H &= (k_1 \cdot l)/g; \\ \rho &= F/k_1. \end{aligned} \quad (7)$$

Компьютерным аналогом системы уравнений (6), предназначенным для его интегрирования, является структурная схема в среде MatLab/Simulink (рис. 3).

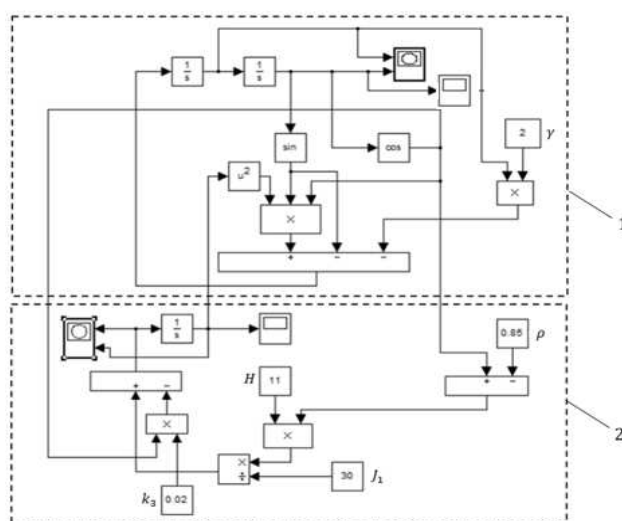


Рисунок 3 – Структурная схема системы «ветровая турбина-ЦР-генератор»

Она состоит из структурных схем: 1 – центробежного регулятора; 2 – системы «гидротурбина-генератор». Визуализация результатов моделирования в виде зависимостей $\varphi^\circ(t)$, $\omega(t)$ и фазовых портретов осуществляется в соответствующих блоках (рис. 4, 5). Параметры математической модели (6, 7) для моделирования работы системы «ветровая турбина-ЦР-генератор»: $\gamma = 4$; $\rho = 0.7$; $H = 15$; $J_1 = 30$; $k_3 = 0.04$.

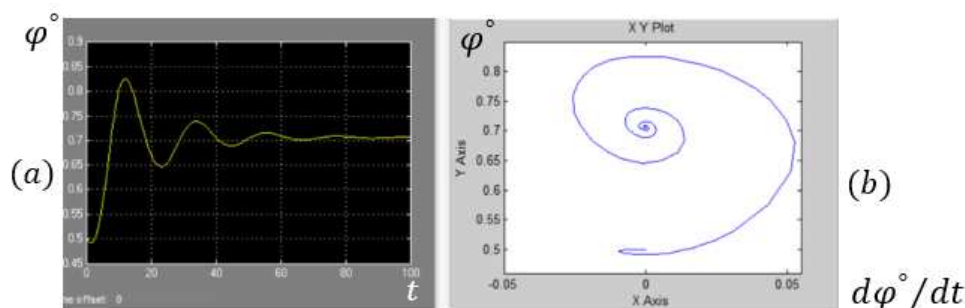


Рисунок 4 (a) – зависимость от времени угла отклонения стержня ЦР, от своего вертикального положения; (b)– фазовый портрет

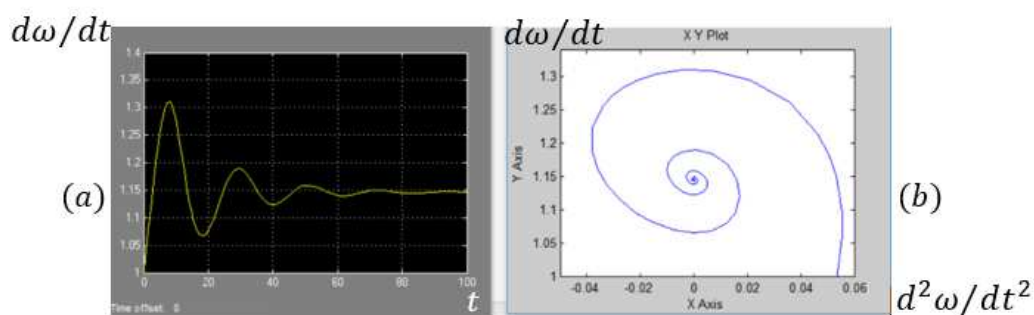


Рисунок 5 (a) – зависимость от времени угловой скорости вращения вала МЭС; (b) – фазовый портрет

Постановка задачи №2. Разработка новой конструкции МЭС с целью увеличения его мощности, расширения, используемого для выработки электроэнергии энергоносителей (потоков воды, ветра, восходящего потока нагретого воздуха) и стабилизации режимов его работы.

