

# Keysight Technologies

Особенности построения систем питания и нагрузок высокой мощности

Рекомендации  
по применению



## Введение

Спутники, гибридные электромобили (ГЭМ), источники бесперебойного питания (ИБП), альтернативные источники энергии и ряд других современных систем электроснабжения поставляют электроэнергию, когда это целесообразно. Они основаны на системах и устройствах двунаправленного преобразования и рекуперации энергии, предназначенных для её накопления, с целью обеспечения бесперебойной подачи электроэнергии по требованию. Примерами таких систем и устройств являются:

- Аккумуляторные батареи
- Суперконденсаторы
- Мотор-генераторные установки
- Двунаправленные преобразователи постоянного тока
- Системы управления аккумуляторными батареями (BMS)
- Рекуперативные тормозные системы

Многие из этих систем и устройств работают, используя многокиловаттные уровни мощности. При разработке и производстве таких систем требуется обеспечить возможность подавать и потреблять уровни мощности в диапазоне от киловатта и выше, что часто представляет чрезвычайно сложную задачу для специалистов по тестированию. Обычно для подачи и потребления мощности используются уже имеющиеся отдельные приборы. Но этот подход имеет недостатки, которые могут быть преодолены только при наличии функций подачи и потребления мощности, которые полностью интегрированы в одном приборе или системе.

## Сравнение двухквadrантного и четырёхквadrантного режимов работы

Специалисты по тестированию иногда неправильно понимают, что им необходимо для подачи и потребления мощности при тестировании систем и устройств двунаправленного преобразования и рекуперации энергии. Двунаправленные источники питания часто представляют как биполярные, предполагая, что для тестирования требуется биполярный источник питания. На самом деле это две разные вещи. Униполярный двунаправленный источник питания - это источник, который работает в квадрантах I и II четырёхквadrантной вольт-амперной характеристики (ток-напряжение), как показано на рисунке 1. Он может выдавать и потреблять ток, но только при положительном напряжении. Он работает и как источник постоянного тока, и как электронная нагрузка, то есть, является двухквadrантным источником постоянного тока.

В отличие от него, биполярный источник питания может осуществлять переход через нулевое значение напряжения и работать с положительным или отрицательным напряжением. Он может отдавать мощность в квадрантах I и III и потреблять мощность в квадрантах II и IV.

Поскольку системы и устройства для двунаправленного преобразования и рекуперации энергии выдают и потребляют ток и имеют однополярное напряжение, для их тестирования почти всегда можно использовать униполярный двухквadrантный источник питания, а иногда его использование даже предпочтительно. Важно отметить, что двухквadrантный источник питания постоянного тока имеет полностью управляемый непрерывный режим работы при его использовании в качестве электронной нагрузки в квадранте II. Однако его способности быстрого снижения напряжения за счёт потребления тока (down-programming) недостаточно для надлежащего тестирования систем и устройств для двунаправленного преобразования энергии.

