

Д.Г. ЗОЗИЕВ, А.В. КОТОВА, Э.О. МАЛИЕВ,  
магистранты гр. Элм-25 (СКГМИ(ГТУ))

Научный руководитель О.А. ГАВРИНА, к.т.н., доцент (СКГМИ(ГТУ))  
г. Владикавказ

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТВЁРДЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО МОНИТОРИНГА И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

### **Аннотация**

Статья посвящена исследованию энергетической эффективности специализированного электротермического оборудования в производстве твёрдых сплавов. Представлены результаты комплексного мониторинга энергопотребления муфельных печей и сварочных аппаратов с использованием современных измерительных систем. Разработаны практические решения по оптимизации технологических процессов, позволяющие снизить энергоёмкость на 15-20%. Особое внимание уделено перспективам внедрения цифровых двойников и систем предиктивной аналитики для управления энергопотреблением.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, электротермическое оборудование, мониторинг энергопотребления, цифровой двойник, твёрдые сплавы, оптимизация процессов

В рамках выполнения экспериментальной программы осуществлялся комплексный мониторинг ключевых параметров, включающий фиксацию электрических величин (силы тока, напряжения, активной мощности, расхода электроэнергии) и основных технологических показателей. Особое внимание уделялось контролю температуры рабочей среды, являющейся критически важным параметром при синтезе твёрдых сплавов. Измерения проводились как в установившихся нормальных режимах функционирования оборудования, так и в переходных процессах, связанных с операциями нагрева и охлаждения технологических установок [5].

Для обеспечения высокой точности измерений использовалась многоуровневая система сбора данных, включающая: интеллектуальные измерительные преобразователи с автоматической коррекцией показаний; систему термопар с беспроводной передачей данных; программно-аппаратный комплекс для синхронизации временных меток.

Для исследования мгновенных значений электроэнергетических параметров в кратковременных интервалах (до 30 минут) применялся специ-

ализированный анализатор электропотребления AR5. Ключевым преимуществом данного оборудования является наличие интегрированного вычислительного модуля, обеспечивающего оперативную обработку измеряемых величин непосредственно в процессе проведения эксперимента. Это позволяет осуществлять непрерывный мониторинг динамических характеристик энергопотребления с высокой временной разрешающей способностью. Использование встроенного процессора анализатора AR5 открывает возможности для: моментального вычисления производных параметров (коэффициентов мощности, гармонических искажений); адаптивной фильтрации измерительных сигналов; автоматической компенсации инструментальных погрешностей; оперативного обнаружения аномалий в потреблении [1, 6].

Получаемые с помощью анализатора AR5 данные позволяют: оптимизировать графики работы энергоемкого оборудования; выявлять скрытые резервы энергосбережения; формировать цифровые профили нагрузок; разрабатывать адаптивные системы управления электропотреблением.

Интеграция современных измерительных комплексов в системы энергомониторинга создает основу для построения интеллектуальных систем управления энергохозяйством промышленных предприятий.

На рассматриваемом предприятии твердосплавного производства основными потребителями электроэнергии являются печи сопротивления (вращающиеся, муфельные, карбидизации и т.д.).

Спаренные муфельные печи сопротивления косвенного нагрева представляют собой специализированное технологическое оборудование, предназначенное для операции предварительного спекания заготовок (штабиков) в производстве твёрдых сплавов. Конструктивной особенностью данных установок является двухканальное исполнение с применением нагревательных элементов на основе молибдена, обеспечивающих рабочую температуру до 1600°C. Каждая из нагревательных зон представляет собой автономный модуль мощностью 40 кВт с однофазной схемой подключения [3, 8].

Питание нагревательных зон осуществляется через специализированные печные трансформаторы ТПО-63/80/160 ПК, характеризующиеся следующими параметрами: номинальная мощность: 63 кВА; первичное напряжение: 380 В; диапазон вторичного напряжения: 24,4-80 В; ступенчатое регулирование: 8 позиций трансформации.

Регулировочная характеристика трансформаторов обеспечивает возможность плавного изменения тепловой мощности в процессе спекания за счет переключения числа витков обмотки высокого напряжения.

По итогам проведения энергоаудита были установлены ключевые энергетические параметры работы одноканальной муфельной печи (рисунок 1).

Современные тенденции развития электротермического оборудования предполагают: внедрение тиристорных преобразователей для бесступенчатого регулирования мощности; использование алгоритмов адаптивного управления температурными режимами; интеграцию в системы промышленного Интернета вещей; внедрение предиктивных систем диагностики состояния нагревательных элементов [2, 9].

