

ДИСЦИПЛИНА	Схемотехника электронных устройств. Часть 2 полное название дисциплины без аббревиатуры
ИНСТИТУТ	радиоэлектроники и информатики
КАФЕДРА	радиоволновых процессов и технологий полное название кафедры
ГРУППЫ	РИБО-01, 02, 03, 04-19, РРБО-01, 02-19, РССО-01, 02, 03-19 номер групп/ы, для которых предназначены материалы
ВИД УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА	Лекция лекция; материал к практическим занятиям; контрольно-измерительные материалы к практическим занятиям; руководство к КР/КП, практикам
ПРЕПОДАВАТЕЛЬ	Битюков Владимир Ксенофонтович фамилия, имя, отчество
СЕМЕСТР	6 указать номер семестра обучения

ЛЕКЦИЯ 2

Схемотехника компенсационных стабилизаторов напряжения постоянного тока с непрерывным регулированием (Линейные стабилизаторы напряжения)

Компенсационные стабилизаторы напряжения обладают лучшими параметрами, чем параметрические стабилизаторы. Компенсационные стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием (КСН с НР) выполняют по двум структурным схемам: либо с последовательным (рисунок 5.25), либо с параллельным (рисунок 5.26) включением регулирующего элемента и нагрузки R_H .

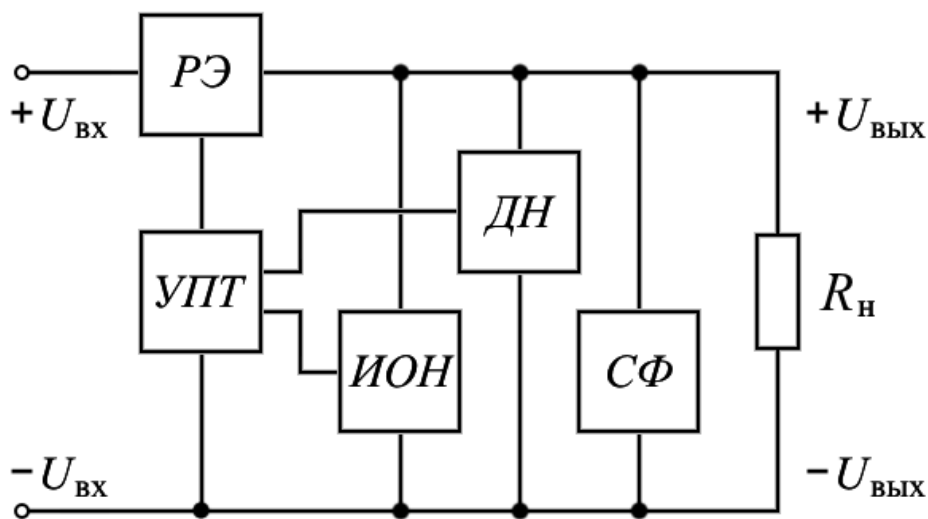


Рисунок 5.25 - Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием и с последовательным включением регулирующего элемента и нагрузки

Со схемотехнической точки зрения у КСН с НР, построенных с последовательным включением регулирующего элемента (РЭ) и нагрузки R_H , последние (РЭ и R_H) представляют собой делитель входного напряжения $U_{ВХ}$. При этом часть входного напряжения формирует выходное напряжение $U_{ВЫХ}$, а разность входного и выходного напряжений компенсируется на регулирующем элементе.

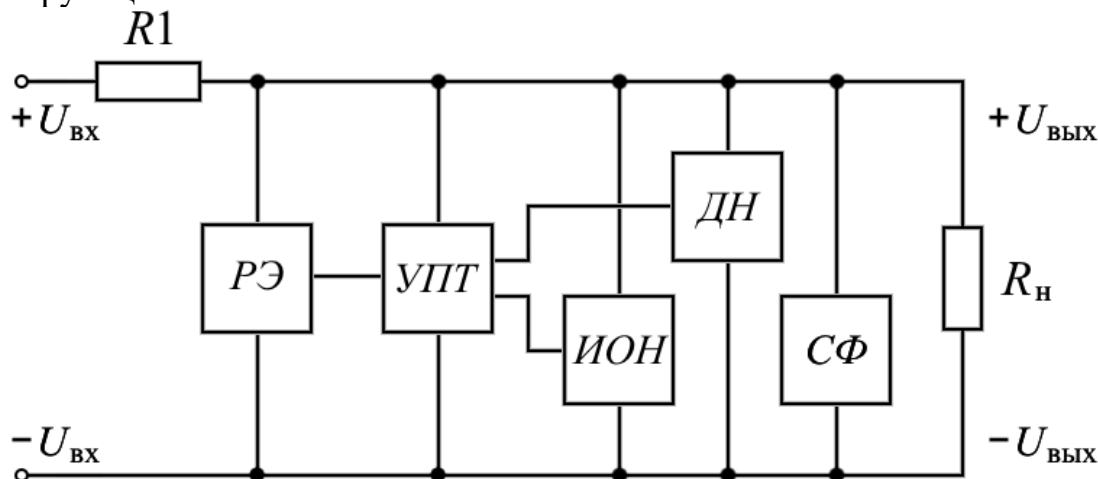


Рисунок 5.26 - Структурная схема компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием и с параллельным включением регулирующего элемента и нагрузки

