

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ДЛЯ УЧЁТА, МОНИТОРИНГА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ АКУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ НА ОБЪЕКТАХ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

К.Р. Раменский¹, О.А. Манякина²

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
ИШИНЭС, 6ВМ31ПИШ*

² *Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета,
Электроэнергетика и электротехника, Гидроэлектростанции, ГЭ24-01М*

Научный руководитель: Т. Е. Мамонова, к.т.н., доцент ОИС ИШИНЭС

Современные системы управления техническими объектами требуют высокой точности и предсказуемости для обеспечения надежной эксплуатации оборудования и сокращения рисков непредвиденных поломок. Одним из эффективных методов, который используется для управления сложными объектами, является технология цифровых двойников. Цифровой двойник – это виртуальная модель физического объекта, которая отражает его текущее состояние, поведение и возможное развитие в будущем на основе данных о работе и эксплуатации объекта. Первоначально концепция цифрового двойника была предложена NASA для управления сложными космическими системами [1].

Цифровые двойники могут применяться для моделирования различных процессов, включая предсказание состояния и срока службы аккумуляторных батарей (АКБ), которые широко используются в энергетических системах, таких как гидроэлектростанции (ГЭС). В данной статье рассматривается возможность применения цифровых двойников для мониторинга, прогнозирования и оптимизации работы аккумуляторов в составе систем энергоснабжения ГЭС.

На крупных объектах, таких как ГЭС, использование свинцово-кислотных аккумуляторов критически важно для бесперебойной работы аварийных систем и обеспечения их автономности в случае отключения электроснабжения. Однако срок службы аккумуляторов ограничен, и их износ со временем снижает эффективность работы системы.

Задача заключается в создании системы цифрового двойника, которая позволила бы:

- учитывать и отслеживать установленные аккумуляторы на объекте;
- предсказывать срок службы каждого аккумулятора на основании текущих данных и условий эксплуатации;
- оповещать о необходимости замены или пополнения запасов на складе;
- моделировать саморазряд аккумуляторов и корректировать планы по их замене.

Цифровой двойник аккумуляторов может представлять собой систему учета и мониторинга, где каждый аккумулятор описан набором характеристик, включая тип, серийный номер, дату производства, текущее состояние и параметры эксплуатации. Все данные об аккумуляторах собираются и сохраняются в базе данных, доступной через веб-интерфейс. Подобная система может включать такие модули, как:

Мониторинг состояния АКБ. Оценка текущего состояния аккумулятора может производиться на основе параметров, таких как напряжение, сопротивление, емкость и другие показатели состояния аккумулятора (State of Health, SoH). Прогнозирование поведения аккумуляторов позволяет заранее определить момент, когда аккумулятор выйдет из строя или его производительность снизится до критических значений [2].

Предсказание срока службы и саморазряда. Один из ключевых аспектов работы с аккумуляторами – это учет саморазряда, который напрямую влияет на состояние АКБ при длитель-

ном хранении. Различные математические модели, в том числе методы машинного обучения, могут использоваться для прогноза саморазряда [3].

Система учета и мониторинга аккумуляторных батарей разработана с использованием объектно-ориентированного подхода, где каждое устройство описывается с помощью соответствующих классов. Основные компоненты системы включают:

- *Классы типов аккумуляторов.* Эти классы содержат информацию о номинальных характеристиках батареи, таких как напряжение, емкость, внутреннее сопротивление и другие технические параметры.
- *Классы тестовых индикаторов.* Отдельные классы хранят результаты тестов АКБ, таких как коэффициент здоровья батареи (SoH), коэффициент заряда (SoC), напряжение, внутреннее сопротивление и другие параметры, полученные в ходе диагностики.
- *Классы аккумуляторов.* Каждый объект класса «аккумулятор» содержит информацию о типе батареи, месте установки, серийном номере и истории тестирования. Это позволяет точно отслеживать состояние каждого устройства в системе и своевременно реагировать на изменения.

Основная часть системы – алгоритмы предсказания состояния аккумуляторов. Например, расчет саморазряда осуществляется с учетом процентной потери емкости в зависимости от времени хранения на складе. Алгоритмы анализа данных включают:

- *Моделирование саморазряда.* Рассчитывается снижение емкости аккумулятора в зависимости от времени с использованием показателя саморазряда.
- *Предсказание оставшегося срока службы.* На основе данных о текущей емкости и характеристиках аккумулятора можно предсказать, когда его рабочие параметры снизятся до критического уровня.
- *Графики изменения состояния.* Система позволяет построить графики зависимости емкости от времени, что наглядно демонстрирует поведение аккумулятора в различных условиях эксплуатации.

