

УДК: 620.91:621.314.572

*Асанова Салима Муратовна, к.т.н., доцент*

*Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова,  
Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: [a\\_sm07@kstu.kg](mailto:a_sm07@kstu.kg)*

*Сатаркулов Тимур Калмурзаевич, аспирант*

*ОсОО "Нур Ал Энерго", г.Бишкек, ул.Исакеева 1/5, e-mail: [timsat76@mail.ru](mailto:timsat76@mail.ru)*

*Асанова Дамира Улановна, аспирант*

*Теплоэлектроцентр города Бишкек, 720070, Кыргызстан, г. Бишкек, пр.  
Жибек-Жолу, 326, e-mail: [damira.asanova@mail.ru](mailto:damira.asanova@mail.ru)*

*Сатаркулов Калмурза, к.т.н., доцент*

*Институт машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной академии  
наук Кыргызской Республики, 720055, Кыргызстан, г. Бишкек, ул. Скрябина 23, e-  
mail: [satarkulov46k@mail.ru](mailto:satarkulov46k@mail.ru)*

*Калмурзаев Апсамат Болотович, аспирант*

*Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова,  
Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Мира 66, e-mail: [apsi\\_kg@mail.ru](mailto:apsi_kg@mail.ru)*

### ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ И СЕТЕВЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ В ВИДЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА

Рассмотрена схема гибридной ветро-солнечной электростанции с накопителем энергии на сжатом воздухе. Предложен способ преобразования постоянного напряжения солнечных электростанций в переменное напряжение приемлемого качества электроэнергии без использования полупроводниковых устройств, путем использования технологических операций выработки электрической энергии в определенной последовательности с использованием компрессора, накопителя энергии на сжатом воздухе и ветродвигателя. Для выработки электроэнергии со стабилизированной частотой напряжения 50 Гц использован новый тип микро-ветроэлектростанции небольшой мощности с центробежным регулятором.

**Ключевые слова:** распределенная энергосистема, возобновляемые источники энергии, солнечная электростанция, микро-ветроэлектростанция, солнечная батарея, ветрогенератор, инвертор, математическая модель.

**Введение.** Существенную часть территории Кыргызстана в силу своего географического положения трудно охватить централизованным электроснабжением. Эти районы с необходимостью децентрализованного электроснабжения значительны по размеру и находятся преимущественно в его высокогорной части, где потребители рассредоточены, следовательно, электроснабжение их может быть обеспечено с помощью децентрализованных источников электроэнергии, например, на основе изолированных систем возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с накопителями.

В то же время использование новых технологий в офисных и бытовых приборах на компьютерной основе привело к существенному увеличению требований к качеству вырабатываемой этими источниками электроэнергии [1].

Для организации микросети, объединяющей между собой изолированные в пространстве ВИЭ на основе солнечных электростанций с накопителями, а также при необходимости их подключения к системе, требуются преобразовательные полупроводниковые устройства (выпрямители и инверторы) (рис.1), в результате возникают проблемы, связанные с наличием гармонических колебаний. Гармоники, вызванные наличием преобразовательных устройств, а также нелинейной нагрузкой, приводят ко многим негативным последствиям. Поэтому, по мнению многих авторов [2 - 6], проблема качества электрической энергии является серьезной для изолированных систем электроснабжения и требует особого внимания.

Возможные проблемы, связанные со значительным содержанием гармонических колебаний высших порядков в питающем напряжении систем электроснабжения, изучаются в течение длительного времени [7], в результате для таких систем внедрялись соответствующие технологии и стандарты.

На сегодняшний день для любых СЭС, в том числе и изолированных, применяются различные способы снижения гармонических колебаний высших порядков и их негативного воздействия на элементы СЭС. К основным способам относятся: увеличение числа фаз в выпрямительных устройствах; применение пассивных и активных фильтров; соединение обмотки в зигзаг, группирование соединения обмоток силовых трансформаторов; отдельное питание мощных нелинейных нагрузок. Однако эти способы с определенными достоинствами и недостатками решают только частные задачи и не позволяют полностью решить вопрос компенсации гармоник [1]. В этой работе поставлена задача построения изолированных систем возобновляемых источников энергии (ВИЭ) с накопителями энергии на сжатом воздухе, без содержания полупроводниковых преобразовательных устройств.

