

О МЕТОДЕ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ И ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЙ МИКРОГЭС ДЛЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Абдыкадырова Ж.К., Муратов А.Т., Сагынбаева М.Р.

Институт энергетики и возобновляемых источников энергии
НАН КР, г. Бишкек

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 λ и восстановления μ 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].

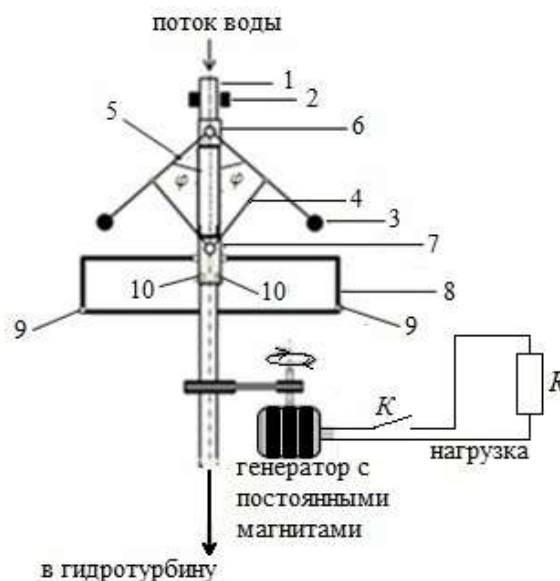


Рисунок 1 – Схема микроГЭС с центробежным регулятором и с АРМИ маховиком: 1 – напорный трубопровод, 2 – подшипник; 3 – металлические грузики; 4 – стержни, шарнирно прикрепленные к подвижной муфте; 5 – стержни, шарнирно прикрепленные к неподвижной втулке; 6 – подвижная муфта, надетая на напорный трубопровод;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

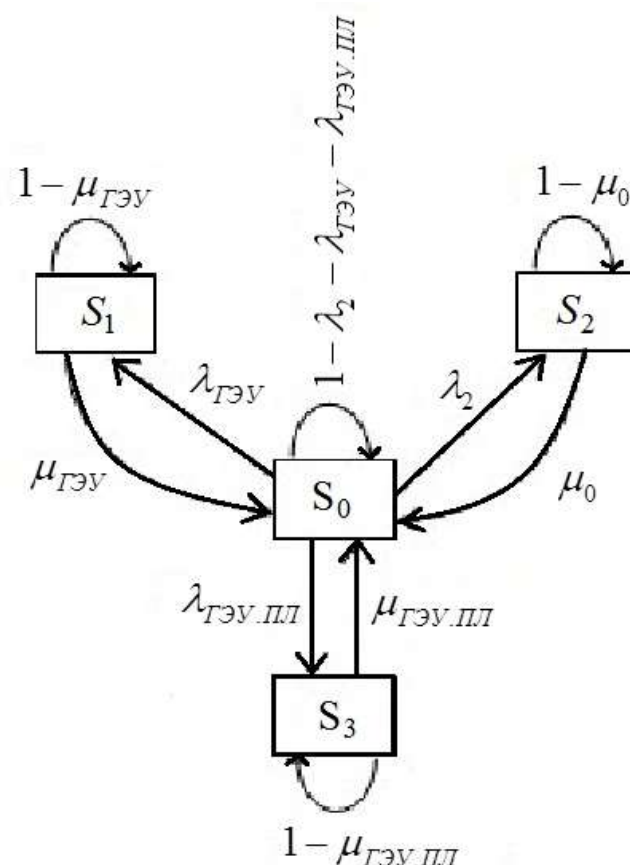


Рисунок 2 – Граф состояний микроГЭС

На рис. 2 λ_2 – интенсивность потока событий (отказов), связанных с повреждением питающей линии электропередач, приводящих к останову микроГЭС; $\lambda_{ГЭУ}$ – интенсивность потока событий, связанных с повреждением основных элементов микроГЭС или напорного водопровода, приводящих к аварийному останову микроГЭС; $\lambda_{ГЭУ.ПЛ}$ – интенсивность потока событий, связанных с плановым ремонтом микроГЭС; μ_0 – интенсивность восстановления линии; $\mu_{ГЭУ}$ – интенсивность восстановления основных элементов микроГЭС или напорного водопровода, $\mu_{ГЭУ.ПЛ}$ – 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 $p_0(t)$, являющейся вероятностью состояния микроГЭС S_0 в момент t . Найдем эту же вероятность по истечении времени Δt . 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 Δt она не вышла из него;
- 2) в момент t система была в состоянии S_1 , а за время Δt перешла из него в S_0 ;
- 3) в момент t система была в состоянии S_2 , а за время Δt перешла из него в S_0 ;
- 4) в момент t система была в состоянии S_3 , а за время Δt 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 Δt 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 Δt 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 Δt 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 Δt 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:

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

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 микро-гидроэнергетики. 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: STT, 2001. – 120 с.
 7. Сатаркулов К., Бакасова А.Б., Иманакунова Ж.С., Ниязова Г.Н. Способ стабилизации частоты автономной микроГЭС // Проблемы автоматики 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 автоматики 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.