

# ИЗМЕРЕНИЕ КПД СИЛОВЫХ СХЕМ

Мы начинаем цикл статей, в которых инженеры делятся оригинальными схемотехническими решениями. В данной подборке описан метод измерения КПД силовой схемы без применения мощного источника питания и эквивалентной нагрузки, а также приведены схемы точного измерения тока и удвоителя напряжения без использования катушки индуктивности.

Эффективность или КПД силовой схемы [1] — важнейший параметр для оценки производительности устройства и подбора охлаждающей системы. На рисунке 1 изображен традиционный способ расчета КПД. Измеряется мощность на входе  $P_{in}$  и выходе  $P_{out}$ , после чего находится их отношение:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\%.$$

Измеренная входная мощность равна выходной мощности плюс мощность потерь.

Для измерения КПД мощных схем, которые питают такие устройства как электродвигатели, генераторы или промышленные ЭВМ, требуется мощный источник и эквивалентная нагрузка. При единичных измерениях это дорого и неоправданно. В этой статье предлагается другой подход (см. рис. 2), при котором источник должен иметь выходную мощность, равную мощности потерь. Выходные выводы закорочены.

Схема управления вырабатывает реактивную мощность и поддерживает требуемую амплитуду и частоту входного и выходного токов. Биполярные транзисторы с изолированным затвором и магнитные элементы контролируют уровень потерь в системе, который есть функция амплитуды и частоты входного и выходного токов. Для определения требуемого входного и выходного токов необходимо рассчитать коэффициент мощности схемы, обратную ЭДС двигателя и напряжение питания системы.

$$I_{ROUT} = I_{ROUT\_RE} + jI_{ROUT\_IM} = \frac{P_{OUT}}{\sqrt{3}V_{BEMF}};$$

$$I_{RIN} = I_{RIN\_RE} + jI_{RIN\_IM} = \frac{P_{RIN}}{\sqrt{3}V_{GRID}} = \frac{P_{OUT}}{\sqrt{3}V_{GRID} \cdot \eta_E} \quad (1)$$

где  $I_{ROUT}$  — требуемый выходной ток;  $I_{RIN}$  — требуемый входной ток;  $P_{RIN}$  — требуемая входная мощность;  $P_{OUT}$  — выходная мощность в условиях теста;  $V_{BEMF}$  — обратная ЭДС двигателя;  $V_{GRID}$  — линейное напряжение;  $\eta_E$  — ожидаемый КПД схемы.

Если входной ток равен  $I_{RIN}$ , а выходной  $I_{ROUT}$ , измеренная действительная входная мощность будет близка к мощ-

ности потерь  $P_{LOSS}$  при данном уровне выходной мощности  $P_{OUT}$ . Таким образом, КПД вычисляется следующим образом:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} \cdot 100\%.$$

Если полученное значение не совпадает с ожидаемым  $\eta_E$  то в уравнение (1) надо подставить измеренный КПД  $\eta$ , и повторять измерения до тех пор, пока значения  $\eta$  и  $\eta_E$  не совпадут.

Этот метод используется в компании Calnetix для оценки КПД схем с выходной мощностью 125 кВт. Как показали сравнения, при традиционном методе оценки получается практически такой же результат.

Многие мощные силовые системы имеют высокий КПД, т.е. активная составляющая тока намного больше реактивной. Для уменьшения фазового тока  $I_{RIN}$  можно подключить вторую такую же схему, как показано на рисунке 3. При этом входной реактивный ток, создаваемый измерительной установкой, смещается. За счет уравнительной мощности источник питания должен обеспечивать только мощность потерь, а не полную мощность силовой схемы. Входной ток во второй схеме (см. рис. 3) имеет вид:

$$I_{RIN} = I_{RIN\_RE} + jI_{RIN\_IM}.$$

При токе на входе первой схемы  $I_{RIN1} \approx I_{RIN\_RE} - jI_{RIN\_IM}$ , ток источника равен

