

УДК 621.31

**АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГО-
КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ИЗОЛИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**Степанов В.М., студент гр. 8Э-52, I курс, Соловской А.С., ст. преподава-
тельАлтайский государственный технический университет имени И.И. Пол-
зунова
г. Барнаул

Более 20 млн км² российской территории лишены централизованного электроснабжения. Там работают дизельные электростанции. Топливо в северных районах стоит 80–120 руб./л, доставка срывается, экологическая нагрузка растёт. Солнечные и ветровые установки снижают расход дизеля. Но их выработка нестабильна — без резервирования не обойтись. Отсюда и возникают гибридные энергокомплексы, где ВИЭ, дизель-генераторы и накопители работают в связке [1].

Цель работы — разобрать архитектурные решения гибридных энергокомплексов. Нужно понять, какие из них лучше подходят для изолированных энергорайонов России.

По структурному признаку выделяют три основных типа гибридных энергокомплексов.

Первый тип — АС-шина (0,4 кВ). Генераторы, накопители и потребители подключаются к единой шине переменного тока. Накопитель входит в схему через двунаправленный инвертор. Он может заряжаться от сети и отдавать энергию обратно. Исторически это самая ранняя конфигурация. Чаще всего её выбирают при модернизации действующих дизельных станций.

Второй тип — ДС-шина (600–1500 В). ВИЭ и накопители сходятся на шине постоянного тока. Солнечные панели подключаются через DC/DC-преобразователи. Ветроустановки — через выпрямители. Аккумуляторы — напрямую или через двунаправленные конвертеры. К нагрузке переменного тока и дизелю выход идёт через инвертор. Конфигурация становится стандартом для новых объектов малой и средней мощности.

Третий тип совмещает оба предыдущих. ДС-шина собирает ВИЭ и накопители. АС-шина — дизель и основную нагрузку. Между шинами стоит двунаправленный преобразователь. Он управляет перетоком мощности в обе стороны. Такая схема даёт наибольшую гибкость управления.

Архитектуры сравниваются по восьми критериям: КПД, предельная доля ВИЭ, сложность управления, надёжность, капитальные затраты, операционные расходы, масштабируемость, стандартизация оборудования.

АС-шина. КПД — 85–90%. Потери возникают из-за двойного преобразования: из DC в AC у ВИЭ, затем обратно для части нагрузки. Доля ВИЭ — не выше 30–50% пиковой нагрузки. Инверторные источники не имеют инерции синхронной машины. При большей доле ВИЭ устойчивость нарушается. Дизель ведёт сеть по частоте и напряжению. Инверторы работают ведомыми. Управление — умеренно сложное. Надёжность средняя: отказ элемента может потребовать отключения части генерации. Капвложения минимальны — используется существующая инфраструктура. Операционные расходы высоки из-за топлива. Масштабирование — добавлением инверторов. Стандартизация высокая.

DC-шина. КПД — 92–95%. Панели и аккумуляторы отдают энергию инвертору напрямую. Лишних ступеней нет. Доля ВИЭ — до 70–100%. Накопитель принимает на себя балансировку и держит напряжение шины. Управление сложнее: все источники должны согласованно поддерживать заданный уровень напряжения. Надёжность высокая: накопитель временно замещает дизель. Капвложения средние — нужно преобразовательное оборудование. Расход топлива падает на 70–80% против традиционной станции. Масштабирование широкое. Стандартизация пока невысокая: единых норм на напряжение DC-шин нет.

Гибридная схема. КПД — 87–91%. Потери вносит интерфейсный преобразователь между шинами. Доля ВИЭ — 50–90%. Зависит от ёмкости накопителя и алгоритмов управления. Управление трёхуровневое: локальные регуляторы, координатор перетоков, оптимизатор по технико-экономическим критериям. Самая сложная система из трёх. Надёжность максимальная: дизель держит качество напряжения и частоты, накопитель сглаживает пульсации ВИЭ. Капвложения наибольшие — за счёт интерфейсного преобразователя и усложнённой АСУ. Операционные расходы — на уровне DC-варианта. Масштабирование затруднено: нужно согласовывать режимы двух шин. Стандартизация средняя.

