

Оптимизация качества источников питания,

работающих с динамически меняющейся нагрузкой

Пейман Сафа
(Peyman Safa)

Современные интегральные схемы (ИС) работают все быстрее и быстрее. Повышение скорости ведет к тому, что потребляемая мощность резко изменяется в большом динамическом диапазоне. Это порождает проблемы тестирования с применением программируемых источников питания (ИП). Высокая скорость изменения тока может приводить к провалам напряжения в цепи питания ИС. Если они достаточно чувствительны, то провал напряжения может «сбросить» микропроцессор или создать аномалии в результатах измерений. В статье поясняются причины появления провалов напряжения и предлагаются способы их минимизации за счет оптимального выбора соединительных проводов и ИП, а также за счет применения блокировочного конденсатора в обходной цепи.

Выбор программируемых источников питания

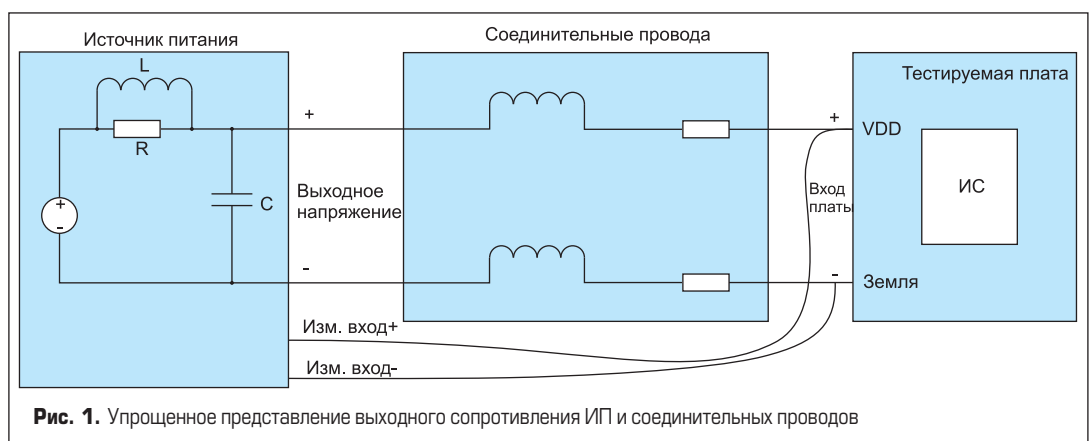
Традиционно считается, что для достижения лучшей стабилизации выходного напряжения нужно применять линейный ИП. Однако на больших токах линейные ИП становятся очень громоздкими, дорогими и неэффективными. Последние достижения позволяют заменить линейные ИП импульсными.

Разработчики импульсных ИП сталкиваются с противоречивыми, на первый взгляд, требованиями низкого уровня выходного шума, малого времени отклика на изменение нагрузки, низкой стоимости и высокой удельной мощности. Низкий уровень выходных шумов достигается обычно

за счет применения нескольких каскадов фильтрации или больших фильтров, что приводит к удорожанию, росту габаритов и увеличению времени отклика. Качественные ИП используют более высокую частоту преобразования, лучшие фильтры и более сложные схемы управления и стабилизации, позволяющие оптимизировать все критерии. При выборе ИП для тестирования ИС важно знать его время отклика и выходное сопротивление.

Выбор соединительных проводов

Во многих случаях физические ограничения вынуждают устанавливать ИП в нескольких метрах от исследуемой схемы, в результате чего длина соединительных проводов также достигает нескольких метров. Сопротивление соединительных проводов может значительно увеличить выходное сопротивление источника. Почти все программируемые ИП имеют измерительные входы, которые позволяют стабилизировать напряжение непосредственно на нагрузке, подключив ее к этим входам отдельными проводами. В такой схеме сигнал обратной связи снимается непосредственно со входа тестируемой ИС или платы. Однако цепь обратной связи может компенсировать переходные процессы только в пределах своей полосы пропускания. Следовательно, в этой схеме тоже могут возникать переходные процессы при достаточно быстрых изменениях тока. Сопротивление соединительных проводов на низких частотах можно смоделировать последовательно включенными резистором и индуктивностью, как показано на рис. 1.