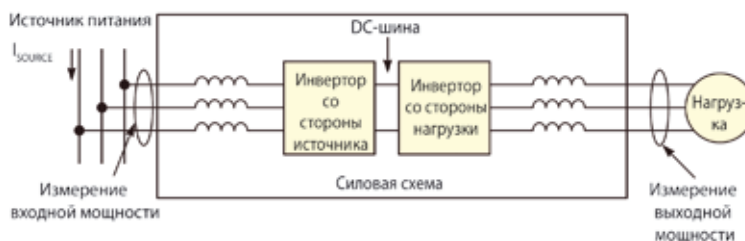


Рис. 1. Классический способ измерения КПД

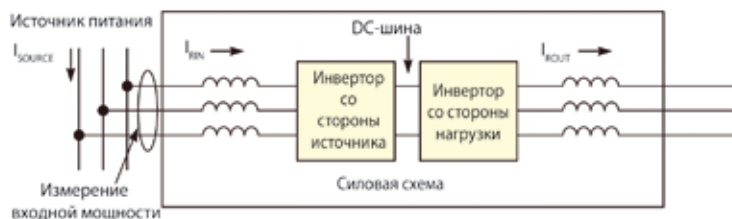


Рис. 2. Предлагаемый способ измерения КПД

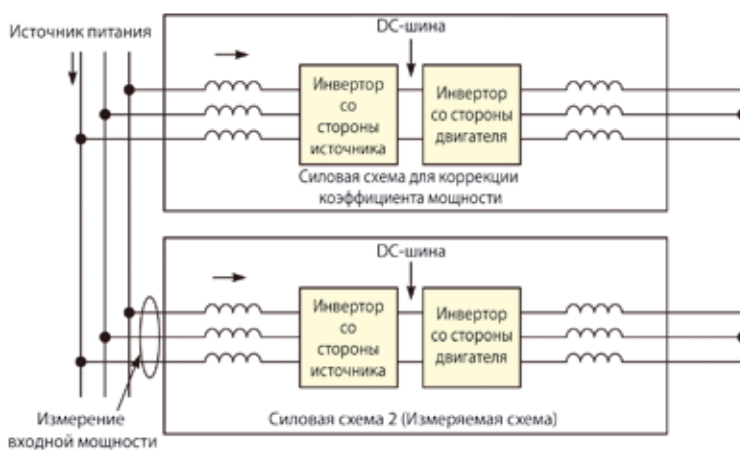


Рис. 3. Схема с компенсацией

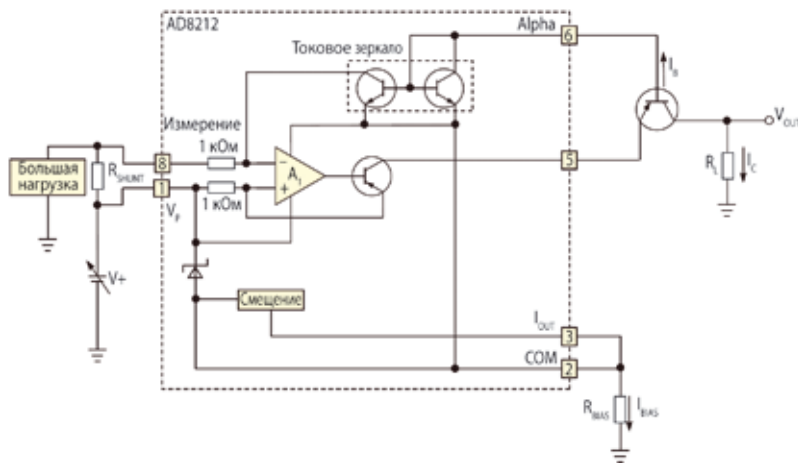


Рис. 4. Принципиальная схема устройства

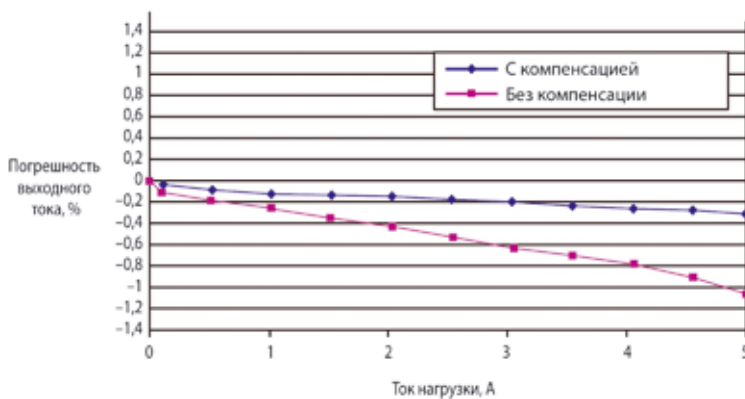


Рис. 5. Погрешность выходного тока

$I_{SOURCE} = I_{RIN1} + I_{RIN} \approx IR_{IN\_RE} + IR_{IN\_RE} + j(I_{RIN\_IM} - I_{RIN\_IM}) = 2I_{RIN\_RE}$ . В схеме используется входной ток от источника с тем, чтобы избежать потерь в обеих схемах и упростить измерительную установку.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ПОГРЕШНОСТИ

Иногда нужно измерить большой ток нагрузки (несколько ампер) при существенном синфазном напряжении (например, 500 В). Это можно сделать с помощью измерителя AD8212, предназначенного для использования в высокоточных катушках или схемах управления двигателем [2].

На рисунке 4 приведена измерительная схема. С помощью внешнего резистора и ррр-транзистора выходной ток AD8212 преобразуется в напряжение, пропорциональное входному дифференциальному сигналу. Биполярный транзистор расширяет диапазон синфазного напряжения до нескольких сотен вольт, а резистор  $R_{BIAS}$  используется для ограничения напряжения. Внутренняя схема смещения и регулятор на 5 В обеспечивают стабильное выходное напряжение на всем температурном диапазоне. Это снимает необходимость установки дополнительных внешних элементов. Падение напряжения на транзисторе, включенном по

схеме с общим эмиттером, является синфазным.

Из-за ненулевого тока базы  $I_B$  уменьшается выходной ток AD8212, вследствие чего возникает погрешность выходного напряжения. Этот эффект компенсируется с помощью токового зеркала, которое пропускает  $I_B$  в цепь обратной связи усилителя  $A_1$ .