Выбор архитектуры зависит от нескольких факторов. Важны климат, мощность объекта, профиль нагрузки, цена доставки топлива и доступный бюджет.

Если бюджет ограничен и дизельная станция уже работает — правильнее начать с АС-шины. ВИЭ подключаются поэтапно. Существующую инфраструктуру демонтировать не нужно. Расход топлива снижается на 30–40%. Доля ВИЭ при этом достигает 50%.

Новые объекты до 1 МВт — ДС-шина. КПД выше. Дизель замещается на 70–80%. Себестоимость выработки — 12–25 руб./кВт·ч. Это в 2–3 раза ниже, чем у традиционной дизельной станции.

Объекты свыше 1 МВт со смешанной нагрузкой — гибридная схема. Она поддерживает «чёрный запуск» после полного обесточивания. Управление гибкое. В районах экстремального холода и полярной ночи — Якутия, Чукотка — ДС-шина с увеличенным резервом накопителей в отапливаемых контейнерах. Летний избыток РV-генерации закрывает зимний дефицит. На ветроресурсном побережье Дальнего Востока подходят и АС-шина, и гибрид. Оба варианта дают высокую долю ВИЭ при дизеле в резерве.

Данные получены по реализованным проектам в Якутии, Камчатском крае и Архангельской области.

- 1) Традиционная ДЭС. Расход топлива — 70–80 т/год на 100 кВт нагрузки [2]. Себестоимость выработки — 25–60 руб./кВт·ч. Капвложения — 50–80 тыс. руб./кВт.
- 2) Гибридный комплекс на АС-шине. Расход топлива — 35–50 т/год на 100 кВт. Выбросы CO₂ сокращаются на 30–40%. Капвложения — 120–180 тыс. руб./кВт. Себестоимость выработки — 15–35 руб./кВт·ч.
- 3) ДС-шинный комплекс — лучшие результаты. Расход топлива — 20–35 т/год на 100 кВт. Выбросы CO₂ снижаются на 50–70%. Капвложения — 150–250 тыс. руб./кВт. Себестоимость — 12–25 руб./кВт·ч. КИУМ ВИЭ достигает 20–35% против 15–25% у АС-варианта.

АС-шина — выбор для поэтапной модернизации действующих ДЭС. Капзатраты минимальны. Стандартизация высокая. Доля ВИЭ — до 50%. Экономия топлива — 30–40%. ДС-шина обеспечивает максимальный КПД и наибольшее замещение дизеля. Предпочтительна для новых объектов до 1 МВт. Гибридная схема нужна там, где мощность превышает 1 МВт, состав нагрузки сложный, а требования к надёжности повышенные.

Три приоритета дальнейшего развития. Первый — АСУ с прогнозированием генерации и потребления. Второй — актуализация нормативной базы для распределённой генерации в изолированных районах. Третий — локализация производства накопителей и преобразовательного оборудования для Крайнего Севера.

Список литературы:

1. Васильев, В. Ю. Разработка методики оценки энергетического потенциала ветроэнергетических установок / В. Ю. Васильев // Наука и молодежь : Материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 14–18 апреля 2025 года.

- Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2025. – С. 321-322. – EDN CIGQFG.
2. Приказ Министерства энергетики Российской Федерации от 28 ноября 2025 г. N 1553 "Об утверждении схемы и программы развития электроэнергетических систем России на 2026-2031 годы" // Министерство энергетики РФ URL: https://minenergo.gov.ru/upload/iblock/0ee/qk0fgtteujwd4pwydt7h72i53bm4ybqc/Prikaz-Minenergo-1553-SIPR-2026_2031.pdf (дата обращения: 25.03.2026).