

---

УДК 621.316

## РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ СТУПЕНЧАТОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Воронин В.А., старший преподаватель  
Непша Ф.С., к.т.н., старший научный сотрудник  
Варнавский С.А., научный сотрудник  
Кузбасский государственный технический университет  
имени Т.Ф. Горбачева  
г. Кемерово

**Введение и постановка проблемы.** Наиболее распространенным подходом к компенсации реактивной мощности (КРМ) является допущение о постоянстве электрических нагрузок потребителей [1, 2], однако, для электроприемников с резкопеременным режимом работы таких, как горно-шахтное оборудование (ГШО) выемочных участков угольных шахт, это допущение может привести к неоптимальной работе устройств КРМ (УКРМ) и неполной реализации потенциала повышения энергетической эффективности.

В работе [4] отмечена необходимость учета суточного графика электрической нагрузки шахтных электроустановок при определении средневзвешенного коэффициента мощности, а в [11] авторы указывают на невозможность выбора мощности УКРМ по среднему значению  $\text{tg}\varphi$  из-за риска возникновения перекомпенсации в процессе изменения потребляемой реактивной мощности в течение рабочей смены.

Многими авторами предложено использовать динамические УКРМ на базе технологии FACTS для КРМ в системах электроснабжения (СЭС) горных предприятий [6, 7, 9, 10]. Однако данные устройства все еще являются слишком дорогостоящими и не могут обеспечить приемлемых экономических показателей.

Менее дорогостоящими управляемыми УКРМ являются регулируемые ступенчатые батареи статических конденсаторов (БСК). Проблеме выбора мощности и числа ступеней таких УКРМ посвящен ряд работ. В работе [12] рассмотрена оптимизация выбора мощности и мест подключения БСК с учетом суточных профилей нагрузки потребителей. В [5] для оптимизации выбора мощности ступеней БСК использован алгоритм поиска кукушки (Cuckoo search). В [8] выполнена оптимизация КРМ с БСК при учете суточного графика изменения электрической нагрузки. В перечисленных работах оптимизация требует предварительного моделирования распределительной сети, что может представлять затруднение для инженеров-проектировщиков. В ряде случаев требуемая мощность УКРМ может быть определена исходя из паспортных параметров оборудования, но отсутствие простого и универсального

---

алгоритма распределения мощности по ступеням БСК, препятствует широкому использованию таких устройств.

В данной статье предложен алгоритм оптимального распределения мощности по ступеням УКРМ на основе анализа гистограммы реактивной мощности потребителя электроэнергии.

**Методология.** Алгоритм оптимального распределения мощности по ступеням УКРМ может быть построен на основе двух подходов. Первый подход основан на комбинаторном методе расчета и заключается в формировании матрицы всех возможных коммутационных состояний ступенчатой УКРМ и определении оптимального состояния УКРМ с точки зрения минимизации реактивной мощности для каждого уровня нагрузки (или момента времени графика нагрузки). Достоинством данного подхода является его простота и быстродействие. Для его работы достаточно иметь временной ряд или гистограмму частот реактивной мощности в месте установки УКРМ. Недостатком данного подхода является неучет быстродействия ступенчатой БСК. Как отмечено в работе [3], быстродействие ступенчатой конденсаторной установки определяется уставкой выдержки времени контроллера реактивной мощности и блокировкой включения ступени на время разряда конденсатора.

Данного недостатка лишен второй подход, предусматривающий имитационное моделирование работы ступенчатой БСК при заданном графике изменения реактивной мощности. Однако данный метод намного требовательнее к вычислительным ресурсам.

Разработка имитационной модели УКРМ выполнена в программной среде Matlab-Simulink, оптимизация выполнена с использованием пакета Matlab Optimization Toolbox. Блок-схемы разработанных алгоритмов оптимизации приведена на рис. 1.

