

# Особенности и применение двухквадрантных источников питания постоянного тока

Юрий Широков

Двунаправленные двухквадрантные источники питания – это особый вид оборудования, без которого сегодня не могут обойтись многие промышленные испытательные стенды. О том, что это за приборы, каков принцип их работы и для чего они применяются, рассказано в статье.

### АВТОРАНЖИРОВАНИЕ РЕКУПЕРАЦИЕЙ НЕ ИСПОРТИШЬ

Программируемые источники питания постоянного тока являются необходимым инструментом при разработке, тестировании и производстве широкого спектра продукции в различных отраслях. Зачастую функциональный тест требует проверки тестируемого устройства (device under test – DUT) в широком диапазоне условий эксплуатации. В некоторых случаях DUT потребляет постоянную мощность при переменных напряжении и токе.

В качестве примера можно привести моторные приводы постоянного тока или регулируемые DC/DC-преобразователи. В таких обстоятельствах способность программируемого источника постоянного тока обеспечить повышенный ток при пониженном выход-

ном напряжении является ценной. Эта способность известна как авторанжирование.

Авторанжирование – это технология, которая позволяет программируемому источнику питания постоянного тока автоматически подбирать выходные напряжение и ток для поддержания полной выходной мощности в широком рабочем диапазоне. На рис. 1 показана разница между традиционным (фиксированным) и автоматическим (плавающим) режимами. Идея проста: источник автоматически обеспечивает повышенный ток при более низких напряжениях (и наоборот), что увеличивает до максимума его гибкость. Этот тип решения позволяет использовать один и тот же источник для моделирования множества комбинаций выходных напряжений и токов, в отличие от традиционного источника, базовый выход которого ограничен «квадратом». Его значение полной мощности достигается только при максимальном выходном напряжении, так как выходной ток также ограничен указанным значением. Как следствие, в большинстве случаев традиционный источник не используется на полную мощность.

### Эффективность под вопросом

Распределение питания с напряжением 380 В постоянного тока для серверных ферм было предложено в качестве эффективного метода энергоснабжения дата-центров (рис. 2). Лучшие производители, такие как Cisco и Juniper, при-

няли эту технологию, так как считается, что чем проще преобразование энергии, тем выше КПД. В этом примере показана коммутаторная платформа Cisco Nexus 9500 с потребляемой мощностью 3000 Вт и с диапазоном входного напряжения от 192 до 400 В постоянного тока. Этот широкий диапазон допустимых рабочих напряжений означает, что коммутатор при низком напряжении потребляет значительно больший ток. К примеру, при 192 В ток будет 16,4 А, а при 420 В – 7,5 А.

При выборе программируемого источника подходящей мощности для тестирования такого оборудования инженеры должны учитывать максимальные значения как напряжения (400 В), так и тока (16,4 А). Также надо иметь в виду, что большинство тестов проверки конструкции являются экстремальными. Например, может потребоваться проверить работоспособность до 180 В постоянного тока. В этом случае ток увеличится до 17,5 А. Давайте теперь посмотрим на рис. 1 и представим себе обычный программируемый источник постоянного тока. Большинство производителей предлагают модели с выходным напряжением 500 В. Для определения мощности это будет означать:

$$500 \text{ В} \times 16,4 \text{ А} = 8200 \text{ Вт.}$$

То есть в этом случае для обеспечения обоих граничных случаев испытаний необходим источник с мощностью не менее 8,2 кВт.

