

**Научная статья****УДК 621.316****DOI: 10.26730/1816-4528-2022-1-61-68**

**Воронин Вячеслав Андреевич<sup>1,\*</sup>, научный сотрудник, Непша Федор Сергеевич<sup>1</sup>, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник**

<sup>1</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева

\*E-mail: voroninva@kuzstu.ru

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ УКРМ В УСЛОВИЯХ НЕРАВНОМЕРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

**Информация о статье**

Поступила:

12 сентября 2021 г.

Одобрена после

рецензирования:

20 января 2022 г.

Принята к печати:

15 февраля 2022 г.

**Ключевые слова:**

компенсация реактивной мощности; оптимизация; имитационное моделирование; энергоэффективность

**Аннотация.**

Целью настоящей работы является представление подхода к определению параметров конденсаторных установок рудничного исполнения в условиях их использования в подземной части систем электроснабжения выемочных участков угольных шахт на основе использования методов имитационного моделирования и оптимизации.

В статье дана краткая характеристика методов оптимизации, используемых для компенсации реактивной мощности, и обосновано применение суррогатного алгоритма оптимизации. Далее авторами представлено описание используемой целевой функции, включающей в себя величину чистого дисконтированного дохода, и сделано математическое описание условий оптимизации. В работе используется имитационная модель системы электроснабжения выемочного участка угольной шахты и электроприводов горно-шахтного оборудования, реализованная в среде Matlab – Simulink, позволяющая моделировать работу системы электроснабжения выемочного участка в динамических режимах с учетом горно-геологических условий и технологических параметров горных машин. В заключительной части статьи представлены результаты оптимизации параметров конденсаторных установок при реализации компенсации реактивной мощности на этапе эксплуатации и проектирования системы электроснабжения. Сделаны выводы о высокой экономической эффективности компенсации реактивной мощности, а также о существенно лучших показателях при реализации мероприятий по этапе проектирования системы электроснабжения.

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2021 138/3)

**Для цитирования:** Воронин В.А., Непша Ф.С. Выбор оптимальной мощности и мест размещения УКРМ в условиях неравномерных электрических нагрузок выемочных участков угольных шахт // Горное оборудование и электромеханика. 2022. № 1 (159). С. 61-68. DOI: 10.26730/1816-4528-2022-1-61-68

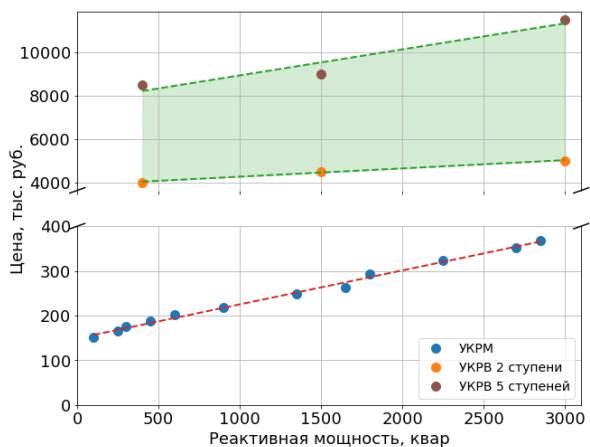


Рис. 1. Зависимости удельных цен на УКРМ и УКРВ  
Fig. 1. Dependences of unit prices for reactive power compensation devices

**Введение.** Традиционные подходы к разработке мероприятий по компенсации реактивной мощности (КРМ), как правило, основаны на сопоставлении фактической и нормируемой величины коэффициента реактивной мощности  $\text{tg}\phi$  [1, 2] либо базируются на оптимационных расчетах [3, 4]. Вычисления проводятся аналитически либо с использованием простых имитационных моделей для расчета установившегося режима работы. Описанные подходы за долгое время их применения показали достаточную эффективность и простоту их реализации, однако в ряде случаев учет особенностей технологического процесса и характера потребления реактивной мощности электрооборудования может позволить получить более эффективное решение в части КРМ.

Цифровизация энергетики, активное развитие методов имитационного моделирования, а также широкое внедрение систем непрерывного мониторинга электрических и технологических параметров электрооборудования может позволить значительно повысить эффективность принимаемых решений при проектировании систем электроснабжения (СЭС) и при разработке мероприятий по КРМ.

В данной статье рассматривается подход к разработке мероприятий по КРМ в СЭС выемочных участков угольных шахт с использованием методов имитационного моделирования, анализа данных и методов оптимизации.

**Постановка проблемы.** Размещение, выбор числа и мощности устройств КРМ (УКРМ) в СЭС является сложной комбинаторной оптимизационной задачей. В работах, посвященных оптимизации КРМ [5–11], выделяют следующие основные методы оптимального размещения УКРМ в распределительных сетях:

- аналитические методы;
- методы численного программирования;
- нейросетевые методы;
- метаэвристические методы и методы на основе искусственного интеллекта;
- методы на основе анализа чувствительности;
- комбинированные методы.

К аналитическим методам относятся: метод прямого перебора; градиентные методы; метод Лагранжа; метод Ньютона и др. Данные методы находят широкое применение при оптимизации КРМ, однако имеют ряд недостатков. В работе [5] отмечены такие недостатки аналитических методов, как чувствительность к начальным приближениям, требования к непрерывности, дифференцируемости и унимодальности целевой функции, затруднение в определении глобального экстремума функции, плохая приспособленность для дискретных функций. В работах [6, 11] также отмечены проблемы, возникающие при оптимизации функции с локальными экстремумами с помощью классических методов оптимизации.

