

## Выбор элементов питания для скважинных приборов

Специфика работы автономных скважинных приборов (серии АМТ и МТУ) требует применения соответствующих комплектующих. В частности, к элементам питания предъявляются следующие требования: широкий диапазон температур, длительная автономная работа, минимальные размеры. Данным требованиям соответствуют первичные (не заряжаемые) литий-тионилхлоридные ( $\text{LiSOCl}_2$ ) элементы питания (далее батарея). Диапазон рабочих температур для разных батарей составляет от минус 55 до 125 или от минус 20 до 165°C. Длительная автономность достигается за счет низкого саморазряда – от 1 до 3% в год в зависимости от конструкции при правильном хранении (для батарей спирального типа саморазряд может достигать 10% при 40°C). Минимальные габариты обеспечиваются благодаря высокой удельной емкости батарей. На рисунке 1 представлена зависимость напряжения от удельной емкости для различных литиевых батарейных систем и щелочных батарей. Площадь под кривыми соответствует указанной в таблице 1 плотности энергии.

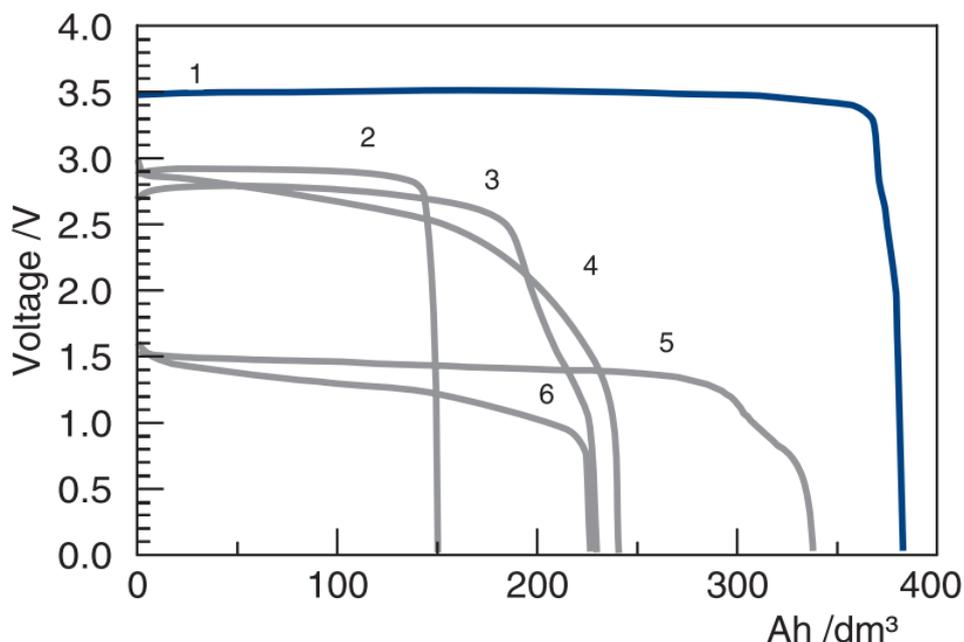


Рисунок 1 – Сравнение разных батарейных систем [1]

Таблица 1 – Плотность энергии разных батарейных систем [1]

Номер на графике	Батарейная система	Плотность энергии, Вт*ч/дм <sup>3</sup>
1	Li/SOCl <sub>2</sub>	1280
2	Li/SO <sub>2</sub>	430
3	Li/CF <sub>x</sub>	550
4	Li/MnO <sub>2</sub>	580
5	Li/FeS <sub>2</sub>	450
6	Alkaline	280

## Особенности батареи

### Задержка установления напряжения. Пассивация

При подключении нагрузки к батарее напряжение падает ниже уровня холостого хода. На малых токах напряжение мгновенно устанавливается до рабочего (кривая А на рисунке 2). Однако, при более высоких токах возможен переходный период, в течение которого напряжение падает ниже рабочего (кривая В на рисунке 2). Если ток еще выше, то напряжение может упасть ниже *напряжения отсечки* на короткое время (кривая С на рисунке 2). Задержка установления напряжения обусловлена эффектом *пассивации* – образованием изолирующей пленки внутри батареи. Степень пассивации зависит от длительности и условий хранения, механических особенностей конструкции батарей.

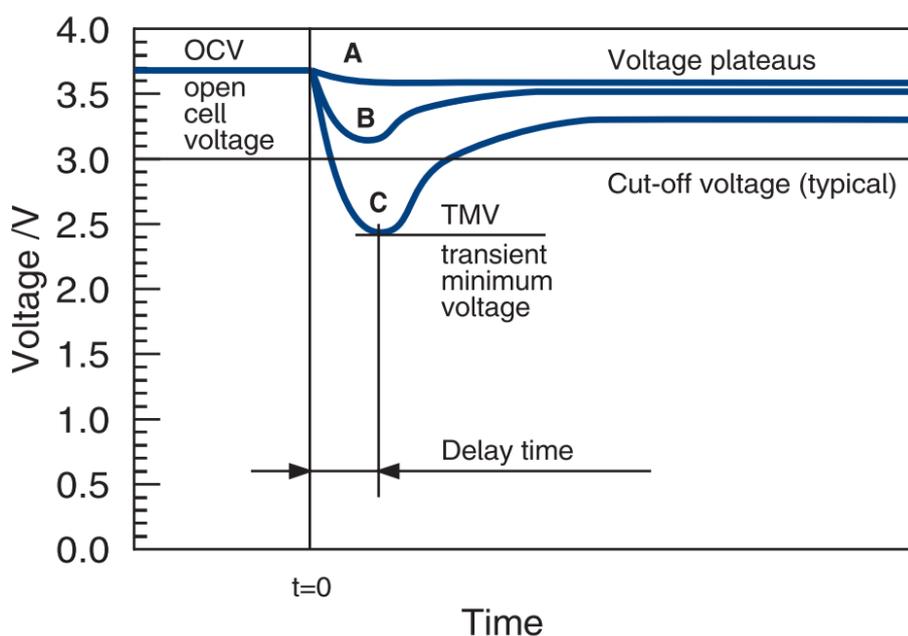


Рисунок 2 – Кривые переходных напряжений [1]

А – низкий ток: нет задержки напряжения

В – средний ток: напряжение остается выше напряжения отсечки

С – высокий ток: напряжение мгновенно падает ниже напряжения отсечки

Пассивация дает и положительные, и отрицательные моменты. Благодаря пассивации уменьшается ток саморазряда и, соответственно, увеличивается время хранения. Но при этом требуется «активация» (*депассивация*) батарей после хранения перед запуском в работу.

### Стабильность напряжения

Другой особенностью литий-тионилхлоридных батарей является стабильность напряжения в течение всего срока службы. Кривая разряда обычно имеет форму прямоугольника, как видно на рисунке 3. Внутри окружностей показано восстановление напряжения до первоначального уровня (пунктирная линия), когда разряд прерывается.

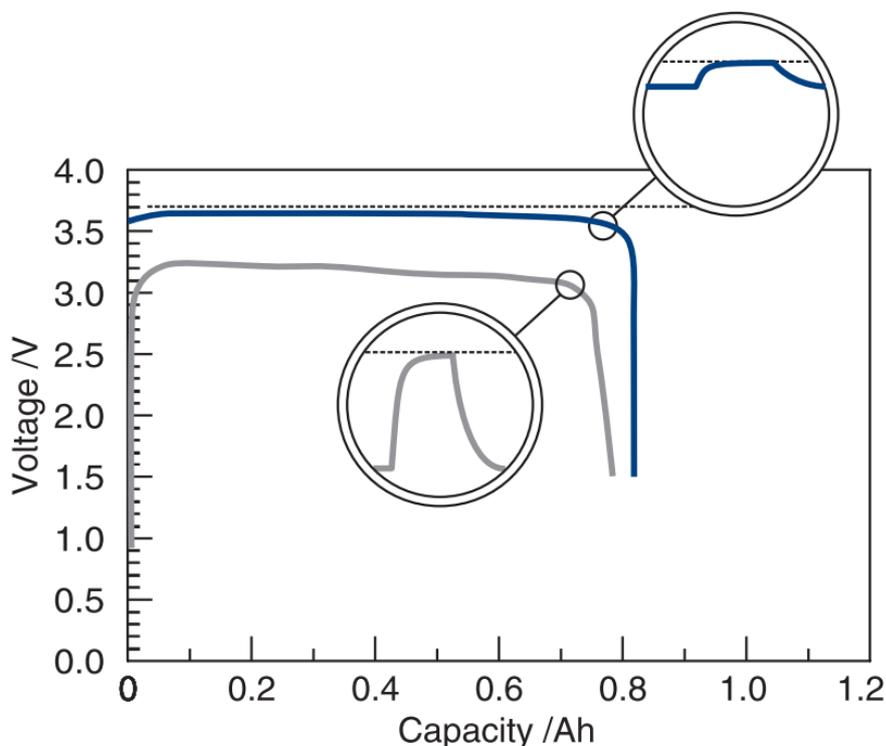


Рисунок 3 – Кривая разряда батареи типоразмера  $\frac{1}{2}$  АА при температуре 25°C [1]  
Серая кривая: 180 Ом (30 часов)  
Синяя кривая: 180 кОм (4 года)

### Депассивация

Ток и время депассивации зависит от конструкции батареи (*бобинная* или *спиральная*), ее типоразмера, условий хранения и степени пассивации. Для спиральных типов батарей характерны более высокие токи депассивации. Чем крупнее батарея, тем выше ток депассивации. Таким образом, для разных батарей необходим разный ток.