Рассмотрим схему с потребляемым током 25 А и переходными процессами (изменением нагрузки) 5 А, в которой ИП настроен на 2,5 В и подключен к тестируемой плате проводами длиной 1,5 м и сечением 2 мм². При таком низком напряжении провалы напряжения на 100 мВ уже недопустимы. Провод сечением 2 мм² имеет удельное сопротивление 8,33 мОм на метр, что дает 25 мОм суммарного сопротивления двух соединительных проводов от ИП к тестируемой плате.

$$V_{\text{падения-R}} = R_{\text{проводов}} \times I_{\text{перех}};$$

$$V_{\text{падения-R}} = 0,025 \text{ Ом} \times 5 \text{ А} = 125 \text{ мВ.}$$

Расчетное падение напряжения 125 мВ будет скомпенсировано схемой стабилизации источника в соответствии с его полосой пропускания. Но пока это произойдет, тестируемая ИС испытает падение напряжения на 125 мВ. В данном случае одного только сопротивления проводов достаточно, чтобы вызвать неприемлемый кратковременный провал напряжения на тестируемой плате. Однако сопротивление соединительных проводов — не единственный фактор, который надо учитывать. Нередко встречаются ситуации, когда потребляемый ток тестируемой платы возрастает на 5 А за 10 мкс. Столь быстрое изменение тока может вызвать значительное падение напряжения на проводах во время нарастания тока. Такое падение напряжения можно описать лишь приблизительно, поскольку точная индуктивность проводов может меняться в зависимости от расстояния между положительным и отрицательным проводом. В большинстве случаев невитая пара проводов имеет индуктивность 250 нГн/м.

$$V_{\text{падения-L}} = LI_{\text{перех}}/t;$$

$$V_{\text{падения-L}} = 2 \times 1,5 \text{ м} \times 250 \times 10^{-9} \text{ Гн} \times 5 \text{ А} / 10 \times 10^{-6} \text{ с} = 1,25 \text{ В.}$$

Комбинированное воздействие сопротивления и индуктивности создает падение:

$$V_{\text{падения-Общее}} = V_{\text{падения-R}} + V_{\text{падения-L}};$$

$$V_{\text{падения-Общее}} = 125 \text{ мВ} + 1,25 \text{ В} = 1,375 \text{ В.}$$

Ясно, что конечный результат 1,375 В неприемлем. Как уже говорилось, схема стабилизации ИП регистрирует этот переходный процесс

и изменит выходное напряжение так, чтобы поддержать стабильное напряжение 2,5 В на тестируемой плате. Тем не менее этот процесс может занять несколько миллисекунд даже с хорошим ИП. Влияние индуктивности проводов можно ослабить, если расположить провода вплотную друг к другу, скрепив их стяжками через регулярные интервалы либо просто свив их между собой. Свивание дает дополнительные преимущества, ослабляя влияние магнитного поля проводов на окружающие цепи. Свитые провода характеризуются индуктивностью 170 нГн/м. Это значение учитывает влияние обоих проводов. Пересчет для свитых проводов даст:

$$V_{\text{падения-Lсвитые}} = 1,5 \text{ м} \times 170 \times 10^{-9} \text{ Гн} \times 5 \text{ А} / 10 \times 10^{-6} \text{ с};$$

$$V_{\text{падения-Lсвитые}} = 0,425 \text{ В}$$

Хотя падение напряжения уменьшилось, суммарный результат по-прежнему неприемлем. Дальнейшего улучшения можно добиться параллельным включением нескольких кабелей. Например, параллельное включение четырех свитых кабелей снижает сопротивление и индуктивность в четыре раза.

$$V_{\text{падения-свитые-4 кабеля}} = (0,425 + 0,125) / 4 = 0,1375 \text{ В.}$$

Требуемые 100 мВ по-прежнему не достигнуты, особенно если учесть, что ИП внесет дополнительное падение напряжения в ответ на изменение выходного тока. Специализированные кабели, такие как специальные коаксиальные или ленточные, могут снизить индуктивность до 10 нГн/м, но они стоят дорого и не всегда доступны. Это приводит нас к мысли о необходимости применения ИП с малым выходным сопротивлением, расположенного в непосредственной близости от тестируемой платы.

Применение блокировочного конденсатора

ИП не может достаточно быстро скомпенсировать падение напряжения на соединительных проводах и на собственном выходе, значит, нам нужен локальный источник энергии, как показано на рис. 2. Конденсаторы облают

малым сопротивлением на высоких частотах и могут отлично дополнить малое выходное сопротивление ИП на низких частотах. При изготовлении конденсаторов применяются разные технологии, и выбор правильной детали или комбинации деталей может оказаться непростым. Керамические конденсаторы обеспечивают отличную высокочастотную блокировку на малых напряжениях. Однако даже последние технологии создания керамических конденсаторов не позволяют им достичь высокой удельной емкости и малой стоимости алюминиевых электролитических конденсаторов и твердотельных конденсаторов с проводящим полимером в качестве электролита. Важную роль играет также эквивалентное последовательное сопротивление блокировочной цепи, поскольку оно включается последовательно с конденсатором и может существенно снижать эффективность блокировки. Выбор конденсатора с минимальным номинальным напряжением позволяет получить минимальное последовательное сопротивление и максимальную удельную емкость.