Размещение УКРМ в распределительной сети является многокритериальной, условной оптимизационной задачей с недифференцируемой, дискретной целевой функцией, имеющей локальные экстремумы [11, 12]. В связи с этим многими авторами [5, 11, 13, 14] предложено использовать недетерминированные (стохастические), работающие одновременно с большим количеством текущих решений (многоагентные) алгоритмы оптимизации, такие как генетический алгоритм, метод роя частиц и др. В работе [5] выполнена оптимизация размещения и выбора мощности батарей статических конденсаторов (БСК) в СЭС с учетом пусковых процессов электродвигателей с использованием генетического алгоритма. В [14] использован генетический алгоритм для оптимизации параметров БСК в распределительной сети с учетом суточных профилей электрической нагрузки. В [11] оптимизация выполняется с помощью модифицированного метода дискретного роя частиц. В [12] оптимальное размещение БСК в распределительной сети выполнено методом генетического алгоритма. В [15] выполнена оптимизация размещения БСК с учетом гармонических искажений в сети методом роя частиц. В работе [16] рассмотрена оптимизация размещения УКРМ методом роя частиц с применением индекса потерь.

Оптимизационная задача, рассматриваемая в данной работе, относится к категории задач оптимизации «черного ящика» (black-box optimization). Для таких задач характерны следующие признаки [17]:

- оптимизируемая целевая функция не имеет аналитического выражения;
- значение целевой функции определяется времязатратным моделированием;
- целевая функция может быть не дифференцируемой;
- наличие скрытых ограничений, нарушение которых приводит к отказу имитационного моделирования.

В связи с вышесказанным классические градиентные методы оптимизации не могут быть использованы для оптимизации «черного ящика», т.к. градиент целевой функции не может быть получен традиционным способом из-за отсутствия аналитического выражения функции, а применение метода конечных разностей для вычисления градиента требует слишком большого числа запусков времязатратной имитационной модели.

Методы оптимизации, основанные только на значении функции и не требующие ее производной (derivative-free), такие, как методы прямого поиска, генетические алгоритмы, метод роя частиц и др. также требуют для своей реализации слишком большое количество итераций.

Оптимизация сложных и времязатратных целевых функций может быть выполнена с использованием суррогатных моделей. Суррогатной называют функцию, которая аппроксимирует некоторую другую функцию и занимает намного меньше времени для расчета. Таким образом для нахождения значений оптимизируемых переменных, минимизирующих заданную «тяжелую» целевую функцию, предварительно выполняются сотни вычислений «легкой» суррогатной функции.

В данной статье рассматривается использование алгоритма суррогатной оптимизации для выбора оптимальных параметров УКРВ в комплексной и времязатратной имитационной модели СЭС выемочного участка угольной шахты.

**Методология.** Как правило, целевая функция оптимизации КРМ включает в себя следующие составляющие [6, 18, 19]:

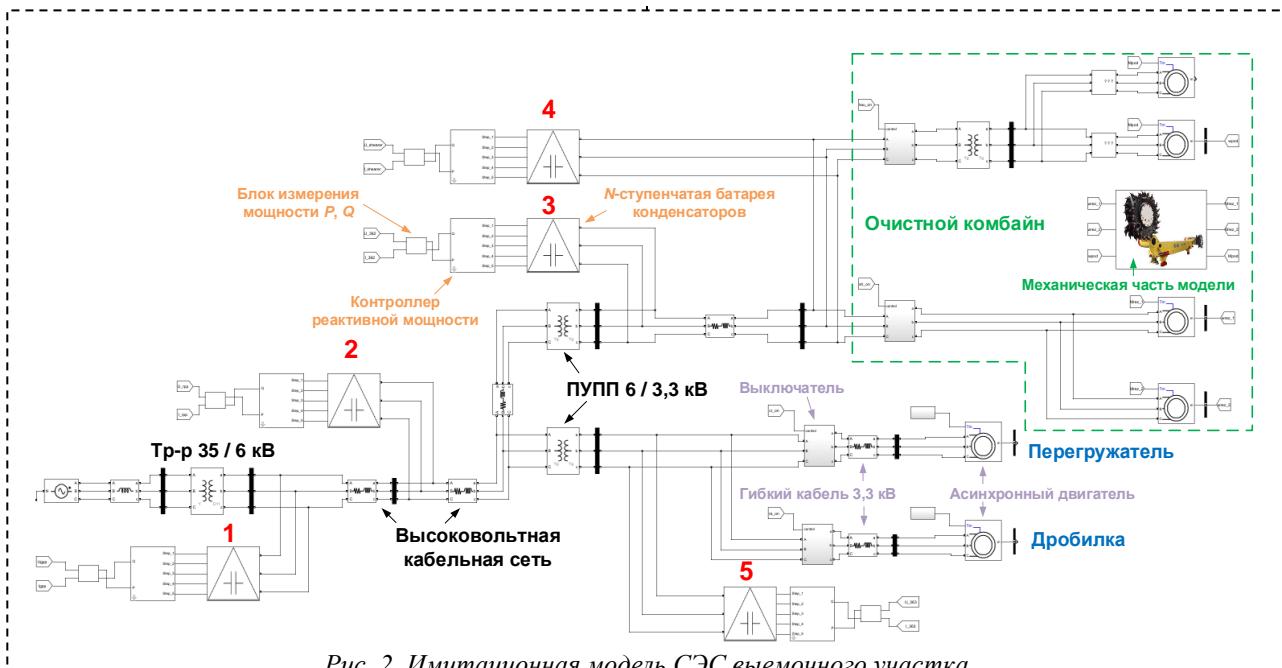


Рис. 2. Имитационная модель СЭС выемочного участка  
Fig. 2. Simulation model of the excavation area PSS