Депассивацию рекомендуется проводить при токе, превышающем рабочий ток (примерно в 1,5-2 раза). В документации производителей обычно указан рекомендуемый *максимальный длительный ток разряда* и *максимальный импульсный ток разряда*, а так же приводятся графики разряда при разных токах. Ток депассивации не должен превышать рекомендуемый максимальный длительный ток. В таблице 2 приведены общие рекомендуемые значения тока депассивации и тестирования для разных батарей. Данные значения носят рекомендательный характер и могут быть изменены в зависимости от требований к батареям.

Таблица 2 – Общие рекомендации по депассивации и тестированию батарей

Типоразмер батареи	Бобинная		Спиральная	
	депассивация, мА	тест, мА	депассивация, мА	тест, мА
AAA	10	5	20	10
AA	30	15	60	30
C	100	50	200	100

### Определение ресурса батареи

Указанная выше особенность батарей – стабильность напряжения в течение всего срока службы – усложняет определение остаточной емкости батареи, т.к. нет прямой зависимости между текущим напряжением и оставшейся емкостью.

Существует рекомендация производителей, по которой можно оценить степень разряда батареи и, таким образом, отбраковать разряженные батарейки. Метод основан на обнаружении момента снижения напряжения из-за увеличения внутреннего сопротивления, которое возрастает к концу срока службы батареи (рисунок 4).

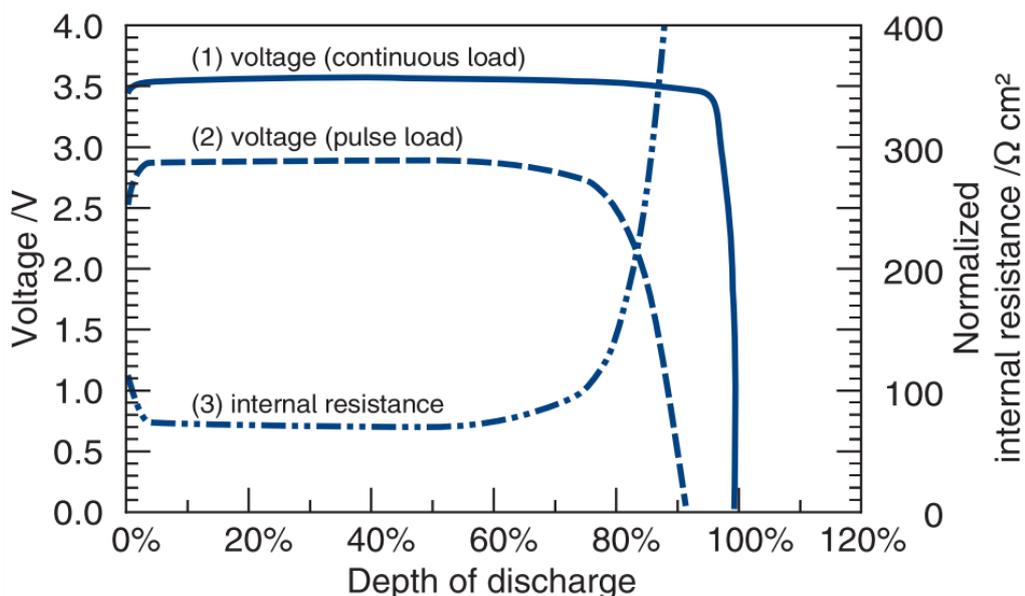


Рисунок 4 – Изменение напряжения и внутреннего сопротивления батареи в зависимости от глубины разряда [1]

- (1) Напряжение при разряде постоянным током
- (2) Напряжение при разряде импульсным током
- (3) Внутреннее сопротивление

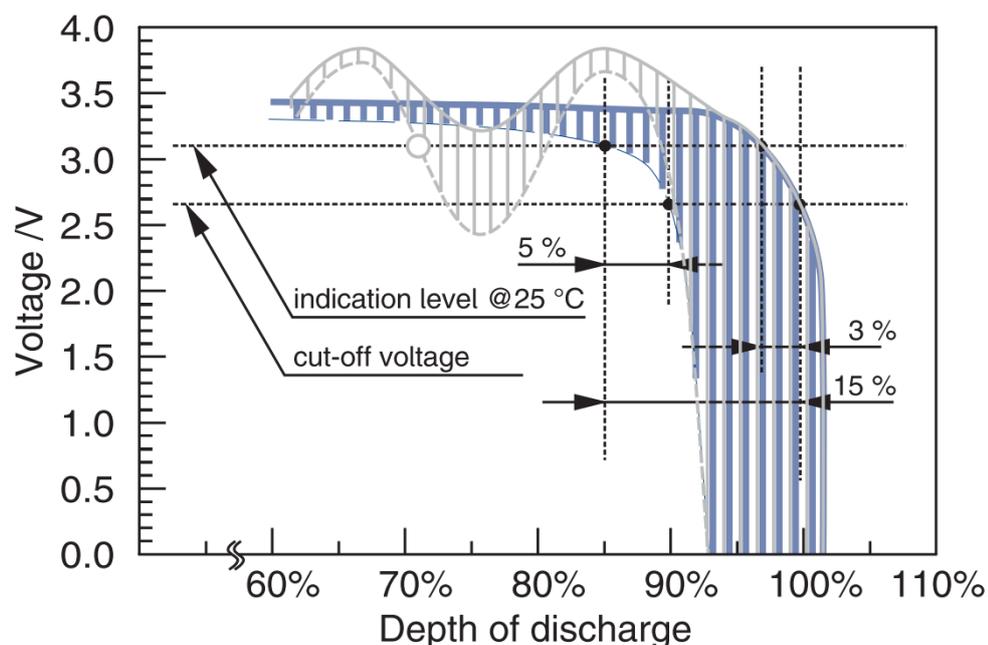


Рисунок 5 – Принцип обнаружения конца срока службы батареи [1]

Есть факторы, которые влияют на напряжение во время такого теста: характер нагрузки (постоянная или импульсная нагрузка), температура батареи. Рисунок 5 демонстрирует влияние данных факторов:

Сплошная синяя кривая: Постоянный разряд при 25°C. Обнаружение конца срока службы возможно примерно за 3% до напряжения отсечки.

Прерывистая синяя кривая: Импульсный разряд. Обнаружение конца срока службы возможно примерно за 5% до напряжения отсечки относительно емкости при импульсном разряде или примерно за 15% до напряжения отсечки относительно емкости при постоянном разряде.

Серая кривая: Искажение кривой разряда при изменении температуры.

### Батарейные тестеры ГК Грант

Батарейные тестеры БТ-01 и GBA-02 разработаны для проведения депассивации и оценки состояния литий-тионилхлоридных батарей. В тестерах реализован алгоритм определения пригодности батареи, основанный на анализе напряжения при подключении нагрузки.

На лицевой панели БТ-01 расположены четыре светодиода, индицирующие режимы работы тестера (рисунок 6, а). На передней панели GBA-02 располагаются дисплей и кнопки для навигации по меню (рисунок 6, б). Тестеры можно применять как в лабораторных условиях с подключением к компьютеру, так и автономно вне взрывоопасных зон.

GBA-02 является усовершенствованной версией БТ-01 и позволяет получить более полные данные во время тестирования благодаря широкому диапазону токов разряда и наличию программного обеспечения «GBA Utility».