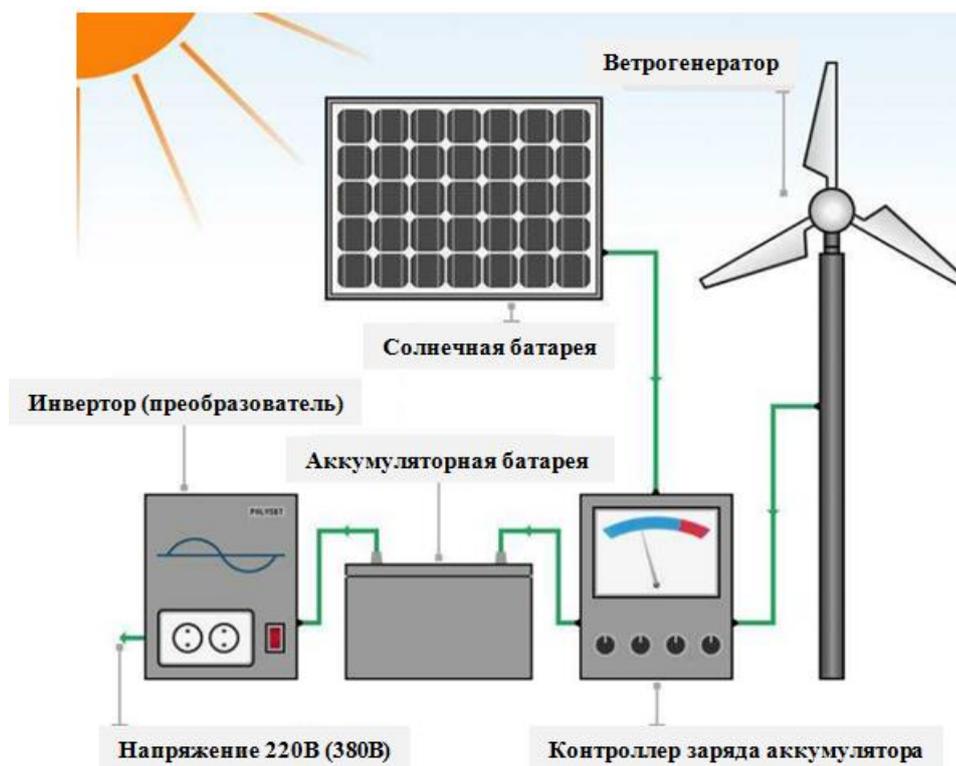


Рисунок 1 – Известная схема гибридной ветро-солнечной электростанции с накопителем энергии в виде аккумуляторной батареи и преобразовательным полупроводниковым устройством (инвертор)

### 1. Постановка задачи

На основе результатов работ [8, 9, 10] разработать способ для преобразования постоянного напряжения солнечных электростанций в переменное напряжение приемлемого качества электроэнергии без использования полупроводниковых устройств, путем использования технологических операций по выработке электрической энергии в определенной последовательности, с использованием компрессора, накопителя энергии на основе сжатого воздуха и ветродвигателя.

### 2. Предлагаемый способ решения

Предлагаемый способ решения поставленной задачи для гибридной ветро-солнечной электростанции представлен на рисунке 2, где к выходу солнечных батарей подключен компрессор с электроприводом на постоянном токе. Компрессор закачивает воздух в металлический баллон, выполняющий функции накопителя энергии на сжатом воздухе [11].

С выхода баллона сжатый воздух подается на вход напорного трубопровода ветродвигателя микро-ветроэлектростанции (МВЭ). В результате работы микро-ветроэлектростанции вырабатывается электрическая энергия со стабилизированной промышленной частотой, так как станция имеет устройство, поддерживающее номинальную частоту [8, 9]. Подробное описание принципа работы МВЭ и его математическая модель изложены в [9].

Энергия ветра гибридной ветро-солнечной электростанции накапливается также в виде сжатого воздуха в металлическом баллоне. Для этого компрессор «К<sub>2</sub>.» (рис.2), приводом которого является ветродвигатель, накачивает воздух в металлический баллон.

