

Анализ преобразователя SEPIC

Рэй РИДЛИ (Ray RIDLEY)
Перевод: Дмитрий ИОФФЕ
dsioffe@yandex.ru

Данный материал представляет собой перевод статьи "Analyzing the SEPIC Converter", Power Systems Design Europe, November, 2006.

Преобразователь SEPIC

Одна из наиболее известных и широко применяемых топологий преобразователя — это понижающий (buck) преобразователь. Он назван так потому, что выходное напряжение в нем всегда ниже входного. Рассчитать выходное напряжение можно по формуле:

$$V_o = D \times V_g,$$

где D — относительная длительность импульсов в преобразователе.

В повышающем (boost) преобразователе, наоборот, выходное напряжение всегда выше входного, о чем и говорит его название. Выходное напряжение рассчитывается по формуле:

$$V_o = 1/D' \times V_g,$$

где $D' = 1 - D$.

Но что делать, если в вашем устройстве надо и повышать, и понижать напряжение, в зависимости от требуемых значений входного и выходного напряжения? Можно использовать преобразователь из двух каскадов: понижающего и повышающего. К сожалению, для этого необходимы два отдельных контроллера и два силовых ключа. Однако во многих случаях это будет хорошим решением.

Инвертирующий преобразователь (buck-boost) может как повышать, так и понижать входное напряжение:

$$V_o = -D/D' \times V_g,$$

но выходное напряжение в нем инвертировано. Обратноходовый преобразователь (flyback, isolated buck-boost) требует применения транс-

форматора вместо простой катушки индуктивности, что увеличивает сложность разработки.

Одна из топологий, которая обеспечивает нужное нам соотношение между выходным и входным напряжениями, — это SEPIC (single-ended primary inductor converter). Его схема показана на рис. 1. В последнее время эта топология стала популярной в устройствах с питанием от батарей, где в зависимости от заряда батареи надо то понижать, то повышать входное напряжение. На выходе сохраняются полярность входного напряжения и потенциал «земли».

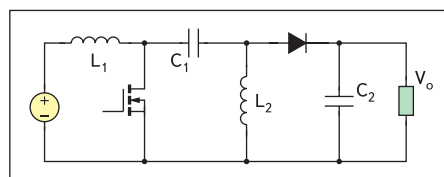


Рис. 1. Преобразователь SEPIC, обеспечивающий нужное соотношение между выходным и входным напряжениями

На схеме, показанной на рис. 2, силовой ключ замкнут. Когда ключ замкнут, входная индуктивность заряжается от источника напряжения, а вторая индуктивность заряжается от первого конденсатора. Первая индуктивность, L_1 , в это время заряжается от входного источника напряжения. Вторая индуктивность принимает энергию из первого конденсатора, а выходной конденсатор обеспечивает ток нагрузки. В это время энергия в нагрузку не поступает; полярности токов в катушках и напряжений на конденсаторах обозначены на рис. 2. Тот факт, что обе индуктивности, L_1 и L_2 , при замкнутом ключе отключены от на-

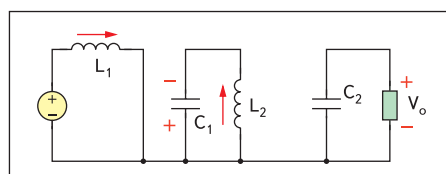


Рис. 2. Преобразователь SEPIC с замкнутым силовым ключом

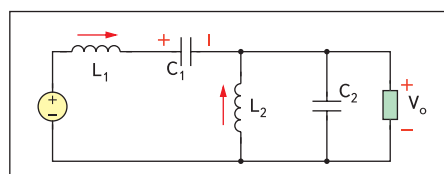


Рис. 3. Преобразователь SEPIC с разомкнутым силовым ключом

грузки, усложняет регулировочные характеристики, как мы увидим далее.

Когда ключ разомкнут, первая индуктивность заряжает конденсатор C_1 , а также поддерживает ток в нагрузке, как показано на рис. 3. Вторая индуктивность в это время также подключена к нагрузке.