Сравнение характеристик тестеров приведено в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение батарейных тестеров производства ГК Грант

Параметр	БТ-01	GBA-02
Число тестируемых элементов питания	от 1 до 2	от 1 до 6
Максимальное входное напряжение, В	9,99	30
Напряжение одного тестируемого элемента питания, В	3...3,6	
Ток разряда	~20 мА (фиксированный)	до 1000 мА (настраиваемый)
Рассеиваемая мощность, Вт	0,15	21,6
Тип индикатора	светодиоды	ЖК-дисплей
Интерфейс для связи с ПК	USB	
Потребляемая мощность (от батареи), Вт	0,1	0,15
Время автономной работы, ч	90	120
Типоразмер источника питания (литий-тионилхлоридный элемент питания)	AA	C
Диапазон рабочих температур, °С	от -30°С до 85°С	от -20°С до 70°С
Степень защиты от пыли и влаги	IP20	IP54
Габаритные размеры, мм	144 x 68 x 32	100 x 195 x 50
Масса (без источника питания), г	150	800



а)



б)

Рисунок 6 – Внешний вид батарейных тестеров

а) БТ-01

б) GBA-02

Далее более подробно рассмотрены возможности тестера **GVA-02** при работе с подключением к ПК.

Программное обеспечение для компьютера «GVA Utility» позволяет отобразить графики напряжения и тока в реальном времени. Для запуска тестирования в ПО необходимо установить количество ячеек в батарее и ток разряда. Также в ПО реализован режим подсказки, который помогает пользователю визуально оценить пригодность батареи: на графике в реальном времени отображается эталонное напряжение, соответствующее текущему току разряда и область допустимых напряжений для текущего тока разряда. При выходе напряжения батареи за пределы допустимой области можно сделать вывод о непригодности батареи для дальнейшей эксплуатации (при условии, что батарея была предварительно депассивирована, прошло некоторое время до восстановления напряжения холостого хода, и температура разряда батареи соответствует указанной в документации).

### Профили батарей

Для работы режима подсказки необходимо предварительно записать в тестер профили батарей. На графике разряда из документации производителя батарей (рисунок 7) выбираются токи – не менее 1 мА – и соответствующее напряжение в горизонтальной области. Полученные значения тока и напряжения записываются в ПО (рисунок 8). В области предварительного просмотра отображается вольт-амперная характеристика разряда батареи. В остальных полях записываются данные для справки. Тестер поддерживает до 32 профилей батарей.

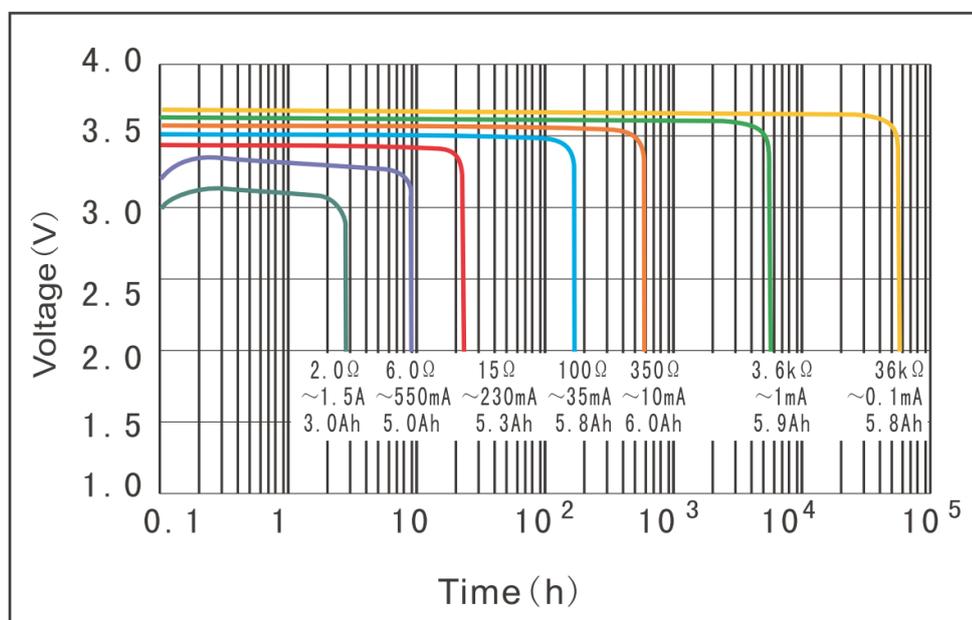


Рисунок 7 – Кривые разряда спиральной батареи типа С при 25°C [2]

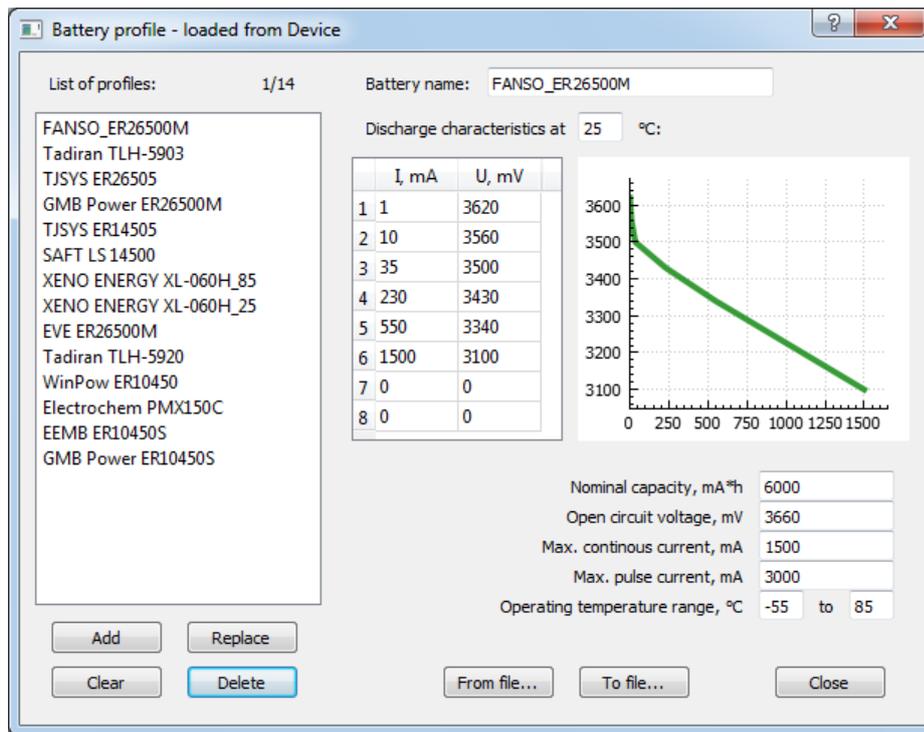


Рисунок 8 – Окно «Battery profile»

Необходимо иметь в виду, что данные в документации производителей батарей указаны для новых непассивированных батарей. Кроме того, следует учитывать, что напряжение так же зависит от температуры и степени пассивации батареи (рисунки 9 и 10). Поэтому тестирование необходимо проводить в условиях, указанных в документации производителя.

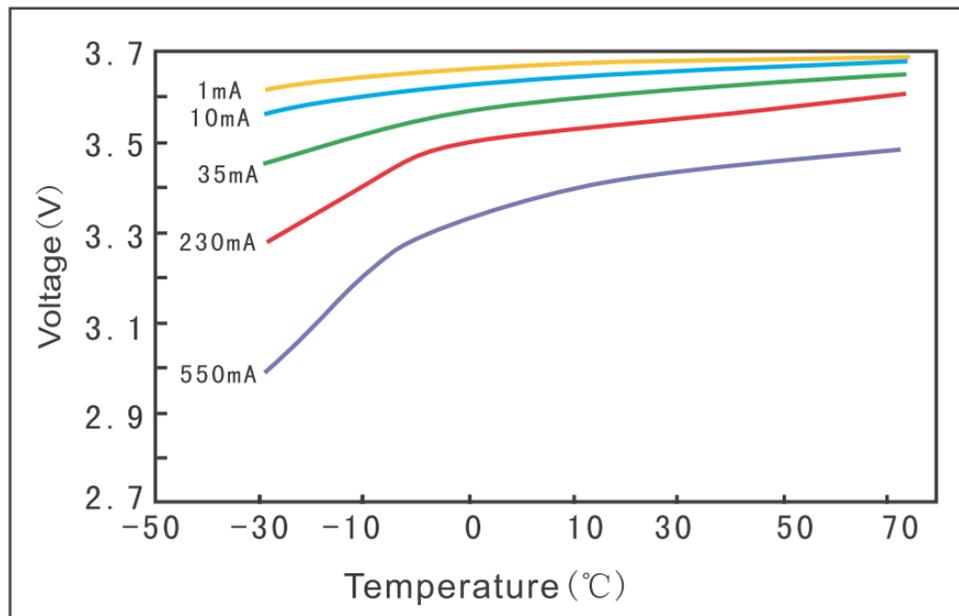


Рисунок 9 – Зависимость напряжения от температуры при разных токах [2]

