

# Мониторы тока

Михаил ПУШКАРЕВ

**Основная функция монитора тока — преобразование падения напряжения на токовом шунте в подходящий для дальнейшего преобразования электрический сигнал: ток, напряжение или цифровой (импульсный) сигнал.**

Если в общем случае безразлично, в каком из полюсов нагрузки измеряется потребляемый ею ток, то в конкретной электронной схеме место измерения потребляемого тока может иметь как определенные достоинства, так и недостатки. Кремниевые биполярные *n-p-n*-транзисторы и полевые транзисторы с *n*-каналом имеют определенные преимущества в производстве и применении по сравнению с транзисторами *p-n-p*- и *p*-канальными. Вследствие этого подавляющее большинство электронных схем строятся с минусовым общим «земляным» проводом.

Рассмотрим два варианта измерения тока нагрузки.

## Измерение тока в отрицательном полюсе нагрузки

Преимущества:

- простая схемотехника;
- низкое входное синфазное напряжение;
- входной и выходной сигнал имеют общую «землю»;
- простота реализации с одним источником питания.

Недостатки:

- нагрузка не имеет непосредственной связи с «землей»;
- отсутствует возможность коммутации нагрузки ключом в отрицательном полюсе;
- возможность выхода из строя измерительной схемы при коротком замыкании в нагрузке.

## Измерение тока в положительном полюсе нагрузки

Достоинства:

- нагрузка заземлена;
- обнаруживается короткое замыкание в нагрузке;
- сохраняется целостность системной «земли» при измерении тока в отдельных функциональных узлах схемы.

Недостатки:

- высокое синфазное входное напряжение (зачастую очень высокое);
- необходимость смещения выходного сигнала до уровня, приемлемого для последующей обработки в системе (привязка к «земле»);

- сложно обеспечить высокую точность измерений при реализации схемы монитора тока на дискретных компонентах.

За время, прошедшее с публикации первой статьи [1], в производстве микросхем мониторов тока произошли заметные изменения. В результате прошедших слияний и поглощений, появления новых заинтересованных компаний изменился список производителей этой продукции. Существенно увеличилась номенклатура микросхем, в том числе за счет микросхем автомобильного класса (*automotive grade*). Как правило, микросхемы этого класса имеют расширенный диапазон рабочих температур, вплоть до  $-55...+150$  °С. При этом характеристики обычно специфицированы для температурного диапазона  $-40...+125$  °С. Такая позиция объяснима: контроль характеристик при крайних рабочих температурах сложная и дорогостоящая процедура. Исключение представляют MCP6C02, MCP6C02 от Microchip, параметры которых нормируются в диапазоне температур  $-40...+150$  °С.

Специальных микросхем для измерения тока в отрицательном полюсе нагрузки ожидаемо не появилось, поскольку задача достаточно просто решается применением инструментальных и дифференциальных усилителей. Характеристики некоторых дифференциальных усилителей, в рекомендациях по применению которых определенно указана возможность использования в схеме монитора тока, приведены в таблице 1.

Микросхемы для измерения тока в положительном полюсе нагрузки постоянно совершенствуются с улучшением характеристик как давно выпускаемых микросхем, так и вновь освоенных в производстве. Следует отметить, что широкий диапазон входных синфазных напряжений, вплоть до небольших отрицательных значений, в некоторых моделях позволяет использовать их и для измерения тока в отрицательном полюсе нагрузки.

Номенклатура микросхем с токовым выходом (табл. 2) невелика. Минималистская внутренняя схема обеспечивает очень малый потребляемый ток, что создает преимущество в приборах с батарейным питанием.