- капитальные затраты на установку УКРМ;
- годовые эксплуатационные затраты на обслуживание УКРМ;
- стоимость потерь электрической энергии в распределительной сети с УКРМ.

В работе [10] предложено также учитывать:

- коэффициент реактивной мощности;
- среднее и максимальное отклонение напряжения;
- коэффициент гармонических искажений.

В обзорной статье [20] приведены ссылки на 27 публикаций, посвященных оптимизации КРМ с 1961 по 2018 гг. Более чем в половине работ использована целевая функция для снижения потерь мощности в сети, а примерно в 30% работ целевая функция составлена для регулирования напряжения с помощью УКРМ.

Также в целевой функции необходимо учесть снижение капитальных затрат на электросетевое оборудование при снижении его номинальной мощности благодаря КРМ. Например, вопросы выбора цеховых трансформаторов с учетом КРМ рассмотрены в работе [21].

Для оценки экономической эффективности КРМ целесообразно использовать чистый дисконтированный доход ( $NPV$ ). Величина капитальных затрат на КРМ ( $IC$ ) должна включать в себя:

$$IC = C_{PFC} - \Delta C_{PG},$$

где  $C_{PFC}$  – капитальные затраты на УКРМ и УКРВ;  $\Delta C_{PG}$  – разница между капитальными затратами на электросетевое оборудование подземной распределительной сети угольной шахты при учете и без учета КРМ. Таким образом при достаточной величине  $\Delta C_{PG}$  возврат инвестиций в КРМ может произойти еще до их размещения.

При оценке капитальных затрат на КРМ в угольных шахтах необходимо учитывать различие в стоимости УКРМ общепромышленного исполнения и УКРВ рудничного исполнения. На рис. 1 приведены зависимости стоимости компенсирующих устройств от реактивной мощности, используемые в данной работе.

На рис. 1 по имеющимся ценам были построены линейные регрессии вида  $Y = a + bx$ . Как следует из представленных зависимостей, стоимость УКРВ многократно превышает стоимость УКРМ из-за наличия взрывозащиты. Значение  $a$ -коэффициента регрессии для УКРВ в 26...52 раза превышает ана-

логичные значения для УКРМ общепромышленного исполнения.  $b$ -коэффициент регрессии для УКРВ также больше, чем для УКРМ в 5...15 раз. Необходимо также отметить, что УКРМ общепромышленного исполнения на рис. 1 имеют от 2 до 9 ступеней, причем увеличение числа ступеней незначительно влияет на стоимость УКРМ. В то время как увеличение числа ступеней УКРВ с 2-х до 5-ти увеличивает их стоимость более чем в 2 раза.

Величину денежного потока от КРМ ( $CF$ ) можно записать как:

$$CF = \Delta C_{energy} - OC_{PFC},$$

где  $\Delta C_{energy}$  – разница в величине платы за электроэнергию и мощность угольной шахты до и после КРМ (плата за электроэнергию и мощность определяется для 4-й ценовой категории по тарифам, приведенным на сайте ПАО «Кузбассэнергосбыт»);  $OC_{PFC}$  – эксплуатационные расходы на обслуживание УКРМ (УКРВ).

С учетом вышесказанного фитнес-функцию для оптимизации КРМ в СЭС выемочных участков угольных шахт можно записать следующим образом:

$$OF = -NPV_T,$$

где  $T$  – период времени для расчета  $NPV$ , следует принимать в зависимости от требуемого срока возврата инвестиций. Таким образом в ходе оптимизации будет найден вариант КРМ, обеспечивающий максимальный чистый дисконтированный доход к сроку  $T$ .

Оптимизация выполняется с использованием суррогатного алгоритма (surrogateopt) в программном пакете Global Optimization Toolbox в среде Matlab. Оптимизируемыми параметрами являются мощности ступеней УКРВ (УКРМ)  $Q$  с учетом следующих ограничений:

$$\min OF(Q) \text{ при } \begin{cases} 0 \leq Q \leq 1200 \\ \text{sum}(Q) \leq 1200, \\ \text{sum}(Q) \geq 400 \end{cases}$$

где  $\text{sum}(Q)$  – суммарная мощность УКРВ (УКРМ)..