Принцип действия КСН с НР, выполненного по схеме с последовательным включением регулирующего элемента и нагрузки R_H (рисунок 5.25) состоит в следующем. Пусть напряжение на входе КСН с НР увеличилось, тогда возрастут и напряжения на параллельно включенных нагрузке и делителе выходного напряжения (ДН). С делителя выходного напряжения часть выходного напряжения подается на первый вход усилителя постоянного тока (УПТ), а на второй вход усилителя подается напряжение с источника опорного напряжения (ИОН). Разность напряжений, подаваемых на УПТ, последним усиливается и подается на регулирующий элемент, изменяя его режим работы так, чтобы выходное напряжение КСН с НР достигло первоначальной величины или весьма близкой к ней.

Для уменьшения пульсаций выходного напряжения предназначен сглаживающий фильтр (СФ).

Таким образом, напряжение на нагрузке КСН с НР остается постоянным благодаря компенсации регулирующим элементом вариаций входного напряжения.

Компенсационные стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием представляют собой замкнутую систему автоматического регулирования. В этой системе возмущение, возникшее в любом ее звене, пройдет через всю систему, после чего вернется в то же звено. При этом, в зависимости от параметров системы, возмущение, пройдя через нее, может ослабиться или усилиться. Если возмущение усилится, то переходной процесс будет нарастающим, и система превратится в генератор колебаний, амплитуда

которых ограничена нелинейностью системы, а частота определяется ее эквивалентными параметрами. Такая система регулирования называется неустойчивой и в ней стабилизация невозможна. Если возмущение будет ослаблено, то переходный процесс станет затухающим, а система регулирования является устойчивой. Для превращения неустойчивой системы в устойчивую в нее вводят отрицательную обратную связь.

В компенсационных стабилизаторах напряжения с непрерывным регулированием и параллельным включением регулирующего элемента и нагрузки для сохранения неизменным выходного напряжения компенсация вариаций входного напряжения осуществляется на гасящем резисторе $R1$ (рисунок 5.26). С физической точки зрения принцип действия данного типа стабилизаторов напряжения и рассмотренного ранее (рисунок 5.25) аналогичны. Параллельные стабилизаторы имеют меньший КПД и используются реже. Для стабилизации при повышенных токах и напряжениях чаще используются последовательные стабилизаторы, однако они чувствительны к короткому замыканию нагрузки и требуют обязательного применения защиты от короткого замыкания выходной цепи. Стабилизаторы напряжения параллельного типа не требуют принятия специальных мер защиты от короткого замыкания на выходе.

Наибольшее распространение в РЭС нашли КСН с НР, выполненные по схеме с последовательным включением регулирующего элемента и нагрузки. Поэтому в дальнейшем они и анализируются.

Принципиальная электрическая схема КСН с НР и последовательным включением регулирующего элемента и нагрузки приведена на рисунке 5.27.

Функциональные блоки компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием, показанные на рисунке 5.25, в принципиальной схеме, приведенной на рисунке 5.27, реализованы следующими электрорадиоэлементами: РЭ – транзистор $VT1$, УПТ – транзистор $VT2$ и резистор $R1$, ИОН – стабилитрон $VD1$ и резистор $R2$, ДН – резисторы $R3$, $R4$ и $R5$, СФ – конденсаторы $C1$ и $C2$. Конденсаторы $C1$ и $C2$ гасят броски напряжения, вызванные переходными процессами и предотвращают самовозбуждение стабилизатора. Емкость этих конденсаторов не может быть большой, иначе при включении будет срабатывать защита от короткого замыкания. Обычно в качестве конденсатора $C1$ используют керамический безиндуктивный конденсатор емкостью около 0,1 мкФ, а в качестве конденсатора $C2$ – электролитический конденсатор емкостью несколько десятков мкФ, шунтированный керамическим конденсатором емкостью 0,1 мкФ.

Принцип действия КСН с НР состоит в следующем. Пусть напряжение на входе $U_{вх}$ остается неизменным, а ток нагрузки изменился, например, увеличился. Тогда в первый момент времени выходное напряжение $U_{вых}$ компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием уменьшится из-за увеличения падения напряжения $U_{кэ VT1}$ на регулирующем транзисторе $VT1$.

