

Линейные регуляторы напряжения для высокоэффективных приложений

Маркус ЗИМНИК
(Marcus ZIMNIK)
epic@ti.com

Линейные регуляторы — это один из старейших и наиболее широко распространенных типов интегральных схем в электронной промышленности. За много лет применения технические характеристики этих интегральных схем были существенно улучшены. В статье описываются основные механизмы работы различных архитектур линейных регуляторов, отдельно рассматриваются их наиболее важные параметры, и в заключение приводятся рекомендации по правильному выбору линейного регулятора для конкретной спецификации.

Основы функционирования линейного регулятора

Схема линейного регулятора состоит из четырех функциональных блоков: это источник опорного напряжения, последовательный регулирующий элемент, измерительный резистор и усилитель сигнала рассогласования, как показано на рис. 1.

Усилитель сигнала рассогласования интегральной схемы управляет последовательным регулирующим элементом и постоянно отслеживает сигнал обратной связи, сравнивая его с фиксированным внутренним опорным напряжением. Чтобы поддерживать постоянное выходное напряжение при изменениях входного напряжения, а также необходимый для нагрузки выходной ток, открывается или дросселируется регулирующий элемент.

Большинство линейных регуляторов, помимо этого, включают в себя схему защиты от перегрузки по току и от перегрева регулятора.

Определения основных терминов: падение напряжения и ток в рабочей точке

Падение напряжения

Падение напряжения определяется как минимальная разность между входным напряжением V_{in} и выходным напряжением V_{out} , она необходима для функционирования регулятора в пределах спецификации. Графики на рис. 2 поясняют это.

Обычно линейные регуляторы с падением напряжения <1 В рассматриваются как регуляторы с малым падением напряжения (Low Dropout Voltage, LDO). Регуляторы с паче-

ем напряжения >1 В относятся к стандартным линейным регуляторам. Регуляторы LDO необходимы в том случае, когда допускается приближение входного напряжения к выходному напряжению, а рассеяние мощности должно быть сведено к минимуму.

Ток в рабочей точке

Ток в рабочей точке, или ток заземления, представляет собой разность входного и выходного токов. Для достижения максимального коэффициента полезного действия в рабочей точке необходимо иметь небольшой ток.

Ток в рабочей точке состоит из тока смещения (например, ток опорного сигнала через запрещенную зону, ток через измерительный резистор, а также ток усилителя сигнала рассогласования) и тока управления затвором/базой последовательного проходного элемента, не входящих в выходную мощность. Величина тока в рабочей точке, в основном, определяется последовательным регулирующим элементом и топологией регулятора.

Классификация линейных регуляторов напряжения

Классификация линейных регуляторов напряжения основана на технологии изготовления последовательного регулирующего элемента: *pnp*-регуляторы на паре Дарлингтона, *pnp*-, *pnp*-, PMOS- и NMOS-регуляторы. В таблице приведены различные типы регуляторов с характеристиками по падению напряжения и току в рабочей точке.

Биполярные транзисторы *pnp* обеспечивают малое падение напряжения, поэтому традиционно применялись в приложениях с малым падением напряжения. Однако им при-