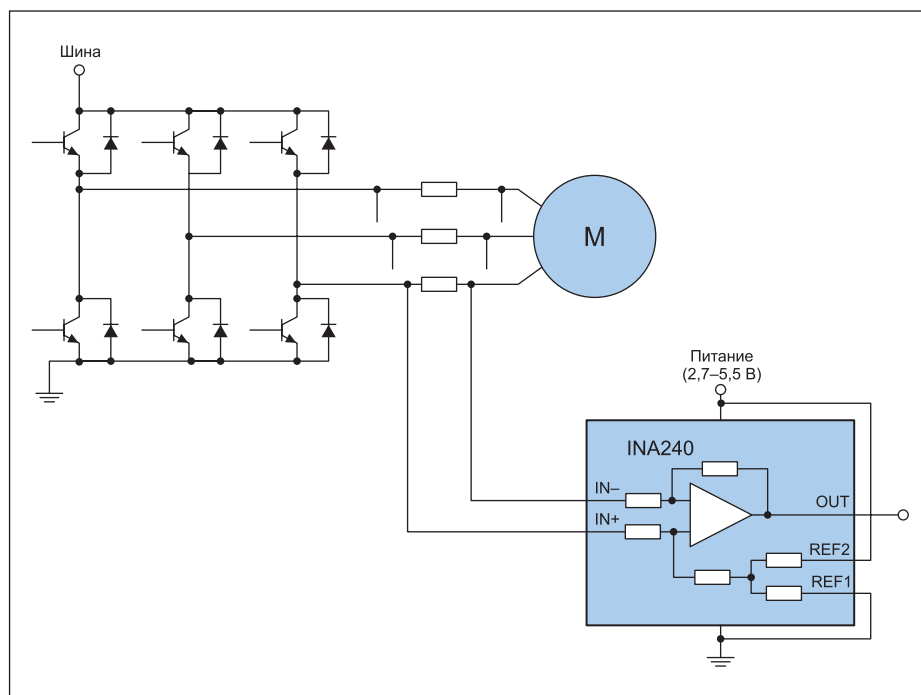


Рис. 1. Измерение фазного тока электродвигателя с INA240

Таблица 1. Дифференциальные усилители

Прибор	Диапазон входного напряжения, мВ	Синфазное входное напряжение, В	Коэффициент передачи G, В/В	Погрешность коэффициента передачи при +25 °С, % (макс.)	Температурный дрейф коэффициента передачи ррн./°С (макс.)	Погрешность коэффициента передачи в рабочем диапазоне температур, % (макс.)	Полоса пропускания –3 дБ (тип.), кГц	Напряжение питания V <sub>S</sub> , В	Ток потребления, мА (макс.)	Рабочий диапазон температур, °С	Корпус	Дополнительные функции			
												Переключаемое усиление	Выход для организации фильтра	Установка усиления внешним резистором	Спящий режим
<b>Analog Devices</b>															
AD629		±270	1	0,05	10		500	±(2,5–18)	1	–40...+85	DIP(8), SO(8)				
AD8202	500	–6...+28	20	0,3	20		30	3,5–12	1	–40...+125	MSOP(8), SO(8)		+		
AD8203	700	–6...+30	14	0,3	20		40	3,5–12	1	–40...+125	MSOP(8), SO(8)		+		
AD8205	100	–2...+65	50			1,2	50	4,5–5,5	2	–40...+150	SO(8)				
AD8206	250	–2...+65	20			1,3	100	4,5–5,5	2	–40...+150	SO(8)				
AD8207	250	–4...+65	20			0,3	150	4,5–5,5	2	–40...+125	SO(8)				
AD8208	250	–2...+45	20			0,3	70	4,5–5,5	2,7	–40...+150	MSOP(8), SO(8)				
AD8209	250	–2...+45	14			0,3	80	4,5–5,5	2,7	–40...+150	MSOP(8)				
AD8209A	250	–2...+50	14			0,15	100	4,5–5,5	2,7	–40...+125	MSOP(8)				
AD8216	250	–4...+65	3	0,25	15		3000	4,5–5,5	2	–40...+125	SO(8)				
AD8276		–2...+2	1	0,02	5		550	2–36	0,25	–40...+85	MSOP(8), SO(8)				
LT1990		–30...+80	1; 10	0,8 (G = 10)		0,98 (G = 10)	6,5 (G = 10)	2,7–36	0,2	–40...+125	SO(8)	+			
MAX4198	100	0–VS	1	0,1	6		175	2,7–5,5	0,055	–40...+85	SO(8), μMAX(8)				+
MAX4199	100	0–VS	10	0,1	6		45	2,7–5,5	0,055	–40...+85	SO(8), μMAX(8)				+
<b>Texas Instruments</b>															
INA145		0–(2VS – 2)	1–1000				50 (G = 10)	4,5–36	0,7	–55...+125	SO(8)				+
INA147		±200	1	0,05	10		200	±(5–18)	2	–55...+125	DIP(8), SO(8), TO-99				
INA148		0–200	1	0,075	10		100	2,7–36	0,3	–55...+125	SO(8)				
INA152		0–(2VS – 2)	1	0,1	10		800	2,7–20	0,65	–55...+125	MSOP(8)				