Для сокращения длительности оптимизации формируется набор начальных значений оптимизируемых параметров, которые алгоритм суррогатной оптимизации рассматривает в первую очередь. Данный набор значений формируется на основе упрощенной и быстрой оптимизации мощностей

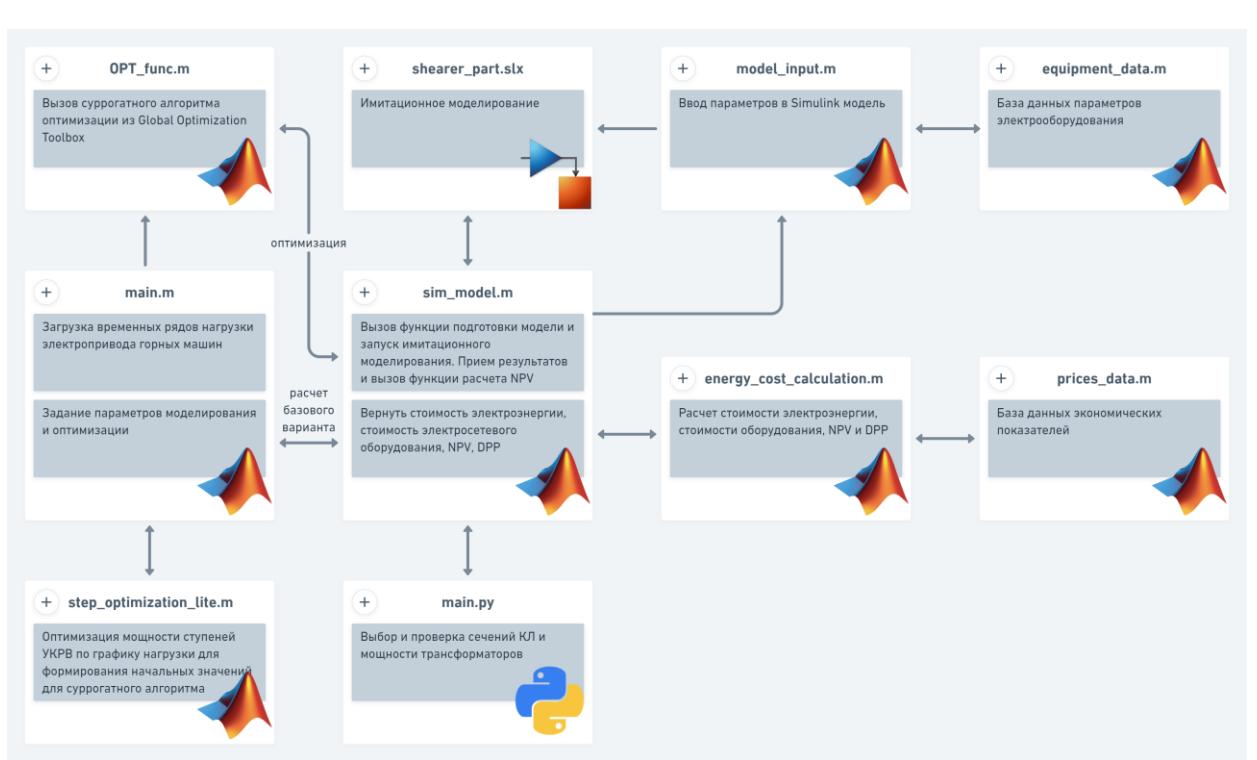


Рис. 5. Алгоритм оптимизации  
Fig. 5. Optimization Algorithm

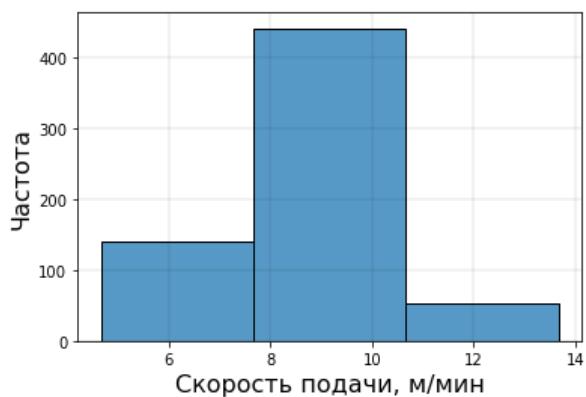


Рис. 3. Гистограмма частот скорости подачи комбайна  
Fig. 3. Shearer haulage speed rate histogram

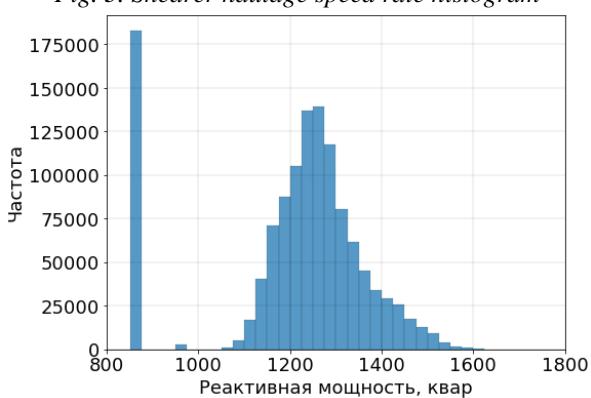


Рис. 4. Гистограмма частот реактивной мощности моделируемого режима  
Fig. 4. Histogram of the frequencies of the reactive power of the modeled mode

стушеней УКРВ по заданной гистограмме частот реактивной мощности по критерию минимизации

реактивного электропотребления методом генетического алгоритма. Данный алгоритм представлен в работах [22, 23].

