

Национальный исследовательский университет «МЭИ»



**ВСЕРОССИЙСКАЯ ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ
«Системные исследования энергетических технологий»
25 - 26 ноября 2025, г. Москва, ИНЭИ РАН**

Алгоритмы управления реактивной мощностью солнечных электростанций в
● изолированных энергосистемах и их роль в регулировании напряжения.

Аспирант кафедры ГВИЭ: Муджон Маклеан Муджон
Научный руководитель: д.т.н. Илюшин П.В.

Введение и актуальность

Проблематика

- В изолированных энергосистемах Намибии наблюдаются частые отклонения напряжения (до $\pm 10\%$).
- Основная причина – недостаточная компенсация реактивной мощности (Q) при переменной нагрузке.
- Дизель-генераторы не обеспечивают динамическое регулирование напряжения.
- Рост доли солнечных электростанций (СЭС) требует интеллектуального управления Q/U .

Научная актуальность

- Современные инверторы СЭС выполняют VAR-сервис (reactive power support service).
- VAR-сервис уменьшает колебания напряжения и снижает нагрузку на генераторы.
- Проблема актуальна для энергосистем развивающихся стран (Африка, Азия, Латинская Америка).

Цели и задачи исследования

Цель исследования

Разработка алгоритмов управления реактивной мощностью солнечных электростанций (СЭС), обеспечивающих стабилизацию напряжения в изолированных энергосистемах.

Задачи исследования:

- 1□. Построить годовые и месячные графики P и Q на основе климатических и эксплуатационных данных региона Кунене.
- 2□. Оценить диапазоны $\cos \varphi$ для бытовых, коммерческих и промышленных потребителей.
- 3□. Исследовать возможности инверторов для анализа генерации и потребления реактивной мощности.
- 4□. Смоделировать распределение Q/U с учётом параметров узлов сети 20 кВ.

Методика исследования

Этапы алгоритма моделирования:

- 1□. Сбор данных – солнечная радиация, угол наклона панелей, температура воздуха, профили нагрузки.
- 2□. Расчёт активной мощности: $P = P_{\text{ном}} \times f(\text{радиация, температура})$.
- 3□. Определение реактивной мощности: $Q = P \times \tan(\arccos(\cos\varphi))$.
- 4□. Валидация с реальными

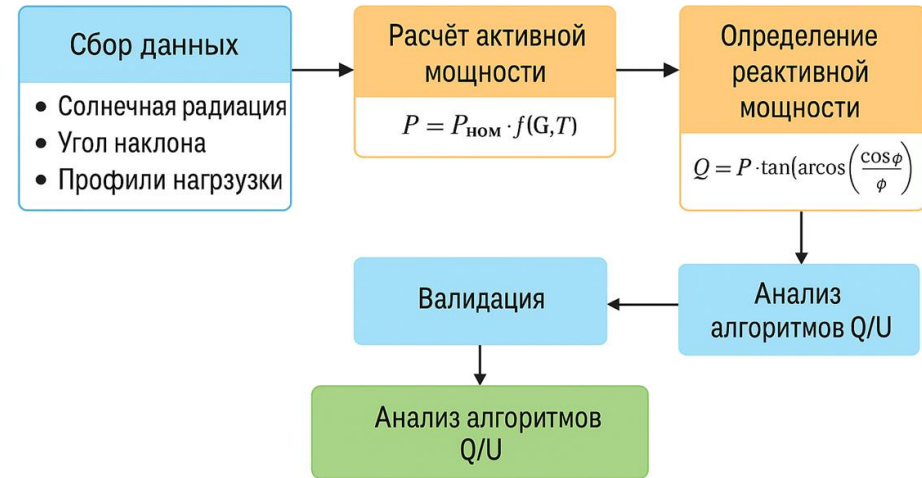
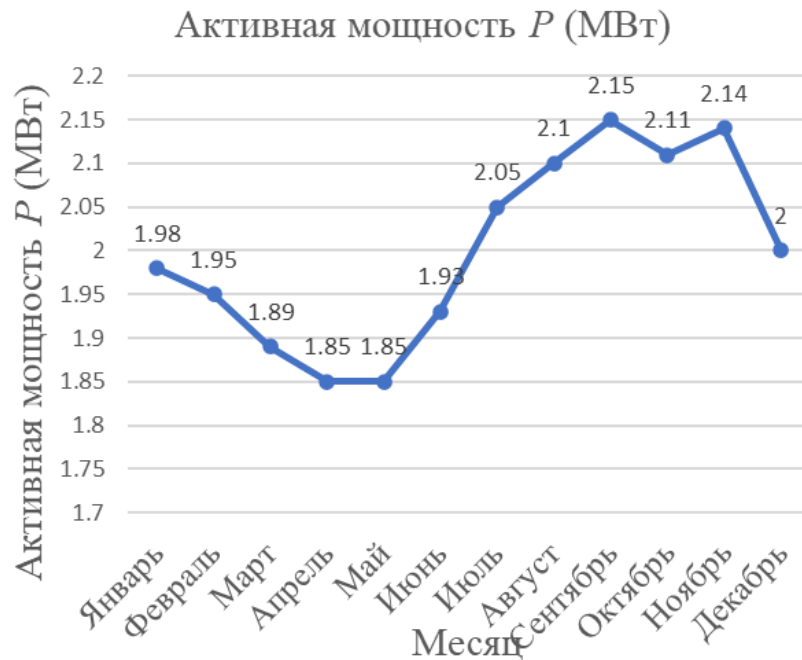


