

# Упрощение сложных измерений с помощью источника-измерителя (SMU)

Том Ольсен, (Tektronix)

В статье показано, как двухканальные источники-измерители могут ускорить тестирование преобразователей постоянного тока и полевых транзисторов.

В современных быстро развивающихся технологиях проектирования электронного оборудования сложность является реальным злом и должна избегаться любой ценой, в то время как простота олицетворяет собой всё хорошее и правильное. Возможно это слишком сильно сказано, но, когда речь заходит о контрольно-измерительных задачах, простота становится лучшим другом инженера, поскольку позволяет экономить время и снижает трудоёмкость, при этом позволяя получать более достоверные и точные результаты.

Одним из приборов, способных максимально упростить многие широко распространённые измерения, является источник-измеритель (SMU), объединяющий в себе функции источника напряжения и тока, цифрового мультиметра и электронной нагрузки. В результате получается измерительный прибор, более гибкий, чем каждый из входящих в его состав отдельных приборов, что упрощает схему измерения, сокращает число опера-

ций и, как следствие, снижает вероятность ошибки оператора.

Чтобы не тратить много времени на объяснения того, как SMU упрощает измерения, рассмотрим конкретный пример. Для этого сначала покажем, как с помощью SMU упростить измерение параметров преобразователя постоянного тока, а потом рассмотрим методы упрощения тестирования полевого транзистора. Как покажут эти примеры, работа с SMU требует меньшего числа операций и обеспечивает глубокое понимание результатов измерений.

## УПРОЩЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Как и для любых других устройств параметры преобразователей постоянного тока необходимо измерять в процессе их производства, а также для оценки пригодности их применения в проектируемой схеме. В стремлении создать изделие с меньшим энергопотреблением разработчики ищут способы повышения эффективности преоб-

разования энергии. В ходе определения электрических характеристик преобразователя постоянного тока приходится измерять множество параметров, и в том числе следующие:

- нестабильность по входу;
- нестабильность по нагрузке;
- погрешность входного и выходного напряжений;
- ток покоя;
- КПД;
- время включения;
- пульсации;
- динамические характеристики.

Обычно измерение электрических характеристик преобразователей постоянного тока включает подачу и измерение входного напряжения ( $U_{вх}$ ), измерение входного тока ( $I_{вх}$ ), измерение выходного напряжения ( $U_{вых}$ ) и выходного тока ( $I_{вых}$ ) на определённой нагрузке. По результатам этих измерений можно узнать КПД и другие параметры преобразователя. КПД является одним из важнейших показателей, особенно для устройств с автономным питанием, поскольку от него непосредственно зависит время работы устройства от батареи.

Традиционно для выполнения таких измерений используют пару цифровых мультиметров, источник питания и электронную нагрузку. Однако измерение параметров преобразователей постоянного тока можно упростить, заменив все эти приборы одним двухканальным SMU. SMU очень удобны для измерения вольт-амперных характеристик преобразователей постоянного тока, поскольку они могут подавать и измерять как ток, так и напряжение, а также могут выступать в роли электронной нагрузки. Обратите внимание, что для измерения всех параметров преобразователя постоянного тока, кроме SMU, обеспечивающего входное напряжение и ток нагрузки, понадобится ещё и осциллограф.

Применение одного прибора вместо нескольких упрощает схему измерения, программирование и синхронизацию, а также экономит место в стойке или в испытательном стенде. Как показано на рисунке 1, подключение одного канала SMU (канал 1) к входным контактам и

