

# КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ BOURNS ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

МИХАИЛ СТАРИЧЕНКОВ, региональный представитель Bourns Inc. по России и странам СНГ

В статье подробно описаны основные параметры и конструктивные особенности катушек индуктивности. Приведены примеры выбора этих устройств для понижающего DC/DC-преобразователя, рассчитаны их потери, а также кратко описаны некоторые серии катушек индуктивности Bourns.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электронные изделия потребляют все больше электроэнергии. При этом увеличиваются требования по уменьшению их размеров, что влечет за собой увеличение рабочей частоты преобразователей энергии. Катушки индуктивности, одни из главных компонентов регуляторов напряжения, используются практически во всех источниках питания, где бы они ни применялись: в автомобильной и потребительской электронике, а также в промышленных приложениях. Поскольку катушки индуктивности, изготовленные по традиционной технологии, могут не отвечать всем требованиям, предъявляемым к современным изделиям, компания Bourns создала несколько серий этих устройств, у которых постоянный ток достигает 60 А.

Несмотря на огромное число катушек индуктивности, представленных на современном рынке, их выбор для преобразователя мощности следующего поколения — не всегда простая задача для разработчика. Для правиль-

ного выбора катушки индуктивности необходимо определить ее параметры: электромагнитное излучение, номинальный ток, материал сердечника и потери в нем, рабочую температуру и ток насыщения. Мы рассмотрим и проиллюстрируем примерами роль каждого из этих параметров при выборе наилучшего варианта катушки индуктивности, опишем особенности использования и преимущества устройств Bourns — их размеры, параметры, простоту использования — для различных приложений.

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Кратко опишем физические закономерности работы катушки индуктивности. Хотя многим они известны еще с институтской скамьи, напомним их, т.к. они потребуются нам для дальнейших рассуждений. Итак, катушка индуктивности — компонент электрической цепи, запасающий энергию в магнитном поле сердечника. Закон Фарадея описывает индуктивность, изменение магнитного потока и ЭДС следующим образом:

$$E = -N(d\phi/dt) = -L(di/dt).$$

Протекающий через индуктивность ток порождает магнитный поток. Пока ключ открыт, и индуктивность подключена к сети (см. рис. 1), ток через индуктивность нарастает. Когда индуктивность отключается от сети, она становится источником тока; соответственно, магнитный поток в сердечнике убывает. Если ток через индуктивность не уменьшается до нуля, считается, что схема работает в режиме непрерывного тока. Напряжение на индуктивности изменяется одновременно с изменением тока. При этом ток и напряжение не совпадают по фазе — напряжение на  $180^\circ$  опережает ток (см. рис. 2–3).

## ЭКРАНИРОВАНИЕ

Перед выбором индуктора необходимо расположить на печатной плате чувствительные к помехам компоненты и цепи. От решения этой задачи зависит

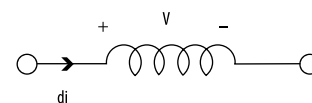


Рис. 2. Напряжение на индукторе

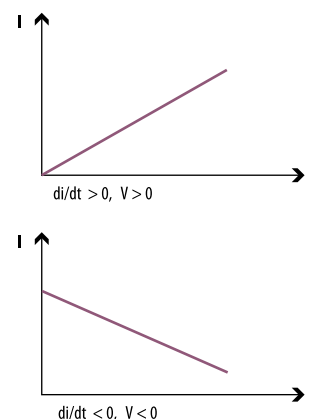


Рис. 3. Изменение тока и напряжения на индукторе

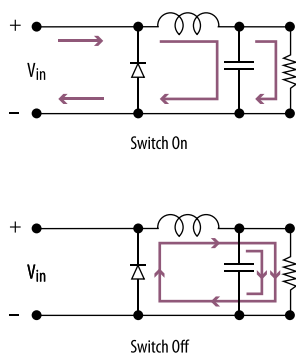
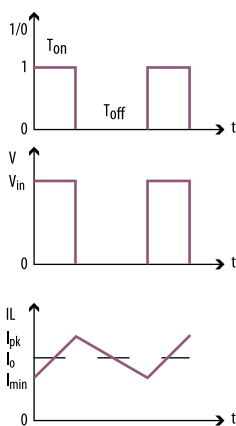