Рис. 1 – Блок-схема алгоритма моделирования потоков активной и реактивной мощности в изолированной энергосистеме.

Месячный профиль активной мощности P (МВт)

Анализ сезонных изменений активной мощности солнечной электростанции (СЭС):

- В зимние месяцы (апрель-июнь) наблюдается снижение выработки активной мощности до 1.85 МВт, что связано с уменьшением солнечной радиации и более низкими температурами.
- Летний максимум приходится на сентябрь (2.15 МВт), когда интенсивность солнечного излучения и продолжительность дня максимальны.
- Среднегодовая активная мощность составляет примерно 2.0 МВт, что соответствует стабильному уровню генерации для изолированной энергосистемы региона Кунене.



Реактивная мощность (Q) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$)

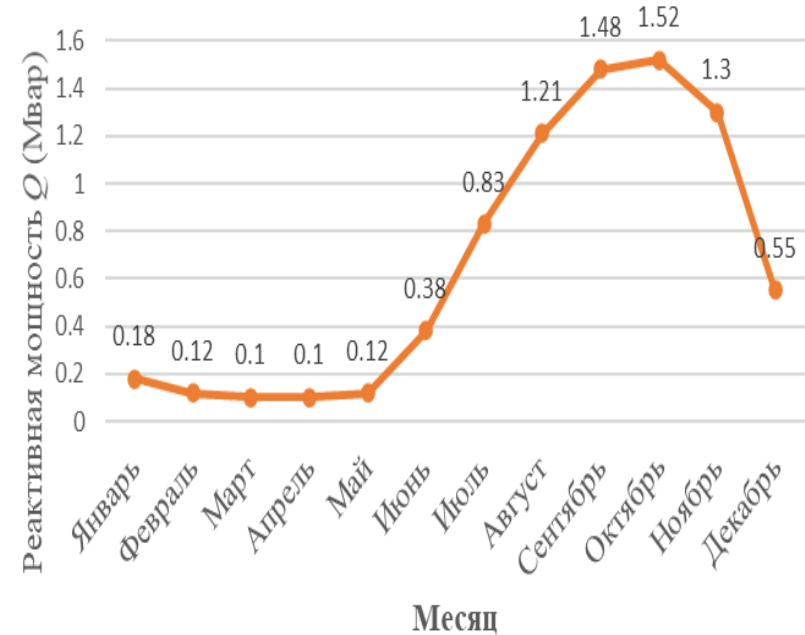
- ✓ Реактивная мощность Q определяет нагрузку на инверторы и влияет на стабильность напряжения.
- ✓ Максимальные значения Q (1.4-1.5 Мвар) – июль-октябрь; минимальные (<0.2 Мвар) – март-май.
- ✓ Для регулирования используется коэффициент мощности $\cos \varphi$, различающийся по типам нагрузок.

