

Урок 7. Стабилизаторы напряжения и тока

Параметрические стабилизаторы

Стабилизаторы напряжения. При проектировании источников питания электронной аппаратуры предъявляются высокие требования к **стабильности** питающего напряжения. Как медленные, так и быстрые колебания (пульсации) напряжения питания существенно изменяют режим и параметры электронной схемы. Причинами нестабильности могут быть колебания напряжения и частоты питающей сети, изменения нагрузки, пульсации выпрямленного напряжения, колебания нагрузки и влажности окружающей среды.

Например, для питания измерительных устройств, работающих с точностью 0,1%, требуется стабильность напряжения питания не хуже 0,01%.

Основные параметры стабилизаторов напряжения следующие:

- 1) **коэффициент полезного действия**, равный отношению мощности, выделяемой в нагрузке, к входной мощности

$$\eta = P_H / P_{BX} = (U_H I_H) / (U_{BX} I_{BX}) \quad (1)$$

- 2) **коэффициент стабилизации**, определяемый как отношение относительного приращения напряжения на входе стабилизатора $\Delta U_{BX} / U_{BX}$ к относительному приращению напряжения на нагрузке $\Delta U_H / U_H$ при постоянной нагрузке:

$$K_{CT} = \Delta U_{BX} / U_{BX} : \Delta U_H / U_H |_{U_{BX} = \text{const}} \quad (2)$$

- 3) **выходное сопротивление**, показывающее, во сколько раз изменится напряжение на выходе стабилизатора ΔU_H при изменении тока нагрузки

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_H}{\Delta I_H} |_{U_{BX} = \text{const}} \quad (3)$$

При питании усилителей большое выходное сопротивление стабилизатора приводит к появлению паразитных обратных связей через источник питания, вызывающих изменения параметров усилителей и даже самовозбуждение. Поэтому снижение выходного сопротивления стабилизатора является важной задачей.

Высокую стабильность напряжения питания позволяют получить схемы стабилизаторов напряжения, использующие нелинейные элементы, вольт-амперная характеристика которых содержит участок, где напряжение слабо зависит от тока. Такую вольт-амперную характеристику имеет стабилитрон, работающий при обратном напряжении в области пробоя (рис. 1, б).

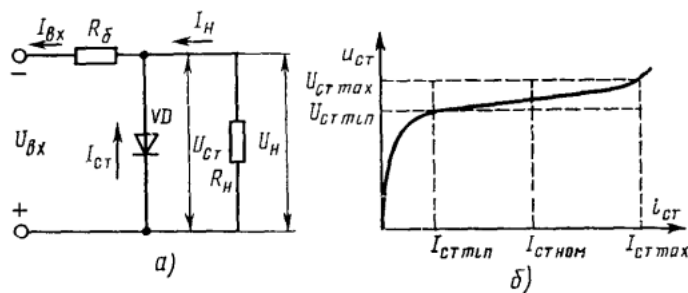


Рис. 1

Схема простейшего стабилизатора напряжения, называемого **параметрическим**, приведена на рис. 1, а. Свойства такого стабилизатора определяются в основном параметрами стабилитрона.

В этой схеме колебания входного напряжения или тока нагрузки приводят только к изменению тока через стабилитрон, а напряжение на стабилитроне, подключенном параллельно нагрузке, остается почти неизменным.

Входное напряжение распределяется в схеме между балластным резистором R_6 и стабилитроном, т. е.

$$U_{BX} = U_{R6} + U_{CT} \quad (4)$$

где $U_{R6} = (I_{CT} + I_H) R_6$ падение напряжения на резисторе R_6 от протекания токов стабилитрона I_{CT} и нагрузки I_H .

Так как напряжение на стабилитроне U_{CT} в соответствии вольт-амперной характеристикой почти не зависит от тока стабилитрона в пределах участка от $I_{CT \min}$ до $I_{CT \max}$, то приращение входного напряжения ΔU_{BX} примерно равно приращению напряжения ΔU_{R6} на резисторе R_6 .

Так как ток нагрузки $I_H = U_H / R_H = U_{CT} / R_H$ останется при этом неизменным, то можно записать

$$\Delta U_{BX} = \Delta U_{R6} = \Delta I_{CT} R_6 \quad (5)$$

т. е. при изменении входного напряжения на ΔU_{BX} ток стабилитрона изменится на величину $\Delta U_{BX} / R_6$.

Теперь предположим, что изменилась нагрузка, например, уменьшилось сопротивление резистора R_H , что привело к увеличению тока нагрузки. Поскольку при неизменном входном напряжении должно сохраняться постоянство входного тока $I_{BX} = I_{CT} + I_H = \text{const}$, увеличение тока I_H влечет за собой уменьшение на такое же значение тока стабилитрона.

Выходное сопротивление параметрического стабилизатора (рис. 1, а) определяется дифференциальным сопротивлением стабилитрона R_d на рабочем участке вольт-амперной характеристики

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_d = \frac{\Delta U_{CT}}{\Delta I_{CT}} = \frac{U_{CT \max} - U_{CT \min}}{I_{CT \max} - I_{CT \min}} \quad (6)$$

так как выходным напряжением стабилизатора является напряжение на стабилитроне $U_H = U_{CT}$, а изменение тока в нагрузке равно изменению тока через стабилитрон: $\Delta I_H = \Delta I_{CT}$.