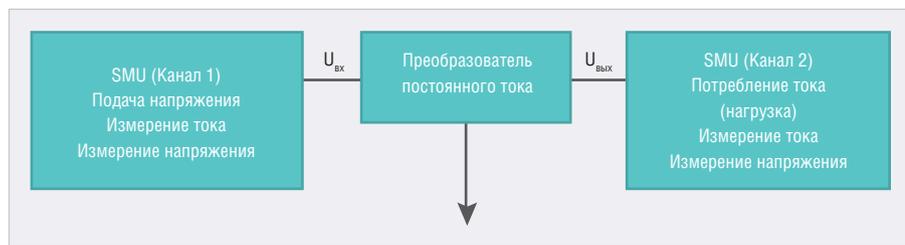


Рис. 1. Подключение SMU к входным и выходным контактам преобразователя

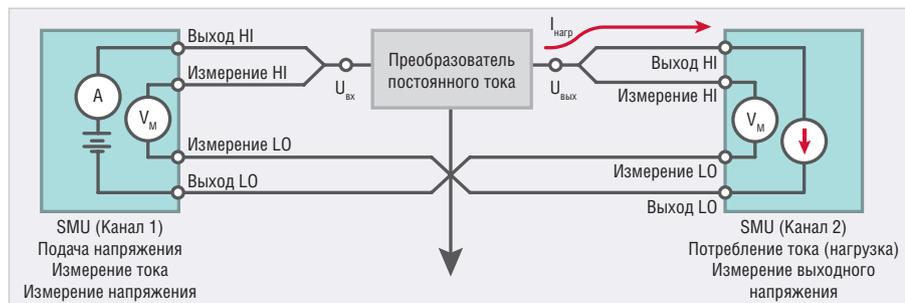


Рис. 2. Типовая схема измерения нестабильности по нагрузке с помощью двух каналов SMU

второго канала SMU (канал 2) к выходным контактам преобразователя постоянного тока заменяет несколько измерительных приборов.

Измерение параметров преобразователя постоянного тока включает регистрацию многих электрических величин. Но мы сосредоточимся на нестабильности по нагрузке и по входу, поскольку эти измерения являются самыми распространёнными.

### Нестабильность по нагрузке

Нестабильность по нагрузке характеризует способность преобразователя постоянного тока поддерживать заданное выходное напряжение при изменении тока нагрузки ( $I_{нагр}$ ) при постоянном входном напряжении  $U_{вх}$ . Обычно этот параметр измеряется во всём диапазоне токов нагрузки.

На рисунке 2 показана типовая схема измерения нестабильности по нагрузке с помощью двух каналов SMU. Канал 1 SMU подаёт входное напряжение и измеряет входной ток. Канал 2 SMU работает в режиме электронной нагрузки (является источником отрицательного тока). В этом режиме SMU работает в четвёртом квадранте и потребляет ток.

Каналы SMU настраиваются на работу с отдельным измерительным входом напряжения (четырёхпроводной режим). Четырёхпроводной режим подключения компенсирует падение напряжения на соединительных проводах, которое, в противном случае, отрицательно сказалось бы на точности измерений. В четырёхпроводном режиме напряжение подаётся по одной паре проводов (Выход HI и Выход LO), а измеряется по другой паре проводов (Измерение HI и Измерение LO). Измерительные провода следует подключать как можно ближе к тестируемому устройству, что минимизирует влияние сопротивления проводов на результаты измерения.

На рисунке 3 показаны результаты типового измерения нестабильности по нагрузке, в ходе которого постоянное выходное напряжение тестируемого устройства было установлено на 3,6 В. Канал 1 SMU настраивался так, чтобы подавать на вход преобразователя напряжение 5 В (номинальное значение). Канал 2 SMU настраивался так, чтобы изменять ток нагрузки от 0 до 1 А и измерять результирующее выходное напряжение. Измерения выполнялись автоматически под управлением спе-

