

**УДК 621.316**

## **ПРИМЕНЕНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ КОНДЕНСАТОРНЫХ УСТАНОВОК В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

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

Компенсация реактивной мощности (КРМ) является одним из основных мероприятий по повышению энергетической эффективности систем электроснабжения. Разгрузка электрической сети от перетоков реактивной мощности приводит к снижению потерь электроэнергии и напряжения, что позволяет использовать устройства КРМ (УКРМ) также и для регулирования напряжения.

Однако суточные графики реактивной мощности многих потребителей электроэнергии могут характеризоваться высокой степенью неравномерности. Предприятия металлургической и горнодобывающей промышленности имеют резкопеременный характер электропотребления. Для выемочных участков угольных шахт характерны частые пуски и остановки, а также значительное колебание нагрузки в течение рабочей смены, связанной с влиянием множества случайных факторов на нагруженность электропривода горных машин. На рис. 1 приведен пример графика электрических нагрузок выемочного участка шахты, включающего в себя очистной комбайн, скребковый конвейер, перегружатель и дробилку. В таких условиях для КРМ целесообразно применять управляемые УКРМ.

В электрических сетях среднего напряжения для КРМ наибольшее распространение получили нерегулируемые и ступенчато-регулируемые (автоматические) конденсаторные установки (АКУ). Статические тиристорные компенсаторы (СТК) и устройства STATCOM, обеспечивающие плавное регулирование реактивной мощности, получили распространение главным образом в электрических сетях высокого и сверхвысокого напряжения, а маломощные устройства D-STATCOM все еще не нашли широкого применения, в связи с их высокой стоимостью. Более того реализация мероприятий по КРМ в условиях угольных шахт затруднена необходимостью соблюдения требований по взрывозащите для электрооборудования, работающего в условиях горных выработок опасных по пыли и газу. В настоящее время на рынке представлены взрывозащищенные нерегулируемые и ступенчато-регулируемые конденсаторные установки компании ЕХС [1]. Важным вопросом является оценка эффективности работы регулируемых конденсаторных установок в условиях резкопеременных электрических нагрузок выемочного участка угольной шахты.

