

Научная статья
УДК 620.91:330.15
EDN: XDJFRS
DOI: 10.21285/1814-3520-2023-3-527-538

ЭНЕРГЕТИКА



Интеллектуальная поддержка принятия решения по вводу мощностей малой гидроэлектростанции в Республике Тыва

Т.В. Кривенко^{1✉}, В.А. Тремясов², К.В. Кенден³, В.Е. Кожемякин⁴

^{1,2}Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³Тувинский государственный университет, г. Кызыл, Россия

⁴Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Резюме. Цель – развитие метода принятия технических решений в части системы генерации при вводе мощностей малых гидроэлектростанций в Республике Тыва с учетом надежности функционирования оборудования и неопределенности части исходной информации. В качестве исходной информации используются цены на приобретаемое оборудование, стоимость дизельного топлива в будущем времени и др. В данных исследованиях использован метод комплексного анализа эффективности технических решений автономной системы генерации от малой гидроэлектростанции, расположенной в Тоджинском районе Республики Тыва на основе системного подхода. Для адекватной оценки надежности функционирования гидроэнергетических агрегатов использован логико-вероятностный метод на основе кинетической теории дерева отказов. Метод позволяет учесть отказы используемого оборудования, а также незапланированные отключения агрегатов из-за дефицита гидроресурсов р. Большой Енисей (межень, пересыхание, частичное промерзание реки). Создание системы генерации от малой гидроэлектростанции для населенных пунктов Тоджинского района Республики Тыва позволяет покрыть нагрузку до 2 500 кВт, что способствует сокращению затрат на покупку, доставку и хранение дизельного топлива, при этом дизельные генераторы используются как резервные источники электроэнергии. Были рассмотрены 3 варианта состава малой гидроэлектростанции, отличающиеся количеством и установленной мощностью гидрогенерирующих агрегатов: 5х500 кВт; 4х630 кВт и 3х800 кВт. Таким образом, при помощи метода многокритериальной оптимизации из трех предлагаемых вариантов выбран оптимальный вариант системы генерации от малой гидроэлектростанции с тремя гидроагрегатами (мощностью 800 кВт каждый), учитывая надежность и неопределенность части исходной информации

Ключевые слова: малая гидроэлектростанция, функция принадлежности, эффективность технических решений, оценка надежности, дерево отказов

Для цитирования: Кривенко Т.В., Тремясов В.А., Кенден К.В., Кожемякин В.Е. Интеллектуальная поддержка принятия решения по вводу мощностей малой гидроэлектростанции в Республике Тыва // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 3. С. 527–538. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-527-538>. EDN: XDJFRS.

POWER ENGINEERING

Original article

Intelligent decision-making support system for the commissioning of a small hydroelectric power plant in the Republic of Tyva

Tatyana V. Krivenko^{1✉}, Vladimir A. Tremyasov², Kara-kys V. Kenden³,
Vyacheslav E. Kozhemyakin⁴

^{1,2}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

³Tuvan State University, Kyzyl, Russia

⁴Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. This article develops the method for decision-making regarding the generating system during the commissioning of small hydroelectric power plants in the Republic of Tyva, taking into account the operational reliability of equipment and the uncertainty associated with a fraction of the initial information. The initial information includes such factors as the prices of equipment and projected expenses for diesel fuel. In this work, the method of complex analysis based on a systematic approach is used to evaluate the efficiency of technical solutions for an autonomous generation

system based on a small hydropower station located in the Todzhinsky district of the Republic of Tyva. For an adequate assessment of the operational reliability of hydropower units, a logical and probabilistic method based on the kinetic theory of fault tree was used. The method allows the failures of the used equipment, as well as unplanned shutdowns of units due to a shortage of water resources in the Great Yenisey (low water, overdrying, and frozen frost), to be taken into account. The development of a generation system based on a small hydroelectric power plant for the settlements in the Todzhinsky district of the Republic of Tyva offers a load of up to 2,500 kW, which helps to reduce the cost of purchasing, delivering, and storing diesel fuel, while diesel generators can be used as backup power sources. 3 scenarios of structuring a small hydroelectric power plant were considered that involved various numbers and total capacity of hydrogenating units: 5x500 kW, 4x630 kW, and 3x800 kW. Therefore, by using the multi-criteria optimization method, the optimal structure of the generating system based on a small hydroelectric power plant having three hydroelectric units (each characterized by a capacity of 800 kW) was selected from the three proposed options, taking into account the reliability and uncertainty of the initial information.

Keywords: small hydroelectric power station, membership function, efficiency of engineering solutions, reliability assessment, fault tree

For citation: Krivenko T.V., Tremyasov V.A., Kenden K.V., Kozhemyakin V.E. Intelligent decision-making support system for the commissioning of a small hydroelectric power plant in the Republic of Tyva. *iPolytech Journal*. 2023;27(3):527-538. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-3-527-538>. EDN: XDJFRS.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время большинство задач оптимизации систем энергообеспечения с использованием гидроэлектростанций (ГЭС) решается с помощью основного критерия – приведенных затрат. Лучшим вариантом считается тот, который имеет меньшие затраты. В таких расчетах для всех рассматриваемых вариантов качество электроэнергии и надежность генерирующей системы с использованием ГЭС принимаются одинаковыми. Однако показатели качества электроэнергии и надежности не являются одинаковыми для сравниваемых вариантов, но могут находиться в допустимых границах.

Также задачи оптимизации таких энергетических объектов отличаются отсутствием части исходной информации (цена на используемое оборудование, стоимость дизельного топлива в будущем времени и другое), для учета которой в расчетах можно указать границы интервала значений от минимума до максимума.

Решение задач оптимизации генерирующих систем на основе ГЭС по многокритериальным моделям в условиях неопределенности начальной информации возможно на основе теории принятия решений⁵ [1]. Доступностью и возможностью получения исходной информации определяются используемый математический аппарат и способ решения.

Целью работы является разработка подхода для принятия решений в части системы генерации при вводе мощностей малых ГЭС (МГЭС) в Республике Тыва с учетом надежности.

ОЦЕНКА ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕКИ БОЛЬШОЙ ЕНИСЕЙ

Чтобы оценить возможности развития малой гидрогенерации электроэнергии, а также определить перспективные места строительства гидроэлектростанций, необходимо оценить гидроэнергетический потенциал рек Республики Тыва.