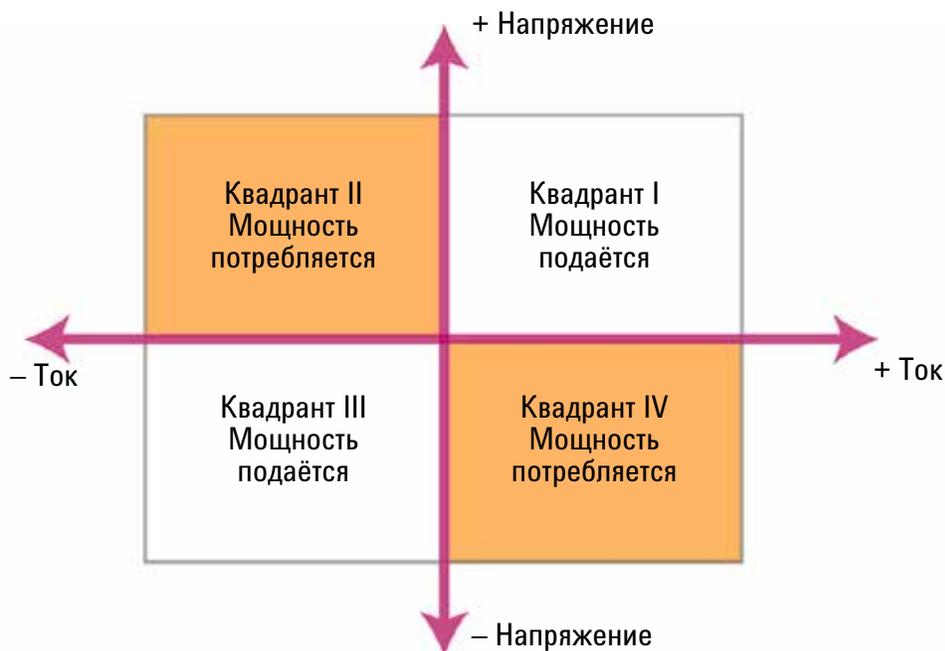


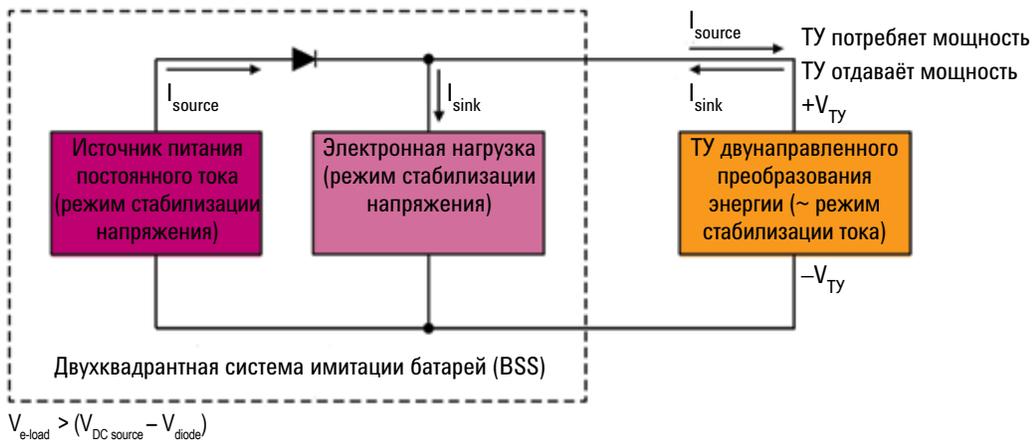
Рисунок 1. Четыре квадранта вольт-амперной характеристики

## Система подачи/потребления мощности с зоной отстройки по напряжению на базе отдельного источника питания постоянного тока и электронной нагрузки

Выбор подходящих двухквadrантных источников питания постоянного тока, работающих при многокиловаттных уровнях мощности, очень ограничен. Инженеры часто прибегают к использованию отдельных источников питания постоянного тока и электронных нагрузок, чтобы обеспечить комбинированное техническое решение подачи и потребления мощности, необходимое для тестирования своих систем и устройств двунаправленного преобразования и рекуперации энергии.

Работая независимо друг от друга, источник питания постоянного тока и электронная нагрузка хорошо подходят для подачи и потребления мощности, обеспечивая при этом хорошую точность в режиме постоянного тока, стабильность характеристик и быстрые динамические характеристики, независимо от тестируемого устройства (ТУ). Для такой работы это необходимо, поскольку рассматриваемые ТУ являются активными и динамическими, попеременно потребляя или отдавая мощность, в зависимости от их состояния и рабочих условий.

Одна из структурных схем установки, которая совместно использует источник питания постоянного тока и электронную нагрузку для подачи/потребления мощности, показана на рисунке 2. Она часто используется в качестве системы имитации батарей (BSS).



ТУ потребляет мощность (активен источник питания постоянного тока):  $V_{TU} = (V_{DC source} - V_{diode})$

ТУ отдаёт мощность (активна электронная нагрузка):  $V_{TU} = V_{load}$

Рисунок 2. Структурная схема системы имитации батарей (BSS), которая совместно использует источник питания постоянного тока и электронную нагрузку