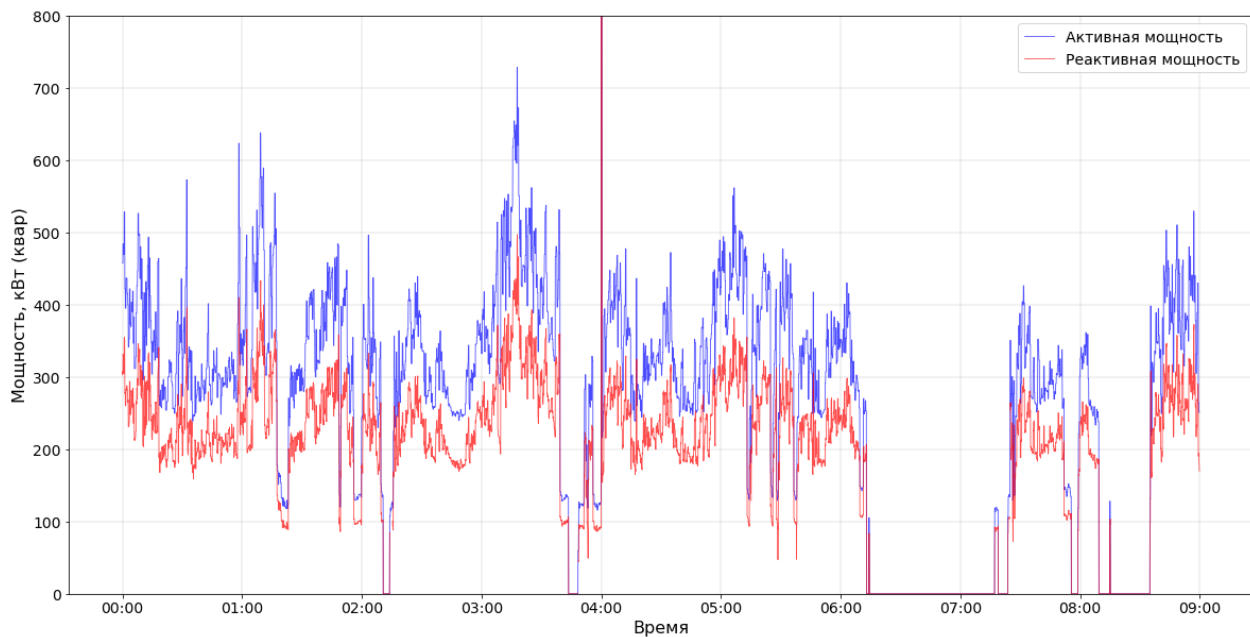


Рис. 1. График электрической нагрузки выемочного участка угольной шахты (интервал измерения 5 сек)

АКУ оснащаются контроллером реактивной мощности, осуществляющим автоматическое включение и отключение отдельных ступеней УКРМ в зависимости от выбранного метода регулирования. В работе [2] выделяют следующие основные методы управления УКРМ:

- управление по расписанию – время включения и отключения отдельных ступеней задается заранее в виде расписания в течение суток или большего периода времени (например, для сезонного регулирования);
- управление по напряжению – переключение ступеней выполняется в зависимости от уровня напряжения, в этом случае УКРМ используется для автоматического регулирования напряжения;
- управление по реактивной мощности – используется для минимизации потерь электроэнергии;
- управление по коэффициенту мощности – используется для поддержания требуемого  $\cos\varphi$ ;
- управление по температуре и току – используется, если УКРМ не оснащен датчиком измерения реактивной мощности;
- ручное управление.

Современные контроллеры также позволяют реализовать на практике любой алгоритм управления УКРМ.

В условиях резко изменяющихся электрических нагрузок важным фактором является время переключения УКРМ. Быстродействие АКУ среднего напряжения определяется выбранным методом управления, временем разряда конденсаторов и износостойкостью контакторов.

Как отмечается в [3], до недавнего времени были распространены алгоритмы управления на основе контроля мгновенного значения  $\cos\varphi$ , однако, со-

временные регуляторы вместо мгновенного значения отслеживают  $\cos\varphi$  за выбранный интервал времени. Например, регуляторы реактивной мощности марки NOVAR [4] имеют параметр – время регулирования, который определяет частоту повторения регулирующих воздействий. Время регулирования может быть фиксированным или обратнозависимым от величины текущей ошибки регулирования [5].

Коммутационный ресурс контакторов ступеней АКУ ограничен, в связи с этим регулятор реактивной мощности может накладывать ограничения на частоту переключений.

Включение конденсаторных батарей под напряжение может сопровождаться значительными бросками тока и перенапряжением, величина которого в том числе зависит и от остаточного заряда конденсатора. В связи с этим перед каждым повторным включением требуется провести разряд конденсаторной батареи, что может существенно ограничить быстродействие АКУ. Как отмечается в [6], для конденсаторов с номинальным напряжением до 660 В время разряда составляет не более 180 с, а при номинальном напряжении 660 В и выше – не более 10 мин. Как правило, эта значение составляет 5 мин [2].

Задачей контроллера реактивной мощности также является выбор ступени регулирования для включения или отключения. Как правило, при этом используется принцип First In First Out [7], согласно которому сначала подключаются ступени, которые были отключены раньше всего и их остаточный заряд минимален. Также при наличии ступеней разной мощности регулятор должен обеспечить достижение оптимального состояния компенсации с минимальным количеством переключений, правильно выбирая ступень регулирования.

Фрагмент алгоритма работы контроллера реактивной мощности приведен на рис. 2.

