

# Расчёт трансформатора для AC/DC-преобразователей на микросхемах Silan Microelectronics

ВЛАДИМИР БУРЛАЕНКО, [burlaenko@e-neon.ru](mailto:burlaenko@e-neon.ru)

*В статье подробно рассказывается, как спроектировать обратноходовый преобразователь, в том числе рассчитать трансформатор для микросхем компании Silan Microelectronics. Расчетные соотношения иллюстрированы графиками.*

Микросхемы серии SD414X, SD686X и SDH688X (см. табл.1) предназначены для построения AC/DC импульсных источников питания (ИИП), совмещающих в одном корпусе ШИМ, цепи управления и защиты, высоковольтный полевой транзистор. Подобная комбинация устройств значительно сокращает количество компонентов схемы, снижает габариты и массу. При этом ИИП характеризуется высокой степенью защиты от перегрева и перегрузки, хорошей электромагнитной совместимостью с другими устройствами. Если учесть экономию за счёт меньшего числа внешних компонентов, меньшего числа операций по сборке и наладке таких ИИП, то выгода при производстве становится очевидной. Ориентировочная стоимость самой мощной ИС Silan (20 Вт) серии SD686x составляет 14 руб. с НДС, и это основное отличие от продукции конкурентов.

## ПРИНЦИП РАБОТЫ ОБРАТНОХОДОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Принцип действия обратноходового преобразователя подобен принципу действия повышающего преобразователя, в котором энергия накапливается в дросселе, когда ключ замкнут, и отдаётся в нагрузку при разомкнутом ключе. Магнитные сердечники не очень хорошо «умеют» накапливать энергию магнитного поля.

Эффективные (с высокой магнитной проницаемостью) сердечники насыщаются уже при малом уровне напряжённости магнитного поля. В обратноходовой схеме энергия в действительности накапливается в воздушном зазоре дросселя (см. рис.1). Сердечник же предоставляет энергии экранированный путь с малым магнитным сопротивлением от обмоток к воздушному зазору.

Обратноходовая схема может работать как в непрерывном, так и в прерывистом режимах. В непрерывном режиме в одной из обмоток дросселя всегда течёт ток. В прерывистом режиме ток во всех обмотках в определённый период рабочей частоты снижается до нуля, как

и накопленная дросселем энергия. Каждый режим имеет свои достоинства и недостатки.

Главным преимуществом непрерывного режима работы является то, что импульсы тока во вторичной цепи имеют относительно большую длительность, что позволяет применять фильтрующий конденсатор небольшой ёмкости с большим эквивалентным последовательным сопротивлением (ЭПС). Первичная обмотка имеет довольно большую индуктивность и небольшой пиковый ток, поэтому её сравнительно несложно рассчитать. Пиковый ток в непрерывном режиме составляет примерно 1/2 от тока в прерывистом режиме при одинаковом уровне мощности.

Принципиальный недостаток непрерывного режима состоит в том, что контур управления имеет нуль в правой полуплоскости передаточной функции, а это усложняет проведение коррекции крутизны контура управления (однако коэффициент обратной связи зависит не от тока нагрузки, а только от коэффициента заполнения и входного напряжения). Проблемы с коррекцией крутизны в контроллерах с управлением по току возникают при непрерывном режиме работы и коэффициенте заполнения более 50%.

Рассеивание мощности в непрерывном режиме работы при отпирании ключа довольно значительное, потому что коммутация ключа происходит при высоком токе и большом напряжении. Ещё одна проблема возникает в результате протекания тока обратного восстановления в выходных выпрямителях. В момент включения из-за наличия тока обратного восстановления происходит дополнительный скачок тока.