Взаимодействие схемы стабилизации ИП, соединительных проводов и блокировочного конденсатора может быть достаточно сложным. Однако оценочный расчет позволяет приблизительно определить номинал конденсатора.

Для этого нужно проделать следующее:

- Рассчитать максимальное полное сопротивление цепи. Максимальное допустимое полное сопротивление соединительных проводов и блокировочного конденсатора определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{макс}} = \text{Максимальный допустимый провал напряжения (В)} / \text{Амплитуда переходного тока (А)} = 100 \text{ мВ} / 5 \text{ А} = 20 \text{ мОм.}$$

- Рассчитать емкость блокировочного конденсатора. Для этого следует приравнять максимальное сопротивление к характеристическому сопротивлению LC-контура, образованного индуктивностью соединительных проводов и емкостью блокировочного конденсатора. Решение этого уравнения даст значение емкости:

$$Z_{\text{макс}} = Z_c = \sqrt{\text{Индуктивность проводов (Гн)} / \sqrt{\text{Блокировочный конденсатор (Ф)}} \Rightarrow 20 \text{ мОм} = \sqrt{5 \times 170 \text{ нГн} / 4 / C} \Rightarrow C = 530 \text{ мкФ.}$$

- Рассчитать резонансную частоту контура. Используемый ИП должен иметь меньшее

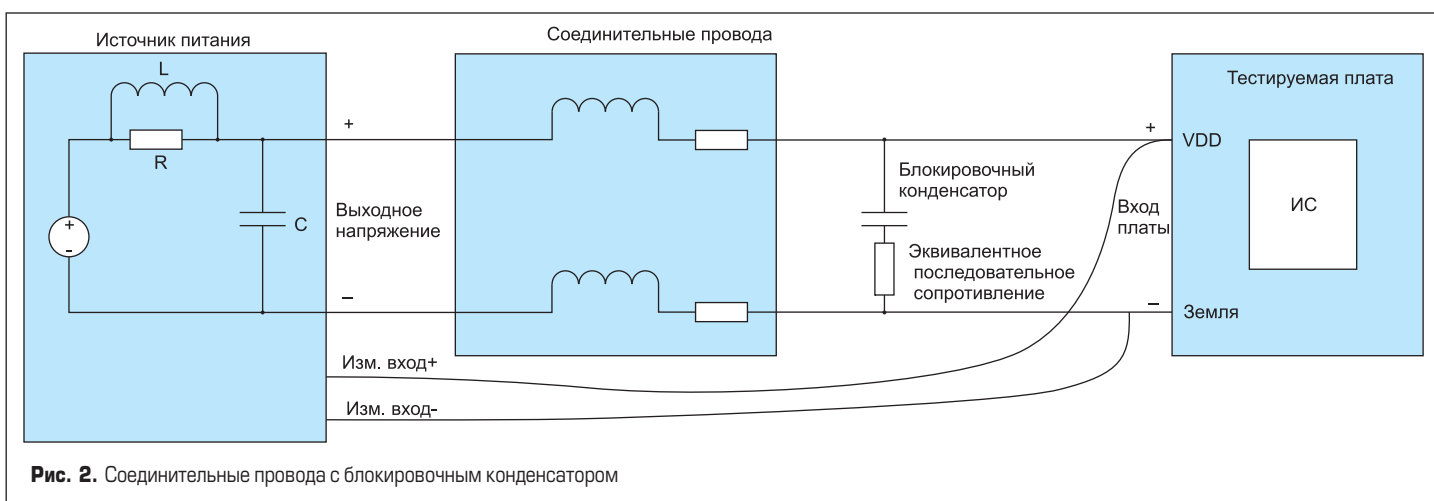
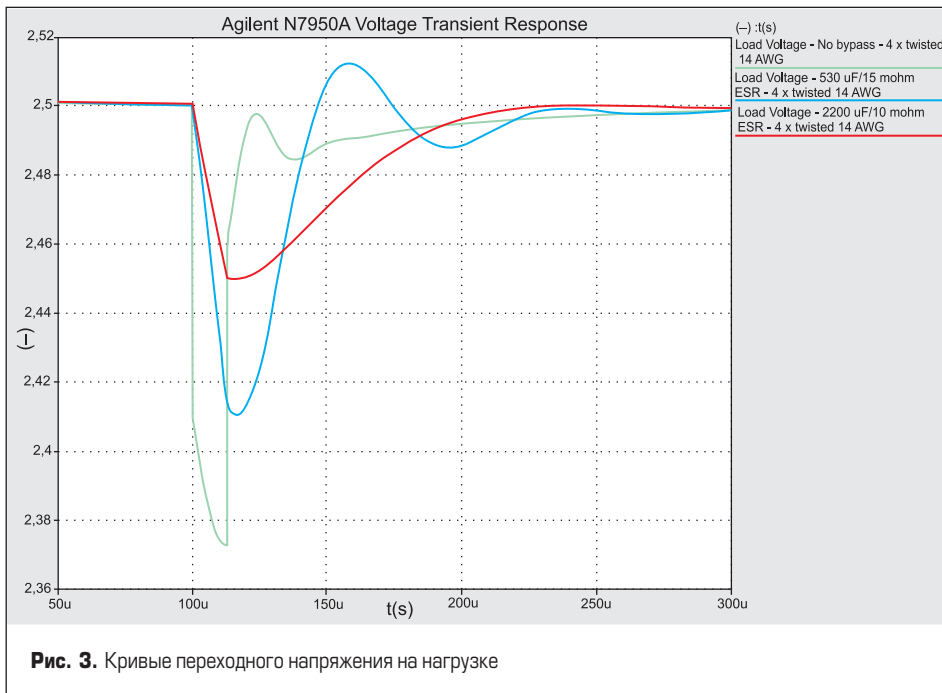