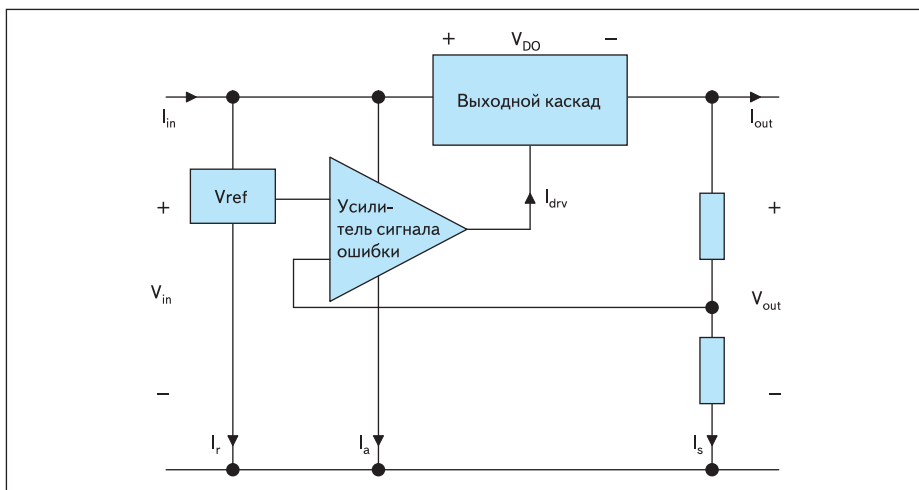


Рис. 1. Основные элементы линейного регулятора

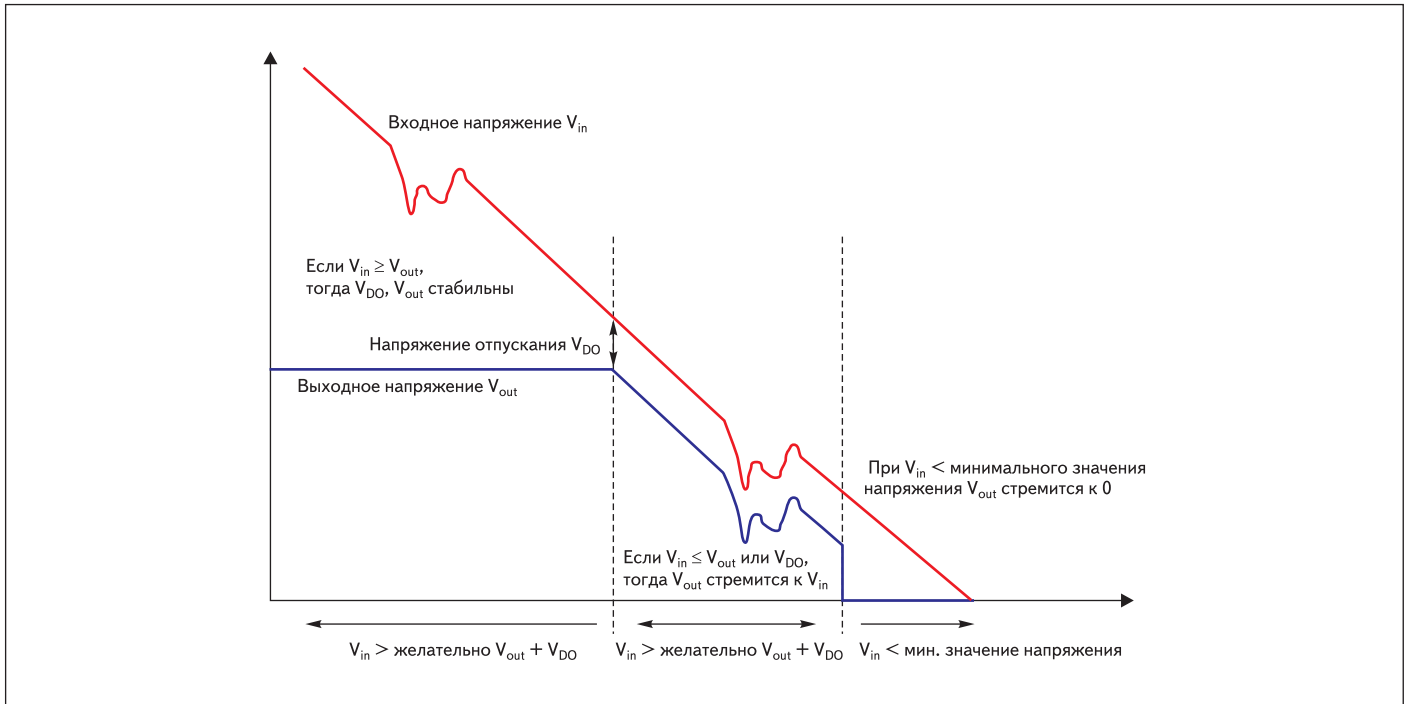


Рис. 2. Падение напряжения

сущи большой ток в рабочей точке и низкий коэффициент полезного действия, что не подходит для приложений, где увеличение КПД имеет первостепенное значение. Устройства PMOS достигли высокого уровня развития