Таблица 2. Микросхемы мониторов тока с токовым выходом

Прибор	Количество схем в корпусе	Диапазон входного напряжения, мВ	Синфазное входное напряжение, В	Коэффициент передачи, мА/В	Погрешность коэффициента передачи при +25 °С, % (макс.)	Погрешность коэффициента передачи в рабочем диапазоне температур, % (макс.)	Полоса пропускания –3 дБ (тип.), кГц	Напряжение питания, В	Ток потребления, мкА (макс.)	Рабочий диапазон температур, °С	Корпус	Дополнительные функции		
												Установка коэффициента передачи внешними резисторами	Двухнаправленный режим	Выход сигнализации
<b>Analog Devices</b>														
AD8212	1	500	7–65	1		1	1000	7–65	720	–40...+125	MSOP(8)			
LT6105	1	110	–0,3...+44				100	2,85–36	350	–40...+125	MSOP(8), DFN(6)	+		
LT6106	1	120	2,7–36				200	2,7–36	120	–40...+125	TSOT-23(5)	+		
LT6107	1	500	2,7–36				200	2,7–36	120	–55...+150	TSOT-23(5)	+		
LT6115	1	500	5–100				200	5–100	450	–40...+125	MSOP(12)	+		
MAX4172	1	150	0–32	10	2	3	800	3–32	1600	–40...+105	μMAX(8), SO(8)			+
MAX9928	1	±50	–0,1...+28	5	1	2,5	150	2,7–5,5	30	–40...+125	μMAX(8), UCSP(6)			+
MAX9934	1	±30	–0,1...+5,5	5; 25	0,25	2	1,5; 5	2,5–3,6	230	–40...+125	μMAX(8), UCSP(6)			+
<b>Diodes</b>														
ZXCT1008	1	500	2,5–20	10	2,5		2000	2,5–20	15	–40...+125	SOT-23			
ZXCT1009	1	1000	2,5–20	10	2,5		2000	2,5–20	15	–40...+85	SOT-23, SM(8)			
ZXCT1010	1	1000	2,5–20	10	2,5		2000	2,5–20	18	–40...+85	SOT23(5)			
ZXCT1011	1	500	2,5–20		3		1500	2,5–20	15	–40...+125	SOT23(5)	+		
ZXCT1012	1	2500	2,5–20	10	3		2000	2,5–20	15	–40...+85	SOT23(5)			
ZXCT1020	1	1500	2,5–20	10–100	3		2000	2,5–20	35	–40...+125	SOT23(5)	+		
ZXCT1082	1	500	2,7–60	0,2	1	2		2,7–60	6	–40...+125	SOT23(5)			
ZXCT1083	1	500	2,7–40	0,2	1	2		2,7–40	6	–40...+125	SOT23(5)			
ZXCT1107	1	500	2,5–36	4	1,8		650	2,5–36	5	–40...+125	SOT-23			
ZXCT1109	1	500	2,5–36	4	1,8		650	2,5–36	5	–40...+125	SOT-23			
ZXCT1110	1	500	2,5–36	4	1,8		650	2,5–36	5	–40...+125	SOT-23(5)			
<b>ON Semiconductor</b>														
FAN4010	1	1000	2–6	10	2,5		600	2–6	5	–40...+85	MCP(6)			
<b>Texas Instruments</b>														
INA138	1	100	2,7–6	0,2	1	2	800	2,7–36	45	–55...+150	SOT-23(5)			
INA138_Q1	1	100	2,7–36	0,2		3	800	2,7–36	60	–55...+150	TSSOP(8)			
INA139	1	100	2,7–40	1		1	440	2,7–40	125	–40...+125	SOT-23(5)			
INA139-Q1	1	100	2,7–40	1		2	440	2,7–40	125	–55...+125	TSSOP(8)			
INA168	1	100	2,7–60	0,2	1	2	800	2,7–60	45	–55...+150	SOT-23(5)			
INA168-Q1	1	100	2,7–60	0,2		3	800	2,7–60	60	–55...+150	TSSOP(8), SOT-23(5)			
INA169	1	100	2,7–60	1		1	440	2,7–60	125	–40...+85	SOT-23(5)			
INA169-Q1	1	100	2,7–60	1		2	440	2,7–60	125	–55...+125	TSSOP(8)			
INA170	1	100	2,7–60	1	1		400	2,7–40	125	–55...+125	MSOP(8)			+