Большинство производителей предлагают стандартные решения мощ-

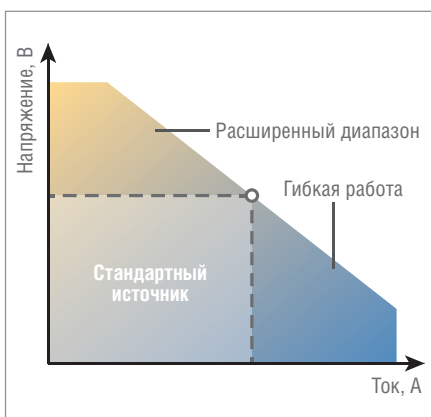


Рис. 1. Профиль мощности источника с авторанжированием

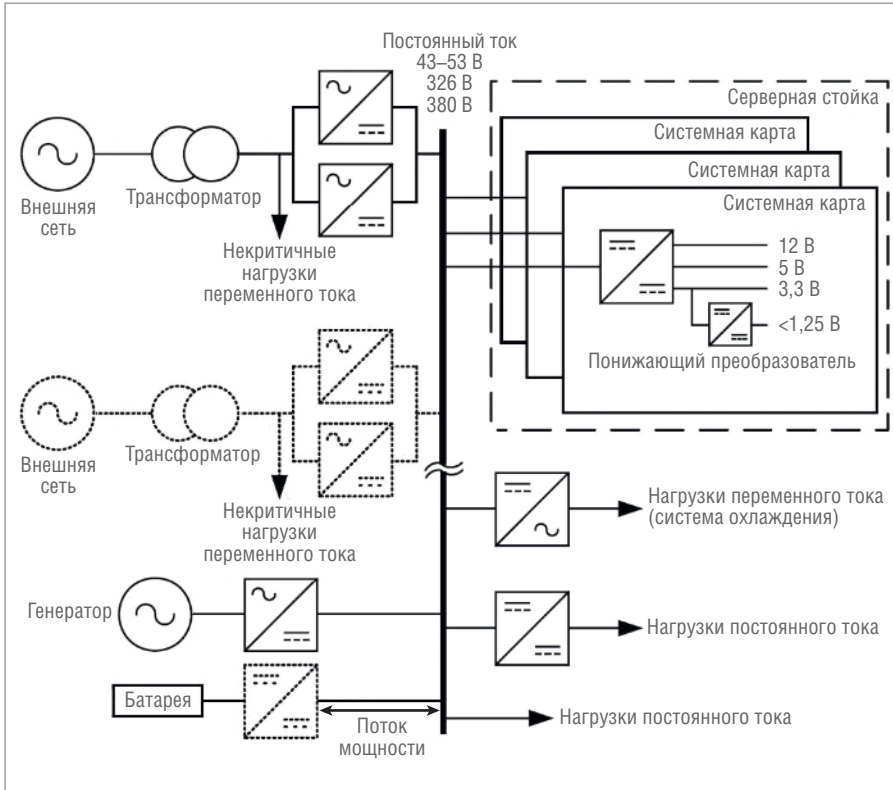


Рис. 2. Типовая схема организации электропитания

ностью 5, 10, 15 кВт, поэтому инженер будет вынужден выбрать решение 10 кВт. И всё только для того, чтобы проверить устройство, потребляющее 3150 Вт. Далее приведён пример того, что источник мощностью 8/10 кВт обеспечивает выходной ток максимум 20 А (табл. 1).

**ПОДРОБНЕЕ  
О ПРЕИМУЩЕСТВАХ  
АВТОРАНЖИРОВАНИЯ**

В предыдущем примере мы вывели минимальную потребную для эксперимента мощность обычного источника – 8,2 кВт. Источник EA-PSB 9500-30 3U имеет номинальную мощность 5000 Вт и обеспечивает на выходе напряжение 0–500 В постоянного тока при величине тока до 30 А. При номинальной мощности 5000 Вт этот источник способен обеспечить:

- 192 В постоянного тока при 26,0 А,
- 420 В постоянного тока при 11,9 А.

В этом случае избыток мощности авторанжируемого источника компании Elektro-Automatik (EA) составляет всего половину запаса мощности традиционного устройства и всё же обеспечивает больший ток и даже позволяет провести тест с напряжением до 180 В постоянного тока. Если оценивать стоимость источника питания в долларах США/Вт, то чем больше мощность, тем выше стоимость. Авторанжируе-

мый источник питания может оказаться вдвое дешевле. Но одну вещь при выборе блока питания с авторанжированием всё же следует учитывать: это запас на будущее. Что, если вместо 400 В постоянного тока вам потребуется, скажем, 600 В? Почему бы сразу не приобрести источник 750 В? Источник EA-PSB 9750-20 3U рассчитан также на 5000 Вт выходной мощности, при этом бес-

печивает 750 В постоянного тока при величине тока до 20 А. Этот источник, как и предыдущий, будет соответствовать вашим требованиям, но имеет преимущество резерва выходного напряжения. На рис. 1 это обозначено как расширенный диапазон.

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ  
ТЕСТОВЫЕ СИСТЕМЫ**

Интеграция систем автоматического тестирования (automatic test equipment – АТЕ) при использовании авторанжируемых источников постоянного тока часто упрощается. Проекты АТЕ обычно содержат несколько источников постоянного тока для решения различных задач или один негабаритный для удовлетворения всех требований. Использование источника с авторанжированием может не только оптимизировать стоимость установки, но и сэкономить ценное пространство в конструкции АТЕ.

**Цифровые интерфейсы  
управления**

Большинство решений Elektro-Automatik снабжены лидирующим в отрасли цифровым интерфейсом для удалённого управления под названием Apybus. Модули связи просто подключаются к задней панели источника. Широкий выбор интерфейсов избавляет от необходимости дополнительно использовать нестабильные и дорогостоящие цифровые преобразователи. Для связи доступны следующие модули (рис. 3):

Таблица 1

Спецификация традиционного источника питания

Выход: диапазоны напряжения и тока			
Высота	3U		
Мощность	4/5 кВт	8/10 кВт	12/15 кВт
Напряжение	Ток		
500 В	10 А	20 А	30 А



Рис. 3. Сменные модули Apybus (модули цифровых интерфейсов серии EA-IF-AB)



Рис. 4. Решения Auto-Ranging для стоек мощностью от 16 Вт до 480 кВт

- RS-232;
- CANopen;
- PROFIBUS;
- PROFINET IO (1/2-портовый);
- Ethernet (1/2-портовый);
- Modbus TCP;
- CAN;
- EtherCAT.

**Решения высокой мощности**

Решения Elektro-Automatik Auto-Ranging начинаются с мощности 160 Вт и простираются до 480 кВт. Таким образом, компания предлагает комплексные решения под ключ, адаптируемые к любым требованиям (рис. 4)

**ЭЛЕКТРОННЫЕ НАГРУЗКИ С ФУНКЦИЕЙ РЕКУПЕРАЦИИ**

Электронные нагрузки серии EA-ELR 9000 благодаря своей компактной конструкции особенно подходят для тестовых и промышленных контрольных систем (рис. 5). Помимо наличия основных обязательных функций, они имеют встроенный функциональный генератор, предназначенный для создания нескольких типов кривых.