В процессе разработки были реализованы несколько полезных графиков для анализа состояния аккумуляторов:

- *График саморазряда.* Показывает, как изменяется емкость аккумулятора в зависимости от времени хранения. Это помогает оценить, насколько долго аккумулятор может храниться без потери рабочих характеристик.
- *Зависимость емкости от срока службы.* Построение графиков зависимости емкости аккумулятора от срока службы в буферном режиме позволяет предсказать его поведение при эксплуатации.

Для иллюстрации работы системы учета аккумуляторных батарей, приведены два графика, которые наглядно демонстрируют поведение аккумуляторов в зависимости от их состояния.

Рис. 1. На первом графике показана зависимость емкости от срока службы для аккумулятора Delta DT 1207. Синяя линия представляет прогноз емкости по мере старения аккумулятора. Важным моментом является то, что в точке 5.74 Ah (около 3 лет службы) система отображает текущую емкость батареи (выделена красной точкой). Анализ этого графика помогает оценить, когда аккумулятор достигнет критической точки, и предсказать время его замены.

Рис. 2. Второй график отображает процесс саморазряда аккумулятора Delta DT 1207 в течение времени. Синяя пунктирная линия показывает медленное снижение емкости в результате саморазряда. Данный график можно использовать для оценки состояния аккумуляторов, находящихся на складе. Он позволяет предсказать, когда емкость может снизиться до критического уровня и будет необходимо провести техническое обслуживание или заменить батарею.

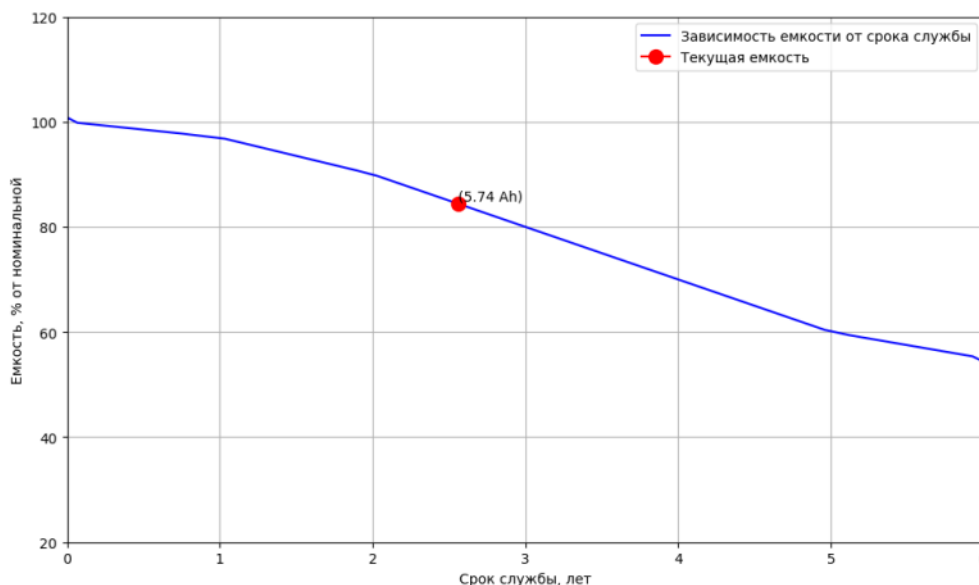


Рис. 1. График зависимости емкости от срока службы аккумуляторной батареи в буферном режиме

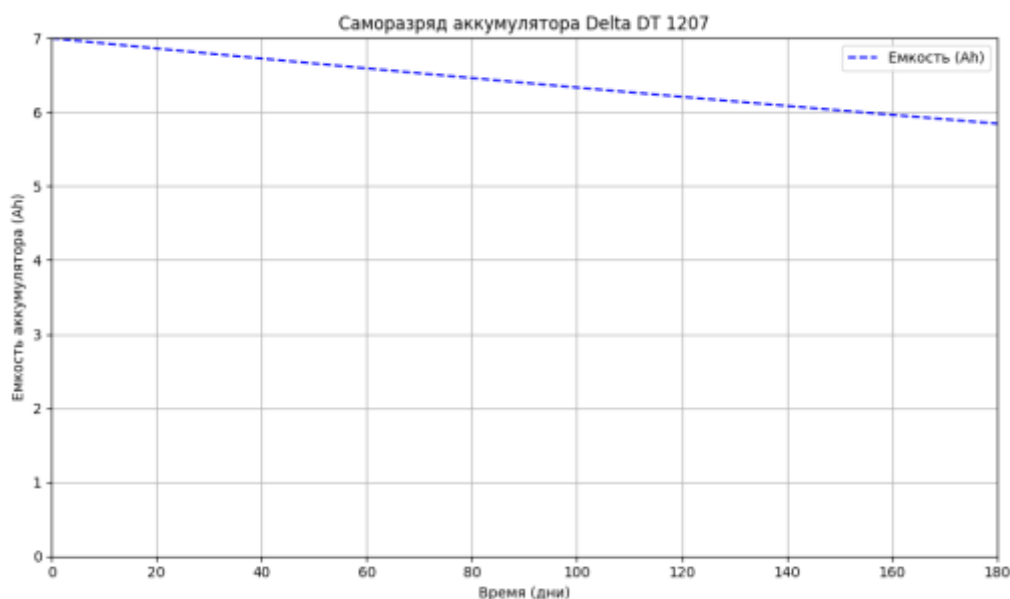


Рис. 2. График саморазряда аккумуляторной батареи Delta DT 1207, которая находилась на складе в течение 180 дней (полгода)

