*National Semiconductor* Chester Simpson Member of Technical Staff Power Management Applications

# Linear and Switching Voltage Regulator Fundamentals

# Линейные и импульсные стабилизаторы напряжения

## Реферат

Статья предназначается для того что бы пользователи понимали принцип работы линейных и импульсных стабилизаторов напряжения. В ней будет рассказано о самых общих моделях используемых регуляторов.

Для линейных регуляторов стандарты с низким падением и квази низким падением будут раскрыты (на ряду с схемами примеров).

В части посвящённой импульсным стабилизаторам понижающий, повышающий, понижающий - повышающий и обратноходовой будут детально рассмотрены. Некоторые примеры будут даны как продукты доступные для проектирования и использования как импульсные преобразователи.

## Введение

Линейные стабилизаторы напряжения – основные строительные блоки почти всех источников питания в электронике. Интегральные микросхемы линейных стабилизаторов очень легки в использовании, это достаточно простой и, обычно самый недорогой элемент на плате.

В статье будет представлена информация что обеспечит очень хорошее понимание как линейные стабилизаторы работают и будет помогать пояснять состав регулятора и области применения.

Некоторые типичные схемы будут представлены в свете коммерческих стабилизаторов, доступных в настоящий момент. Основное внимание уделено примерам новых продуктов в области стабилизаторов с низким падением напряжения, которые предлагают большие преимущества по сравнению с обычными во многих разработках.

# Принцип работы линейного стабилизатора напряжения

## Введение

## Все электронные схемы разработаны для питания от какого-либо источника напряжения, которое, обычно, должно быть постоянным. Стабилизатор напряжения обеспечивает это постоянство выходного напряжения и содержит схему что постоянно удерживает выходное напряжение в значениях в пределах заложенных при разработке допусков. Несмотря на изменение тока нагрузки или входного напряжения (здесь подразумевается, что ток нагрузки и входное напряжение находятся в пределах определённых в спецификации элемента.

## Основы работы линейного стабилизатора

Линейный стабилизатор работает при помощи источника тока управляемого напряжением чтобы заставить фиксированное напряжение появляться на выходе стабилизатора (см рисунок 1).



Рисунок. . Функциональная схема линейного стабилизатора.

Схема управления может должна контролировать выходное напряжение и воздействовать на источник тока (как требуется для нагрузки) чтоб поддержать выходное в необходимых значениях. Заложенные ограничения источника тока определяют максимальный ток нагрузки, выдаваемый стабилизатором, при котором ещё сохраняется способность стабилизировать.

Выходное напряжение контролируется при помощи петли обратной связи, которая требует некоторой компенсации для стабильной работы. Большинство линейных стабилизаторов имеют встроенную схему компенсации и очень стабильно работают без внешних элементов. Некоторые стабилизаторы (например с низким падением напряжения) требуют некоторых внешних конденсаторов подключаемых от выходного вывода к земле для гарантии стабильности.

Другие характеристики любых линейных стабилизаторов, говорят сколько нужно определенного времени для приведения в соответствие выходного напряжения после изменения тока потребления. Это отставание по времени определяется переходной характеристикой. Она определяет как быстро стабилизатор вернётся в устойчивое состояние после изменения нагрузки.

## Работа петли управления

Работа петли управления типичного линейного регулятора будет разъяснена с использованием упрощённой схемы на рисунке 2 (функции петли управления похожи во всех типах линейный стабилизаторов).



Рисунок. . Схема распространённого линейного стабилизатора

Проходное устройство (Q1) в этом стабилизаторе сделано на NPN транзисторах по схеме Дарлингтона с управляющем PNP транзистором (это стандартный стабилизатор, что будет рассказано далее). Ток вытекающий из эмиттера проходного транзистора (который также ток нагрузки Il) управляется при помощи Q2 и усилителя ошибки напряжения. Ток через резистивный делитель R1, R2 должен быть пренебрежимо малым по сравнению с током нагрузки.

Петля обратной связи, которая контролирует выходное напряжение получуна с использованием R1 и R2 для измерения выходного напряжения и прикладывания этого напряжения к инвертирующему входу усилителя напряжения ошибки. Не инвертирующий вход соединён с источником опорного напряжения. Что подразумевает что усилитель ошибки будет постоянно регулировать своё выходное напряжение (и ток через Q1) для поддержания напряжений на своих входах равных друг другу.

Работа петли обратной связи – постоянно поддерживать фиксированное значение на регулируемом выходе, которое состоит из опорного напряжения (как установлено R1 и R2) несмотря на изменение тока нагрузки.

Важно отметить что неожиданное увеличение или уменьшение потребление тока нагрузки (шаговое изменение сопротивления нагрузки) влечёт за собой изменение выходного напряжения до тех пор пока петля не сможет скорректировать и стабилизировать новый уровень (это называется переходная характеристика). Изменение выходного напряжения ощущается через R1 и R2 и появляется как сигнал ошибки на входе усилителя ошибки, в результате чего корректируется ток через Q1.

## Типы линейных стабилизаторов (стандарты LDO и квази-LDO)

Будет рассказано о трёх основных типов линейных регуляторов:

Стандартный (NPN Дарлингтон) стабилизатор

Стабилизатор с низким падением напряжения (LDO)

Стабилизатор с квазе низким падением напряжения (Quasi LDO)

Одно самое важное различие между этими тремя типами – это перепад напряжения, что определяется минимальным падением напряжения на стабилизаторе при котором поддерживается стабилизация выходного напряжения. Критическая точка будет рассмотрена, в которой стабилизатор работает при минимальном падении напряжения на нём, рассеивая мало мощности потерь, соответственно имея высокую эффективность. Стабилизаторы LDO требуют меньшее падение напряжение, в то время как стандартные большего.

Следующее важное различие между типами стабилизаторов – это ток земляного вывода требуемый устройству при изменении номинального тока нагрузки. Стандартные регуляторы имеют меньший земляной ток по сравнению с большинством LDO (разница между типами пояснена в следующих параграфах). Увеличенный земляной ток нежелательное явление, поскольку это выброшенный ток что должен потреблять стабилизатор от источника, но не питать нагрузку.

## Стандартный NPN стабилизатор

Первая интегральная микросхема стабилизатора напряжения сделана на NPN транзисторе по схеме Дарлингтона – проходного элемента и называется Стандартный стабилизатор (см. Рисунок.3.)



