

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАТУШКИ РОГОВСКОГО ДЛЯ ТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Максим Ковнерев, студент, Юрий Троицкий, к.т.н., доцент, филиал МЭИ (г. Смоленск)

Рассматривается принцип действия катушки (пояса) Роговского как токового датчика. Выпускаемые в настоящее время датчики для аппаратуры измерения электрической энергии в системах технологического контроля и научных исследований обеспечивают точность преобразования до 0,1% при малых весогабаритных показателях. Приведен пример использования катушки Роговского для построения счетчика электрической энергии с использованием микросхем фирмы Analog Devices.

Повышение требований к точности измерений в системах учета электрической энергии, технологического контроля и научных исследованиях привело к появлению на рынке широкого спектра электронных компонентов, предназна-

ченных для сбора и обработки сигналов с токовых датчиков. Использование традиционных токовых датчиков, таких как токовые шунты и трансформаторы тока, во многом тормозит реализацию потенциальных возможностей электрон-

ной базы. В связи с этим многими фирмами ведутся интенсивные работы как по совершенствованию традиционных датчиков, так и разработке принципиально новых.

Как следует из сравнительных характеристик датчиков в таблице 1, одним из перспективных типов токовых датчиков является катушка Роговского.

Этот датчик нельзя назвать новым. Катушка Роговского, созданная в 1912 г. [1], использовалась для обнаружения и измерения электрических токов в течение многих десятилетий, но только в последнее время ее приме-

Таблица 1. Достоинства и недостатки основных типов токовых датчиков

	Тип датчика	Достоинства	Недостатки
	Резистивный шунт	Низкая стоимость, хорошая линейность	Отсутствие гальванической развязки, ограниченный диапазон преобразуемых токов, паразитная индуктивность, смещение по постоянному току
	Трансформатор тока	Возможность преобразования больших токов, малая собственная потребляемая мощность	Насыщение, гистерезис, фазовый сдвиг, невозможность преобразования пост. тока, относительно большие весогабаритные показатели
	Датчики на основе эффекта Холла	Широкий динамический диапазон	Гистерезис, насыщение, температурный дрейф, высокая стоимость
	Катушка Роговского	Низкая стоимость, нет ограничений по насыщению, малая потребляемая мощность, очень низкая температурная зависимость, невосприимчивость к смещению по пост. току	Выходной сигнал требует использования аппаратного интегратора, чувствительность к внешним магнитным полям
	Магниторезистивные датчики	Высокая надежность, высокая чувствительность, широкий диапазон рабочих частот (от 0 Гц до МГц) и широкий диапазон рабочих температур	Нелинейность, чувствительность к внешним магнитным полям
	Магнитооптические датчики	Высокая точность, широкий диапазон измеряемых токов (от мА до МА)	Высокая цена. Выигрыш в точности, размерах и весе проявляется только при измерении сверхбольших токов

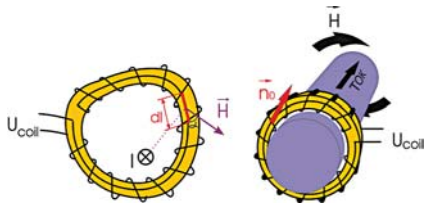


Рис. 1. Структура катушки Роговского

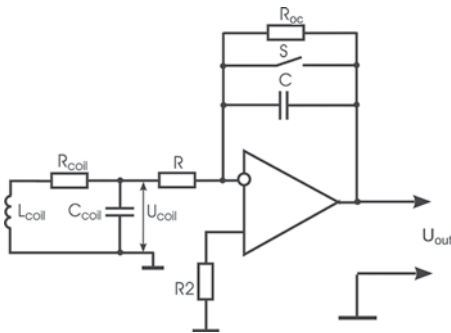


Рис. 2. Активный интегратор на операционном усилителе

нение вышло из рамок лабораторных исследований в область универсального промышленного применения.

**ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ**

Катушка Роговского представляет собой длинный соленоид с воздушным сердечником с равномерной намоткой витков. Концы катушки выводятся вместе и замыкаются через сопротивление нагрузки. В большинстве случаев катушка Роговского наматывается на гибкий стержень, который затем и охватывает токоведущий проводник (см. рис. 1). Отсутствие магнитного сердечника обеспечивает достоинства, присущие этому типу датчиков: высокую линейность, точность и надежность.

В отличие от токового трансформатора в катушке Роговского нет первичной обмотки. В катушке, окружающей проводник с измеряемым током, при замыкании контура наводится э.д.с., величина которой теоретически не зависит от формы петли и ее расположения относительно провода [2]. Связь между электрическим током и напряженностью магнитного поля устанавливается законом полного тока (первым уравнением Максвелла или уравнением Ампера), гласящим, что линейный интеграл напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру равен полному току через поверхность, ограниченную этим контуром

$$\oint H \cos \alpha \, dl = i, \quad (1)$$

где  $H$  — напряженность магнитного поля,  $\alpha$  — угол между вектором маг-

нитного поля и направлением нормали к плоскости витка элементарной секции длиной  $dl$ .

Связь между магнитным потоком  $\Phi$  и напряженностью магнитного поля  $H$  определяется выражением

$$\Phi = \iint \mu_0 \times H \, dS = \mu_0 \times A \times n \oint H \times dl, \quad (2)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха,  $dS = A \times n \times dl$  ( $A$  — поперечная площадь элементарной секции,  $n$  — число витков в секции длиной  $dl$ ).

В замкнутом контуре э.д.с. появляется вследствие наведенного электрического поля при изменении магнитного поля:

$$U_{coil} = - \frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \times A \times n \frac{di}{dt} = -M \frac{di}{dt}, \quad (3)$$

где  $M = \mu_0 \times A \times n$  — взаимная индуктивность между катушкой и проводником.

Поскольку э.д.с. наводится только при изменении магнитного поля, катушка не может использоваться для измерения постоянной составляющей тока. Кстати, это свойство является дополнительным достоинством катушки при применении ее в бытовых счетчиках электроэнергии, для которых предусматривается аттестация при несимметричной нагрузке, содержащей постоянную составляющую.

Существенно, что при намотке катушки должна соблюдаться равномерность распределения витков по всей длине, причем равномерность должна сохраняться даже при деформации катушки. Для обеспечения этих условий катушка наматывается на стержень из очень гибкого материала.

Современные технологии позволяют создавать катушки диаметром 7 мм, охватывающие проводники диаметром менее 10 мм с высокой однородностью намотки. Такие катушки могут обеспечить погрешность преобразования менее 0,1%.

**Влияние внешних магнитных полей.** По самому принципу действия катушка Роговского подвержена воздействию внешних магнитных полей. При совершенно равномерной намотке витков на круглый тороидальный стержень влияние равномерного внешнего магнитного поля уравновешивается внутри катушки.

Для уменьшения емкостной связи с внешними цепями и устранения наводок от посторонних переменных электромагнитных полей катушку Роговского обычно помещают в электростатический экран с разрезом по внутренней стороне экрана. Однако,

для экранирования низкочастотных (сетевых) магнитных полей требуется экран значительной толщины из материала с высокой магнитной проницаемостью.

Эффективным способом подавления влияния внешних переменных магнитных полей является использование т.н. обратного витка [2] (см. рис. 1). Если плоскость тора пронизывается переменным магнитным полем, то наводимое на обратном витке напряжение будет равно по величине и противоположно по направлению напряжению на «прямом» витке, образуемом основной обмоткой, и скомпенсирует его.

**ИНТЕГРАТОРЫ**

Поскольку напряжение на выходе катушки Роговского пропорционально производной тока, необходим интегратор, чтобы преобразовать сигнал пропорциональный  $di/dt$  в сигнал пропорциональный  $i(t)$  для дальнейшей обработки.

Интегрирование выходного напряжения катушки можно осуществить несколькими способами:

- активное интегрирование с использованием операционных усилителей;
- пассивное интегрирование;
- интегрирование на внутренней индуктивности;
- цифровое интегрирование.