Формула расчёта:

$$Q = P \times \tan(\arccos(\cos \varphi))$$

Средние значения $\cos \varphi$:

- Бытовая – 0.85
- Коммерческая – 0.82
- Промышленная – 0.78



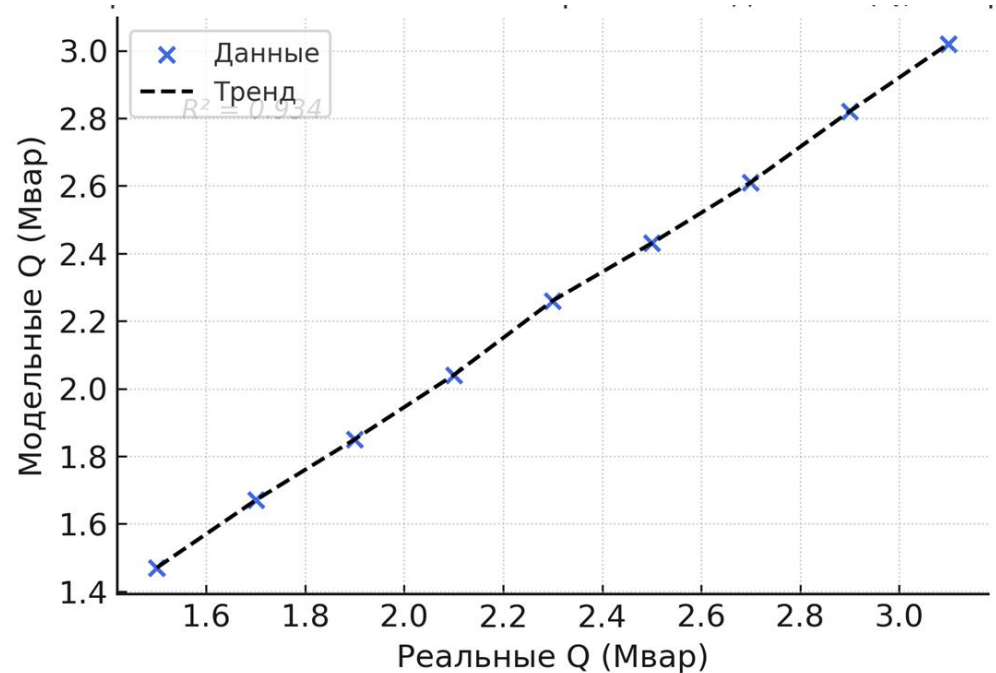
Моделирование алгоритмов Q/U и VAR-сервиса

1. Алгоритм PI-регулятора – классическая пропорционально-интегральная схема, обеспечивающая устойчивое, но медленное регулирование напряжения.
2. Fuzzy-логический контроллер – основан на нечеткой логике и позволяет адаптировать управление при неопределённых нагрузках и флуктуациях солнечной радиации.
3. Нейросетевой подход (ANN) – использует машинное обучение для предсказания оптимального реактивного тока инвертора и стабилизации напряжения при резких изменениях irradiance.