Рисунок. . Стандартный NPN стабилизатор

Важно отметить что Стандартному стабилизатору для поддержания регулировки по выходу требуется минимальное падение напряжение на проходном транзисторе определяемое:

Vd(min)=2Vbe+Vce (Стандартный стабилизатор)

В разрешённом диапазоне температур от -55°С до +150°С минимальное падение напряжение требуется обычно около 2.5В – 3В при котором производитель гарантирует выполнение требований заявленных в спецификации.

Падение напряжения на стабилизаторе , при котором стабилизация выходного напряжения уже не осуществляется (называется перепад напряжения) будет, вероятно, между 1.5В и 2.2В для стандартного (это зависит от тока нагрузки и температуры). Перепад напряжения стандартного стабилизатора самый большой (наихудший) из всех трёх типов.

Земляной ток стандартного стабилизатора очень низкий (так LM309 может питать нагрузку током 1А при земляном токе менее 10 мА). Причина этого в том что базовый управляющий ток проходного транзистора (который вытекает через земляной вывод) равен току нагрузки делённому на коэффициент усиления проходного устройства. В стандартных регуляторах проходной элемент есть сеть составленная из одного NPN и двух PNP транзисторов, в результате чего итоговый коэффициент усиления чрезвычайно высок (>300)/

Результатом использования проходного устройства с таким высоким коэффициентом усиления по току является то что такой маленький нужен для управления базой проходного транзистора что и ведёт к малому земляному току. Земляной ток стандартного стабилизатора наименьший (лучший) из всех трёх типов стабилизаторов.

## Стабилизаторы с низким падением напряжения (LDO)

Стабилизаторы LDO отличаются от стандартный тем что проходной элемент сделан только на одном PNP транзисторе (см Рисунок. 4.)



Рисунок. . Стабилизатор с низким падением напряжения (LDO).

Минимальное падение напряжения на LDO стабилизаторе для поддержания стабилизации только напряжение на одном PNP транзисторе:

Vd(min)=Vce (Стабилизаторы LDO)

Максимальное заявленное падение напряжения на LDO стабилизаторе обычно в пределах от 0.7В до 0.8В при полном токе нагрузки, типичное значение около 0.6В. Падение напряжения напрямую зависит от тока нагрузки. Что означает что при очень низком значении тока нагрузки падение напряжения может быть так мало как 50 мВ. LDO стабилизаторы имеют самое низкое заявленное падение напряжения (наилучшее) из трёх типов стабилизаторов.

Низкое падение напряжение стало причиной доминирования LDO стабилизаторов для питания устройств от батарей. Они увеличили допустимое входное напряжение могут работать с высочайшей эффективность. Взрывной рост питающихся от батарей потребительских продуктов в прошлые годы стал драйвером развития линейки стабилизаторов LDO.

Земляной ток в стабилизаторах LDO приблизительно равен току нагрузки делённому на коэффициент усиления одного PNP транзистора. Следовательно земляной ток LDO наибольший из трёх типов.

Для примера LP2953 LDO стабилизатор согласно спецификации при токе нагрузки 250 мА имеет земляной ток 28 мА (или менее). Это определяется коэффициентом усиления 9 или выше. LM2940 (который также 1А LDO стабилизатор) имеет земляной ток 45 мА (максимальный), при максимальном токе нагрузки. Это требует коэффициент усиления по току не менее чем 22 для PNP проходного транзистора при допустимом токе.

## Стабилизаторы с квазе низким падением напряжения

Вариация стандартнго стабилизатора это стабилизаторы с квазе – низким падением напряжения (quasi-LDO), которые используют NPN и PNP транзистор как проходной элемент (см Рисунок. 5).



Рисунок. . Стабилизаторы с квазе низким падением напряжения (quasi-LDO).

Минимальное падение напряжения на quasi-LDO стабилизаторе для поддержания стабилизации определяется:

Vd(min)=Vbe+Vce (quasi-LDO стабилизатор)

Падение напряжения для quasi-LDO работающего при номинальном токе обычно заявляется около 1.5В (максимально). Реальное падение напряжения зависит от температуры и тока нагрузки, но некогда не может опуститься ниже чем около 0.9В (при 25°С) даже при минимальном токе. **Падение напряжения на стабилизаторе quasi-LDO больше чем на LDO но меньше чем на стандартном.**

Земляной ток для quasi-LDO достаточно низкий (обычно менее чем 10 мА для полного номинального тока) что хорошо так же как и в стандартных стабилизаторах.

## Вывод

Сравнение трёх типов стабилизаторов напряжения представлено на рисунке 6.



Рисунок. . Сравнение трёх типов стабилизаторов.

Стандартный стабилизатор обычно оптимальный для устройств питающихся переменным напряжением, где низкая стоимость и большой ток нагрузки делают это идеальным выбором. В устройствах питающихся от переменного напряжения напряжение на стабилизаторе по крайней мере 3В и выше, так падение напряжения не критично.

Интересно, что в таких устройствах (где падение напряжения на стабилизаторе >3В) стандартные стабилизаторы действительно более эффективны чем LDO (потому что стандартные имеют меньшую рассеиваемую мощность потерь из-за меньшего земляного тока)

Стабилизаторы LDO лучше подходят для устройств питающихся от батарей, потому что низкое падение напряжения переводится прямо в стоимость сэкономленную на снижении количества ячеек – батарей требующихся для обеспечения стабильного выходного напряжения. При небольшой разнице напряжений вход – выход (от1В до 2В) LDO более эффективны чем стандартные стабилизаторы. Потому что понижение рассеиваемой мощности определяющейся умножением тока нагрузки на падение напряжения в LDO заметно выше.

## Выбор оптимального стабилизатора для питания устройств

Выбор стабилизатора для определённого устройства может осуществляться с оценкой следующих требований:

максимальный ток нагрузки

тип входного источника напряжения (батарея или сеть переменного тока)

допуск на выходное напряжение(точность)

ток покоя (холостой)

определенные функции (вывод выключения, флаг ошибки, и т.д)

## Максимальный ток нагрузки

Максимальный ток нагрузки требуемый для устройства должен быть чётко определён при выборе микросхемы стабилизатора. В спецификации на интегральную микросхему стабилизатора будет указано либо одиночное значение или значение, что зависит от разницы напряжений вход – выход (подробней об этом рассказано в параграфе схема защиты).

Выбранный стабилизатор должен обеспечивать достаточный ток для нагрузки при наихудшем случае, который может быть при работе, что бы система работала надёжно.