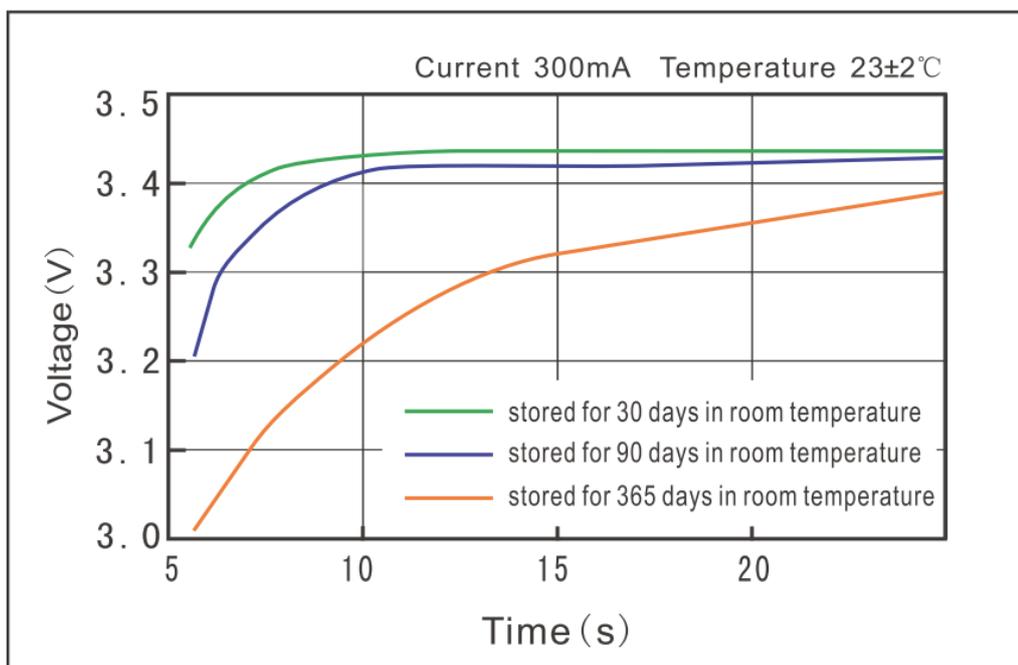


Рисунок 10 – Характеристики разряда после хранения [2]

## Примеры графиков депассивации и тестирования батарей

На рисунке 11 представлен график депассивации батареи спиральной конструкции типоразмера «С» после хранения более одного года. Кривая имеет классическую форму: напряжение падает в моменте (до 3,15 В), далее начинается рост. Ток депассивации установлен равным 200 мА при максимальном продолжительном токе разряда 1 А.

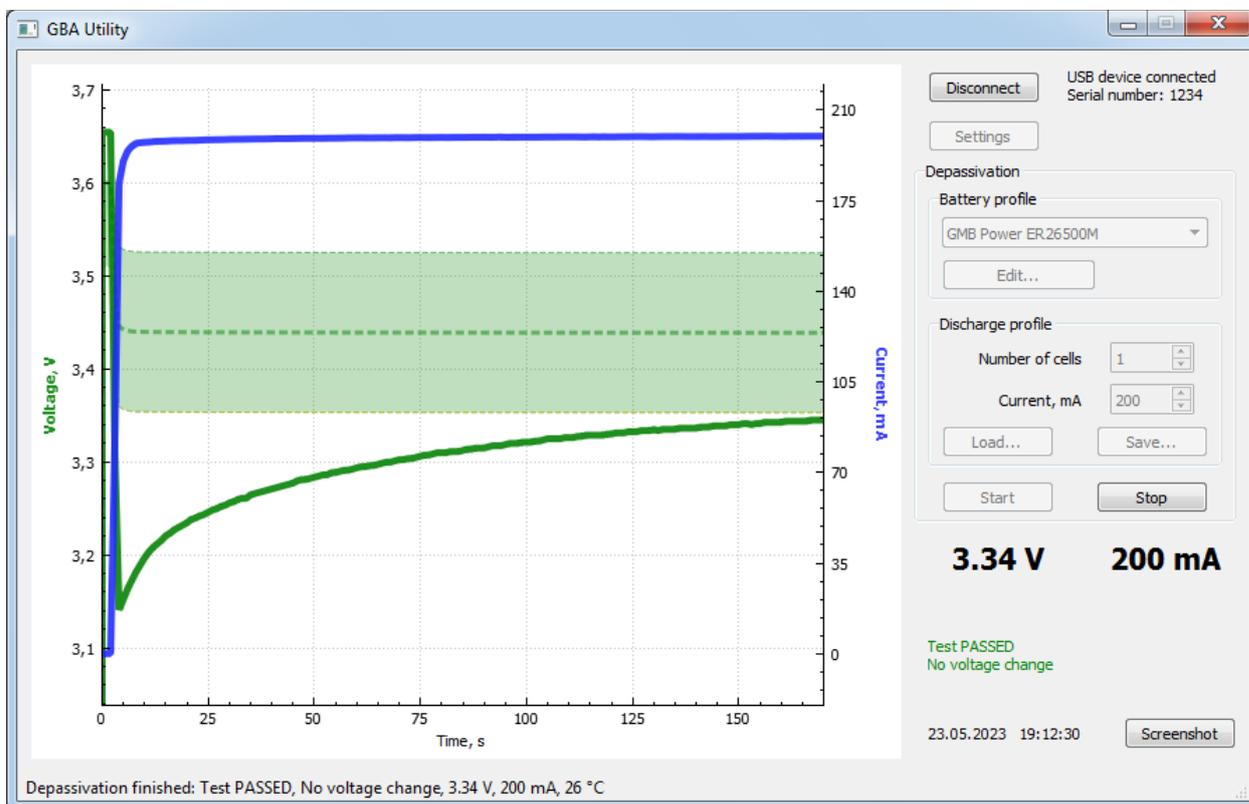


Рисунок 11 – Депассивация батареи типа «С» после хранения

На рисунке 12 представлен график тестирования той же батареи после восстановления напряжения холостого хода до первоначального значения. Напряжение находится в допустимых пределах и даже практически равно эталонному значению из документации для данного тока разряда, нет провалов и падения. Таким образом, данная батарея депассивирована и допустима для применения.

На рисунке 13 – график тестирования батареи типоразмера «АА» после депассивации после хранения (2 года). Напряжение выше эталонного значения, батарея допустима для применения.