В центральной части Республики при слиянии двух рек (Большой Енисей и Малый Енисей) образовался Верхний Енисей (рис. 1). Бассейн Большого Енисея перспективен для строительства малых ГЭС, поскольку он имеет большой гидроэнергетический потенциал и протекает в районах с децентрализованным электроснабжением (Тоджинский, Бий-Хемский районы).

Места строительства малых ГЭС выбирают с учетом подходящих условий. На рис. 1 видно, что наиболее подходящим расположением являются створы 5–10 (легкодоступные места строительства, близкое расположение населенных пунктов, а также дизельных электростанций (ДЭС)).

Для створов 5, 6 и 7 рассчитаны величины среднегодовых расходов воды Q , при выбранном значении напора (табл. 1) по методу линейного учета [2].

Из анализа гидроэнергетических ресурсов Республики Тыва следует, что параметры рек (скорость потока, глубина, секундный расход) являются переменными и зависящими от многих факторов (помесячное распределение осадков, температурный режим и др.). Также водотоки характеризуются большими сезон-

⁵Тремясов В.А., Кривенко Т.В. Теория принятия решений в электроэнергетике: учеб. пособ. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. 126 с.

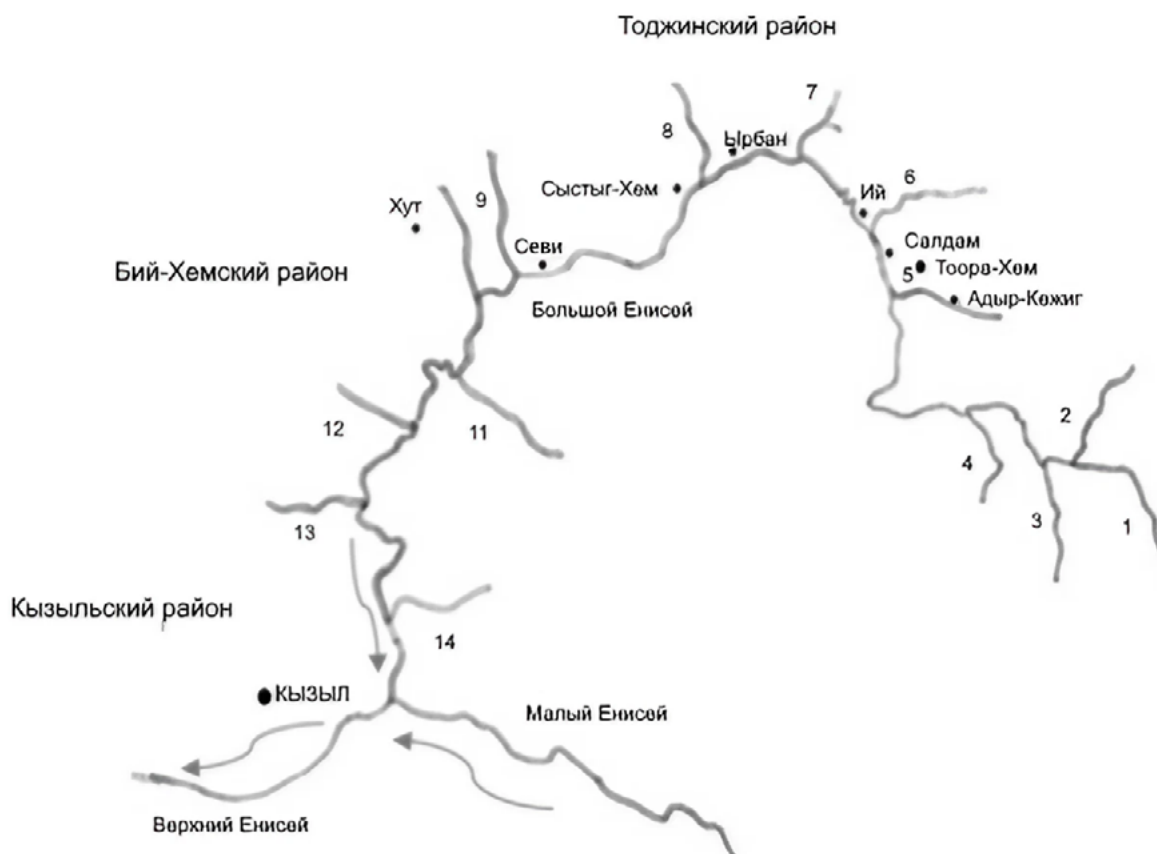


Рис. 1. Речная сеть бассейна реки Большой Енисей
Fig. 1. The river network of the Bolshoy Yenisei river basin

ными изменениями параметров. Так, скорость потока изменяется в диапазоне в 2–4 раза; глубина – в 1,3–2 раза; секундный расход – до 50 раз.

Закон их распределения близок к нормальному, а параметры рассеяния весьма стабильны. Коэффициент вариации скорости колеблется от 0,11 до 0,25, а коэффициент вариации секундного расхода – от 0,15 до 0,3.

Таблица 1. Рассчитанные значения среднегодовых расходов воды в створах
Table 1. Calculated values of average annual water flow in sections

№ створа i	Створ	Модуль среднегодового стока m , л/(с·км ²)	Площадь водосборной поверхности бассейна F , км ²	Рассчитанный среднегодовой расход воды в створе, Q_p м ³ /с
5	Тоора-Хем	12,25	2768	33,9
6	Ий	11,35	1031	11,7
7	Хамсара	12,35	4754	58,7

Целесообразно рассмотреть створ 5 для снабжения электроэнергией селений Тоджинского района, поскольку выбранный створ имеет малый расход воды и большие уклоны русла. Предлагается для создания напора применить отвод части стока реки. Отвод воды из реки возможно выполнить, используя в качестве искусственного водовода левобережную протоку реки Большой Енисей. Водовод для создания хранения воды необходимо расширить и углубить, а также оградить дамбой для создания напора. Наиболее оптимальной будет схема с искусственно созданным водоемом, аккумулирующим объем воды. В соответствии с этим, сброс воды из реки осуществляется в бассейн, расположенный ниже по течению, который функционирует как водохранилище.

В часы потребления малой мощности МГЭС вода аккумулируется в специальном резервуаре для снижения пиковых нагрузок.

При описанной выше схеме напор составит 8–11 м. Эксплуатация описанной выше МГЭС способствует использованию малой пропускной способности водозаборного канала. При этом обеспечивается равномерная доставка воды в аккумулирующий водоем.