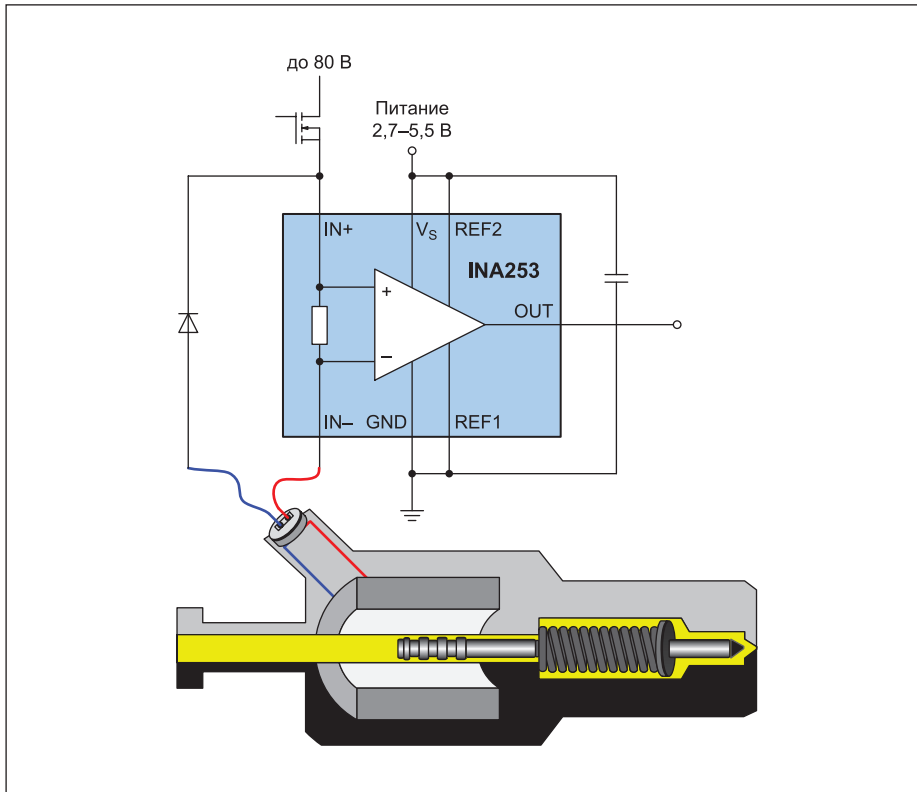


Рис. 2. INA253 в схеме контроля тока управления форсункой

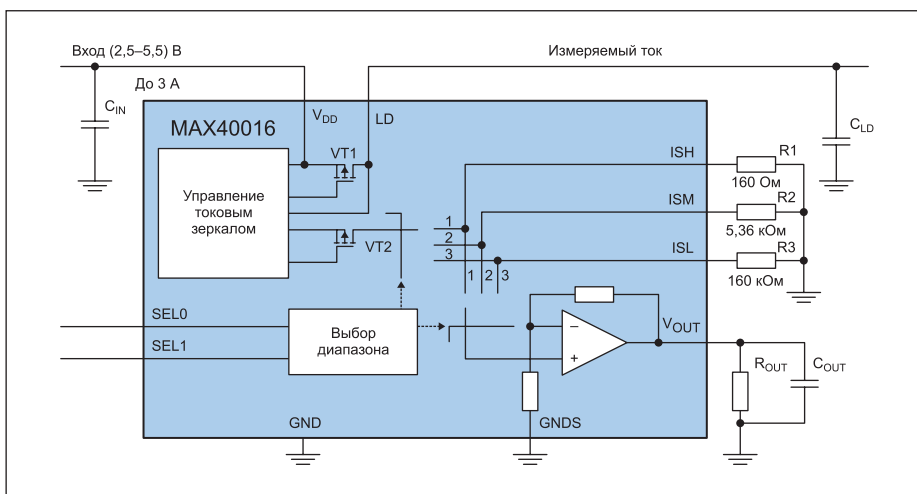


Рис. 3. Микросхема MAX40016 с МОП-транзистором в качестве токового шунта

Однако выходное сопротивление величиной от единиц до десятков килоом усложняет дальнейшую обработку сигнала.