В схеме, использующей прерывистый режим работы, сделан ряд упрощений ради увеличения пиковых токов. Рассеивание мощности при отпирании ключа незначительно, потому что ток начинает течь с нуля, и к ключу приложено только входное напряжение. Выходной ток некоторую часть периода равен нулю, поэтому ток обратного восстановления диода отсутствует и не влияет на ключ в момент его переключения. В прерывистом режи-

Таблица 1. Технические характеристики микросхем серий SD414X, SD686X и SDH688X

Наименование	Частота, кГц	Выходная мощность, Вт		Корпус
		85 – 265 VAC	190 – 265 VAC	
SD4841	25...67	8	10	DIP-8-300-2.54
SD4842		10	12	
SD4843		12	14	
SD4844		14	16	
SD6861		8	10	
SD6863		12	14	
SD6864		18	20	
SDH6881		8	10	
SDH6883		12	14	
SDH6884		14	16	

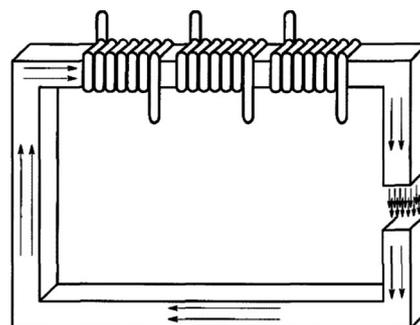


Рис. 1. Схематическое изображение ферритового сердечника с тремя обмотками

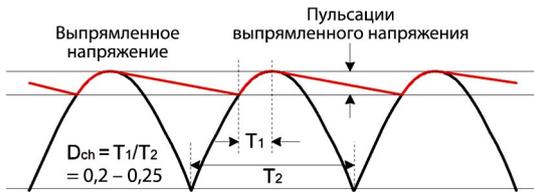


Рис. 2. Сглаженное выпрямленное напряжение

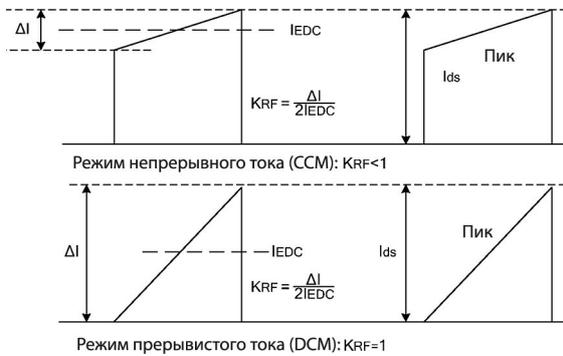


Рис. 3. Ток стока и коэффициент пульсаций  $K_{RF}$  MOSFET

ме передаточная функция контура управления практически линейна и не имеет полюса в правой полуплоскости, поэтому коррекция крутизны совсем не нужна. Однако сопротивление нагрузки является одним из коэффициентов в уравнении контура. Вследствие этого в режиме работы с разомкнутым контуром его управляемость ниже, чем в непрерывном режиме. Обычно с этим не возникает проблем, если реализована соответствующая коррекция, и контур замкнут. Величина зазора в сердечнике дросселя при прерывистом режиме становится критичной, т.к. более высокому пиковому току легче насытить сердечник.

Переменная магнитная индукция в сердечнике довольно велика, поэтому в прерывистом режиме расчёт потерь в сердечнике приобретает большое значение. Выходные пульсации в прерывистом режиме обычно выше, потому что выше переменный ток через ЭПС конденсатора, и конденсатор должен обеспечивать полный ток нагрузки более длительную часть периода коммутации. Предпочтительным, особенно для маломощных схем, прерывистый режим делают простота проектирования, повторяемость и лёгкость коррекции.

Трансформаторы и диоды имеют паразитные ёмкости, что может привести к нежелательным последствиям. Вторичные ёмкости вместе со вторичными индуктивностями рассеяния могут сформировать высокочастотный резонансный контур, который возбуждается при запирании диода. Этот эффект сильнее проявляется, когда используются диоды с большим временем обратного восстановления. Паразитный резонансный контур генерирует шумы и передаёт переменный сигнал обратно в цепь первичной обмотки.