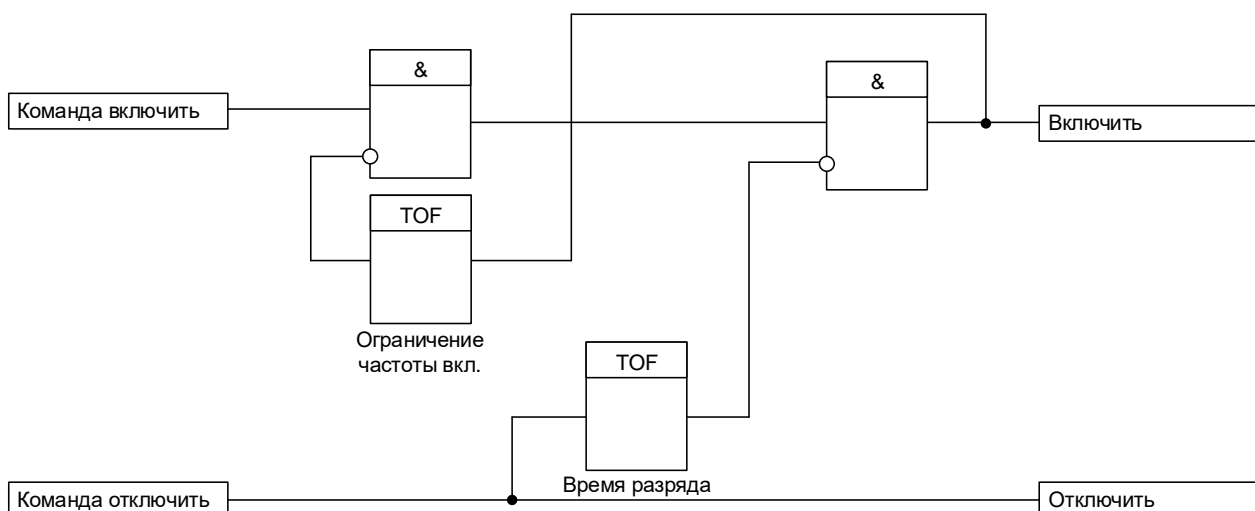


Рис. 2. Упрощенный алгоритм формирования управляющего воздействия регулятора реактивной мощности

Алгоритм управления АКУ, часть которого показана на рис. 2, был реализован в среде Matlab – Simulink. Для оценки эффективности КРМ был использован график реактивной мощности, приведенный на рис. 1. Моделируемая АКУ имеет 3 ступени по 100 кВАр. Метод управления – по реактивной мощности, полная компенсация. Быстродействие АКУ ограничено блокировкой включения ступеней таймером разряда (5 минут). Результаты моделирования представлены на рис. 3.