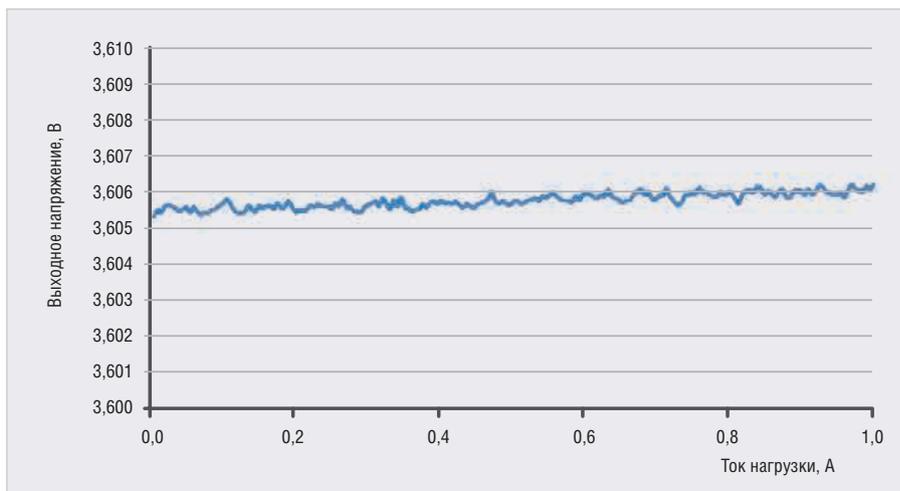


Рис. 3. Результаты типового измерения нестабильности по нагрузке

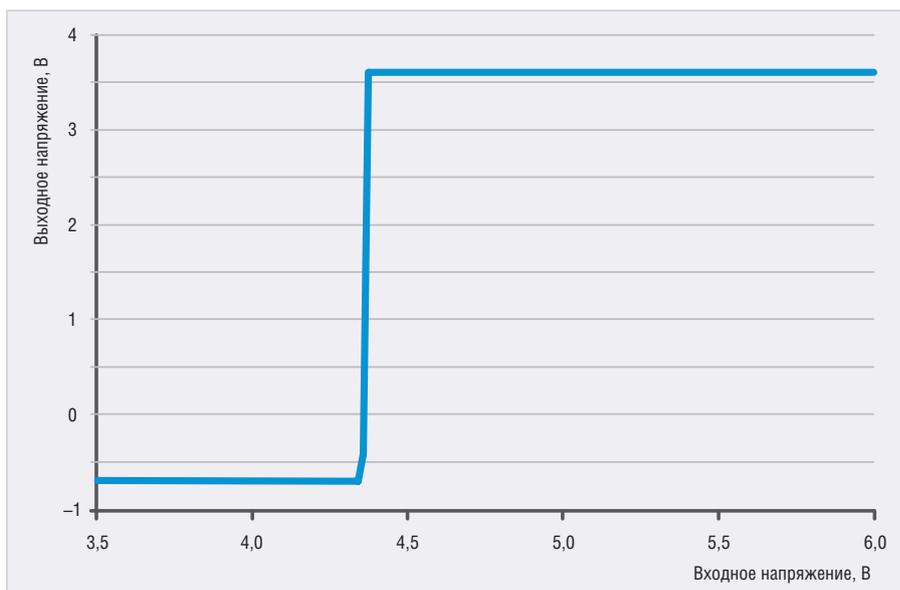


Рис. 4. Результаты типового измерения нестабильности по входу

циальной программы. Значение нестабильности по нагрузке легко рассчитывается по измеренным значениям тока и напряжения.

### Нестабильность по входу

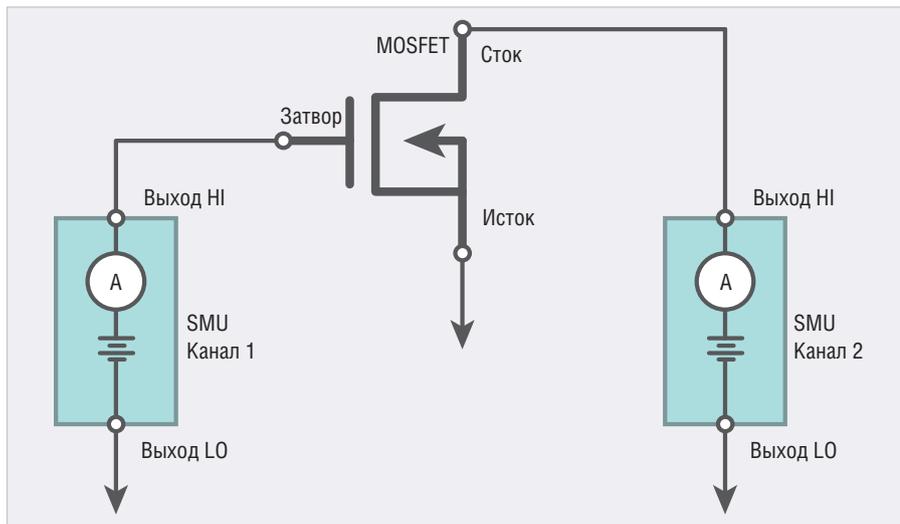
Нестабильность по входу характеризует способность преобразователя постоянного тока поддерживать заданное выходное напряжение при изменении входного напряжения. Выходное напряжение должно оставаться постоянным в пределах нескольких милливольт при изменении входного напряжения в указанном диапазоне. Для измерения нестабильности по входу оба канала SMU подключаются к преобразователю постоянного тока так же, как при измерении нестабильности по нагрузке.