## Источник входного напряжения (батарея или сеть переменного тока)

От входного источника питания будет сильно зависеть какой тип стабилизатора лучше подходит в конкретном случае.

**Батарея.** В устройствах с батарейным питанием LDO стабилизаторы обычно лучший выбор, потому что они используют доступное входное напряжение в большей мере (могут работать дольше в цикле разряда источника).

Для примера 6В оксидо - свинцовая батарея (распространённый тип батарей) имеет напряжение на контактах около 6.3В при полном заряде. И около 5.5В под конец разрядного цикла. Если разработчик желает получить стабильные 5В от этой батарее, тогда потребуется LDO стабилизатор. Потому что только этот тип регуляторов имеет падение напряжения около 0.5В – 1.3В.

**Сеть переменного тока.** Если питание постоянным током осуществляется от выпремленного переменного тока падение напряжение на стабилизаторе не столь критично, потому что входное напряжение на стабилизаторе легко получить добавлением напряжения на вторичной обмотки трансформатора, увеличением числа витков.

В этом случае стандартный стабилизатор обычно более экономичный вариант и может обеспечить больший ток нагрузки. Однако в некоторых случаях дополнительные функции и лучшая точность выходного напряжения некоторых новых типов LDO стабилизаторов так же сделает их лучшим выбором.

## Точность выходного напряжения (допуск)

Распространённые линейные стабилизаторы в основном имеют стабильное выходное напряжение в пределах 5% от номинального значения. Это достаточный уровень для большинства случаев применения.

Многие новые стабилизаторы которые имеют более жёсткий допуск отклонения выходного напряжения (менее чем 2% в общем), что достигнуто благодаря использованию лазерных технологий. Так же в новых стабилизаторах параметры в спецификации разделены на группы: область температур/полный диапазон рабочих температур и работа при полной нагрузки/работа в облегчённом режиме.

## Ток покоя (холостой ток)

Ток покоя что устройство потребляет от источника на холостом ходу (так же в выключенном состоянии или при малых токах нагрузки) долен быть принят во внимание в устройствах с батарейным питанием.

В некоторых устройствах стабилизатор может провести большинство своей жизни в выключенном состоянии (в режиме ожидания) и отдавать ток в нагрузку только при выходе из строя основного стабилизатора. В этом случае ток покоя определяет время жизни батареи.

Многие новые LDO стабилизаторы оптимизированы под низкий ток покоя (порядка 75 – 150 мА) и обеспечивают значительное преимущество над распространёнными стабилизаторами, с значениями несколько миллиампер.

## Дополнительные функции

Многие LDO стабилизаторы предлагают характеристики дающие разработчику гибкость в выборе.

**Вывод отключения.** Вывод низкого потребления позволяет выключить стабилизатор логическим состоянием, например с вывода микроконтроллера. Эта функция так же позволяет соединять стабилизатор для защёлкивания включения выключения. Это будет рассмотрено в одно из примеров проекта представленных далее.

**Защита от перегрузки.** Стабилизаторы использующиеся в автомобильных устройствах нуждаются в защите от кратковременных скачков напряжения. В таких случаях стабилизатор обычно отключает свой выход в течении периода перенапряжения. И восстанавливает как только это прошло.

**Защита от изменения полярности входного напряжения.** Это предотвращает повреждение стабилизатора при несоблюдении полярности входного напряжения. Что очень важно в устройствах где пользователи могут подключить батарею перепутав полярность.

**Флаг ошибки**Этот флаг используется для сигнала предупреждения или схемы контроля о том что выходное напряжение вышло за пределы допустимых 5%, находится ниже номинального значения. Это понимается как флаг предупреждения что должен сигнализировать контроллер о напряжении питания, ниже достаточного и может привести к неустойчивой работе процессора или связанных логических схем.

## Схема защиты встроенная в интегральную микросхему линейного стабилизатора

Микросхемы линейных стабилизаторов содержат встроенную схему защиты которая делает их потенциально защищенными от повреждения от чрезмерного тока нагрузки или высоких рабочих температур. Две схемы защиты находятся практически во всех линейных стабилизаторах на основе интегральных микросхем:

Температурное отключение

Ограничение по току.

## Цепи команд

Температурное отключение, ограничение по току и усилитель напряжения ошибки сделаны на отдельных самостоятельных цепях что имеют определённую иерархию (сложившийся порядок), который позволяет одному опережать других. Порядок команд и приоритет срабатывания петлей:

1) Температурное ограничение (микросхема работает в режиме стабилизации температуры перехода / потребляемой мощности)

2) Ограничение по току (микросхема работает в режиме стабилизации по току

3) Управление напряжением (микросхема работает в режиме стабилизации напряжения)

Эта иерархия подразумевает что линейный стабилизатор будет пытаться нормально работать в режиме постоянного напряжения, когда усилитель ошибки стабилизирует выходное напряжение в фиксированном значении. При этом обязательно и ток нагрузки и температура перехода должны быть ниже своих ограничительных значений.

Если ток нагрузки увеличится до ограничительного значения, схема ограничения по току возьмёт управления и удержит ток нагрузки в предельно допустимом значении, опережая усилитель напряжения ошибки. Он в свою очередь может возобновить контроль только если ток нагрузки понизился достаточно для освобождения схемы от ограничения по току. Подробно об этом рассказано в разделе «Ограничение по току».

При повышении температуры корпуса (независимо от причины), при приближении значения к ограничительному порогу (около 160 °С) срабатывает защита от перегрева отключая силовой транзистор, таким образом понижая ток нагрузки и мощность рассеяния на элементе. Отметим, что температурное ограничение может опередить и схему ограничения по току и усилитель напряжения ошибки. В следующем разделе будет подробно рассказано о температурной защите.

Важно понимать что стабилизатор держит фиксированное выходное напряжение только тогда, когда он постоянно находится в режиме стабилизации напряжения. В ограничении по току выходное напряжение будет снижено как требуется для удержания тока нагрузки в установленном ограничением значении.

В температурном ограничении выходное напряжение падает и ток нагрузки может быть понижен до любого значения (включая нулевое). **Характеристики заявленные в спецификации не выполняются, когда устройство работает в режиме тепловой защиты.**

## Тепловая защита

Схема тепловой защиты в интегральной микросхеме предотвращает повышение температуры корпуса настолько что достаточно для повреждения компонента (см. Рисунок. 7). Это осуществляется наблюдением за температурой корпуса и понижением мощности рассеяния микросхемы для удержания температуры в значении ограничения (обычно около 160°С).