Для расчета целевой функции использована имитационная модель СЭС выемочного участка угольной шахты в среде Matlab – Simulink, разработка которой была описана авторами в работах [24-26].

В данной статье рассмотрен участок СЭС очистного забоя, который включает в себя очистной комбайн Eickhoff SL 900 (2104 кВт), перегружатель (400 кВт) и дробилку (400 кВт). Имитационная модель рассматриваемого участка СЭС в Matlab – Simulink показана на рис. 2.

В связи с тем, что имитационное моделирование занимает длительное время, для облегчения модели блоки Asynchronous machine в электроприводе горных машин были заменены блоками Three-Phase Dynamic Load, на вход которых подаются временные ряды активной и реактивной мощности для данной горной машины, которые были предварительно получены путем моделирования нормально-го режима работы выемочного участка СЭС в исходной «сложной» модели. Исключение блоков Asynchronous machine снижает вычислительную сложность модели и позволяет увеличить шаг дискретизации, что значительно ускоряет моделирование. Согласно результатам моделирования работы СЭС выемочного участка с УКРВ в сложной и облегченной модели, разница в средней полной мощности, потребляемой электроприводами горных машин, составляет не более 5%.

Для выполнения оптимизации с помощью имитационного моделирования сформирован фрагмент графика электрических нагрузок рабочей смены СЭС выемочного участка, включающий в себя:

- пуск горных машин;
- зарубку и рабочий ход очистного комбайна при разных скоростях подачи;
- холостой ход очистного комбайна при отсутствии подачи.

Согласно результатам анализа массивов измерений электрических и технологических парамет-

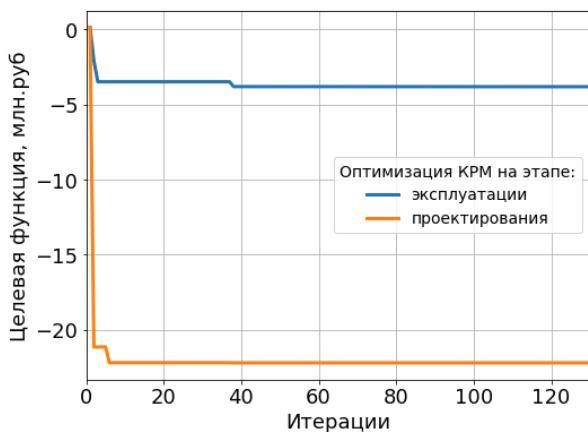


Рис. 6. График изменения целевой функции оптимизации при КРМ на этапе эксплуатации и проектирования СЭС выемочного участка

Fig. 6. The graph of the change in the objective function of optimization in the case of PFC at the stage of operation and design of the PSS of the excavation area

Таблица 1. Результаты оптимизации  
Table 1. Optimization results

Параметр	Эксплуатация	Проектирование
Состав, квр	1x912	1x689 + 1x250
NPV, млн. руб.	3,82	22,20

ров работы выемочного участка одной из угольных шахт Кемеровской области, приведенных в работах [27], в течение смены в среднем 52,7% времени оборудование не работает, 40,3% времени занимает рабочий режим, а 7% – холостой ход. Среднее количество пусков в смену – 11. В течение рабочего режима скорость подачи комбайна изменяется в соответствии с гистограммой, приведенной на рис. 3.

Таким образом типовой сценарий рабочей смены будет включать:

- простой – 252,96 мин;
- рабочий режим – 193,44 мин;
- работа при отсутствии подачи (холостой ход) – 33,6 мин.

При среднем числе пусков – 11, для имитационного моделирования рабочей смены СЭС выемочного участка рабочий режим можно представить в виде совокупности интервалов в 1249 сек. Таким образом, годовой расход электроэнергии СЭС выемочного участка определяется по результатам моделирования 1249 сек режима при допущении о том, что полная рабочая смена в среднем состоит из 11 таких интервалов, количество смен в сутки – 3, а число рабочих дней в году – 365.

Для моделирования рабочего режима принят средний коэффициент загрузки электроприводов очистного комбайна в 0,79. По результатам моделирования рабочего режима получен график реактивной мощности с размахом изменения от 858,9 квр до 1435,9 квр ( $p = 0,95$ ), гистограмма частот которого приведена на рис. 4.

Для выбора и проверки сечений кабельных линий и мощности трансформаторов ПУПП при учете КРМ разработана программа на языке Python, которая по заданной схеме включения, паспортным параметрам оборудования, а также мощностям и местам расположения УКРВ выполняет выбор параметров электросетевого оборудования и оценивает величину капитальных затрат.

Алгоритм взаимодействия отдельных программных модулей при реализации оптимизации показан на рис. 5.

**Результаты и обсуждение.** В ходе оптимационных расчетов было выполнено 130 итераций суррогатного алгоритма оптимизации. График изменения целевой функции показан на рис. 6.