НЕЧЕТКАЯ МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ГЕНЕРИРУЮЩИХ СИСТЕМ МАЛЫХ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Принятие технического решения – это проблема выбора стратегических решений, которая часто характеризуется множественными, конфликтующими и несоизмеримыми критериями. Критерии способны иметь количественный и качественный характер. Может существовать большое количество критериев и некоторые из них оказывают гораздо большее влияние на окончательную оценку. Такая оценка носит многокритериальный анализ.

Принятие технического решения генерирующих систем МГЭС разделяется на два этапа: предварительное составление и отбор вариантов системы генерации от МГЭС и окончательная оценка с помощью теории нечетких множеств (ТНМ).

ТНМ преобразует различные критериальные показатели с помощью функции принадлежности (исчисляемые критерии), или составления таблицы принадлежностей экспертами или лицами, принимающими решение на этапе планирования (неисчисляемые критерии) [3, 4].

Многокритериальные подходы способны решать вопросы, содержащие различные противоречивые оценки в форме интегрированной оценки (свертка критериальных свойств), преобразующие основные количественные или качественные показатели системы генерации от МГЭС в единый критерий эффективности.

Ниже представлены свертки многокритериальных оценок [4]:

– средняя арифметическая линейная форма свертки

$$F_{\text{ср.А}}^* = \sum_{i=1}^n v_i e_{ij} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (1)$$

– мультипликативная форма

$$F_{\text{М}}^* = \prod_{i=1}^n (e_{ij})^{v_i} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (2)$$

– аддитивная форма свертки

$$F_{\text{А}}^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n v_i e_{ij}} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (3)$$

– средняя гармоническая форма свертки

$$F_{\Gamma}^* = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_{ij}} \right)^{-1} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1, \quad (4)$$

где F^* – оценочный функционал, представленный единым комплексным (скалярный) критерием; e_{ij} – оценка i -го частного критерия в j -м варианте; n – число частных критериев оценки в рассматриваемой задаче; v_i – весовость частного критерия.

Выбор формы свертки определяется самостоятельно. Метод облегчает сравнение различных значений путем преобразования в нечеткие числа из диапазона [0:1].

В качестве оптимального варианта системы генерации от МГЭС выбирается тот, у которого достигается наибольшая оценка эффективности по выражениям (1)–(4).

Для формирования относительных оценок весовости критериальных свойств (КС) v_j систем генерации от МГЭС целесообразней использовать метод ранговой корреляции [5].

Определение эффективности e_j для j -го КС выполняется на основе рассчитанных показателей свойств у сравниваемых вариантов или посредством экспертной оценки.

Показатели, описывающие существенные свойства системы генерации от малой ГЭС, имеют разный характер и размерность. С помощью функции принадлежности необходимо устранить различную размерность путем нормирования.

Основной характеристикой нечетких множеств являются их функции принадлежности. На практике используются такие функции, как треугольные, трапециевидные, гауссовы, колоколообразные и некоторые другие типы функций [6]. Каждая из этих типов функций характеризуется рядом параметров, которые могут быть использованы для построения функции принадлежности конкретного нечеткого множества. Соответственно, тип функции принадлежности важен для конкретной задачи, поскольку он влияет на систему нечеткого вывода. Единственное условие, которому должна удовлетворять функция, это то, что она обязана варьироваться от 0 до 1.

Для определения значений параметров функции принадлежности конкретного нечеткого множества используются различные подходы построения [3]. В данной работе применен метод экспертных оценок, основанный

на определении и измерении численных значений КС.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ОТ МГЭС «ТООРА-ХЕМ»

Одной из проблем оценки надежности рассматриваемой системы электроснабжения от МГЭС является использование упрощенного подхода к такой оценке и получение завышенных величин показателей надежности. Для количественной оценки надежности малых гидроэлектростанций был предложен целый ряд методов [7–10], которые не учитывают отказ гидроагрегатов (ГА) по причине дефицита гидроресурсов. В [11,12] используется марковский подход, учитывающий влияние гидрологических условий на работу малых ГЭС. Однако при значительном числе элементов число линейных уравнений становится недопустимо большим.

Задача адекватного моделирования надежности системы генерации МГЭС, которая позволяет учитывать отказы используемого оборудования, а также брать в расчет незапланированные отключения ГА из-за дефицита гидроресурсов (межень, пересыхание, частичное промерзание реки), может быть решена с помощью кинетической теории дерева отказов (ДО) [13].

Анализ надежности системы генерации МГЭС с помощью кинетической теории ДО представляет собой графическую модель, позволяющую описывать отказы, которые могут возникнуть в системе, и то, как эти отказы взаимодействуют, вызывая отказ системы в целом. На рис. 2 указаны стандартные или статические операторы, позволяющие учесть отказы ГА, выключателей, трансформаторов и другого оборудования МГЭС.

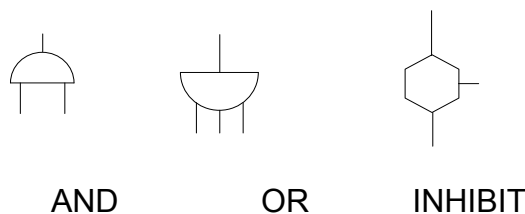


Рис. 2. Статические операторы дерева отказов
Fig. 2. Static operators of the fault tree

Операторы **AND** и **OR** позволяют учитывать исполнения входных событий, влияющих на возникновение выходного события.

Отказы ГА по причине отсутствия распадающейся энергии водного потока реки позволяют

учесть статический оператор **INHIBIT** («Запрет» выходное событие возникает, если происходит входное событие, в то время как также происходит условное событие, отображаемое справа от оператора). Если происходит промерзание реки в зимний период, а также преобладает низкий уровень воды в реке в осенний или весенний период, работа ГА должна быть прекращена (полный отказ агрегата). Условное (ограничительное) событие определяется с помощью ряда наблюдений водотока за год в месте расположения МГЭС.

При анализе надежности в используемой модели не учитывается только изменение нагрузки системы как внешнего фактора окружающей среды в связи с тем, что интенсивность отказов ГА не зависит от нагрузки.

Моделировать работу ГА, выключателей и силовых трансформаторов системы генерации МГЭС и их взаимодействие, а также их функциональные зависимости или зависимости отказов, возможно с использованием динамических операторов (см. рис. 1).