Анализ данных графиков позволяет делать точные прогнозы по времени замены аккумуляторов и времени проведения планового обслуживания, что оптимизирует работу персонала и снижает затраты на поддержание работоспособности оборудования. Таким образом, взглянув на оба графика видно, что данный аккумулятор можно использовать в буферном режиме более трёх лет.

Для точного прогноза саморазряда и общего срока службы аккумулятора в системе цифрового двойника могут использоваться алгоритмы, основанные на эмпирических данных и физических моделях. В работе применялась модель, в которой учитывается процент саморазряда аккумуляторов в зависимости от времени и температуры хранения. Например, для свинцово-кислотных аккумуляторов можно использовать данные о снижении емкости в буферном режиме эксплуатации [4].

На основе полученных данных система может уведомлять пользователей о необходимости замены аккумуляторов или корректировке условий их хранения. Это позволит более эффективно управлять запасами АКБ на складах и предотвратить непредвиденные поломки оборудования из-за выхода батарей из строя.

Прогнозирование состояния аккумуляторов в рамках системы цифрового двойника основано на моделировании зависимости емкости от времени и учета других ключевых факторов, таких как температура и саморазряд. В данной работе использовались математические модели, учитывающие изменения емкости АКБ в зависимости от времени эксплуатации и условий окружающей среды. Подобный подход описан в ряде работ, посвященных анализу состояния аккумуляторов с использованием регрессионных моделей и эмпирических данных [5].

Кроме того, важную роль в прогнозировании играет температура эксплуатации аккумуляторов, так как емкость батарей значительно снижается при низких температурах. Это особенно актуально для ГЭС, где температурные условия могут варьироваться в широком диапазоне [6].

Применение системы цифрового двойника на ГЭС позволяет решить ряд важных задач:

Автоматизация учета АКБ. Система позволяет вести учет всех аккумуляторов, установленных на объекте, и анализировать их состояние в реальном времени.

Предсказание замены АКБ. Благодаря предсказательным алгоритмам система может своевременно уведомить персонал о необходимости замены АКБ на складе или на объекте, что позволяет избежать аварийных ситуаций и продлить срок службы оборудования.

Оптимизация работы персонала. Уведомления о необходимости замены АКБ или пополнении запасов позволяют оптимизировать работу сотрудников и минимизировать время на планирование обслуживания.

Хотя основной акцент данной работы сделан на аккумуляторах, система цифрового двойника может быть использована для оптимизации работы не только самого оборудования, но и персонала. Система учета и мониторинга АКБ позволит операторам на ГЭС своевременно получать информацию о состоянии всех аккумуляторов и принимать решения о необходимости их замены или ремонта, что сократит затраты на обслуживание и повысит надежность системы энергоснабжения [7].

Разработка цифровых двойников для аккумуляторных батарей позволяет существенно улучшить управление их состоянием и предсказать срок службы, что, в свою очередь, способствует более эффективному использованию ресурсов и снижению затрат. Система учета АКБ на ГЭС, основанная на цифровом двойнике, позволяет не только отслеживать состояние батарей, но и уведомлять персонал о необходимости их замены, тем самым оптимизируя рабочие процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. – NASA, 2014.
2. Zhang Y., Lee J. A review on prognostics and health monitoring of Li-ion battery // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196, № 15. – P. 6007–6014.
3. Eddahech A., Briat O., Vinassa J.M. Determination of lithium-ion battery state-of-health based on constant-voltage charge phase // Journal of Power Sources. – 2012. – Vol. 258. – P. 218–227.
4. Ganesan S., Haran B., Popov B.N., White R.E. Self-discharge of lithium-ion batteries: A theoretical study // Journal of Power Sources. – 2003. – Vol. 123, № 1. – P. 153–158.
5. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. – Springer, 2006.
6. Ge S., Wang C.Y., Yang X.G. A physics-based lithium-ion battery model with chemical/mechanical degradation physics for long-term capacity fade prediction // Journal of Power Sources. – 2015. – Vol. 282. – P. 382–391.
7. Phan L., Rohrer S., Otte P. Optimizing maintenance schedules using a digital twin of a gas turbine // Procedia CIRP. – 2018. – Vol. 72. – P. 590–595.