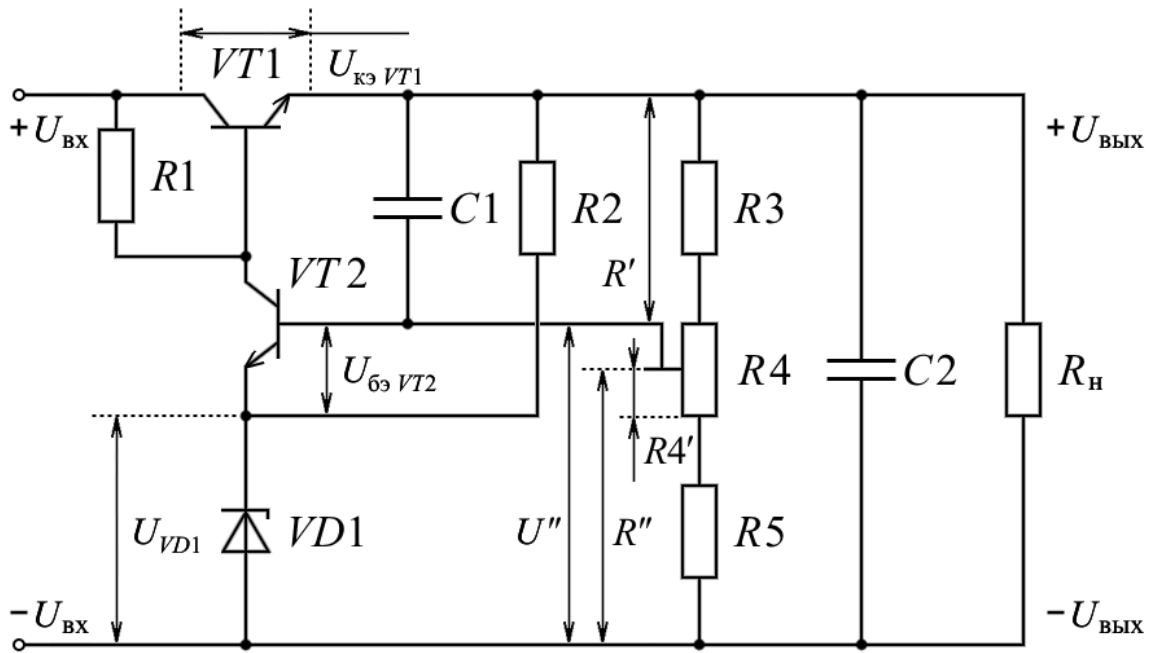


Рисунок 5.27 - Принципиальная электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием и последовательным включением регулирующего элемента и нагрузки

Это вызывает уменьшение падения напряжения на нижнем плече R' делителя выходного напряжения $R3R4R5$, которое приложено между базой усилительного транзистора $VT2$ и минусовой шиной стабилизатора напряжения. Параметрический стабилизатор напряжения $VD1R2$ обеспечивает неизменность напряжения между эмиттером усилительного транзистора $VT2$ и минусовой шиной стабилизатора напряжения. Поэтому падение напряжения между базой и эмиттером $U_{бэ VT2}$ усилительного транзистора $VT2$ уменьшится.

Уменьшение напряжения $U_{бэ VT2}$ между базой и эмиттером усилительного транзистора $VT2$ приведет (согласно его входной характеристике $I_{б VT2} = f(U_{бэ VT2})$) к уменьшению его базового тока $I_{б VT2}$.

Учитывая, что при включении биполярного транзистора по схеме с общим эмиттером (ОЭ), где входным током является ток базы $I_{б}$, а выходным – ток коллектора $I_{к}$, параметром, связывающим выходной сигнал со входным, является коэффициент усиления по току β в схеме с ОЭ $\beta = I_{к}/I_{б}$. Параметр β всегда больше единицы, а его типовое значение изменяется от 10 до 300.

Следовательно, уменьшение базового тока $I_{б VT2}$ усилительного транзистора $VT2$ приведет к уменьшению и его коллекторного тока $I_{к VT2}$. А это приведет, в свою очередь, к увеличению базового тока $I_{б VT1}$ регулирующего транзистора $VT1$. Согласно коллекторной характеристике БТ $I_{к} = f(U_{кэ})$ при увеличении тока базы $I_{б}$ биполярного транзистора падение напряжения $U_{кэ}$ между его коллектором и эмиттером уменьшается. В рассматриваемом случае $U_{кэ VT1}$ уменьшится и это обеспечит возврат выходного напряжения до своего первоначального значения.

Если в рассматриваемой схеме КСН с НР отсутствует конденсатор $C1$, то коэффициент сглаживания пульсаций $K_{\text{сгл}}$ приблизительно равен коэффициенту стабилизации выходного напряжения по входному K_U .

Включение конденсатора $C1$ параллельно верхнему плечу R' делителя выходного напряжения $R3R4R5$, то есть при шунтировании R' по переменной составляющей напряжения наблюдается рост $K_{\text{сгл}}$ по сравнению с K_U . Емкость C_{C1} конденсатора $C1$ выбирают такой, чтобы его сопротивление $1/(\omega \cdot C_{C1})$ было, по крайней мере, на порядок меньше сопротивления R' верхнего плеча делителя выходного напряжения, то есть

$$\frac{1}{\omega \cdot C_{C1}} < 0,1 \cdot R', \quad (5.7)$$

где $\omega = 2\pi f$, f – частота. Из соотношения (5.7) можно получить формулу для расчета емкости C_{C1} конденсатора $C1$

$$C_{C1} > \frac{10}{\omega \cdot R'}. \quad (5.8)$$

Следует иметь в виду, что уменьшение емкости конденсатора $C1$ за счет увеличения сопротивления R' не рекомендуется, так как при увеличении сопротивления R' надо увеличивать также и сопротивление нижнего плеча R'' делителя выходного напряжения. А это приводит к росту постоянной времени τ нижнего плеча ДН, равной $\tau = R'' \cdot C$, где C – емкость монтажных проводов и входная емкость усилительного транзистора $VT2$. Увеличение постоянной времени τ уменьшает ослабление пульсации выходного напряжения, что вызывает необходимость дополнительного увеличения емкости конденсатора $C1$.

