

Пути уменьшения пульсаций

В ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ ТОКА

В статье рассмотрены некоторые аспекты создания импульсного источника тока (ИТ), в частности — способы снижения величины пульсаций выходного тока и вопросы устойчивости регулирования. Рассмотрены особенности работы многофазных импульсных ИТ. Публикуемые материалы собраны на основе опыта разработки импульсного двухфазного ИТ мощностью 3 кВт (100 В, 30 А).

Александр Орбенко

Петр Топольский

Виктор Писарев

mius@nkbmius.ru

Рассмотрим ИТ с регулированием по выходному току. Импульсные стабилизаторы напряжения применяются довольно широко, и методика их расчета и критерии устойчивости приводятся во многих источниках [1, 2]. Что касается импульсных ИТ, то они используются реже и в меньшей степени рассмотрены в публикациях.

Следует уточнить, что речь идет об ИТ, которые допускают подключение на выходе параллельного ШИМ-регулятора, замыкающего выход ИТ с частотой в десятки кГц. Стандартные источники питания, имеющие режим ограничения тока (обратная связь по напряжению и току), такой нагрузки не допускают из-за наличия на выходе конденсатора большой емкости (сотни микрофарад). Такая емкость сама по себе является источником напряжения для быстрых процессов (на частоте 10 кГц сопротивление конденсатора емкостью 100 мкФ равно 0,15 Ом), поэтому подключение параллельного ШИМ-регулятора к такому выходу приведет к закорачиванию выходного конденсатора открытым ключевым элементом ШИМ-регулятора. Такое подключение означает, что энергия заряженного конденсатора будет рассеиваться в виде тепла на ключевом элементе, а средняя рассеиваемая

мощность при частоте 10 кГц оказывается неприемлемо большой (5 кВт при напряжении 10 В).

Анализ уменьшения пульсаций в импульсном ИТ

На первый взгляд, чтобы получить импульсный ИТ, достаточно взять импульсный источник напряжения (рис. 1), заменить отрицательную обратную связь по напряжению на отрицательную обратную связь по току и убрать выходной сглаживающий (фильтрующий) конденсатор, как показано на рис. 2.

Но при этом возникают некоторые сложности. Первое существенное различие состоит в том, что пульсации тока в сглаживающем дросселе импульсного ИТ составляют обычно 10–30% от среднего значения тока, тогда как пульсации напряжения в стабилизаторе напряжения составляют обычно от долей процента до 1–2% и определяются величиной ESR выходных конденсаторов (выбор конденсаторов с меньшим ESR позволяет уменьшить пульсации). Исходя из этого, в ИТ необходимо уменьшать коэффициент усиления в петле обратной связи (то есть

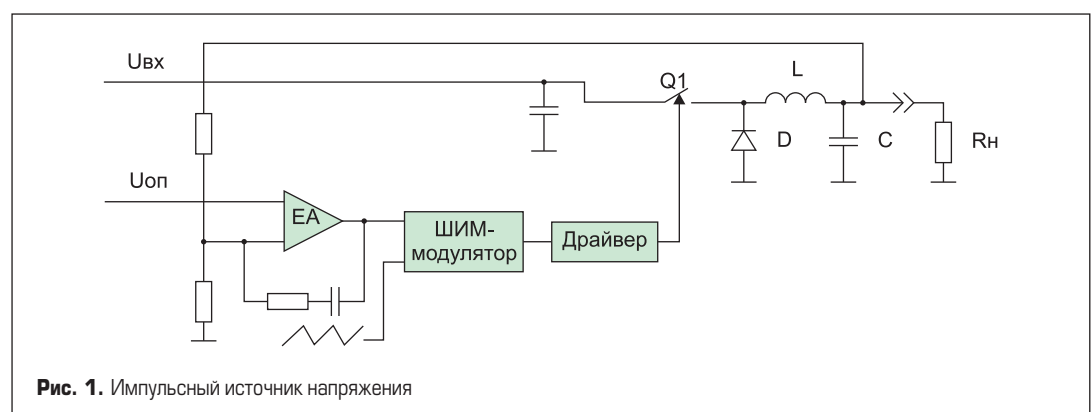


Рис. 1. Импульсный источник напряжения

уменьшать усиление усилителя ошибки), чтобы исключить ограничение выходного сигнала усилителя ошибки. В свою очередь, уменьшение усиления приводит к ухудшению динамических характеристик: амплитуда переходных процессов при скачкообразном изменении нагрузки от нуля до максимума в ИТ может достигать 30% (в источниках напряжения обычно менее 5%).