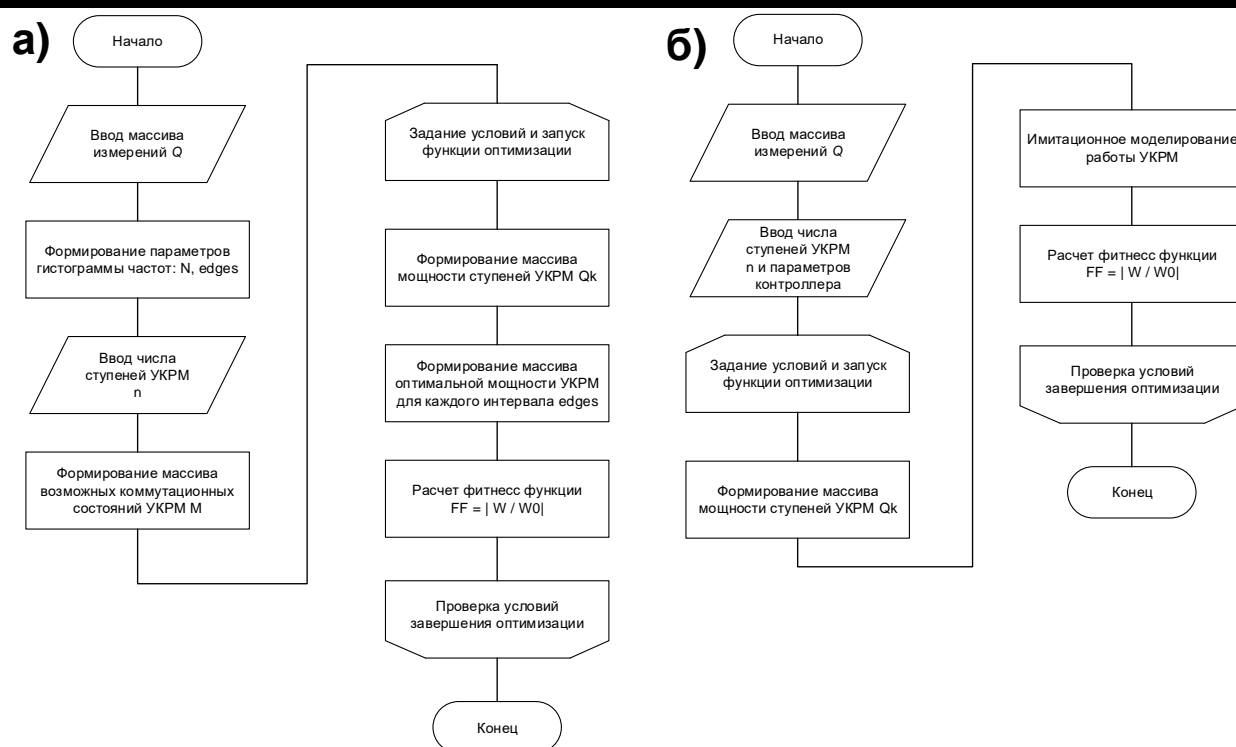


Рис. 1. Блок-схема алгоритма распределения мощности по ступеням УКРМ комбинаторный (а) и с использованием имитационной модели УКРМ (б)  
Фитнесс-функция оптимизации:

$$FF = |W / W_0|,$$

где  $W$  – исходная величина реактивного электропотребления;  $W_0$  – величина реактивного электропотребления при работе УКРМ.

Контроллер реактивной мощности УКРМ работает в режиме поддержания заданного коэффициента мощности. Выбранная уставка коэффициента мощности – 1. Уставка выдержки времени на включение составляет 5 секунда и является обратно зависимой от текущей величины ошибки регулирования по реактивной мощности. Время блокировки ступени для разряда конденсатора составляет 300 секунд. Общее описание имитационной модели УКРМ представлено в работе [3].

Оптимизация выполнена дискретным генетическим алгоритмом с числом особей в популяции – 50, при следующих ограничениях: мощность ступени от 1 до 600 квар; суммарная мощность всех ступеней до 800 квар.

Для проверки алгоритмов оптимизации использован временной ряд реактивной мощности очистного комбайна, полученный по результатам измерений на одной из угольных шахт Кемеровской области.