и в настоящее время имеют эксплуатационные характеристики, превышающие показатели большинства биполярных продуктов. Наибольшими преимуществами обладают элементы питания NMOS благодаря их низ-

кому сопротивлению. К сожалению, трудности управления затвором не позволяют им стать идеальным выбором. Регуляторы LDO с топологией NMOS, такие как TPS74901, имеют падение напряжения всего 120 мВ при выходном токе 3 А.

В отличие от устройств с топологией PMOS, выходной конденсатор оказывает незначительное влияние на устойчивость контура. Большинство регуляторов LDO NMOS производства компании Texas Instruments работают устойчиво как при наличии выходного конденсатора, так и при его отсутствии. Переходная характеристика этих устройств лучше, чем у топологий PMOS, особенно в приложениях с низким входным напряжением V_{in} .

Специальные функции линейных регуляторов напряжения с высокими рабочими показателями

Простейшие линейные регуляторы напряжения имели лишь 3 вывода для напряжений V_{in} , V_{out} и заземления (GND). Следующим шагом в эволюции линейных регуляторов было добавление вывода сигнала разрешения (ENABLE), чтобы включать и выключать регулятор.

Требования к надежности цифровых приложений привели к необходимости интегрировать функции супервизора напряжения питания (SVS). Эти функции обеспечивают подачу выходных сигналов «Сброс» (RESET) или «Питание» в пределах нормы (POWER GOOD) на процессор. Внутренний компаратор постоянно отслеживает выходное напряжение и инициирует сброс в цифровых системах в случае пониженного напряжения. Когда

Таблица. Описание типов регуляторов с характеристиками по падению напряжения и току в рабочей точке

Технология изготовления последовательного регулирующего элемента	Падение напряжения V_{DO}	Ток в рабочей точке I_q	Примечания
<p>NPN на паре Дарлингтона</p>	$V_{CE(sat)} + 2V_{BE} = 1,6 - 2,5 \text{ В}$	$I_q = I_{bias} = (I_a + I_r + I_s)$	Это старейшая технология производства линейных регуляторов. Для использования этой технологии необходим минимальный выходной ток. Им является ток последовательного регулирующего элемента. Пример устройства: TL317
<p>NPN</p>	$V_{CE(sat)} + V_{BE} \sim 0,9 \text{ В}$	$I_q = I_{bias} = (I_a + I_r + I_s)$	Транзистор <i>rpl</i> получает управляющий ток с входной шины через транзистор <i>rpl</i> . Схема управления базой добавляет свой эмиттерный ток к выходному току. Поэтому ток в рабочей точке <i>rpl</i> -регулятора велик. Для регулирования по этой технологии также необходим лишь минимальный выходной ток. Пример устройства: TLV1117
<p>PNP</p>	$V_{CE(sat)} = 0,15 - 0,4 \text{ В}$	$I_q = I_{drv} + I_{bias} \sim 0,8 - 2,6 \text{ мА}$ I_{drv} — ток управления базой транзистора PNP	Ток управления базой течет на «землю». Величина тока непосредственно зависит от коэффициента усиления транзистора последовательного регулирующего элемента. Таким образом, ток в рабочей точке <i>rpl</i> -регулятора больше, чем в случае <i>rpl</i> -регулятора. Пример устройства: TL5209
<p>PMOS</p>	$I_o \times R_{on} \sim 35 - 350 \text{ мВ}$	Последовательные регулирующие элементы MOSFET представляют собой управляемые напряжением устройства и, в отличие от биполярных транзисторов, не требуют увеличения управляющего тока при увеличении выходного тока. Поэтому достигается очень малая величина тока в рабочей точке (менее 1 мА)	Последовательные элементы PMOS просты в управлении, но требуют поддерживать некоторое минимальное входное напряжение, чтобы обеспечивалась надлежащая оптимизация канала. Пример устройства: TPS75901
<p>NMOS</p>	где R_{on} — сопротивление входного элемента во включенном состоянии; I_o — выходной ток	Линейные регуляторы NMOS требуют генератора подкачки заряда или управляющего напряжения $> V_{in}$ для оптимизации NMOS. Пример устройства: TPS73201	Линейные регуляторы NMOS требуют генератора подкачки заряда или управляющего напряжения $> V_{in}$ для оптимизации NMOS. Пример устройства: TPS73201