Пределы регулирования выходного напряжения в рассматриваемом КСН с НР могут быть определены следующим образом.

Как видно из рисунка 5.27, напряжение U'' на нижнем плече R'' делителя выходного напряжения равно сумме напряжения U_{VD1} на стабилитроне $VD1$ и напряжения $U_{бэ VT2}$ между базой и эмиттером усилительного транзистора $VT2$, то есть

$$U'' = U_{VD1} + U_{бэ VT2}. \quad (5.9)$$

В соответствии с законом Ома можно записать

$$\frac{U''}{R'_4 + R_5} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_3 + R_4 + R_5}, \quad (5.10)$$

где R'_4 – сопротивление потенциометра $R4$ между его движком и резистором $R5$.

Из соотношений (5.9) и (5.10) следует

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_{VD1} + U_{бэ VT2}}{\alpha},$$

где $\alpha = (R'_4 + R_5)/(R_3 + R_4 + R_5)$ – коэффициент передачи делителя

выходного напряжения.

Эту формулу можно упростить, если учесть, что, $U_{VD1} \gg U_{бэ VT2}$ (обычно $U_{бэ VT2}$ порядка 0,7 В, а напряжение стабилизации стабилитрона $U_{VD1} > 5$ В. Тогда

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{VD1}}{\alpha}. \quad (5.11)$$

Из полученного выражения (5.11) следует, что стабильность выходного напряжения в значительной степени зависит от стабильности напряжения ИОН. Уравнение (5.11) после перехода к конечным приращениям имеет вид

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{VD1}}{\alpha}, \quad (5.12)$$

Учитывая, что $\alpha < 1$, из уравнения (5.12) следует, что

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} > \Delta U_{VD1}. \quad (5.13)$$

Нестабильность выходного напряжения в значительной степени зависит от стабильности ИОН и превышает изменение опорного (эталонного) напряжения ΔU_{VD1} .

То есть у компенсационных стабилизаторов напряжения с непрерывным регулированием изменение выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ превышает изменение опорного (эталонного) напряжения ΔU_{VD1} .

Принципиальная электрическая схема КСН с НР и параллельным включением регулирующего элемента и нагрузки приведена на рисунке 5.28.

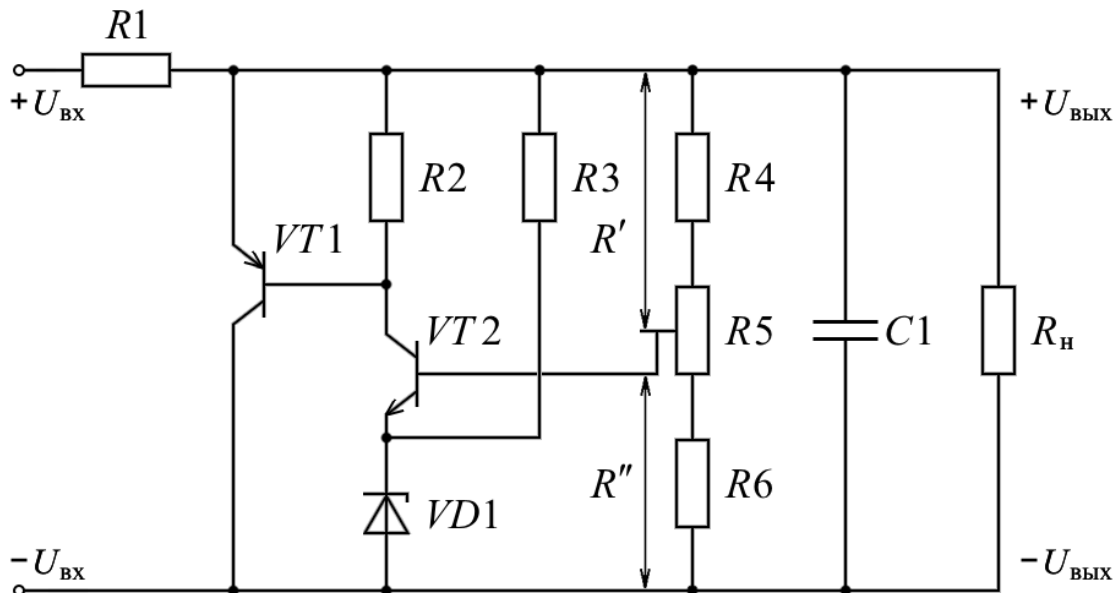


Рисунок 5.28 - Принципиальная электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием и параллельным включением регулирующего элемента и нагрузки

Функциональные блоки компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием, показанные на рисунке 5.26, в принципиальной электрической схеме, приведенной на рисунке 5.28, реализованы следующими электрорадиоэлементами: $R1$ – гасящий резистор,

РЭ – транзистор $VT1$, УПТ – транзистор $VT2$ и резистор $R2$, ИОН – стабилитрон $VD1$ и резистор $R3$, ДН – резисторы $R4$, $R5$ и $R6$, СФ – конденсатор $C1$.