**Результаты и обсуждение.** Результаты оптимального распределения мощности по ступеням УКРМ приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Результаты выполнения оптимизации

Кол-во ступеней	Мощности ступеней, квар		Средневзвешенное отклонение, %
	рис. 1, а	рис. 1, б	
1	502	537	6,52
2	494 + 56	483 + 68	4,17
3	494 + 74 + 52	480 + 72 + 65	4,70
4	478 + 78 + 64 + 27	478 + 72 + 66 + 63	6,48
5	484 + 75 + 61 + 47 + 22	457 + 68 + 60 + 36 + 33	8,72

Как следует из табл. 1, применение разных алгоритмов для распределения реактивной мощности по ступеням УКРМ дает схожие результаты (отклонения не превышают 10 %), а после приведения полученных значений к существующему параметрическому ряду номинальных мощностей БСК, отклонения практически полностью устраняются. Это говорит о том, что быстроедействие ступенчатой УКРМ не оказывает существенного влияния на КРМ очистного комбайна. В то же время длительность выполнения одной итерации оптимизации при использовании комбинаторного метода расчета (рис. 1, а) примерно в 6500 раз меньше, чем при использовании имитационного моделирования (рис. 1, б).

На рис. 2, а приведен пример графика изменения фитнес-функции при оптимизации реактивной мощности разными алгоритмами для УКРМ с пятью ступенями. Величина фитнес-функции нормирована по минимальному значению. В обоих случаях для выполнения оптимизации требуется примерно одинаковое число итераций, однако, за счет большего быстрогодействия общие затраты времени при комбинаторном методе расчета существенно меньше.

На рис. 2, б приведена совмещенная диаграмма реактивной мощности очистного комбайна и ступенчатой УКРМ. Разреженное расположение столбцов на гистограмме частот реактивной мощности УКРМ обусловлена дискретным характером ее изменения при различных комбинациях включенных ступеней.