В результате расчета были определены оптимальные параметры УКРВ. При оптимизации КРМ на этапе эксплуатации оптимальный состав УКРВ – одно устройство в позиции №4 (рис. 2) с одной ступенью мощностью 912 квр. При оптимизации КРМ на этапе проектирования, с учетом возможности снижения номинальной мощности трансформаторов и сечений кабельных линий, оптимальный состав УКРВ – два устройства: в позиции №4 – две ступени 689 и 250 квр; в позиции №5 – одна ступень 265 квр. Как следует из рис. 6, реализация КРМ на этапе проектирования позволяет существенно увеличить величину  $NPV$  (в 5,8 раз). Кроме того, в этом случае удается вернуть инвестиции в УКРВ еще до их размещения за счет сокращения капитальных затрат на электросетевое оборудование. Дисконтированный срок окупаемости инвестиций в УКРВ на этапе эксплуатации составляет 6 лет, а на этапе проектирования окупаемость происходит еще до установки УКРВ.

Результаты оптимизации также представлены в табл. 1.

Оптимальные точки размещения УКРВ – максимальное приближение к электроприводам горных машин (индивидуальная КРМ).

Стоит отметить, что лучшее значение целевой функции при использовании суррогатного алгоритма отличается от аналогичного значения при использовании предварительной упрощенной оптимизации генетическим алгоритмом не более, чем на 10 %.

**Заключение.** В статье рассмотрен подход к выбору параметров УКРВ в СЭС выемочных участков угольных шахт на основе использования методов имитационного моделирования и оптимизации.

Установлено, что использование УКРВ в подземной части выемочных участков угольных шахт для КРМ является экономически эффективным решением для обеспечения энергоэффективности СЭС.

Выявлено, что реализация КРМ на этапе проектирования СЭС выемочного участка, с учетом возможности снижения номинальной мощности трансформаторов и сечений кабельных линий, позволяет существенно повысить величину  $NPV$  (в 5,8 раз).

Полученные результаты работы могут быть полезны при проектировании СЭС и разработки мероприятий по КРМ. Рассмотренный подход может быть распространен и на иные объекты с учетом внесения соответствующих изменений в имитационной модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Озерной М. И. Электрооборудование и электроснабжение подземных разработок угольных шахт / М.И. Озерной. М. : Недра, 1975. 448 с.
2. Установка конденсаторная рудничная высоковольтная типа УКРВ-6,3 :: Корпорация РудЭнергоМаш «РЭМ» [Электронный ресурс]. – URL: [http://remeksim.ru/product/ustanovka\\_kondensatornaya\\_rudnichnaya\\_visokovoltnaya\\_tipa\\_ukrv\\_63](http://remeksim.ru/product/ustanovka_kondensatornaya_rudnichnaya_visokovoltnaya_tipa_ukrv_63) (дата обращения: 16.09.2021).
3. Плащанский Л. А. Основы электроснабжения горных предприятий. М. : Издательство Московского государственного горного университета, 2006. 499 с.

4. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий: [учеб.-справ. пособие]. М. : ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 2006. 672 с.
5. Дабаров В. В. Компенсация реактивной мощности в динамических режимах работы электродвигательной нагрузки: монография [Электронный ресурс] Кемерово : КузГТУ, 2015. 106 с. Текст.
6. Толба Мохамед Али Хассан. Развитие методов оптимизации размещения компенсирующих устройств и возобновляемой распределенной генерации в радиальных электрических сетях: диссертация ... кандидата технических наук: 05.14.02 / Толба Мохамед Али Хассан. – Москва, 2018. – 171 с.
7. Abul'Wafa A. R. Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method // Electric Power Systems Research. 2013. Vol. 95. P. 168-174.
8. Ng H. N., Salama M.M.A., Chikhani A.Y. Classification of capacitor allocation techniques // IEEE Transactions on Power Delivery. 2000. T. 15. № 1. С. 387-392.
9. Sirjani R., Rezaee Jordehi A. Optimal placement and sizing of distribution static compensator (D-STATCOM) in electric distribution networks: A review / R. Sirjani, // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 77. P. 688-694.
10. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review A. A. Téllez [и др.] // Heliyon. 2018. T. 4. № 8.
11. Optimal allocation and sizing of capacitors to minimize the transmission line loss and to improve the voltage profile : PCO' 2010 / I. Ziari [et al.] // Computers & Mathematics with Applications. 2010. Vol. 60. № 4. P. 1003-1013.
12. Boone G., Chiang H.-D. Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic algorithm // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 1993. Vol. 15. № 3. P. 155-161.
13. Кулиев Э. В., Лежебоков А. А., Кравченко Ю. А. Роеевой алгоритм поисковой оптимизации на основе моделирования поведения летучих мышей// Известия ЮФУ. Технические Науки. 2016. № 7 (180).
14. Soma G. G. Optimal Sizing and Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm // Electricity. 2021. Vol. 2. № 2. P. 187-204.
15. Yu X., Xiong X., Wu Y. A PSO-based approach to optimal capacitor placement with harmonic distortion consideration// Electric Power Systems Research. 2004. Vol. 71. № 1. P. 27-33.
16. Optimal placement of capacitor in radial distribution system using PSO / D. Sattianadan [и др.] // International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011) International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011). 2011. С. 326-331.
17. Bajaj I., Arora A., Hasan M.M.F. Black-Box Optimization: Methods and Applications / I. Bajaj, // Black Box Optimization, Machine Learning, and No-Free Lunch Theorems : Springer Optimization and Its Applications / eds. P. M. Pardalos, V. Rasskazova, M.N. Vrahatis. Cham : Springer International Publishing, 2021. P. 35-65.
18. Железко Ю .С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. Москва : ЭНАС, 2009. 456 с.
19. Беляевский Р. В. Повышение энергоэффективности территориальных сетевых организаций при оптимизации потребления реактивной мощности: диссертация ... кандидата технических наук: 05.09.03 / Р. В. Беляевский. Кемерово. 2015. 132 с.
20. Saad O. Historical Literature Review of Optimal Placement of Electrical Devices in Power Systems: Critical Analysis of Renewable Distributed Generation Efforts / O. Saad, C. Abdeljabbar // IEEE Systems Journal. 2021. T. 15. № 3. С. 3820-3831.
21. Степанов В. М., Косырихин В. С. Выбор цеховых трансформаторов с учетом компенсации реактивной мощности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2010. № 3-5. С. 38-43.
22. В. А. Воронин, Непша Программа для ЭВМ № 2021669862 Программа для выбора оптимальной конфигурации многоступенчатой конденсаторной установки на очистных участках угольных шахт. КузГТУ, 2021.
23. Воронин В. А., Непша Ф. С., Варнавский С. А. Разработка алгоритма выбора оптимальной конфигурации ступенчатой конденсаторной установки // ЭНЕРГОСТАРТ. Материалы IV Всероссийской молодежной научно-практической конференции. Кемерово : КузГТУ, 2021.
24. Nepsha F. S., Voronin V. A., Ermakov A. N. METHODOLOGY OF SIMULATION COMPUTER MODELING OF THE POWER SUPPLY SYSTEM OF THE COAL MINE EXTRACTION AREA / Mining Equipment and Electromechanics. 2020. № 6. С. 59-67.
25. Voronin V. A., Nepsha F. S. Modelling and Simulation of Scraper Face Conveyor Electric Drive // 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC) 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). 2020. С. 63-67.
26. Voronin V., Nepsha F. Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system. 2021.
27. Voronin V., Nepsha F., Ermakov A. Analysis of electric consumption: a study in the excavation area of the modern coal mine // E3S Web of Conferences. 2021. Vol. 326. P. 00005.