**Активное интегрирование.** Традиционно активные интеграторы строят на базе операционных усилителей (см. рис. 2). Напряжение на выходе интегратора ( $U_{out}$ ) в пределах рабочей полосы частот усилителя описывается выражением:

$$U_{out} = - \frac{1}{\tau} \times \int U_{coil} \, dt = - \frac{M}{\tau} \times I, \quad (4)$$

где  $\tau = RC$  — постоянная интегрирования,  $M$  — взаимдуктивность катушки.

Чувствительность полной системы, т.е. отношение измеряемого тока к выходному напряжению интегратора  $U_{out}$ , можно менять в широких пределах путем подстройки  $\tau$  и  $M$ . Одна и та же катушка может использоваться для измерения токов от нескольких миллиампер до нескольких мегаампер. Повысить чувствительность можно также, изменяя плотность намотки витков и меняя, тем самым, магнитную связь  $M$ .

Многие фирмы-изготовители катушек Роговского, например, компания Roscoil, предлагают конструктивно завершённые модели активных интеграторов с чувствительностью от 10 А/В до 100 кА/В, входящие в единый

комплект с катушкой или поставляемые отдельно. Кроме одноканальных выпускаются трехканальные интеграторы, используемые в трехфазных счетчиках.

К недостаткам интеграторов на операционных усилителях следует отнести влияние входных токов и напряжения смещения, а также насыщение операционных усилителей при приближении выходного напряжения к уровню напряжения питания. Поэтому даже при использовании прецизионных усилителей для задания начальных условий применяют ключ S (см. рис. 2). Для ограничения выходного напряжения часто в обратную связь включают резистор  $R_{oc}$  [2, 3]. Однако при этом выражение (4) справедливо только при  $t \ll \tau_1$  ( $\tau_1 = R_{oc} \times C$ ).

Фирме High Current Technologies, Inc. (НСТ) удалось значительно уменьшить эти недостатки. Выпускаемые фирмой активные прецизионные интеграторы модели 1007 предназначены для измерения с высокой точностью (доли процента) импульсных и непрерывных токов в диапазоне от 100 А до 100 кА. Интегратор может работать в промышленном диапазоне температуры окружающей среды.

Пренебрежение паразитными параметрами катушки ( $R_{coil}$ ,  $C_{coil}$ ) допустимо для частот в пределах нескольких десятков килогерц. На более высоких частотах влияние индуктивности и емкости катушки становится существенным. Если индуктивный импеданс катушки сопоставим с входным сопротивлением интегратора, могут возникать амплитудные и фазовые ошибки. С целью увеличения входного сопротивления на высоких частотах используют неинвертирующие интеграторы [2–4]. При этом, естественно, следует использовать широкополосные операционные усилители.

На высоких частотах следует учитывать резонансные явления в катушках. Если катушка используется на частоте, близкой к резонансной, то надо позаботиться об условиях демпфирования, т.е. снижения добротности резонансного контура подбором демпфирующего резистора. Резонансная частота (0,5...3 МГц) зависит от размера катушки и качества намотки. На этих частотах катушки Роговского используют, прежде всего, в экспериментальных и научных исследованиях, в частности, при исследовании переходных процессов в различных электротехнических и электронных устройствах. На резонансную частоту также влияет

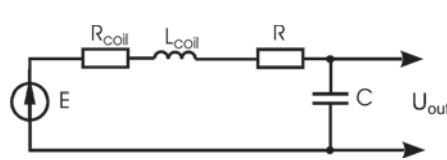


Рис. 3. Пассивный интегратор

наличие электростатического экрана и длина выходного кабеля между катушкой и интегратором, который вносит дополнительную емкость.

Хотя современные операционные усилители имеют полосу пропускания до 300 МГц и выше [7], на практике для измерения фронтов токов в различных электронных устройствах, например, в ключах инверторов, используют пассивные интеграторы [3].