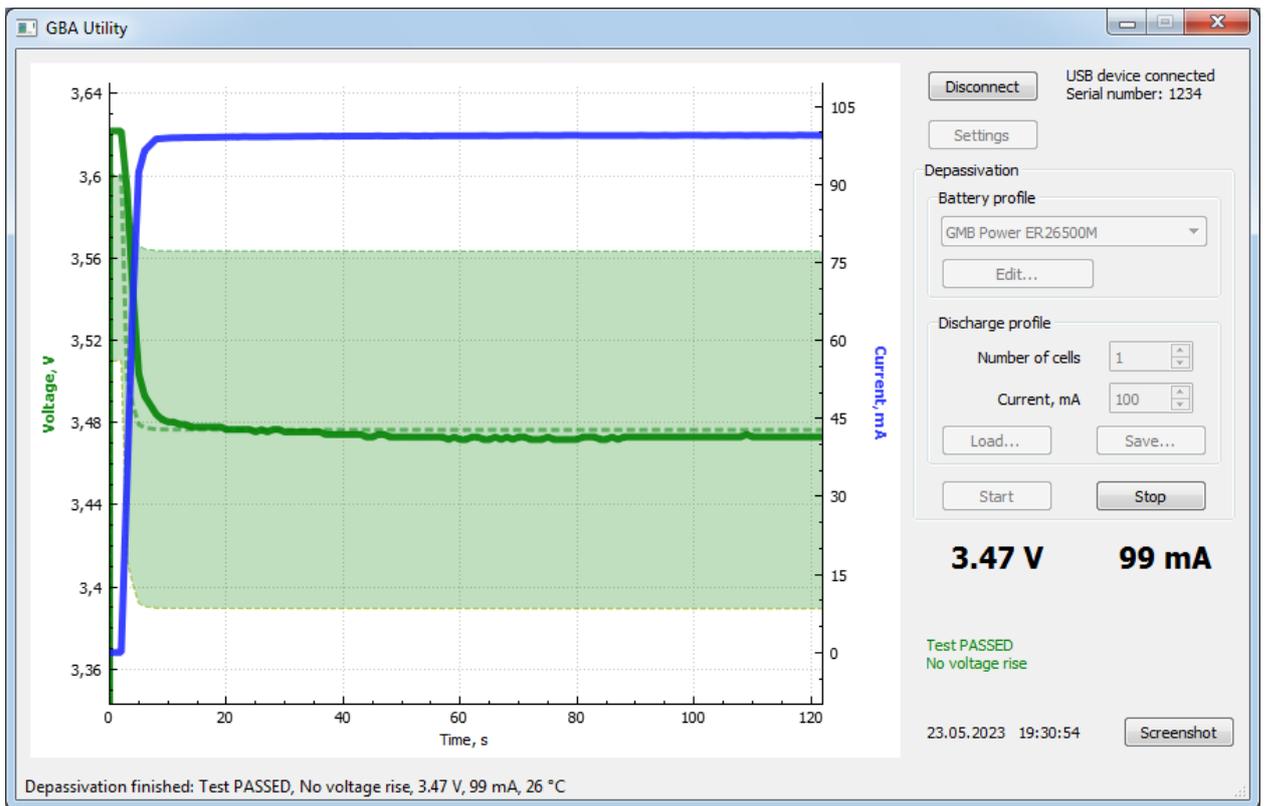


Рисунок 12 – Тестирование батареи типа «С» после депассивации

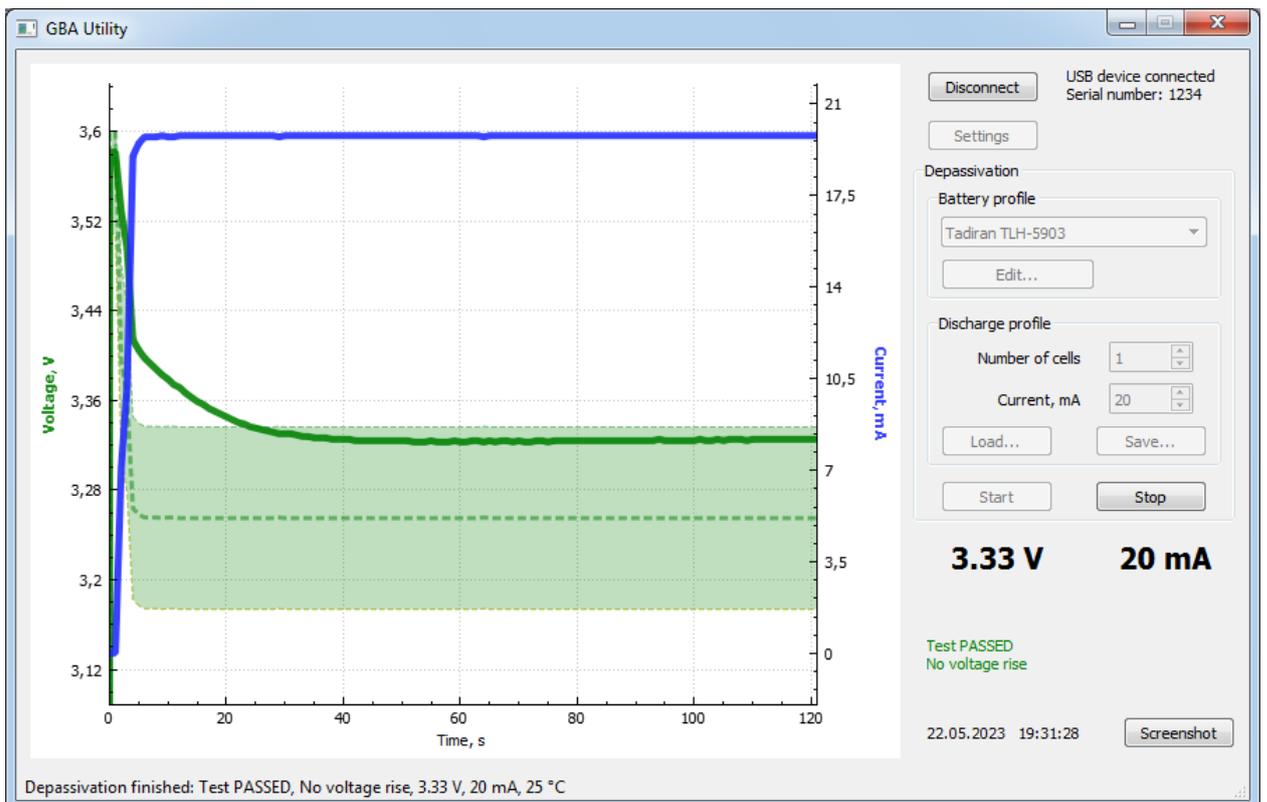


Рисунок 13 – Тестирование батареи типа «AA» после депассивации

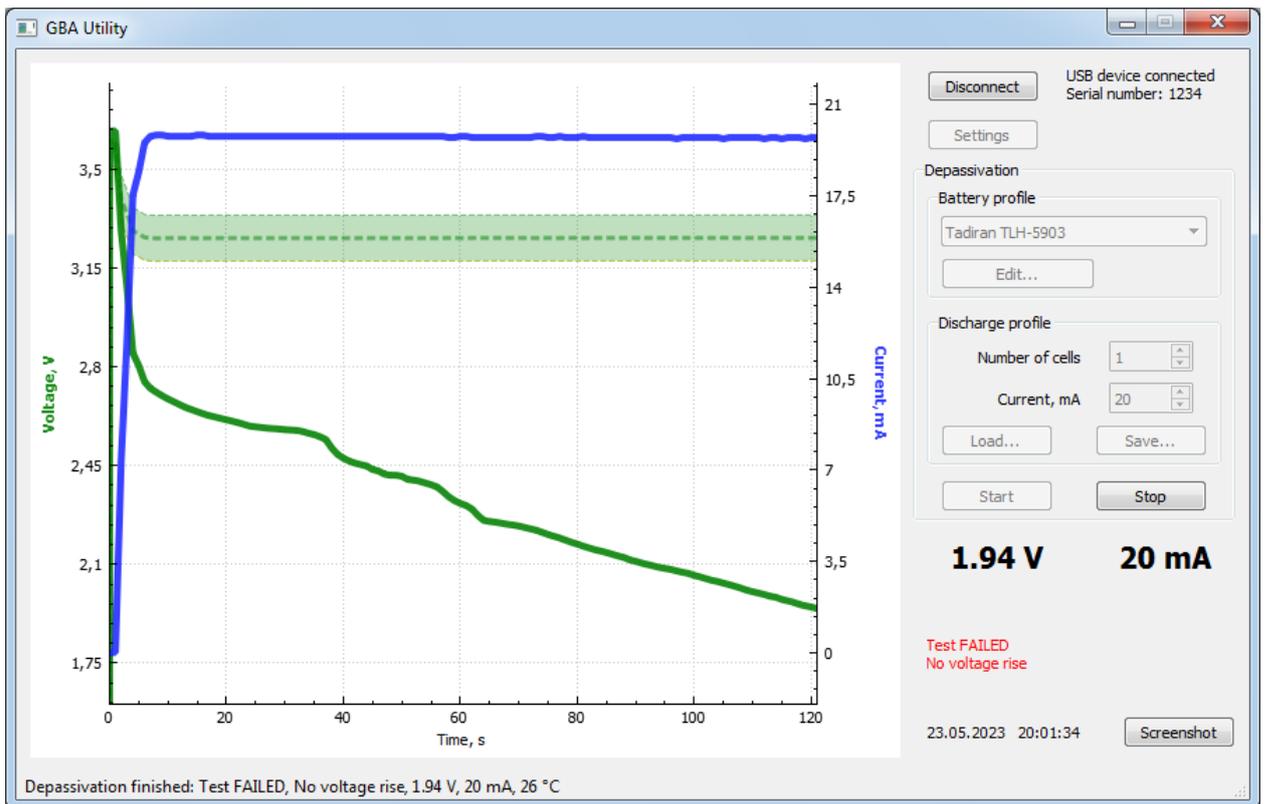


Рисунок 14 – Тестирование разряженной батареи, тест не пройден

На рисунке 14 – представлен график тестирования разряженной батареи. Такую батарею применять недопустимо.

Стандартный алгоритм определения пригодности батареи основан на сравнении напряжения в конце теста с уровнем допустимого напряжения, который задается в памяти тестера (рисунок 15). Такой метод хорошо работает в качестве отбраковки разряженных батарей, но не дает более полной картины в отличие от режима подсказки. На рисунке 16 видно, что стандартный тест пройден и батарея не разряжена полностью («Test PASSED»), но при этом напряжение ниже допустимого для данного тока разряда. Такую батарею применять не рекомендуется.