Кроме того, эти устройства способны достигать действительно высоких значений мощности, несмотря на то, что по мере увеличения подлежащей проверке мощности растут потери энергии, выделяемой в виде рассеиваемого тепла. Для этого EA предлагает электронные нагрузки постоянного тока с дополнительным экологичным решением, которое состоит в преобразовании подаваемой на них энергии постоянного тока в переменный ток и подаче её обратно в локальную или общественную сеть (рис. 6).

Таким образом, при эффективности рекуперации 95% нагрузка 3 кВт возвращает в сеть 2,85 кВт. Это решение сводит к минимуму обычное в таких случаях тепловыделение и одновременно экономит энергозатраты.

Как показано на рис. 7, энергия постоянного тока подаётся на вход DC/DC-преобразователя, который после преобразования (гальванической развязки и стабилизации) подаёт её на вход инвертора. Последующая стадия преобразования происходит в инверторе, который конвертирует энергию постоянного тока в соответствующую энергию переменного тока.

Подразумевается, что энергия переменного тока должна быть подготовлена по уровням напряжения и частоты для передачи в местную сеть. В этот мо-

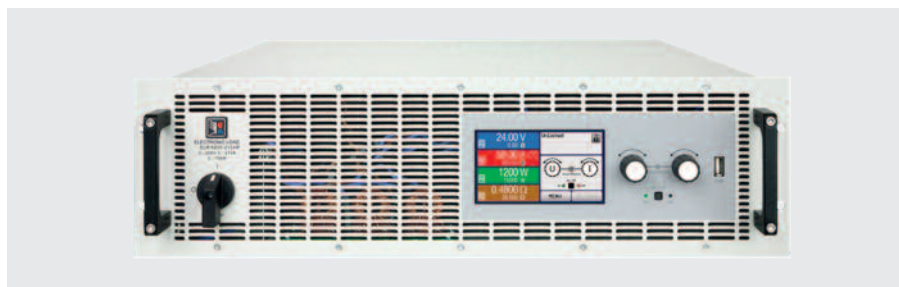