Большинство мониторов тока имеет потенциальный выход (табл. 3)\*. Наличие буферного выходного усилителя во многих микросхемах обеспечивает выходное сопротивление в единицы ом. Наряду с выполнением основной функции многие из них имеют и дополнительные возможности. Так, наличие встроенных источника опорного напряжения и компараторов позволяет организовать различные варианты схем сигна-

лизации. Двухнаправленный режим работы позволяет измерять ток как втекающий в нагрузку, так и вытекающий из нее, а наличие спящего режима — существенно экономить потребляемую энергию. Микросхемы с отключаемым выходом дают возможность объединять выходные сигналы нескольких каналов измерения на одном входе аналого-цифрового преобразователя. Микросхемы AD8418, MAX49921, TSC2010-TSC2012, INA225 имеют впечатляющие точностные характеристики. Например, у AD8418 в рабочем диапазоне температур максимальная погрешность усиления не превышает 0,15% при смещении нуля не более 0,4 мВ.

Появился ряд микросхем, предназначенных для измерения тока фаз электродвигателей в системах с напряжением питания до 48 В (in-line — по классификации Texas Instruments). Основное назначение — измерение токов, потребляемых электродвигателями и электромагнитами. Микросхемы представляют собой дифференциальный усилитель со встроенными цепями подавления помех от ШИМ-модуляции. Это существенно сокращает пульсации выходного сигнала, вызванные быстрыми изменениями синфазного входного напряжения, чем достигается более точное измерение тока. Схема включения такого монитора тока, INA240, приведена на рис. 1. Условно показан только один измерительный канал для одной фазы.

В основном предполагается включение микросхем с использованием внешнего токоизмерительного резистора (токового шунта). Однако компания Texas Instruments производит несколько типов микросхем со встроенным токоизмерительным резистором с номинальным сопротивлением 2 мОм — например, предназначенную для контроля тока электромагнитов, электродвигателей, управления работой импульсных преобразователей микросхему INA253. На рис. 2 показана схема ее включения для контроля тока форсунки двигателя внутреннего сгорания.

В микросхеме MAX40016, устройство которой показано на рис. 3, предлагается иная технология встроенного шунта, а именно МОП-транзистор VT1, работающий на линейном участке семейства выходных характеристик. Падение напряжения не превышает 60 мВ при токе 3 А. Второй транзистор — VT2, составляющий с шунтом токовое зеркало, формирует ток, пропорциональный измеряемому, но много меньший по величине. Переключателем диапазонов к входу оконечного усилителя и выходу токового зеркала подсоединяется один из резисторов R1–R3. Этим обеспечивается высокая точность измерения в диапазоне токов 300 мкА – 3 А. Диапазоны переключаются установкой соответствующего кода на входах SEL0, SEL1.

Характеристики микросхем с цифровым выходом приведены в таблице 4. Номенклатура небогата, выходной интерфейс I<sup>2</sup>C (SMBus). С цифровым интерфейсом просто решается задача передачи данных о нескольких физических процессах, и некоторые мониторы тока одновременно с измерением тока позволяют измерять напряжение и температуру.

Мониторы тока могут применяться не только по их прямому назначению.

На рис. 4 изображена схема включения микросхемы ZXCT1032 — электронного предохранителя. Эта микросхема последовательно обеспечивает плавный пуск, ограничение тока в линии, отключение нагрузки с циклическим перезапуском. Порог срабатывания устанавливается напряжением на выводе ISET.

\* В статье приведен сокращенный вариант таблицы 3. Полную версию таблицы 3 можно посмотреть по ссылке [2].