© 2022 Авторы. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Об авторах:

**Воронин Вячеслав Андреевич**, научный сотрудник, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)  
**Непша Федор Сергеевич**, кандидат техн. наук, старший научный сотрудник, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28)

Заявленный вклад авторов:

Воронин В.А., Непша Ф.С. - постановка исследовательской задачи; научный менеджмент; обзор соответствующей литературы; концептуализация исследования; написание текста, сбор и анализ данных; обзор соответствующей литературы; выводы; написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Vyacheslav A. Voronin\*, senior lecturer, Fedor S. Nepsha, C. Sc. In Engineering, senior researcher

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University.,

\*E-mail: voroninva@kuzstu.ru

## OPTIMAL SIZING AND PLACING OF CONDENSERS UNDER HARSH ELECTRIC LOADS OF COAL MINES EXCAVATION AREAS

### Abstract.

The purpose of this work is to present an approach to determining the parameters of mine-type capacitor units in the conditions of their use in the underground part of the power supply systems of mining sections of coal mines based on the use of simulation and optimization methods.

The article gives a brief description of the optimization methods used for reactive power compensation and substantiates the use of a surrogate optimization algorithm. Further, the authors present a description of the objective function used, which includes the value of the net present value, and make a mathematical description of the optimization conditions. The work uses a simulation model of the power supply system for the excavation area of a coal mine and electric drives for mining equipment, implemented in the Matlab - Simulink environment, and which allows simulating the operation of the power supply system for the excavation area in dynamic modes, taking into account mining and geological conditions and technological parameters of mining machines.

The final part of the article presents the results of optimizing the parameters of capacitor units in the implementation of reactive power compensation at the stage of operation and design of the power supply system. Conclusions are drawn about the high economic efficiency of reactive power compensation, as well as significantly better performance in the implementation of measures at the design stage of the power supply system.

**Acknowledgment:** The research was supported by the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (№ 075-03-2021-138/3)

### Article info

Received:

12 September 2021

Accepted for publication:

20 January 2022

Accepted:

15 February 2022

**Keywords:** power factor correction; optimization; simulation modeling; energy efficiency

**For citation** Voronin V.A., Nepsha F.S. Optimal sizing and placing of condensers under harsh electric loads of coal mines excavation areas. Mining Equipment and Electromechanics, 2022; 1(159):61-68 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2022-1-61-68

