

**Бакасова А.Б., Сатаркулов К., Ниязова Г.Н.**

*Институт машиноведения и автоматики НАН КР, г. Бишкек*

[bakasovaaina@mail.ru](mailto:bakasovaaina@mail.ru), [gulmira-n.86@mail.ru](mailto:gulmira-n.86@mail.ru)

**Сатаркулов Т.К**

*Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова*

[satarkulov46k@mail.ru](mailto:satarkulov46k@mail.ru)

## **О МЕТОДЕ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЙ МИКРОГЭС ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

В статье дан краткий обзор микроГЭС с центробежным регулятором и маховиком с автоматически регулируемой массой и моментом инерции (АРМИ). Описан метод анализа надежности и диагностики состояний. МикроГЭС представлена в виде некоторой физической системы  $S$  с протекающим в ней случайным процессом Марковского типа с дискретными состояниями и непрерывным временем. Предполагается, что все переходы системы  $S$  из одного состояния в другое происходят под действием простейших потоков отказа  $\lambda$  и восстановления  $\mu$  с заданными интенсивностями. Составлен размеченный граф состояний системы и построена математическая модель рассматриваемого процесса, которая дает возможность найти все вероятности состояний в виде функции времени, т.е. произвести диагностику состояний. Полученная математическая модель позволяет оценить работу микроГЭС с учетом всех условий, от которых зависит ее функциональность, оценить потери, вызванные различными причинами.

**Ключевые слова:** микроГЭС, маховик, стабилизация частоты вращения, гидротурбина, регулятор Уатта, математическая модель, Марковский процесс, размеченный граф, анализ надежности, диагностика состояний.

**Введение.** Электроснабжение населенных пунктов, находящихся в зоне децентрализованного электроснабжения, осуществляется в основном от дизельных электростанций. Удаленность и малочисленность таких населенных пунктов, а также низкая потребляемая ими мощность влияют на снижение рентабельности энергетических установок. Поэтому ветровые электростанции [1, 2] и микроГЭС малой мощности [3–6] для таких населенных пунктов все чаще рассматриваются как альтернативные источники энергии. Потенциальными потребителями малых и особенно микроГЭС могут стать удаленные поселки, геологические станции, метеостанции, небольшие фермерские хозяйства, летние пастбища, туристические базы и т.д.

В работах [7–10] приведены конструкции, математические модели и подробные описания принципов работы различных вариантов мобильных микроГЭС. На рис. 1 представлена схема микроГЭС, математическая модель которой описывается системой (1) [9, 10].

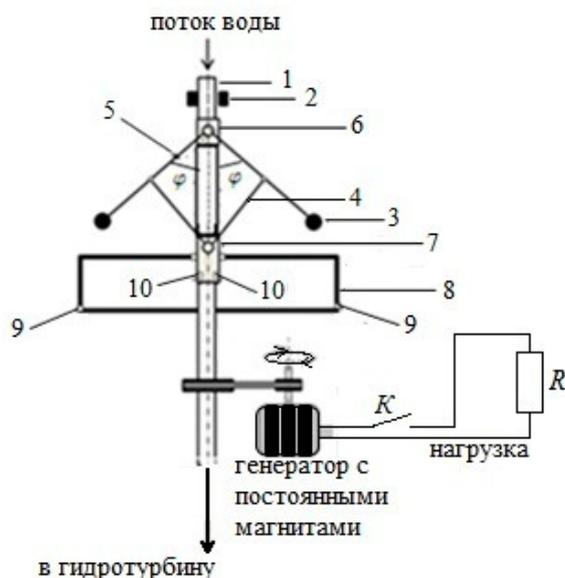


Рисунок 1 – Схема микроГЭС с центробежным регулятором и с АРМИ маховиком: 1 – напорный трубопровод, 2 – подшипник; 3 – металлические грузики; 4 – стержни, шарнирно прикрепленные к подвижной муфте, 5 – стержни, шарнирно прикрепленные к неподвижной втулке 6; 7 – подвижная муфта, надетая на напорный трубопровод; 8 – маховик с перегородкой, разделяющей полость на две части; 9 – сквозные отверстия для выброса воды из маховика; 10 – сквозные отверстия для поступления воды в полость маховика.