**Пассивное интегрирование.**

Пассивный интегратор представляет собой интегрирующую RC-цепочку (см. рис. 3). Пассивные интеграторы полезны в задачах измерения очень больших импульсных токов с фронтами порядка нескольких микросекунд.

Обмотка катушки вместе с элементами R и C интегрирующей цепочки представляет собой колебательный контур с затуханием, для которого справедливо выражение:

$$L_{coil} \times C \times \frac{d^2 U_{out}}{dt^2} + (R_{coil} + R) \times C \times \frac{dU_{out}}{dt} + U_{out} = E, \quad (5)$$

где  $E = U_{coil}$  — наведенная в катушке э.д.с., определяется выражением (3);  $U_{out}$  — напряжение на конденсаторе C.

При постоянной скорости нарастания тока ( $\alpha$ ) на фронте импульса для  $\tau_{ii} \ll (R_{coil} + R) \times C$  и  $\tau_{ii} \ll \sqrt{L_{coil} \times C}$  имеем:

$$U_{out} \approx \int_0^t \frac{E}{(R_{coil} + R) \times C} dt = - \frac{L_{coil}}{(R_{coil} + R) \times C} \times \frac{I(t)}{N}, \quad (6)$$

где N — количество витков катушки Роговского.

**Интегрирование на собственной индуктивности.**

При исследовании переходных процессов на высоких частотах часто используют интегрирование на собственной индуктивности катушки [3, 5] (см. рис. 4).

Для эквивалентной схемы на рисунке 4 справедливо выражение:

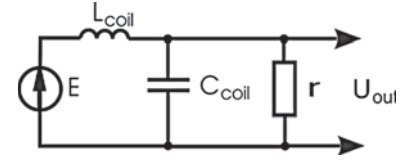


Рис. 4. Интегратор на собственной индуктивности катушки

$$\frac{L_{coil}}{r} \times \frac{dU_{out}}{dt} + U_{out} = E(t) = M \frac{di}{dt}, \quad (7)$$

откуда при  $r \ll L_{coil} \times \omega$

$$U_{out}(j\omega) = \frac{i(j\omega) \times M}{\tau}, \quad (8)$$

где  $i$  — измеряемый ток,  $\tau = L_{coil}/r$  — постоянная интегрирования.

Недостатки аналогового интегрирования, прежде всего низкая точность и ограничения по частотному диапазону, замышляли использование катушки Роговского узким кругом экспериментальных исследований, связанных с изучением переходных процессов в электрических цепях.

Ситуация в корне изменилась с появлением цифровых интеграторов, работающих в реальном масштабе времени, что позволило начать переход от частного применения катушек Роговского в научных экспериментах к их внедрению в промышленных устройствах.

**Цифровое интегрирование.**

Цифровые интеграторы, легко реализуемые на базе сигнальных процессоров, позволяют обрабатывать сигналы в ВЧ- и СВЧ-диапазоне, что позволяет использовать их в сочетании с катушкой Роговского во всех перечисленных случаях. Однако для измерения электрической энергии в области промышленных частот возможности универсальных сигнальных процессоров избыточны. В связи с этим фирмой Analog Devices для измерения электрической энергии были разработаны микросхемы энергетических конвертеров ADE7759 и ADE7753 [7] в качестве датчиков с выходом по производной тока  $di/dt$ .

Микросхема ADE7759 предназначена для измерения активной мощности, а ADE7753 — для измерения активной, реактивной, полной мощности и ряда других показателей качества электрической энергии. Нелинейность рекомендуемых фирмой токовых датчиков на базе катушек Роговского (информация доступна по адресу meter@analog.com) в диапазоне измеряемых токов 0,1...100 А не превышает 0,1% (см. рис. 5).