Рис. 5. Рекуперативная электронная нагрузка ELR 9000 3U

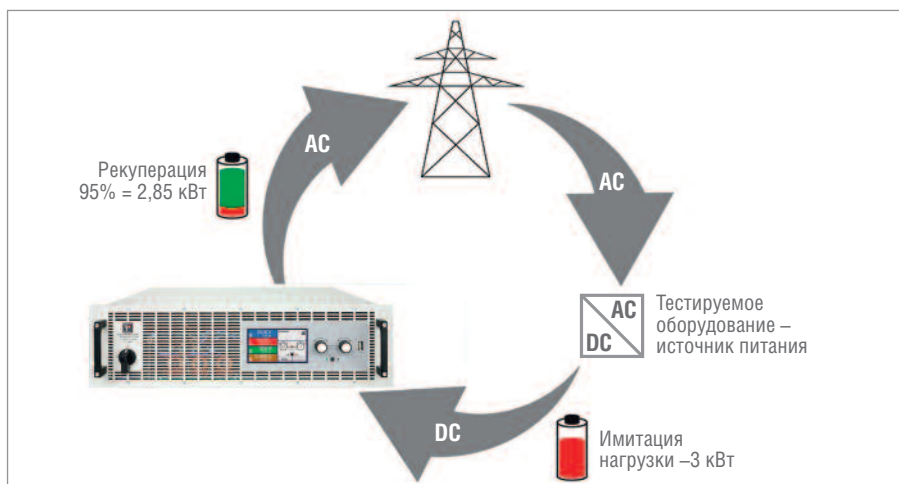


Рис. 6. Схема рекуперации энергии электронной нагрузкой

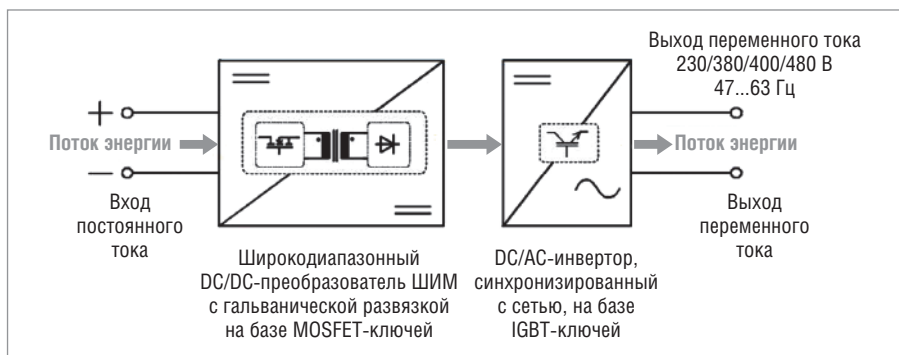
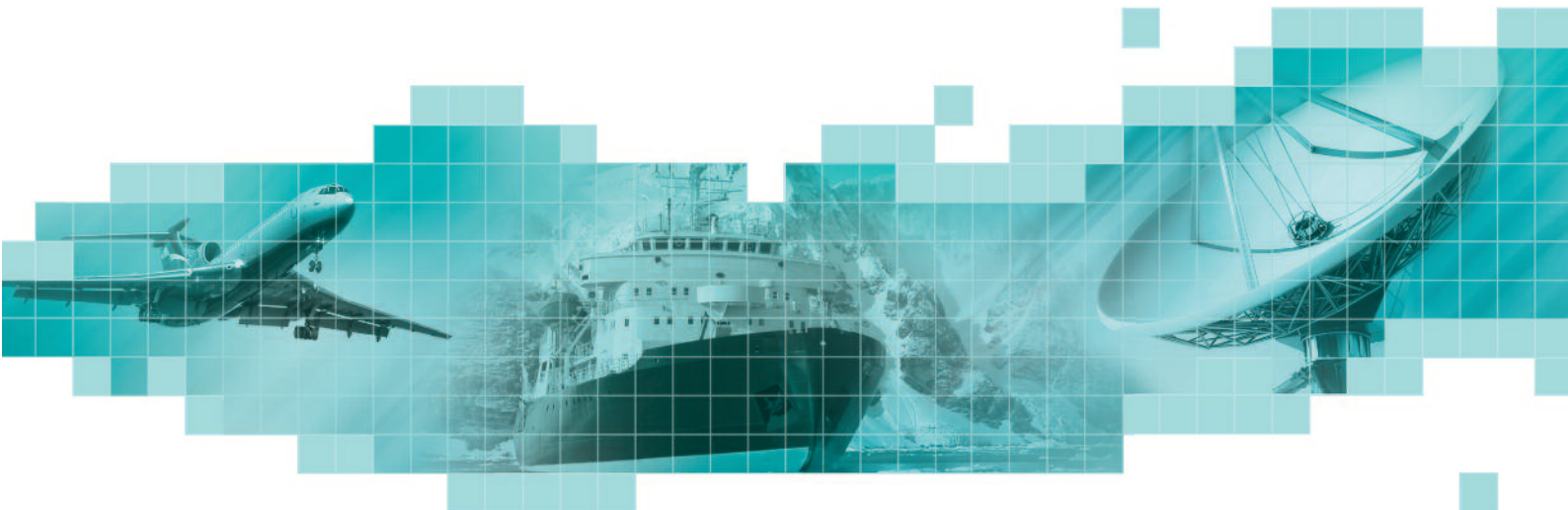


Рис. 7. Процесс преобразования энергии



## CompactPCI ■ Компьютеры специального назначения

**Блочные корпуса** с различными механическими характеристиками, в том числе с ударпрочностью до **25g**

Эффективное электромагнитное экранирование

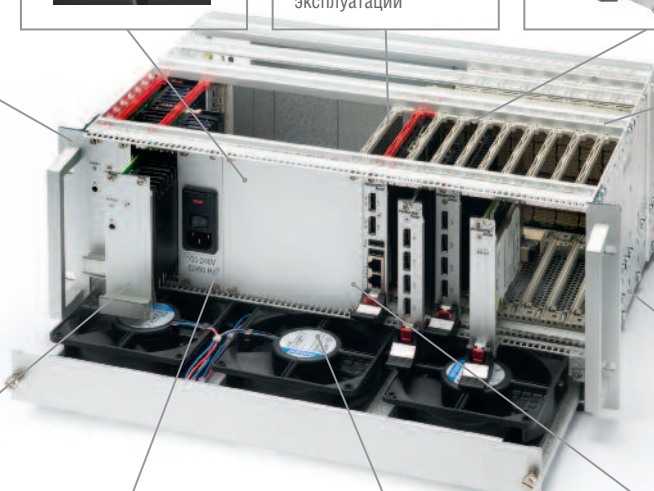
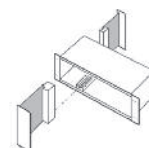


**Процессорные модули PICMG 2.0, 2.16, 2.30; CPCI-S.0 (Serial)** на различных процессорных платформах AMD и Intel для работы в жёстких условиях эксплуатации

**Кросс-платы и модули расширения PICMG 2.0, 2.16, 2.30, CPCI-S.0 (Serial)**



Подключение модулей тыльного ввода-вывода



**Источники питания** одинарные или резервированные: встраиваемые или в виде сменных блоков



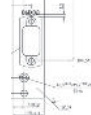
**Панели ввода** с клеммами заземления и разъёмами питания разных типов



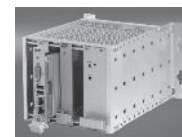
**Вентиляторы** с возможностью «горячей» замены. Система охлаждения, в том числе с кондуктивным отводом тепла



