

Дакукина Т.А.,
магистр,
Тюменский индустриальный университет
Россия, г. Тюмень

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННЫХ СЕТЯХ

Аннотация: В статье представлены четыре альтернативных подхода к регулированию напряжения на промышленных предприятиях. Для каждого подхода описаны принцип работы, преимущества и ограничения. Проведён многокритериальный сравнительный анализ по семи показателям с использованием 10-балльной шкалы. Результаты представлены в виде таблицы и лепестковой диаграммы. Даны практические рекомендации по выбору рационального устройства в зависимости от условий эксплуатации.

Ключевые слова: регулирование напряжения, конденсаторная установка, распределённая компенсация, гибридная установка, СТК, многокритериальный анализ.

Annotation: The article presents four alternative approaches to voltage regulation in industrial facilities. For each approach, the operating principle, advantages, and limitations are described. A multi-criteria comparative analysis was conducted across seven indicators using a 10-point scale. The results are presented in the form of a table and a radar chart. Practical recommendations are provided for selecting a rational device based on operating conditions.

Key words: voltage control, capacitor bank, distributed compensation, hybrid installation, STC, multi-criteria analysis.

В промышленных системах электроснабжения для поддержания напряжения в допустимых пределах применяются различные технические средства [1]. Помимо традиционных конденсаторных установок с управлением по $\cos \varphi$, существуют распределённые системы, координированное управление с регулятором РПН трансформатора, а также гибридные решения на основе статических тиристорных компенсаторов (СТК) [3]. Выбор оптимального устройства зависит от характера нагрузки, конфигурации сети и экономических ограничений [2].

К альтернативным решениям регулирования напряжения относятся:

1. Адаптивная КУ с приоритетом напряжения (АККУ-Н) – модернизация традиционной АККУ, где главным регулируемым параметром является напряжение. Обеспечивает снижение числа переключений в 5–6 раз, улучшение качества напряжения, низкую стоимость.

2. Распределённая система компенсации – установка нескольких конденсаторных батарей малой мощности (например, по 100 кВАр) непосредственно в узлах нагрузки (у каждого цеха, на ответвлениях). Эффективна при протяжённых линиях (более 300 м). Позволяет выровнять профиль напряжения, снизить потери в 2–3 раза, но требует координации работы установок и увеличивает капитальные затраты на 20–30%.

3. Координированная система (КУ + РПН) – единый контроллер управляет конденсаторной батареей и трансформатором с устройством регулирования под нагрузкой (РПН). Медленные изменения напряжения (суточные, сезонные) компенсируются РПН, быстрые колебания – конденсаторной установкой. Снижает число переключений РПН в 3–4 раза, улучшает точность поддержания напряжения.

4. Гибридная установка (СТК + КУ) – сочетает мощную конденсаторную батарею (грубая ступенчатая компенсация, например, на 80% требуемой мощности) и маломощный статический тиристорный компенсатор (плавная

быстрая доводка). Обеспечивает быстроедействие до 20 мс, плавное регулирование, но имеет высокую стоимость (в 2,5 раза выше базовой).

Проведем оценку по 10-балльной шкале по вышесказанным альтернативам, используя научные статьи и опыт производственных предприятий. Определим 7 основных критериев по выбору средства регулирования напряжения:

1. Точность поддержания напряжения – максимальное отклонение от номинала, %.

2. Быстродействие – время реакции на ступенчатое изменение нагрузки, мс.

3. Число переключений ступеней – в сутки (характеризует износ контакторов).

4. Качество электроэнергии – коэффициент искажения синусоидальности THDu, %.

5. Капитальные затраты – относительные (база – АККУ-Н).

6. Эксплуатационные расходы – относительные (включая обслуживание, замену контакторов).

7. Надёжность – средний ресурс до первого отказа, лет.

Рассмотрим каждое устройство и расставим соответственные баллы в таблице 1.

Таблица 1.

Оценка альтернатив

Критерий	АККУ-Н	Распределённая система	Координированная система	Гибридная установка
Точность напряжения	7	9	8	10
Быстродействие	5	5	5	10
Число переключений	8	6	7	10
Качество (THDu)	7	8	8	9

Капитальные затраты	10	8	6	4
Эксплуатац. расходы	10	9	8	6
Надёжность	9	7	9	6
Средний балл	8,0	7,4	7,3	7,9

Диаграмма (см. рисунок 1) наглядно показывает, что АККУ-Н имеет «выпуклую» форму в сторону экономических показателей (капитальные затраты, эксплуатационные расходы, надёжность), а гибридная установка – в сторону технических (быстродействие, точность).

