

Российское
ШАХТИНСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ БЫТОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ
(ШТИБО)

1135

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
по самостоятельному изучению теоретической
части курса "Аналоговые электронные устройства"
для студентов специальности 2301 "Радиотехника"

Часть 6

Стабилизаторы напряжения
с непрерывным регулированием

Шахты
1992

Составитель

Доцент кафедры "Радиотехника",
канд. техн. наук

Е.И.Старченко

Рецензенты

Доцент кафедры "Радиотехника",
канд. техн. наук

П.В.Сучков

Доцент кафедры "Радиотехника",
канд. техн. наук

В.Е.Мешков

ВВЕДЕНИЕ

В методическом пособии дается общая классификация стабилизаторов напряжения, даются определения основных качественных параметров стабилизаторов напряжения. Приводится методика определения основных динамических показателей стабилизаторов напряжения. На основе анализа обобщенных функциональных схем определяются коэффициент стабилизации и выходное сопротивление компенсационных стабилизаторов напряжения с последовательным включением регулирующего элемента. Анализ проводится с учетом влияния неустойчивости источника опорного напряжения.

Методическое пособие предназначено для студентов специальности 2301 "Радиотехника" и может быть использовано как при изучении дисциплины "Аналоговые электронные устройства" (раздел "Стабилизаторы напряжения"), так и при выполнении курсовых и дипломных проектов.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	4
1. Общая классификация стабилизаторов напряжения	5
1.1. Принцип действия СН с непрерывным регулированием	7
1.2. Качественные параметры стабилизаторов напряжения	8
1.3. Параметрические стабилизаторы напряжения	10
2. Компенсационные стабилизаторы напряжения с непрерывным регулированием	14
3. Динамические параметры компенсационных стабилизаторов напряжения с непрерывным регулированием	16
3.1. Стабилизатор напряжения с эмиттерным выходом регулирующего элемента	16
3.1.1. Определение $K_{от}$ при питании ИОН со входа СН	16
3.1.2. Определение $K_{от}$ при питании ИОН с выхода СН	19
3.2. Стабилизатор напряжения с эмиттерным выходом регулирующего элемента	20
3.2.1. Определение $K_{от}$ при питании ИОН со входа СН	20
3.2.2. Определение $K_{от}$ при питании ИОН с выхода СН	21
3.3. Неустойчивость выходного напряжения при изменении тока нагрузки стабилизатора	22
3.3.1. Определение K_T в СН с эмиттерным выходом РЭ	22
3.3.2. Определение K_T в СН с коллекторным выходом РЭ	23
Список рекомендуемых источников	25

I. ОБЩАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ

Стабилизаторами напряжения (СН) называются устройства, автоматически поддерживающие напряжение на стороне потребителя с заданной степенью точности.

Основные дестабилизирующие факторы, вызывающие изменение напряжения на выходе стабилизатора: колебание входного напряжения стабилизатора; изменение тока, потребляемого нагрузкой; изменение температуры окружающей среды и параметров элементов схемы.

Изменение входного напряжения обусловлено нестабильностью питающей сети, в частности промышленной сети переменного тока. Типичная нестабильность такой сети - $+5\% - 15\%$.

Изменение тока нагрузки приводит к изменению падения напряжения на внутреннем сопротивлении СН и сопротивлении соединительных проводов.

Изменение температуры может вызвать изменение параметров элементов, составляющих СН, и, как следствие, изменение выходного напряжения.

Назначение СН, следовательно, заключается в уменьшении влияния всех дестабилизирующих факторов.

Стабилизаторы разделяются в зависимости от рода напряжения: стабилизаторы переменного и стабилизаторы постоянного напряжения. В свою очередь они подразделяются на СН параметрические и компенсационные.

Рассмотрение работы стабилизаторов переменного напряжения выходит за рамки настоящего методического пособия, поэтому в дальнейшем будут подразумеваться только стабилизаторы постоянного напряжения.

В параметрических СН используются нелинейные элементы и стабилизация осуществляется за счет нелинейности их вольт-амперных характеристик (например, диоды, стабилитроны, стабилитроны).

Компенсационные СН представляют собой систему автоматического регулирования, содержащую цепь отрицательной обратной связи (ООС). Эффект стабилизации в таких устройствах достигается за счет изменения параметров регулирующего элемента (РЭ) при воздействии на него сигнала обратной связи (рис. 1).

В зависимости от вида регулирования они, в свою очередь, подразделяются на непрерывные и импульсные. (В дальнейшем рассматриваются только непрерывные СН).