**Лицевые панели** универсальные и заказные для вставных блоков



**Различные габариты** и варианты компоновки



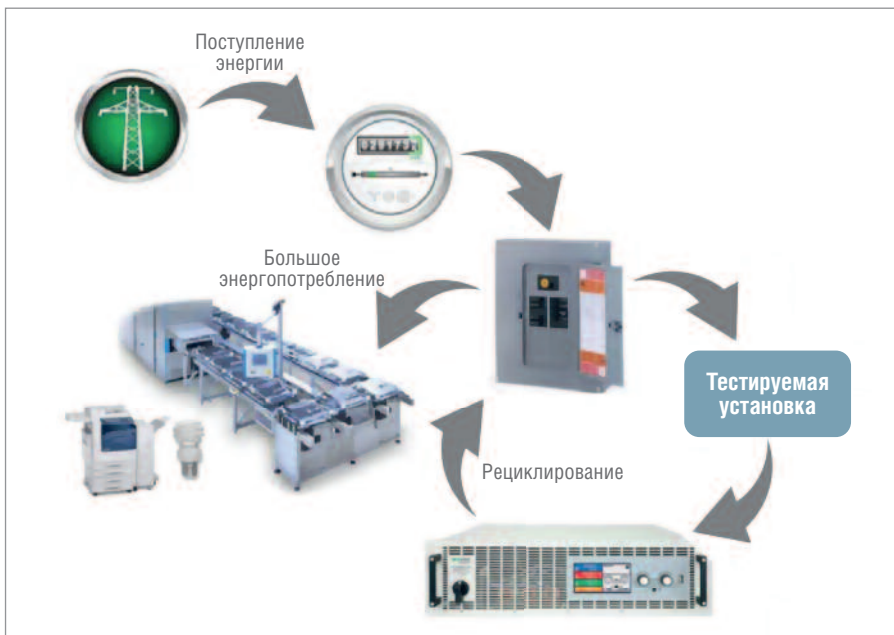


Рис. 8. Процесс передачи энергии в сети

мент восстановленная энергия возвращается в заводскую сеть и в конечном итоге используется пользователями в соответствующих производственных процессах.

В случае если восстановленная мощность выше потребляемой пользователями внутренней сети, эта энергия передается в общую сеть. На рис. 8 показан процесс восстановления энергии. На производственной линии с высоким энергопотреблением можно увидеть нагрузку с рекуперацией энергии, работающую как часть тестируемой установки. Поток, выходящий из проверяемого оборудования к нагрузке ELR 9000, подключается после счётчика и находится в одной линии с главным блоком предохранителей, а полученная энергия возвращается обратно в заводскую сеть (это внутренняя сеть). Если устройство будет использоваться как часть непрерывных тестовых операций, подключение устройства таким способом обязательно. Восстановленная энергия будет затем использоваться производством, лабораториями или даже офисным оборудованием.

### ДВУНАПРАВЛЕННЫЕ ЛАБОРАТОРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

Двунаправленный источник питания серии EA-PSB 9000 3U с микропроцессорным управлением объединяет два устройства в одном: источник питания постоянного тока и электронную нагрузку с рекуперацией энергии. Благодаря такой функциональности устройство может реализовать двухквadrантную ра-

боту. Таким образом, с точки зрения подключённой нагрузки, устройство ведёт себя как стандартный источник питания, а с точки зрения подключённого источника питания, как нагрузка серии EA-ELR 9000. Кроме того, эта серия имеет все преимущества авторанжирования, о которых было сказано ранее, а также преимущество наличия функционального генератора, позволяющего создавать на выходе одну из предустановленных кривых, показанных на рис. 9. Предусмотрена и возможность генерации произвольной кривой, заданной пользовательским набором точек.

Далее на примере тестирования управляемого контроллером электродвигателя проиллюстрируем работу этих источников.



Рис. 9. Встроенные возможности функционального генератора

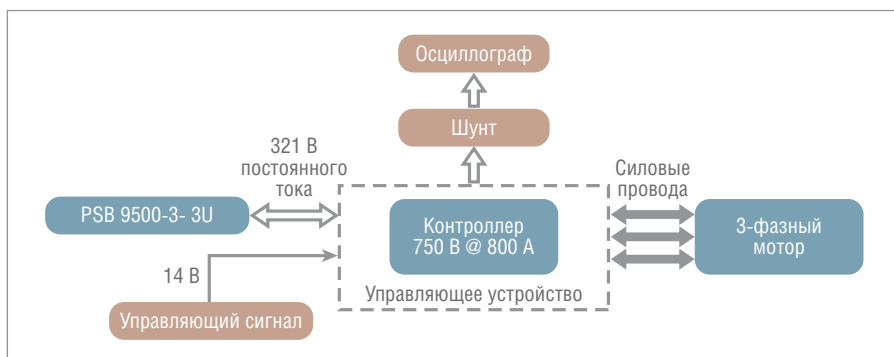


Рис. 10. Структурная схема тестовой установки

### Испытание электродвигателя

С каждым годом электрификация транспортных средств набирает обороты, и все признаки указывают на то, что эта тенденция в будущем лишь усилится. Некоторыми факторами, способствующими этому развитию, являются всё более широкое использование гибридных и полностью электрических транспортных средств с целью снижения вредных выхлопов, а также стремление к повышению надёжности.

Испытание является критически важной частью запуска любого электропривода в производство. Получаемые в результате данные отражают различные условия нагрузки во время циклов испытаний на долговечность. Эта концепция “Smart Green Technology” не только снижает энергопотребление энергосистемы, но и устраняет её низкую энергоэффективность, возвращая энергию в систему. Структурная схема тестовой установки приведена на рис. 10. Параметры используемого источника следующие:

- модель PSB 9500 0-30 3U,
- выход/вход по напряжению 0–500 В постоянного тока,
- выход/вход по току 0–30 А постоянного тока,
- мощность 5 кВт.

В испытаниях использованы измерительный токовый шунт и осциллограф. Максимальная мощность контроллера 750 В постоянного тока при 800 А. Описанный далее тест обеспечивает испытание мотора при напряжении 320 В постоянного тока и токе не более 10 А. Число оборотов двигателя составляет примерно 6000 об/мин, по часовой стрелке

и против часовой стрелки в режиме холостого хода. Итак, электродвигатель развивает скорость 6000 об/мин в направлении вращения по часовой стрелке, увеличивая положительный ток до 10 А (PSB 9500-30 работает как источник, питающий мотор). Примерно через 100 мс контроллер управления мотором выключает питание, и энергия быстро рассеивается на PSB 9000 с пиковыми значениями тока приблизительно  $-5$  А (в это время PSB 9500-30 работает как электронная нагрузка). Затем напряжение снова подаётся и двигатель вновь разгоняется до установления тока 10 А (рис. 11). Поскольку PSB 9000 автоматически переключается из режима источника в режим нагрузки, стабильность напряжения поддерживается на уровне 320,9 В постоянного тока даже во время перехода от положительного к отрицательному току (рис. 12).