Стабилизаторы напряжения параллельного типа находят применение при небольших токах нагрузки или, когда ток нагрузки изменяется в достаточно узком диапазоне.

Из анализа процессов в КСН с НР следует, что повышение стабильности выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ можно достичь, по крайней мере, тремя схемотехническими методами:

- увеличивая сопротивление коллекторной нагрузки усилительного транзистора, то есть, используя динамическую нагрузку;
- улучшая стабильность напряжения питания усилителя постоянного тока;
- осуществляя температурную компенсацию опорного напряжения.

Первые два метода улучшения стабильности выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ КСН с НР построены на повышении чувствительности базового тока регулирующего (силового) транзистора к изменению выходного напряжения компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием.

Пример реализации первого метода (применение динамической нагрузки для УПТ) показан на принципиальной электрической схеме, приведенной на рисунке 5.29.

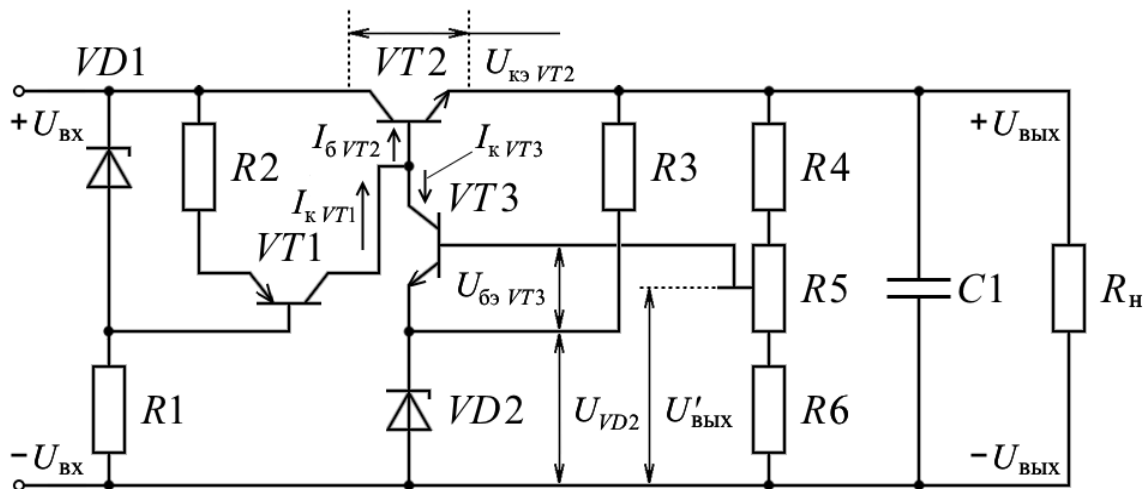


Рисунок 5.29 - Принципиальная электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения с непрерывным регулированием и использованием динамической нагрузки для усилителя постоянного тока

В рассматриваемом КСН с НР в коллекторную цепь усилительного транзистора $VT3$ включена динамическая нагрузка. Она представляет собой параметрический стабилизатор тока, состоящий из транзистора $VT1$, резисторов $R1$ и $R2$ и стабилитрона $VD1$.

Этот ПСТ обеспечивает стабильность коллекторного тока $I_{\text{к} VT1}$ транзистора $VT1$, то есть выполнение условия $I_{\text{к} VT1} = \text{const}$. Учитывая, что

$I_{кVT1} = I_{бVT2} + I_{кVT3}$, то изменения токов $I_{бVT2}$ и $I_{кVT3}$ равны по модулю. Поэтому, например, при увеличении $U_{вых}$ возрастают $U_{бэVT3}$, токи базы и коллектора транзистора $VT3$, а ток базы регулирующего транзистора $VT2$ уменьшается. Это приводит к увеличению падения напряжения на нем, а значит к возврату выходного напряжения к исходному.

Такой схемотехнический прием на порядок улучшает коэффициент стабилизации устройства.

Реализация второго метода (повышение стабильности напряжения питания усилителя постоянного тока) улучшения стабильности выходного напряжения КСН с НР может быть выполнена, если питать УПТ от дополнительного стабилизированного источника питания $U_{доп}$ согласно принципиальной электрической схеме, приведенной на рисунке 5.30.