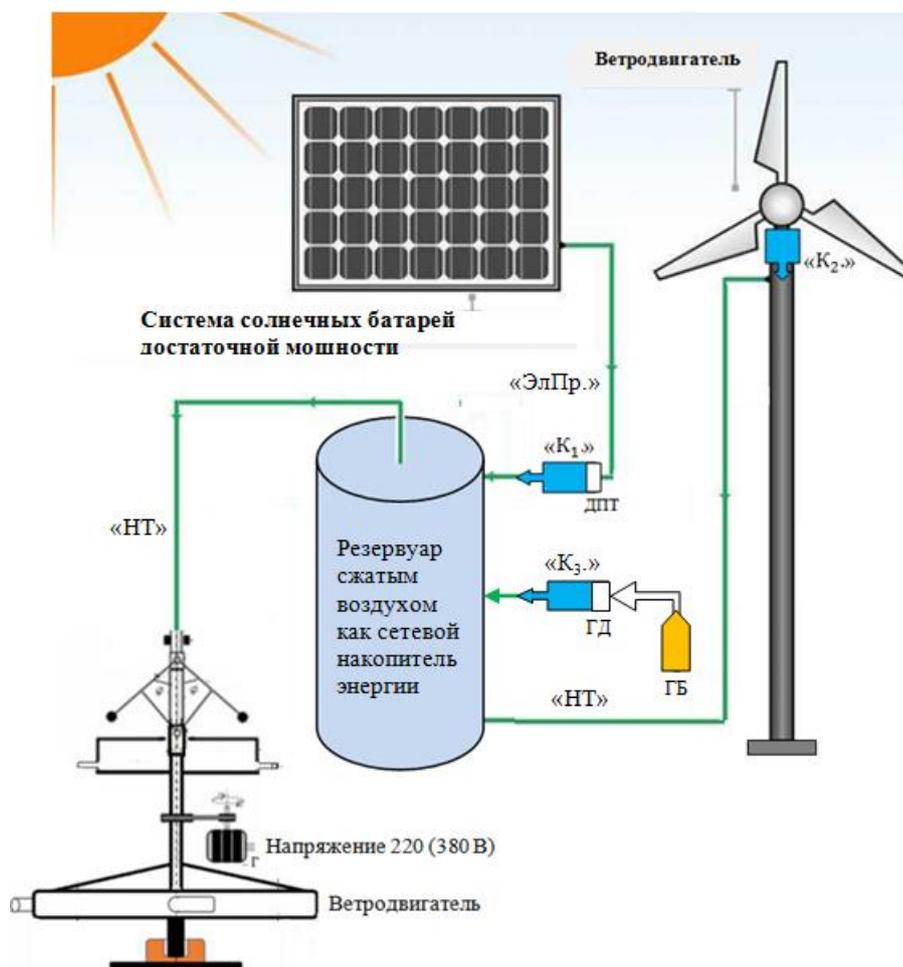


Рисунок 2 – Разработанная схема гибридной ветро-солнечной электростанции с сетевым накопителем энергии на сжатом воздухе: «К<sub>1</sub>.» – компрессор с электроприводом постоянного тока – ДПТ; «К<sub>2</sub>.» – компрессор, приводимый в работу потоком ветра; «ЭлПр.» – электрический провод; «НТ» – напорный трубопровод; «К<sub>3</sub>.» – компрессор с газовым двигателем на природном газе; ГБ – газовый баллон

Для непредвиденных ситуаций, когда перестают функционировать источники энергии на основе ВИЭ и прекращается поступление сжатого воздуха в резервуар, выполняющий функцию накопителя энергии, предусмотрен компрессор «К<sub>3</sub>.» с приводом на газовом двигателе специальной конструкции, получающий питание от газового баллона ГБ с природным газом.