Микросхемы включают в себя (см. рис. 6) два 24-разрядных сигма-дельта

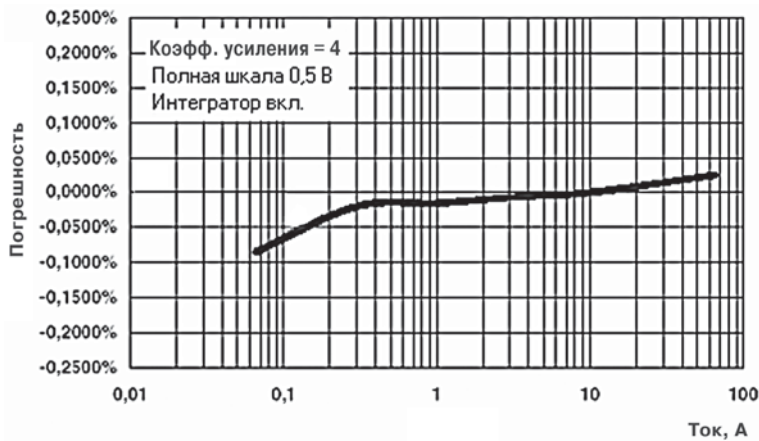


Рис. 5. Зависимость погрешности коэффициента преобразования катушки Роговского от измеряемого тока (при температуре 25°C и коэффициенте мощности = 1)

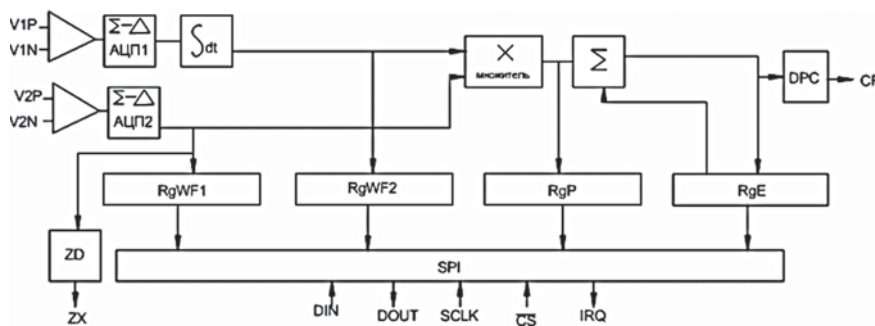


Рис. 6. Структурная схема измерителя активной мощности ADE7759

аналого-цифровых преобразователя с программируемыми усилителями на входе. Первый канал используется как токовый, а второй является каналом напряжения. К входам первого АЦП (U1P и U1N), подключаются токовые датчики, в качестве которых могут использоваться либо традиционные датчики (токовый трансформатор или токовый шунт), либо катушка Роговского. В последнем случае к выходу АЦП1 после фильтра высоких частот подключают цифровой интегратор. Цифровой интегратор обеспечивает высокую точность амплитудного и фазового преобразования. Погрешность фазового преобразования в диапазоне частот 40...1000 Гц не превышает 0,2°. Получаемые текущие значения тока и напряжения заносят-

ся в 20-разрядные регистры RgWF1 и RgWF2, с которых информацию можно прочитать через последовательный интерфейс SPI. С помощью ядра сигнального процессора осуществляется перемножение текущего значения тока и напряжения, в результате чего получается текущее значение мощности, которое заносится в 24-разрядный регистр RgP. Как известно, энергия вычисляется следующим образом

$$E = \int_0^t P(t) dt = \lim_{T \rightarrow 0} \sum_{n=0}^{N_t} P(nT) \times T, \quad (9)$$

где T — интервал между отсчетами, n — номер отсчета.

Интервал между отсчетами T в микросхеме выбран равным 1,1 мкс, число отсчетов можно регулировать программно. Значение рассчитанной энергии заносится в доступный для считывания 40-разрядный регистр RgE (AEnergy).

Микросхема имеет также частотный выход CF, с которого можно снимать сигнал, частота которого пропорциональна измеренной электрической мощности. Этот выход может быть использован для калибровки измерителя или для вывода на индикатор с частотным входом (например, на электромеханический счетчик).



Рис. 7. Конструкция прецизионной катушки Роговского фирмы High Current Technologies

Кроме того, с помощью нуля-детектора ZD выделяются полупериоды напряжения, подаваемого на вход канала АЦП2 (на входы U2P и U2N). Сигнал с выхода ZD выводится в качестве внешнего сигнала на вывод ZX, а также используется внутри схемы в процессе обработки сигналов.