Записав $\Delta U_{CT} = I_{CT} R_d$ и учтя выражение (5), в соответствии с формулой (2) найдем коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора

$$K_{CT} = \frac{\Delta I_{CT} R_6}{U_{BX}} : \frac{\Delta I_{CT} R_d}{U_H} = \frac{U_H}{U_{BX}} \frac{R_6}{R_d} \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что с ростом R_6 увеличивается коэффициент стабилизации. Однако при заданных U_{BX} , U_H , $I_{CT \text{ ном}}$, I_H сопротивление резистора R_6 однозначно определяется из выражения (9-1):

$$R_6 = \frac{U_{BX} - U_H}{I_H + I_{CT \text{ ном}}} \quad (8)$$

где $I_{CT \text{ ном}} = (I_{CT \max} - I_{CT \min}) / 2$ — номинальный ток стабилитрона (рис. 1, б).

Увеличить R_6 можно, если повысить $U_{вх}$, а это приводит к уменьшению $K_{ст}$. Поэтому значение коэффициента стабилизации параметрических стабилизаторов напряжения обычно не превышает 50. Для повышения $K_{ст}$ можно применять последовательное включение стабилизаторов.

Параметрические стабилизаторы напряжения просты и надежны, однако имеют существенные недостатки, главными из которых являются невозможность регулировки выходного напряжения, малое значение коэффициента стабилизации, особенно при больших токах нагрузки ($I_H > I_{ст\text{ ном}}$).

Стабилизаторы тока. Основным параметром стабилизаторов тока, кроме выходного сопротивления, является коэффициент стабилизации выходного тока, равный отношению относительного приращения входного тока к относительному приращению тока нагрузки, т. е.

$$K_{стi} = \frac{\Delta I_{вх}}{I_{вх}} \frac{\Delta I_H}{I_H} \quad (9)$$

В маломощных параметрических стабилизаторах тока используются элементы с большим сопротивлением по переменному току, вольт-амперная характеристика которых содержит участок, где ток через элемент не зависит от напряжения на нем.

Такую характеристику имеют биполярные транзисторы, включенные с общей базой, сопротивление которых переменному току составляет несколько мегаом.

В качестве стабилизатора тока можно использовать также схему на полевом транзисторе (рис. 2), в которой стабилизация тока осуществляется за счет действия глубокой отрицательной обратной связи по току, создаваемой резистором в цепи истока R_H .

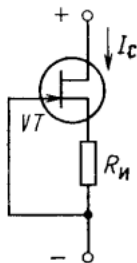


Рис. 2

Падение напряжения на резисторе R_H от протекания тока $I_H = I_c$ равно по абсолютной величине напряжению затвор — исток, т. е.

$$I_c R_H = |U_{зи}|$$

Записав $R_H = |U_{зи}| / I_c$ и учитывая, что стоко-затворная характеристика полевого транзистора описывается выражением

$$I_c = I_{c0} \left(1 - \left| \frac{U_{зи}}{U_{отс}} \right| \right)^2$$

где I_{c0} — ток стока при $U_{зи} = 0$;

$U_{отс}$ — напряжение затвор — исток при отсечке тока ($I_c = 0$) будем иметь

$$R_H = \frac{|U_{отс}| (1 - \sqrt{I_c / I_{c0}})}{I_c}$$

Для обеспечения хорошей стабилизации тока сопротивление и должно быть по возможности большим, так как при увеличении R возрастает внутреннее сопротивление транзистора, определяемое формулой

$$r_i = r_{ci} (1 + S * R_{ii})$$

где $r_{ci} = dU_{ci} / dI_c$ (при $U_{зи} = \text{const}$) — дифференциальное сопротивление сток — исток, значение которого лежит в диапазоне 80 — 100 кОм.

Схема стабилизатора тока (рис. 2) может быть включена вместо любого омического сопротивления. Эта особенность схемы используется для повышения коэффициента стабилизации параметрического стабилизатора напряжения (см. рис. 1), заменив в нем балластный резистор R_b стабилизатором тока (рис. 2). В этом случае коэффициент стабилизации напряжения может достигать 10^4 .

Компенсационные стабилизаторы

Стабилизаторы напряжения различают компенсационные стабилизаторы непрерывного и импульсного действия. Стабилизаторы напряжения непрерывного действия представляют собой систему автоматического регулирования, в которой фактическое значение выходного напряжения сравнивается с заданным значением эталонного (опорного) напряжения. Возникающий при этом сигнал рассогласования усиливается и должен воздействовать на регулирующий элемент стабилизатора таким образом, чтобы выходное напряжение стремилось вернуться к заданному уровню. В качестве источника опорного напряжения обычно используют параметрический стабилизатор, работающий с малыми токами нагрузки, реже гальванические батареи.

В зависимости от способа включения регулирующего элемента различают компенсационные стабилизаторы последовательного и параллельного типов.