Стабилизатор напряжения с последовательным включением РЭ

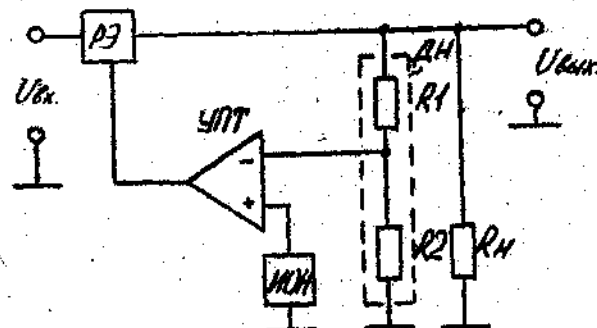


Рис. 1

Непрерывные СН подразделяются по способу включения РЭ по отношению к нагрузке: с последовательным включением РЭ (рис. 1) и параллельным включением РЭ (рис. 2)

Стабилизатор напряжения с параллельным включением РЭ

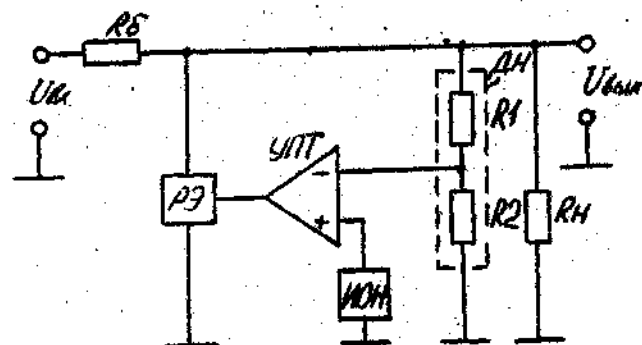


Рис. 2

1.1. Принцип действия СН с непрерывным регулированием

Работа такого СН заключается в следующем. Изменение входного напряжения или тока нагрузки вызывает в первый момент изменение выходного напряжения схемы. Усилитель постоянного тока (УПТ) сравнивает часть выходного напряжения с опорным и вырабатывает на своем выходе усиленный сигнал рассогласования. Сигнал рассогласования воздействует на РЭ. Падение напряжения на РЭ изменяется, чтобы скомпенсировать изменение выходного напряжения с определенной степенью точности. (Очевидно, что входное напряжение стабилизатора всегда больше выходного).

При изменении входного напряжения в параллельном СН (рис. 2) в первый момент изменяется выходное напряжение. На выходе УПТ появляется сигнал рассогласования между выходным напряжением и опорным. Изменение сигнала на входе РЭ приводит к изменению тока через РЭ. В общем случае это вызывает изменение входного тока СН. Изменение входного тока приводит к изменению падения напряжения на балластном сопротивлении R_c , в результате чего выходное напряжение возвращается к своему первоначальному значению.

Изменение тока нагрузки ΔI_H вызывает противоположное по знаку и равное по значению изменение тока через РЭ. Таким образом, напряжение на выходе стабилизатора поддерживается постоянным, а ток, потребляемый устройством от первичной цепи, не изменяется.

Применяют также схемы комбинированные, с двумя РЭ, один из которых включен параллельно, а другой последовательно с нагрузкой. Такие схемы имеют повышенную динамическую стабильность выходного напряжения при импульсном изменении тока нагрузки.

1.2. Качественные параметры стабилизаторов напряжения

Основными параметрами, которые характеризуют качество как параметрических, так и компенсационных СН являются:

1. Коэффициент стабилизации по входному напряжению — отношение относительных приращений напряжений на входе и выходе стабилизатора:

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} / \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}, \quad (1)$$

где $\Delta U_{\text{вх}}$, $\Delta U_{\text{вых}}$ — соответственно приращения входного и выходного напряжений СН при неизменном токе нагрузки;

$U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$ — номинальные значения входного и выходного напряжений.

В некоторых случаях качество стабилизации оценивают по статической ошибке:

$$\delta_H = \Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}},$$

оговаривая, при каких $U_{\text{вх}}$, $U_{\text{вых}}$ и токе нагрузки $I_H = \text{const}$ проходит измерение.

2. Внутреннее (выходное) сопротивление СН:

$$R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}},$$

измеряемое при постоянном входном напряжении.

Иногда задается статическая ошибка

$$\delta_I = \Delta U_{\text{вых}} / U_{\text{вых}}$$

при постоянном входном напряжении и заданном изменении тока нагрузки.