### Вечный аккумулятор

Многие автономные электрические и электронные устройства используют для питания перезаряжаемые аккумуляторные батареи. Батареи аккумуляторов также активно применяются на транспорте, в источниках бесперебойного питания, в гелиоэнергетических системах и т.п. Эти устройства должны быть протестированы на предмет корректной работы с АКБ во всех её возможных состояниях. При этом проводить такие тесты с реальными АКБ весьма затруднительно, поскольку сложно добиваться требуемого начального состояния «живой» АКБ в составе тестовой установки. К тому же, подвергаясь множеству циклов глубокой разрядки и/или перезарядки, реальная АКБ быстро выходит из строя. Можно было бы использовать для целей тестирования хорошо известные специальные аппаратные симуляторы батарей. Симулятор батареи имитирует электрические характеристики батареи аккумуляторов, в нужные периоды выдавая напряжение или потребляя зарядный ток. Обычный источник питания тут не подойдёт, поскольку он может лишь выдавать ток при положительном напряжении (работает только в первом квадранте), а нам требуется работа и с отрицательными токами во втором квадранте. Таким образом, симулятор батареи – это особый тип источника питания, называемый двухквadrантным источником питания (рис. 13). Но мы уже знаем, что рассмотренный нами ранее двунаправленный источник ЕА также может работать