Однако в ходе этого измерения входное напряжение меняется в заданном диапазоне и при этом измеряется

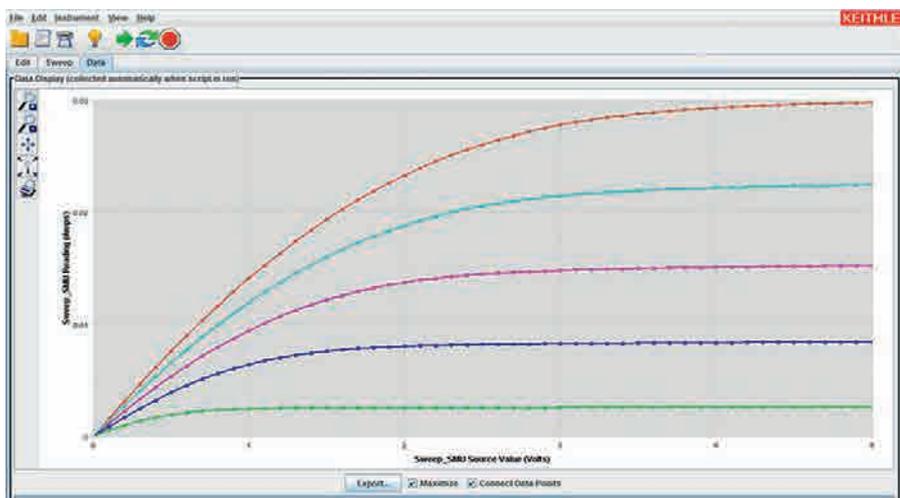
результирующее выходное напряжение. Обычно ток нагрузки устанавливается на 0 А. На рисунке 4 показаны результаты типового измерения нестабильности по входу. Один канал SMU (первый) настроен так, чтобы менять напряжение на входе тестируемого устройства, а другой канал SMU (второй) настроен на измерение выходного напряжения. Затем нестабильность по входу можно рассчитать по измеренным значениям входного и выходного напряжения.

### УПРОЩЕНИЕ ТЕСТИРОВАНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА С ПОМОЩЬЮ SMU

Измерение вольт-амперных характеристик полевого транзистора используется для того, чтобы подтвердить его соответствие требованиям спецификаций и пригодность к применению в целевых приложениях. Измеряемые



**Рис. 5. Схема измерения вольт-амперных характеристик транзистора MOSFET на постоянном токе с помощью двухканального SMU**



**Рис. 6. Семейство выходных характеристик транзистора MOSFET, полученное с помощью двухканального SMU**

параметры могут включать ток утечки затвора, напряжение пробоя, пороговое напряжение, передаточные характеристики, ток стока, сопротивление в открытом состоянии и т.п.

Тестирование полевого транзистора зачастую включает программирование и синхронизацию нескольких измерительных приборов, в том числе чувствительного амперметра и нескольких источников питания, что может отнимать много времени. И хотя готовые системы для измерения параметров полупроводниковых приборов решают проблему интеграции, стоимость систем такого типа составляет обычно десятки тысяч долларов.

Альтернативный подход заключается в использовании SMU. Число SMU, необходимых для проведения теста, зависит обычно от числа выводов полевого транзистора, на которые надо подавать

питание и на которых надо выполнять измерения.

В большинстве случаев полевой транзистор представляет собой устройство, работающее с основными носителями заряда, в котором протекающий ток меняется под воздействием электрического поля. Полевой транзистор, как правило, имеет три вывода: исток, сток и затвор. Приложенное к затвору напряжение ( $U_g$ ) управляет током, протекающим от истока ( $I_{in}$ ) к стоку ( $I_c$ ).

Существует множество структур полевых транзисторов, включая MOSFET (металл-окисел-полупроводник), MESFET (металл-полупроводник), JFET (полевой транзистор с управляющим p-n-переходом), OFET (органический полевой транзистор), GNR-FET (транзистор с графеновой нанолентой) и CNTFET (транзистор с углеродной нанотрубкой). Все эти транзисто-

ры отличаются конструктивно и типом канала.

Вольт-амперные характеристики полевого транзистора можно использовать для извлечения многих параметров устройства, для изучения влияния технологий изготовления и параметров технологических процессов и для определения качества контактов. На рисунке 5 показана схема измерения вольт-амперных характеристик транзистора MOSFET на постоянном токе с помощью двухканального SMU (каналы 1 и 2). Здесь клемма Выход HI канала 1 подключена к затвору транзистора, клемма Выход HI канала 2 подключена к стоку. Исток транзистора подключён к клеммам Выход LO обоих каналов SMU или к третьему каналу SMU, если нужно подавать и измерять напряжение на всех трёх выводах транзистора.

После подключения транзистора к SMU нужно настроить управляющую программу (как правило, встроенную в SMU) на выполнение автоматических измерений. Подключите прибор к компьютеру кабелем Ethernet, введите IP-адрес SMU в адресную строку любого браузера, после чего откроется внутренняя веб-страница прибора. С этой страницы пользователь может запустить встроенную программу и настроить нужные тесты, которые можно сохранить для дальнейшего использования.