Рис. 1. Временная диаграмма работы индуктора в понижающем DC/DC-преобразователе  
Switch On — включено; Switch Off — выключено



и выбор типа катушки индуктивности — экранированный или неэкранированный. Одним из главных преимуществ экранированных катушек индуктивности является низкое электромагнитное излучение и слабая электромагнитная связь с другими неэкранированными компонентами и контурами. И, напротив, неэкранированные устройства характеризуются сильной магнитной взаимосвязью с другими компонентами и контурами схемы.

Компания Bourns еще в 2011 г. разработала серию полужэкранированных катушек индуктивности, в которых эпоксидная смола использовалась в качестве экрана. Примеры различных вариантов устройств см. в таблице 1.

Экранированные катушки индуктивности имеют большие размер и стоимость, характеризуется довольно быстрым уменьшением индуктивности при увеличении тока (см. рис. 4). У них также наименьший ток насыщения. Неэкранированные индуктивности дешевле, у них меньше габариты и выше ток насыщения. Однако все эти преимущества в ряде случаев могут не иметь значения, когда на первый план выходит увеличение помехозащитности. Полужэкранированные компоненты представляют собой компромиссное решение между упомянутыми выше вариантами.

Альтернативным вариантом могут стать катушки индуктивности с тороидальным сердечником (см. рис. 5). Такой индуктор по своим характеристикам схож с экранированным, а воздушный зазор в сердечнике обеспечивает высокое значение тока.

### НОМИНАЛЬНЫЙ ТОК КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

При протекании через индуктивность переменного или пульсирующего тока в ней возникают потери. В установившемся режиме номинальный постоянный ток приравнивается к среднеквадратичному току  $I_{rms}$  (см. рис. 6), вызывающему рост температуры дросселя на 20–40°C. По сути, это ток, при котором происходит такое же рассеивание мощности на катушке индуктивности. Такое определение верно, если пульсации тока невелики и потерями в сердечнике можно пренебречь. Иногда  $I_{rms}$  индуктора классифицируют как среднеквадратичный или выходной ток преобразователя с индуктивностью.

### МАТЕРИАЛ СЕРДЕЧНИКА И ПОТЕРИ

Потери в сердечнике зависят от выбора материала сердечника и площади его поперечного сечения в той же мере, как и от величины пульсирующего тока и от частоты коммутации. Потери в катушке индуктивности определяются потерями в сердечнике и в обмотке.

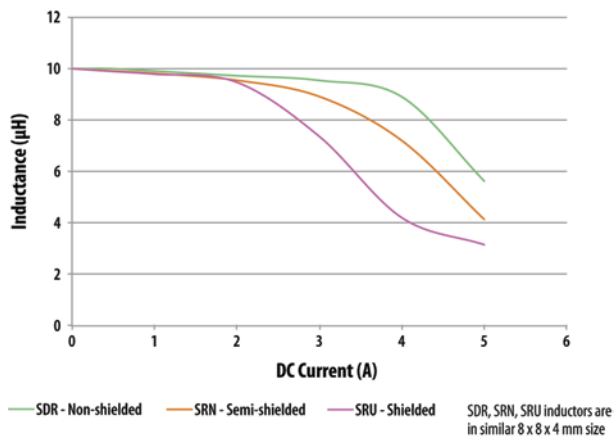


Рис. 4. Токи насыщения неэкранированного, полужэкранированного и экранированного индукторов

Inductance (µH) — индуктивность, мкГн; DC Current (A) — постоянный ток, А; Non-shielded — неэкранированный; Semi-shielded — полужэкранированный; Shielded — экранированный; SDR, SRN, SRU inductors are in similar 8×8×4 mm size — у индукторов SDR, SRN, SRU — одинаковый размер 8×8×4 мм