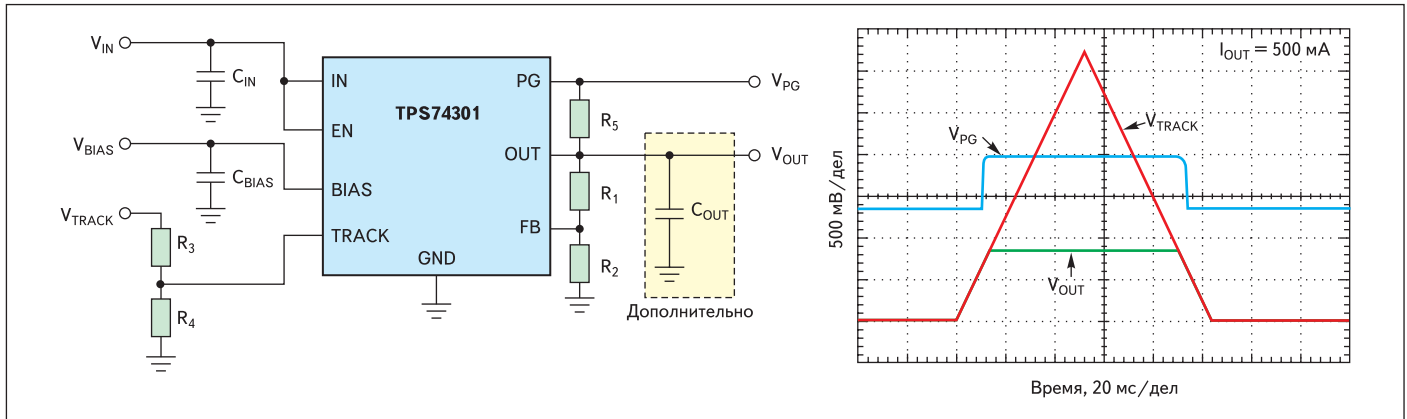


Рис. 3. Отслеживание напряжения с помощью устройства TPS74301

на выходе достигается уровень регулирования, сигнал «Сброс» выключается через определенное время задержки (обычно 20–200 мс). Сигнал «Сброс» подается снова, когда выходное напряжение падает ниже петли гистерезиса требуемого выходного напряжения.

Сигнал питания в пределах нормы показывает состояние выходного напряжения V_{out} и часто используется с целью включения других источников питания в заданной последовательности. Если V_{out} превосходит порог выключения сигнала питания в пределах нормы (обычно 97% от заданного показателя напряжения), то вывод этого сигнала переходит в состояние с высоким импедансом. В противном случае поддерживается состояние питания в пределах нормы с низким импедансом.

Для обеспечения максимальных рабочих характеристик схемы ФАПЧ (фазовой автоподстройки частоты) и РЧ (радиочастотные) нуждаются в малошумящих источниках питания. Фильтрация опорного напряжения регулятора LDO — очень эффективный способ получения малошумящего источника питания. Регуляторы LDO с поддержкой этой функции имеют шунтирующий вывод для подключения конденсатора фильтра между выходом опорного напряжения и входом усилителя сигнала рассогласования. Примером регулятора LDO является устройство TPS79101, генерирующее шум со среднеквадратичной величиной всего лишь 15 мкВ в диапазоне частот от 100 Гц до 100 кГц.