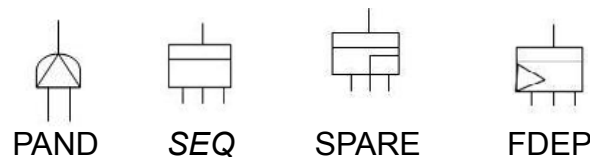


Рис. 3. Динамические операторы дерева отказов
Fig. 3. Dynamic operators of the fault tree

Оператор **PAND** (приоритетное И) используют, если все входные события выполняются слева направо.

SEQ (строгая последовательность возникновения входных событий). Выходное событие возникнет только, если выходные события происходят в строго определенном порядке.

SPARE (состояние резерва) моделирует оборудование системы, которое может быть заменено одним или несколькими резервными элементами. Когда основное оборудование выходит из строя, активируется первый резервный элемент. По условию, запасные элементы упорядочены слева направо.

FDEP (функциональная зависимость) выходное событие является фиктивным и никогда не происходит, но когда происходит триггерное событие слева, все остальные входные события также происходят.

В кинетической теории динамические операторы требуют применения

дополнительных методов для их анализа [14–17]. Поскольку в автономной системе генерации МГЭС имеется небольшое количество оборудования, отказы которого необходимо учесть, для представления динамических операторов подходит марковская модель [18].

Количественная оценка кинетического ДО позволяет получить информацию о завершающем (конечном) событии – отказ системы генерации от МГЭС. К такому показателю относится коэффициент простоя системы ($K_{п}$):

$$K_{п(с)} \approx \sum_{i=1}^{N_c} (q_i^* + q_i^{*оп})$$

где q_i – вероятность существования i -го МСО; $q_i^{*оп}$ – вероятность существования i -го МСО при включении k -го динамического оператора; N_c – число минимальных сечений отказов в кинетическом ДО.

Информацией об основных событиях являются показатели надежности отдельных элементов системы генерации МГЭС: интенсивность отказов – λ_j , 1/год; интенсивность восстановлений – μ_j , 1/год, тогда коэффициент простоя элемента системы генерации от МГЭС при $t \rightarrow \infty$ и при $\lambda_j / \mu_j \ll 1$ равен

$$q_j(t) = \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu_j} \approx \frac{\lambda_j}{\mu_j}. \quad (6)$$

Вероятность существования i -го МСО в кинетическом ДО определяется по формулам:
 – при отсутствии в i -м МСО k -го динамического оператора

$$q_i^{*оп} = \prod_{k=1}^m q_k^{*оп} \prod_{j=1}^n q_j; \quad (7)$$

– при включении в i -е МСО k -го динамического оператора

$$q_i^{*i} = \prod_{k=1}^m q_k^{*i} \prod_{j=1}^n q_j \quad (8)$$

Кинетическая теория ДО для расчета надежности системы генерации от МГЭС реализована с помощью интегрированной среды разработки программ Lazarus, использующая язык Free Pascal⁶. Программа позволяет определять минимальные сечения построенного ДО, дает информацию об основном событии каждого минимального сечения, а также информацию о каждом сечении дерева и о завершающем событии – отказ системы.

Произведем расчет надежности с учетом гидрологических условий Тоджинского района Республики Тыва для различных вариантов схемы выдачи мощности от МГЭС с помощью кинетической теории ДО. На рис. 2 приведена схема выдачи мощности от МГЭС для первого варианта (5хГА по 500 кВт).

МГЭС расположена на расстоянии 22 км от Большого Енисея на реке Бий-Хем. Передача мощности в населенные пункты выполняется на напряжении 35 кВ. Повысительная трансформаторная подстанция (ТП) 10/35 кВ с двумя трансформаторами по 1000 кВ·А установлена на МГЭС. Понижительная ТП размещена в селах. ДЭС является резервным источником питания при отказах в работе малых ГЭС.

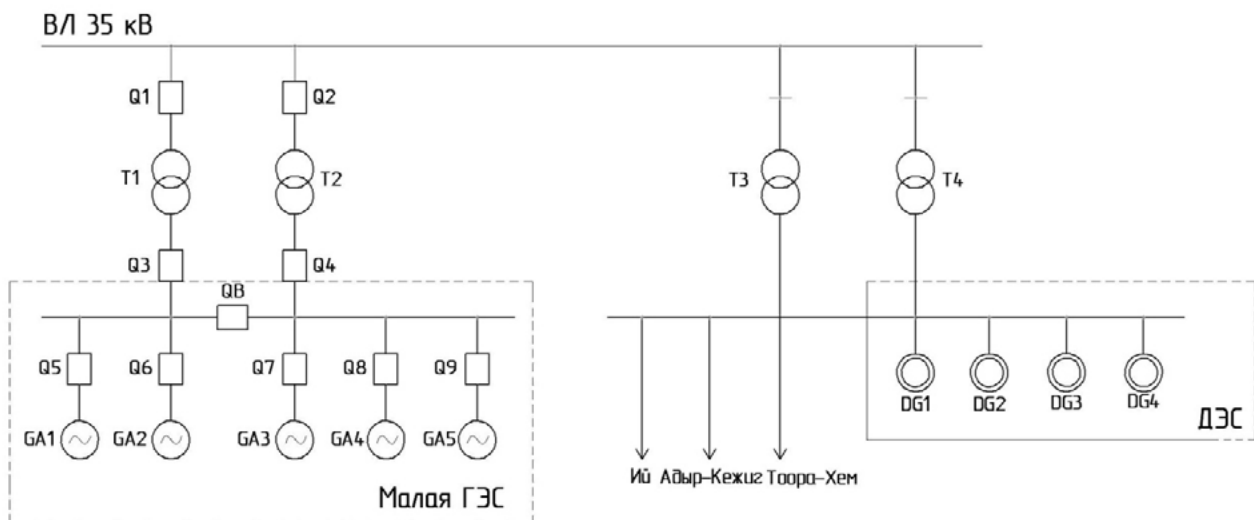


Рис. 4. Система генерации от малых гидроэлектростанций
 Fig. 4. Small hydroelectric power plant generation system

ДО для варианта системы генерации от МГЭС с пятью ГА по 500 кВт приведено на рис. 5. Конечным событием ДО является «Отказ системы генерации МГЭС».

Показатели надежности оборудования МГЭС представлены в табл. 2 [19].