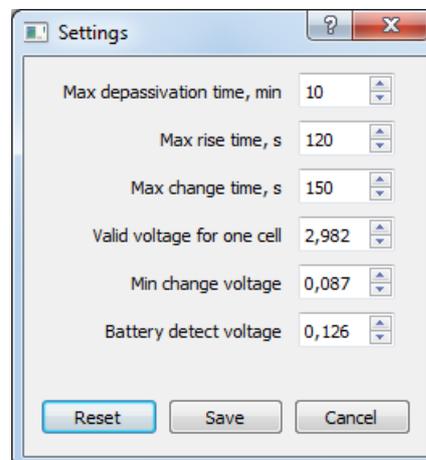


Рисунок 15 – Окно настроек тестера

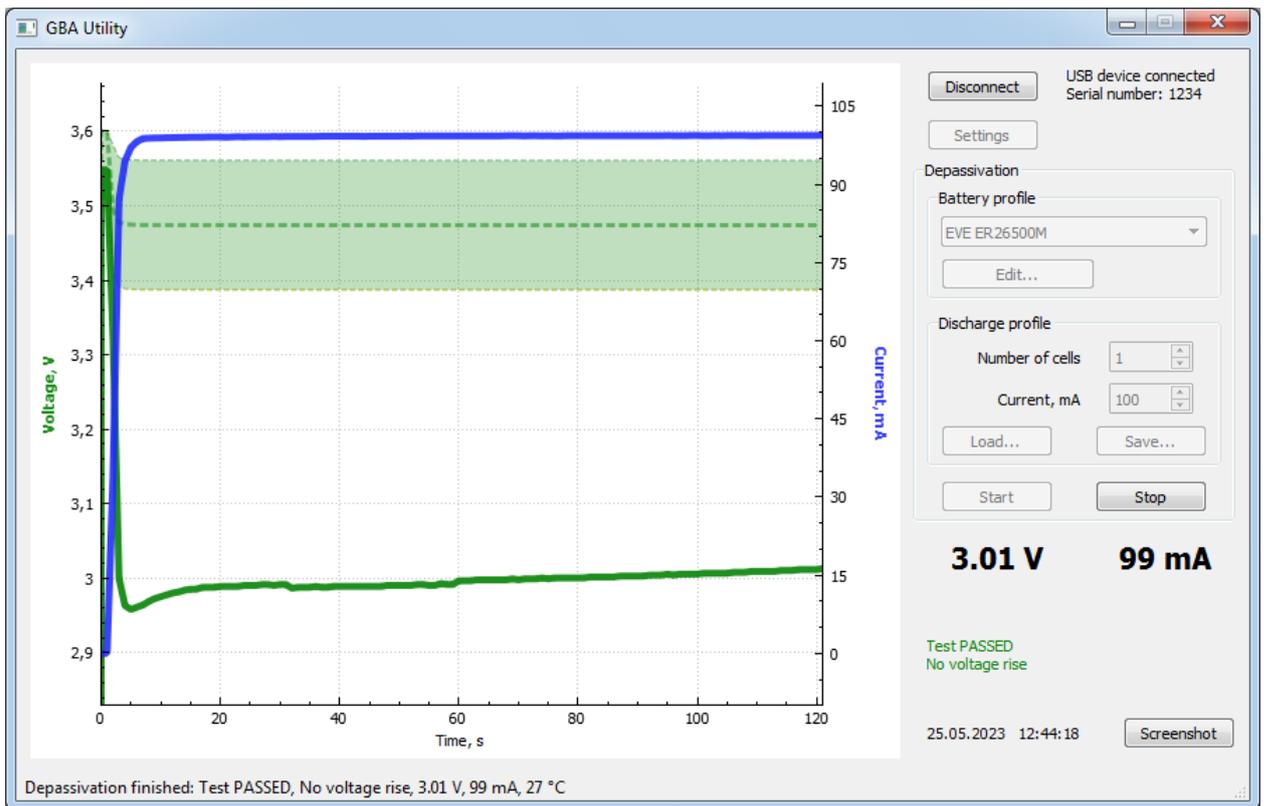


Рисунок 16 – Результат тестирования батареи; в режиме подсказки тест не пройден, хотя и написано «Test PASSED»

### Особенности тестирования высокотемпературных батарей

Высокотемпературные батареи (верхняя граница рабочего диапазона температур достигает 150-165°C) ведут себя немного иначе, чем обычные. У высокотемпературных батарей сильнее выражен эффект пассивации и пассивационная пленка образуется быстрее. Это заметно во время депассивации: напряжение проваливается ниже (рисунок 17). На рисунке 18 – график тестирования высокотемпературной батареи после депассивации.

Кроме того, в документации высокотемпературных батарей часто указаны токи и напряжения разряда только при высоких температурах. Таким образом, учитывая зависимость напряжения от температуры (рисунок 9), необходимо самостоятельно корректировать вольт-амперную характеристику на основе эмпирических данных. На рисунке 19 и 20 представлены графики депассивации и тестирования со скорректированным профилем. В документации данной батареи указаны кривые разряда при 85°C.