Таблица 4. Мониторы тока с цифровым выходом Analog Devices

Прибор	Количество схем	Диапазон входного напряжения, мВ	Синфазное входное напряжение, В	Выходной интерфейс	Погрешность коэффициента передачи при +25 °С, % (макс.)	Погрешность коэффициента передачи в рабочем диапазоне температур, % (макс.)	Напряжение питания, В	Ток потребления, мА (тип.)	Разрешение, бит	Рабочий диапазон температур, °С	Корпус	Дополнительные функции				
												Переключаемое усиление	Измерение температуры	Встроенный компаратор	Измерение напряжения	Спящий режим
LTC2945	1	102,4	0–80	ІС		0,75	4–80	0,8	12	–40...+125	MSOP-12, QFN-12				+	+
LTC2946	1	102,4	0–100	ІС		0,7	4–100	0,9	12	–55...+125	MSOP-16, DFN-12				+	+
LTC2990	1	±300	–0,3...Vcc	ІС		0,75	2,9–5,5	1,1	14	–40...+85	MSOP-10		+		+	+
LTC2991	1	±312,5	–0,3...Vcc	ІС		0,75	2,9–5,5	1,1	14	–40...+85	MSOP-16		+		+	+
LTC4151	1	±81,92	7–80	ІС		1,25	7–80	1,2	12	–40...+125	MSOP-10, DFN-10, SO-16				+	+
MAX9611	1	55; 110; 440	0–60	ІС	0,5	2,5	2,7–5,5	2,6	12	–40...+125	μMAX(10)	+		+		+
MAX9612	1	55; 110; 440	0–60	ІС	0,5	2,5	2,7–5,5	2,6	12	–40...+125	μMAX(10)	+		+		+
MAX34408	2	12,25	2,5–13,2	ІС/SMBus		2	2,7–3,6	0,83	8	–40...+85	TQFN-16					
MAX34409	4	12,25	2,5–13,2	ІС/SMBus		2	2,7–3,6	0,83	8	–40...+85	TQFN-16					

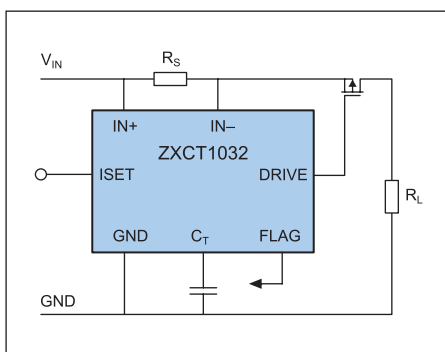


Рис. 4. Электронный предохранитель на ZXCT1032

На рис. 5 показан пример использования монитора тока LMP8645HV в схеме стабилизатора тока мощного светодиода. Обычное включение микросхемы драйвера светодиода LM3406 предполагает подключение резистора обратной связи между катодом светодиода и «землей». Такое решение неприемлемо в некоторых приложениях, например в источниках света автомобилей. Применение монитора тока позволяет перенести токоизмерительный резистор  $R_S$  в положительный полюс нагрузки и подключить катод светодиода к общему проводу системы.

Разработчики аппаратуры имеют богатый выбор микросхем для контроля и измерения

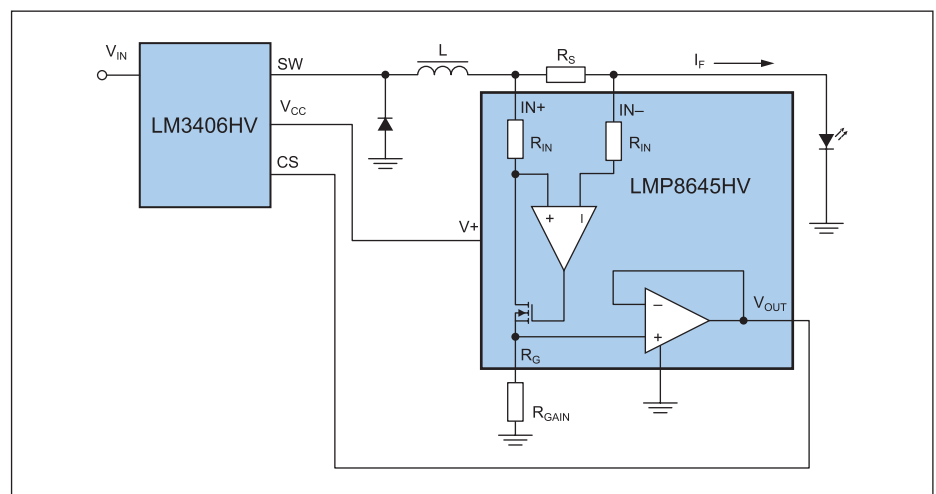


Рис. 5. Применение монитора тока в стабилизаторе тока светодиода

тока, требующих минимального количества внешних компонентов. ■

### Литература

1. Пушкарев М. Микросхемы для измерения тока // Компоненты и технологии. 2006. № 10.
2. Полная версия таблицы 3. [//https://kit-e.ru/elcomp/tablica-3/](https://kit-e.ru/elcomp/tablica-3/) или QR-коду