Микросхема ADE7753 построена по тому же принципу и предназначена для измерения активной, реактивной и полной мощности, а также среднеквадратичного значения напряжения и тока и других параметров, характеризующих качество электрической энергии.

## КОНСТРУКТИВНОЕ ИСПОЛНЕНИЕ

На зарубежном рынке главенствуют несколько фирм, занимающихся изготовлением катушек Роговского: Rocoil Rogowski Coils [8], Eltek [9], Taehwatrans Co. [10], ABB Ais [11], High Current Technologies, Inc. (HCT) [12].

Упомянутая выше фирма High Current Technologies предлагает высокоточные катушки серии G с точностью преобразования до 0,1% на диапазон тока от 100 А до 20 кА (см. рис. 7).

Наиболее широко представлена номенклатура компании Rocoil, занимающейся выпуском катушек Роговского и интеграторов к ним. Продукция этой компании поставляется на заказ.

Конструктивно катушки делятся на разъемные и неразъемные. Первые, в свою очередь, на катушки с соединением концов встык и соединением внахлест.

Маркировка катушек фирмы Rocoil производится 4-разрядным цифровым кодом со следующим значением каждого разряда:

- 1-я цифра: 1 — соединение концов встык, 4 — соединение внахлест;
- 2-я цифра: 0 — без экрана, 1 — экранирующая оплетка, 2 — экран из фольги;
- 3-я цифра: 1 — стандартное сечение, 2 — маленькое сечение, 3 — низкое выходное сопротивление;
- 4-я цифра: 0 — без изоляции, 1 — однослойная изоляция, 2 — двухслойная изоляция.

В таблице 2 для продукции фирмы Rocoil с учетом данной классификации приведены типовые значения параметров катушек.

Катушки с соединением концов встык могут иметь зажимные фитинги (см. рис. 8), которые удобно использовать в случае частой переустановки датчиков, или винтовые соединения для постоянной установки датчика (см. рис. 9) [8].



Рис. 8. Катушка с соединением встык зажимным фитингом и с автономным интегратором фирмы RogoCoil



Рис. 9. Катушка с соединением встык винтовым соединением фирмы RogoCoil



Рис. 10. Катушка с соединением внахлест (RC1000) фирмы Eltec



Рис. 11. Неразъемные конструкции катушек Роговского фирмы Taehwatrans Co., Ltd



Рис. 12. Неразъемная конструкция катушки Роговского (BU 3410) фирмы ABB Ais

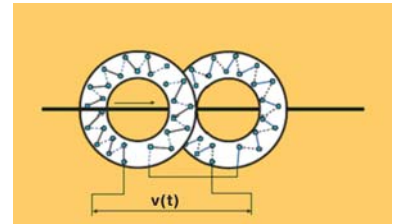


Рис. 13. Печатная конструкция двухконтурной катушки Роговского

Для работы на частотах до 100 МГц и исследования импульсных сигналов с фронтами до 3 нс фирмой выпускаются специальные высокочастотные катушки с интегрированием на собственной индуктивности с чувствительностью 1, 10 и 100 мВ/мА.

Компания Eltec, занимающаяся выпуском катушек Роговского, серийно поставляет только разъемную катушку RC1000 двух типов: С – соединение концов встык (применяют обычно для катушек большого сечения) и D – соединение концов внахлест (см. рис. 10) для катушек малого сечения [9].

Наряду с разъемными конструкциями широко используются неразъемные овальные и круглые катушки, выпускаемые фирмами Taehwatrans Co., Ltd [10] (см. рис. 11) и ABB Ais [11] (см. рис. 12).

Для прецизионных измерений на высокой частоте в последнее время предложена печатная конструкция двухконтурной катушки Роговского (см. рис. 13) [6].

**Калибровка.** Катушки Роговского обычно калибруются совместно с интегратором. В качестве эталонного тока используется только переменный ток.