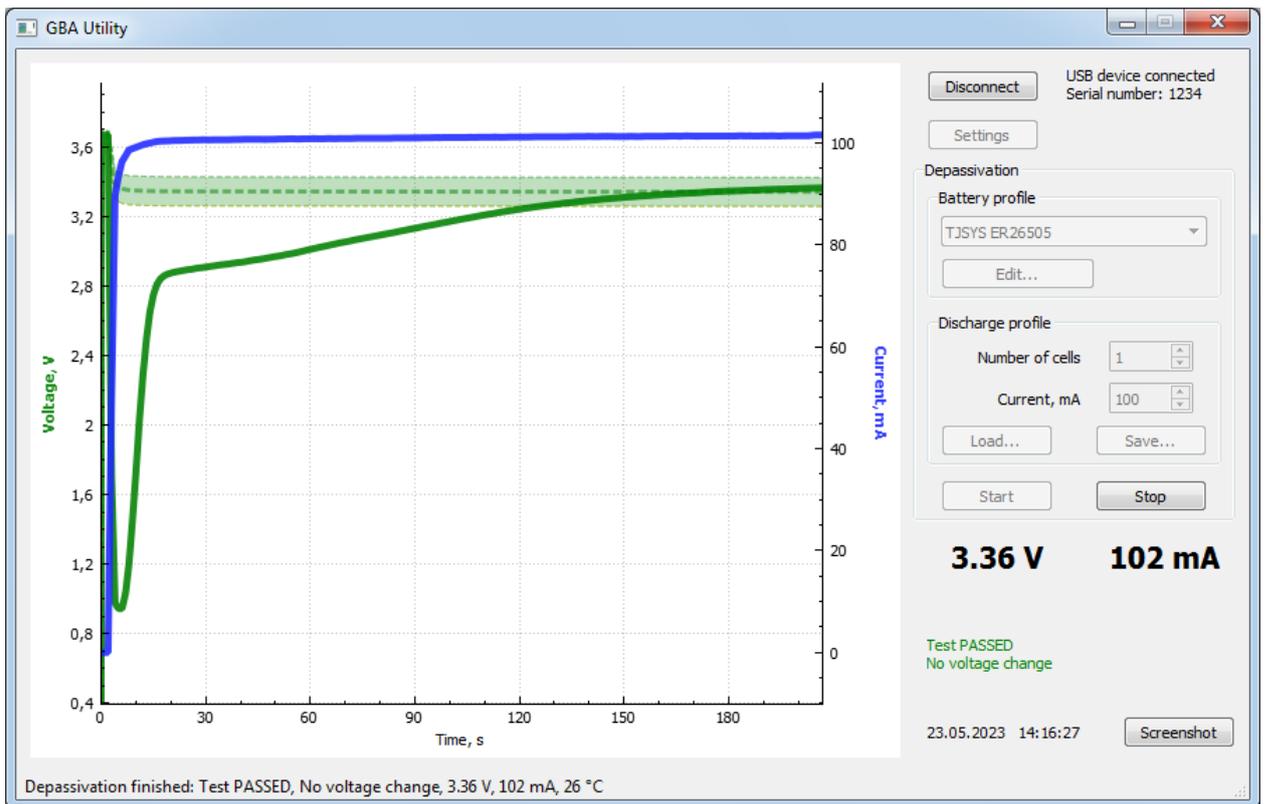


Рисунок 17 – Депассивация высокотемпературной батареи после хранения

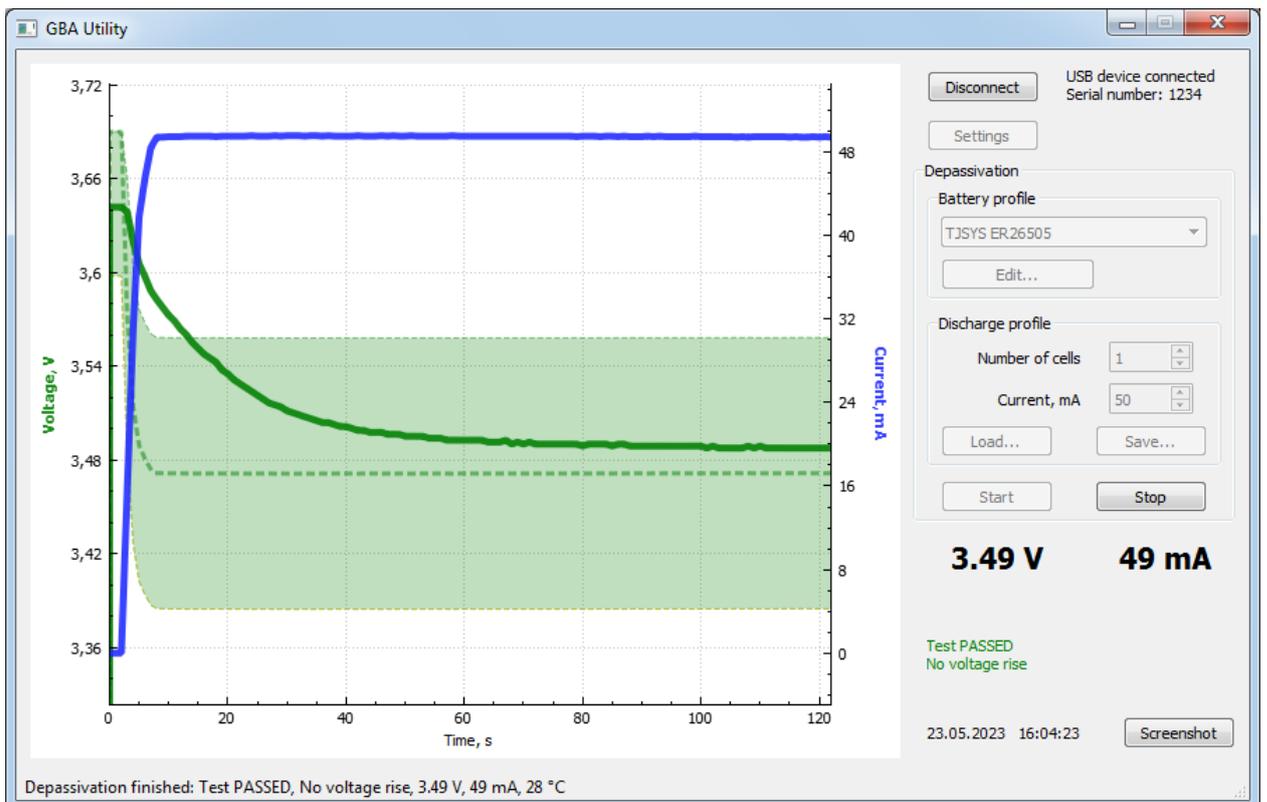


Рисунок 18 – Тестирование высокотемпературной батареи после депассивации и восстановления напряжения