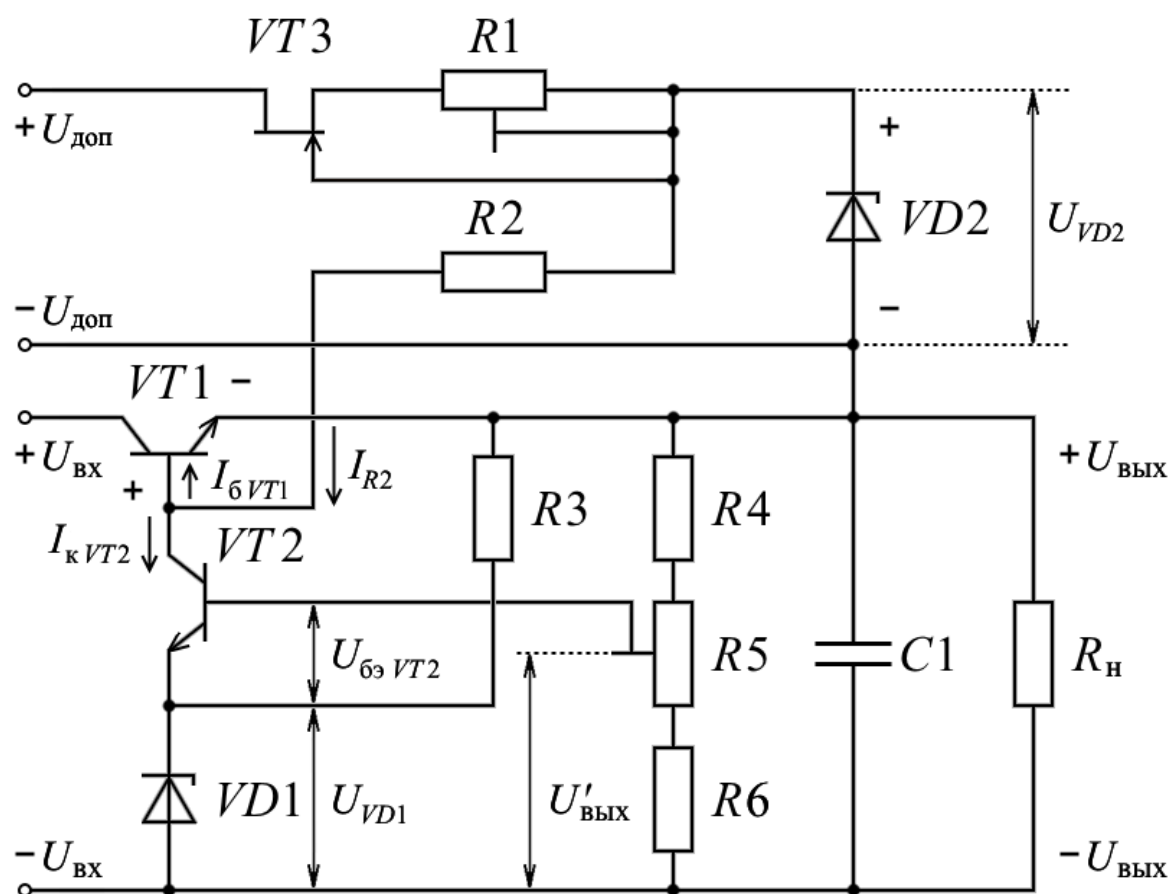


Рисунок 5.30 - Компенсационный стабилизатор напряжения с непрерывным регулированием и с дополнительным стабилизированным источником электропитания для усилителя постоянного тока

Дополнительный источник электропитания выполнен в виде параметрического стабилизатора напряжения $R1VT3VD2$, у которого функцию гасящего резистора выполняет стабилизатор тока (стабилиток) $R1VT3$.

Усилитель постоянного тока в рассматриваемой схеме КСН с НР питается напряжением, которое определяется суммой напряжений U_{VD2} и $U_{вых}$, то есть напряжениями формируемыми дополнительным источником

электропитания и самим стабилизатором напряжения.

При изменении $U_{\text{вых}}$, например, при увеличении потенциал базы усилительного транзистора $VT2$ становится более положительным, а его базовый и коллекторный токи увеличиваются. Напряжение U_{R2} на резисторе $R2$ равно разности напряжений U_{VD2} на стабилитроне $VD2$ и $U_{\text{бэ} VT1}$ регулирующего транзистора $VT1$, то есть

$$U_{R2} = U_{VD2} - U_{\text{бэ} VT1} . \quad (5.14)$$

Учитывая, что напряжение $U_{\text{бэ} VT1}$ изменяется незначительно из-за нелинейности входной характеристики транзистора $VT1$, а напряжение U_{VD2} также изменяется незначительно из-за нелинейности ВАХ стабилитрона, то и падение напряжения U_{R2} можно считать постоянным. Тогда и ток I_{R2} , протекающий через резистор $R2$, является постоянным. Поэтому можно записать, что

$$I_{R2} = I_{\text{к} VT2} + I_{\text{б} VT1} = \text{const} . \quad (5.15)$$

В соответствии с уравнением (5.15) при постоянном токе I_{R2} изменения $I_{\text{к} VT2}$ и $I_{\text{б} VT1}$ равны по величине, но различаются по знаку.

