

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.311.21

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-263-9-67-76

С.В. Кандан, А.В. Бастрон, А.М. Ондар

S.V. Kandan, A.V. Bastron, A.M. Ondar

МЕТОДИКА КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ВНЕДРЕНИЯ ПИКО-ГЭС В УДАЛЕННЫХ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ХОЗЯЙСТВАХ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА

CLUSTERING METHODOLOGY FOR PLANNING THE IMPLEMENTATION OF PICO-HYDROELECTRIC POWER PLANTS ON REMOTE LIVESTOCK FARMS IN THE REPUBLIC OF TUVA

Ключевые слова: пико-ГЭС, отгонное животноводство, децентрализованное энергоснабжение, возобновляемые источники энергии, иерархическая кластеризация, гидроэнергетический потенциал малых рек.

Представлен методологический подход к решению актуальной проблемы энергоснабжения удалённых и изолированных животноводческих хозяйств в Республике Тыва, где традиционное отгонное животноводство сталкивается с отсутствием сетевой электрификации. Предлагается использование сверхмалых гидроэлектростанций (пико-ГЭС) мощностью до 5 кВт, способных эффективно работать на малых водотоках. Целью исследования является определение приоритетных районов для внедрения данной технологии на основе многокритериального анализа с учётом региональной специфики. Для этого разработана система из 4 ключевых критериев: удалённость от централизованных сетей, гидроэнергетический потенциал малых рек и ручьёв, уровень энергопотребления хозяйств, а также сезонность использования пастбищ. Качественные показатели по каждому критерию формализуются в порядковые или бинарные шкалы, после чего для классификации 17 кожуунов (районов) применяется метод иерархической кластеризации с метрикой Манхэттена и методом полной связи. Вычисление коэффициента кофенетической корреляции и силуэта подтверждает адекватность полученной кластеризации. В результате выделено 4 кластера районов с разной степенью приоритетности внедрения пико-ГЭС. На основе интегрального показателя приоритетности, рассчитанного как взвешенная сумма нормализованных критериев, ранжированы все 17 районов. Высокоприоритетными признаны Тоджинский и Монгун-

Тайгинский районы, где гидропотенциал сочетается с максимальной удалённостью от сетей; установка пико-ГЭС здесь экономически и социально обоснована. Второй и третий кластеры требуют технико-экономического обоснования или сезонных решений. Для районов с минимальным приоритетом (Эрзинский, Овюрский) применение пико-ГЭС нецелесообразно из-за низкого гидропотенциала или близости к ЛЭП. Предложенная методика позволяет объективно классифицировать территории, дифференцировать подход к энергообеспечению и обосновывать приоритеты инвестиций в децентрализованную энергетику на основе возобновляемых источников.

Keywords: pico-hydropower plants, free range animal husbandry, decentralized energy supply, renewable energy sources, hierarchical clustering, small river hydropower potential.

A methodological approach to power supply for remote isolated livestock farms in the Republic of Tuva where free range animal husbandry lacks grid electrification is discussed. The use of pico-hydropower plants (up to 5 kW) operating on small watercourses is proposed. The research goal is to identify priority districts for this technology via multi-criteria analysis accounting for regional specificity. Four key criteria are developed: remoteness from grids, hydroelectric potential of small rivers and streams, farm energy consumption, and pasture seasonal patterns. Qualitative indicators are formalized into ordinal or binary scales after which hierarchical clustering (Manhattan metric, complete linkage) classifies 17 kozhuuns (districts). The cophenetic and silhouette coefficients confirm clustering adequacy. Four clusters with varying priority for pico-hydropower plant implementation are identified. Using an integral priority

index (weighted sum of normalized criteria), all 17 districts are ranked. The Todzhinskiy and Mongun-Tayginskiy districts are high-priority areas where hydroelectric potential combines with maximum grid remoteness; pico-hydropower plant installation here is economically and socially justified. The second and third clusters require feasibility studies or seasonal solutions. For min-

imal priority districts (Erzinskiy, Ovyurskiy), pico-hydropower plants are impractical due to low hydroelectric potential or proximity to power lines. The proposed methodology enables objective territorial classification, differentiated energy supply approaches, and justification of investment priorities in decentralized renewable energy.

Кандан Софья Викторовна, аспирант, ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: moveslower@vk.com.

Бастрон Андрей Владимирович, к.т.н., доцент, ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: abastron@yandex.ru.

Ондар Айдаш Мерген-оолович, аспирант, ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Российская Федерация, e-mail: ondar0103@mail.ru.

Kandan Sofya Viktorovna, post-graduate student, Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: moveslower@vk.com

Bastron Andrey Vladimirovich, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Krasnoyarsk State Agricultural University, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: abastron@yandex.ru

Ondar Aydash Mergen-oolovich, post-graduate student, Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation, e-mail: ondar0103@mail.ru.

Введение

В Республике Тыва, где традиционное отгонное животноводство является основой экономики и уклада жизни значительной части населения, существует острая проблема энергоснабжения малых рассредоточенных потребителей. Удалённые пастбищные пункты (станы), чабанские стоянки и мелкие фермерские хозяйства, как правило, не подключены к централизованным электрическим сетям [1].