Внутренний регулятор опорного напряжения устанавливает напряжение на выводе COM на 5 В ниже напряжения питания, таким образом, схема измерителя питается от 5 В. Сопротивление  $R_{BIAS}$  подбирается так, чтобы ток был достаточен для включения и работы регулятора. Для работы на высоком напряжении ток  $I_{BIAS}$  следует установить на уровне 200 мкА...1 мА. Нижняя граница обеспечивает включение схемы смещения, а верхняя зависит от типа используемого устройства. Например, при напряжении питания 500 В и  $R_{BIAS} = 1000 \text{ кОм}$ ,  $I_{BIAS} = (V - 5 \text{ В})/R_{BIAS} = 495 \text{ В}/1000 \text{ кОм} = 495 \text{ мкА}$ .

Выходное напряжение схемы практически совпадает с напряжением на выводе COM плюс два  $V_{BE}$ , т.е.  $V_{OUT} \approx V + (-5 \text{ В}) + 2V_{BE}$ . Вместо PNP-транзистора можно использовать полевой, тогда погрешность, вносимая током базы, исчезнет, однако увеличится стоимость.

Погрешность выходного тока в зависимости от тока в нагрузке показана на рисунке 5. Видно, что использование схемы компенсации позволяет уменьшить суммарную погрешность с 1 до 0,4%. Сопротивление  $R_L$  должно быть подобрано в соответствии с диапазоном входного напряжения АЦП. Так, если максимальное дифференциальное напряжение равно 500 мВ, то максимальный выходной ток равен 500 мкА, и максимальное напряжение на входе АЦП составит 5 В при сопротивлении нагрузки 10 кОм.

#### УДВОИТЕЛЬ НАПЯЖЕНИЯ С КПД = 96%

Удвоитель напряжения, принципиальная схема которого приведена на рисунке 6, преобразует постоянное напряжение 2,5 В в 5 В или 1,8 В в 3,3 В. Достоинство данной схемы в том, что в ней не используется катушка индуктивности [3].

Конденсатор С заряжается через ключи  $S_B$ . Пока конденсатор заряжается, ключи  $S_A$  разомкнуты. В процессе разряда наоборот разомкнуты ключи  $S_B$ , а конденсатор С становится включенным между входным напряжением  $V_S$  и конденсатором  $C_{OUT}$  на выходе схемы. Напряжение на выходе близко к  $2V_S$ .