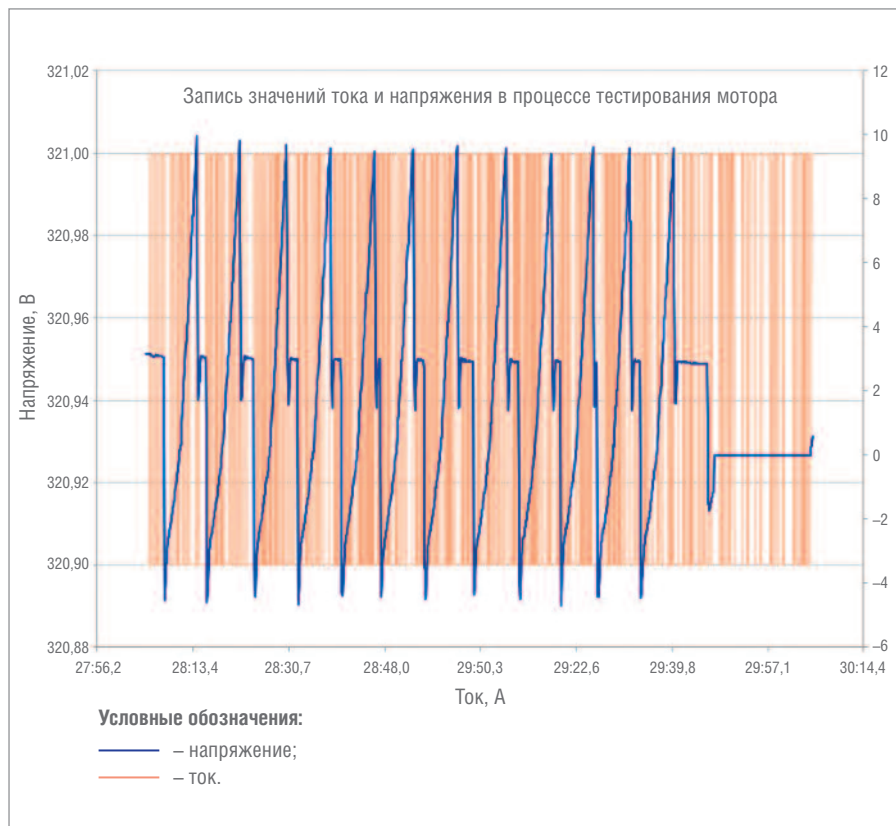


Рис. 11. Вольт-амперная характеристика 100-миллисекундных циклов испытаний

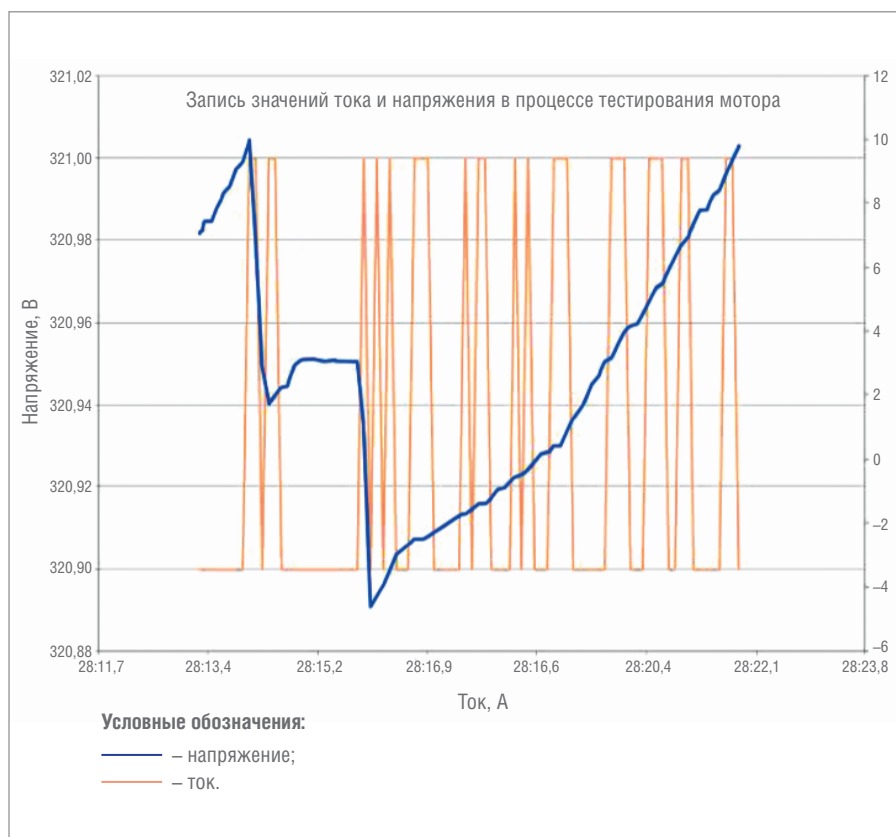


Рис. 12. 100-миллисекундный цикл испытаний в увеличенном масштабе

как двухквadrантный. Таким образом, потенциально он сможет имитировать как заряд, так и разряд батареи. Требуется лишь управлять таким источником специальным образом, чтобы, с точки зрения исследуемого изделия, его пове-

дение ничем не отличалось от поведения реальной АКБ. Именно для целей такого управления ЕА создала специальное ПО, названное Battery Simulator. Battery Simulator – это программа для Windows™, удалённо контролирующая