Рис. 2. Соединительные провода с блокировочным конденсатором



с разными значениями емкости и последовательного сопротивления.

Результаты

На рис. 3 показано переходное напряжение на нагрузке при использовании динамического ИП постоянного тока Agilent N7950A. Этот источник оптимизирован на малые напряжения при большом токе и обладает очень низким выходным сопротивлением, что идеально подходит для рассматриваемого приложения. Здесь показаны оба описанных выше сценария. В обоих случаях применялись четыре кабеля длиной 1,5 м, состоящие из свитых проводов сечением 2 мм², но в одном из сценариев применялся локальный блокировочный конденсатор, установленный на входе тестируемого устройства. Показан также и третий сценарий. В нем применяется четверо больший локальный блокировочный конденсатор, который снижает сопротивление контура примерно вдвое.

Заключение

В статье исследованы проблемы стабилизации питания на нагрузке с высокой динамикой потребляемого тока с помощью ИП, расположенного на расстоянии нескольких метров от тестируемого устройства. Хотя сопротивление соединительных проводов может сильно ухудшать переходную характеристику высокопроизводительного ИП, рассмотренные методы компенсации позволяют достичь необходимых характеристик питающего напряжения на тестируемом устройстве. Такие методы, как свивание соединительных проводов для минимизации площади петли между двумя проводами, применение ленточных или толстых экранированных кабелей, могут значительно снизить индуктивность соединительных проводов. Правильный выбор блокировочного конденсатора, установленного на входе тестируемого устройства, может дополнительно повысить стабильность напряжения при быстром изменении тока, потребляемого тестируемым устройством.

выходное сопротивление, чем характеристическое сопротивление LC-контура, в противном случае выполненные расчеты не будут точно описывать поведение системы. Выходное сопротивление ИП снижается с понижением частоты. Если оно больше требуемого максимального сопротивления, следует выбрать резонансную частоту контура равной частоте, на которой выходное сопротивление ИП становится меньшим или равным Z_{\max} . Резонансную частоту можно снизить, увеличив емкость блокировочного конденсатора.

$$F_{\text{резонанса}} = 1/2\pi\sqrt{LC} = 1/2\pi\sqrt{5 \times 170 \text{ нГн} / \sqrt{4} \times 530 \text{ мкФ}} = 15 \text{ кГц.}$$

- Выбрать конденсатор с эквивалентным последовательным сопротивлением, обеспечивающим необходимое демпфирование LC-контура. Соответствующее демпфирование колебательного контура имеет важное значение, поскольку неправильно демпфированный контур склонен к возбуждению и может оказывать деста-

билизирующее воздействие на цепь стабилизации ИП. Колебательный контур демпфируется суммарным сопротивлением проводов и эквивалентным последовательным сопротивлением конденсатора. Для снижения времени отклика и пикового напряжения постараемся достичь коэффициента демпфирования 0,5, приравняв сопротивление проводов и эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора к характеристическому сопротивлению LC-контура.

Z_{\max} = сопротивление проводов + эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора \Rightarrow

Эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора = 20 мОм–25 мОм/4 = 13,75 мОм.

Поскольку найти конденсатор с нужным последовательным сопротивлением может оказаться сложной задачей, для получения необходимых параметров можно использовать параллельно включенные конденсаторы