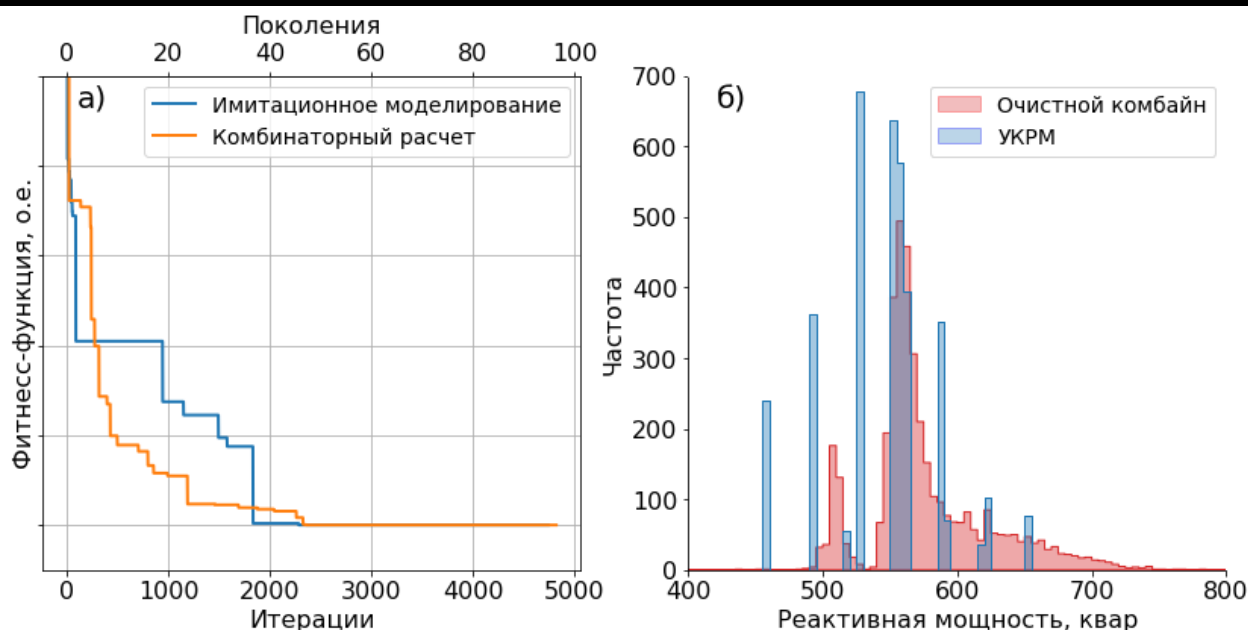


Рис. 2. График изменения фитнес-функции (а) и совмещенная гистограмма частот реактивной мощности очистного комбайна и УКРМ (б)

Применение управляемой ступенчатой УКРМ позволяет увеличить ее установленную мощность, не допуская перекомпенсации, и повысить эффективность КРМ до 13 % (для очистного комбайна). Однако при выборе числа ступеней необходимо учитывать и экономическую эффективность. Недостатком рассмотренных подходов является неучет стоимости УКРМ при выполнении оптимизации. Таким образом предложенный алгоритм может быть использован как вспомогательный инструмент при разработке мероприятий по КРМ, позволяющий достаточно просто определить технически оптимальную компоновку ступенчатой БСК. При отсутствии результатов измерений реактивной мощности по объекту проектирования для оптимизации могут быть использованы типовые гистограммы реактивной мощности ГШО.

**Заключение.** В данной статье предложен алгоритм оптимизации распределения реактивной мощности по ступеням УКРМ. Установлено, что для выполнения оптимизации могут быть использованы простые комбинаторные методы расчета, существенно превосходящие по быстродействию методы имитационного моделирования. Неучет быстродействия ступенчатой УКРМ вызывает отклонение не более 10 % при КРМ очистного комбайна.

**Благодарности.** Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых №МК-236.2020.8.

**Список литературы:**

- 
1. Железко Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко, Litres, 2018. 457 с.
  2. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: [учеб.-справ. пособие] / Б. И. Кудрин, Теплотехник, 2009. 698 с.
  3. Воронин В. А., Непша Ф. С. Применение управляемых конденсаторных установок в системах электроснабжения угольных шахт Кемерово: КузГТУ, 2021.
  4. Озерной М. И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт / М. И. Озерной, Москва: Недра, 1975. 448 с.
  5. Ahbab F. [и др.]. Capacitor bank step state optimization under load alteration in smart distribution networks 2017.C. 1–5.
  6. Bilgin H. F. [и др.]. Reactive power compensation of coal mining excavators by using a new generation STATCOM 2005.C. 185-197 Vol. 1.
  7. Buła D. [и др.]. Control Strategy of 1 kV Hybrid Active Power Filter for Mining Applications // Energies. 2021. № 16 (14). С. 4994.
  8. Gil-González W. [и др.]. Optimal Selection and Location of Fixed-Step Capacitor Banks in Distribution Networks Using a Discrete Version of the Vortex Search Algorithm // Energies. 2020. № 18 (13). С. 4914.
  9. Jie K. Research on control strategy of cascade STATCOM underground coal mine 2011.C. 2782–2786.
  10. Li Y. [и др.]. Research of Mining STATCOM Based on Hybrid Multi-level H-bridge Inverter // Energy and Power Engineering. 2013. № 04 (05). С. 636.
  11. Morley L. A. Mine Power Systems / L. A. Morley, U.S. Department of the Interior, 1990. 437 с.
  12. Soma G. G. Optimal Sizing and Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm // Electricity. 2021. № 2 (2). С. 187–204.

Информация об авторах:

Воронин Вячеслав Андреевич, старший преподаватель, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, [voroninva@kuzstu.ru](mailto:voroninva@kuzstu.ru)

Непша Федор Сергеевич, к.т.н., старший научный сотрудник, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, [nepshafs@kuzstu.ru](mailto:nepshafs@kuzstu.ru)

Варнавский Сергей Александрович, научный сотрудник, КузГТУ, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28