Система имитации батарей (BSS) является преимущественно устройством, управляемым напряжением; и источник питания постоянного тока, и электронная нагрузка, как правило, работают в режиме стабилизации напряжения (CV). Их напряжения смещены для создания зоны отстройки по напряжению, чтобы работа этих устройств не перекрывалась. Величина напряжения электронной нагрузки устанавливается несколько большей, чем напряжение источника питания постоянного тока. Чаще всего система имитации батарей (BSS) используется для тестирования систем управления аккумуляторными батареями (BMS), но эту установку можно применить и для многих других ТУ, которые должны быть протестированы с использованием униполярного двухквadrантного источника питания постоянного тока. Когда ТУ питается или потребляет мощность, напряжение поддерживается источником питания постоянного тока. Когда ТУ генерирует или отдаёт мощность, напряжение возрастает, источник питания постоянного тока отключается, и электронная нагрузка начинает активно работать в режиме стабилизации напряжения (CV), фиксируя напряжение на несколько более высоком уровне. Для изоляции и предотвращения протекания обратного тока в источник питания постоянного тока, когда ТУ будет активно отдавать мощность, на выходе источника питания постоянного тока часто требуется установить блокировочный диод. В этой конфигурации выдаваемый ток затем считывается непосредственно с источника питания постоянного тока, а потребляемый ток - с электронной нагрузки. При использовании такого подхода существует несколько обстоятельств, которые приводят к ухудшению рабочих характеристик системы.

- Источник питания постоянного тока должен использовать локальное измерение напряжения на выходных клеммах, так как блокировочный диод будет дестабилизировать его работу, если использовать дистанционное измерение напряжения на диоде.
- Зона отстройки по напряжению между подачей и потреблением мощности является высокоимпеданной.

- Требуется посылать команды для программирования уровней напряжения как к источнику питания постоянного тока, так и к электронной нагрузке, для того чтобы они были согласованы, поскольку уровень напряжения системы имитации батарей (BSS) изменяется.
- В целом для координации активности источника питания постоянного тока и электронной нагрузки во время тестирования требуется намного более высокий уровень сложности системы.
- Электронная нагрузка должна переключаться между выключенным состоянием и активным режимом стабилизации напряжения (CV), что ухудшает её динамические характеристики.
- Падение напряжения на блокировочном диоде является переменной величиной, которая зависит от уровней силы тока и температуры, что приводит к необходимости использовать существенную величину зоны отстройки по напряжению между уровнями напряжения источника питания постоянного тока и электронной нагрузки, которая исчисляется несколькими сотнями милливольт.

В частности, два последних пункта ограничивают гибкость, точность и общую производительность этой конфигурации с двухквadrантным источником питания для работы в статическом режиме. С целью корректировки напряжения зоны отстройки по напряжению при работе в статическом режиме напряжение системы имитации батарей (BSS) можно программно поднимать или опускать по мере необходимости до достаточно близкого уровня напряжения. Однако, степень напряжения зоны отстройки по напряжению является неотъемлемым свойством динамических переключений, которое ещё более усугубляется быстрым переходом электронной нагрузки в режим стабилизации напряжения (CV), как показано на рисунке 3.

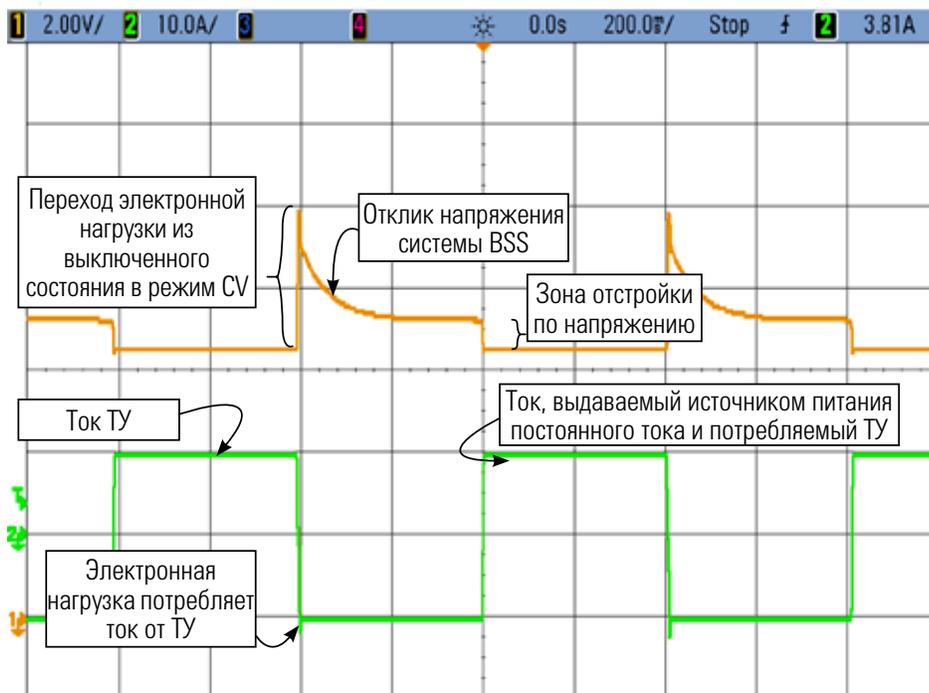


Рисунок 3. Процессы переключения между подачей/потреблением мощности в системе на базе отдельного источника питания постоянного тока и электронной нагрузки с зоной отстройки по напряжению