Рисунок. . Тепловая защита.

Принцип работы схемы.

Температурный датчик (Q1) расположен близко к силовому транзистору на кристалле, что бы гарантировать очень близкий температурный переход. R1 и R2 удерживают на базе Q1 напряжение около3.5В, что соответствует включению перехода Vbe Q1 при температуре около 160°С.

При повышении температуры кристалла Q1 в конечном счёте достигает порога открывания (около 160°С) и оттягивает ток от источника тока, который питает цепь управления силовым каскадом. В этом случае ток нагрузки снижается (или прекращается совсем), что снижает внутреннюю мощность рассеивания стабилизатора.

При срабатывании тепловой защиты и выходное напряжение и ток нагрузки будут снижены. При снижении выходного напряжения ниже его номинального значения, сигнал ошибки появится на усилители напряжения ошибки, который в свою очередь начнет пытаться скорректировать выходное напряжения (питая большим током базу проходного транзистора).

Схема теплового ограничения по току может отобрать весь ток с выхода усилителя ошибки и оставить выходное напряжение/ток стабилизатора таким низким как нужно для поддержания температуры корпуса 160°С. Как показано, схема тепловой защиты может опередить схему контроля напряжения, когда нужно предотвратить повреждение интегральной микросхемы.

## Схема ограничение тока

Назначение схемы ограничения тока не допустить повреждение микросхемы при перегрузках на выходе стабилизатора (сопротивление нагрузки слишком мало). Без ограничения тока стабилизатор будет источником чрезмерного тока нагрузки и разрушит внутренний проходной транзистор.

Что бы предотвратить это происшествие схема ограничения тока будет опережать петлю управления напряжением и отключит управление проходным транзистором. Таким образом максимально допустимый уровень выходного тока не превышается.

Наиболее часто в линейных стабилизаторах используются две базовые схемы ограничения тока (подробно описаны в следующих разделах):

Постоянное ограничение тока

Ограничение тока зависимое от напряжения (иногда называется «сворачиваемое ограничение»).

## Постоянное ограничение тока

Максимальный ток что может выдавать стабилизатор в нагрузку указан в data sheet. Для многих стабилизаторов ( и для большинство стабилизаторов LDO) указано только одиночное значение максимального тока. Это значение гарантируется при любых входных/выходных напряжениях в пределах максимальных значений элемента.

Для примера LP2952 гарантированный источник по крайней мере 250 мА без попадания в ограничение по току при любых значениях выходного напряжения от 1.2В до 29В и входного напряжения по крайней мере на 0.8В больше выходного.

Упрощённая схема обеспечивающая постоянное ограничение тока представлена на рисунке 8. Это вариант реализации проекта на дискретных элементах (схема используемая в интегральном исполнении может слегка отличаться).



Рисунок. . Схема постоянного ограничения по току.

Принцип работы схемы.

Ток нагрузки измеряется на сопротивлении «I sense», падение напряжения на котором прямо пропорционально току. Это напряжение сдвигается по фазе и усиливается дифференциальным усилителем.

Напряжение на выходе дифференциального усилителя – сигнал пропорциональный току нагрузки относительно земли. Этот "ток нагрузки" сигнал, поступающий от дифференциальный усилитель подается на инвертирующий вход усилителя тока ошибки, в то время как вход неинвертирующий соединен с опорным напряжением. Значение этого опорного напряжения должно быть равно напряжению на выходе дифференциального усилителя при максимальном токе нагрузки регулятора (это точка ограничения тока).

Отметим что все время пока ток нагрузки ниже порога ограничения, выход усилителя тока ошибки в высоком состоянии (и усилитель напряжения ошибки регулирует постоянное выходное напряжение).

При достижении током нагрузки ограничительного порога, выход усилителя тока ошибки принимает низкое состояние и начинает забирать ток с выхода усилителя напряжения ошибки (что переводит стабилизатор в режим постоянного выходного тока).

При работе в ограничении по току напряжение на выходе стабилизатора снижается ниже своего номинального значения, что измеряется усилителем напряжения ошибки как недостаточное выходное напряжение. Поэтому усилитель напряжения ошибки будет поднимать свой выход в высокое состояние пытаясь повысить сниженное выходное напряжение. Однако, усилитель тока ошибки может слить весь ток поступающий от первого. Как температурное ограничение, ограничение тока опережает усилитель напряжения ошибки для предотвращения повреждения интегральной микросхемы.

Нагрузочная характеристика представленная на рисунке 8 показывает как выходное напряжение поддерживается постоянным до уровня при котором ток нагрузки достигает предельного значения. Где стабилизатор переходит в режим постоянного тока. **При работе в режиме постоянного тока** микросхема стабилизирует ток нагрузки в значении ограничения, что означает что **выходное напряжение может снижаться до любого значения в том числе до нуля.**

Нужно понимать, что **тепловое ограничение может всегда опередить токовое и понизить выходное напряжение и ток до любого значения для поддержания температуры корпуса около 160°С.**

Для примера если в LP2952 (которая 250 мА) закоротить выход на землю, выходной ток будет течь больше чем 250 мА, но меньше чем 530 мА (см. ограничение по току в data sheet).

При этом если входное напряжение достаточно высоко чтобы выделять мощность, при которой включается режим ограничения по мощности, этот ток будет снижаться в зависимости от регулировки LP2952 температуры кристалла около 160°С.

**Важно:** Схема ограничения тока должна быть очень высокоскоростной и блокировочный конденсатор на входе стабилизатора всегда рекомендуется для предотвращения повреждения устройства из-за взаимодействия с сопротивлением входного источника.

## Ограничение по току зависимое от напряжения (foldback)

В стабилизаторах напряжения рассчитанных на ток больше 1А используется тип зашиты от перегрузки по току в котором максимально допустимое значение тока нагрузки зависит от разницы напряжений вход-выход.

На характеристика всех транзисторов есть зона безопасной работы (SOA) это и послужило причиной возникновения ограничения тока зависящее от напряжения. Зона безопасной работы (далее SOA) – ограничение тока транзистора при повышении напряжения, при которых он работает без выхода из строя (см. Рисунок. 9.)



Рисунок. . (SOA) Зона безопасной работы NPN транзистора 3А/60В.