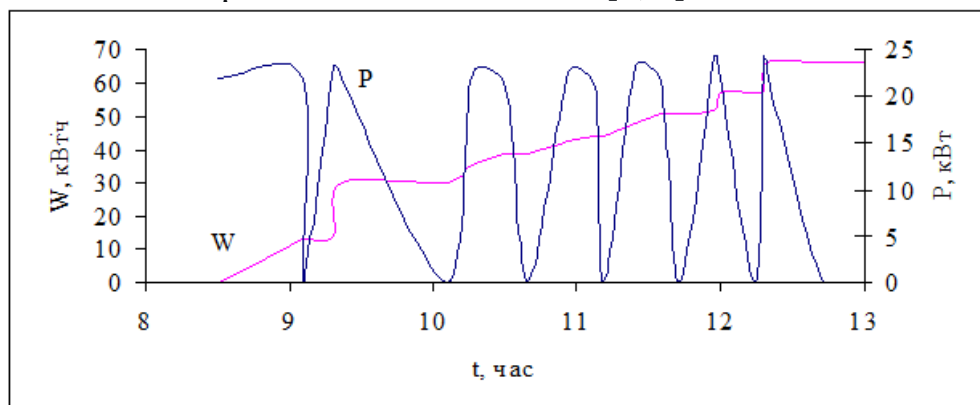


Рис. 1. График изменения мощности и электропотребления муфельной печи

Применение современных систем управления позволяет: снизить энергоемкость процесса на 15-20%; обеспечить стабильность температурных полей в рабочем пространстве; повысить воспроизводимость технологических параметров; увеличить срок службы молибденовых нагревателей

Дальнейшее развитие направлено на создание цифровых двойников технологического процесса, позволяющих оптимизировать режимы спекания с учетом характеристик исходных материалов и требований к конечной продукции.

Полученные экспериментальные данные служат основой для создания адаптивных систем управления тепловыми процессами и оптимизации энергопотребления при сохранении требуемых технологических параметров производства.

Специализированные сварочные аппараты моделей ЦЭП и КПН представляют собой технологическое оборудование, предназначенное для соединения заготовок из молибдена методом контактной сварки. Для достижения технологически необходимого температурного диапазона 2200-2400°C в установках применяется принцип прямого резистивного нагрева через специализированные трансформаторы ОСУ 100/0,5 или ОСУ 200/0,5, формирующие на выходе параметры: напряжение 18 В при силе тока до 4,7 кА [4].

Регулирование температурных параметров в процессе сварки осуществляется за счет прецизионного изменения напряжения на первичной обмотке силового трансформатора. Технологический цикл включает сле-

дующие этапы: прогрев: 8 минут; изотермическая выдержка: 13 минут; охлаждение: 8 минут; финальное охлаждение: 1 минута

Производительность оборудования варьируется в диапазоне 1,7-7,8 кг/час при номинальной мощности 80 кВт для моделей ЦЭП и 138 кВт для аппаратов КПН.

Проведенные экспериментальные исследования позволили количественно оценить энергетические параметры работы сварочного аппарата ЦЭП-223А, результаты которых визуализированы на рисунке 2.

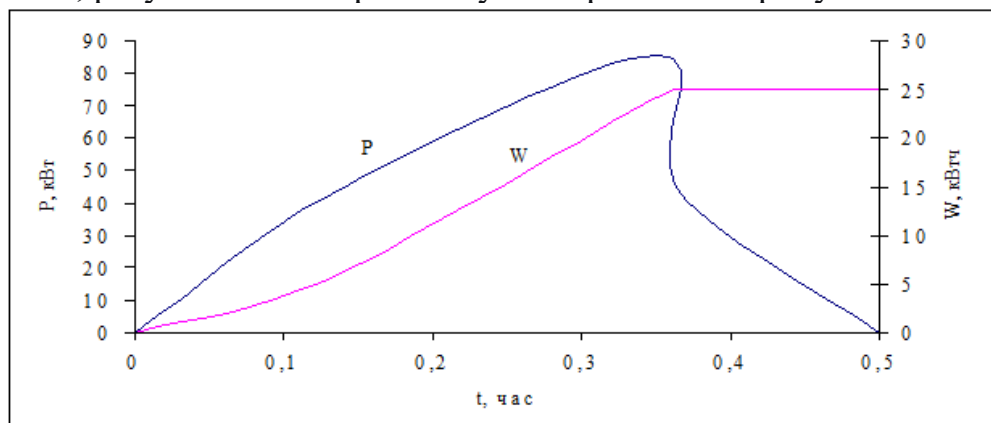


Рис. 2. Динамика изменения мощности и расхода электроэнергии сварочного аппарата ЦЭП-223А

Была проведена также экспериментальная оценка энергоэффективности сварочного аппарата ЦЭП-223А, которая выявила оптимальные соотношения между потребляемой мощностью и качеством сварного соединения. Полученные данные демонстрируют: нелинейную зависимость энергопотребления от массы свариваемых заготовок; наличие оптимальных точек работы оборудования по критерию "энергия/качество"; возможности снижения удельного энергопотребления на 15-20% за счет оптимизации временных параметров цикла [7].