Энергетическая изолированность сдерживает развитие производства, ограничивает возможности по переработке животноводческой продукции (охлаждение молока, заготовка мяса), ухудшает бытовые условия и снижает привлекательность жизни в сельской местности. При этом территория Тувы обладает значительным гидроэнергетическим потенциалом малых рек и ручьёв, который в настоящее время практически не используется.

В этом контексте автономные системы на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности пико-гидроэлектростанций (ГЭС) (до 5 кВт), представляются перспективным решением для устойчивого энергообеспечения отгонных хозяйств [2].

Вопросы развития малой гидроэнергетики в России и мире освещены в трудах многих исследователей. Существуют работы, посвящённые технико-экономическим аспектам проектирования микро-ГЭС, оценке гидропотенциала территорий и экологическим последствиям их строительства [3-6]. Однако специфика применения данных технологий именно для нужд отгонного животноводства в условиях Республики

Тыва изучена недостаточно. Не в полной мере проанализированы адаптированные к кочевому и полукочевому образу жизни технические решения, модели экономической целесообразности для малых хозяйств, а также социально-культурные аспекты внедрения таких систем. Таким образом, существует пробел в исследованиях, нацеленных на комплексное решение проблемы энергоснабжения тувинских животноводов с учётом их территориальной, хозяйственной и культурной специфики.

Пико-ГЭС – это сверхмалые гидроэлектростанции мощностью до 5 кВт, предназначенные для автономного энергоснабжения одного или нескольких домохозяйств, малых ферм или удалённых объектов. Ключевые особенности пико-ГЭС заключаются в их минимальных требованиях к ресурсам: для работы достаточно небольшого перепада высот (от 0,5-1 м) и малого расхода воды, что позволяет использовать естественные ручьи, небольшие реки или оросительные каналы. Эти установки отличаются простотой и компактностью, часто представляя собой готовые модули с различными типами турбин, которые можно смонтировать без масштабного строительства. Низкая стоимость обеспечивается относительно невысокими капитальными затратами и быстрой окупаемостью для индивидуальных пользователей. Пико-ГЭС обеспечивают автономность, позволяя организовать базовое электроснабжение там, где подключение к центральным сетям невозможно или нецелесообразно. При этом они обладают высокой экологичностью, оказывая минимальное

воздействие на окружающую среду и не требуя затопления территорий [7].

Цель исследования – провести анализ целесообразности, эффективности и перспектив внедрения пико-ГЭС для обеспечения электроэнергией малых отгонных хозяйств в Республике Тыва.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- оценить гидроэнергетический потенциал малых рек и ручьёв на территориях традиционного отгонного животноводства Республики Тыва, пригодных для установки пико-ГЭС;
- разработать многокритериальную методику (в т.ч. с использованием иерархической кластеризации) для районирования территорий и выявления приоритетных зон внедрения пико-ГЭС с учётом удалённости от сетей, гидропотенциала, уровня энергопотребления и сезонности использования.

Объекты и методы

Объект исследования – удалённые рассредоточенные потребители электроэнергии в сфере отгонного животноводства Республики Тыва (17 районов), рассматриваемые с точки зрения их энергетической изолированности и гидроэнергетического потенциала. Методика данного исследования заключается в применении метода иерархической кластеризации для многокритериального анализа территорий.

Экспериментальная часть.

Предлагаемая система критериев и их градация:

1-й критерий. Удаленность от централизованной энергосистемы. Участки классифицируются по удалённости от ЛЭП следующим образом: к классу 1 (красная зона) относятся территории >10 км от ЛЭП либо абсолютно изолированные участки – для них приоритетно внедрение автономной энергетики; к классу 2 (жёлтая зона) – участки на расстоянии 5-10 км от ЛЭП, где подключение к сети экономически нецелесообразно и оптимально использовать автономные источники энергии; к классу 3 (зелёная зона) – территории ближе 5 км от ЛЭП, где теоретически возможна прокладка ЛЭП, однако требуется детальное сравнение затрат.

2-й критерий. Гидроэнергетический потенциал участка. Участки классифицируются по пригодности для установки пико-ГЭС следующим

образом: к классу А (высокий) относятся территории с постоянным водотоком (ручьём или малой рекой) с круглогодичным стоком, перепадом высот на коротком участке более 10-15 м и минимальным зимним расходом воды свыше 20-30 л/с (в зависимости от модели) – это идеальные условия; к классу Б (средний) – участки с постоянным водотоком и умеренным уклоном (перепад 5-10 м) либо с сезонным водотоком, характеризующимся высоким стоком в период работы летника/зимника, где требуется тщательный расчёт и, возможно, сооружение небольшого водохранилища (запруды) для сглаживания суточных и сезонных колебаний стока; к классу В (низкий/отсутствует) – территории, где в радиусе 1-2 км нет подходящего водотока, что делает применение пико-ГЭС невозможным и требует использования альтернативных источников энергии (солнечных панелей или ветрогенераторов).