### 3. Основные конструктивные элементы МВЭ

При описании упрощенной схемы МВЭ (рис.3) будем рассматривать только функционально важные элементы:

1 – напорный трубопровод, выполняющий функцию вертикального вала и вала центробежного регулятора, с элементами (3, 4, 5, 6, 7);

- 7 – подвижная муфта, закрывающая отверстия 10 при номинальной скорости вращения ветротурбины;
- 8 – полый маховик, полость которого разделена перегородкой на две части;
- 9 – две изогнутые под девяносто градусов трубки для выброса потока воздуха 14, играющие роль реактивного сопла;
- 10 – два сквозных отверстия на участке вала, симметрично расположенные внутри полого маховика, для поступления напора воздуха;

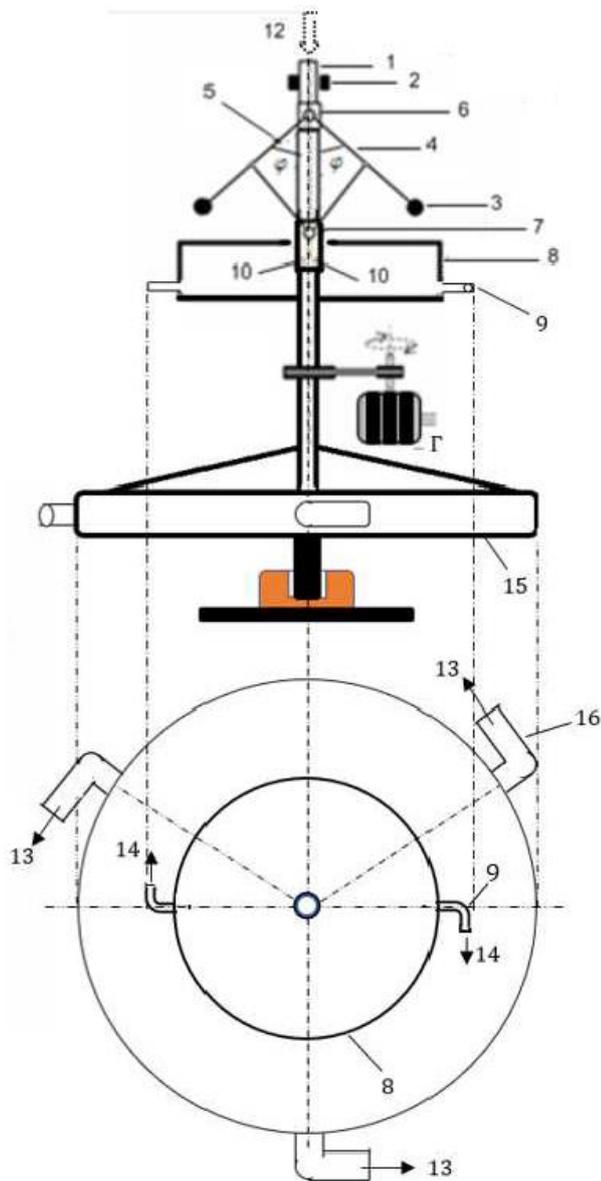


Рисунок 3 – Упрощенная схема микро-ветроэлектростанции (МВЭ) небольшой мощности с центробежными регуляторами (ЦР)

- 12 – поток сжатого воздуха, поступающий по напорному газопроводу из накопителя энергии в виде металлического баллона со сжатым воздухом;
- 13 – напор потока воздуха, приводящий к вращательному движению из-за его реактивной отдачи;
- 15 – ветроколесо;
- 16 – три изогнутые под девяносто градусов трубки, расположенные по периметру ветроколеса с интервалами в  $120^\circ$ , для выброса потока воздуха 13, играющего роль реактивного сопла;
- Г – генератор.

*Описание процесса автоматического поддержания равномерного вращательного движения турбины МВЭ.* Поток сжатого воздуха поступает от накопителя в напорный трубопровод 1, и при выходе потока воздуха 13 из сопла 16 ветроколеса 15 приводится во вращательное движение напорный трубопровод 1, а также жестко соединенные с ним маховик 8 и неподвижная втулка 6. При этом 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, в результате подвижная втулка 7 приоткрывает или закрывает сквозные отверстия на вале, которые находятся во внутренней области маховика, регулируя поступление воздуха в него. В случае номинальной скорости вращения ветровой турбины отверстия 10 закрыты муфтой 7. Если увеличится скорость вращения выше номинальной, за счет уменьшения нагрузки генератора, то муфта 7 приоткрывает отверстия 10, и поток воздуха поступает в полости маховика, уменьшая напор потока воздуха 13. Это происходит 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 вышесказанное приводит к понижению скорости вращения вала 1. Когда скорость вращения вала приближается к номинальной скорости, то муфта 7 начинает прикрывать сквозные отверстия 10. При этом уменьшается поступление воздуха в него и увеличивается напор на выходе 13 ветровой турбины, тем самым обеспечивая поддержание равномерного вращательного движения ветровой турбины МЭС.