Одним из измерений, часто выполняемых для транзисторов MOSFET, является получение семейства выходных характеристик ( $U_{ci}-I_c$ ). В ходе этого измерения канал 1 SMU ступеньками меняет напряжение на затворе ( $U_g$ ), а канал 2 SMU свипирует напряжение на стоке и измеряет результирующий ток стока ( $I_c$ ). После настройки двух каналов SMU на выполнение этого теста, данные можно получать и выводить в виде графика на экран в режиме реального времени.

На рисунке 6 показано семейство выходных характеристик транзистора MOSFET, полученное с помощью двухканального SMU, оптимизированного для измерения малых токов. После экспорта в файл формата CSV эти данные можно загружать в электронные таблицы для дальнейшего анализа или для преобразования в таблицу.

Другим широко распространённым измерением полевого транзистора, которое можно выполнить по той же схеме, является построение зависимости тока стока ( $I_c$ ) от напряжения на

затворе ( $U_g$ ). В ходе этого измерения выполняется свипирование напряжения на затворе и измеряется результирующий ток стока при постоянном напряжении на стоке.

На рисунке 7 показана результирующая кривая  $I_c-U_g$ , полученная при постоянном напряжении на стоке. Однако в этом случае полученные данные были экспортированы в виде файла и нанесены на график в полулогарифмическом масштабе. Этот тест можно изменить так, чтобы напряжение на стоке менялось шагами, а напряжение на затворе свипировалось. Данные  $I_c-U_g$  отображают несколько декад тока стока, измеренного с помощью SMU (от  $10^{-12}$  до  $10^{-2}$  А).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сложность измерений отрицательно сказывается на эффективности и продуктивности работы инженера. Как показано в статье, источники-измерители, объединяющие в себе функции нескольких приборов, могут упростить процедуры тестирования, экономя время и позволяя получать более точные и воспроизводимые результаты.

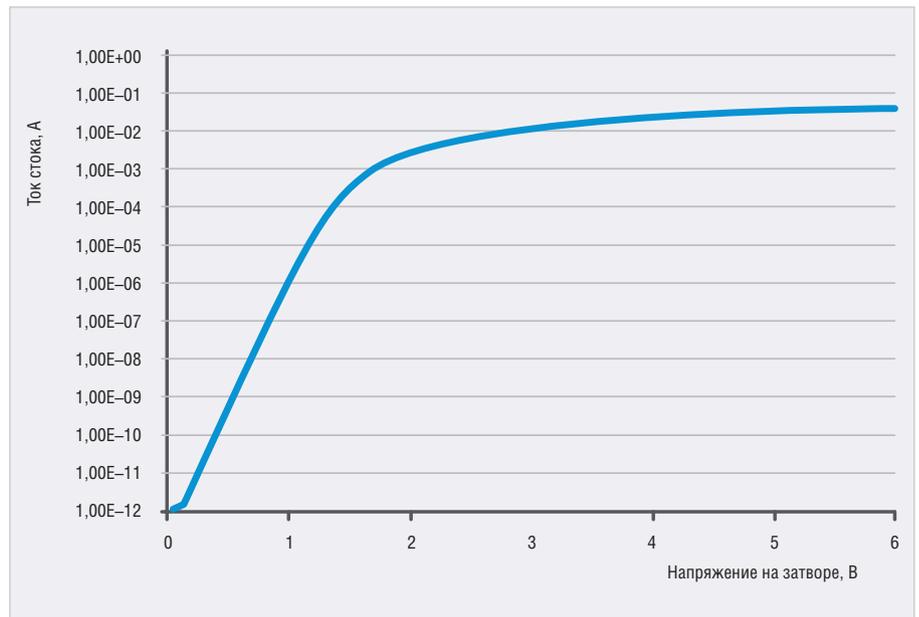


Рис. 7. Зависимость тока стока от напряжения на затворе транзистора MOSFET

В ходе измерений характеристик преобразователей постоянного тока один двухканальный SMU заменяет пару цифровых мультиметров, источник питания и электронную нагрузку. В ходе измерений параметров полевого транзистора SMU представляет

собой более простую и недорогую альтернативу схемам измерения, состоящим из чувствительного амперметра и нескольких источников напряжения или из специализированной системы для измерения характеристик полупроводниковых приборов. ©



**Fastwel**

Российская электроника  
для ответственных  
применений

**CompactPCI 2.0, 2.16, 2.30, Serial**

**Скорость и надежность современных технологий**








CPC503



CPC508



CPC510



CPC512



ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР

(495) 234-0636  
INFO@PROSOFT.RU

WWW.PROSOFT.RU