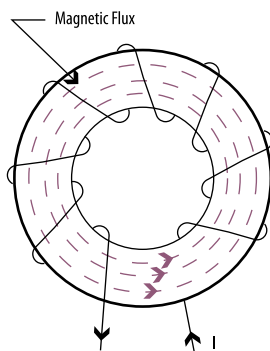


Рис. 5. Индуктор с тороидальным сердечником

Magnetic Flux — магнитный поток

Потери в сердечнике определяются как разница между энергией, запасенной в сердечнике во время подключения ее к сети, и энергией, которую отдал сердечник в цепь при его отключении от сети. В таблице 2 указаны потери в сердечнике в зависимости от материала.

Общие потери в катушке индуктивности определяются суммированием потерь в сердечнике и в обмотке.

Таблица 1. Коэффициент взаимосвязи индукторов

Индуктор	SDR3015, 10 мкГн, 3,0×2,8×1,5 мм	SRN4018, 10 мкГн, 3,95×3,95×1,6 мм	SRR301810, 10 мкГн, 3,8×3,8×1,65 мм
	Неэкранированный	Полужэкранированный	Экранированный
Серия			
Коэффициент взаимосвязи, K*	37,8%	18,74%	0,16%

\* Коэффициент взаимосвязи индукторов с индукторами схожих размеров сравнивался при частоте 1 кГц при расположении индукторов рядом друг с другом.

Таблица 2. Потери в сердечнике индуктора в зависимости от материала

Материал*	Потери в 100-г сердечнике при частоте коммутации 250 кГц, мВт/см <sup>3</sup>	Относительная стоимость
Феррит (с воздушным зазором)	1	Низкая
Железо (75µ)	80	Низкая
Алсифер (60µ)	35	Средняя
MPP (60µ)	8	Высокая

\* Феррит = Mn-Zi; Алсифер = Fe-Al-Si; MPP = Me-Ni-Fe.

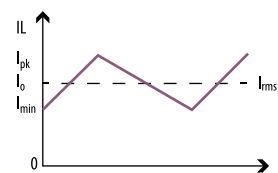


Рис. 6. Среднеквадратичный ток

Последние определяются выражением  $P = I^2 R$ .

### ТЕМПЕРАТУРА И НАСЫЩЕНИЕ СЕРДЕЧНИКА

При выборе диапазона рабочих температур следует учитывать, что он в общем случае не совпадает с диапазоном окружающих температур, при которых работает индуктор. Например, если диапазон рабочих температур катушки индуктивности заявлен в пределах -40...125°C, а ее саморазогрев составит 40°C, то диапазон температуры окружающей среды должен изменяться в пределах -40...85°C. Обратите внимание, что изменяется только верх-

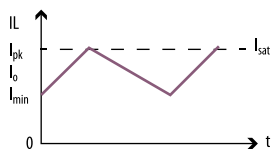


Рис. 7. Ток насыщения

ний предел температур, нижний не меняется. Температура разогрева  $\Delta T$  описывается как функция рассеиваемой мощности и площади поверхности рассеяния выражением:

$$\Delta T = f(\text{рассеиваемая мощность}) / f(\text{площадь поверхности рассеяния})$$

Ток насыщения  $I_{\text{sat}}$  определяется как постоянный ток, при котором индуктивность уменьшается на 5–35% от начального значения. Ток насыщения показывает способность катушки индуктивности запасать энергию. Напомним, что эта величина определяется соотношением:

$$W = LI^2/2.$$

Таким образом, при токе насыщения сердечник катушки индуктивности не находится в состоянии насыщения, когда его индуктивность приближается к нулю и становится равной индуктивности дросселя с немагнитным сердечником. Разработчик должен рассматривать эту величину как максимальный пиковый ток преобразователя с индуктивностью (см. рис. 7). Обратим внимание еще на одно обстоятельство: если через катушку индуктивности достаточно долго протекает большой ток, то и сердечник, и обмотка могут повредиться из-за перегрева. В большинстве случаев именно перегрев является ограничивающим фактором при эксплуатации.