*Определение оптимальных параметров МВЭ, обеспечивающих их устойчивую работу, с поддержанием номинальной частоты вращения генератора, реализуется на основе его математической модели [9], т.е. математическая модель МВЭ получается из математической модели микрогидроэлектростанции (МГЭ), имеющей следующий вид [8]:*

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

В этом выражении:  $\varphi$  – угол между вертикалью и стержнями 4, 5 ЦР;  $\tau$  – время;  $\psi$  – определена первым уравнением системы (1) и представляет скорость изменения  $\varphi$ ;  $\omega$  – угловая скорость 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.3);  $F = (P_{\Gamma} - P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi}) + k_1 \cos \tilde{\varphi})$ , где  $P_{\Gamma}$  – момент силы, вызванный электрической нагрузкой,  $P_{\text{мех}}(\tilde{\varphi})$  – составляющие момента силы  $P_{\text{мех}}(\varphi)$ , создаваемой реактивной отдачей напора воды для МГЭ, а для МВЭ – напоры воздуха 13 (рис.3) при некотором угле ( $\tilde{\varphi}$ ), вблизи которого меняется  $\varphi$ ,  $k_1 > 0$  – коэффициент пропорциональности.

В выражении (1) первые два уравнения описывают динамику ЦР.

С целью уменьшения числа независимых параметров можно произвести замену переменных [13]:

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

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

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

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

Для получения математической модели МВЭ из аналитических выражений (2, 3) достаточно приравнять в выражении (3)  $k_2$  нулю и ввести дополнительную слагаемую в правую часть третьего уравнения системы (2) функцию  $P(x_1)$ , определяющую момент силы торможения от действия потока воздуха 14 сопла 9 (рис.3). Тогда математическая модель МВЭ примет следующий вид:

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

где

$$\begin{aligned} J(x_1) &= J_1; \\ \gamma &= b/m(gl)^{1/2}; \quad H = (k_1 \cdot l)/g; \quad \rho = F/k_1. \end{aligned} \quad (5)$$

Функция  $P(x_1)$  имеет следующий вид:

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

где  $k_3 > 0$ , коэффициент пропорциональности.

С учетом вышесказанного окончательная модель МВЭ 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

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

Компьютерным аналогом системы уравнений (6), предназначенным для его интегрирования, является структурная схема в среде MatLab/Simulink (рис. 4).