Данные для характеристики SOA взяты из data sheet NPN транзистора TIP31A (3A/60В). Важной информацией на характеристике SOA является то что максимально допустимое значение тока снижается на 15% при максимальном напряжении на транзисторе (Vce). Если использовать транзистор при максимально допустимом токе, тогда напряжение Vce должно быть ниже 14В.

Важно понимать что напряжение вход-выход линейного стабилизатора так же напряжение Vce его пропускного транзистора. Что означает что ток нагрузки должен быть ограничен в соответствии с характеристикой SOA транзистора стабилизатора.

Ограничительная характеристика для линейного стабилизатора должна быть подогнана под SOA проходного транзистора для того что бы элемент не вышел из строя при повышенных нагрузках. Характеристика ограничения тока микросхемы LM317 подробно описана далее с иллюстрацией на Рисунке 11. Видно, что форма кривой напоминает кривую SOA на рисунке 9, нарисованную на линейной оси.

## Сравнение фиксированного ограничения по току и зависящего от приложенного напряжения (foldback)

Фиксированное ограничение потоку и ограничение зависящее от приложенного напряжения имеют разные характеристики, в них легко запутаться.

Предполагая, что разработчик хотел проверить ограничение тока, он мог бы использовать резистор для регулирования мощности подключённый к выходу регулятора (Рисунок 10). По мере того как сопротивление регулируют до более низких значений (и ток нагрузки возрастает), в конечном счёте будет достигнута точка, где наступит ограничение тока.



Рисунок. . Схема тестирования ограничения по току.

**Фиксированное ограничение по току**. При наступлении ограничения по току выходное напряжение заметно надает от номинального значения, стабилизатор переходит из режима постоянного напряжения в режим постоянного выходного тока.

Как только сопротивление нагрузки снизится и наступит ограничение по току, итогом чего станет то что выходное напряжение будет падать прямо пропорционально уменьшению сопротивления нагрузки (потому что ток нагрузки остаётся постоянным).

Падение выходного напряжения может быть сделано, чтобы происходить постепенно, и выходное напряжение

можно перемещать вверх и вниз, регулируя сопротивление нагрузки.

Если сопротивление нагрузки увеличивается выше точки, в которой ограничитель тока активирован, регулятор автоматически вернется в режим постоянного напряжения (выходное напряжение будет в фиксированным).

**Ограничение тока зависящее от напряжения (foldback)**. Принцип работы этой схемы отличается, потому что здесь присутствует некоторый встроенный гистерезис. При уменьшении сопротивления нагрузки до точки, где наступает ограничение тока, выходное напряжение нем должно существенно снизиться и стать намного ниже номинального значения.

Возврат сопротивления нагрузки обратно к значению в котором ограничение по току ещё не наступало не может восстановить выходное напряжение до номинального значения (сопротивление нагрузки должно быть увеличено до большего значения что бы позволить стабилизатору вернуться в режим стабилизации напряжения). Это, очевидно, "гистерезис", обусловлен формой кривой (см. Рисунок. 11).

****

Рисунок.. Схема ограничения по току в зависимости от напряжения (foldback).

Показанная на примере линяя нагрузки была построена с использованием типового значения предельного тока, предполагая, что VIN = 40В и Vout = 28В. Форма линии нагрузки объясняет принцип работы ограничения по току зависящее от напряжения. Такая схема называется Foldback, поскольку наблюдается (см. рисунок 11) падения значения тока нагрузки значения наблюдаются падение с увеличением выходного напряжения. Что бы лучше понять, как ограничение FOLDBACK работает с гистерезисом требуется представить информацию на рисунке 11 несколько иначе:

Область линии нагрузки показывающей ограничения тока будет использована для получения значений точек сопротивлений нагрузки, которые эквивалентны каждому напряжение/ток значению на характеристике (область с постоянным напряжением не отображается).

Нагрузочная характеристика ограничения по току со значениями сопротивлений нагрузки в различных рабочих точках при работе стабилизатора в области ограничения (см. Рисунок. 12).



Рисунок. . Нагрузочная характеристика LM317 в режиме ограгничения.

Характеристика на рисунке 12 показывает принцип работы ограничения по току foldback с гистерезисом при выходных напряжениях во время уменьшения сопротивления нагрузки. Например:

Предположим что сейчас выходное напряжение микросхемы 28В (работа в режиме стабилизации напряжения) и сопротивление нагрузки установлено в 14 Ом (ток нагрузки=2A). Теперь постепенно понижая сопротивление нагрузки до 12.2 Ом. При этом значении ток нагрузки будет достаточен для наступления ограничения. С этого момента значения можно увидеть на характеристике (Vout =28В) причём оно внезапно упадёт до значения эквивалентное сопротивлению 12.2 Ом. Точка на нагрузочной характеристике соответствующая выходному напряжению около 7В.

При попытки восстановить работу в режиме постоянного выходного напряжения (V out = 28 В) возвращая переменный резистор в 14 Ом, где предварительно выходное напряжение составляло стабилизированные 28 В, выясняется что напряжение не восстановилось. Проделав это возврат к выходному напряжению 28В осуществлён не будет, даже при возврате обратно в рабочую точку в которой сопротивление 14 Ом, как было изначально. Однако теперь здесь наблюдается значение выходного напряжения V out 10В.

А для того что бы получить обратно 28В сопротивление нагрузки должно быть увеличено выше 15,1Ом т.е. рабочая точка должна переступить выступ на характеристике. При постепенном увеличении сопротивления нагрузки выходное напряжение будет медленно повышаться до значения близкое к 14В и потом скакнет до 28В.

На этом примере видно, что нету значений сопротивления нагрузки при которых выходное напряжение стабилизатора будет находиться в пределах от 14В до 28В. Это связано с гистерезисом, который имеет место быть в некоторых случаях в которых стабилизатор с ограничением по току foldback работает при токе нагрузки, при котором действует схема ограничения.

# Советы по применению линейных стабилизаторов

Информация о применении будет представлена на темы, связанные с ошибками, часто совершаемые при применении линейных стабилизаторов.

## Выходная емкость влияющая на стабильность обратной связи регулятора

Выходной конденсатор используемый в линейных стабилизаторах может привести к самовозбуждению паразитных колебаний, если он выбран не правильно.

**Паразитные элементы конденсатора.**

Каждый реальный конденсатор содержит нежелательные паразитные элементы, которые ухудшают его электрические характеристики (Рисунок 13).



Рисунок. . Модель реально конденсатора

Наиболее важными элементами являются эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) и эффективная последовательная индуктивность (ESL).