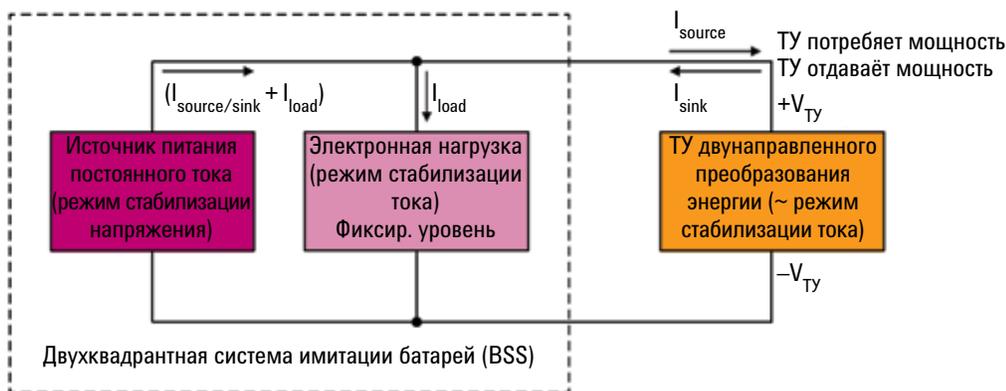
## Система подачи/потребления мощности с перекрытием на базе отдельного источника питания постоянного тока и электронной нагрузки

Для устранения многих проблем, связанных с тем, что работа источника питания постоянного тока и электронной нагрузки не перекрываются, как было описано ранее, можно использовать режим работы с полным перекрытием. В этом случае источник питания постоянного тока и электронная нагрузка конфигурируются для работы с полным перекрытием, как показано на рисунке 4. Теперь электронная нагрузка работает не в режиме стабилизации напряжения (CV), а в режиме стабилизации тока (CC). В качестве установки силы тока электронной нагрузки используется величина, превышающая максимальное значение, которое, как ожидается, будет выдавать ТУ. Таким образом, электронная нагрузка всегда остаётся в режиме стабилизации тока (CC), поддерживая фиксированный уровень силы тока и мощности. Электронная нагрузка больше не испытывает влияния каких-либо проблем, связанных с переходами в другой режим работы. Источник питания постоянного тока всегда остаётся в режиме стабилизации напряжения (CV) и всегда выдаёт ток. Поэтому блокировочный диод больше не требуется. В результате эта конфигурация системы BSS всегда работает в режиме стабилизации напряжения (CV) во всём диапазоне подачи и потребления мощности, освобождена от переходов электронной нагрузки из одного режима работы в другой и переходных процессов напряжения зоны отстройки по напряжению, которые влияют на работу системы BSS с конфигурацией без перекрытия. В результате в этом случае можно отметить ряд недостатков.

- Источник постоянного тока должен быть значительно мощнее, чтобы обеспечить максимальные значения силы тока и мощности, требуемые ТУ, плюс полную величину силы тока, непрерывно потребляемой электронной нагрузкой. Например, для обеспечения 100%-го потребления тока источник питания постоянного тока должен быть в два раза мощнее.
- Электронная нагрузка постоянно рассеивает полную мощность, которая является значительной величиной для большой системы.
- При измерениях требуется считывать значения силы тока источника напряжения постоянного тока и электронной нагрузки и определять разность между ними, часто чтобы из двух больших значений получить одно малое значение. В результате страдает точность измерений.