### REFERENCES

1. Ozernoi M. I. Electrical equipment and power supply of underground coal mines [Elektrooborudovanie i elektrosnabzhenie podzemnykh razrabotok ugol'nykh shakht], Moscow: Nedra. 1975.
2. Explosion-proof mine condenser unit (EP-MCU). Product Catalog.," Manufacturing plants of mining equipment JSC "EXC Manufacturing plants of mining equipment JSC "EXC, 2021. <http://oaoex.ru/upload/docs/ukrv-a-63-500-uhl5-specifications.pdf> (accessed Aug. 21, 2021)
3. Plashchanskiy L. A., Kholmogorov M. M. Reactive power compensation in distribution networks of mining enterprises. Mining Science and Technology, no. 1, Art. no. 1. 2016.
4. Kudrin B. I. Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy: [ucheb.-sprav. posobie]. Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriyatiy. 2006. P. 672.
5. Dabarov V. V. Compensation of reactive power in dynamic modes of operation of an electric motor load, KuzSTU, Kemerovo, 2015. P. 107
6. Tolba Mokhamed Ali Khassan. Razvitie metodov optimizatsii razmeshcheniya kompensiruyushchikh ustroystv i vozobnovlyayemoy raspredelennoy generatsii v radial'nykh elektricheskikh setyakh. 2018. P. 171 .
7. Abul'Wafa A. R. Optimal capacitor allocation in radial distribution systems for loss reduction: A two stage method. Electric Power Systems Research. 2013; 95:168-174.
8. Ng H. N., Salama M. M. A., Chikhani A. Y. Classification of capacitor allocation techniques. IEEE Transactions on Power Delivery. 2000; 15(1): 387-392.
9. Sirjani R., Rezaee Jordehi A.. Optimal placement and sizing of distribution static compensator (D-STATCOM) in electric distribution networks: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017; 77: 688-694.
10. Téllez A. Á. [et al]. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review. Heliyon. 2018; 4(8).
11. I. Ziari [et al.] Optimal allocation and sizing of capacitors to minimize the transmission line loss and to improve the voltage profile: PCO' 2010. Computers & Mathematics with Applications. 2010; 60(4): 1003-1013.
12. Boone G., Chiang H.-D. (1993) Optimal capacitor placement in distribution systems by genetic

- algorithm. International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 1993; 15(3):155-161.
13. Kuliev E. V., Lezhebokov A. A., Kravchenko Yu. A. Roevoy Algoritm Poiskovoy Optimizatsii Na Osnove Modelirovaniya Povedeniya Letuchikh Myshey. Izvestiya Yufu. Tekhnicheskie Nauki, 2016. 7(180).
14. Soma G. G. Optimal Sizing ad Placement of Capacitor Banks in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm. Electricity. 2021; 2(2):187-204.
15. Yu X., Xiong X., Wu Y. A PSO-based approach to optimal capacitor placement with harmonic distortion consideration. Electric Power Systems Research. 2004; 71(1):27-33.
16. D. Sattianadan [et al] Optimal placement of capacitor in radial distri-bution system using PSO. International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011) International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011). 2011. P. 326-331.
17. Bajaj I., Arora A., Hasan M. M. F. Black-Box Optimization: Methods and Applications. Black Box Optimization, Machine Learning, and No-Free Lunch Theorems : Springer Optimization and Its Applications. Cham: Springer International Publishing. 2021. P. 35-65.
18. Zhelezko Yu. S. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov. Poteri elektroenergii. Reaktivnaya moshchnost'. Kachestvo elektroenergii. 2018. P. 457.
19. Belyaevskiy R. V. Povyshenie energoeffektivnosti territorial'nykh setevykh organizatsiy pri optimizatsii potrebleniya reaktivnoy moshchnosti. 2015. P. 132.
20. Saad O., Abdeljebbar C. Historical Literature Review of Optimal Placement of Electrical Devices in Power Systems: Critical Analysis of Renewable Distributed Generation Efforts. IEEE Systems Journal. 2021; 15(3):3820-3831.
21. Stepanov V. M., Kosyrikhin V. S. Vybor tsekhovykh transformatorov s uchetom kompensatsii reaktivnoy moshchnosti. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2010; 3-5: 38-43.
22. Voronin V. A., Nepsha F. S. Programma dlya EVM № 2021669862 Programma dlya vybora optimal'noy konfiguratsii mnogostupenchatoy kondensatornoy ustanovki na ochistnykh uchastkakh ugol'nykh shakht. 2021.
23. Voronin V. A., Nepsha F. S., Varnavskiy S. A. Razrabotka algoritma vybora optimal'noy konfiguratsii stupenchatoy kondensatornoy ustanovki. ENERGOSTART. Materialy IV Vserossiyskoy molodezhnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. 2021.
24. Nepsha F. S., Voronin V. A., Ermakov A. N. METHODOLOGY OF SIMULATION COMPUTER MODELING OF THE POWER SUP-PLY SYSTEM OF THE COAL MINE EXTRACTION AREA. Mining Equipment and Electromechanics. 2020; 6:59-67.
25. Voronin V. A., Nepsha F. S. Modelling and Simulation of Scraper Face Conveyor Electric Drive. 2020 Ural Smart Energy Conference (USEC). 2020. P. 63-67.
26. Voronin V., Nepsha F. Simulation of the electric drive of the shearer to assess the energy efficiency indicators of the power supply system. 2021.
27. Voronin V., Nepsha F., Ermakov A. (2021) Analysis of electric consumption: a study in the excavation area of the modern coal mine. E3S Web of Conferences. 2021; 326:00005.

© 2022 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

The authors declare no conflict of interest.

About the authors

**Vyacheslav A. Voronin**, senior lecturer, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, 28 Vesennaya st.,)

**Fedor S. Nepsha**, C. Sc. In Engineering, senior researcher, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (650000, Russia, Kemerovo, 28 Vesennaya st.,)

Contribution of the authors:

Voronin V.A., Nepsha F.S. – research problem statement; scientific management; reviewing the relevant literature; conceptualisation of research; writing the text, data collection; data analysis; reviewing the relevant literature; drawing the conclusions; writing the text.

All authors have read and approved the final manuscript.