Можно улучшать параметры ИТ путем увеличения значения индуктивности сглаживающего дросселя (при этом будут уменьшаться пульсации тока, и можно, соответственно, увеличивать усиление усилителя ошибки), но увеличение при этом габаритов дросселя не всегда позволяет решить проблему только таким способом. Другой вариант — уменьшать пульсации тока импульсного ИТ путем увеличения частоты коммутации, но при этом снижается диапазон регулирования выходного тока и возрастают потери, что не во всех случаях приемлемо.

Снижение пульсации тока путем подключения конденсатора параллельно дросселю и настройкой в резонанс на частоте пульсаций (фильтр-пробка) приводит к уменьшению пульсаций при статической нагрузке (резистор), однако при динамической нагрузке (параллельный ШИМ-регулятор на выходе) приводит к ухудшению устойчивости стабилизатора тока. Снижение пульсации тока можно получить за счет установки на выходе (параллельно нагрузке) конденсатора небольшой емкости (доли микрофарад). Использование параллельного ШИМ-регулятора в качестве нагрузки накладывает определенные требования к цепям обратной связи ИТ.

Одним из критериев, определяющих выбор параметров цепи обратной связи, является субгармоническая устойчивость — отсутствие «дрожания» длительности соседних импульсов ШИМ (субгармонические колебания). Подробно эти процессы описаны в [3], там же приведен пример расчета величины, необходимой slope-компенсации для обеспечения субгармонической устойчивости. В данной статье рассматривается стабилизатор напряжения с токовым режимом (current mode), но, поскольку в ИТ пилообразные пульсации попадают на вход усилителя ошибки по цепи обратной связи по току и далее на выход усилителя ошибки, то все процессы, описанные в статье, и методика расчета в полной мере распространяются на работу импульсного ИТ.

Радикальным способом улучшения динамических характеристик импульсного ИТ является введение дополнительной положительной обратной связи по напряжению. Моделирование упрощенной схемы ИТ (без ШИМ) с положительной обратной связью по напряжению дает хорошие результаты (при точно подобранных постоянных времени в цепях отрицательной обратной связи по току и положительной обратной связи по напряжению); переходный процесс практически отсутствует — ток абсолютно постоянен. Но, с учетом работы ШИМ внешнего па-

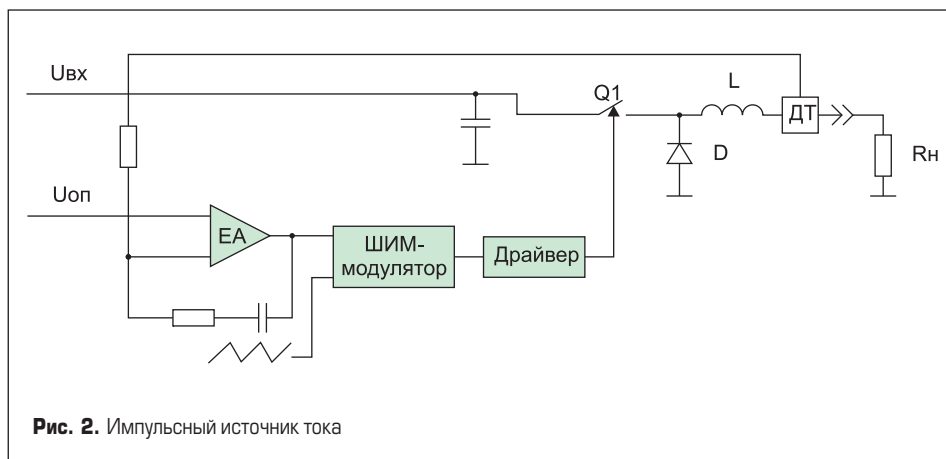


Рис. 2. Импульсный источник тока

раллельного преобразователя, устойчивость ухудшается. Поясним причины этого.