Эквивалентная последовательная индуктивность (ESL) ограничивает эффективность конденсаторы на высоких частотах, и это основная причина почему электролитические конденсаторы должны быть зашунтированы хорошими ВЧ конденсаторами (керамические или плёночные часто используются). В импульсных источниках питания это важное требование.

приложения (импульсный регулятор и керамические пленки типа часто используются).

Эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) является основной причиной нестабильности контура обратной связи в импульсных стабилизаторах и стандартных линейных LDO (с низким падением напряжения). Для того, чтобы понять это, краткий обзор теории обратной связи будет представлен для иллюстрации эффекта ESR на отклик петли.

## РЕАКЦИЯ ПЕТЛИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ СТАБИЛИЗАТОРА

Отклик петли типичного регулятора показан на рисунке 14. Наиболее важной точкой, чтобы понять, что для стабильной работы, коэффициент усиление должен пересечь отметку ниже 0 дБ до того как сдвиг фаз достигнет 180 °.

Фазовый сдвиг 180 ° означает, что сигнал обратной связи, который подается обратно с выхода на вход на самом деле положительная обратная связь наличие которой и приводит к возникновению паразитных колебаний.



Рисунок. . Коэффициент усиления петли обратной связи.

Примечание: в реальных условиях, запаса по фазе в 45 °, как правило, достаточно для хорошей стабильности. Это означает, что, желательно, чтобы коэффициент усиления пересечёт отметку в 0 дБ до того, как фазовый угол достигает 135 °.

В стабилизаторах LDO, применяется выходной конденсатор, чтобы снизить коэффициент усиления на повышенных частотах достаточно для соответствия требованиям стабильной работы (стандартный регулятор на NPN транзисторе, как правило не требует выходных конденсаторов для стабильности).

Как показано на рисунке 14, в этом случае, последовательное эквивалентное сопротивление (ESR) выходного конденсатора равное нулю задерживает точку пересечения о дБ. При значениях ESR достаточно высоких для получения нулевого коэффициента усиления на частотах, на которых сдвиг фаз приближается к значению 135 градусов в достаточной мере выполняется требование стабильности.

Требования стабильности для конкретного стабилизатора будет печататься в data sheet элемента. В некоторых случаях приводится диапазон значений с указанием требований ESR максимального и минимального пределов. В самых новых элементах встречается только максимальный предел (что во многом упрощает выбор конденсатора).

## Температурная зависимость последовательного эквивалентного сопротивления (ESR).

Теперь уяснив необходимость правильно выбора ESR выходного конденсатора стабилизатора LDO (что бы предотвратить паразитные колебания), необходимо отметить,

одну очень важную вещь: ESR не является постоянной величиной при изменении температуры.

На рисунке 15 показана зависимость ESR от температуры для типичного алюминиевый электролитического конденсатора. Наиболее важным моментом для исследования является область, показывающая как быстро, ESR увеличивается при низких температурах.



## Рисунок. 15. Последовательное эквивалентное сопротивление (ESR) алюминиевого электролитического конденсатора, при разных температурах.

В случаях, в которых LDO стабилизатор должен работать при температурах ниже -10 С иногда невозможно найти алюминиевый электролитический конденсатор с ESR находящимся в допустимых пределах. Так же важно то, что конденсатор должен работать в пределах всего диапазона рабочих температур, при этом некоторые алюминиевые электролиты не пригодны для использования при температурах ниже -20 С (потому что их электролит замерзает).

Если стабилизатор имеет только оба и максимальный и минимальный приделы (ESR должна находиться в определённом диапазоне), тогда может возникнуть необходимость в использовании низкоомных углеродистых плёночных резисторов. Которые устанавливают последовательно с конденсатором с низким ESR (танталовые, плёночные и керамические так же пригодны).

От того, какая потребуется суммарная ёмкость и будет зависеть выбор того или иного типа конденсатора.

## Стабилизация нагрузки

Как правило стабилизаторы обеспечивают значительно лучшие показатели стабильности нагрузки, чем нам самом деле можно встретить в тех или иных случаях из-за падения напряжения на длинных проводниках работающих при высоких токах. Что бы понять как и почему это происходит мы рассмотрим пример со стабилизаторами с фиксированным выходным напряжением и с регулируемым.

## Стабилизаторы с фиксированным выходным напряжением

Типичное применение микросхемы LM780 (трехвыводной стабилизатор) представлено на рисунке 16.



Рисунок. . Стабилизация нагрузки с учётом падения напряжения на проводниках.

Разработчиков в большинстве случаев интересует напряжение на самой нагрузке, однако LM7805 стабилизирует напряжение, что действует между выходным и земляным выводами. Любое падение напряжения что происходит между выводами стабилизатора и нагрузкой понижают напряжение на последней (и ухудшают регулировку нагрузки).

Обычно V нагр всегда меньше чем V вых на сумму напряжений падающих на положительном и отрицательном проводниках печатной платы (проводах). Падение напряжения на выводах эквивалентно падению на сопротивлениях, на рисунке 16 Rwp и Rwn, которые влияют на ток нагрузки.

Это очень ясно показывает как сопротивление дорожек может стать причиной неверного напряжения на выходных клеммах. Величины ошибки напрямую будет зависеть от тока нагрузки. Видно, что в таких случаях стабилизация на нагрузке будет значительно хуже чем написано в спецификации микросхемы стабилизатора.

Стабилизация выходного напряжения может быть улучшена двумя способами:

Переместить элемент на плате связать земляной вывод стабилизатора непосредственно с выводными клеммами. Так, что ни какой лишний ток не может течь в месте и вызвать падение напряжения.

Уменьшить падение напряжения на положительном выводе, используя максимально возможную толщину проводника и поместить микросхему стабилизатора на сколько это физически возможно ближе к нагрузке.

## Стабилизаторы с регулировкой выходного напряжения

Регулируемые линейные стабилизаторы отличаются от стабилизаторов с фиксированным выходным напряжением, тем что используется резистивный делитель (наряду с внутренним источником опорного напряжения) для установки выходного напряжения.

Трехвыводныестабилизаторы

В трехвыводных регулируемых стабилизаторах (например, LM317), опорное напряжение прикладывается между выходным и регулирующим выводом (см. Рисунок. 17).



Рисунок. .Влияние падений напряжения на проводниках на стабилизацию напряжения (стабилизатор LM317).