Структурная схема компенсационного стабилизатора последовательного типа представлена на рис. 3, а.

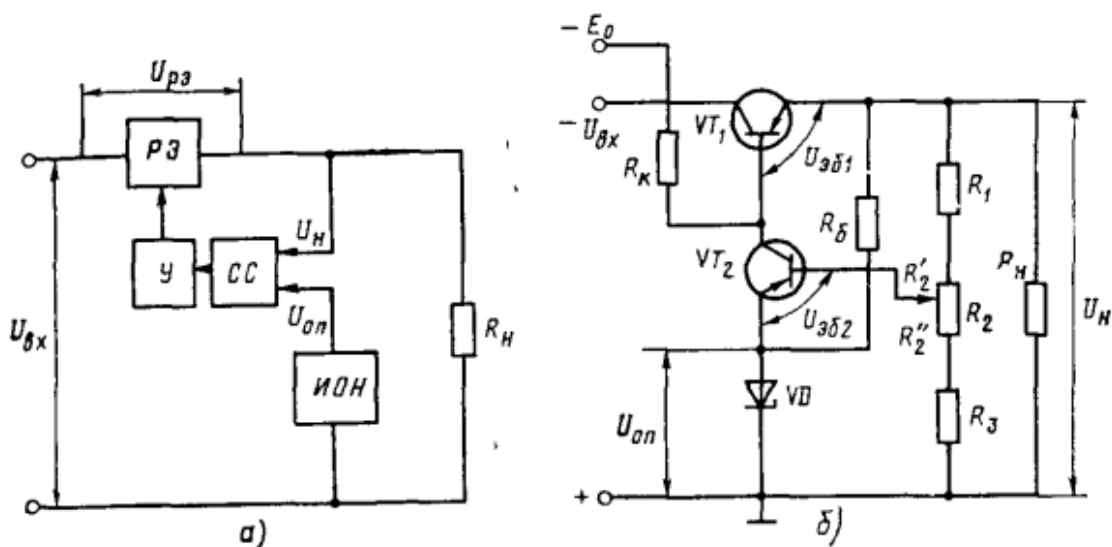


Рис. 3

В этой схеме регулирующий элемент РЭ включен последовательно с нагрузкой и играет роль управляемого балластного сопротивления разностный сигнал рас-

согласования $U_H - U_{оп}$, формируемый схемой сравнения СС, поступает на вход усилителя постоянного тока У, усиливается и воздействует на регулирующий элемент РЭ.

При положительном сигнале рассогласования $(U_H - U_{оп}) > 0$ внутреннее сопротивление РЭ возрастает и падение напряжения $U_{рэ}$ на нем увеличивается. Так как РЭ и нагрузка включены последовательно, то при увеличении $U_{рэ}$ выходное напряжение уменьшается, стремясь к значению $U_{H ном}$.

При отрицательном сигнале рассогласования $(U_H - U_{оп}) < 0$, наоборот, внутреннее сопротивление РЭ и падение напряжения на нем уменьшаются, что приводит к возрастанию выходного напряжения U_H .

Принципиальная схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа на транзисторах приведена на рис. 3, б. Роль регулирующего элемента в этой схеме играет транзистор VT_1 . При увеличении $U_{вх}$ выходное напряжение возрастает по абсолютному значению, создавая отрицательный сигнал рассогласования напряжения $U_{бэ2}$ на входе усилителя постоянного тока, выполненного на транзисторе VT_2 . Ток коллектора транзистора VT_2 возрастает, а потенциал коллектора VT_2 становится более положительным относительно потенциала земли. Напряжение база — эмиттер транзистора VT_1 уменьшается, что приводит к возрастанию внутреннего сопротивления транзистора VT_1 и падения напряжения на нем. Выходное напряжение при этом уменьшается, стремясь к прежнему значению.

Для повышения коэффициента стабилизации схемы резистор R_k , определяющий базовый ток регулирующего транзистора VT_1 подключается к стабильному источнику напряжения — E_0 .

Коэффициент стабилизации схемы рис. 3, б при абсолютно стабильном напряжении E_0 и без учета влияния делителя напряжения $R_1 - R_2 - R_3$ (база транзистора VT_2 подключена непосредственно на выход стабилизатора) определяется выражением

$$K_{ст} \approx \frac{U_H}{U_{вх}} \frac{r_{к1}}{R_d + r_{э2} + r_{б2} / h_{21э2}} \quad (10)$$

а выходное сопротивление

$$R_{вых} \approx [(r_э + R_d) h_{2э2} + r_{б2}] / h_{21э2} h_{21э2}$$

Если E_0 не стабилен, то его колебания передаются через резистор R_k на базу регулирующего транзистора VT_1 и ухудшают коэффициент стабилизации схемы

$$A = 1 + \frac{r_{к1}}{R_k} \frac{\Delta E_0}{\Delta U_{вх}}$$

Увеличение R_k снижает величину A , но может привести к нарушению условия нормальной работы стабилизатора:

$$\Delta I_{к2} = - \Delta I_{б1} \quad (11)$$

Это условие вытекает из очевидного равенства

$$I_{б1} + I_{к1} = I_{Rk} \approx (E_0 - U_H) / R_k = \text{const}$$

Согласно равенству (11), увеличение тока базы $I_{э1}$ транзистора VT_1 на величину $\Delta I_{б1}$ вызывает уменьшение на такую же величину тока коллектора $I_{к2}$ транзистора VT_2 .