3-й критерий. Уровень энергопотребления и экономический потенциал хозяйства. Хозяйства классифицируются по уровню энергопотребности и мотивации к инвестициям следующим образом: к I классу (высокий) относятся крупные или технологически ориентированные хозяйства, которым необходимы базовое освещение, холодильное оборудование, электропастух и электроинструмент; при этом высокая мотивация к инвестициям обусловлена прямым влиянием энергообеспечения на доход; к II классу (средний/базовый) – хозяйства среднего размера, где требуются освещение, зарядка средств связи и малые бытовые приборы – здесь энергия нужна преимущественно для обеспечения комфорта и безопасности; к III классу (минимальный) – малые или сезонные хозяйства, для которых критически важен лишь минимум: освещение и связь, необходимые для базового жизнеобеспечения.

4-й критерий. Сезонность использования. Выделяют три типа эксплуатации пико-ГЭС: тип «Летник» предполагает работу только в тёплый период (май-сентябрь), когда сток воды максимален, но сезон короток – в таких условиях конструкция пико-ГЭС может быть упрощена; тип «Круглогодичный», является наиболее сложным и энергоёмким режимом, поскольку предполагает надёжную работу в экстремальных условиях и, вероятнее всего, потребует внедрения гибридной системы, включающей ГЭС, аккумуляторы и резервный источник энергии.

Для применения математических методов кластеризации качественные признаки были преобразованы в количественные:

$$f: \text{Качественный признак} \rightarrow R$$

1. Удаленность (порядковая шкала):

$$\text{Значение} = \begin{cases} 1, \text{низкая удаленность} \\ 2, \text{средняя удаленность} \\ 3, \text{высокая удаленность} \end{cases}$$

2. Гидропотенциал (номинальная шкала с порядком):

$$f_{\text{гидро}}(x) = \begin{cases} 3, x = A (\text{высокий}) \\ 2, x = B (\text{средний}) \\ 1, x = B (\text{низкий}) \end{cases}$$

3. Потребление (порядковая шкала):

$$f_{\text{потреб}}(x) = \begin{cases} 2, x = I (\text{высокое}) \\ 1, x = II (\text{среднее}) \end{cases}$$

4. Сезонность (бинарная шкала):

$$f_{\text{сезон}}(x) = \begin{cases} 2, x = \text{круглогодичный} \\ 1, x = \text{летний} \end{cases}$$

Для иерархической кластеризации нужно рассчитать матрицу расстояний между всеми парами объектов (районов). Поскольку наши данные смешанные (порядковые и бинарные), используем метрику Манхэттена [8]. Она более устойчива к разным масштабам, чем Евклидова, для наших небольших целочисленных данных.

Расстояние между двумя объектами p и q в n -мерном пространстве определяется как:

$$d_M(p, q) = \sum_{i=1}^n |x_{p,i} - x_{q,i}|; \quad (1)$$

Матрица расстояний. Для m объектов строится симметричная матрица расстояний размера $m \times m$:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & d_{1,2} & d_{1,3} & K & d_{1,m} \\ d_{2,1} & 0 & d_{2,3} & K & d_{2,m} \\ d_{3,1} & d_{3,2} & 0 & K & d_{3,m} \\ M & M & M & O & M \\ d_{m,1} & d_{m,2} & d_{m,3} & K & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{где } d_{i,j} = d_M(i, j) \text{ и } d_{i,i} = 0$$

Использован метод полной связи [9], который обеспечивает компактные и хорошо разделённые кластеры, расстояние между двумя кластерами A и B определяется как максимальное рас-

стояние между любыми двумя объектами из разных кластеров.

Матрица расстояний для m объектов строится симметричная матрица расстояний размера $m \times m$:

$$d_K(A, B) = \max_{p \in A, q \in B} d(p, q);$$

В результате работы агломеративного алгоритма иерархической кластеризации формируется структура данных, фиксирующая последовательность объединения кластеров, матрица слияния Z , матрица имеет размерность $(m-1) \times 4$:

$$D = \begin{bmatrix} i_1 & j_1 & d_1 & n_1 \\ i_1 & j_2 & d_2 & n_2 \\ M & M & M & M \\ i_{m-1} & j_{m-1} & d_{m-1} & n_{m-1} \end{bmatrix};$$

где i_k, j_k – индексы объединяемых кластеров на шаге k ;

d_k – расстояние между объединяемыми кластерами;

n_k – количество объектов в новом кластере.

Для объективной количественной оценки качества полученной иерархической кластеризации и соответствия дендрограммы исходной матрице расстояний используется коэффициент кофенетической корреляции [10]:

$$r_c = \frac{\sum_{i < j} (d_{ij} - \bar{d})(t_{ij} - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i < j} (d_{ij} - \bar{d})^2 \sum_{i < j} (t_{ij} - \bar{t})^2}}; \quad (2)$$

где d_{ij} – исходное расстояние между объектами i и j (элемент матрицы расстояний);

t_{ij} – кофенетическое расстояние (высота объединения);

$\bar{d}, \bar{t}$ – средние значения.