С учетом высокой линейности характеристики катушки калибровку можно производить лишь в одной точке при фиксированном значении параметров тока (амплитуды, частоты).

Именно за счет индивидуальной калибровки достигается высокая точность измерения токов при использовании рассматриваемого типа датчиков. Каждая катушка прецизионной серии G фирмы НСТ сопровождается сертификатом калибровки, отвечающим требованиям стандартов ISO170025, ISO Guide 25C, ANSI Z-50. Все испытательные тесты согласовываются с национальным институтом стандартов и технологий (NIST) США.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помимо традиционной научной области исследования переходных процессов, катушки Роговского находят все более широкое применение в системах учета и контроля качества

электрической энергии. С появлением прецизионных активных интеграторов и специализированных микросхем ADE7753 и ADE7759, обеспечивающих высокоточное измерение электрической энергии с использованием токовых датчиков с выходом  $di/dt$ , применение катушки Роговского может стать массовым.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Rogowski W., Steinhaus W. «Die Messung der magnetischen Spannung», Arch. Elektrotech., 1912, vol. 1, Pt. 4, pp. 141–150.
2. Ray W. F., Hewson C. R. «Practical Aspects of Rogowski Current Transducer Performance». Power Electronic Measurements Ltd., Nottingham, U.K.
3. Ray W. F., Hewson C. R. «High performance Rogowski current transducers», Proc. IEEE – IAS Conf., Rome, September 2000.
4. Ray W.F., Davis R M: «High frequency improvements in wide bandwidth Rogowski transducers», Proc. EPE 99 Conf., Lauzanne. Sept 1999.
5. Ray W.F., Davis R.M. «Improvements in Rogowski Current transducers». Proc. Conf. PCIM 99, Nurnberg, Germany, June 1999.
6. Kojovic L. «High-Precision Rogowski Coils for Improved Relay Protection, Control and Measurements». The Line. November 2002, p. 7.
7. [www.analog.com](http://www.analog.com)
8. [www.rocoil.cw.com](http://www.rocoil.cw.com)
9. [www.eltekdataloggers.co.uk](http://www.eltekdataloggers.co.uk)
10. [www.taehwatrans.com](http://www.taehwatrans.com)
11. [www.ABB.com](http://www.ABB.com)
12. [www.highcurrenttech.com](http://www.highcurrenttech.com)

Таблица 2. Типовые характеристики некоторых катушек фирмы RogoCoil

Тип	Описание	Диаметр, включая изоляцию, мм	Типичное значение индуктивности, мкГн
x012	Без экрана/стандартное сечение/двойная изоляция	10	0,20...0,31
x112	Экран. оплетка/стандартное сечение/двойная изоляция	12	
x022	Без экрана/малое сечение/двойная изоляция	6	0,10
x122	Экран. оплетка/малое сечение/двойная изоляция	6,5...7	
x232	Экран из фольги/низкое выходное сопр./двойная изоляция	7,5	0,02

# Израиль...

это не только апельсины



**Вниманию руководителей предприятий, разработчиков, изготовителей электронной техники, дистрибьюторов и других специалистов в областях электроники!**

**“Merav-Koren Publishing Ltd.”** - специализированное издательство в области электронной индустрии, предоставляет возможность размещения рекламы в израильском журнале “Электроника”.

“Электроника” - один из ведущих профессиональных журналов в области электроники, охватывающий широкий спектр тем в сфере технологий, продукции, компонентов, производства и услуг.

Журнал публикует обширную информацию о представителях и дистрибьюторах, мировых изготовителей электронных компонентов и крупнейших международных компаний в области высоких технологий.

Издание делает обзор новых проектов, расширяя возможности экономического и делового сотрудничества в электронной промышленности. Журнал “Электроника” распространяется по всей территории Израиля и предназначен для широкого круга читателей.

Принимается тексты реклам на английском языке. В дальнейшем возможен перевод на иврит. Более подробную информацию вы можете получить по тел. (972)-3-9007930 или по адресу: [haim@merav.co.il](mailto:haim@merav.co.il)



**MERAV-KOREN PUBLISHING LTD.**