Так как ток базы связан с током нагрузки соотношением $I_{б1} \approx I_n / h_{21э1}$, то при увеличении сопротивления R_k ток $I_{б1}$ может оказаться больше, чем ток $I_{к2}$, что нарушает условие (11).

Плавная регулировка выходного напряжения производится с помощью делителя напряжения R_1, R_2, R_3 , включенного в выходную цепь стабилизатора таким образом, как показано на рис. 2, б.

В этом случае выходное напряжение стабилизатора

$$U_n = U_{оп} + [I_{б2} + U_{оп} / (R_3 + R_2'')] (R_1 + R_2') + U_{бэ2} \quad (12)$$

Ток через делитель $I_{дел}$ выбирают обычно на порядок больше, чем ток базы транзистора VT_2 . Дальнейшее увеличение тока делителя за счет снижения сопротивлений R_1, R_2, R_3 нецелесообразно, так как приводит к существенному уменьшению КПД схемы. Тогда выражение (12) принимает вид

$$U_n \approx U_{оп} \left(1 + \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_2} \right) + U_{бэ2} \quad (13)$$

При включении делителя напряжения коэффициент стабилизации, определяемый формулой (10), уменьшается в B раз, так как во столько раз уменьшается приращение входного тока транзистора VT_2 , соответствующее приращению выходного напряжения ΔU_n .

Записав приращения входного тока без делителя ($\Delta U_n = \Delta U_{бэ2}$)

$$\Delta I_{б2} = \Delta U_n / R_{вх \text{ э2}}$$

и с делителем $\Delta I_{б2 \text{ дел}} = K_{дел} \Delta U_n / (R_{вх \text{ э2}} + R_{дел})$

где $K_{дел} = (R_3 + R_2'') / (R_1 + R_2 + R_3)$, $R_{дел} = (R_3 + R_2'') \parallel (R_1 + R_2')$, найдем

$$B = \frac{\Delta I_{б2}}{\Delta I_{б2 \text{ дел}}} = \frac{R_{вх \text{ э2}} + R_{дел}}{R_{вх \text{ э2}} K_{дел}} = \left(1 + \frac{R_{дел}}{R_{вх \text{ э2}}} \right) / K_{дел}$$

Для повышения коэффициента стабилизации компенсационного стабилизатора в качестве регулирующего элемента используют составной транзистор. Использование составного транзистора увеличивает коэффициент стабилизации на величину коэффициента усиления по току дополнительного транзистора.

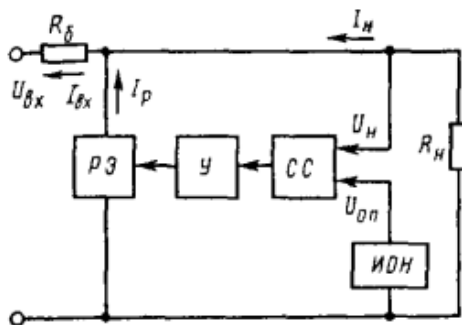


Рис. 4

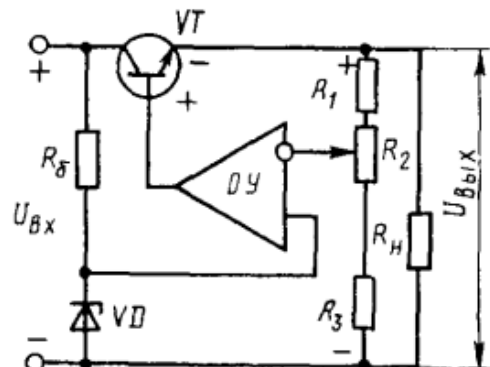


Рис. 5

Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения параллельного типа приведена на рис. 4. В этой схеме регулирующий элемент (РЭ) подключен параллельно нагрузке R_n . Последовательно с ними включается балластный резистор R_b . Таким образом, схема компенсационного стабилизатора параллельного типа при от-

существовании усилителя U по своей структуре напоминает схему параметрического стабилизатора, в которой роль регулирующего элемента играет стабилитрон.

Схема рис. 4 работает следующим образом. Разностный сигнал рассогласования $|U_n - U_{оп}|$, формируемый схемой сравнения, усиливается с помощью усилителя U и воздействует на регулирующий элемент (РЭ), изменяя его ток I_p таким образом, чтобы обеспечить постоянство выходного напряжения U_n .

Коэффициент стабилизации компенсационных последовательных стабилизаторов достигает нескольких тысяч и зависит от коэффициента усиления усилителя U . Однако следует учитывать, что при увеличении коэффициента усиления до определенного значения схема стабилизатора самовозбуждается.

Выходное сопротивление компенсационных стабилизаторов имеет значение порядка нескольких ом и даже долей ом.