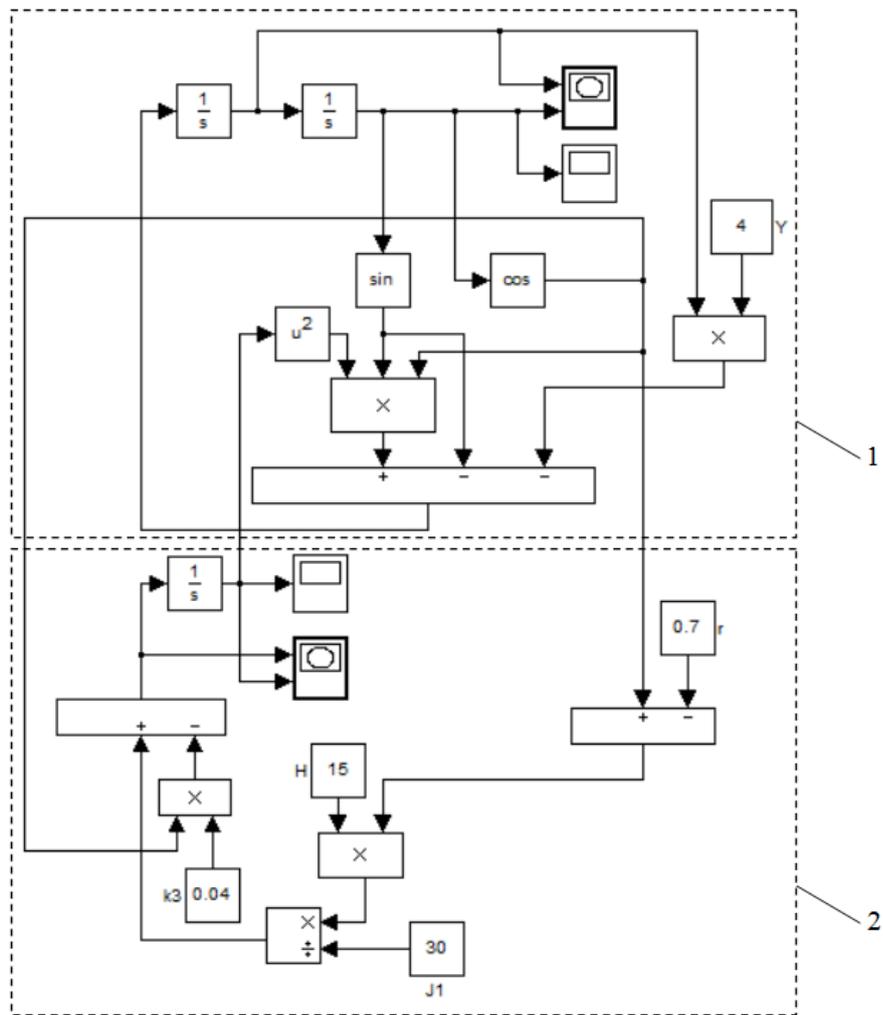


Рисунок 4 – Структурная схема модели МВЭ

На рисунке 4 представлена структурная схема МВЭ. Элементы, ограниченные пунктирными линиями – 1, соответствуют структурной схеме ЦР, а элементы, ограниченные – 2, соответствуют структурной схеме системы «газотурбина-генератор».

Визуализация результатов моделирования (рис. 5 и 6) в виде зависимостей  $\varphi^\circ(t)$ ,  $\omega(t)$  и фазовых портретов осуществляется в соответствующих блоках (рис. 4).

Результаты моделирования (рис.5, рис. 6) получены при следующих параметрах математической модели (6, 7) :  $\gamma = 4$ ;  $\rho = 0.7$ ;  $H = 15$ ;  $J_1 = 30$ ;  $k_3 = 0.04$ .

Как видно из результатов моделирования, при вышесказанных параметрах модели работа МВЭ устойчива, следовательно, используя формулы (7), можем оценить оптимальные параметры, обеспечивающие эту устойчивость.

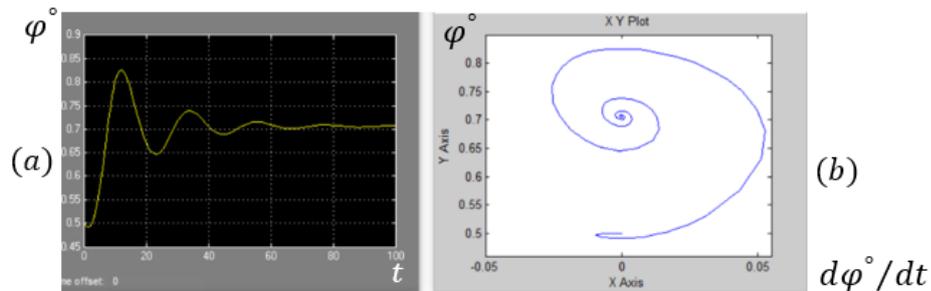


Рисунок 5 – (a) – зависимость от времени угла отклонения стержня ЦР, от своего вертикального положения; (b) – фазовый портрет

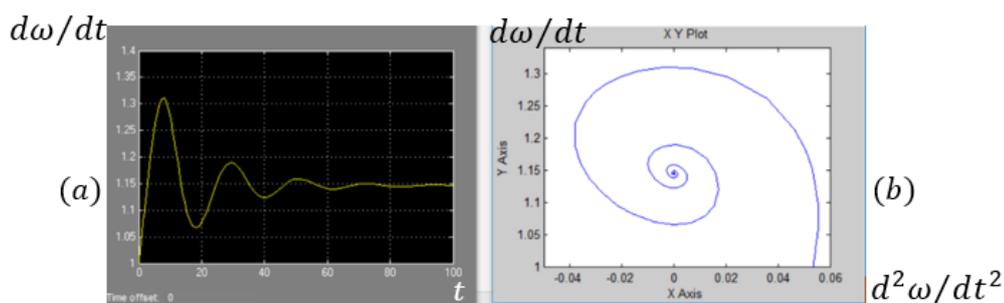


Рисунок 6 – (a) – зависимость от времени угловой скорости вращения вала МВЭ; (b) – фазовый портрет