Далее строится дендрограмма как древовидная диаграмма, где:

- листья представляют исходные объекты;
- узлы представляют объединения кластеров;
- высота узла соответствует расстоянию объединения.

Для определения оптимального числа кластеров использован метод локтя по инерции [11]:

$$W(k) = \sum_{j=1}^k \sum_{x \in C_j} \|x - \mu_j\|^2; \quad (3)$$

где k – число кластеров;

C_j – j -тый кластер;

μ_j – центроид j -того кластера.

Оптимальное число кластеров соответствует «локтю» на графике $W(k)$ от k .

После определения границ кластеров и отнесения каждого объекта (района) к конкретной группе выполняется этап интерпретации и формализации профилей кластеров. С этой целью для каждого выделенного кластера производятся расчеты дескриптивных статистик по исходным признакам.

Ключевой процедурой является вычисление средних значений (центроидов) для каждого из четырёх формализованных признаков, участвовавших в кластеризации. Для кластера C_k , содержащего n_k объектов, среднее значение j -того признака вычисляется по формуле:

$$\bar{x}_j^{(k)} = \frac{1}{n_k} \sum_{i \in C_k} x_{ij}; \quad (4)$$

где $\bar{x}_j^{(k)}$ – среднее значение j -того признака в кластере C_k ;

x_{ij} – значение j -того признака для i -того объекта, принадлежащего кластеру C_k ;

n_k – количество объектов в кластере C_k .

Полученные векторы средних значений $\bar{X}^{(k)} = (\bar{x}_1^{(k)}, \bar{x}_2^{(k)}, \bar{x}_3^{(k)}, \bar{x}_4^{(k)})$ формируют типизированный профиль каждого кластера.

Рекомендации по кластерам:

1. Кластер С1. Районы с высоким удалением от сетей и отличным гидропотенциалом. Рекомендуется внедрение полноценных пико-ГЭС.

2. Кластер С2. Районы с умеренной удалённостью и хорошим потенциалом. Требуется технико-экономическое обоснование.

3. Кластер С3. Сезонные хозяйства со средним потенциалом. Рекомендуются упрощённые сезонные решения.

4. Кластер С4. Районы с низким гидропотенциалом. Пико-ГЭС нецелесообразна, требуются альтернативные решения.

Для перехода от результатов кластерного анализа к количественной оценке приоритетности районов разработана многокритериальная математическая модель ранжирования. Модель позволяет агрегировать значения ключевых признаков для каждого объекта в единый интегральный показатель, определяющий очередность и целесообразность внедрения пико-ГЭС.

Интегральный показатель приоритетности P_i для i -того района вычисляется по формуле взвешенной суммы:

$$P(i) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot \bar{x}_{ij}; \quad (5)$$

где $P(i)$ – интегральный показатель (ранг) приоритетности i -того района;

$\bar{x}_{ij}$ – нормализованное значение j -того критерия для i -того района, обеспечивающее приведение разноразмерных признаков к сопоставимому безразмерному виду;

w_j – вес значимости j -того критерия, отражающий его вклад в общую оценку ($\sum_{j=1}^n w_j = 1$);

n – количество критериев (в данном исследовании $n = 4$).

Для валидации результатов кластеризации и количественной оценки качества полученного разбиения объектов на группы применяется метод силуэта [12]. Данный метод позволяет оценить, насколько хорошо каждый объект соответствует своему кластеру, сравнивая среднее расстояние до объектов в своём собственном кластере с расстоянием до объектов ближайшего соседнего кластера. Коэффициент силуэта для отдельного объекта i рассчитывается по формуле (6)

$$S(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}, \quad (6)$$

где $a(i)$ – среднее расстояние между объектом i и всеми остальными объектами того же кластера (мера когерентности, «сплочённости»);

$b(i)$ – минимальное из средних расстояний между объектом i и объектами других кластеров (мера разделимости).

Значение $s(i)$ лежит в интервале $[-1, 1]$.

Общий коэффициент силуэта для всего разбиения вычисляется как среднее арифметическое значений силуэта для всех объектов:

$$S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s(i); \quad (7)$$

где m – общее количество объектов.

Высокое среднее значение S ($>0,5$) свидетельствует о качественной и статистически обоснованной кластеризации с чёткими границами между группами.

Для статистического подтверждения неслучайности и значимости различий между выделенными кластерами был проведен однофакторный дисперсионный анализ [12] по каждому

формализованному признаку. Ключевым статистическим критерием в дисперсионном анализе является F-статистика Фишера, рассчитываемая как отношение межгрупповой дисперсии к внутригрупповой:

$$F = \frac{MS_{\text{мск}}}{MS_{\text{внк}}} = \frac{SS_{\text{мск}} / (k - 1)}{SS_{\text{внк}} / (m - k)}; \quad (8)$$

где $SS_{\text{мск}}$ – межгрупповая сумма квадратов;

$SS_{\text{внк}}$ – внутригрупповая сумма квадратов;

m – общее число объектов;

$MS_{\text{мск}}, MS_{\text{внк}}$ – соответствующие оценки дисперсий.