Переключение ключей происходит с частотой  $f$ , задаваемой генератором IC2. Рабочий цикл составляет примерно 50%, но это не критично. Две половины коммутатора ADG888 (Analog Devices) работают независимо. Резистор  $R_P$  номиналом 10 Ом ограничивает пусковой ток, защищающий ключи  $S_{1,2B}$  от перегрузки по току, которая может возникнуть при включении питания.

Операционный усилитель  $IC_{3A}$  работает как компаратор. Когда выходной сигнал  $IC_{3A}$  высок, ключи  $S_3$  и  $S_4$  замыкаются. Компаратор работает как логометр, поскольку опорное напряжение на инвертирующем входе равно напряжению питания  $V_{IN}$ . Такое подключение возможно, поскольку размах выходного напряжения AD8617 равен напряжению питания. Схема  $IC_{3A}$  обеспечивает защиту нагрузки от перенапряжения.

Во время легкого запуска напряжение в нагрузке не может опуститься ниже установленного порога. Сопротивление  $R_L$ , необходимое для срабатывания защитной схемы, определяется выражением:

$$R_L \leq m^2 \cdot \left( \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \cdot R_p$$

где  $m = V_{OUT}/V_{IN}$ ,  $\alpha$  — доля  $V_{OUT}$ , при которой режим легкого запуска отключается. Для  $m = 2$ ,  $\alpha = 0,8$  и  $R_p = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_L = 160 \text{ Ом}$ . Таким образом, если до включения питания подключить нагрузки с сопротивлением менее 160 Ом, в схеме возникнут перегрузки.