### ПРОЦЕСС ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Возьмём за основу микросхему фирмы Silan SD4841, рабочая частота которой 67 кГц. Выходная мощность определяется выходными параметрами:

$$P_O = V_{11} + V_{212} + V_{33} = 5,74(\text{Вт}) \quad (1)$$

Эффективность  $\eta_{\text{eff}} = 65\%$ , следовательно, выходная мощность  $P_{\text{in}} = \frac{P_O}{\eta_{\text{eff}}}$ :

$$P_{\text{in}} = \frac{5,74}{0,65} = 8,8(\text{Вт}). \quad (2)$$

Для широкого диапазона входных напряжений ( $90 \dots 264 V_{\text{RMS}}$ ), максимальная  $V_{\text{DC}}$  рассчитывается по формуле:

$$\Delta V_{\text{DC}}^{\text{max}} = \frac{P_{\text{in}}(1-D_{\text{ch}})}{\sqrt{2}V_{\text{line}}^{\text{min}}2f_L C_{\text{DC}}},$$

где  $D_{\text{ch}}$  — коэффициент периода заряда  $C_{\text{DC}}$ . Как видно из рисунка 2, он составляет около 0,2. Для широкого диапазона входного напряжения он составляет 10—15%  $\sqrt{2}V_{\text{line}}^{\text{min}}$ . Тогда  $\text{max}/\text{min } V_{\text{DC}}$  будет определяться как:

$$V_{\text{DC}}^{\text{min}} = \sqrt{2}V_{\text{line}}^{\text{min}} - \Delta V_{\text{DC}}^{\text{max}}, \text{ т.е. } V_{\text{DC}}^{\text{min}} = \quad (3)$$

$$= \sqrt{2} \times 90 - (\sqrt{2} \times 90 \times 0,2) = 102(\text{В})$$

$$V_{\text{DC}}^{\text{max}} = \sqrt{2}V_{\text{line}}^{\text{max}} \text{ т.е. } V_{\text{DC}}^{\text{max}} = \quad (4)$$

$$= \sqrt{2} \times 264 = 375(\text{В})$$

### РАСЧЁТ КОЛИЧЕСТВА ВИТКОВ В ОБМОТКЕ

$D_{\text{max}}$  (максимальный рабочий цикл) меньше, чем 0,5. Отражённое напряжение на первичной обмотке и номинальное напряжение MOSFET-транзистора определяется следующим образом:

$$V_{\text{RO}} = \frac{D_{\text{max}}}{1-D_{\text{max}}} \times V_{\text{DC}}^{\text{min}} \quad (5)$$

$$V_{\text{ds}}^{\text{nom}} = \sqrt{2}V_{\text{line}}^{\text{max}} + V_{\text{PO}} \quad (6)$$

При уменьшении  $D_{\text{max}}$  напряжение на MOSFET-транзисторе будет уменьшаться. Следовательно,  $D_{\text{max}}$  выбирается в допустимом диапазоне напряжений и равно 0,45. Когда присутствует несколько выходных обмоток,  $D_{\text{max}}$  рассчитывается по минимальному выходному напряжению.

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{V_{\text{DC}}^{\text{min}}}{V_r} \times \frac{D}{1-D} \quad (7)$$

где  $V_r = V_0 + V_f$ ,  $V_r$  — напряжение падения на выходном выпрямителе,  $V_f = 0,7$  (В), таким образом  $V_r = 3,3 + 0,7 = 4$  (В), где  $D = 0,45$ ,  $V_{\text{DC}}^{\text{min}} = 102(\text{В})$ .

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{102}{4} \times \frac{0,45}{1-0,45} = 20,8 \quad (8)$$

Округлив, получаем:

$$\frac{N_p}{N_s} = 20. \quad (9)$$

### ИНДУКТИВНОСТЬ ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКИ

Есть два рабочих режима: непрерывный режим проводимости (CCM) и прерывистый режим проводимости (DCM). Рабочий режим определяется током нагрузки и входным напряжением. Следовательно, основная индуктивность устанавливается согласно максимальному выходному току и минимальному входному напряжению.