В схеме для лучшего регулирования нагрузки, показано, что напряжение, непосредственно на нагрузке уменьшается от номинального выходного напряжения в результате падения напряжения на сопротивлении положительного проводника, что определяется умножением этого сопротивления на ток нагрузки.

Как отмечалось ранее, наилучшие характеристики получены при соединении отрицательной (земляной) стороны резистивного делителя прямо с выходной отрицательной клеммой. Такая схемотехника исключает падение напряжения на отрицательном проводнике при высоких токах, что влечёт за собой дополнительное уменьшение напряжения нагрузки Vload.

На первый взгляд может показаться правильным, что дополнительное улучшение может быть получено соединением верхней стороны делителя с положительной выходной клеммой, но это предположение абсолютно неверно.

Напряжение Vref используется для поддержания (установки) постоянным тока через R1 и R2 и точность выходного напряжения напрямую зависит от точности этого тока. Если R1 соединен с положительной выходной клеммой, падение напряжения на Rwp вычитается из Vref понижая ток через делитель.

Общий эффект от изменения тока является заключается в том что напряжение ошибки умножается на соотношение (1 + R2 / R1), что значительно ухудшает стабилизацию нагрузки.

Многовыводные стабилизаторы

Регулируемые стабилизаторы которые не ограничены только тремя выводами имеют преимущество благодаря использованию земляного вывода, которое позволяет устранить ошибку из-за падения напряжения на выходном проводнике.

 Для примера рассмотрим многофункциональный LDO стабилизатор такого типа LP2951 на ток 250 мА, который способен изменять выходное напряжение от1.23В до 29В. Типовая схема включения представлена на рисунке 18 (слева, падение напряжение на токопроводящих дорожках, исключено из напряжения ошибки).



Рисунок. . Исключение влияния падения напряжения на токопроводящих дорожках на стабилизацию нагрузки в LP2951.

Заметим, что опорное напряжение в LP2951стабилизируется относительно земляного вывода. Несмотря на то что трёхвыводные регулируемые стабилизаторы такого не имеют. Информация касаемо этого стабилизатора вполне применима для любых стабилизаторов, чьё опорное стабилизируется относительно земли.

На рисунке 18 слева напряжение ошибки проводников исключено путём соединения измерительной точки резистивного делителя с выходной клеммой. **Важно**, при использовании такого удалённого метода измерения, чтобы **земляной вывод также был соединён с отрицательной выходной клеммой**, для предотвращения значительных ошибок на V load (см.рисунок 18 справа).

При отдельном соединении земляного вывода и нижней точки резистивного делителя напряжение между двумя точками умножается на коэффициент (1+R1/R2) и прикладывается как напряжение ошибки в нагрузки. С этих пор как это напряжение ошибки стало зависимо от тока нагрузки, Vload становится также измениться при изменении тока нагрузки. Результатом этого будет плохая стабильность нагрузки.

Для лучшей стабилизации нагрузки, R2 необходимо размещать ближе к стабилизатору и соединить напрямую с земляным выводом. От отрицательной выходной клеммы необходимо проложить отдельный проводник к земляному выводу стабилизатора. Напомни что толщина проводников должна быть достаточной, для того что бы падение напряжения было незначительным на всём протяжении, в то время когда элемент проводит максимальный земляной ток (земляной ток может быть достигать 45 мА в 1 А стабилизаторе LDO).

## Характер(истика тока земляного вывода стабилизатора LDO, (по форме напоминающая морковь)

Большинство (но не все) стабилизаторы с низким падением напряжения (LDO) имеют характеристику земляного тока похожую на морковь. Морковь – это выступ на характеристики в которой ток земляного вывода существенно увеличивается при понижении входного напряжения см. рисунок 19.



Рисунок. . Стабилизатор LDO и его характеристика, напоминающая морковь.

Усилитель ошибки стабилизатора всегда пытается поддержать выходное напряжение в номинальном значении регулируя ток нагрузки через проходное устройство (в этом случае PNP транзистор).

При уменьшении входного напряжения (и напряжение на проходном транзисторе уменьшается) коэффициент усиления PNP транзистора будет снижаться. При этом для поддержания правильного значения выходного напряжения усилителю ошибки тяжелей управлять током базы для обеспечения такого же тока нагрузки. Управляющий ток базы PNP транзистора покидает регулятор как ток земляного вывода.

При дальнейшем снижении входного напряжения стабилизатор будет приближаться к режиму с минимальным падением напряжения в результате чего усилитель ошибки будет управлять базой транзистора максимальным током (это вершина моркови). Это значение максимального земляного тока может быть в три или четыре раза больше, что требуется для управления при максимальном токе и 5В падения на проходном транзисторе.

Участок характеристики в виде моркови является нежелательным для работы, поскольку при работе на нём наблюдается заметное увеличение земляного тока, ведущее к лишнему потреблению тока от источника, который не поставляется в полезную нагрузку (потеря энергии на нагрев стабилизатора).

В новейших LDO стабилизаторах встроена схема, предотвращающая заметный подъём земляного тока. Для примера LP2951 (как и все продукты в том семействе) имеют только незначительное увеличение земляного тока, наступающее в области значений входных напряжений, при которых стабилизатор работает в режиме минимального падения напряжения на нём.

# Схемы примеров применения микросхем стабилизаторов

## Введение

Схемы с примерами применения будут представлены с акцентом на некоторые наиболее важные для разработчиков функции новых LDO (с низким падением) стабилизаторов.

## Добавление функции внешнего выключения стабилизатора 5В.

Новый стабилизатор LDO (с низким падением) LP2954 обеспечивает точные выходные 5В и ток нагрузки до 250 мА. Микросхема не имеет встроенного электронного выключения, которое может быть добавлено использованием нескольких внешних компонентов.

Рисунок. . Прецизионный стабилизатор 5В с добавленной функцией отключения низкого потребления.

Маломощная (совместимая с логическими интегральными микросхемами) функция выключения может быть добавлена при помощи полевого транзистора во входной цепи, как переключатель вкл./откл. (см. Рисунок. 20). При токах нагрузки меньше < 300мА, полевой транзистор может работать при с очень низкими потерями мощности. При выборе конкретного полевого транзистора следует отдать предпочтение элементу совместимому с логическими уровнями сигнала, что подразумевает пороговое напряжение между 1В и 3В.