Таблица 2. Показатели надежности системы генерации малых гидроэлектростанций
Table 2. Reliability indicators of the small hydroelectric power plant generation system

Элемент системы	Интенсивность отказов λ , 1/год	Интенсивность восстановления μ , 1/год
Гидроагрегат	0,1	50
Трансформатор 35 кВ	0,012	125
Выключатель 10 кВ	0,030	769,23
Дизельные генераторы	0,025	66,7

Таблица 3. Результаты оценки надежности вариантов системы выдачи мощности от малых гидроэлектростанций
Table 3. Reliability assessment results of power output system variants of small hydropower plants

Показатель y_j	Мощность ГА N_j , кВт		
	500	630	800
Число агрегатов n_j^a	5	4	3
Коэффициент простоя, K_n	$2,789 \cdot 10^{-6}$	$2,790 \cdot 10^{-6}$	$3,566 \cdot 10^{-6}$

В табл. 3 приведены результаты оценки надежности различных вариантов системы выдачи мощности от МГЭС для сел Тоджинского района Республики Тыва.

ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ОТ МАЛОЙ ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «ТООРА-ХЕМ»

Электроснабжение поселков Тоора-Хем, Адыр-Кежиг и Ий Тоджинского района Республики Тыва в настоящее время осуществляется за счет нескольких ДГ, расположенных в селении Тоора-Хем, общей мощностью 2400 кВт (рис. 6).

Предложены три варианта состава малой МГЭС с установленной мощностью не меньше вечернего зимнего максимума нагрузки потребителей поселков. На малой ГЭС предлагается установить пропеллерные турбины компании

«ИНСЭТ» [20]: пять ГА мощностью по 500 кВт, четыре ГА мощностью по 630 кВт и три ГА мощностью по 800 кВт.

Для технико-экономического расчета трех вариантов МГЭС исходными данными являются:

1) среднее потребление электрической энергии за год – $W_{\text{потр}} = 8\,399$ МВт·ч/год;

2) средняя выработка электрической энергии за год с учетом надежности работы МГЭС, $W_{\text{МГЭС}}$, для трех вариантов, соответственно: 6359; 7424 и 7961 МВт·ч/год;

3) стоимость оборудования МГЭС, $C_{\text{МГЭС}}$, тыс. руб.

Определим приемлемый вариант состава МГЭС сверткой многокритериальных экспертных оценок в контексте неопределенности.

Группой компетентных лиц в области проектирования и эксплуатации ГЭС сформулирован массив показателей, на основе которых осуществляется сравнение альтернативных вариантов:

1) максимум экономичности технического решения МГЭС;

2) максимум надежности функционирования МГЭС;

3) минимальный срок строительства МГЭС;

4) минимум объема строительно-монтажных работ (СМР);

5) максимум технического совершенства МГЭС.

При вычислении весовостей КС необходимо придерживаться следующих условий:

По методу С.Н. Черникова [21], система неравенств (9) свертывается относительно v_5 . После шага III получим $v_5 \leq 1/5$.

Аналогичной процедурой свертывания

$$v_1 < v_2 + v_3, v_1 \geq v_3 + v_4, v_2 < v_3 + v_4, v_2 \geq v_3 + v_5, v_3 \geq v_4 + v_5, v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 = 1. \quad (9)$$

системы неравенств (9) относительно v_4, v_3, v_2 и v_1 получаем следующее:

$$0 < v_4 < 1/4; 1/6 < v_3 < 1/3; 1/4 < v_2 < 1/2; 0 < v_1 < 5/12. \quad (10)$$

Условиям (10) могут удовлетворять большое количество различных вариантов весовостей КС. Поэтому по (10) необходимо проверить

⁶Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660562 Российская Федерация. Программа расчета надежности автономного ВДК / Т.В. Кривенко, В.А. Тремясов; правообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет». № 2018618137; заявлено 30.07.2018; опубликовано 24.08.2018.

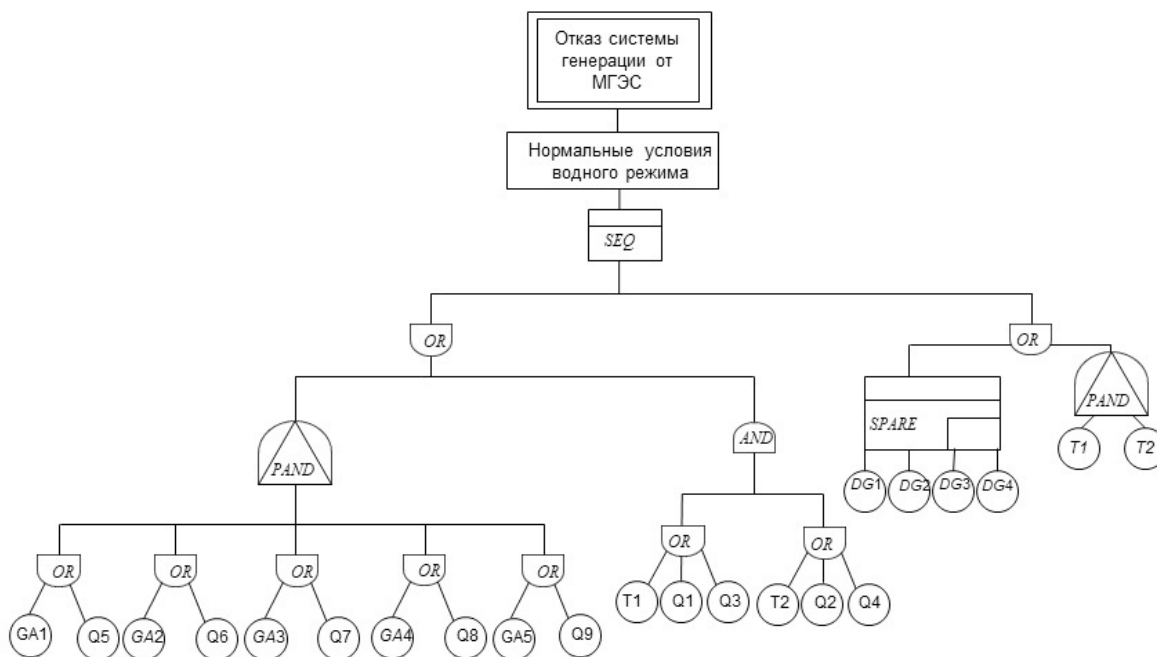


Рис. 5. Дерево отказов для I варианта схемы генерации от малой гидроэлектростанции (5хГА по 500 кВт)
 Fig. 5. Fault tree for the I variant of the generation scheme from a small hydroelectric power plant (five 500 kW hydro units)

оценки, данные лицами, расценивающими КС. Приняты три альтернативных варианта весовых коэффициентов, которые удовлетворяют условиям выше (табл. 4).