Решение задачи №2 и описания МЭС

Результаты решения поставленной задачи показаны на рис. 6, 7, 8, где МЭС может функционировать не только под воздействием потока воды, но и от потоков ветра, и восходящего потока, нагретого солнечными лучами воздуха (рис. 6, 7). При этом принцип автоматической регулировки частоты вращения агрегатов сохраняется, к тому же в систему стабилизации режима работы устройства добавлен и элемент 25 для демпфирования скачка давления при резких порывах ветра, поступающего через диффузор 7 (рис. 6, 7). Это устройство совместно с ЦР улучшает стабильный режим работы МЭС.

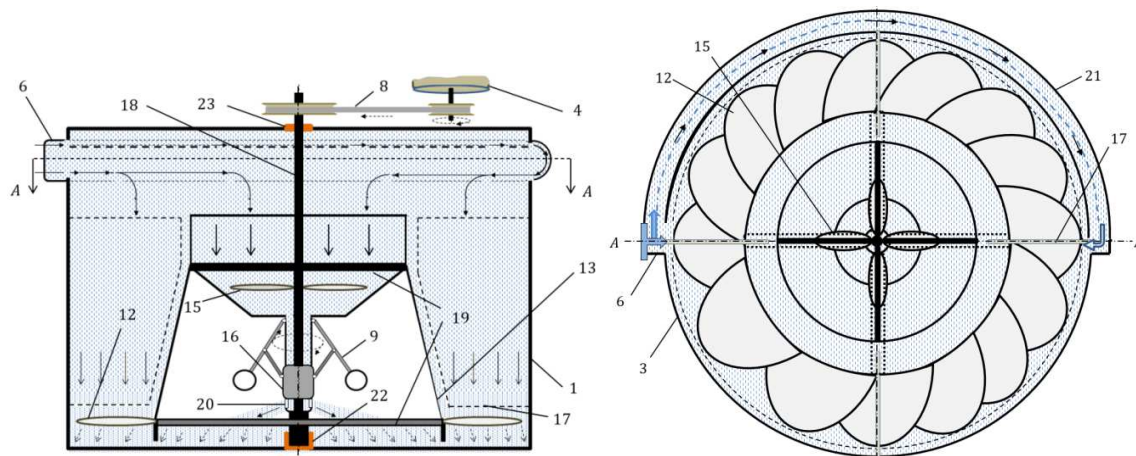


Рисунок 6 – Гидротурбина увеличенной мощности с центробежным регулятором

Описание элементов конструкции (рис. 6). Рассмотрим только функционально важные элементы, к которым относятся: неподвижная часть устройства — это корпус гидроагрегата 1 с подводными к нему напорными трубопроводами 6, 21, по которым поток воды поступает с двух сторон во внутреннюю область гидроагрегата; вращающаяся часть – это вал 18, к которому жестко прикреплен полый маховик – 13, состоящий из отдельных элементов.

Верхняя область маховика по форме чашеобразна и заполнена водой. Продолжение маховика, т.е. нижнее его основание, представляет собой полый цилиндр, полость которого

сообщается с верхним чашеобразным участком маховика. Следовательно, этот участок также заполнен водой. В нижней цилиндрической области чашеобразного участка маховика приварен «юбкообразный» полый участок в виде усеченного цилиндра конической формы, который в верхней и нижней частях жестко прикреплен к двум крестовинам – 19, которые в свою очередь приварены к валу – 18.

К торцевой нижней части «юбкообразного» участка маховика жестко прикреплено гидрокосило с лопастями - 12.

С внутренней стороны корпуса 1 приварены перпендикулярно к нему четыре направляющие перегородки 17, создающие условия для поступательного движения потока воды сверху вниз до достижения лопаток гидроагрегата.

В состав маховика входят и элементы ЦР 9, 16 и лопасти 15, жестко прикрепленные к валу, которые при поступательном движении воды в полости маховика сверху вниз при открытом отверстии 20 оказывают тормозящее действие. В случае увеличения скорости вращения муфты выше номинальной, отверстия 20 открываются из-за перемещения вверх муфты 16 от действия ЦР.

В правой части (рис. 6) показан вид сверху МЭС по сечению $A - A$. Электроэнергия вырабатывается генератором 4, вал которого приводится во вращение ременной передачей 8.

На рис. 6 окрашенные в темный (голубой) цвет участки соответствуют областям МЭС, заполненные водой – неокрашенные области соответствуют воздушному пространству.