КПД у стабилизаторов параллельного типа ниже, чем у стабилизаторов последовательного типа, так как на балластном резисторе R_6 расходуется дополнительная мощность.

Недостатком стабилизаторов последовательного типа является их критичность к перегрузкам. При коротком замыкании на выходе к регулирующему элементу (транзистору VT_1) прикладывается все входное напряжение и резко увеличивается ток I_p , что может привести к выходу транзистора из строя.

В настоящее время все больше распространены схемы стабилизаторов напряжения, выполненные на основе операционных усилителей.

На рис. 5 приведена схема компенсационного стабилизатора напряжения последовательного типа, где операционный усилитель используется в качестве усилительного элемента. Напряжение на выходе схемы определяется выражением

$$U_{вых} = U_{вых\text{ оу}} - U_{бэ} = [(R_1 + R_2') / (R_2'' + R_3) + 1] U_{оп} - U_{бэ} \quad (14)$$

и остается постоянным при изменении нагрузки R_n .

Изменяя сопротивление в цепи обратной связи R_2 , можно регулировать выходное напряжение схемы. Опорное напряжение $U_{оп}$ создается параметрическим стабилизатором напряжения, состоящим из резистора R_1 и стабилитрона VD .

В настоящее время выпускают широкий ассортимент интегральных стабилизаторов напряжения с защитой от токовых перегрузок и короткого замыкания на выходе.

В качестве источника опорного напряжения используют параметрический стабилизатор напряжения, состоящий из стабилитрона и полевого транзистора, выполняющего роль балластного сопротивления.

Регулирующий элемент обычно представляет собой составной транзистор, состоящий из двух или нескольких отдельных транзисторов, число которых определяется требованиями, предъявляемыми к стабилизатору.

Усилительным элементом схемы интегрального стабилизатора является операционный усилитель или в некоторых случаях просто дифференциальный каскад.

На рис. 6 приведена основная схема включения гибридного интегрального стабилизатора типа 275ЕН6А, позволяющая стабилизировать на выходе положительное напряжение 6 В.

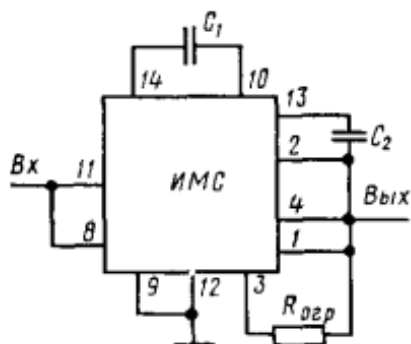


Рис. 6

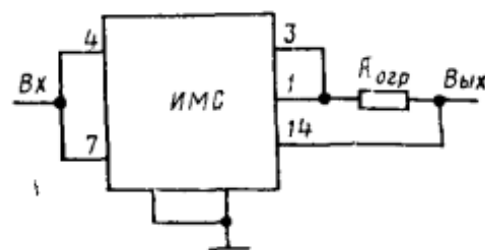


Рис. 7

Навесной резистор $R_{огр}$ включается в цепь защиты стабилизатора от короткого замыкания нагрузки. Его сопротивление зависит от значения допустимого тока нагрузки $I_{н доп}$ и определяется из формулы

$$R_{огр} \approx U_{бэ} / I_{н доп}$$

где $U_{бэ} = 0,5 \dots 0,7 \text{ В}$.

Конденсаторы C_1 , C_2 устраняют самовозбуждение стабилизатора и их подбирают при использовании стабилизатора на практике.

Выходное напряжение можно регулировать с помощью внешних сопротивлений.

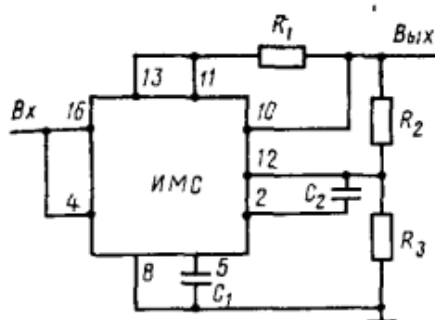


Рис. 8

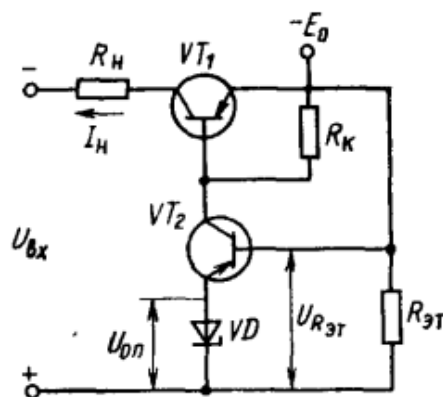


Рис. 9

Стабилизаторы отрицательного напряжения этой же серии отличаются от стабилизаторов положительного напряжения другим типом электропроводности транзисторов.

На рис. 7 приведена основная схема включения стабилизатора типа 275ЕН12А, позволяющая стабилизировать отрицательное выходное напряжение - 12 В.