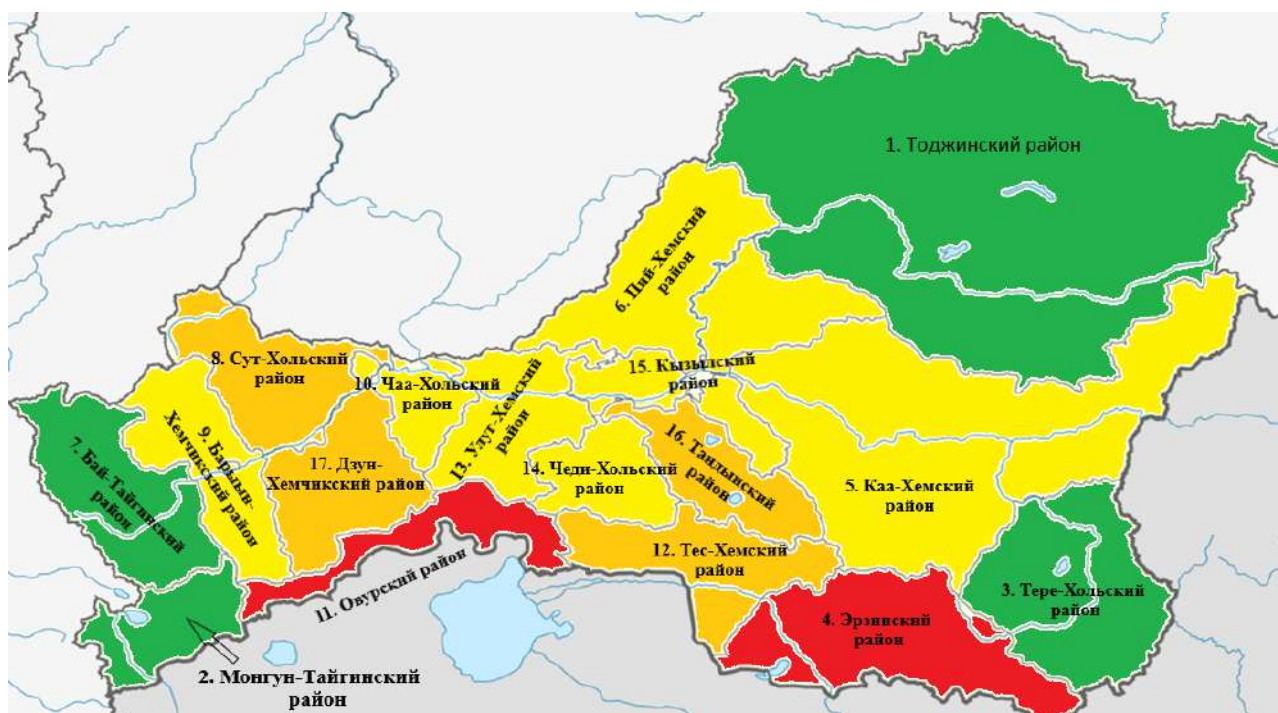


Рис. 1. Иерархическая кластеризация, применённая для анализа 17 районов Республики Тыва (кластер 1 – зеленый, кластер 2 – желтый, кластер 3 – оранжевый, кластер 4 – красный)

В результате применения метода иерархической кластеризации (агломеративный алгоритм с методом полной связи и метрикой Манхэттена) к анализу 17 районов Республики Тыва по четырём ключевым критериям пригодности для внедрения пико-ГЭС было получено содержательное разбиение на кластеры (рис. 1), позволяющее сформулировать адресные рекомендации.

Гидроэнергетический потенциал «зеленых» кластеров. Для определения мощности проектируемого ГЭС используется следующая формула:

$$N = 9.81 * Q * H * N^* \eta_{\text{турб}} * \eta_{\text{ген}}, \quad (9)$$

где Q – расход воды через турбину, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – напор воды, м ;

$\eta_{\text{турб}}$ – коэффициент полезного действия (КПД) турбины;

$\eta_{\text{ген}}$ – КПД генератора.

Произведение КПД турбины и генератора для современных малых ГЭС находится в диапазоне 0,75-0,85, в данных расчетах принято за 0,75.

В таблице представлены расчеты мощности створа рек «зеленого» кластера. Выбор рек для расчетов обусловлен их удаленностью от централизованных сетей и длиной до 100 км. Расчеты основаны на доступных топографических данных, а также использованы расчеты гидро-

потенциала Тувы с использованием ГИС [13]. На рисунке 2 выделены реки каждого кластера, данные которых использовались для расчетов.

На рисунке 2 выделены реки каждого кластера, данные которых использовались для расчетов. Для Тувы характерен алтайский тип водного режима: около 50% годового стока проходит через реки в период весенне-летнего половодья

(с апреля по июль), в то время как в зимнюю межень (с ноября по март) расход воды может снижаться в разы [14]. Поэтому при проектировании пико-ГЭС критически важно провести детальные гидрологические изыскания для конкретного створа реки, чтобы точно спрогнозировать выработку и экономическую окупаемость проекта.

