

УДК 621.355.2

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ДЕСУЛЬФАТАЦИЯ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ИМПУЛЬСНЫМИ АСИММЕТРИЧНЫМИ ТОКАМИ

Е. А. МОИСЕЕВ

Белорусско-Российский университет

Могилев, Беларусь

Актуальность исследования обусловлена повсеместным использованием свинцово-кислотных аккумуляторов (АКБ) в качестве основных стартерных батарей для автомобилей с двигателями внутреннего сгорания. Однако специфика использования стартерных аккумуляторов – частые недозаряды в городском цикле, глубокие разряды при длительных простоях, воздействие экстремальных температур – приводит к ускоренной деградации и, как следствие, к преждевременному выходу батареи из строя. Таким образом, разработка эффективных методов восстановления ресурса данных АКБ представляет собой важную практическую задачу для автосервисной отрасли. Основным лимитирующим фактором их срока службы является необратимая сульфатация – процесс образования на поверхности электродов крупнокристаллического, плохорастворимого сульфата свинца ($PbSO_4$). Этот слой снижает активную площадь пластин, увеличивает внутреннее сопротивление и приводит к потере полезной ёмкости. Традиционные методы зарядки неспособны обратить глубокую сульфатацию, что создаёт необходимость в разработке специализированных восстановительных технологий. Среди них – метод электрохимической десульфатации импульсными асимметричными токами (ИАТ).

Теоретической основой процесса служит электрохимическая кинетика образования и растворения $PbSO_4$. При нормальной эксплуатации разряд сопровождается образованием мелкодисперсного $PbSO_4$, который при последующем заряде легко регенерируется в диоксид свинца и губчатый свинец. Однако при нарушении режимов эксплуатации происходит рекристаллизация: мелкие кристаллы растворяются и повторно осаждаются в виде крупных, термодинамически стабильных образований с низкой растворимостью и проводимостью. Метод ИАТ направлен на разрушение именно этой стабильной структуры. Принцип действия основан на подаче на АКБ последовательности импульсов сложной формы, включающей мощный зарядный импульс прямой полярности, короткий разрядный импульс обратной полярности и паузу. Такое воздействие создаёт нестационарные условия у поверхности электрода. Зарядный импульс обеспечивает основную электрохимическую реакцию преобразования $PbSO_4$, в то время как разрядный импульс вызывает локальную деполяризацию, микрокипение электролита в порах активной массы и создаёт механические напряжения, способствующие разрушению крупных кристаллов. Пауза необходима для релаксации концентрационных градиентов и диффузии ионов серной кислоты к поверхности реакции.

Эффективность десульфатации находится в строгой зависимости от выбора параметров импульсного воздействия, которые образуют многомерное пространство оптимизации. Ключевыми из них являются частота следования импульсов, их амплитуда, скважность и коэффициент асимметрии – отношение амплитуды разрядного тока к зарядному. Важно подчеркнуть, что не существует универсального набора параметров. Их оптимальные значения зависят от типа АКБ, его состояния, степени сульфатации и температуры. Следовательно, наиболее перспективным является создание адаптивных систем, способных в реальном времени подстраивать параметры воздействия под реакцию конкретной АКБ.

Реализация такого адаптивного подхода стала технически и экономически оправданной с развитием микроконтроллеров. В качестве платформы для построения устройства управления был выбран микроконтроллер STM32F103C8T6. Его выбор обусловлен наличием таймеров, позволяющих генерировать сложные импульсные последовательности с аппаратно реализованной защитой от сквозных токов. Силовой каскад представляет собой полный H-мост, собранный на мощных MOSFET-транзисторах, что позволяет формировать импульсы как прямой, так и обратной полярности. Цепи измерения включают в себя прецизионный шунт для измерения тока, резистивный делитель для контроля напряжения на АКБ и датчик температуры.

Управляющий алгоритм, исполняемый микроконтроллером, реализует многофазную адаптивную логику. Процесс начинается с этапа диагностики: на АКБ подаётся короткий тестовый импульс, по отклику напряжения вычисляется его текущее внутреннее сопротивление, на основе которого оценивается степень сульфатации и выбираются начальные параметры работы. Затем начинается основной цикл десульфатации. В нём микроконтроллер, используя таймеры, формирует импульсы с заданными параметрами, а с помощью аналого-цифрового преобразователя непрерывно контролирует напряжение, ток и температуру. Эти данные поступают в алгоритм адаптивной коррекции. При достижении порогового напряжения или чрезмерном нагреве амплитуда зарядного тока автоматически снижается. Таким образом, система работает не по жёсткой программе, а гибко реагирует на состояние АКБ. Процесс продолжается до выполнения одного из критериев завершения.

В заключение можно констатировать, что электрохимическая десульфатация импульсными асимметричными токами представляет собой научно обоснованный и высокоэффективный метод восстановления свинцово-кислотных аккумуляторов. Ключевым фактором его успешной реализации является переход от устройств с фиксированными параметрами к интеллектуальным адаптивным системам.