По сравнению с гибридными полупроводниковые стабилизаторы напряжения имеют высокую стабильность выходного напряжения за счет запаса коэффициента усиления, который легко реализовать в полупроводниковых интегральных микросхемах, так как в гибридных ИМС транзисторы являются дискретными элементами.

Основная схема включения полупроводникового стабилизатора 142ЕН1 приведена на рис. 8. Внешний резистор R_1 включен в цепь защиты схемы от короткого замыкания нагрузки.

Конденсатор C_1 определяет время восстановления номинального режима при импульсном изменении нагрузки и входного напряжения. Емкость конденсатора C_1 составляет в реальных схемах примерно 10^3 пФ.

Емкость конденсатора C_2 позволяет уменьшить выброс выходного напряжения при импульсном изменении нагрузки и входного напряжения.

Импульсные стабилизаторы напряжения

Существенным недостатком, рассмотренных выше компенсационных стабилизаторов непрерывного действия является относительно низкий КПД, не превышающий 60%, что приводит к увеличению массы и габаритов устройства. Применение импульсного режима работы регулирующего элемента (транзистора) стабилизатора позволяет повысить КПД до 80 % и уменьшить массу и габариты стабилизатора, так как при малой рассеиваемой мощности регулирующего транзистора, работающего в импульсном режиме, можно не применять массоемкие теплоотводящие радиаторы. На рис. 10, а приведена структурная схема импульсного стабилизатора напряжения последовательного типа, иллюстрирующая принцип его действия. В схеме рис. 10, а нагрузка последовательно через сглаживающий фильтр Φ и ключевой регулирующий элемент РЭ подключена к источнику входного напряжения. Выходное нагрузочное напряжение сравнивается с эталонным опорным напряжением $U_{оп}$. Разностный сигнал рассогласования U_p , формируемый схемой сравнения СС, воздействует на схему управления СУ, которая вырабатывает импульсы управляющие временами размыкания и замыкания ключевого регулирующего элемента. В результате к входу сглаживающего фильтра Φ будет приложено импульсное напряжение u_{Φ} , форма которого представлена на рис. 10, б. Среднее значение этого напряжения $U_{\Phi 0}$ зависит от соотношения времен замкнутого t_3 и разомкнутого t_p состояний ключа РЭ и определяется формулой

$$U_{\Phi 0} = U_{вх} \frac{t_3}{t_3 + t_p} = U_{вх} \frac{t_3}{T} = U_{вх} t_3 f = U_{вх} / Q$$

где $T = t_3 + t_p$ - период, f — частота переключения ключевого элемента, $Q = T/t_3$ — скважность последовательности импульсов.

Изменяя параметры t_3 и f , можно регулировать напряжение $U_{\Phi 0}$ таким образом, чтобы выходное напряжение стабилизатора оставалось почти неизменным.

Изменение параметров t_3 и f можно рассматривать как модуляцию входного напряжения ключевым элементом РЭ.

Возможны три способа модуляции входного напряжения:

1. Широтно-импульсная модуляция (ШИМ), когда изменяется длительность управляющих импульсов t_3 (время замкнутого состояния ключевого элемента), а частота f их следования (частота переключения ключевого элемента) остается неизменной.
2. Частотно-импульсная модуляция (ЧИМ), в процессе которой изменяется частота следования управляющих импульсов, а их длительность неизменна.
3. Широтно-частотная, когда частота и длительность управляющих импульсов — переменные величины.

Наибольшее распространение получили стабилизаторы с широтно-импульсной модуляцией.

В качестве схемы управления СУ в таких стабилизаторах может использоваться генератор импульсов ГИ, вырабатывающий прямоугольные импульсы с постоянной частотой. Длительность импульсов определяется величиной сигнала рассогласования, поступающего с выхода схемы сравнения СС. Возможно построение стабилизатора с ШИМ на основе структурной схемы рис. 11, а, где функции сравнения сигналов и управления ключом выполняет компаратор напряжения КН, на один из

входов которого поступает выходное напряжение $u_{\text{вых}}$ или часть его, а на другой — пилообразные импульсы $u_{\text{г}}$, вырабатываете с постоянной частотой генератором линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН). Компаратор срабатывает при равенстве напряжений на обоих входах и формирует управляющее напряжение на входе регулирующего элемента (ключа), закрывая или открывая его. При отклонении выходного напряжения от номинального значения изменяется момент времени срабатывания компаратора т. е. длительность управляющего импульса на входе ключа. Принцип работы схемы (рис. 10, а можно проиллюстрировать с помощью временных диаграмм (рис. 10, б).