При размыкании ключа в выходном конденсаторе возникает импульс тока. Он вызывает специфическую помеху, из-за которой SEPIC порождает больший шум, чем повышающий преобразователь. Входной ток не пульсирует, это дает важное преимущество при работе от батарей.

Ключевая модель ШИМ в преобразователе SEPIC

Лучший способ анализа характеристик преобразователя SEPIC по переменному и постоянному току — использовать ключевую модель ШИМ, которую разработал Воче Ворперайен (Vatché Vorpérian) в 1986 году. Прежде чем изучать ключевую модель, необходимо произвести некоторые незначительные манипуляции со схемой, как показано на рис. 4. Для того чтобы показать преимущества ключевой ШИМ-модели Ворперайена, необходимо сначала реорганизовать элементы схемы.

Сначала переместим конденсатор C_1 в нижнюю ветвь преобразователя. Затем перенесем индуктивность L_2 влево, сохраняя под-

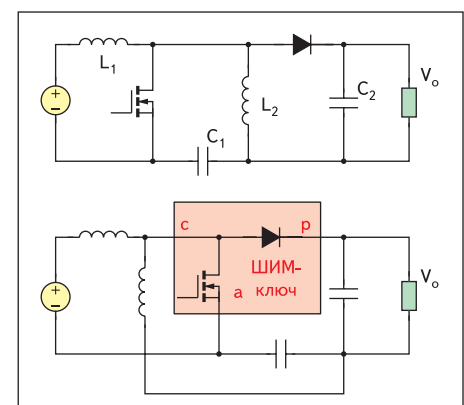


Рис. 4. Ключевая модель ШИМ в преобразователе SEPIC

ключение его выводов к тем же узлам схемы. Таким образом, мы получим ключевую ШИМ-модель преобразователя, которая позволит нам использовать хорошо обоснованные результаты анализа для этого преобразователя.

Для получения начальных сведений о ключевой ШИМ-модели рекомендуем прочитать книгу "Fast Analytical Techniques for Electrical and Electronic Circuits" [1].

Анализ преобразователя SEPIC по постоянному току

На рис. 5 показана эквивалентная схема преобразователя SEPIC, представляющая собой часть ключевой ШИМ-модели по постоянному току. Для анализа по постоянному току источниками малых сигналов пренебрегаем, индуктивности становятся премычками, а конденсаторы — разрывами цепей. После того как схема преобразована, легко написать выражение для внешнего контура схемы, позволяющее вычислить усиление напряжения в преобразователе. Модель по постоянному току — это просто трансформатор с коэффициентом $1/D$. При желании можно включить в модель любые паразитные сопротивления [2].

После преобразования схемы в соответствии с рис. 5 мы можем записать выражение для внешнего контура преобразователя:

$$V_g + V_o - 1/D \times V_o = 0.$$

После преобразования получим:

$$V_g = (1/D - 1) \times V_o = D'/D.$$

Тогда усиление по постоянному току можно рассчитать по следующей формуле:

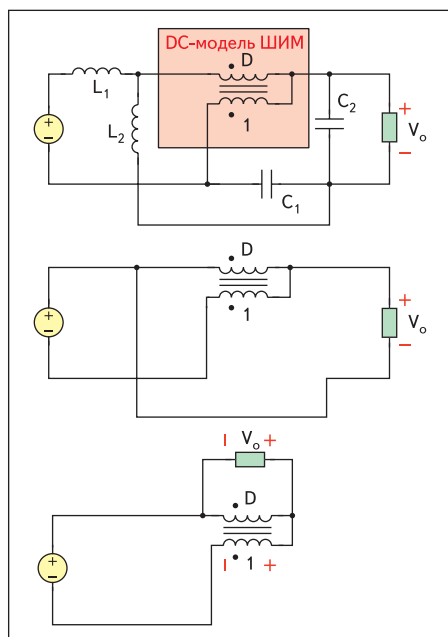


Рис. 5. Эквивалентная схема преобразователя SEPIC

$$V_o = D/D' \times V_g.$$

Эта формула иллюстрирует способность преобразователя как повышать, так и понижать напряжение. При $D = 0,5$ усиление будет равно единице. В отличие от инвертирующего преобразователя и преобразователя Чука, выходное напряжение не инвертируется.