Таблица

Мощность створа рек

	Створы кластера	Длина, км	Ср. расход (Q), м³/сд	Падение Н, м	Площадь водосбора, км²	Мощность створа N, кВт
Кластер 1 Мон-гун-Тайгинский	Каргы	92	23,6	905	600	157
Кластер 2 Бай-Тайгинский	Чон-Хем	28,32	2,2	1200	114	78
Кластер 3 Тоджинский	Хоор-Ос	86	8,28	700	312	42
Кластер 4 Тере-Хольский	Узук	27	16	800	148	94

**Рис. 2. Обозначение рек кластеров**

Заключение

Результаты иерархической кластеризации показали выделение четырёх кластеров районов. Кластер 1 (4 района): Тожу, Монгун-Тайга, Тере-Хол и Бай-Тайга – приоритет высокий, рекомендуются пико-ГЭС. Кластер 2 (7 районов): Каа-Хем, Пий-Хем, Барыын-Хемчик, Чаа-Хол, Улуг-Хем, Чеди-Хол и Кызылский – приоритет

средний, требуется экономический расчёт. Кластер 3 (4 района): Тес-Хем, Танды, Дзун-Хемчик и Сут-Холь – приоритет низкий, возможны упрощённые сезонные решения. Кластер 4 (2 района): Эрзин и Овур – приоритет минимальный, пико-ГЭС не рекомендуется, требуются альтернативные решения.

Представленная методика иерархической кластеризации позволяет:

- 1) объективно классифицировать районы по пригодности для внедрения пико-ГЭС;
- 2) выделить целевые группы для дифференцированного подхода;
- 3) обосновать приоритетность инвестиций;
- 4) разработать типовые решения для каждого кластера.

Метод обладает высокой интерпретируемостью результатов и может быть использован для аналогичных исследований в других регионах.

Библиографический список

1. Кылгыдай, А.-К. Ч. Отгонное животноводство как традиционный вид деятельности населения Тувы / А.-К. Ч. Кылгыдай. – Текст: электронный // Природные ресурсы, среда и общество. – 2019. – № 1 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otgonnoe-zhivotnovodstvo-kak-traditsionnyy-vid-deyatelnosti-naseleniya-tuvy> (дата обращения: 26.02.2026).
2. Мировые тенденции в области построения автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии / М. А. Сурков, Б. В. Лукутин, Е. Ж. Сарсикеев, В. Р. Киушкина. – Текст: электронный // Вестник евразийской науки. – 2012. – № 4 (13). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovye-tendentsii-v-oblasti-postroeniya-avtonomnyh-sistem-elektrosnabzheniya-s-ispolzovaniem-vozobnovlyaemykh-istochnikov-energii> (дата обращения: 01.02.2026).
3. Кенден, К. В. Техничко-экономическая оценка вариантов состава микро-ГЭС для с. Тоолайлыг / К. В. Кенден, С. А. Кужугет, А. А. Ооржак. – Текст: непосредственный // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2018. – № 3. – С. 45-52.
4. Лукутин, Б. В. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций: монография / Б. В. Лукутин, С. Г. Обухов, Е. Б. Шандарова. – Томск: Томский политехнический университет, 2001. – 104 с. – Текст: непосредственный.
5. Ибрагимов, К. Об эффективности строительства микро-ГЭС и перспективах её развития в Южном Казахстане / К. Ибрагимов. – Текст: непосредственный // Научные труды ЮКГУ им. М. Ауэзова. – 2015. – № 1 (32). – С. 23-25.
6. Васильев, П. П. Оценка гидроэнергетического потенциала малых рек Сибири и технико-экономическое обоснование строительства микро-ГЭС / П. П. Васильев, Н. С. Григорьев, Л. М. Соколова. – Текст: непосредственный // Гидротехническое строительство. – 2020. – № 5. – С. 34-41.
7. Башмур, К. А. Возможности развития пико-и микрогидроэнергетики в Российской Федерации / К. А. Башмур. – Текст: непосредственный // Инженерные технологии: традиции, инновации, векторы развития. – 2023. – № 9. – С. 73-74.
8. Кисляков, А. Н. Иерархические методы кластеризации в задаче поиска аномальных наблюдений на основе групп с нарушенной симметрией / А. Н. Кисляков, С. В. Поляков. – Текст: электронный // Управленческое консультирование. – 2020. – № 5 (137). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ierarhicheskie-metody-klasterizatsii-v-zadache-poiska-anomalnyh-nablyudeniy-na-osnove-grupp-s-narushennoy-simmetriy> (дата обращения: 06.03.2026).
9. Пархоменко, П. А. Обзор и экспериментальное сравнение методов кластеризации текстов / П. А. Пархоменко, А. А. Григорьев, Н. А. Астраханцев. – Текст: электронный // Труды Института системного программирования РАН. – 2017. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-i-eksperimentalnoe-sravnenie-metodov-klasterizatsii-tekstov> (дата обращения: 26.02.2026).
10. Луценко, Е. В. Некоторые проблемы классического кластерного анализа / Е. В. Луценко, В. Е. Коржаков. – Текст: электронный // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. – 2011. – № 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-problemy-klassicheskogo-klasterного-analiza> (дата обращения: 26.02.2026).
11. Болдовская, Т. Е. Применение моделей машинного обучения для контроля качества вибродиагностических данных / Т. Е. Болдовская, И. В. Берсенов. – Текст: электронный // Математические структуры и моделирование. – 2024. – № 3 (71). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primeneniye-modeley-mashinnogo-obucheniya-dlya-kontrolya-kachestva-vibrodiagnosticheskikh-dannykh> (дата обращения: 26.02.2026).
12. Подживотов, Н. Ю. Оценка результатов испытаний с помощью однофакторного дисперсионного анализа / Н. Ю. Подживотов. – Текст: электронный // Труды ВИАМ. – 2022. – № 8