У таких сложных цифровых устройств, как перепрограммируемые логические схемы и процессоры, при включении иногда наблюдается большой пусковой ток. Однако он уменьшается, если питающее напряжение постепенно возрастает при включении. Для выполнения этой задачи такие регуляторы LDO, как TPS74401, имеют встроенную функцию плавного запуска, позволяющую пользователю программировать наклон графика линейного изменения напряжения во время включения.

Другая функция, необходимая в сложных цифровых системах, — это отслеживание напряжения. Она полезна для минимизации нагрузки на схемы защиты от электростатиче-

ского разряда, присутствующие между выводами питания «ядро» (CORE) и «ввод/вывод» (I/O) многих процессоров. Отслеживание напряжения позволяет выходному напряжению регулятора LDO следовать за внешним источником. Дополнительные детали приводятся на рис. 3.

Выбор линейного регулятора

Выбор линейных регуляторов начинается с определения необходимого интервала входного напряжения, выходного напряжения и тока. Если допускается приближение входного напряжения к выходному напряжению, следует убедиться в том, что минимальное падение напряжения не ограничивает требуемого интервала входного напряжения. Также важно обеспечить, чтобы точность выходного напряжения соответствовала точности, необходимой для приложения. Следующий после этого шаг состоит в проверке таких специфических характеристик, как низкий уровень шума, и исследовании, нужны ли специальные выходные конденсаторы (если они применимы). В заключение рассматриваются такие дополнительные функции, как сигнал разрешения, сигнал нормального состояния питания или последовательность включения. Учет упомянутых факторов сужает диапазон линейных регуляторов для заданного набора требований.

Другое, в высшей степени важное, но часто упускаемое из виду соображение при выборе линейного регулятора — это применение специфических тепловых параметров.

Для большинства регуляторов LDO определена максимальная температура $p-n$ -перехода, при которой гарантируется их функционирование. Это условие ограничивает рассеяние мощности, которое способен поддерживать регулятор в данном приложении. Во-первых, нужно рассчитать фактическое рассеяние мощности P_D . Его величина определяется следующим образом (если пренебречь током в рабочей точке):

$$P_D = (V_{in} - V_{out}) \times I_{out}$$

Во-вторых, следует вычислить наибольшее допустимое рассеяние мощности — P_{Dmax} , Вт. Оно определяется с помощью следующего уравнения:

$$P_{Dmax} = (T_{jmax} - T_A) / R_{\theta JA}$$

где T_{jmax} — максимальная допустимая температура $p-n$ -перехода, °C; T_A — температура окружающей среды, °C; $R_{\theta JA}$ — тепловое сопротивление границы « $p-n$ -переход — окружающая среда» для корпуса, °C/Вт.

Для того чтобы температура $p-n$ -перехода гарантированно находилась в допустимых пределах, значение P_D должно быть меньше или равно P_{Dmax} .

Мощность рассеивается корпусом линейного регулятора и внешними радиаторами. К факторам, влияющим на тепловые характеристики, относятся топология печатной платы, расположение компонентов, взаимодействие с другими компонентами на плате, обтекание потоком воздуха и высота компонента. За дополнительными сведениями по учету тепловых параметров в конструкциях линейных регуляторов обратитесь к выпущенному компанией TI руководству по применению SLVA118 [3].

Литература

1. Understanding the Terms and Definitions of Low-Dropout Voltage Regulators, руководство по применению, компания Texas Instruments. <http://www.ti.com/lit/pdf/slva079>
2. Technical Review of Low Dropout Voltage Regulator Operation and Performance, руководство по применению, компания Texas Instruments. <http://www.ti.com/lit/pdf/slva072>
3. Digital Designer's Guide to Linear Voltage Regulators and Thermal Management, руководство по применению, компания Texas Instruments. <http://www.ti.com/lit/pdf/slva118>
4. TPS74301, 1.5A Ultra-LDO with Programmable Sequencing, технические данные изделия, компания Texas Instruments. <http://www.ti.com/lit/gpn/tps74301>