Анализ преобразователя SEPIC по переменному току

Редко можно найти полный анализ преобразователя SEPIC где-либо в научной литературе. Обычно в указаниях по применению встречаются комментарии типа «SEPIC труден для понимания». Несмотря на недостаток документации по этим преобразователям, инженеры продолжают применять их там, где это возможно.

Точный малосигнальный анализ преобразователя SEPIC представляет собой трудную задачу. Оригинальную практическую передовую методику разработал Дэвид Миддлброк (David Middlebrook) и развил Ворперайен [1].

Если мы беремся за разработку SEPIC, то нам, как минимум, надо разбираться в регулировочных характеристиках. К счастью, сейчас доступна работа Ворперайена по этим преобразователям, и можно скачать полное описание анализа [2].

Упрощенный анализ преобразователя SEPIC, отличающийся в деталях от [2], игнорирует паразитные сопротивления индуктивностей и конденсаторов и дает следующий результат для передаточной функции по управлению (формула внизу страницы), где

$$\begin{aligned} \omega_{o1} &\approx \frac{1}{\sqrt{L_1 \left(C_2 \frac{D^2}{D^2} + C_1 \right) + L_2 (C_1 + C_2)}}, \\ Q_1 &\approx \frac{R}{\omega_{o1} \left(L_1 \frac{D^2}{D^2} + L_2 \right)}, \\ \omega_{o2} &\approx \sqrt{\frac{1}{L_2 \frac{C_1}{D^2} \parallel \frac{C_2}{D^2}} + \frac{1}{L_1 C_1 \parallel C_2}}, \\ Q_2 &\approx \frac{R}{\omega_{o2} (L_1 + L_2) \frac{C_1 \omega_{o1}^2}{C_2 \omega_{o2}^2}}. \end{aligned}$$

Как видно из этих выражений, «упрощенный» анализ совсем не прост. Включение паразитных сопротивлений еще больше усложняет анализ, но это может быть необходимо

для анализа наихудшего сочетания параметров в преобразователе SEPIC. Анализ этого преобразователя вынуждает использовать сложные теоремы и книгу Ворперайена о технике анализа схем [1].

В дополнение к неизбежному знаменателю четвертого порядка, наиболее важные свойства передаточной функции описываются членами числителя. Первый член — это одиночный ноль в правой полуплоскости. Нули в правой полуплоскости приводят к тому, что увеличение коэффициента заполнения вызывает на начальной стадии уменьшение выходного напряжения.

Когда силовой ключ замкнут, первая индуктивность отключена от нагрузки, и это непосредственно дает ноль первого порядка в правой полуплоскости. Обратите внимание, что выражение зависит только от входной индуктивности L_1 , сопротивления нагрузки R и коэффициента заполнения.

Комплексные нули в правой полуплоскости появляются из-за того, что при замыкании ключа вторая индуктивность отключается от нагрузки. Положение этих нулей зависит от величин паразитных сопротивлений в схеме, поэтому для обеспечения устойчивости преобразователя при всех условиях необходим тщательный анализ.

Моделирование преобразователя SEPIC в PSpice

Приведенное аналитическое решение не включает все паразитные элементы схемы. Как можно видеть из [2], даже без учета сопротивлений должно быть выполнено очень много работы.

Малосигнальные источники переменного напряжения включены в ключевую модель (рис. 6), и мы можем выполнить анализ вручную или же использовать PSpice, чтобы получить график желаемой передаточной функции. Ручной анализ является основным для символических выражений и формул.

Чтобы лучше понять работу SEPIC, мы можем использовать PSpice. На рис. 7 показана схема модели с конкретными числовыми параметрами SEPIC, и она включает сопротивления, которые влияют на устойчивость преобразователя. Паразитные сопротивления включены в модель PSpice.

Листинг файла PSpice можно скачать с [2] и затем воспроизвести эти результаты для анализа вашего преобразователя SEPIC.