Во-первых, большинство микросхем ШИМ-контроллеров работает таким образом, что ШИМ регулирует (воздействует) на задний фронт ШИМ-импульса, то есть включение импульса происходит по тактам задающего генератора и не зависит от сигнала обратной связи, а задний фронт формируется компаратором в зависимости от сигнала обратной связи. Из-за этого реакция ШИМ на сигнал положительной обратной связи по напряжению оказывается асимметричной. При уменьшении сопротивления нагрузки реакция практически «мгновенная»: задержка определяется компаратором, драйвером и силовым ключом, а при увеличении сопротивления нагрузки «реагирование» на сигнал обратной связи произойдет только по следующему импульсу тактового генератора. Таким образом, задержка может достигать величины периода тактового генератора и зависит от совпадения фаз изменения нагрузки и тактового генератора ИТ (от совпадения по времени).

Во-вторых, сам ШИМ ИТ является нелинейным. «Пила» slope-компенсации, формируемая тактовым генератором, практически линейна и имеет постоянную амплитуду, а «пила» тока в сглаживающем дросселе линейна (в пределах линейности феррита), но имеет непостоянную амплитуду. Амплитуда пульсаций тока максимальна в середине диапазона нагрузок, когда выходное напряжение равно половине входного, и коэффициент заполнения импульса ШИМ равен 0,5 (скважность 2). При минимальном (КЗ) и максимальном (напряжение на выходе близко к входному)

сопротивлению нагрузки амплитуда пульсаций стремится к нулю. В результате для «традиционной» схемы ШИМ (с включением по тактовому генератору и выключением по сигналу компаратора) коэффициент передачи ШИМ получается минимальным при КЗ в нагрузке и максимальным, когда выходное напряжение близко ко входному. Видимо, с этим связано наблюдаемое на практике ухудшение устойчивости импульсного стабилизатора тока при максимальных сопротивлениях нагрузки. Очевидно, что при уменьшении амплитуды пульсаций линейность модулятора будет улучшаться (таким образом, увеличение индуктивности дросселя со всех точек зрения «положительно»). Если величина входного напряжения не постоянна, то коэффициент положительной обратной связи должен быть обратно пропорционален входному напряжению.

Все это усложняет задачу введения положительной обратной связи по напряжению, которая должна быть нелинейная, с зависимостью от выходного и входного напряжения.

Следует рассмотреть вариант понижения пульсаций в многофазных импульсных ИТ. Как уже было сказано, многофазные импульсные источники напряжения широко применяются (на всех современных компьютерных платах). С увеличением числа фаз импульсного ИТ пропорционально уменьшаются создаваемые им помехи и квадратично уменьшаются выходные пульсации. На рис. 3 показана зависимость амплитуды пульсаций от отношения $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ для одно-, двух- и четырехфазных источников.