(114). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-rezultatov-ispytaniy-s-pomoschyu-odnofaktornogo-dispersionnogo-analiza> (дата обращения: 26.02.2026).

13. Котельников, В. И. Расчет гидроэнергетического потенциала рек на территории Тувы с помощью ГИС / В. И. Котельников, С. А. Чупикова. – Текст: непосредственный // Международный журнал экспериментального образования. – 2015. – № 3-3. – С. 455-459.

14. География Республики Тыва: практикум / составители С. С. Курбатская, С. К. Кужугет. – Кызыл: Изд-во ТувГУ, 2022. – 75 с. – Текст: непосредственный.

References

1. Kылгыдай, А.-К. Ч. Отгонное животноводство как традиционный вид деятельности населения Тувы / А.-К. Ч. Kылгыдай // Природные ресурсы, среда и обшчество. – 2019. – No. 1 (1). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otgonnoe-zhivotnovodstvo-kak-traditsionnyy-vid-deyatelnosti-naseleniya-tuvy> (data obrashcheniya: 26.02.2026).

2. Surkov, M. A. Mirovye tendentsii v oblasti postroeniya avtonomnykh sistem elektrosnabzheniya s ispolzovaniem vozobnovlyaemykh istochnikov energii / M. A. Surkov, B. V. Lukutin, E. Zh. Sarsikeev, V. R. Kiushkina // Vestnik evraziyskoy nauki. – 2012. – No. 4 (13). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mirovye-tendentsii-v-oblasti-postroeniya-avtonomnykh-sistem-elektrosnabzheniya-s-ispolzovaniem-vozobnovlyaemykh-istochnikov-energii> (data obrashcheniya: 01.02.2026).

3. Kenden, K. V. Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka variantov sostava mikro-GES dlya s. Toolaylyg / K. V. Kenden, S. A. Kuzhuget, A. A. Oorzhak // Vestnik Tuvinskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie i fiziko-matematicheskie nauki. – 2018. – No. 3. – S. 45–52.

4. Lukutin, B. V. Avtonomnoe elektrosnabzhenie ot mikrogidroelektrostantsiy: monografiya / B. V. Lukutin, S. G. Obukhov, E. B. Shandarova. – Tomsk: Tomskiy politekhnicheskiiy universitet, 2001. – 104 s.

5. Ibragimov, K. Ob effektivnosti stroitelstva mikro-GES i perspektivakh ee razvitiya v Yuzhnom Kazakhstane / K. Ibragimov // Nauchnye trudy YUKGU im. M. Auezova. – 2015. – No. 1 (32). – S. 23–25.

6. Vasilev, P. P. Otsenka gidroenergeticheskogo potentsiala mal'nykh rek Sibiri i tekhniko-

ekonomicheskoe obosnovanie stroitelstva mikro-GES / P. P. Vasilev, N. S. Grigorev, L. M. Sokolova // Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo. – 2020. – No. 5. – S. 34–41.

7. Bashmur, K. A. Vozmozhnosti razvitiya piko-i mikrogidroenergetiki v Rossiyskoy Federatsii / K. A. Bashmur // Inzhenernye tekhnologii: traditsii, innovatsii, vektory razvitiya. – 2023. – No. 9. – S. 73-74.

8. Kislyakov, A. N. Ierarkhicheskie metody klasterizatsii v zadache poiska anomalnykh nablyudeniya na osnove grupp s narushennoy simmetriey / A. N. Kislyakov, S. V. Polyakov // Upravlencheskoe konsultirovanie. – 2020. – No. 5 (137). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ierarkhicheskie-metody-klasterizatsii-v-zadache-poiska-anomalnyh-nablyudeniya-na-osnove-grupp-s-narushennoy-simmetriey> (data obrashcheniya: 06.03.2026).

9. Parkhomenko, P. A. Obzor i eksperimentalnoe sravnenie metodov klasterizatsii tekstov / P. A. Parkhomenko, A. A. Grigorev, N. A. Astrakhansev // Trudy ISP RAN. – 2017. – No. 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-i-eksperimentalnoe-sravnenie-metodov-klasterizatsii-tekstov> (data obrashcheniya: 26.02.2026).