### ПРИМЕР ВЫБОРА КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

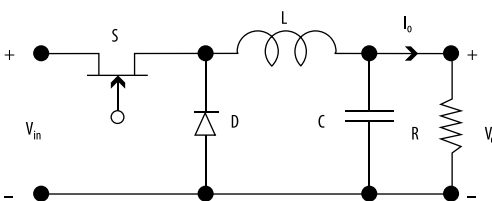
Рассмотрим процесс выбора катушки индуктивности для понижающего DC/DC-преобразователя (см. рис. 8). Рабочие параметры преобразователя следующие:

- входное напряжение  $V_{\text{in}} = 8\text{--}12\text{ В}$ ;
- выходное напряжение  $V_{\text{O}} = 5\text{ В}$ ;
- выходной ток  $I_{\text{O}} = 0,5\text{--}2\text{ А}$ ;
- рабочая частота:  $f_{\text{switch}} = 250\text{ кГц}$ .

Преобразователь работает в режим непрерывного тока, т.е. ток в дросселе не спадает до нуля. Приведенной информации достаточно для выбора индуктора. Рассмотрим шаг за шагом процесс выбора.

1. Рассчитываем период:  $T = 1/f = 1/250\text{ кГц} = 4\text{ мкс}$ .

Рис. 8. Понижающий DC/DC-преобразователь



2. Определяем минимальный коэффициент заполнения:  $D_{\text{min}} = V_{\text{O}}/V_{\text{in(max)}} = 5/12 \approx 0,4$ .
3. Время открытого состояния ключа S:  $T_{\text{on}} = TD_{\text{min}} = 4\text{ мкс} \cdot 0,4 = 1,6\text{ мкс}$ .
4. Ток пульсации индуктивности в непрерывном режиме обычно не превышает 30% от максимального выходного тока:  $dI = 2\text{ А} \cdot 0,3 = 0,6\text{ А}$ .
5. Падение напряжения на катушке индуктивности является разницей между максимальным входным и выходным напряжениями. Учтем также падение напряжения на диоде:  $V = V_{\text{in(max)}} - V_{\text{out}} - V_{\text{diode}} = 12\text{ В} - 5\text{ В} - 1\text{ В} = 6\text{ В}$ .
6. Минимальное значение индуктивности вычисляется из соотношения  $V = L(di/dt)$ :  
 $L_{\text{min}} = V(dt/di) = 6\text{ В} \cdot 1,6 \cdot 10^{-6} / 0,6\text{ А} = 16\text{ мкГн}$ .
7. Учитывая возможное отклонение 20% от номинального значения и уменьшение индуктивности на 10–35% при пиковом токе, получим:  $L = 16\text{ мкГн} / (0,8 \cdot 0,35) = 31\text{ мкГн}$ .  
Выбираем из ряда номинальных значений катушку с индуктивностью 33 мкГн. Это минимальное значение для обеспечения режима непрерывного тока.
8. Величину пикового тока найдем из соотношения  $I_{\text{peak}} = I_{\text{O(max)}} + dI/2$ :  
 $I_{\text{peak}} = 2\text{ А} + 0,6\text{ А}/2 = 2,3\text{ А}$ .  
Далее определим потери в выбранной катушке индуктивности.

1. Добавим, что площадь сечения сердечника  $A = 0,071\text{ см}^2$ , а число витков  $N = 20$ . Магнитный поток вычисляется по формуле  $B_m = (dI \cdot L \cdot 108) / (2NA)$ ; подставляя значение, получаем:  $B_m = (0,6 \cdot 33\text{ мкГн} \cdot 108) / (2 \cdot 20 \times 0,071\text{ см}^2) = 700\text{ Гс}$ .
2. Поскольку удельные потери в сердечнике составляют  $150\text{ мВт/см}^3$ , а его объем  $V_e = 0,2\text{ см}^3$ , то  $150\text{ мВт/см}^3 \cdot 0,2\text{ см}^3 = 30\text{ мВт}$ .
3. Потери в обмотке определим из соотношения  $P = I^2R$ :  
 $P = (2\text{ А})^2 \cdot 0,06\text{ Ом} = 240\text{ мВт}$ .  
Как видно из этого примера, потери в обмотке существенно превышают потери в сердечнике.

### ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Всю приведенную в этой части информацию можно найти в ката-

логах компании. Bourns предлагает широкий выбор катушек индуктивности. Их номинальная величина находится в пределах 0,1 мкГн...15 мГн, а номинальный ток изменяется в диапазоне 60 мА...43 А (СКВ); при этом ток насыщения достигает 65 А. Чтобы выбрать из этого множества требуемую катушку, необходимо последовательно пройти несколько этапов. Ниже приведен метод выбора, предлагаемый Bourns.

1. Выберите компоненты, отвечающие требованию по максимальному току.
2. Из них отберите индукторы с необходимым значением индуктивности.
3. Проведите отбор по требуемому сопротивлению обмотки (DC resistance).
4. Чтобы в еще большей степени сузить диапазон поиска, выберите катушку индуктивности, подходящую по конструкции или по типу сердечника.
5. Выберите наименование катушки по каталогу.
6. При необходимости используйте таблицу перекрестных ссылок с новейшей продукцией.

### ТЕНДЕНЦИИ НОВЫХ ПРОДУКТОВ BOURNS

Bourns более 40 лет специализируется на катушках индуктивности и электромагнитных компонентах, предлагая изделия, отвечающие требованиям сегодняшнего дня. Такие приложения как сотовые телефоны, планшеты, портативные компьютеры, промышленное оборудование, электроника для развлечений предъявляют новые требования к индукторам, их размерам и характеристикам. Ниже приведено краткое описание нескольких семейств катушек индуктивности. Их внешний вид показан на рисунке 9.

**Серия SDR** (см. рис. 9а). Неэкранированные силовые катушки индуктивности для поверхностного монтажа. Номинальные значения индуктивности находятся в пределах 0,68 мкГн...15 мГн, а величина тока составляет 0,06–16 А. Катушки индуктивности выпускаются в корпусах различной формы — круглые, овальные, прямоугольные; минимальная высота корпуса: 2,2 мм.

**Серия SRN** (см. рис. 9б). Полуэкранированные силовые катушки индуктивности для поверхностного монтажа.

Катушки залиты магнитной эпоксидной смолой, играющей роль экрана. Их электромагнитное излучение заметно ниже, чем у неэкранированных индукторов. Они дешевле и занимают меньше места на плате по сравнению с экранированными индукторами. Минимальная высота катушки индуктивности: 1 мм. Диапазон номинальных значений индуктивности серии: 0,5–470 мкГн. Максимальный ток достигает 10 А.

**Серия SRR** (см. рис. 9в). Экранированные силовые катушки индуктивности для поверхностного монтажа в круглых и прямоугольных корпусах. Диапазон номинальных значений индуктивности этой серии: 0,47–15000 мкГн. Токи катушек индуктивности: 0,07–20 А. Устройства этой серии хорошо подходят для портативной техники, ЖК-дисплеев, плееров и т.д. Катушки индуктивности соответствуют требованиям директивы RoHS.

**Серия SRU** (см. рис. 9г). Новая серия экранированных катушек индуктивности. Их форма близка к округлой, что упрощает монтаж, а минимальная высота корпуса достигает 0,9 мм. Уникальная особенность этих катушек индуктивности состоит в том, что ряд компонентов этой серии имеет одинаковые размеры для монтажа на плату, что позволяет заменять устройства без доработок платы. Восьмиугольная форма корпуса позволяет без ошибок осуществлять монтаж, а также удобна для транспортировки — уменьшает возможность вращения компонентов в ленточной упаковке. Заметим, что экранированные катушки индуктивности большой мощности становятся все более популярными в различных приложениях.