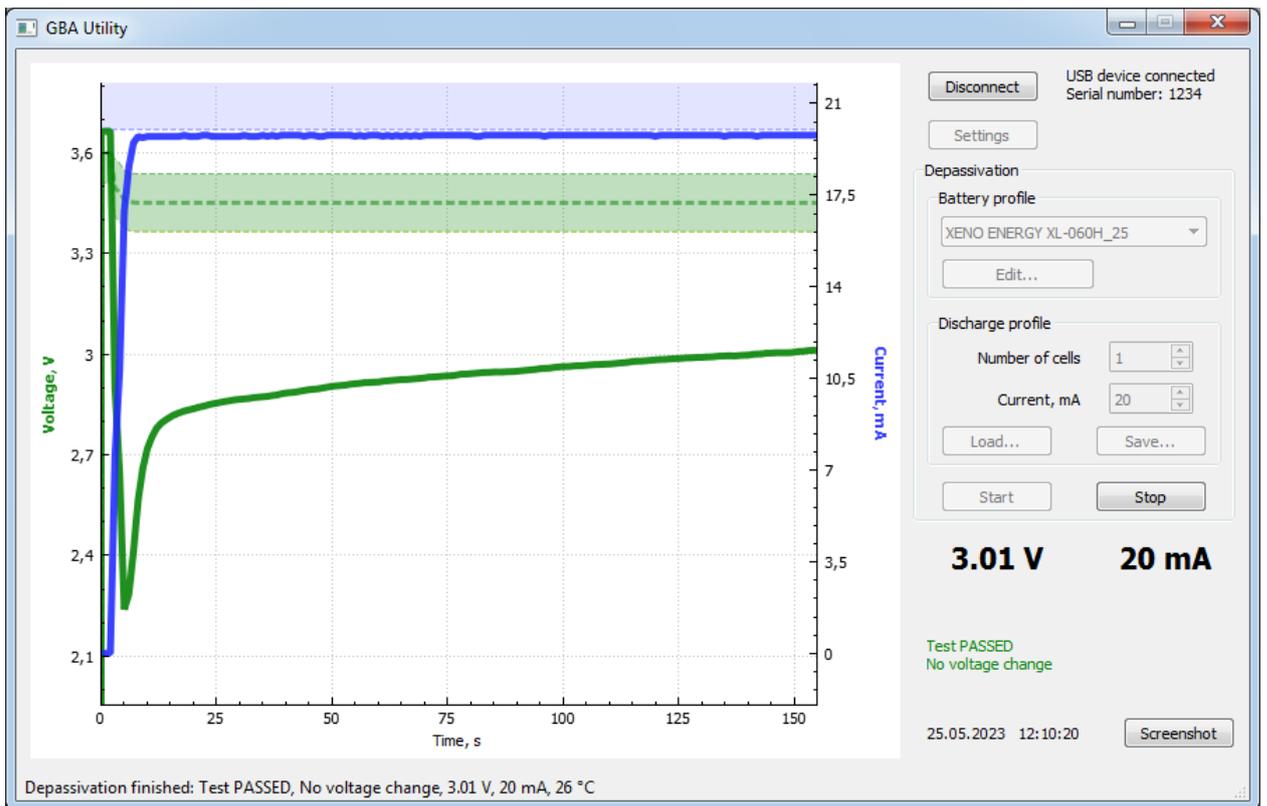


Рисунок 19 – Депассивация батареи; скорректированный профиль

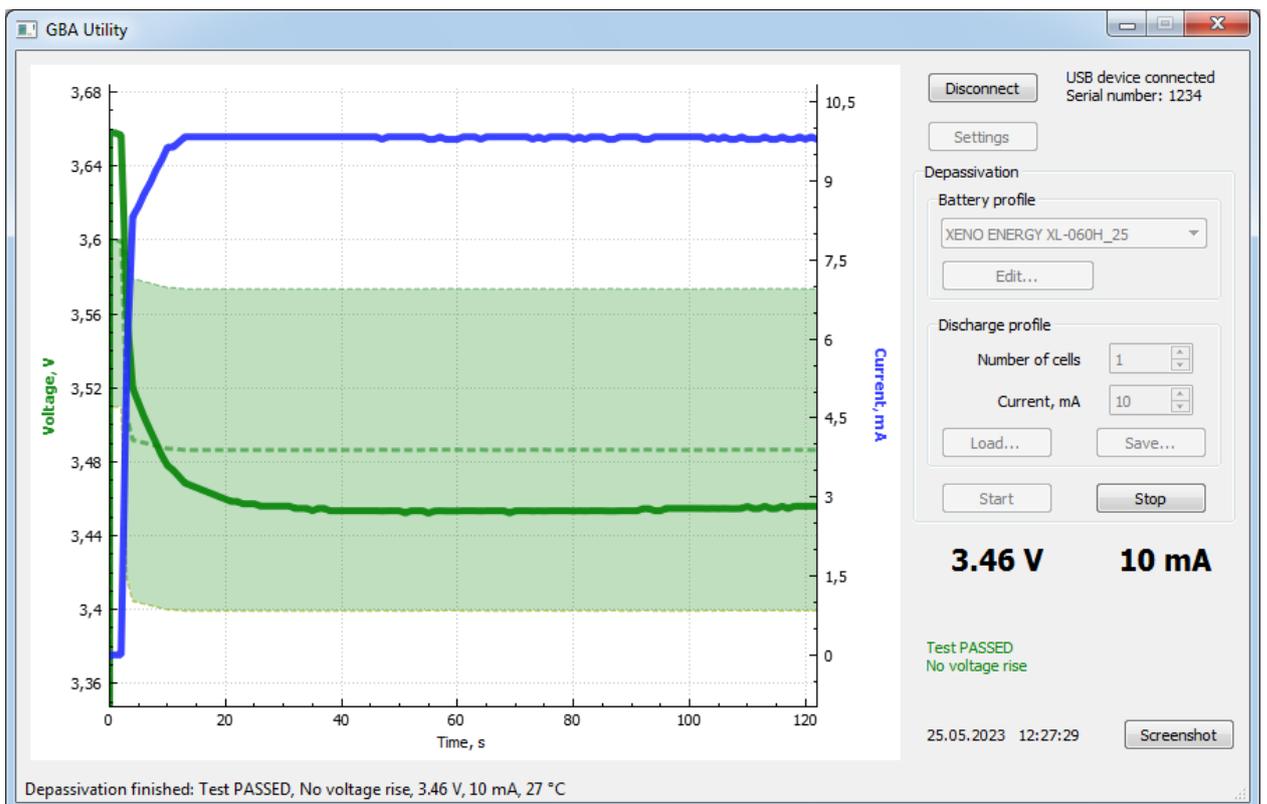


Рисунок 20 – Тестирование батареи; скорректированный профиль

## Область неопределенности

При превышении тока разряда выше указанного в профиле выбранной батареи, на графике появляется область неопределенного напряжения. На рисунке 21 представлен фрагмент профиля батареи, где максимальный ток равен 31 мА, а на рисунке 22 представлен график тестирования при токе 35 мА. Для корректного отображения допустимого напряжения тестирование стоит проводить при токах, не превышающих максимальный ток в вольт-амперной характеристике разряда профиля батареи.

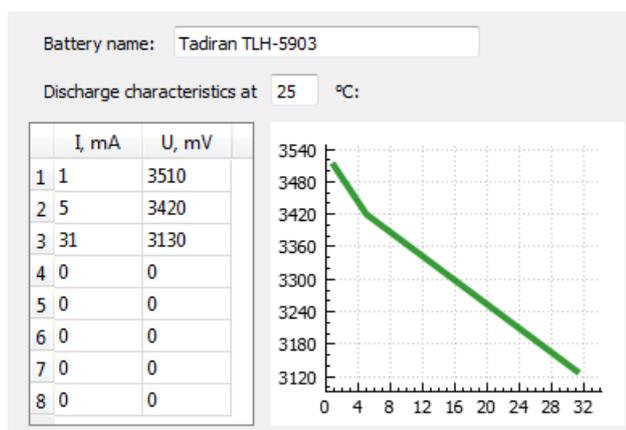


Рисунок 21 – Фрагмент окна профилей батарей

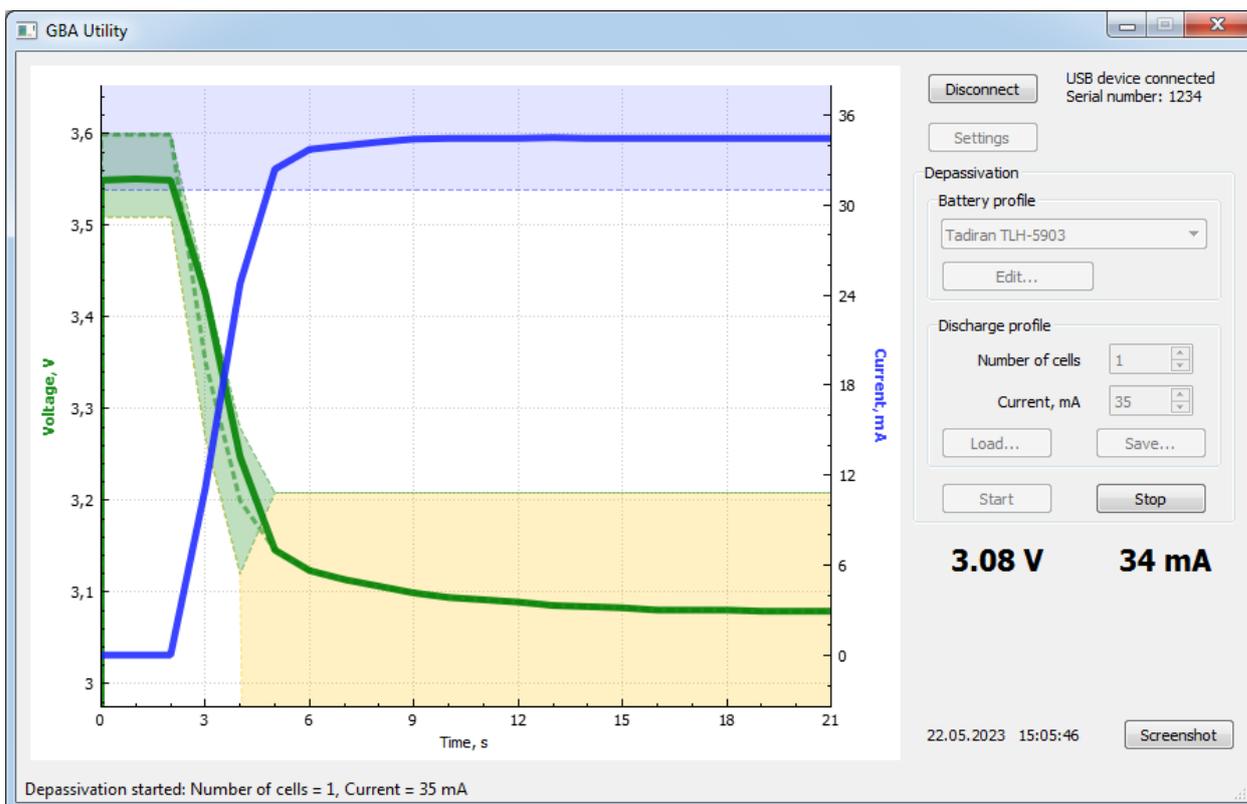


Рисунок 22 – Область неопределенного напряжения

## **Заключение**

Благодаря своим преимуществам литий-тионилхлоридные элементы питания получили широкое распространение в быту и промышленности. Применяя данный тип батарей, стоит знать об их особенностях и предпринимать ряд мероприятий для корректной работы. Рассмотренный батарейный тестер GBA-02 позволяет провести необходимые процедуры: депассивацию после хранения, тестирование перед запуском в работу для одиночных батарей и батарейных сборок до шести элементов в широком диапазоне токов разряда.

## Глоссарий

**Бобинная конструкция** – конструкция батареи, характеризующаяся меньшей токоотдачей, большей емкостью, меньшим саморазрядом, чем спиральная конструкция.

**Депассивация** – процедура подготовки батареи к работе (разрушение пассивационного слоя).

**Максимальный импульсный ток разряда** – максимальный ток, который способна выдать батарея в указанном в документации режиме (показатель способности, возможности батареи выдать импульсный ток).

**Максимальный продолжительный ток разряда** – максимальный ток, при котором батарея (еще) способна выдать более 15% от номинальной емкости.

**Напряжение отсечки** – напряжение, ниже которого батарея считается не работоспособной для конкретного применения. В приборах серии АМТ/МТУ напряжением отсечки считается 2,7 В.

**Напряжение холостого хода** – напряжение на контактах батареи без нагрузки.

**Пассивация** – явление, при котором образуется изолирующая пленка внутри батареи.

**Плотность энергии** ( $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{дм}^3$ ) – величина, равная отношению энергии батареи (произведение емкости и напряжения) к её объему.

**Саморазряд** – потеря полезной емкости, вызванная внутренними химическими реакциями.

**Спиральная конструкция** – конструкция батареи, характеризующаяся более высокой токоотдачей, меньшей емкостью, более высоким саморазрядом, чем бобинная конструкция.

**Удельная емкость** ( $\text{А} \cdot \text{ч}/\text{дм}^3$ ) – величина, равная отношению емкости батареи к её объему.

## **Источники**

1. Tadiran Batteries GmbH, Technical Brochure LTC-Batteries,  
URL: <https://tadiranbatteries.de/wp-content/uploads/2021/05/Technical-Brochure-LTC-Batteries.pdf>
2. Wuhan Fanso Technology Co.,Ltd, ER26500M Lithium Thionyle Chloride Battery Specification