10. Lutsenko, E. V. Nekotorye problemy klassicheskogo klasternogo analiza / E. V. Lutsenko, V. E. Korzhakov // Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Estestvenno-matematicheskie i tekhnicheskie nauki. – 2011. – No. 2. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nekotorye-problemy-klassicheskogo-klasternogo-analiza> (data obrashcheniya: 26.02.2026).

11. Boldovskaya, T. E. Primenenie modeley mashinnogo obucheniya dlya kontrolya kachestva vibrodiagnosticheskikh dannyykh / T. E. Boldovskaya, I. V. Bersenev // MSiM. – 2024. – No. 3 (71). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/primenenie-modeley-mashinnogo-obucheniya-dlya-kontrolya-kachestva-vibrodiagnosticheskikh-dannykh> (data obrashcheniya: 26.02.2026).

12. Podzhivotov, N. Yu. Otsenka rezultatov ispytaniy s pomoshchyu odnofaktornogo dispersionnogo analiza / N. Yu. Podzhivotov // Trudy VIAM. – 2022. – No. 8 (114). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-rezultatov-ispytaniy-s-pomoschyu-odnofaktornogo-dispersionnogo-analiza> (data obrashcheniya: 26.02.2026).

13. Kotelnikov V.I. Raschet gidroenergeticheskogo potentsiala rek na territorii Tuvy s

pomoshchyu GIS / V.I. Kotelnikov, S.A. Chupikova
// Mezhdunarodnyy zhurnal eksperimental'nogo
obrazovaniya. – 2015. – No. 3-3. – S. 455-459.

14. Geografiya Respubliki Tyva: praktikum /
sostaviteli S. S. Kurbatskaya, S. K. Kuzhuget. –
Kyzyl: Izdatel'stvo TuvGU, 2022. – 75 s.



УДК 629.4.082.3:621.3.004.12

DOI: 10.53083/1996-4277-2026-263-9-76-80

В.Б. Белый

V.B. Belyy

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА САМОСИНХРОНИЗАЦИИ ГЕНЕРАТОРА АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ОБМОТКАХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

INFLUENCE OF SELF-SYNCHRONIZATION MODE OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEM GENERATOR ON OVERVOLTAGES IN THE EXCITATION WINDINGS

Ключевые слова: автономные системы электроснабжения, синхронные генераторы, самосинхронизация, перенапряжения, обмотка возбуждения.

Современные технологии агропромышленных производств предъявляют высокие требования к системам электрификации. Особенно это касается надежности электроснабжения. Данный вопрос актуален как для крупных агропромышленных объектов, так и малых фермерских хозяйств. Наиболее логичным способом повышения надежности электроснабжения является применение нескольких параллельно включенных различных источников электропитания. Примерами такого решения могут служить широко распространяющиеся в последнее время системы гибридного электроснабжения, в которых источниками электропитания является комбинация традиционной системы электроснабжения и различных видов возобновляемых источников энергии. Данные системы могут содержать синхронные генераторы, для которых предусматривается параллельная работа. Для включения генераторов на параллельную работу используются следующие 3 способа синхронизации: точная синхронизация, самосинхронизация, грубая синхронизация. Включение на параллельную работу способом точной синхронизации производится в момент близкого совпадения амплитуд, частот и фаз напряжений подключаемого генератора к сети. При строгом совпадении этих величин синхронизация протекает идеально в том смысле, что в момент включения генератора совершенно отсутствуют толчки тока. Но в автономных и гибридных системах электроснабжения, где величина напряжения и частота сети не являются строго постоянными, бывает трудно, а порою невозможно выполнить условия точной синхронизации. При этом данный процесс занимает достаточно много време-

ни, что для ряда агротехнологических процессов неприемлемо. Альтернативой процессу точной синхронизации может являться включение синхронного генератора на параллельную работу методом самосинхронизации. Процесс занимает достаточно мало времени, но при этом важно знать и придерживаться границ допустимых отклонений от условий точной синхронизации, при которых не возникают перенапряжения в цепи возбуждения.

Keywords: autonomous power supply systems, synchronous generators, self-synchronization, overvoltages, excitation windings.

Modern technologies of agro-industrial production impose high demands on electrification systems. This is especially true for the reliability of power supply. This issue is relevant both for large agro-industrial facilities and small farms. The most logical way to increase the reliability of power supply is to use several parallel connected, different power sources. Examples of such a solution are the recently widespread hybrid power supply systems where the power sources are a combination of a conventional power supply system and various types of renewable energy sources. These systems may contain synchronous generators for which parallel operation is provided. To turn on the generators for parallel operation, the following three synchronization methods are used: accurate synchronization; self-synchronization; coarse synchronization. Activation for parallel operation by the method of accurate synchronization is performed at the moment of close coincidence of amplitudes, frequencies and phases of voltages of the connected generator to the network. With a strict coincidence of these values, synchronization proceeds ideally in the sense that there are absolutely no current shocks at the moment the generator is turned on. But in autonomous and hybrid power supply systems where the volt-