Стабилизация частоты микроГЭС осуществляется маховиком с автоматически регулируемой массой, моментом инерции (АРМИ маховик) и потоками воды, которые подаются на вход гидротурбины. При заполнении или удалении воды из полостей изменяется масса маховика и его момент инерции. При номинальной скорости вращения гидротурбины  $\omega_{ном}$  отверстия 10 закрыты муфтой 7, а полость маховика не заполнена водой. Подробное описание установки и принцип ее работы представлены в [9, 11].

**Задачей** в данной статье является получение дифференциального уравнения для определения вероятностей состояний микроГЭС для автономного электроснабжения (рис. 1), чтобы в дальнейшем провести анализ надежности и диагностику состояний микроГЭС с центробежным регулятором и с АРМИ маховиком.

### Математическая модель системы (дифференциальное уравнение для вероятностей состояний)

МикроГЭС (рис. 1) представим в виде некоторой физической системы  $S$ , которая с течением времени меняет свое состояние, переходя из одного в другое случайным образом, т.е. в рассматриваемой системе протекает случайный процесс. Предположим, что вероятностное состояние системы  $S$  в будущем для любого момента времени  $t$  (при  $t > t_0$ ) зависит только от ее состояния  $S_i$  в настоящий момент ( $t = t_0$ ) и не зависит от того, когда и как система пришла в это состояние (при  $t < t_0$ ). Такой случайный процесс носит название Марковского [12, 13].

В нашем случае *Марковский случайный процесс* (МСП) является процессом с дискретными состояниями и непрерывным временем, так как состояния микроГЭС можно заранее перечислить ( $S_0$  – работоспособное,  $S_1$  – аварийный останов из-за повреждения основных элементов микроГЭС или напорного водопровода,  $S_2$  – останов из-за повреждения питающей линии электропередач,  $S_3$  – плановый ремонт) (рис. 2). При этом будем считать, что переход микроГЭС из состояния в состояние происходит «скачком», практически мгновенно.

Для анализа рассматриваемого случайного процесса воспользуемся графом состояний (рис. 2).