**Заключение.** Разработанные и запатентованные авторами конструкции нового типа микроэлектростанций [8 – 10, 12] с новым способом стабилизации частоты вращения предусматривались для выработки электроэнергии от потока воды или от потока ветра. Однако конструкция микро-ветроэлектростанции с устройствами автоматической стабилизации частоты вращения ветротурбин [9, 10, 12] в сочетании с накопителем энергии на сжатом воздухе [11], позволило значительно расширить функциональные возможности микро-ветроэлектростанции [9], а его разработанная компьютерная модель позволила значительно облегчить поиск оптимальных геометрических параметров микро-ветроэлектростанции.

Предложенная технологическая цепь выработки электроэнергии с использованием накопителя энергии на основе сжатого воздуха с компрессорным устройством позволила:

- во-первых, исключить полупроводниковые устройства при конвертировании постоянного напряжения солнечной электростанции в переменное напряжение для подключения к системе, что исключило возникновение высших гармоник на выходе источника;

- во-вторых, облегчается организация параллельной работы отдельных изолированных источников электроэнергии.

Все задачи, поставленные в работе, решены, за исключением разработки математической и компьютерной модели накопителя энергии на основе сжатого воздуха, так как эта модель необходима при моделировании работы микросети, объединяющей все изолированные ВИЭ в одну систему.

### **Литература**

1. Suslov, K. Distributed filtering of high harmonics in Smart Grid / K. Suslov, N. Solonina, A. Smirnov // 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe conference.
2. Palizban, O. Microgrids in active network management – part II: System operation, power quality and protection / O. Palizban, K. Kauhaniemi, J.M. Guerrero // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol.36. – P.440–451.
3. L.Sigrist, A review of the state of the art of UFLS schemes for isolated power systems / L. Sigrist, L. Rouco, F.M. Echavarren // Electrical Power and Energy Systems. – 2018. – Vol.99. – P. 525–539.
4. Liu, Y. Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review / Y .Liu, S. Yu, Y. Zhu, D. Wang, J. Liu // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol.82. – Part 1. –P. 460–470.
5. Basak, P. A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid / P. Basak, S. Chowdhury, S.

Halder nee Dey, S.P. Chowdhury // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2012. – Vol.16. – P.5545–5556.

6. Manoj Kumar M.V. Power quality of renewable isolated power systems - A case study / M.V. Manoj Kumar, R. Banerjee // 2010 5th International Conference on Industrial and Information Systems.

7. Смирнов С.С. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения / С.С. Смирнов. – Новосибирск: Наука, 2010. – 327 с.

8. Бакасова А.Б. Моделирование микро-ГЭС малой мощности с маховиком, автоматически регулирующим момент инерции / А.Б. Бакасова, К.А. Сатаркулов, Г.Н. Ниязова, Яблочников А.М., Усубалиева Г.К. // Информатика и системы управления. 2019. – № 1 (59). – С. 36–45.

9. Бакасова А.Б. Расширенные варианты использования гидро-ветряной электроустановки и автоматическая стабилизация режимов ее работы / А.Б. Бакасова, М.С. Асанов, К. Сатаркулов // Проблемы автоматики и управления. – 2021. – № 3 (42). – С. 4–14.

10. Сатаркулов К., Бакасова А.Б., Асанов М.С. и др. Ветро-гидроагрегат микроэлектростанции, Патент № 2319 КР. 2022 г.

11. Воздушно-аккумулирующая электростанция  
<https://www.hydropower.ru/upload/iblock/777/73jmx5s78v0y0ykczo7k937vy5sw5ljm/ssu7iaqhemzk1nq032u2iysgwkz4uvxq.pdf> (дата обращения 14.03.2024).

12. Асанов М.С., Асанова С.М., Асанова Д.У., Сатаркулов К., Сатаркулов Т.К. и др. Устройство регулирования скорости вращения вала гидроагрегата микроГЭС. / Патент №2262 КР. 2021 г.

13. Хэссард Б., Казаринов Н., Вэн И. Теория и приложения бифуркации рождения цикла/ Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.