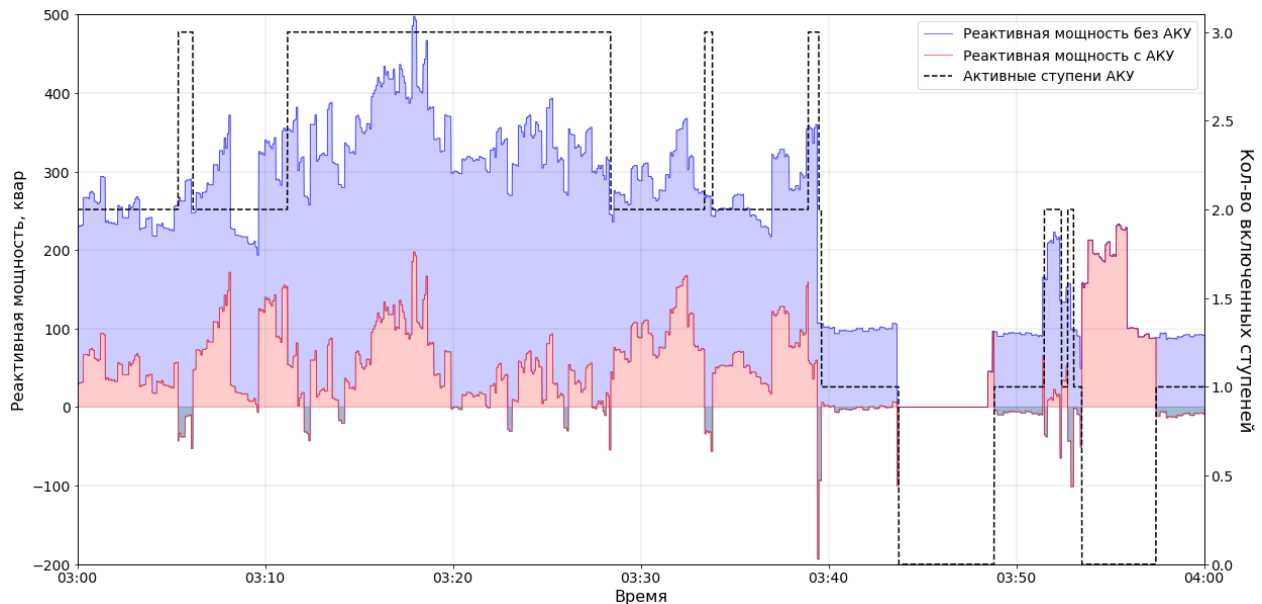


Рис. 3. Фрагмент графика реактивной мощности при наличии и отсутствии АКУ

За интервал моделирования в 9 часов АКУ выполнила 140 переключений, уменьшив потребление реактивной мощности на 86 %. Возможность автоматического изменения реактивной мощности УКРМ позволяет в каждый момент времени выбрать оптимальный режим компенсации. Увеличение количества ступеней АКУ позволит еще более гибко регулировать реактивную мощность и повысить эффективность КРМ.

Поскольку стоимость контроллера составляет лишь малую часть общей стоимости АКУ среднего напряжения, их внедрение в системы электроснабжения с резко-переменной нагрузкой может привести к значительному повышению эффективности КРМ. Сравнительный анализ работы электрической сети с нерегулируемой и регулируемой УКРМ может быть выполнен с помощью имитационного моделирования. Для построения имитационной модели АКУ может быть использован алгоритм, приведенный на рис. 2.

Управляемые УКРМ даже с малым быстродействием могут позволить значительно повысить эффективность КРМ по сравнению с нерегулируемыми устройствами. Дальнейшее повышение эффективности КРМ, а также возможность реагирования на кратковременные изменения реактивной мощности (например, при пуске электродвигателей) требует увеличения быстродействия УКРМ. Для АКУ это может быть достигнуто за счет применения алгоритмов

управляемой коммутации контакторов [8] или использования тиристорных контакторов [3].

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

### Список литературы:

1. Установка конденсаторная рудничная взрывозащищенная (УКРВ). Каталог продукции / Заводы-изготовители горно-шахтного оборудования ЗАО "ЕХС". URL: <http://oaоex.ru/upload/docs/ukrv-a-63-500-uhl5-specifications.pdf>
2. Voloh, I. Review of Capacitor Bank Control Practices / I. Voloh, T. Ernst // 2019 Texas A&M Protective Relaying Conference URL: <http://prorelay.tamu.edu/wp-content/uploads/sites/3/2019/03/Review-of-Capacitor-Bank-Control-Practices-R1.pdf>
3. Современные тенденции развития автоматизированных систем компенсации реактивной мощности // ИСУП, № 4(46). – 2013. – URL: <https://isup.ru/articles/36/5136/>
4. Регуляторы реактивной мощности NOVAR-1106 / 1114 / 1206 / 1214 / 1414 NOVAR-1xxx / S400 NOVAR-1005 / 1007 / 1005D / 1007D NOVAR-1312, NOVAR-1312-3 Версия 1.4 / 1.0 ( N1312 ). Руководство по эксплуатации
5. Marroquin, A. Implementation of a Switched Capacitor Control Scheme using User-Defined Dynamic Load Models / A. Marroquin, A. Chee, M. Manjarekar, 2013 URL: [https://etap.com/docs/default-source/white-papers/implementation-of-a-switched-capacitor-control-scheme.pdf?sfvrsn=8a37b27f\\_20](https://etap.com/docs/default-source/white-papers/implementation-of-a-switched-capacitor-control-scheme.pdf?sfvrsn=8a37b27f_20)
6. Шишкин С.А. Разряд конденсаторных батарей установок компенсации реактивной мощности // Силовая электроника. – 2006. – № 2. – С. 50–52
7. Yuan T., Yu Q., Wu Z. (2012) Design and Implementation of the Improved Control Algorithm for Switching Capacitor Banks. In: Xie A., Huang X. (eds) Advances in Electrical Engineering and Automation. Advances in Intelligent and Soft Computing, vol 139. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-27951-5\\_61](https://doi.org/10.1007/978-3-642-27951-5_61)
8. Лиске, Е.Г. Исследование переходных процессов при управляемом включении конденсаторной батареи / Е.Г. Лиске, Д.С. Сельменова, Д.Е. Шевцов // Вестник ПНИПУ, №24. – 2017. – С. 121-133