## Интегрированные технические решения для подачи/ потребления мощности

Недостатки конфигурирования технических решений на базе отдельного источника питания постоянного тока и электронной нагрузки устраняются, когда функции подачи и потребления мощности интегрированы в одном измерительном приборе. Если эти функции интегрированы, они работают под управлением системы с обратной связью, чтобы обеспечить непрерывный, свободный от переходных процессов, переход между подачей и потреблением тока и мощности. В данном случае нет необходимости постоянно рассеивать большую величину мощности, чтобы достичь этого. Точность измерений на постоянном токе и динамические характеристики являются теперь оптимизированными, а не полученными в результате компромиссов. Технические характеристики измерений значительно улучшаются при наличии единой системы измерений для всех источников тока. Основная проблема заключалась в отсутствии доступных измерительных приборов, которые бы надлежащим образом удовлетворяли потребности тестирования современных систем и устройств двунаправленного преобразования и рекуперации энергии. В результате у инженеров не было выбора, и они вынуждены были использовать системы на базе отдельных источников питания постоянного тока и электронных нагрузок.



$$I_{\text{load}} > (I_{\text{sink-max}}), \text{ фиксированное значение}$$

$$V_{\text{ТУ}} = V_{\text{DC source}}$$

$$\text{ТУ потребляет мощность: } I_{\text{DC source}} = (I_{\text{source}} + I_{\text{load}})$$

$$\text{ТУ отдаёт мощность: } I_{\text{DC source}} = (I_{\text{sink (negative)}} + I_{\text{load}})$$

Рисунок 4: Структурная схема системы имитации батарей (BSS), в которой источник питания постоянного тока и электронная нагрузка работают с перекрытием

## Источники питания постоянного тока серий N6900/N7900 семейства APS компании Keysight с интегрированными функциями подачи и потребления мощности .

Источники питания постоянного тока серий N6900A/N7900A семейства APS (Advanced Power System - производительная система питания), изображённые на рисунке 5, разработаны для тестирования современных систем и устройств двунаправленного преобразования и рекуперации энергии. Их отличительными свойствами являются:

- Энергоёмкие модели мощностью 1 кВт в корпусе высотой 1U и мощностью 2 кВт в корпусе 2U обеспечивают высокую мощность в минимальных габаритных размерах.
- Встроенная возможность потребления тока в диапазоне до 10% от номинальных выходных значений. Возможность простого увеличения потребления тока в диапазоне до 100% от номинальных выходных значений с помощью опционального модуля рассеяния мощности N7909A.
- Возможность широкого выбора выходных напряжений учитывает разнообразие современных ТУ и применений.
- Режимы работы с приоритетом напряжения или тока дают большую гибкость при тестировании процессов подачи и потребления мощности, независимо от типа ТУ.
- Двухквadrантная измерительная система для точных измерений напряжения, силы тока, уровня мощности, заряда и энергии.
- Расширенные возможности подачи мощности и измерений динамических источников питания постоянного тока серии N7900 семейства APS можно использовать для создания динамических выходных событий, проведения измерений переходных процессов, непрерывной регистрации напряжения, силы тока, уровня мощности и многого другого.
- Расширенные возможности маршрутизации сигналов запуска с конфигурируемой логикой для создания специализированных функций управления, запуска и защиты, полезных для упрощения решения особенно сложных задач тестирования.
- Уникальная модульная архитектура, обеспечивающая простое масштабирование интегрированных систем подачи/потребления мощности в диапазоне до 10 кВт, предназначенных для тестирования устройств с большой мощностью.



Источник питания с выходной мощностью 2 кВт в корпусе высотой 2U



Модуль рассеяния мощности, предназначенный для использования с источником питания с выходной мощностью 1 кВт, в корпусе высотой 1U



Источник питания с выходной мощностью 1 кВт в корпусе высотой 1U

Рисунок 5. Семейство APS источников питания постоянного тока компании Keysight

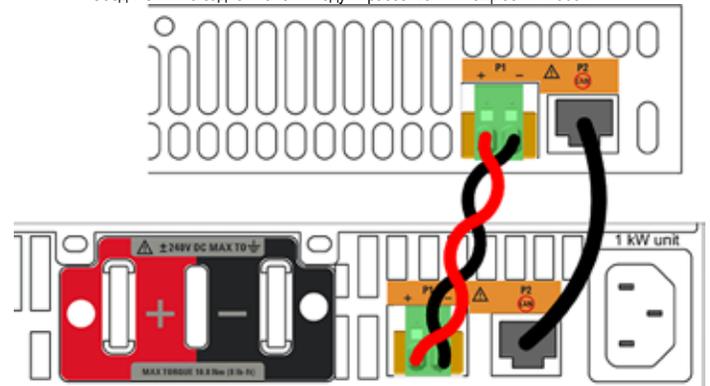
Источники питания постоянного тока серии N6900A семейства APS			Динамические источники питания постоянного тока серии N7900A семейства APS	
	1000 Вт	2000 Вт	1000 Вт	2000 Вт
9 В	100 А	200 А	100 А	200 А
20 В	50 А	100 А	50 А	100 А
40 В	25 А	50 А	25 А	50 А
60 В	17 А	33 А	17 А	33 А
80 В	12,5 А	25 А	12,5 А	25 А