На рис. 8 показан результат анализа в PSpice. Две резонансные частоты, предсказанные при ручном анализе, хорошо видны на графике передаточной функции. При небольших ве-

$$\frac{V_o(s)}{d(s)} \approx \frac{1}{D^2} \frac{\left(1 - s \frac{L_1}{R} \frac{D^2}{D^2} \right) \left(1 - s \frac{C_1 (L_1 + L_2) R}{L_1} \frac{D^2}{D^2} + s^2 \frac{L_2 C_1}{D} \right)}{\left(1 + \frac{s}{\omega_{o1} Q_1} + \frac{s^2}{(\omega_{o1})^2} \right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{o2} Q_2} + \frac{s^2}{(\omega_{o2})^2} \right)}$$

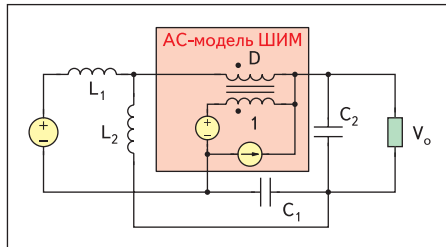


Рис. 6. Малосигнальный источник переменного напряжения

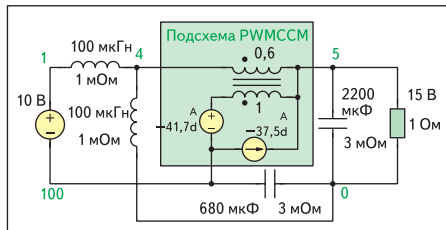


Рис. 7. Пример разработки для преобразователя мощностью 15 Вт

личинах демпфирующих сопротивлений преобразователь имеет четыре полюса и три нуля в правой полуплоскости. Примечательно чрезвычайно большое значение фазового сдвига после второго резонанса. Это вызвано запаздыванием из-за второй пары полюсов и дополнительным запаздыванием из-за

комплексных нулей в правой полуплоскости. Общее запаздывание по фазе во всем преобразователе поразительно: оно составляет 630° . Управление этим преобразователем на частотах выше второго резонанса невозможно.

Заключение

Преобразователь SEPIC будет очень хорошим выбором для некоторых применений. Как избежать трудностей при разработке такого преобразователя? Для этого есть несколько возможностей. Во-первых, если требования по динамике и скачкообразному изменению нагрузки не слишком жесткие, не надо разрабатывать широкополосный контур. Это позволит опустить усиление в контуре ниже 0 дБ до наступления экстремального запаздывания по фазе на частоте второго резонанса.

Во-вторых, во многих случаях на практике паразитные сопротивления в схеме перемещают нули из правой полуплоскости в левую, что значительно уменьшает сдвиг по фазе. Этого можно добиться и добавлением демпфирующих цепей в силовой каскад, но рассмотрение этой темы выходит за рамки данной статьи.

В-третьих, иногда инженеры разрабатывают не истинный SEPIC. В некоторых руководствах по применению предлагается намотывать две катушки на один тороидальный сердечник, что обеспечивает почти единич-

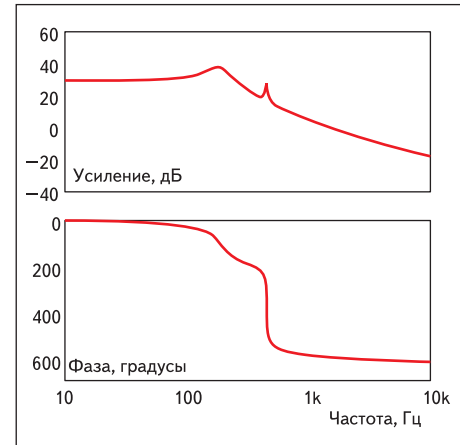


Рис. 8. Передаточная функция по управлению для преобразователя SEPIC

ную связь между ними. В этом случае схема больше не работает как настоящий SEPIC. Не попадайтесь в эту ловушку — схема будет далека от оптимальной!

Литература

1. Vorpérian V. Fast Analytical Techniques for Electrical and Electronic Circuits. Cambridge University Press, 2002. ISBN 0 521 62442 8.
2. <http://www.switchingpowermagazine.com>. Click on Articles and Sepic Analysis Notes.