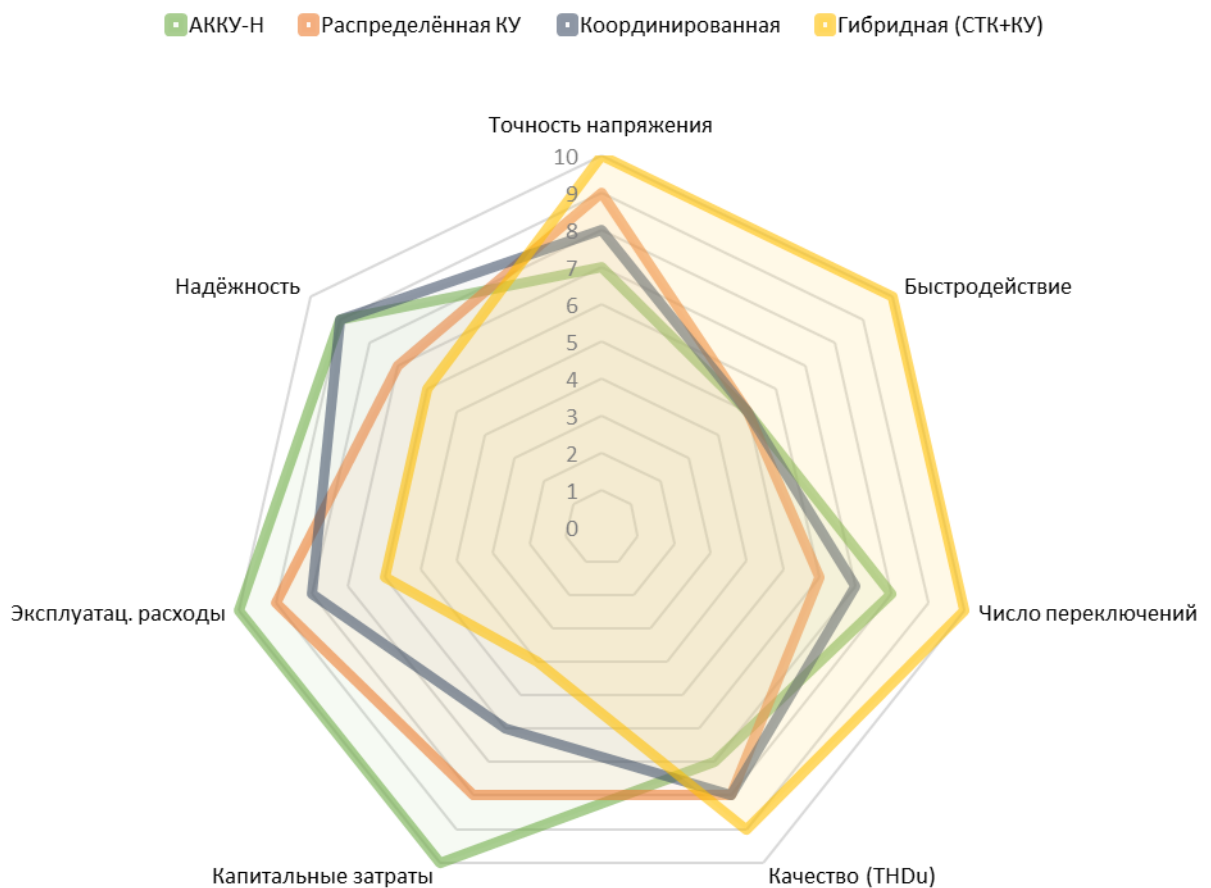


Рисунок 1. Лепестковая диаграмма сравнения

На основе проведённого анализа сформулированы следующие рекомендации:

1. Предприятия со стабильной нагрузкой (химические производства, насосные станции) – достаточно нерегулируемой конденсаторной батареи или АККУ-Н с минимальным числом ступеней (2–4).

2. Предприятия с умеренно переменной нагрузкой (машиностроение, лёгкая промышленность) – оптимальным является АККУ-Н, обеспечивающая лучшее соотношение цены и качества.

3. Протяжённые сети (расстояние между цехами более 300 м) – рекомендуется распределённая система компенсации с установкой батарей в узлах нагрузки.

4. Наличие трансформатора с РПН на ГПП – целесообразно внедрение координированной системы «КУ + РПН», снижающей износ РПН в 3–4 раза.

5. Резкопеременная нагрузка (дуговые печи, прокатные станы, сварочные комплексы) – необходима гибридная установка (СТК + КУ) или, как минимальное решение, АККУ с тиристорной коммутацией.

Проведённый сравнительный анализ показал, что не существует универсального устройства регулирования напряжения, одинаково эффективного для любых промышленных объектов. Выбор должен основываться на конкретных условиях эксплуатации: характере нагрузки, конфигурации сети, наличии РПН, уровне гармоник и бюджете. Однако для большинства промышленных предприятий с умеренно переменной нагрузкой и ограниченными финансовыми ресурсами наиболее рациональным является адаптивная конденсаторная установка с приоритетом напряжения (АККУ-Н).

Использованные источники:

1. Пискунова В. М., Герасимов Д. О., Суслов К. В. Интеллектуальные системы управления распределением электроэнергии // Электроэнергетика глазами молодежи–2019: материалы X Международной научно–технической

конференции. Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2019. Т. 2. С. 223–226. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41270987> (дата обращения: 30.03.2026).

2. Голиков И.О., Лансберг А.А. Возможности адаптивного регулирования напряжения в сети 0,4 кВ средствами компенсации реактивной мощности // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2015. № 12 (134). – С. 146-151.

3. Самарин Г. Н., Ружьев В. А., Егоров М. Ю. Способы коррекции уровней напряжения и несимметрии напряжений в сетях 0,4 кВ // Вестник Чувашского университета. 2017. № 1. С. 134–143.