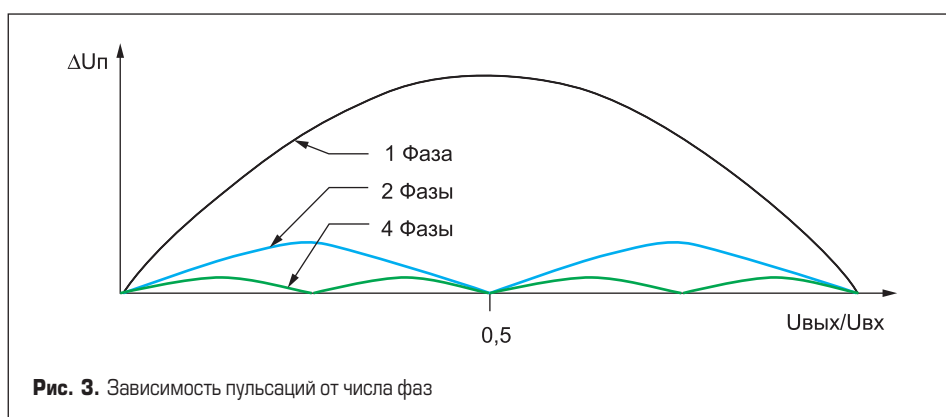
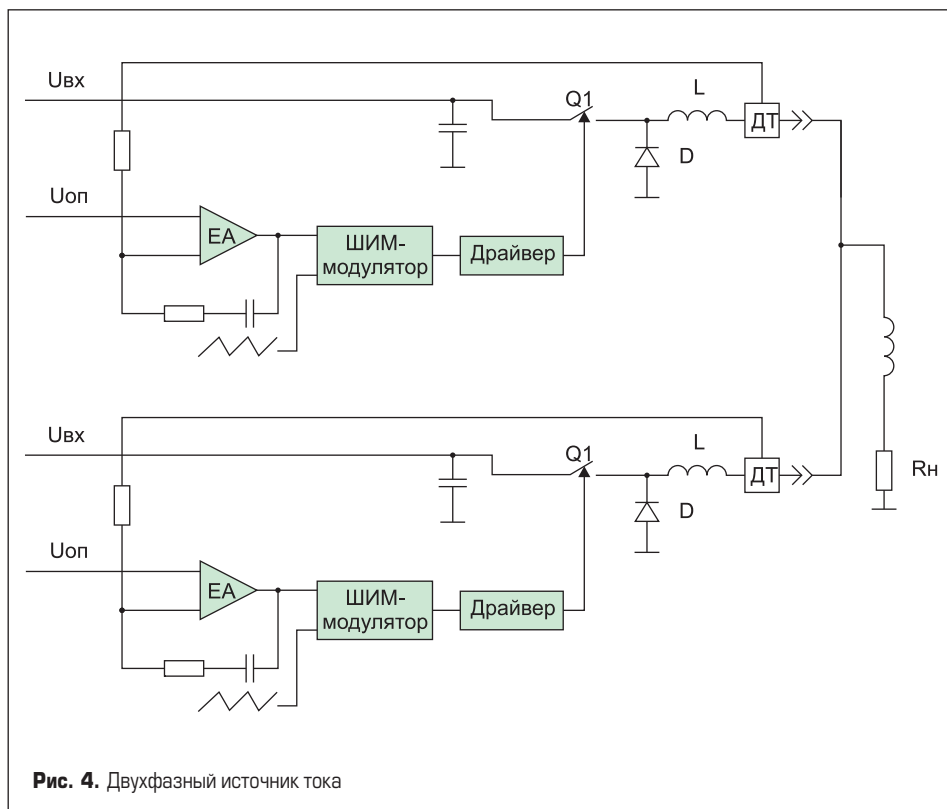


Рис. 3. Зависимость пульсаций от числа фаз



Эти общие закономерности справедливы как для источников напряжения, так и для ИТ.

Было выполнено моделирование многофазных ИТ (двух-, четырех- и восьмифазных) и проведены испытания макета двухфазного

ИТ мощностью 3 кВт (100 В, 1–30 А). В схеме был введен дополнительный выходной фильтрующий дроссель, включенный между общей точкой соединения фазных дросселей и выходом (нагрузкой), как показано на рис. 4.

Индуктивность дополнительного фильтрующего дросселя была выбрана вдвое меньше индуктивности фазных дросселей. В точке соединения дросселей пульсации имеют частоту, кратную числу фаз, что увеличивает эффективность фильтрации в дополнительном выходном дросселе. При этом в сигнале обратной связи каждой фазы появляются составляющие пульсации от других фаз, в результате чего форма пульсаций начинает отличаться от пилообразной. Установлено, что устойчивость работы ИТ при работе на динамическую нагрузку ухудшается.

* * *

Приведенные результаты показывают, что при разработке мощных импульсных ИТ возникают сложности в выборе параметров основных компонентов схемы. При этом в общедоступной литературе недостаточно сведений для определения критериев выбора параметров компонентов и структуры таких источников.

Литература

1. Браун М. Источники питания, расчет и конструирование. Киев: МК-Пресс. 2007.
2. Stabilize the buck converter with transconductance amplifier. Application Note AN-1043. International Rectifier. www.ir.com
3. Modelling, analysis and compensation of the current-mode converter. Application Note. Unitrode U-97. www.ti.com