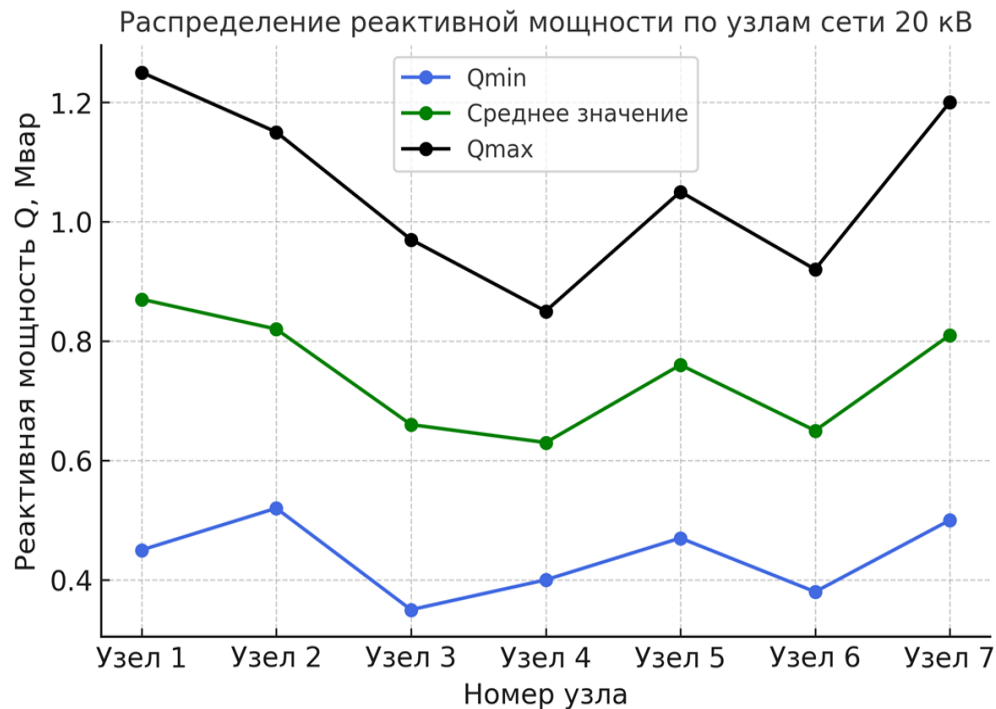
Метод	Время стабилизации, с	Отклонение ΔU , %	$\cos \varphi$
PI-регулятор	4.5	± 4.2	0.96
Fuzzy-контроллер	3.1	± 2.8	0.98
Нейросеть (ANN)	2.4	± 1.9	0.99

Сравнение синтетических и реальных данных (Q , Мвар)

- Для оценки достоверности математической модели управления реактивной мощностью СЭС выполнено сравнение синтетических (модельных) и реальных измерений Q по узлам сети.
- Результаты показали высокую степень совпадения, что подтверждает адекватность разработанного алгоритма Q/U -регулирувания.
 $R^2 = 0.934$ – высокая корреляция между модельными и измеренными значениями



Распределение реактивной мощности по узлам 20 кВ



Для анализа локальных особенностей распределения реактивной мощности проведено моделирование по узлам сети 20 кВ. Наибольшие значения Q наблюдаются в узлах с промышленными потребителями и точках подключения СЭС.

Максимальные пики Q приходятся на узлы 1, 2 и 7, где расположены промышленные объекты и солнечные электростанции. На бытовых узлах (4-5) наблюдаются минимальные значения Q (< 0.5 Мвар).

Выводы

- Основные выводы: Разработаны и протестированы алгоритмы управления реактивной мощностью (Q/U) для солнечных электростанций (СЭС) в изолированных энергосистемах.
- Показано, что применение инверторов с функцией VAR-сервиса позволяет стабилизировать напряжение в пределах $\pm 10\%$ $U_{ном}$.
- Использование адаптивных (fuzzy) и нейросетевых алгоритмов обеспечивает сокращение времени стабилизации напряжения на 40-50 % по сравнению с классическим PI-регулятором.
- Проведённый анализ показал высокий уровень корреляции ($R^2 = 0.934$) между модельными и реальными значениями Q , что подтверждает точность разработанных моделей.

Применение интеллектуальных алгоритмов управления реактивной мощностью СЭС обеспечивает повышение устойчивости изолированных энергосистем, улучшает качество напряжения и снижает нагрузку на дизель-генераторные установки. Предложенные подходы создают основу для перехода к интеллектуальным микросетям (Smart Grids) в странах с развивающейся энергетической инфраструктурой.

Благодарю за внимание!