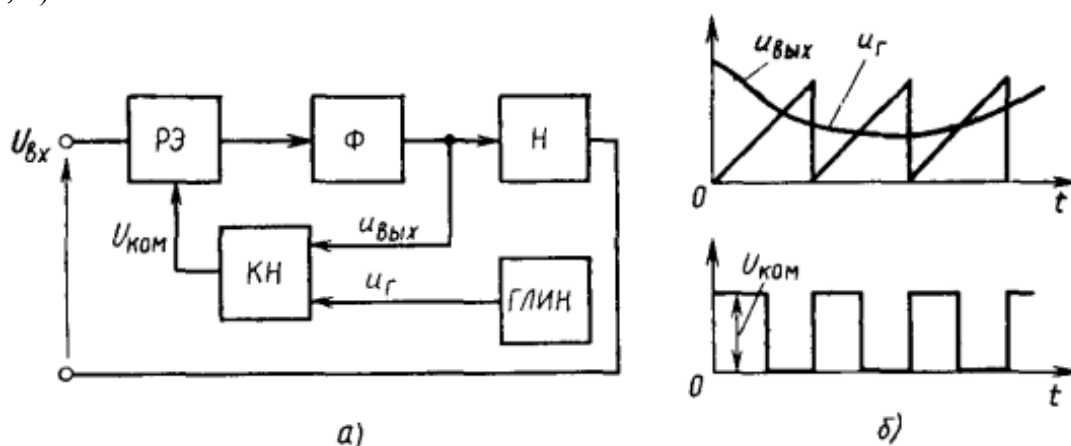


Рис. 10

Существует класс импульсных стабилизаторов релейного типа, в которых схема сравнения представляет собой релейное устройство, которое срабатывает, если часть выходного напряжения становится равной значению порогового напряжения $U_{\text{пор}}$ реле. Недостатком стабилизаторов релейного типа являются относительно высокие пульсации выходного напряжения, так как срабатывание релейного устройства осуществляется только при изменении выходного напряжения.

Поскольку напряжение после ключевого элемента представляет собой последовательность импульсов, необходимым элементом импульсного стабилизатора является сглаживающий фильтр с высоким коэффициентом сглаживания. Обычно в качестве сглаживающего фильтра в импульсных стабилизаторах используют Г-образные LC-фильтры.

Процессы, характеризующие работу импульсного стабилизатора с Г-образным LC-фильтром (рис. 11, а) без учета особенностей системы формирования управляющих импульсов, проиллюстрированы временными диаграммами на рис. 11, б.

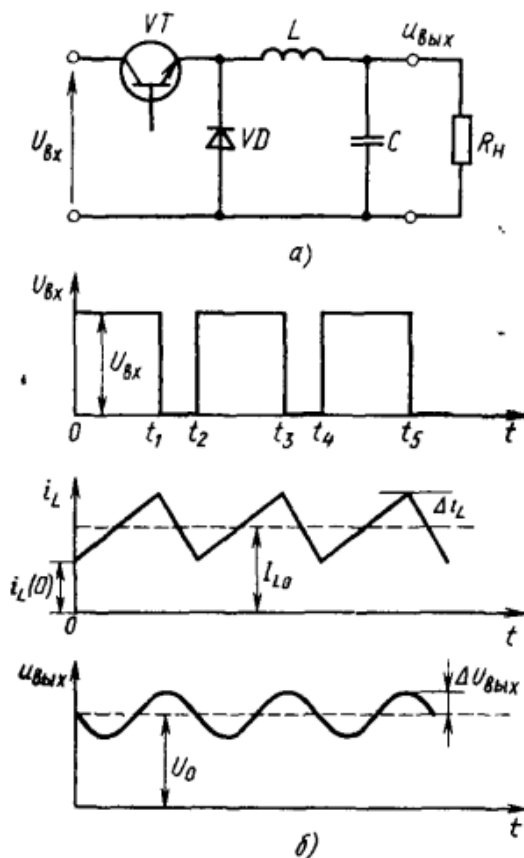


Рис. 11

Предположим, что в момент времени $t = 0$ регулирующий транзистор открыт, и ток через катушку индуктивности нарастает по линейному закону:

$$i_L = i_L(0) + \frac{U_{BX} - U_{ВЫХ}}{L} t$$

где $i_L(0)$ — ток, проходящий через катушку в момент отпирания транзистора.

В момент времени $t = t_1$ транзистор закрывается (ключ размыкается). Ток $i_L(t_1)$ убывает также по линейному закону, протекая через открытый диод (в отсутствие диода на закрытом транзисторе возникли бы недопустимые перегрузки по напряжению, которые могли бы привести к выходу его из строя):

$$i_L = i_L(t_1) - \frac{U_{ВЫХ}}{L} t$$

Затем в момент времени t_2 снова замыкается ключ (открывается транзистор) и ток i_L начинает увеличиваться по линейному закону. Цикл повторяется.

Режим работы стабилизатора при $i_L(t_2) > 0$ называют режимом непрерывного тока. В этом случае выражение для определения пульсации тока, протекающего через катушку индуктивности можно записать как

$$\Delta i_L = \frac{(U_{BX} - U_{ВЫХ})}{2L} (t_2 - t_1) = \frac{U_{BX} - U_{ВЫХ}}{2L} t_{зам}$$

Пульсацию выходного напряжения $\Delta U_{ВЫХ}$ определим, учитывая, что в установившемся режиме работы схемы средние значения токов, протекающих через катушку индуктивности и нагрузку, равны между собой. Следовательно, среднее значение тока, протекающего через конденсатор, равно нулю, а изменение напряжения на нем

(пульсация выходного напряжения определяется только пульсацией тока i_L). Когда ток i_L выше среднего значения $I_{ср}$; напряжение на конденсаторе u_c увеличивается.

