

РАСЧЕТ СИЛОВОГО КАСКАДА ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

БРИГИТТА ХАУКЕ (BRIGITTE HAUKE), Texas Instruments

В статье приведены уравнения для расчета силового каскада повышающего преобразователя, построенного на базе микросхемы с интегрированным ключом и работающего в режиме с непрерывным током через индуктивность (Continuous Conduction Mode — CCM). Статья представляет собой перевод [1].

БАЗОВАЯ КОНФИГУРАЦИЯ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

На рисунке 1 приведена базовая конфигурация повышающего преобразователя со встроенным ключом. Часто в преобразователе с меньшей потребляемой мощностью вместо диода используется второй ключ. В этом случае можно использовать все уравнения, приведенные в данной статье, кроме выражения для рассеиваемой мощности диода.

Необходимые параметры силового каскада

Для расчета силового каскада требуются следующие четыре параметра.

1. Диапазон входного напряжения: $V_{IN(min)}$ и $V_{IN(max)}$.
2. Номинальное выходное напряжение: V_{OUT} .
3. Максимальный выходной ток: $I_{OUT(max)}$.
4. Для построения повышающего преобразователя используется интегральная микросхема. Поэтому некоторые параметры для расчета следует взять из документации на эту микросхему.

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО ТОКА КЛЮЧА

Первым шагом в расчете тока ключа является определение коэффициента заполнения D для минимального входного напряжения. При минимальном входном напряжении обеспечивается максимальный ток ключа.

Коэффициент заполнения можно определить по формуле:

$$D = 1 - \frac{V_{IN(min)} \eta}{V_{OUT}}, \quad (1)$$

где $V_{IN(min)}$ — минимальное входное напряжение, V_{OUT} — заданное выходное напряжение, η — КПД преобразователя, приблизительно равный 80%.

Преобразователь рассеивает мощность, и расчет с учетом КПД позволяет получить более реальное значение коэффициента заполнения.

Можно использовать любое значение КПД, например 80% (которое является вполне реальным значением КПД для наихудшего случая повышающего преобразователя), или взять значение КПД из раздела «Типовые характеристики» в документации на выбранный преобразователь [4, 5].

Следующим шагом в расчете максимального тока ключа является определение тока пульсаций катушки индуктивности. В документации на преобразователи обычно указывают определенную катушку индуктивности или несколько типов катушек, которые могут использоваться совместно с микросхемой. Поэтому для расчета тока пульсаций следует либо использовать рекомендованное значение индуктивности, либо величину средней индуктивности из рекомендованного диапазона значений, либо, если ничего не указано в документации, величину, рассчитываемую по уравнению, указанным в разделе «Выбор катушки индуктивности» данной статьи.

Ток пульсаций катушки индуктивности определяется по формуле:

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN(min)} D}{f_s L}, \quad (2)$$

где $V_{IN(min)}$ — минимальное входное напряжение, D — коэффициент заполнения, рассчитанный из уравнения 1, f_s — минимальная частота коммутации преобразователя, L — выбранное значение индуктивности.

Теперь следует определить, может ли выбранная микросхема обеспечить максимальный выходной ток:

$$I_{MAXOUT} = \left(I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot (1 - D), \quad (3)$$

где $I_{LIM(min)}$ — минимальная величина предельного тока встроенного ключа (дана в документации), ΔI_L — ток пульсаций катушки, рассчитанный из уравнения 2, D — коэффициент заполнения, рассчитанный из уравнения 1.

Если рассчитанное значение максимального выходного тока выбранной микросхемы I_{MAXOUT} меньше максимального значения выходного тока, требующегося в системе, следует использовать микросхему с более высоким предельным током ключа.

Только если полученная величина I_{MAXOUT} лишь немного меньше нужного значения, можно использовать выбранную микросхему с катушкой, которая имеет более высокую индуктивность, если она находится в рекомендуемом диапазоне. Более высокая индуктивность снижает ток пульсаций и, кроме того, увеличивает максимальный выходной ток.

Если рассчитанное значение выше максимального выходного тока приложения, то максимальный ток ключа в системе вычисляется по формуле:

$$I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{OUT(max)}}{1 - D}, \quad (4)$$

где ΔI_L — ток пульсаций катушки, рассчитанный из уравнения 2, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток, необходимый в приложении.