В некоторых случаях задают коэффициент нестability по току нагрузки как отношение относительных изменений выходного напряжения и выходного тока:

$$K_I = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} / \frac{\Delta I_H}{I_H} = \frac{R_{\text{вых}}}{R_H}, \quad (2)$$

где R_H — сопротивление нагрузки.

3. Коэффициент сглаживания пульсаций

$$\gamma = \frac{U_{BX} \sim}{U_{ВЫХ} \sim} \frac{U_{ВЫХ}}{U_{BX}}$$

где $U_{BX} \sim$, $U_{ВЫХ} \sim$ - амплитуды пульсаций входного и выходного напряжений стабилизатора соответственно.

Практически очень часто коэффициент сглаживания пульсаций совпадает с коэффициентом стабилизации

4. Температурный коэффициент выходного напряжения стабилизатора, измеряемый при неизменных входном напряжении и токе нагрузки

$$\gamma_t = \Delta U_{ВЫХ} / \Delta t$$

где Δt - изменение температуры окружающей среды.

5. Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}}$$

где $P_{ВХ}$, $P_{ВЫХ}$ - мощность на входе и в нагрузке соответственно.

В частности, для СН с последовательным РЭ справедлива следующая приближенная формула,

$$\eta \approx \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}}$$

6. Мощность, рассеиваемая на РЭ:

- для последовательного СН

$$P_{РЭ} = (U_{ВХ} - U_{ВЫХ}) I_H$$

- для параллельного СН

$$P_{РЭ} = (I_{ВХ} - I_H) U_{ВЫХ}$$

Массогабаритные параметры - удельная мощность, выраженная в $[Вт/АМ^3]$ или в $[Вт/кг]$.

Стоимостной параметр выражается в единицах $[РЭ/Вт]$.

С точки зрения первых четырех перечисленных параметров СН с последовательным и параллельным включением РЭ равнозначны. Коэффициент полезного действия последовательного СН в общем случае выше, чем параллельного, так как последовательный стабилизатор адаптивен по отношению к нагрузке. Параллельный стабилизатор потребляет постоянную мощность на нагрузке сам, поэтому его целесообразно использовать только при неизменном токе нагрузки. Следует также отметить, что параллельный СН неустойчив в перегрузке, в отличие от последовательного, РЭ которого необходимо защищать от перегрева по току и по мощности рассеяния.

1.3. Параметрические стабилизаторы напряжения

В качестве параметрических СН используют нелинейные элементы, напряжение на которых слабо зависит от тока, протекающего через них. Чаще всего в качестве таких нелинейных элементов используются стабилитроны и стабилитроны.

Основные параметры стабилитронов можно иллюстрировать через характерные точки вольт-амперной характеристики (рис. 3).

Вольт-амперная характеристика стабилитрона

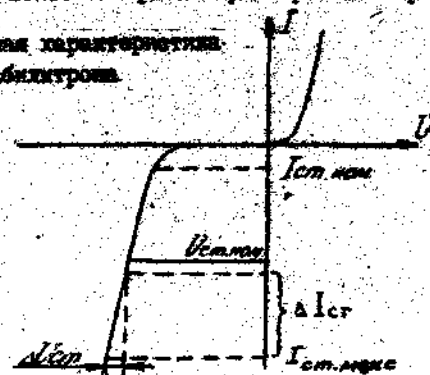


Рис. 3

- номинальное напряжение стабилизации $U_{ст.ном}$ при номинальном токе через стабилитрон;
- минимально допустимый ток стабилизации $I_{ст.мин}$, характеризующий начало рабочего участка;
- максимально допустимый ток стабилизации, при котором мощность, рассеиваемая на стабилитроне, не превышает максимально допустимую;

- дифференциальное сопротивление стабилитрона $r_{ст}$, определяемое как отношение приращения напряжения на стабилитроне $\Delta U_{ст}$ к току, вызвавшему это приращение, $-\Delta I_{ст}$.

Схема однокаскадного параметрического СН приведена на рис. 4

Простейший параметрический стабилизатор напряжения

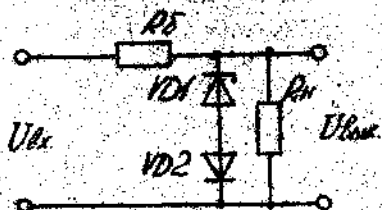


Рис. 4

Коэффициент стабилизации такого стабилизатора можно определить следующим образом: $K_{ст} = (1 + R_5/r_{ст}) U_{вых}/U_{вх}$.