**Серия SRP** (см. рис. 9д). Поскольку катушек индуктивности этого типа предназначены для цепей с частотой до 5 МГц, их обмотка выполнена не круглой, а плоской проволокой. Такая обмотка обеспечивает компактность устройств; они имеют плоскую форму, благодаря чему их можно устанавливать друг на друга. Обмотка из плоской проволоки позволяет использовать 95% объема, что явно превышает показатель использования объема в 70% при намотке круглой проволо-

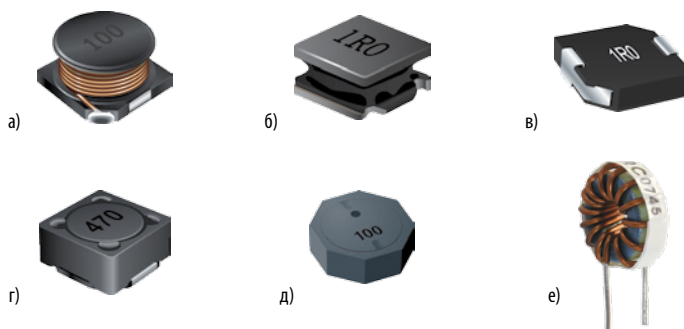


Рис. 9. Некоторые семейства катушек индуктивности Bourns: а) серия SDR; б) серия SRN; в) серия SRR; г) серия SRR; д) серия SRU; е) тороидальные катушки индуктивности J.W. Miller для монтажа в отверстия

кой. Кроме того, плоская проволока имеет большую площадь поверхности, что уменьшает сопротивление переменному току. Особенно заметно это проявляется на высокой частоте, когда начинает сказываться поверхностный эффект, под действием которого ток вытесняется из внутренней области проводника и распределяется по его поверхности.

Приведем пример. При одинаковой площади сечения 0,64 мм<sup>2</sup> площадь поверхности обмотки из плоского провода составит 4,64 мм<sup>2</sup>, а из круглого — 2,83 мм<sup>2</sup>. Прессованный сердечник катушки индуктивности также позволяет максимально эффективно использовать его объем и уменьшить размеры. Пространство внутри сердечника заполнено магнитным компаундом, который увеличивает индуктивность и одновременно служит экраном.

В настоящее время компания готовится внедрить более двух дюжин новых серий силовых катушек индуктивности для поверхностного монтажа. Среди них многие специально разработаны для автомобильной электроники. Они будут производиться в экранированном и неэкранированном исполнении и отвечают требованиям стандарта AEC-Q200.

#### ЗАКАЗНЫЕ РЕШЕНИЯ BOURNS

Чтобы дополнить свой более чем 40-летний опыт производства и разработки катушек индуктивности, компания Bourns приобрела подразделение электромагнитных компонентов компании J.W. Miller, за плечами которой уже 70 лет лидерства на рынке

катушек индуктивности. Имеющийся у Bourns опыт позволяет разрабатывать и производить устройства по требованию заказчика. При этом весь процесс занимает всего 6–8 недель. Высокая квалификация инженеров компании позволяет разрабатывать катушки индуктивности, отвечающие всем требованиям заказчика, в т.ч. по току, индуктивности, типу сердечника и корпуса.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Чтобы соответствовать современным требованиям рынка портативной электроники, необходимо повышать надежность и уменьшать размеры катушек индуктивности. Понимание физических принципов работы позволяет правильно выбрать силовой индуктор, а не руководствоваться догадками. Репутация компании Bourns не оставляет сомнения в том, что ее продукция отвечает всем требованиям, среди которых — гибкость модификаций, стандартные монтажные размеры, компактность и т.д. Специалисты компании смогут найти оптимальные решения для любого заказчика.

*Для запроса образцов или дополнительной информации обращайтесь в российское представительство или к официальным дистрибьюторам по адресу [www.bourns.com/Sales.aspx](http://www.bourns.com/Sales.aspx).*

*Региональное представительство Bourns Inc. по России и странам СНГ:*

*Михаил Стариченков  
тел.: +7(812)646-7572*

*эл. почта: [Mikhail.Starichenkov@bourns.com](mailto:Mikhail.Starichenkov@bourns.com)*