#### Выводы:

1. Комплексный мониторинг энергопотребления с использованием анализатора AR5 позволяет выявить резервы оптимизации работы электротермического оборудования и снизить энергоемкость технологических процессов на 15-20%.

2. Применение современных систем управления с тиристорными преобразователями и адаптивными алгоритмами обеспечивает повышение стабильности температурных режимов и увеличение срока службы нагревательных элементов.

3. Экспериментальные исследования выявили нелинейный характер зависимости энергопотребления от массы обрабатываемых заготовок, что позволяет оптимизировать технологические параметры процессов спекания и сварки.

4. Создание цифровых двойников технологического процесса обеспечивает возможность моделирования различных режимов работы оборудования и выбора оптимальных параметров с учетом характеристик исходных материалов.

5. Интеграция систем промышленного Интернета вещей (IIoT) и предиктивной аналитики позволяет перейти к эффективному управлению энергопотреблением и повысить воспроизводимость технологических параметров.

6. Перспективным направлением развития является создание гибридных систем управления, сочетающих традиционные методы регулирования с алгоритмами искусственного интеллекта для минимизации энергозатрат.

#### Список литературы:

1. Ключев, Р.В., Гаврина, О.А., Мадаева, М.З., Абаев, Г.Я. Ранговый анализ высших гармонических составляющих по напряжению на предприятиях цветной металлургии // Энергоэффективность. Ценология. Экология и Энергобезопасность. Материалы научной конференции. Под научной редакцией Л.Х. Зайнутдиновой, М.Г. Тягунова, 2020. – С. 179-184.

2. Босиков, И.И., Ключев, Р.В., Гаврина, О.А., Текиев, М.В. Разработка научно обоснованной концепции функционирования единой промышленно-энергетической системы // Модели мышления и интеграция информационно-управляющих систем (ММИИУС-2018). Материалы второй Международной научной конференции, посвящённой 25-летию юбилею Кабардино-Балкарского научного центра Российской академии наук, 2018. – С. 321-328.

3. Klyuev, R.V., Tekiev, M.V., Silaev, V.I., Bosikov, I.I., Gavrina, O.A. Sustainable operation analysis of the mining industry power supply system// E3S Web of Conferences. International Conference on Innovations, Physical Studies and Digitalization in Mining Engineering. Saint-Petersburg, 2021. – С. 00016.

4. Гаврина, О.А., Ключев, Р.В., Босиков, И.И., Лысоконь, Э.С. Энергообеспечение потребителей за счет использования солнечных электростанций // Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Материалы Международной научно-практической конференции, 2018. – С. 403-407.

5. Босиков, И.И., Цидаев, Б.С., Гаврина, О.А. Разработка методов для повышения эффективности оценки, анализа и разработки месторождений железистых кварцитов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2018. – № S25. – С. 162-170.

6. Ключев, Р.В., Гаврина, О.А., Лысоконь, Э.С., Гаврина, Ю.В., Каджаев, О.В. Оценка качества электроэнергии на предприятии цветной металлургии на надежность работы электрооборудования // Труды СКГМИ (ГТУ), 2018. – № 25. – С. 19-24.

7. Ключев, Р.В., Голик, В.И., Босиков, И.И., Гаврина, О.А. Обеспечение электробезопасности высокогорного карьера за счет выбора селективной релейной защиты в электрических сетях напряжением выше 1 кВ // Безопасность труда в промышленности, 2021. – № 9. – С. 31-37.

8. Гаврина, О.А., Плиева, М.Т., Кабисов, А.А., Гудиев, Т.Т. Разработка эффективной системы диагностики повреждений воздушных линий электропередач // В сборнике: Достижения, проблемы и перспективы развития нефтегазовой отрасли. Материалы IV Международной научно-практической конференции, 2019. – С. 366-371.

9. Ключев, Р.В., Босиков, И.И., Гаврина, О.А., Голик, В.И. Повышение качества электроэнергии на промышленных предприятиях за счет применения активного фильтра гармоник // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле, 2022. – № 2. – С. 313-324.

10. Ключев, Р.В., Босиков, И.И., Гаврина, О.А., Ляшенко, В.И. Повышение безопасности и эффективности электроснабжения участков добычи руд на высокогорном руднике // Безопасность труда в промышленности, 2022. – № 1. – С. 7-13.

Информация об авторах:

Зозиев Давид Георгиевич, студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Котова Анастасия Владиславовна, студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Малиев Эрик Олегович, студент гр. ЭЛм-25-1, СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44.

Гаврина Оксана Александровна, к.т.н., доцент СКГМИ(ГТУ), 362021, г. Владикавказ, ул. Николаева, д. 44, Gavrina-Oksana@yandex.ru.