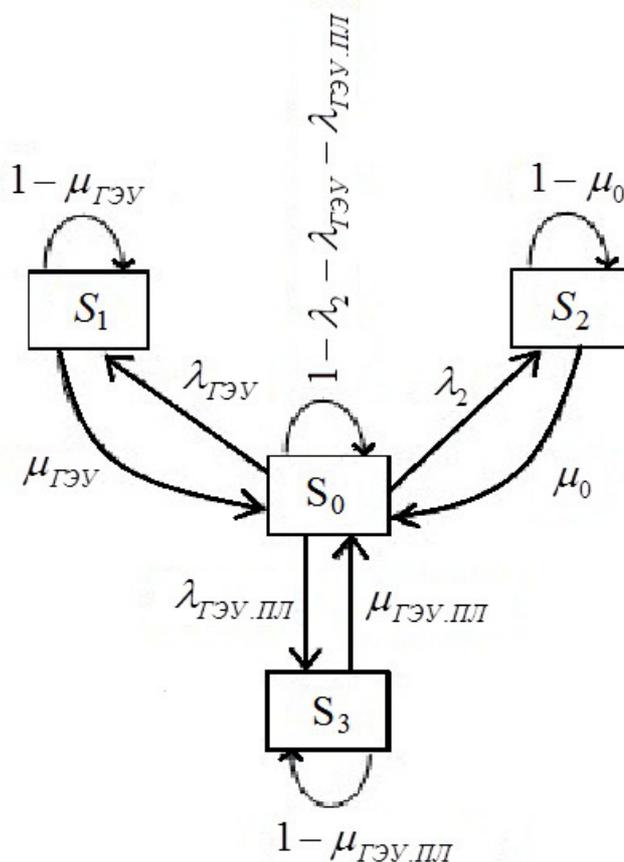


Рисунок 2 – Граф состояний микроГЭС

На рис. 2  $\lambda_2$  – интенсивность потока событий (отказов), связанных с повреждением питающей линии электропередач, приводящих к останову микроГЭС;  $\lambda_{ГЭС}$  – интенсивность потока событий, связанных с повреждением основных элементов микроГЭС или напорного водопровода, приводящих к аварийному останову микроГЭС;  $\lambda_{ГЭС.ПЛ}$  – интенсивность потока событий, связанных с плановым ремонтом микроГЭС;  $\mu_0$  – интенсивность восстановления линии;  $\mu_{ГЭС}$  – интенсивность восстановления основных элементов микроГЭС или напорного водопровода,  $\mu_{ГЭС.ПЛ}$  – интенсивность восстановления после планового ремонта.

Имея размеченный граф, можно построить математическую модель

рассматриваемого процесса и решить его, найдя все вероятности состояний  $p_i(t)$  как функции времени.

Рассмотрим вероятность  $p_0(t)$ , являющуюся вероятностью состояния микроГЭС  $S_0$  в момент  $t$ . Найдем эту же вероятность по истечении времени  $\Delta t$ . То есть вероятность  $p_0(t + \Delta t)$  того, что в момент  $t + \Delta t$  система будет в состоянии  $S_0$ .

Такое возможно в следующих случаях:

- 1) в момент  $t$  система уже находилась в состоянии  $S_0$ , и за время  $\Delta t$  она не вышла из него;
- 2) в момент  $t$  система была в состоянии  $S_1$ , а за время  $\Delta t$  перешла из него в  $S_0$ ;
- 3) в момент  $t$  система была в состоянии  $S_2$ , а за время  $\Delta t$  перешла из него в  $S_0$ ;
- 4) в момент  $t$  система была в состоянии  $S_3$ , а за время  $\Delta t$  перешла из него в  $S_0$ .

Следуя [13] составим уравнения состояний системы:  $S_0, S_1, S_2, S_3$ . Для этого определим вероятности перечисленных вариантов.

В первом случае величина  $p_0(t)$  равна вероятности того, что в момент  $t$  система была в состоянии  $S_0$ . Эту вероятность умножим на вероятность того, что система, находившаяся в момент  $t$  в состоянии  $S_0$ , за время  $\Delta t$  не перейдет из него ни в  $S_1$ , ни в  $S_2$ , ни в  $S_3$ . Суммарный поток событий, выводящий систему из состояния  $S_0$ , равен  $\lambda_2 + \lambda_{ГЭУ} + \lambda_{ГЭУ.ПЛ}$ . Тогда вероятность того, что за время  $\Delta t$  система выйдет из состояния  $S_0$  равна  $\Delta t \cdot (\lambda_2 + \lambda_{ГЭУ} + \lambda_{ГЭУ.ПЛ})$ , а вероятность того, что не выйдет:  $1 - \Delta t \cdot (\lambda_2 + \lambda_{ГЭУ} + \lambda_{ГЭУ.ПЛ})$ . Следовательно, вероятность первого варианта равна  $p_0(t) \cdot [1 - \Delta t \cdot (\lambda_2 + \lambda_{ГЭУ} + \lambda_{ГЭУ.ПЛ})]$ .

Во втором случае в момент  $t$  система находится в состоянии  $S_1$  и за время  $\Delta t$  перейдет из него в состояние  $S_0$ , т.е. она равна  $p_1(t) \cdot \mu_{ГЭУ} \cdot \Delta t$ .

Аналогично находим вероятность для третьего и четвертого случаев, которые соответственно равны:  $p_2(t) \cdot \mu_0 \cdot \Delta t$  и  $p_3(t) \cdot \mu_{ГЭУ.ПЛ} \cdot \Delta t$ .