Другое преимущество такого включения заключается в том что при выключенном полевом транзисторе от источника питания протекает только ток утечки стока. Что означает что ток покоя стабилизатора в режиме ожидания не определяющий фактор жизни батареи (толь утечки полевого транзистора).

## Флаги низкого уровня заряда батареи и выходного напряжения стабилизатора 5В

Определённые трудности вызывает у разработчика обеспечить выдачу информационных сигналов, предупреждающих микроконтроллер о наступлении двух важных состояний:

Батарея близка к полной разрядке

Выходные 5В перестали стабилизироваться

LP2953 - многофункциональный стабилизатор с регулируемым выходом, может обеспечить до 250 мА тока нагрузки. Он имеет функцию «флаг ошибки», принимающий низкое состояние при снижении выходного (стабилизированного) напряжения ниже 5% от номинального значения.



Рисунок. . Стабилизатор 5В с флагом низкого уровня батареи.

На рисунке 21 представлен пример использования микросхемы LP2953 для обеспечения шины прецизионными 5В с добавлением функции предупреждения о низком уровне заряда батареи.

Микросхема LP2953 имеет встроенный компаратор, который в этом примере используется для контроля входного напряжения. При разряженной батареи до уровня ниже 5.5В выход компаратора принимает низкое значение (это соответствует 1.1В на одну батареи, если использовать никель – кадмиевую).

Микросхема LP2953 также может обеспечить энергосберегающее отключение, которое управляется с микроконтроллера для снижения потребляемой схемой мощности и предотвращения чрезмерного - разряда батареи.

## Предотвращение снижение выходного напряжение и возможных сбоев микропроцессора

Микропроцессор может дать сбой если его напряжение питания упадёт ниже 3В. К сожалению многие современные микропроцессоры остаются работоспособны (функционируют) даже при таких низких напряжениях как 1.5В. Поэтому от разработчиков требуется удостовериться что питающее напряжение не останется настолько низким, что могут возникнуть проблемы во время значительного периода времени.



Рисунок. . Стабилизатор 5В с предохранением выходного напряжения от снижения и флагом предупреждения о низком уровне заряда батареи.

 На рисунке 22 показан пример использования микросхемы LP2953 (с регулируемым выходом, 250 мА) на схеме с функцией отключения при низком выходном напряжении. Элемент имеет вывод энергосбережения, который используется в схеме управления выходной мощностью при подаче питания и отключения питания.

В этом примере выход подтянут к 5В при помощи внутреннего подтягивающего резистивного делителя (это означает, что гарантированные ограничения в data sheet применимы для точности выходного напряжения).

Вспомогательный компаратор в этом примере используется для предупреждения о низком уровне заряда батареи (и оповещения пользователя о скором отключении).

## Принцип работы схемы

Резистивный делитель построенный на R1, R2 и R3 подаёт напряжение на вход отключения и вход вспомогательного компаратора. Он включён в цепь входного напряжения, а противоположным концом в земляной проводник. Так он позволяет постоянно контролировать входное напряжение (отражающее состояние заряда батареи).

Аккумуляторные батареи (никель кадмиевые или оксидо свинцовые) могут выйти из строя вседствии чрезмерного разряда. Для предотвращения повреждения аккумулятора резисторы делителя подобраны для отключения выходных 5В при падении напряжения батареи до уровня около 5.44В.

Резистивный делитель удерживает выходные 5В до тех пор, пока входное напряжение выше 5.84В (точка разницы напряжений вкл. и откл. устанавливается R4).

Выход вспомогательного компаратора используется как флаг предупреждения, оповещающий пользователя о состоянии батареи, близкому к точке, где произойдёт отключение (что позволяет сохранить работу, прежде чем устройство автоматически отключится). Флаг предупреждения принимает низкое состояние, при достижении батареи уровня 5.55В (это около 0.1В от точки отключения)

Выходное напряжение всегда включено (Vout=5В) или выключено (Vout=0В), что бы предотвратить средние уровни и приняты меры. Это показано графически на рисунке 23( временная диаграмма работы схемы).

При первичной подаче напряжения от батареи и включении, входное напряжение поднимается по меря заряда внутреннего конденсатора. Стабилизатор удерживается в выключенном состоянии пока входной уровень не достигнет 5.84В. Это точка защёлки включённого состояния.

При удалении батареи (выключении) входное напряжение начинает снижаться по мере разряда внутреннего конденсатора. Выходные 5В отключатся и защёлкнутся при снижении на входе до 5.45В. Микросхема LP2953 имеет внутренней crowbar для быстрого снижения выходного напряжения.

Благодаря использованию данного метода исключается возможность работы стабилизатора при выходных напряжениях в пределах от 0В до 5В.



Рисунок. . Временная диаграмма работы защёлки включения/отключения выходного напряжения.

# Стабилизаторы LDO отрицательной полярности

Наряду со стабилизаторами положительной полярности фирма National Semiconductor выпускает LDO стабилизаторы с выходом отрицательной полярности. Микросхема LM2990 рассчитана на ток 1А с фиксированным выходным напряжением в трёхвыводном корпусе TO-220 выпускается с выходными напряжениями: -5В, -5.2В, -12В и -15В.

Версия этой микросхемы с регулируемым выходом LM2991 (пятивыводной корпус TO-220) имеет вывод отключения совместимый с положительным логическим уровнем (несмотря на отрицательное входное и выходное напряжение).

Стабилизаторы LDO отрицательной полярности (совместимые с положительным логическим уровнем) имеют очень большое преимущество, в результате использования качестве проходного элемента одного мощного транзистора NPN . Высокий коэффициент усиления в стабилизаторах отрицательной полярности (по сравнению с устройствами положительной полярности) ведёт к значительному уменьшению земляного тока при управлении максимальным током нагрузки.

Для сравнения, LM2940 (стабилизатор LDO положительной полярности на 1А) потребляет максимальный земляной ток 45мА при питании нагрузки током в 1А. Отрицательная версия на 1А (LM2990) может обеспечить такую нагрузку (током 1А) при земляном тока всего 5 мА. Примечание: оба значения получены при разницы входного/выходного напряжения 5В

Типовая схема включения микросхемы LM2991 показана на рисунке 24.



Рисунок. . Микросхема LM2991стабилизатор LDO (с низким падением напряжения) отрицательной полярности.

Статья переведена с английского языка.

Автор: Chester Simpson Member of Technical StaffPower Management Applications

Literature Number: SNVA558

Linear and Switching Voltage Regulator Fundamental Part 1

National Semiconductor