Таблица 4. Варианты весовостей КС
 Table 4. Variants of weighting criteria properties

№ варианта	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5
I	0,1	0,2	0,2	0,25	0,25
II	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3
III	0,1	0,15	0,2	0,3	0,25

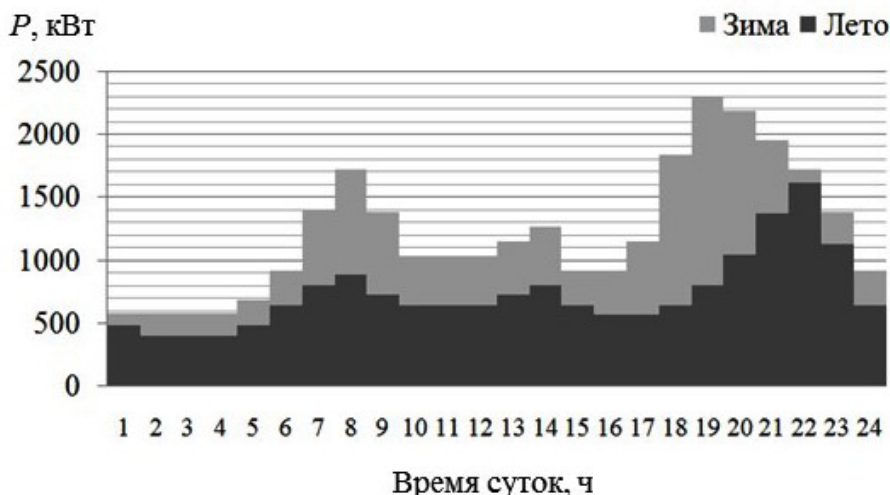


Рис. 6. Суточные графики суммарной нагрузки поселков
 Fig. 6. Daily graphs of the total load of settlements

Лицами, выполняющими оценку альтернатив и взвешивание критериев, также определены технико-экономические показатели y_i МГЭС для пяти КС, назначены способы для их измерений и оценки e_{ik} (табл. 5):
 КС 1 – минимум приведенных затрат (З), тыс. руб/год;

КС 2 – минимум коэффициента простоя системы генерации МГЭС, K_p , о.е.;
 КС 3 – минимум срока строительства МГЭС, $T_{стр}$, лет;
 КС 4 – минимум объема СМР МГЭС $O_{СМР}$, M^3 ;
 КС 5 – минимум влияния МГЭС на окружающую среду, Q.

Таблица 5. Техничко-экономические показатели y_i малых гидроэлектростанций
Table 5. Technical and economic indicators y_i of small hydropower stations

Показатель	Мощность ГА N_j , кВт		
	500	630	800
Количество ГА n_j^e	5	4	3
Экономичность технического решения Z , тыс. руб/год	60 334	53 246	46 816
Надежность функционирования K_n	$2,789 \cdot 10^{-6}$	$2,790 \cdot 10^{-6}$	$3,565 \cdot 10^{-6}$
Срок строительства малой ГЭС $T_{стр}$, лет	1	1,5	1,75
Объем строительно-монтажных работ малой ГЭС $O_{СМР}$, м ³	7 200	7 560	7 500
Влияние малой ГЭС на окружающую среду Q , (место в порядке убывания КС)	3	2	1

Функция принадлежности $\mu(x)$ позволяет ранжировать критерии в порядке их важности. Наименее важным критериям присваивается минимальное значение, наиболее важным – максимальное. Вес критериев может быть рассчитан путем нормализации суммы баллов к единице. Таким образом, $\mu(x) = 1$ для оптимального варианта состава оборудования МГЭС и $\mu(x) = 0$ – для неоптимального варианта.

В работе выбор формы $\mu(x)$ выполнялся экспертным путем посредством установки правил поведения функции принадлежности [22] и реализовывался для групп факторов:

- показателей надежности (коэффициент простоя);
 - стоимостных показателей (приведенные затраты);
 - показателей СМР (сроки, объемы СМР).
- Функция принадлежности может быть пре-

образована следующим образом:
где X_i – критерий; X_{\min} , X_{\max} – наиболь-

$$\mu(x) = \begin{cases} 1, \text{ если } X_i \leq X_{\min} \\ \left[\frac{1}{1 + \left(\frac{X_i - X_{\min}}{\frac{X_{\max} + X_{\min}}{2}} \right)^2} \right] \text{ если } X_i > X_{\min} \end{cases} \quad (11)$$

шее и наименьшее значения критерия. Нормирование частных критериев по (11) выполнялось с помощью компьютерной программы Fuzzi, разработанной для сравнения вариантов на основе ТНМ.

Расчет численных значений $\mu(x)$ для каждого из 5 критериев к оптимальным приведен в табл. 6. А также приведены оценки эффективности вариантов, расчет которых производился по формулам (1), (2) и (4) для ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , соответственно.

Вычисления показывают, что третий вариант состава малой ГЭС является оптимальным, в его составе три гидроагрегата мощностью по 800 кВт каждый. Для первого и второго вариантов оценки ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 , ниже, чем для третьего варианта, что свидетельствует о недопустимости принятия вариантов с наихудшими оценками частных критериев эффективности свойств.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из трех предлагаемых вариантов состава МГЭС выбран оптимальный для селений Тоджинского района Республики Тыва посредством метода многокритериальной оптимизации с учетом надежности работы оборудования МГЭС и неопределенности части исходной информации. Результаты можно представить следующим образом:

- оптимальным является состав МГЭС с тремя ГА мощностью 800 кВт каждый;

Таблица 6. Расчет обобщенного критерия для каждого j -го варианта системы генерации малых гидроэлектростанций

Table 6. Calculation of the generalized criterion for each j -th variant of the small hydropower plant generation system

Вариант	Нормированные значения частных критериев μ_x					Оценки j			Оценки j	
	1	2	3	4	5	I	II	III	j	j
1	0,94	1	1	1	0,33	0,83	0,79	0,83	0,75	0,66
2	0,97	1	0,88	0,99	0,67	0,89	0,87	0,89	0,88	0,86
3	1	1	0,77	0,99	1	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94

– для оптимального варианта приведенные затраты составляют 46 816 тыс. руб/год, что гораздо меньше, чем у двух других предложенных вариантов;

– из кинетической теории ДО K_n для третьего варианта равен $3,565 \cdot 10^{-6}$, что говорит о достаточно высокой надежности;

– срок строительства системы генерации МГЭС с 3 ГАх800 кВ составляет 1,75 лет;

– объем строительно-монтажных работ для оптимального варианта равен 7500 м³.