Основные функциональные элементы конструкции (рис. 7). На чертеже представлены варианты использования разработанной гидроветряной турбины для выработки электроэнергии: 1 – гидроагрегат, описание которого дано выше по тексту; 2 – сочленённый с помощью дистанционно управляемой муфты ветровой агрегат; 3 – вид сверху на гидроагрегат по сечению $A - A$; 4 – генератор, вал которого приводится во вращательное движение ременной передачей 8; 7 – диффузор, от которого поток ветра поступает в ветровой агрегат через трубопровод 23; 6 – трубопровод, по которому напор воды 11 поступает в гидроагрегат; 21 – солнечная труба [4] представляет собой аппарат для использования солнечной энергии посредством конвекции нагретого воздуха. В своей простейшей форме она состоит из трубы, окрашенной в черный цвет. В дневное время солнечная энергия 20 нагревает трубу, тем самым нагревая воздух внутри нее с формированием в результате восходящего потока воздуха внутри трубы; 18 – прозрачная полая емкость сферической формы для нагрева воздуха тепличным эффектом, которая соединена с солнечной трубой. В результате теплый воздух создает в трубе восходящий поток, который через трубопровод 23 поступает в ветровой агрегат; 19 – отверстия, через которые из окружающего пространства холодный воздух поступает в емкость 18; 25 – устройство для демпфирования скачка давления воздушного потока в трубопроводе 23, а следовательно и во внутренней области ветрового агрегата 2, при сильном порыве ветра, поступающего в диффузор; 22, 24 – клапаны; 26 – генератор, вал которого приводится во вращательное движение непосредственно от вала ветрового агрегата 2 через дистанционно управляемую муфту 27.

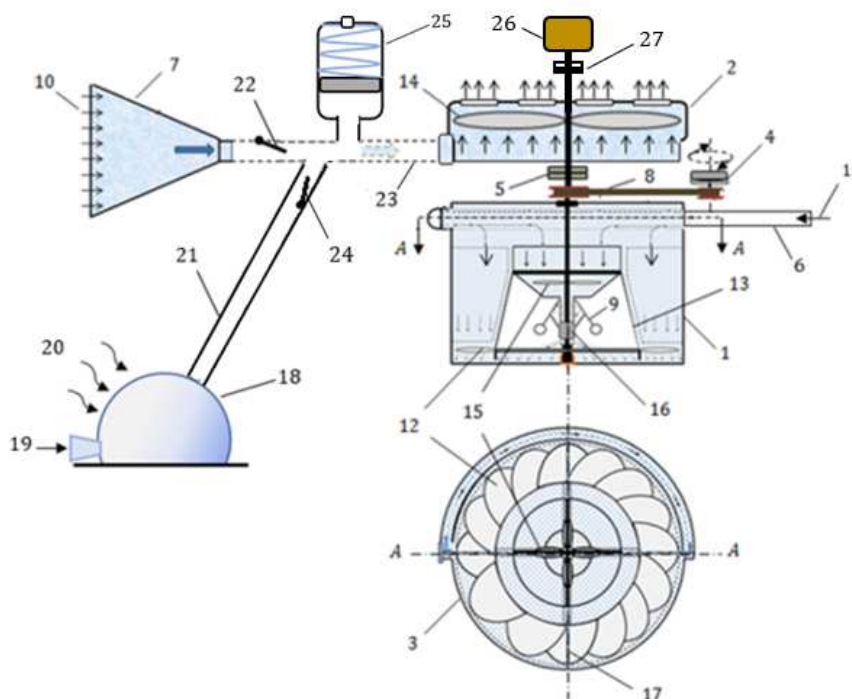


Рисунок 7 – Варианты использования гидроветряной турбины для выработки электроэнергии

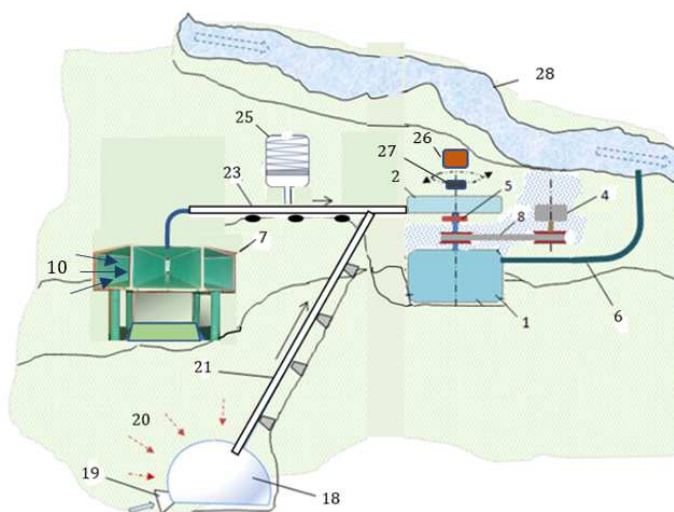


Рисунок 8 – Участок горной местности с возможными вариантами взаимного расположения энергоносителей и гидроветровой турбины

На рисунках 7 и 8 все элементы, а также их алгоритмы функционирования совпадают, за исключением того, что на рис. 7 элементы расположены в предполагаемой горной местности с возможными вариантами взаимного расположения энергоносителей и гидроветровой турбины. Кроме того, на рис. 7 изображен диффузор реальной конструкции – 7, а также изображена река – 28, от которой по напорному трубопроводу - 6 поток воды поступает в гидротурбину - 1.