Это пиковый ток, который должны выдерживать катушка индуктивности, встроенные ключи и внешний диод.

ВЫБОР КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Часто в документации задан диапазон рекомендуемых величин индуктивности. В этом случае следует выбрать индуктивность из данного диапазона. Чем выше величина индуктивности,

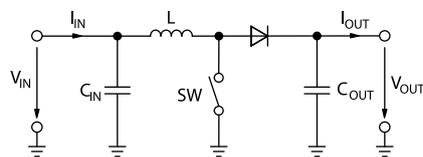


Рис. 1. Силовой каскад повышающего преобразователя

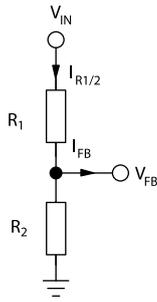


Рис. 2. Резистивный делитель для установки выходного напряжения

тем выше максимальный выходной ток из-за сниженного тока пульсаций.

Чем меньше индуктивность, тем меньше габариты устройства. Заметим, что катушка должна всегда иметь номинальный ток выше максимального тока из уравнения 4, потому что ток увеличивается при уменьшении индуктивности.

Если для микросхемы не указан диапазон индуктивностей, можно воспользоваться следующим уравнением, которое дает достаточно точную оценку величины индуктивности:

$$L = \frac{V_{IN}(V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L f_s V_{OUT}}, \quad (5)$$

где V_{IN} — типовое входное напряжение, V_{OUT} — заданное выходное напряжение, f_s — минимальная частота коммутации преобразователя, ΔI_L — приблизительная величина тока пульсаций катушки (см. ниже).

Ток пульсаций катушки индуктивности нельзя рассчитать с помощью уравнения 2, так как индуктивность неизвестна. Ток пульсаций катушки индуктивности можно оценить как приблизительно равный величине 20—40% от выходного тока:

$$\Delta I_L = (0,2 - 0,4) I_{OUT(max)} \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}, \quad (6)$$

где ΔI_L — приблизительная величина тока пульсаций катушки, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения.

ВЫБОР ВЫПРЯМИТЕЛЬНОГО ДИОДА

Для снижения потерь следует использовать диод Шоттки. Номинальная величина прямого тока диода равна максимальному выходному току:

$$I_F = I_{OUT(max)}, \quad (7)$$

где I_F — средний прямой ток выпрямительного диода, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения.

Диоды Шоттки имеют номинальное значение пикового тока намного выше средней величины. Поэтому более высокое значение пикового тока в системе легко реализуется.

Другим параметром, который следует проверить, является рассеиваемая мощность диода. Она не должна превышать величину:

$$P_D = I_F V_F, \quad (8)$$

где I_F — среднее значение прямого тока выпрямительного диода, V_F — прямое напряжение выпрямительного диода.

УСТАНОВКА ВЫХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Почти все преобразователи устанавливают выходное напряжение с помощью резистивного делителя (который встроен в микросхему, если преобразователь имеет фиксированное выходное напряжение).

Делитель напряжения можно рассчитать при заданном напряжении цепи обратной связи V_{FB} и токе смещения цепи обратной связи I_{FB} .

Ток через резистивный делитель должен быть, по крайней мере, в 100 раз больше тока смещения цепи обратной связи:

$$I_{R1/2} \geq 100 I_{FB}, \quad (9)$$

где $I_{R1/2}$ — ток через резистивный делитель на GND, I_{FB} — ток смещения цепи обратной связи из документации.

Это вносит погрешность в измерения напряжения, не превышающую 1%. Ток также может быть немного выше. Единственным недостатком меньшей величины сопротивления являются более высокие потери мощности в резистивном делителе, однако точность будет немного выше.

При указанных выше допущениях резисторы можно рассчитать следующим образом:

$$R_2 = \frac{V_{FB}}{I_{R1/2}}, \quad (10)$$

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right), \quad (11)$$

где R_1, R_2 — резистивный делитель (см. рис. 2), V_{FB} — напряжение цепи обратной связи из документации, $I_{R1/2}$ — ток через резистивный делитель на GND, рассчитанный из уравнения 9, V_{OUT} — заданное выходное напряжение.