Таблица 1. Модели источников питания постоянного тока серий N6900/N7900 семейства APS компании Keysight

## Интегрированные функции подачи и потребления мощности источников питания семейства APS, обеспечивающие непрерывность характеристик

При использовании отдельных источников питания постоянного тока и электронных нагрузок пользователь не имеет доступа к встроенным возможностям потребления мощности. Источники питания семейства APS имеют интегрированную функцию потребления мощности в диапазоне до 10% от номинальных выходных значений. Без усилий можно нарастить её для использования в диапазоне до 100% от номинальных выходных значений посредством простого добавления одного или двух модулей рассеивания мощности N7909A, в зависимости от номинальных значений параметров мощности источников питания семейства APS (1 или 2 кВт). Всё, что требуется, это подсоединить кабель питания и кабель управления между этими двумя устройствами для создания полностью интегрированного решения, как показано на рисунке 6. Как можно увидеть на рисунке 7, даже при измерении с разрешением по напряжению в 100 раз выше источник питания постоянного тока семейства APS и модуль рассеивания мощности N7909A обеспечивают непрерывность и стабильность характеристик напряжения во время переходов между подачей и потреблением мощности. При этом условия тестирования использовались те же, что и для системы имитации батарей (BSS) на базе отдельного источника питания постоянного тока и электронной нагрузки (см. рисунки 2 и 3).

Соединения на задней панели модуля рассеивания мощности N7909A



Соединения на задней панели источника питания постоянного тока семейства APS

Рисунок 6. Создание полностью интегрированного технического решения, использующего источник питания постоянного тока серии APS и модуль рассеивания мощности N7909A

## Улучшенные характеристики измерений источников питания семейства APS

Проведение точных измерений напряжения, силы тока, мощности, заряда и энергии является необходимой составной частью тестирования современных систем и устройств двунаправленного преобразования и рекуперации энергии. Эти измерения являются сложными и трудными для реализации в случае использования в качестве базы технического решения для тестирования характеристик подачи/потребления мощности отдельных источников питания постоянного тока и электронных нагрузок. Как минимум, отдельные значения силы тока, считываемые с источника питания постоянного тока и электронной нагрузки, должны регулироваться и сравниваться. По всей вероятности, источник питания постоянного тока и электронная нагрузка не будут иметь достаточных возможностей для измерения величины накопленного заряда и энергии, требуя добавления внешних устройств для регистрации и измерений, сопровождаемое соответствующим усложнением и проблемами.

Двухквadrантная интегрированная измерительная система источников питания постоянного тока семейства APS полностью дополняет их интегрированные функции подачи и потребления энергии. Проведение точных измерений напряжения, силы тока, мощности, заряда и энергии упрощается при использовании источников питания постоянного тока семейства APS. В качестве примера, рисунки 8 и 9 отображают процессы подачи силы тока, напряжения и энергии с последующим накоплением энергии в суперконденсаторе. Источник питания постоянного тока семейства APS и модуль рассеивания мощности N7909A используются для заряда и разряда суперконденсатора с одновременным измерением напряжения, силы тока и энергии.