Взаимодействия конструктивных элементов МЭС при их функционированиях

Энергоносителями, от механических воздействий которых на рабочие элементы МЭС функционируют ветровые и гидроагрегаты, являются: поток воды – 11 (рис. 7) поступающий от реки – 28 по напорному трубопроводу – 6; поток ветра – 10 поступающий в ветровую турбину – 2 от диффузора – 7 через напорный трубопровод – 23; поток нагретого восходящего потока воздуха внутри трубы – 21.

Стабилизацию режимов работы МЭС обеспечивает рассмотренный выше по тексту ЦР расположенный в гидроагрегате - 1 и демпфер – 25.

Демпфер работает следующим образом. При устойчивом и стабильном поступлении потоков ветра через диффузор 7, а также нагретого воздушного потока по солнечной трубе 21, клапаны 22 и 24 под действием движущихся потоков воздуха находятся в открытом состоянии, и поток воздуха поступает в ветровую турбину, совершая работу. Движение нагретого воздуха по солнечной трубе более-менее стабильно в отличие от ветрового потока, поступающего в диффузор 7.

Допустим, в какой-то момент времени произошел сильный порыв ветра 10. Давление воздуха скачкообразно возрастает, и фронт повышенного давления, распространяясь по трубе 23, доходит до места сочленения труба 21, при этом клапан 24 закрывается, и избыток давления воздуха, воздействуя на поршень демпфера 25, сжимает пружину демпфера, где аккумулируется избыток энергии. При уменьшении порыва ветра пружина демпфера, разжимаясь, толкает поршень обратно, и избыток энергии, аккумулированный в сжатой пружине в виде потока воздуха, возвращается в ветровую турбину, т.к. в это время клапаны 22, 24 закрываются. Так в среднем сглаживаются скачки давления в ветровой турбине, стабилизируя режим работы.

Вышеприведенные рассуждения относятся к качественному анализу процессов в системе, а их количественный анализ возможен только после завершения разработки математической модели рассматриваемой системы (рис.7, 8).

Заключение. Представленные на рисунках 7 и 8 системы МЭС, состоящие из ветровой и гидро микроэлектростанций, при выработке электроэнергии в зависимости от обстоятельств могут работать в различных сочетаниях, так как их валы между собой соединены дистанционно управляемыми муфтами.

Будем предполагать, что в реке всегда достаточное количество воды, и гидромикростанция может устойчиво генерировать электроэнергию приемлемого качества по частоте благодаря действия ЦР и обеспечивать электроэнергией свою нагрузку с некоторым запасом.

В то же время при благоприятных обстоятельствах (наличие устойчивого ветра достаточной силы, но небольшими по силе порывами, а также при наличии сильной солнечной радиации) ветровая микростанция может обеспечивать свою нагрузку электроэнергией приемлемого качества из-за содержания демпфера 25, сглаживающего небольшие порывы ветра.

При описанных выше обстоятельствах микроэлектростанции могут работать отдельно, так как соответствующие муфты расчлняют их валы. В других обстоятельствах они могут работать совместно на общую нагрузку благодаря запасу мощности гидроагрегата, или работает только гидромикростанция, например, в темное время суток и слабом ветре или полном его отсутствии.

Эффективность технических решений при изменении конструкции МЭС (рис. 1(b)) обоснована результатами компьютерного моделирования.

Все задачи, поставленные в работе, решены за исключением разработки математической и компьютерной модели всей системы, изображенной на рисунках 7, 8, который находится на этапе завершения.

Все новые технические решения работы переданы в виде заявки на изобретения на экспертизу в Кыргызпатент.

Литература

1. Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Сатаркулов К. Принцип стабилизации частоты микрогидроэлектростанций нового типа // Известия ВУЗов Кыргызстана. – 2016. – № 6. – С. 30–33.
2. Бакасова А.Б., Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. Моделирование микро-ГЭС малой мощности с маховиком, автоматически регулирующим момент инерции // Информатика и системы управления. – 2019. – № 1 (59). – С. 36 – 45.
3. Бакасова А.Б., Сатаркулов К., Ниязова Г.Н., Сатаркулов Т.К. О методе анализа надежности и диагностики состояний микро-ГЭС для автономного электро-снабжения Проблемы автоматизации и управления. –2020. – № 1 (38). – С. 15–20.
4. Применение концентратора и завихрителей воздушного потока для повышения эффективности ветровых установок <https://vikidalka.ru/2-196929.html> (Дата обращения 01.10.2021).
5. Хэссард Б., Казаринов Н., Вэн И. Теория и приложения бифуркации рождения цикла; пер. с англ. – М.: Мир, 1985.