При реализации предложенного стро-

ительства малой ГЭС для обеспечения электроэнергией селений Тоджинского района Республики Тыва достигаются следующие результаты:

– ДЭС будет полностью заменена на малую ГЭС, покрывающую нагрузку до 2500 кВт;

– ДГ будет применяться в качестве вспомогательного источника питания при аварийных ситуациях на малой ГЭС или в случае увеличения нагрузки более 2500 кВт;

– уменьшатся годовые затраты на покупку и доставку топлива для ДГ.

Список источников

1. Долгов П.П., Щавелев Д.С. Многокритериальные задачи в гидроэнергетике и водном хозяйстве // Труды ЛПИ им. М.И. Калинина. 1981. № 375. С. 9–12.
2. Котельников В.И., Чуликова С.А. Расчет гидроэнергетического потенциала рек на территории Тывы с помощью ГИС // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 3-3. С. 455–459.
3. Kovalenko I.V., Tremyasov V.A., Belov V.G. Intelligent control support for reconstruction of electrical circuits of station and substations // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 1889. Iss 4. P. 042048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042048>.
4. Тремясов В.А., Григорьева О.А., Кенден К.В. Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно-дизельных систем генерации // iPolytech Journal. 2021. Т. 25. № 5. С. 601–610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.
5. Азгальдов Г.Г., Райхман Э.П. О квалиметрии. М.: Изд-во стандартов, 1973. 282 с.
6. Ismibayli R., Guliyeva P., Ahmadli N. On the construction of membership functions for fuzzy sets associated with // RT&A. 2022. Vol. 17. Iss. 4. P. 367–371.
7. Тремясов В.А., Кенден К.В., Кривенко Т.В. Оценка надежности системы генерации малых ГЭС в изолированных энергосистемах // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сб. тр. IIIV междунар. науч.-техн. конф. (г. Благовещенск, 27 мая 2015 г. – 29 мая 2012 г.). Благовещенск: АмГУ, 2015. С. 143–147. EDN: VAILDL.
8. Majeed A.R., Sadiq N.M. Availability & Reliability Evaluation of Dokan Hydro Power Station // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. <http://doi.org/10.1109/TDCLA.2006.311494>.
9. Sapkota D., Bajracharya T.R., Luintel M.C. Reliability and availability evaluation of Sunkoshi hydro power station // Proceedings of IOE graduate Conference. 2014. Vol. 2. P. 197–202.
10. Sharma R., Bhatrai N. Reliability based maintenance in hydropower: a case study of Bijaypur-i small hydropower plant // Journal of innovations in engineering education. 2020. Vol. 3. Iss. 1. P. 123–130. <http://doi.org/10.3126/jiee.v3i1.34333>.
11. Ale T.O., Olufeagba B.J., Oyeleye M.O. A Markov model of generator performance at the Kainji hydro-power station in Nigeria // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 3585–3592. <http://doi.org/10.11591/ijec.v13i4.pp3585-3592>.
12. Кенден К.В. Оценка надежности системы генерации малых ГЭС на примере Тоджинского района // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. 2020. № 2. С. 31–40. <https://doi.org/10.24411/2221-0458-2020-10032>. EDN: UCAJIC.
13. Тремясов В.А., Кривенко Т.В. Анализ надежности автономного гибридного энергокомплекса на основе возобновляемых источников энергии // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2017. № 1. С. 43–51.
14. Huang Chin-Yu, Chang Yung-Ruei. An improved decomposition scheme for assessing the reliability of embedded systems by using dynamic fault trees // Reliability Engineering & System Safety. 2007. Vol. 92. Iss. 10. P. 1403–1412. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2006.09.008>.
15. Amari S., Dill G., Howald E. A new approach to solve dynamic fault trees // Annual Reliability and Maintainability Symposium (Tampa, 27–30 January 2003). Tampa: IEEE, 2003. P. 374–379.
16. Bobbio A., Portinale L., Minichino M., Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks // Reliability Engineering & System Safety. 2001. Vol. 71. Iss. 3. P. 249–260. [http://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00077-6](http://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6).
17. Rao K.D., Gopika V., Rao V.V.S.S., Kushwaha H.S., Verma A.K., Srividya A. Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment // Reliability Engineering & System Safety. 2009. Vol. 94. Iss. 4. P. 872–883. <http://doi.org/10.1016/j.ress.2008.09.007>.
18. Эндрени Дж. Моделирование при расчетах надежности в электроэнергетических системах / пер. с англ.; ред. Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1983. 336 с.
19. Тремясов В.А., Кенден К.В. Фотоэлектрические и гидроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2017. 208 с.
20. Бляшко Я.И. Опыт МНТО «ИНСЭТ» по созданию и эксплуатации оборудования для микро- и МГЭС // Малая энер

гетика. 2004. № 1. С. 28–33.

21. Черников С.Н. Метод свертывания систем линейных неравенств // Успехи математических наук. 1964. Т. 19. № 5. С. 149–156.

22. Aida-Zade K.R., Guliyeva P.S., Ismibayli R.E. Analysis of the methods for constructing membership functions using expert data // Recent Developments and the New Directions of Research, Foundations, and Applications. Studies in Fuzziness and Soft Computing / eds. S.N. Shahbazova, A.M. Abbasov, V. Kreinovich, J. Kacprzyk, I.Z. Batyrshin. Cham: Springer, 2023. Vol 422. P. 361–365. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20153-0_29.