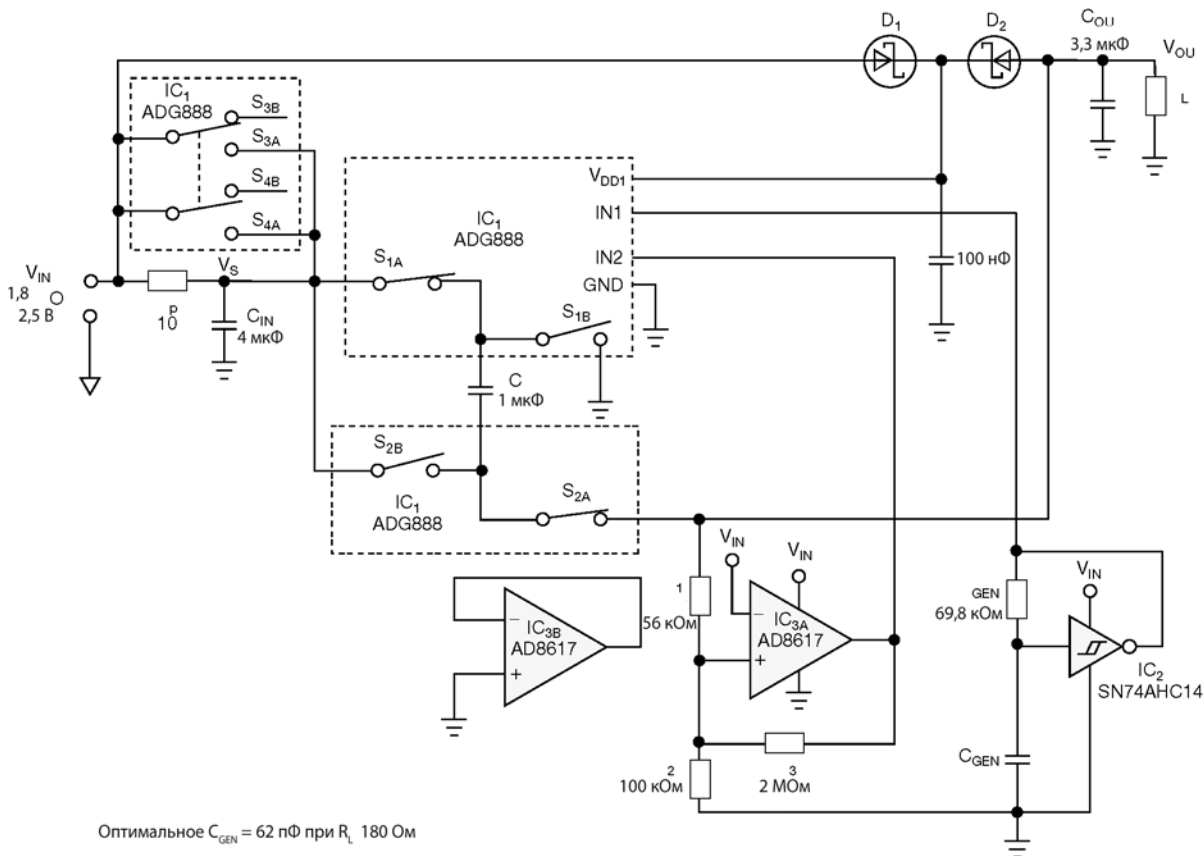


Рис. 6. Принципиальная схема удвоителя

Выходное напряжение  $IC_1$  переключается, когда входное напряжение равно  $2V_{IN}$ . При этом напряжение на выводе  $V_{DD1}$ , задаваемое аналоговым ключом ИЛИ из диодов Шоттки  $D_1$  и  $D_2$ , остается неизменным. Напряжение на выводе  $V_{DD1}$  равно входному, если оно больше выходного, или наоборот.

Схема была испытана при следующих параметрах: входное напряжение

$2,386$  В,  $R_L = 178,46$  Ом, частота  $f = 200$  кГц, напряжение питания  $2,377$  В, ток питания  $51,285$  мА, выходное напряжение  $4,588$  В. В результате  $m = 1,929$  и КПД =  $96,39\%$ .

Согласно измерениям, КПД превышает  $96\%$  на частотах  $150...350$  кГц. Если ключи, шунтирующие резистор  $R_p$  замкнуты, падение напряжения на них равно  $9$  мВ. Отсюда следует, что сопротивление параллельно включен-

ных ключей в замкнутом состоянии составляет примерно  $0,175$  Ом.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Zheng L. Methods measure power electronics' efficiency//EDN, 29 июля 2010.
- 2 Tran u Mullins. Current monitor compensates for errors//EDN, 9 сентября 2010.
- 3 Štofka M. DC-voltage doubler reaches 96% power efficiency//EDN, 15 июля 2010.

## НОВОСТИ СЕТЕЙ И ИНТЕРФЕЙСОВ

**| ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕСПРОВОДНАЯ СЕТЬ. ПОСТУЛАТЫ 6 И 7 | 6. Проводите расчет параметров.** Несмотря на распространенное мнение, вычислить радиус распространения сигнала не так сложно.

Условие успешного приема сигнала:

Передаваемая мощность + усиление передающей антенны – потери в канале – потери в кабеле + усиление принимающей антенны – запас по замиранию  $10$  дБ > чувствительности приемника по входу (или шумовой порог, см. п. 4)

Большинство слагаемых приведены в технической документации производителя. Измерить необходимо только потери в канале и шумовой порог (для случая сильной зашумленности).

**7. Расположение антенны.** Антенны увеличивают эффективную мощность с помощью фокусирования излучаемой энергии в нужном направлении. При этом в других направлениях излучаемая мощность уменьшается.

За последнее время количество беспроводных устройств резко выросло, и каждый разработчик выбирает лучшее место для установки антенны. Зачастую в одном и том же месте может быть несколько антенн. Даже если они работают на разных частотах, их лучше разнести как можно дальше друг от друга. Многие антенны излучают в горизонтальном направлении, поэтому предпочтительно вертикальное разделение. В идеале требуется разнести антенны как минимум на две длины волны. Для  $900$  МГц это  $0,66$  м, а для  $2,4$  ГГц —  $0,25$  м.

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

**26-28 октября 2010г.**  
**Москва, Экспоцентр**

**РОССИЙСКАЯ**  
**НЕДЕЛЯ**  
**ЭЛЕКТРОНИКИ**



**ChipEXPO - 2010**

**ПРОМЫШЛЕННАЯ  
И ВСТРАИВАЕМАЯ  
ЭЛЕКТРОНИКА 2010**

**ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОНИКИ**

**MOBILE &  
WIRELESS**

**DISPLAY 2010**  
26-28 октября  
МОСКВА

**ДРУГАЯ ЭЛЕКТРОНИКА**  
Двернисаж удивительных изделий

Пригласительные билеты:

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