$I_{\text{ds}}^{\text{пик}}$  проанализируем ниже (см. рис.3). В общем, для DCM  $K_{\text{RF}} = 1$ . Для CCM  $K_{\text{RF}} < 1$ . Для широкого диапазона входного напряжения  $K_{\text{RF}} = 0,4 \dots 0,8$ . Возьмём  $K_{\text{RF}} = 0,7$ , пиковый ток MOSFET и ток RMS представлены следующим образом:

$$K_{\text{RF}} = \frac{\Delta I}{2I_{\text{EDC}}} \quad (10)$$

( $I_{EDC}$  — средний ток, его величина показана на рисунке 3);

$$I_{ds}^{пик} = I_{EDC} + \frac{\Delta I}{2} \quad (11)$$

$$I_{ds}^{rms} = \sqrt{\left[3(I_{EDC})^2 + \left(\frac{\Delta I}{2}\right)^2\right] \frac{D_{max}}{3}} \quad (12)$$

$$I_{EDC} = \frac{P_{in}}{V_{DC}^{min} D_{max}} \quad (13)$$

$$\Delta I = \frac{V_{DC}^{min} D_{max}}{L_p f} \quad (14)$$

$$\text{для } L_{pk} = \frac{V_{DC} T_{on}}{I_{pk}}; L_{pk} = \frac{V_{DC}^{min} D_{max}}{\Delta I f} \quad (15)$$

$L_{pk}$  рассчитывается ниже, согласно формулам (10), (13) и (15):

$$L_{pk} = \frac{(V_{DC}^{min})^2}{2P_{in} f K_{rf}}, \text{ т.е.} \quad (16)$$

$$L_{pk} = \frac{(102 \times 0,45)^2}{2 \times 8,8 \times 65 \times 0,7} = 2,6 \text{ (мГн)}$$

#### РАСЧЁТ МИНИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ВИТКОВ ПЕРВИЧНОЙ ОБМОТКИ

Выбранный тип трансформатора — EE-19, эффективная площадь которого  $A_e = 23,0 \text{ мм}^2$ . Согласно закону Фарадея, электромагнитная индукция

$$E = N A_e (dB / dt), \quad (17)$$

$$N_p = \frac{V_{DC}^{min} T_{om}}{A_e \Delta B}$$

где  $\Delta B$  — изменение плотности магнитного потока (Т), что составляет 0,25~0,30 Т для большинства ферритовых стержней  $\Delta B = 0,28$  подходит согласно изменениям температуры, рамкам проекта и т.д. Таким образом:

$$N_p = \frac{102 \times 0,45}{65 \times 23 \times 0,28} \times 1000 = 110 \quad (18)$$

рассчитывается согласно  $N_p = 110$  (18) и (9).

$$N_{3,3} = 5,5. \quad (19)$$

округляем до 6 и  $D_{max} \leq 0,45$ . Согласно формуле (7),  $N_p$  будет в диапазоне  $110 \leq N_p \leq 120$ . На основании  $N_{3,3} = 6$ , рассчитаем количество витков  $N_5$  и  $N_{12}$ . Должно быть учтено напряжение выпрямительного диода  $V_p$ . Падение напряжения на диоде  $V_F = 0,6$  (В). Таким образом  $V_{N5} = 5,6$ ;  $V_{12} = 12,6$ ;  $V_{N3,3} = 3,3V + 0,6V = 3,9V$ . Следовательно, количество витков рассчитывается следующим образом:

$$N_5 = \frac{5,6}{V_{3,3}/6} \approx 9 \quad (20)$$

$$N_{12} = \frac{12,6}{V_{N3,3}/6} \approx 19 \quad (21)$$

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА ПРОВОДА СОГЛАСНО ТОКУ RMS

Сначала должны быть определены режимы соединения обмоток. Поскольку обмотки намотаны отдельно, ток обмотки составляет 0,85 А. Ток первичной обмотки представляет собой волну в виде последовательности треугольных импульсов. Рассчитывается по формуле:

$$I_{ds}^{rms} = \sqrt{\left[3(I_{EDC})^2 + \left(\frac{\Delta I}{2}\right)^2\right] \frac{D_{max}}{3}} \text{ т.е.}$$