Суммируя вероятности всех вариантов (по правилу сложения вероятностей) получим:

$$p_0(t + \Delta t) = p_0(t) \cdot [1 - \Delta t \cdot (\lambda_2 + \lambda_{ГЭУ} + \lambda_{ГЭУ.ПЛ})] + p_1(t) \cdot \mu_{ГЭУ} \cdot \Delta t + p_2(t) \cdot \mu_0 \cdot \Delta t + p_3(t) \cdot \mu_{ГЭУ.ПЛ} \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Раскрыв в выражении (3) квадратные скобки, перенеся  $p_0(t)$  в левую часть, разделив обе части на  $\Delta t$  и устремив его к нулю, получим дифференциальное уравнение для  $p_0(t)$ :

$$\frac{dp_0(t)}{dt} = \mu_{ГЭУ.ПЛ} \cdot p_3(t) + \mu_0 \cdot p_2(t) + \mu_{ГЭУ} \cdot p_1(t) - p_0(t) \cdot (\lambda_2 + \lambda_{ГЭУ} + \lambda_{ГЭУ.ПЛ}) \quad (4)$$

Рассуждая аналогично для всех остальных состояний, получим еще три дифференциальных уравнения. В итоге получим систему дифференциальных уравнений для вероятностей состояний:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= \mu_{ГЭУ.пл} \cdot p_3(t) + \mu_0 \cdot p_2(t) + \mu_{ГЭУ} \cdot p_1(t) - p_0(t) \cdot (\lambda_2 + \lambda_{ГЭУ} + \lambda_{ГЭУ.пл}), \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= \lambda_{ГЭУ} \cdot p_0(t) - \mu_{ГЭУ} \cdot p_1(t), \\ \frac{dp_2(t)}{dt} &= \lambda_2 \cdot p_0(t) - \mu_0 \cdot p_2(t), \\ \frac{dp_3(t)}{dt} &= \lambda_{ГЭУ.пл} \cdot p_0(t) - \mu_{ГЭУ.пл} \cdot p_3(t). \end{aligned} \right\} (5)$$

При этом, следует отметить, что

$$\sum_{i=1}^4 p_i(t) = 1. \quad (6)$$

Чтобы решить уравнения (5), необходимо задать начальные условия. Очевидно, что в начальный момент  $t=0$ , когда все элементы системы исправны,  $p_0(0)=1$ ,  $p_1(0)=0$ ,  $p_2(0)=p_3(0)=0$ .

**В заключении** отметим, что система уравнений (5), также называемая уравнением Колмогорова, дает возможность найти все вероятности состояний как функции времени, т.е. произвести диагностику состояний. Кроме того, полученная математическая модель позволяет оценить работу микроГЭС с учетом всех условий, от которых зависит ее функциональность, оценить потери, вызванные различными причинами.

### *Литература*

1. Бобров А.В., Тремясов В.А. Анализ надежности ветроустановок для автономного электроснабжения // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: материалы всероссийской научно-технической конференции, Томск: изд-во ТПУ, – 2008. – С. 112-113.
2. Тремясов В.А., Надежность электроснабжения: учеб. пособие.; – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 163 с.
3. 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.
4. Крылов А.П., Бакштанин А.М. Новые концепции в развитии микрогидроэнергетики. Гидравлика в напорных водоводах микроГЭС // Строительство и архитектура. – 2017. – № 5. – С. 8-14.
5. Спирин 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.
6. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск: СТТ, 2001. – 120 с.
  7. Сатаркулов К., Бакасова А.Б., Иманакунова Ж.С., Ниязова Г.Н. Способ стабилизации частоты автономной микроГЭС // Проблемы автоматике и управления. – 2014. – № 1 (26). – С. 20-23.
  8. 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 автоматике и управления. – 2017. – № 2 (33). – С. 43–51.
  9. 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.
  10. 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.
  11. 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).
  12. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения, Т. 1. – М.: Мир, 1984. – 527 с.
  13. Вентцель Е.С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. – 2-е изд., стер. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1988. – 208 с.