ВЫБОР ВХОДНОГО КОНДЕНСАТОРА

Минимальная величина входной емкости обычно дается в документации на микросхему. Конденсатор минимальной емкости необходим для стабилизации входного напряжения в соответствии с требованиями по пиковому току импульсного источника питания.

Рекомендуется использовать керамические конденсаторы с низкой

величиной эквивалентного последовательного сопротивления (ESR). Материал диэлектрика должен быть X5R или лучше. В противном случае элемент конденсатора теряет часть своей емкости из-за постоянного смещения или при изменении температуры [8, 9].

Величина емкости может быть увеличена, если входное напряжение содержит помехи.

ВЫБОР ВЫХОДНОГО КОНДЕНСАТОРА

Рекомендуется использовать керамические конденсаторы с низкой величиной ESR для минимизации пульсаций выходного напряжения. Лучше выбирать керамические конденсаторы с материалом диэлектрика X5R или лучше [8, 9].

Если преобразователь имеет внешнюю компенсацию, можно использовать любой номинал конденсатора выше минимального значения, рекомендуемого в документации, но компенсацию необходимо отрегулировать в соответствии с используемой выходной емкостью.

В преобразователе с внутренней компенсацией использовать рекомендуемые номиналы индуктивности и конденсатора или следует придерживаться рекомендаций по выбору выходного конденсатора для данного приложения исходя из соотношения LC.

При внешней компенсации можно использовать следующие уравнения для емкости выходного конденсатора для заданного уровня пульсаций выходного напряжения:

$$C_{OUT(min)} = \frac{I_{OUT(max)}(1-D)}{f_s \Delta V_{OUT}}, \quad (12)$$

где $C_{OUT(min)}$ — минимальная выходная емкость, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения, D — рабочий цикл, рассчитанный из уравнения 1, f_s — минимальная частота коммутации преобразователя, ΔV_{OUT} — заданная величина пульсаций выходного напряжения.

Эквивалентное последовательное сопротивление выходного конденсатора увеличивает уровень пульсаций, который можно найти из следующего уравнения:

$$\Delta V_{OUT(ESR)} = ESR \left(\frac{I_{OUT(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \right), \quad (13)$$

где $\Delta V_{OUT(ESR)}$ — дополнительные пульсации выходного напряжения из-за ESR, ESR — эквивалентное последовательное сопротивление используемого выходного конденсатора, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения, D — рабочий цикл, рассчитанный из уравнения 1, ΔI_L — величина тока пульсаций катушки из уравнений 2 или 16.

УРАВНЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА СИЛОВОГО КАСКАДА ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Максимальная величина рабочего цикла:

$$D = 1 - \frac{V_{IN(min)}\eta}{V_{OUT}}, \quad (14)$$

где $V_{IN(min)}$ — минимальное входное напряжение, V_{OUT} — заданное выходное напряжение, η — КПД преобразователя, приблизительно равный 85%.

Ток пульсаций катушки индуктивности:

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN(min)}D}{f_s L}, \quad (15)$$

где $V_{IN(min)}$ — минимальное входное напряжение, D — коэффициент заполнения, рассчитанный из уравнения 14, f_s — минимальная частота коммутации преобразователя, L — выбранное значение индуктивности.

Максимальный выходной ток выбранной микросхемы:

$$I_{MAXOUT} = \left(I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \cdot (1-D), \quad (16)$$

где $I_{LIM(min)}$ — минимальная величина предельного тока встроенного ключа (дана в документации), ΔI_L — ток пульсаций катушки, рассчитанный из уравнения 15, D — рабочий цикл, рассчитанный из уравнения 14.

Максимальный ток ключа для данного приложения:

$$I_{SW(max)} = \frac{\Delta I_L}{2} + \frac{I_{OUT(max)}}{1-D}, \quad (17)$$

где ΔI_L — ток пульсаций катушки, рассчитанный из уравнения 15, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток для приложения, D — коэффициент заполнения, рассчитанный из уравнения 14.