При уменьшении i_L относительно I_{L0} напряжение u_c также уменьшается. Таким образом, можно записать уравнение баланса электрических зарядов в цепи катушки индуктивности и конденсатора

$$\frac{\Delta i_L}{2} \frac{T}{2} = 2\Delta U_{\text{вых}} C$$

где T — период переключения ключевого транзистора, $\Delta i_L / 2$ — среднее значение тока, протекающего через конденсатор за половину периода, т. е. $T/2$, $2\Delta U_{\text{вых}}$ — изменение напряжения на конденсаторе за половину периода. Подставляя выражение (18) в (19), после несложных преобразований получим

$$\Delta U_{\text{вых}} = \frac{\Delta i_L T}{8C} = \frac{(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}) t_{\text{зам}}}{16LCf}$$

Из выражения (20) следует, что для обеспечения малой пульсации выходного напряжения необходимо увеличивать частоту регулирования f . Однако при увеличении частоты возрастают потери мощности в регулирующем транзисторе, катушке индуктивности, что приводит, в конечном счете, к снижению КПД. Обычно частота регулирования импульсных стабилизаторов напряжения лежит в пределах 2 - 50 кГц.

Задачи

1. Определить сопротивление резистора $R_{\text{бал}}$ в стабилизаторе напряжения (см. рис. 1), если напряжение стабилизации $U_{\text{ст}}$ составляет 10 В, а на вход поступает напряжение $U_{\text{вх}} = 20$ В. Входной ток $I_{\text{вх}} = 0,02$ А.

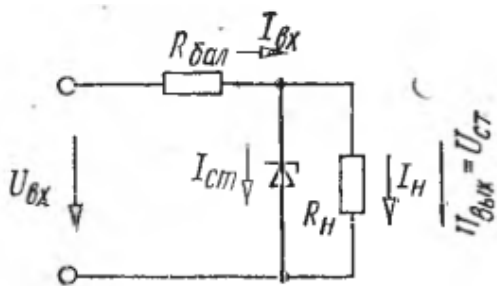


Рис. 1

2. Определить ток стабилитрона $U_{\text{ст}}$ параметрического стабилизатора напряжения (см. рис. 1), если ток в нагрузке $I_n = 0,02$ А, а входной ток $I_{\text{вх}} = 0,05$ А.
3. Как изменится ток стабилитрона параметрического стабилизатора (см. рис. 1), если входное напряжение изменилось на величину $\Delta U_{\text{вх}} = 2$ В? Сопротивление резистора $R_{\text{бал}} = 200$ Ом. Считать, что напряжение на выходе стабилизатора не изменилось.
4. Чему должно быть равно сопротивление резистора $R_{\text{бал}}$, включенного в параметрический стабилизатор напряжения (см. рис. 1), чтобы в режиме холостого хода стабилитрон не вышел из строя? Максимальный ток стабилитрона в режиме стабилизации $I_{\text{ст. макс}} = 100$ мА, а $U_{\text{ст}} = 10$ В. Входное напряжение $U_{\text{вх}} = 20$ В.
5. Сколько каскадов стабилизатора с $K_{\text{ст1}} = 20$ нужно последовательно соединить для того, чтобы общий коэффициент стабилизации был не ниже 4350?

6. Какие функции выполняют в компенсационном стабилизаторе (рис. 2) транзисторы VT1 и VT2 и стабилитрон VD1.

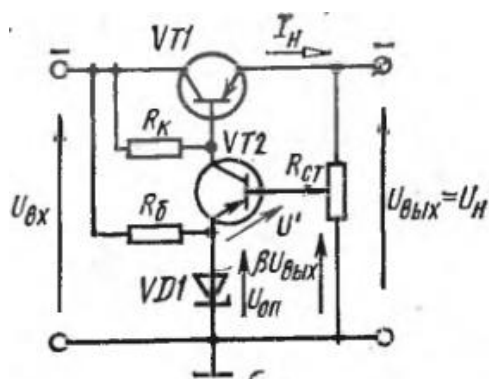


Рис. 2

7. Как изменятся в стабилизаторе (рис. 2) коллекторный ток транзистора VT2 и падение напряжение на резисторе R_K с увеличением $U_{вых}$?
8. Как изменится в стабилизаторе (рис. 1) потенциал базы регулирующего транзистора, сопротивление участка коллектор — эмиттер транзистора VT1 и падение напряжения на нем ΔU , если коллекторный ток транзистора VT2 уменьшится?
9. Определить, каким образом будут изменяться напряжения в узлах схемы (рис. 2) компенсационного стабилизатора; если: а) напряжение на входе уменьшилось, б) напряжение на входе увеличилось.

Информационные источники

1. Королев Г. В. Электронные устройства автоматики: Учеб. пособие.— 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1991. — 256 с.
2. Долженко О. В., Королев Г. В. Сборник задач, вопросов и упражнений по радиоэлектронике: Учеб. пособие для сред. ПТУ.— 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1986. — 103 с.