$$I_{ds}^{rms} = \sqrt{\left[3 \times 0,19^2 + \left(\frac{0,26}{2}\right)^2\right] \times \frac{0,45}{3}} = 0,13(A)$$

$$I_{ds}^{rms} = 0,13A \quad (22)$$

Рассмотрим обмотку на 3,3 В. Выходной ток равен 0,85 А, следовательно, выходная мощность

$$P_{3,3} = V_{3,3} I_{3,3} = 3,3 \times 0,85 = 2,8 \text{ (Вт)}. \quad (23)$$

Как указано выше,  $\eta_{eff} = 65\%$ , соответственно входная мощность для 3,3 В составляет:

$$P_{in}^{3,3} = \frac{P_{3,3}}{\eta} = 4,3 \text{ (Вт)} \quad (24)$$

Согласно формулам (10) и (13), получаем:

$$I_{Пик}^{3,3} = 0,16 \text{ (А)} \quad (25)$$

$$I_{rms}^{(primary)} = \frac{I_p (N_p / N_s)}{\sqrt{3}} \sqrt{1-D} \quad (26)$$

Таким образом,  $I_{3,3}^{rms} = 1,3$  (А).

Ток RMS обмоток 5В/12В может быть рассчитан таким же образом, что составит  $I_5^{rms} = 0,754(A)$ ,  $I_{12}^{rms} = 0,09(A)$ .

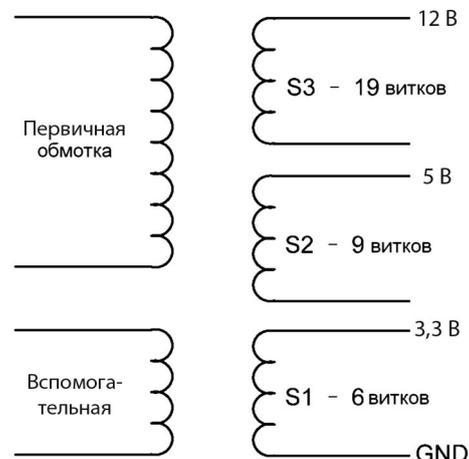


Рис. 4. Структурная схема обмоток трансформатора

Максимальное напряжение и ток RMS могут быть выражены так:

$$V_{D(n)} = V_{o(n)} + \frac{V_{DC}^{max} (V_{o(n)} + V_{F(n)})}{V_{RO}} \quad (27)$$

$$I_{D(n)}^{rms} = I_{ds}^{rms} \sqrt{\frac{1-D}{D_{max}}} \times \frac{V_{RO} K_{L(n)}}{(V_{O(n)} + V_{F(n)})} \quad (28)$$

Круговой мил (CM) обычно используется для расчёта диаметра провода,  $CM = 5(A/ммP^2)$  для первичной обмотки и  $CM = 8(A/мм^2)$  для вторичной.

$$\varnothing dp = 2 \sqrt{\frac{I_p^{rms}}{5_{TT}}}$$

$$\varnothing dp = 2 \times \sqrt{\frac{0,13}{5 \times 3,14}} = 0,18(\text{мм})$$

$$\varnothing ds = 2 \sqrt{\frac{I_s^{rms}}{8_{TT}}}$$

$$\varnothing d_{3,3} = 2 \times \sqrt{\frac{1,3}{8 \times 3,14}} = 0,45(\text{мм})$$

$$\varnothing d_5 = 2 \times \sqrt{\frac{0,754}{8 \times 3,14}} = 0,35(\text{мм})$$

$$\varnothing d_{12} = 2 \times \sqrt{\frac{0,09}{8 \times 3,14}} = 0,12(\text{мм})$$