Расчет индуктивности:

$$L = \frac{V_{IN}(V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L f_s V_{OUT}}, \quad (18)$$

где V_{IN} — типовое входное напряжение, V_{OUT} — заданное выходное напряжение, f_s — минимальная частота коммутации преобразователя, ΔI_L — приблизительная величина тока пульсаций катушки (см. уравнение 19).

Оценка величины тока пульсаций катушки индуктивности:

$$\Delta I_L = (0,2 - 0,4) I_{OUT(max)} \frac{V_{OUT}}{V_{IN}}, \quad (19)$$

где ΔI_L — приблизительная величина тока пульсаций катушки, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения.

Средний прямой ток выпрямительного диода:

$$I_F = I_{OUT(max)}, \quad (20)$$

где I_F — средний прямой ток выпрямительного диода, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения.

Мощность, рассеиваемая на выпрямительном диоде:

$$P_D = I_F V_F, \quad (21)$$

где I_F — среднее значение прямого тока выпрямительного диода, V_F — прямое напряжение выпрямительного диода.

Ток через резистивный делитель для установки выходного напряжения:

$$I_{R1/2} \geq 100 I_{FB}, \quad (22)$$

где $I_{R1/2}$ — ток через резистивный делитель на GND, I_{FB} — ток смещения цепи обратной связи из документации.

Величина резистора между выводом F_B и GND:

$$R_2 = \frac{V_{FB}}{I_{R1/2}}, \quad (23)$$

Величина резистора между выводом F_B и V_{OUT} :

$$R_1 = R_2 \left(\frac{V_{OUT}}{V_{FB}} - 1 \right), \quad (24)$$

где V_{FB} — напряжение цепи обратной связи из документации, $I_{R1/2}$ — ток через резистивный делитель на GND, рассчитанный из уравнения 22, V_{OUT} — заданное выходное напряжение.

Минимальная выходная емкость (если не приведена в документации):

$$C_{OUT(min)} = \frac{I_{OUT(max)}(1-D)}{f_s \Delta V_{OUT}}, \quad (25)$$

где $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения, D — рабочий цикл, рассчитанный из уравнения 14, f_s — минимальная частота коммутации преобразователя, ΔV_{OUT} — заданная величина пульсаций выходного напряжения.

Дополнительное выходное напряжение пульсации из-за ESR:

$$\Delta V_{OUT(ESR)} = ESR \left(\frac{I_{OUT(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \right), \quad (26)$$

где ESR — эквивалентное последовательное сопротивление используемого выходного конденсатора, $I_{OUT(max)}$ — максимальный выходной ток приложения, D — рабочий цикл, рассчитанный из уравнения 14, ΔI_L — величина тока пульсаций катушки из уравнений 15 или 19.

ЛИТЕРАТУРА

1. Brigitte Hauke. *Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage//Application Report SLVA372A, November 2009, Revised April 2010.*
2. *Understanding Boost Power Stages in Switchmode Power Supplies//SLVA061.*
3. *Voltage Mode Boost Converter Small Signal Control Loop Analysis Using the TPS61030//SLVA274.*
4. *Datasheet of TPS65148//SLVS904.*
5. *Datasheet of TPS65130 and TPS65131//SLVS493.*
6. Robert W. Erickson: *Fundamentals of Power Electronics//Kluwer Academic Publishers, 1997.*
7. Mohan/Underland/Robbins: *Power Electronics//John Wiley & Sons Inc., Second Edition, 1995.*
8. *Improve Your Designs with Large Capacitance Value Multi-Layer Ceramic Chip (MLCC) Capacitors by George M. Harayda, Akira Omi, and Axel Yamamoto, Panasonic.*
9. *Comparison of Multilayer Ceramic and Tantalum Capacitors by Jeffrey Cain, Ph.D., AVX Corporation.*

Coilcraft
www.coilcraft.com

ИНДУКТИВНОСТИ • ТРАНСФОРМАТОРЫ
ФИЛЬТРЫ • ДРОССЕЛИ

ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИСТРИБЬЮТОР В РОССИИ

111024, Москва, Авиамоторная ул., д. 8а
Телефон: (495) 957-77-45 sales@radiocomp.net
Факс: (495) 925-10-64 www.radiocomp.net

Уникальные радиокомпоненты ведущих фирм мира
РАДИОКОМП®