Следовательно, увеличение коллекторного тока усилительного транзистора $VT2$ приводит к уменьшению базового тока регулирующего транзистора $VT1$, что вызывает увеличение падения напряжения между коллектором и эмиттером регулирующего транзистора, а, значит, и к сохранению неизменным выходного напряжения КСН с НР.

Пример использования третьего метода (применение температурной компенсации опорного напряжения) для улучшения стабильности выходного напряжения КСН с НР иллюстрируется схемой, приведенной на рисунке 5.31.

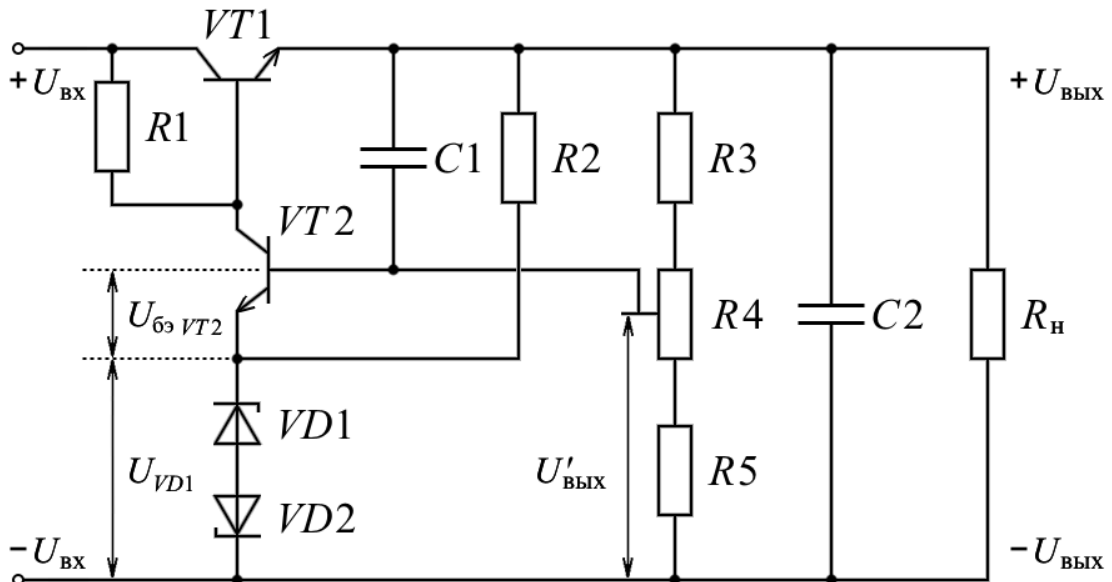


Рисунок 5.31 - Компенсационный стабилизатор напряжения с непрерывным регулированием и термокомпенсацией опорного напряжения

Эталонное напряжение U_{VD1} формируется двумя стабилитронами $VD1$ и $VD2$. Причем стабилитрон $VD1$, имеющий положительный температурный

коэффициент напряжения, включен в режиме стабилизации напряжения, а стабилитрон $VD2$ включен в диодном режиме (его ТКН отрицателен) и обеспечивает термокомпенсацию эталонного напряжения. Такое схемотехническое решение построения ИОН уменьшает влияние теплового состояния КСН с НР на величину выходного стабилизированного напряжения.

Действительно, например, при повышении температуры окружающей среды напряжение стабилизации стабилитрона $VD1$, имеющего положительный ТКН, увеличивается. Это приводит к уменьшению разности потенциалов между эмиттером и базой усилительного транзистора $VT2$, а значит, и к уменьшению его коллекторного тока, что обуславливает увеличение базового тока регулирующего транзистора $VT1$. Это эквивалентно его приоткрыванию, а, значит, и уменьшению падения напряжения на регулирующем транзисторе и росту выходного напряжения всего стабилизатора напряжения.

Термокомпенсацию выходного напряжения КСН с НР можно осуществить и включением диода $VD3$ в верхнее плечо делителя напряжения (рисунок 5.32). Такая термокомпенсация возможна лишь при положительном ТКН стабилитрона $VD1$. Если ТКН последнего отрицателен, то в одно из плеч делителя выходного напряжения включают термозависимый резистор, который и обеспечивает постоянство выходного напряжения при изменении теплового режима устройства.