Количество витков вспомогательной обмотки  $N_b$ , считаем согласно следующему соотношению:

$$\frac{N_{3,3}}{N_b} = \frac{V_{N_{3,3}}}{12}, \quad N_b \approx 19.$$

#### ПАРАМЕТРЫ РАССЧИТАННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

$N_p = 120$  (количество витков первичной обмотки);  
 $N_{3,3} = 6$  (количество витков обмотки 3,3 В);  
 $N_5 = 9$  (количество витков обмотки 5 В);  
 $N_{12} = 19$  (количество витков обмотки 12 В);  
 $N_b = 19$  (количество витков вспомогательной обмотки);  
 $L_p = 2,6$  мГн (индуктивность вспомогательной обмотки);  
 $\varnothing dp = 0,18$  мм (диаметр первичной обмотки);  
 $\varnothing d_{3,3} = 0,45$  мм (диаметр обмотки 3,3 В);  
 $\varnothing d_5 = 0,35$  мм (диаметр обмотки 5);  
 $\varnothing d_{12} = 0,12$  мм (диаметр обмотки 12В).

#### ТИПЫ ОБМОТОК

**Последовательная обмотка.** При последовательной намотке первичной, вторичной и т.д. обмоток, индуктивность рассеяния составляет ~ 5%. Последовательная обмотка характеризуется низким уровнем электромагнитных помех, т.к. имеется только одна контактная поверхность между первичной и вторичной обмотками, но при этом эффективность преобразования хуже.

**Промежуточная («сэндвич») обмотка.** Вторичная обмотка находится внутри первичной, которая разделена на две обмотки. Индуктивность рассеяния составляет приблизительно 1—3%, характеризуется большим уровнем электромагнитных помех, но эффективность преобразования при этом лучше.

Первичная обмотка должна всегда быть самой внутренней, что минимизирует длину витка и уменьшает емкость обмотки. Если первичная обмотка будет внутренней, то уменьшатся помехи, наводимые от других элементов, расположенных в непосредственной близости от трансформатора. Кроме того, для источников питания AC/DC между первичными и вторичными обмотками должна быть предусмотрена трехслойная изоляция, а для DC/DC источников питания — двухслойная.

Silan Microelectronics имеет большой опыт в изготовлении компонентов ИИП. В числе покупателей продукции компании такие известные бренды как FSP, Astec.

Инженеры компании «НЕОН» готовы принять технические задания на разработку ИИП и совместно с инженерами Silan Microelectronics разработать схемное решение, развести печатную плату, предоставить гербер и BOM. Со всеми вопросами просим обращаться к официальному дистрибьютору Silan в России и Болгарии ООО «НЕОН-ЭК»: [www.e-neon.ru](http://www.e-neon.ru).

**Разъёмы серии «NE» для сигнальных и силовых цепей**

Комплекты разъёмов Charlie Con серии «NE» идеально подходят для внутреннего и наружного осветительного монтажа, коммутации приборов малой мощности и сигнальных цепей. Поставляются с количеством контактов от двух до восьми и имеют исполнение IP65, IP68. Разъёмы изготовлены из пластмассы, обладают защитой от неправильной коммутации.

**Герметичные разъёмы Charlie Con:**

- степень защиты IP65, IP68
- рабочее напряжение до 250 В
- максимальный ток — 8 А
- качественный материал изоляции
- низкая цена

Все разъёмы имеют сертификаты соответствия (ГОСТ Р МЭК 60227-5-2009 и ГОСТ Р 52373-2005).

<p><b>САНКТ-ПЕТЕРБУРГ</b>          Россия, 199178, С.-Петербург, а/я 101, ВО, 10-я линия, д. 39          Тел./факс: (812)335-00-65          многоканальный (812) 335-02-60 (2 линии)</p>	<p><b>МОСКВА</b>          115054, Москва, Озерковская наб., д.22/24, офис №14, ст. метро «Новокосинская». Тел./факс: (495)953-24-71, (495)275-54-62</p>	<p><b>ВОРОНЕЖ</b>          Россия, 394063, Воронеж, Ленинский пр-т, 160а          Тел./факс: (473)239-44-46, (473)239-42-41, (473)239-44-50, (473)224-30-44</p>
------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

[www.e-neon.ru](http://www.e-neon.ru)