References

1. Dolgov P.P., Shchhavelev D.S. Multicriteria problems in hydropower engineering and water management. In: *Trudy Leningradskogo politehnicheskogo instituta imeni M. I. Kalinina*. 1981;375:9-12. (In Russ.).
2. Kotel'nikov V.I., Chupikova S.A. GIS-based calculation of the hydropower potential of rivers in the territory of Tyva Republic. *Mezhdunarodnyj zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya = International Journal of experimental education*. 2015;3-3:455-459. (In Russ.).
3. Kovalenko I.V. Tremyasov V.A., Belov V.G. Intelligent control support for reconstruction of electrical circuits of station and substations. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1889(4):042048. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042048>.
4. Tremyasov V.A., Grigorieva O.A., Kenden K.V. Multi-criteria approach to selecting sites for solar-diesel hybrid systems. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):601-610. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.
5. Azgaldov G.G., Reichman E.P. *On qualimetry*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1973, 282 p. (In Russ.).
6. Ismibayli R., Guliyeva P., Ahmadli N. On the construction of membership functions for fuzzy sets associated with. *RT&A*. 2022;17(4):367-371.
7. Tremyasov V.A., Candyen K.V., Krivenko T.V. Articles poll reliability small hydroelectric generation system in isolated power supply system. In: *Energetika: upravlenie, kachestvo i effektivnost' ispol'zovaniya energoresursov: sbornik trudov IIIV mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Energy: management, quality and efficiency of energy resources use: collected works of the 8th international scientific and technical conference*. 27 May 2015 – 29 May 2012, Blagoveshchensk. Blagoveshchensk: Amur State University; 2015, p. 143-147. (In Russ.). EDN: VAILDL.
8. Majeed A.R., Sadiq N.M. Availability & reliability evaluation of Dokan hydro power station. In: *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*. 2006. <http://dx.doi.org/10.1109/TDCLA.2006.311494>.
9. Sapkota D., Bajracharya T.R., Luintel M.C. Reliability and availability evaluation of Sunkoshi hydro power station. In: *Proceedings of IOE graduate Conference*. 2014;2:197-202.
10. Sharma R., Bhatrai N. Reliability based maintenance in hydropower: a case study of Bijaypur-i small hydropower plant. *Journal of innovations in engineering education*. 2020;3(1):123-130. <http://doi.org/10.3126/jiee.v3i1.34333>.
11. Ale T.O., Olufeagba B.J., Oyeleye M.O. A Markov model of generator performance at the Kainji hydro-power station in Nigeria // *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2023. Vol. 13. Iss. 4. P. 3585–3592. <http://doi.org/10.11591/ijece.v13i4.pp3585-3592>.
12. Kenden K.V. Estimation of reliability of small hydro power generation system (based on a sample of the Tozhu district). *Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskije i fiziko-matematicheskie nauki*. 2020;2:31-40. <https://doi.org/10.24411/2221-0458-2020-10032>. EDN: UCAJIC.
13. Tremyasov V.A., Krivenko T.V. Reliability analysis of an autonomous hybrid power system based on renewable energy sources. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*. 2017;1:43-51. (In Russ.).
14. Huang Chin-Yu, Chang Yung-Ruei. An improved decomposition scheme for assessing the reliability of embedded systems by using dynamic fault trees. *Reliability Engineering & System Safety*. 2007;92(10):1403-1412. <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.09.008>.
15. Amari S., Dill G., Howald E. A new approach to solve dynamic fault trees. In: *Annual Reliability and Maintainability Symposium 27–30 January 2003, Tampa*. Tampa: IEEE; 2003, p. 374-379.
16. Bobbio A., Portinale L., Minichino M., Ciancamerla E. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*. 2001;71(3):249-260. [http://doi.org/10.1016/S0951-8320\(00\)00077-6](http://doi.org/10.1016/S0951-8320(00)00077-6).
17. Rao K.D., Gopika V., Rao V.V.S.S., Kushwaha H.S., Verma A.K., Srividya A. Dynamic fault tree analysis using Monte Carlo simulation in probabilistic safety assessment. *Reliability Engineering & System Safety*. 2009;94(4):872-883. <http://doi.org/10.1016/j.res.2008.09.007>.
18. Endreny J. Reliability modelling in electric power systems, 1983, 336 p. (Russ. ed.: *Modelirovanie pri raschetah nadezhnosti v elektroenergeticheskikh sistemah*. Moscow, Energoatomizdat; 1983, 336 p.)
19. Tremyasov V.A., Kenden K.V. *Photovoltaic and hydropower installations in stand-alone power supply systems: monograph*. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; 208 p. (In Russ.).
20. Blyashko Ya.I. Experience of the International Scientific and Technical Society "INSET" in the development and operation of equipment for micro- and small hydroelectric power stations. *Malaya energetika*. 2004;1:28-33. (In Russ.).
21. Chernikov S.N. A convolution method for the systems of linear inequalities. *Uspekhi matematicheskikh nauk*. 1964;19(5):149-156. (In Russ.).
22. Aida-Zade K.R., Guliyeva P.S., Ismibayli R.E. Analysis of the methods for constructing membership functions using expert data. In: Shahbazova S.N., Abbasov A.M., Kreinovich V., Kacprzyk J., Batyrshin I.Z. (eds.). *Recent Developments and the New Directions of Research, Foundations, and Applications. Studies in Fuzziness and Soft Computing*. Cham: Springer, 2023, vol 422, p. 361-365. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20153-0_29.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кривенко Татьяна Витальевна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика»,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
✉ tkrivenko@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9458-047X>

Тремясов Владимир Анатольевич,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры «Электроэнергетика»,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
emf_tva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

Кенден Кара-кыс Вадимовна,

к.т.н., доцент кафедры
«Общеинженерные дисциплины»,
Тувинский государственный университет,
667000, г. Кызыл,
ул. Ленина, 36, Россия
kuca08@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

Кожемякин Вячеслав Евгеньевич,

аспирант,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
slava-kozhemyakin@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 18.08.2023 г.; одобрена после рецензирования 06.09.2023 г.; принята к публикации 10.09.2023 г.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Tatyana V. Krivenko,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Power
Engineering, Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ tkrivenko@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9458-047X>

Vladimir A. Tremyasov,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Electric Power
Engineering, Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
emf_tva@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8629-9549>

Kara-kys V. Kenden,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of General Engineering Disciplines,
Tuvan State University,
36 Lenin St., Kyzyl 667000, Russia
kuca08@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0975-3303>

Vyacheslav E. Kozhemyakin,

Postgraduate Student,
Siberian Federal University,
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
slava-kozhemyakin@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 18.08.2023; approved after reviewing 06.09.2023; accepted for publication 10.09.2023.