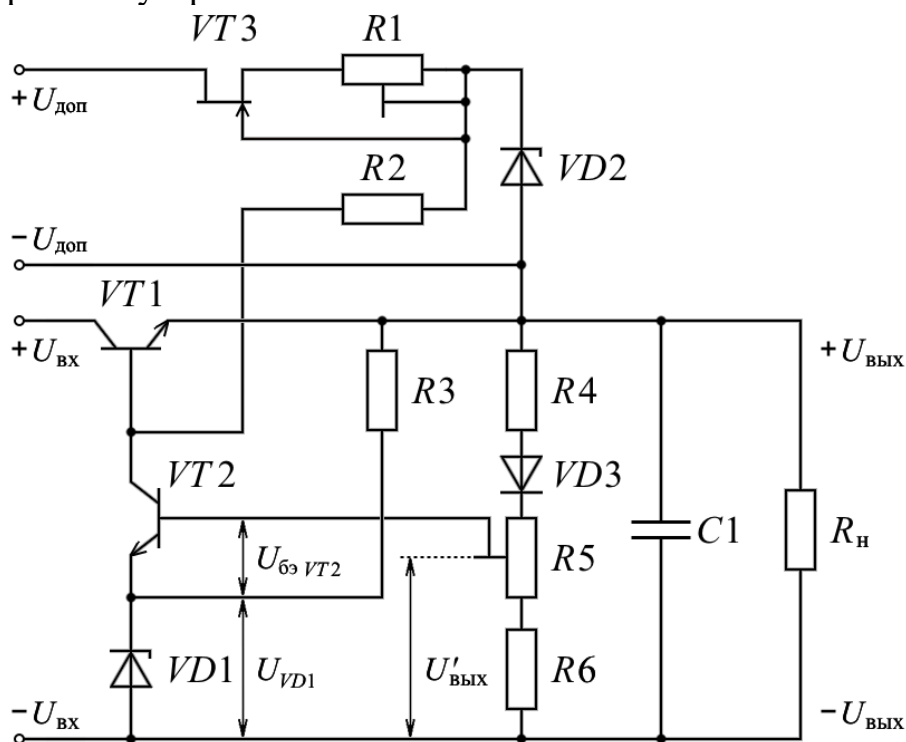


Рисунок 5.32 - Схема КСН с НР с термокомпенсацией с помощью диода, включенного в цепь резистивного делителя выходного напряжения

В рассмотренных схемах КСН с НР выходное напряжение всегда

превышало эталонное напряжение. Поэтому они не могут быть использованы для построения низковольтных стабилизаторов напряжения. Устранение такого недостатка линейных стабилизаторов напряжения возможно с использованием схемотехнического приема, показанного на рисунке 5.33.

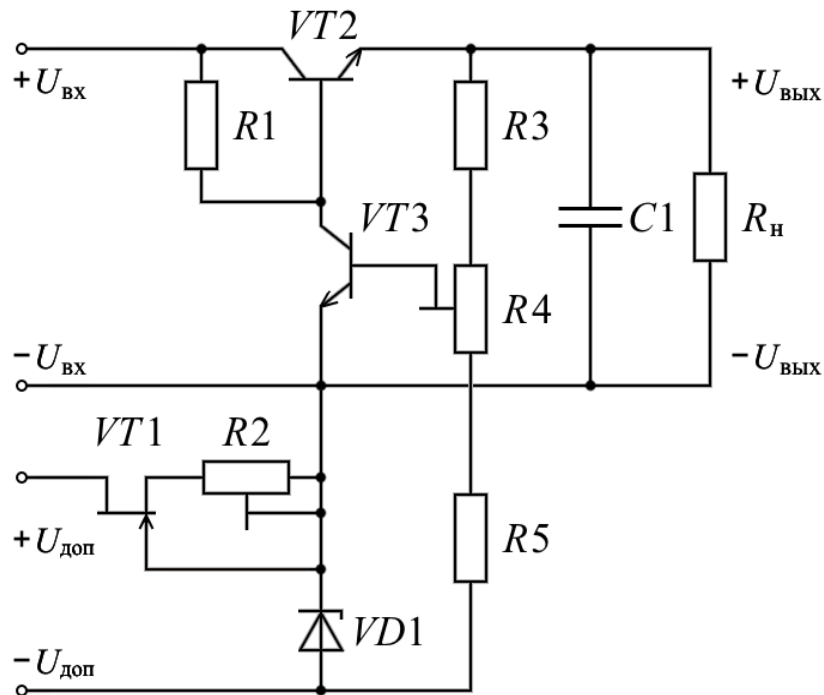


Рисунок 5.33 - Принципиальная электрическая схема КСН с НР, у которого выходное напряжение меньше эталонного

В рассматриваемом линейном стабилизаторе напряжения делитель выходного напряжения $R3R4R5$ питается напряжением, равным сумме выходного напряжения и напряжения, формируемого ПСН $R2VT1VD1$, у которого функцию гасящего резистора выполняет стабилиток $R2VT1$. Выходное напряжение КСН с НР меньше, чем эталонное напряжение.

В КСН с НР ток через регулирующий транзистор один и тот же, что и ток нагрузки. На регулирующем транзисторе рассеивается значительная мощность, зачастую превышающая мощность в нагрузке.

Поэтому при проектировании КСН с НР необходимо применять специальные меры по облегчению работы РЭ:

- снижение падения напряжения на регулирующем транзисторе (стабилизаторы LDO);

- разгрузка РЭ по току и мощности (достигается параллельным включением транзисторов);

- разгрузка РЭ по напряжению и мощности (достигается последовательным включением транзисторов);

- уменьшение управляющего тока от УПТ, что достигается использованием в качестве силовых транзисторов мощных транзисторов с большим коэффициентом усиления β или составных транзисторов (схема Дарлингтона).