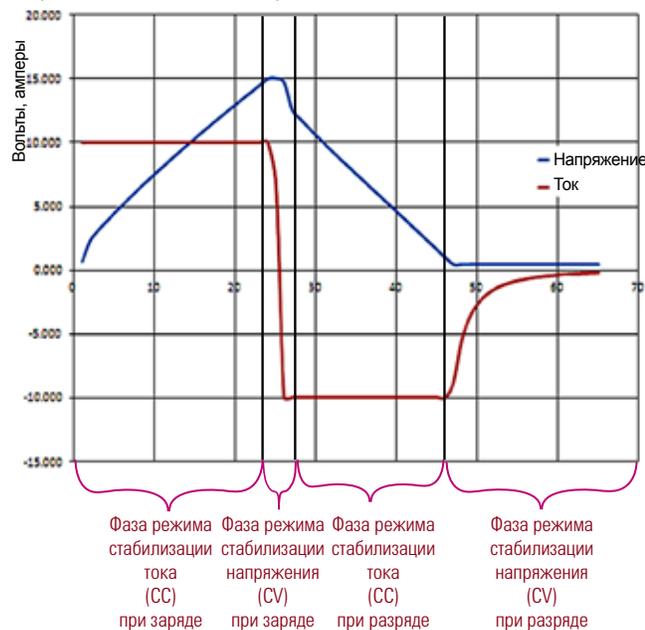


Рисунок 8. Графики напряжения и тока при заряде и разряде суперконденсатора

## Краткие выводы

Спутники, гибридные электромобили (ГЭМ), источники бесперебойного питания (ИБП), альтернативные источники энергии и ряд других современных систем электроснабжения основаны на системах и устройствах двунаправленного преобразования и рекуперации энергии. Многие из этих систем и устройств двунаправленного преобразования энергии работают, используя уровни мощности, измеряемые несколькими киловаттами. Соответственно, при разработке и производстве этих систем требуется обеспечить возможность подавать и потреблять уровни мощности в диапазоне от киловатта и выше, что часто представляет сложную задачу для специалистов по тестированию.

Наиболее общий подход заключается в использовании отдельного источника питания постоянного тока и электронной нагрузки для подачи и потребления мощности. Однако, на практике это



Рисунок 7. Непрерывная характеристика напряжения во время переходов между подачей и потреблением мощности, обеспечиваемая техническим решением на базе источника питания постоянного тока семейства APS и модуля рассеивания мощности N7909A.



Рисунок 9. Процесс накопления и расходования энергии суперконденсатором

приводит к ряду проблем и компромиссов, поскольку процессы подачи и потребления мощности являются независимыми. Только когда эти процессы полностью интегрированы в одной системе, можно обеспечить оптимальные и непрерывные характеристики. Источники питания постоянного тока серий N6900A/N7900A семейства APS имеют интегрированные функции подачи и потребления мощности, разработанные для тестирования современных систем и устройств двунаправленного преобразования и рекуперации энергии. В результате источники питания постоянного тока серий N6900A/ N7900A семейства APS преодолевают все проблемы создания технического решения подачи/потребления высоких уровней мощности, обеспечивая оптимальные характеристики, которые можно получить только с помощью интегрированного решения, освобождая ресурсы тестирования для работы над другими проблемами, которые требуется решить.

**myKeysight**

[myKeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

[www.keysight.com/find/mykeysight](http://www.keysight.com/find/mykeysight)

Персонализированное отображение интересующей вас информации



[www.lxistandard.org](http://www.lxistandard.org)

LXI является преемником шины GPIB. Построенная на базе стандарта локальной сети (LAN), LXI обеспечивает более высокое быстродействие и более эффективные возможности подключения. Компания Keysight является членом учредителем консорциума LXI.



Три Года Стандартной Заводской Гарантии

[www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty](http://www.keysight.com/find/ThreeYearWarranty)

Keysight обеспечивает высочайшее качество продукции и снижение общей стоимости владения. Единственный производитель контрольно- измерительного оборудования, который предлагает стандартную трехлетнюю гарантию на все свое оборудование.



Планы Технической Поддержки Keysight

[www.keysight.com/find/AssurancePlans](http://www.keysight.com/find/AssurancePlans)

До пяти лет поддержки без непредвиденных расходов гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.



[www.keysight.com/go/quality](http://www.keysight.com/go/quality)

Keysight Electronic Measurement Group  
DEKRA Certified ISO 9001:2008  
Quality Management System

Торговые партнёры Keysight

[www.keysight.com/find/channelpartners](http://www.keysight.com/find/channelpartners)

По этому адресу пользователь может получить лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерительной техники и широкая номенклатура выпускаемой продукции компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнёрами.

[www.keysight.com/find/APS](http://www.keysight.com/find/APS)

[www.keysight.com/find/N6700](http://www.keysight.com/find/N6700)

Российское отделение

**Keysight Technologies**

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973954

8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)

Факс: +7 (495) 7973902

e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)

[www.keysight.ru](http://www.keysight.ru)

Сервисный Центр

Keysight Technologies в России

115054, Москва, Космодамианская наб, 52, стр. 3

Тел.: +7 (495) 7973930

Факс: +7 (495) 7973901

e-mail: [tmo\\_russia@keysight.com](mailto:tmo_russia@keysight.com)

(BP-16-10-14)