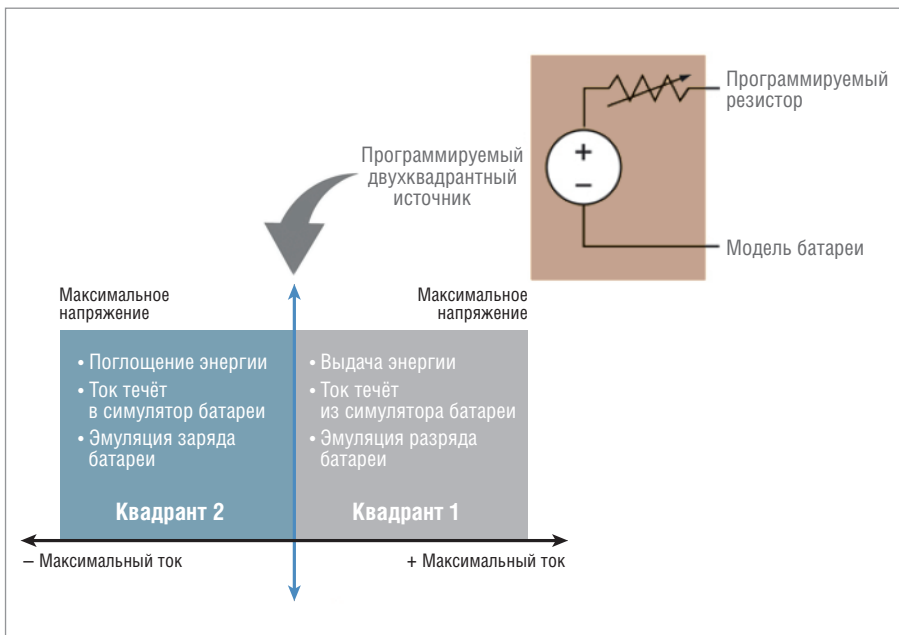


Рис. 13. Иллюстрация работы симулятора АКБ в двух квадрантах

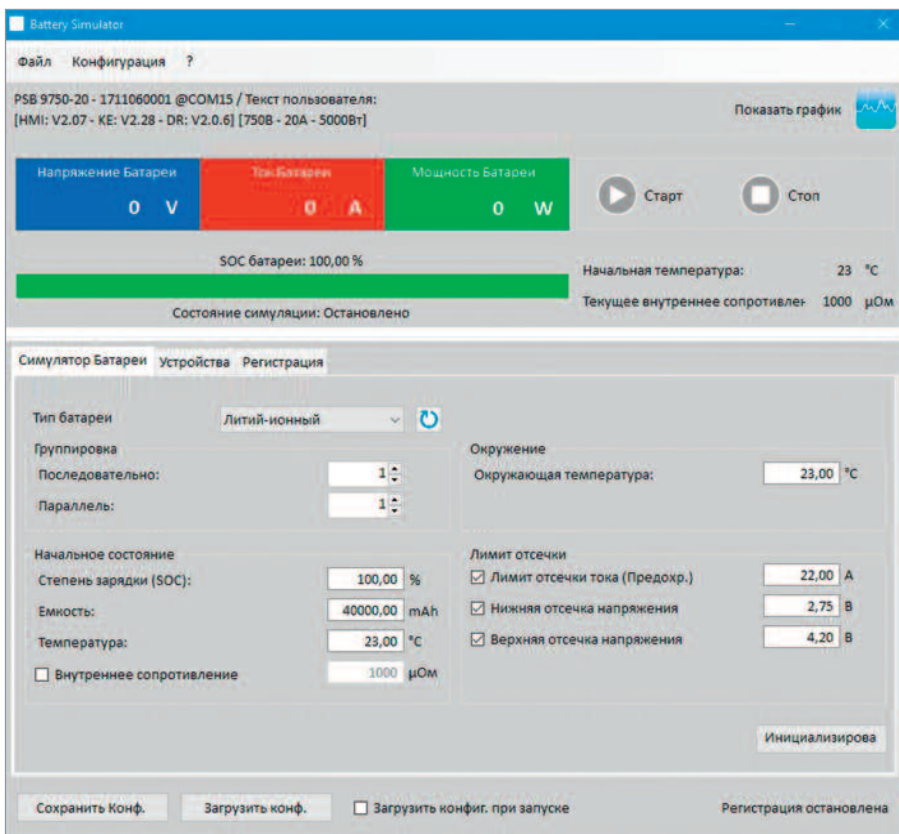


Рис. 14. Пример интерфейса программы Battery Simulator

Типы поддерживаемых в настоящее время АКБ

Таблица 2

Характеристики	Литий-ионная АКБ	Свинцово-кислотная АКБ
Номинальное напряжение	3,7 В	12 В
Номинальная ёмкость	40 А·ч	70 А·ч
Максимальный ток заряда	80 А	30 А
Максимальный ток разряда	200 А	140 А
Верхний предел напряжения	4,2 В	10,5 В
Нижний предел напряжения	2,75 В	16 В

двунаправленные источники питания серий EA-PSB 9000 и EA-PSB 10000, позволяя им симулировать определённые типы батарей, включая их характеристики заряда/разряда. Это достигается с помощью реализованного набора таблиц значений и библиотек параметров, которые были разработаны и собраны в сотрудничестве с известным немецким институтом Фраунгофера (Fraunhofer IIS). Профили переключаемых батарей, которые можно редактировать в соответствии с требованиями целевого приложения, определяют не только основные параметры батареи: её ёмкость, внутреннее сопротивление или состояние заряда, но и параметры тестирования, такие как температура окружающей среды. Как показано на рис. 14, пользовательский интерфейс программы русифицирован. Удалённый программный контроль доступен через цифровой интерфейс источника. Связь с компьютером поддерживается посредством USB и Ethernet.

Основные особенности симуляции следующие:

- благодаря широкому диапазону напряжений и токов блок питания может заменить собой широкий спектр типов батарей;
  - в настоящее время ПО имитирует литий-ионные и свинцово-кислотные батареи (табл. 2), но поскольку характеристики достигаются программно, обновления ПО будут предлагать больше типов батарей;
  - имитируются или рассчитываются конкретные значения параметров батареи, такие как напряжение, ток зарядки/разрядки, внутреннее сопротивление и температура батареи, а также состояние заряда.
- Однако процесс симуляции имеет свои ограничения, которые требуется учитывать, а именно, у реальной АКБ имеются некоторые характеристики, которые нельзя смоделировать.
- Ток короткого замыкания и краткосрочная перегрузочная способность АКБ. При коротком замыкании батарея может выдавать в течение короткого времени очень большой ток. Источник питания всегда ограничивает свой выходной и входной токи.
  - Постоянное наличие напряжения батареи. На выходе батареи всегда присутствует какое-то напряжение, тогда как выход источника питания может быть либо включен, либо выключен. Его включение требует некоторого времени. Нарастание напряжения



Рис. 15. Графическое представление симулированных значений

при мягком старте происходит примерно в течение 150 мс. Кроме того, выходное напряжение источника питания может сильно падать при достижении ограничения по току или по мощности (рис. 1). Падение напряжения на выходе источника обратно пропорционально приращению тока.

- Непрерывность показаний температуры батареи. Невозможно представить смоделированную температуру корпу-

са батареи как аналоговое значение, как это происходит при использовании термисторного датчика температуры, часто применяемого в устройствах заряда АКБ. Температура симулируемой батареи по мере заряда возрастает, но вам доступно только цифровое значение в пользовательском интерфейсе программы (рис. 15). Симулированная батарея может быть источником питания постоянного тока

для нагрузки, что рассматривается как её разряд, или она может быть потребителем на внешнем DC-источнике, что рассматривается как заряд. Симуляция автоматически переключится в режим заряда, как только внешнее напряжение станет выше, чем напряжение симулированной батареи, и переключится обратно в режим разряда, когда внешнее напряжение упадёт ниже напряжения батареи. Если на входе вовсе не будет напряжения, это означает, что режим разряда – это режим умолчания без подключённой нагрузки.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные на примере изделий компании EA технологии, конечно, не уникальны, и есть примеры подобных решений других производителей. Но если задуматься о приобретении и использовании действительно надёжных, функциональных и адекватных по цене двунаправленных двухквadrантных источников питания, то имеет смысл внимательнее присмотреться к линейке устройств EA. ●

E-mail: [textoed@gmail.com](mailto:textoed@gmail.com)

## Беспроводные датчики

для измерения температуры, влажности и уровня CO<sub>2</sub>



Sensortechnik GmbH







- Простота и гибкость при монтаже
- Высокая точность измерения
- Интеллектуальные функции самокалибровки



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

[WWW.PROSOFT.RU](http://WWW.PROSOFT.RU)