При увеличении R_5 $K_{ст}$ растет, однако необходимо увеличивать и $U_{вх}$. Поэтому существует предельное значение коэффициента стабилизации:

$$K_{ст. макс} = U_{вых} (1 - a_{мин}) / (I_H + I_{ст}) r_{ст},$$

где $a_{мин} = (U_{вх} - U_{вых. мин}) / U_{вх}$.
Следовательно,

$$K_{ст} = K_{ст. макс} \left[1 - \frac{U_{вых}}{U_{вх} (1 - a_{мин})} \right],$$

$$U_{вх. мин} \approx (I_{ст. мин} + I_H) R_5 + U_{вых}.$$

Внутреннее сопротивление параметрического СН (рис. 3) определяется, примерно, $r_{ст}$ и мало зависит от R_5 .

Для уменьшения температурной нестабильности иногда последовательно со стабилитроном включается диод. Температурная компенсация возможна в том случае, если температурный коэффициент ста-

билитрона и диода имеют разные знаки (температурный коэффициент стабилитрона должен быть положительным).

Для повышения стабильности $U_{вых}$ иногда применяют каскадное соединение параметрических стабилизаторов (рис. 5)

Каскадное соединение параметрических стабилизаторов

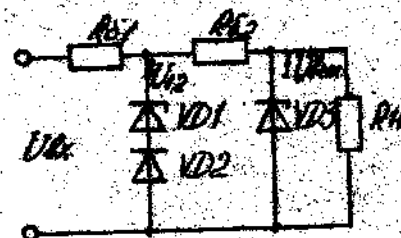


Рис. 5

В этом случае

$$K_{ст} = K_{ст1} K_{ст2} = \frac{R_{51}}{U_{вх}} \frac{U_{вых}}{r_{ст1}} \frac{R_{52}}{U_{вх2}} \frac{U_{вых}}{r_{ст2}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \frac{R_{51} R_{52}}{r_{ст1} r_{ст2}},$$

где $r_{ст1,2} = r_{ст1} + r_{ст2}$ - суммарное дифференциальное сопротивление первого и второго стабилитронов.

Выходное сопротивление схемы (рис. 5) приближенно равно дифференциальному сопротивлению третьего стабилитрона $r_{ст3}$. Следовательно, $K_{ст}$ в многокаскадных стабилизаторах растет, а коэффициент нестабильности по току нагрузки остается на уровне обычного СН.

Существенно повысить $K_{ст}$ можно, применяя в качестве резистора R_5 источник тока, например на полевом транзисторе (рис. 6)

Параметрический СН с источником тока



Рис. 6

Для такой схемы

$$K_{\text{ст}} = U_{\text{вых}} r_{\text{ст}} / U_{\text{вх}} r_{\text{ст}}$$

где $r_{\text{ст}}$ - дифференциальное сопротивление полевого транзистора как источника тока.

Коэффициент полезного действия параметрического стабилизатора невелик:

$$\eta = \frac{U_{\text{вых}} I_{\text{н}}}{U_{\text{вх}} (I_{\text{н}} + I_{\text{ст}})}$$

Обычно параметрические стабилизаторы используются для нагрузок от нескольких единиц до десятков миллиампер. Наиболее часто простейшие параметрические стабилизаторы используются как источники опорного напряжения в компенсационных стабилизаторах напряжения.

В тех случаях, когда необходимо повысить нагрузочную способность параметрического СН, его собирают по схеме рис. 7.

Параметрический СН с повышенной нагрузочной способностью

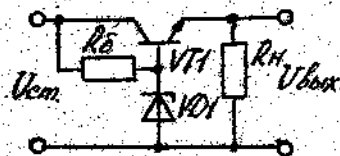


Рис. 7

Выходное сопротивление для такого СН определяется эмиттерным повторителем:

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{r_{\text{ст}}}{h_{21э} + 1} + \frac{r_e}{I_э}$$

где r_e - температурный потенциал, $I_э$ - ток эмиттера транзистора VT1; $h_{21э}$ - коэффициент усиления тока базы транзистора VT1.

Максимальный ток, который может обеспечить такой СН определяется как:

$$I_{\text{н. макс}} = \left(\frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{ст}}}{R_1} - I_{\text{ст. мин}} \right) (h_{21э} + 1)$$

Выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{ст}} - U_{\text{бэ}}$$

где $U_{\text{бэ}}$ - напряжение база-эмиттер транзистора VT1.

Коэффициент стабилизации такого устройства несколько выше, чем у простейшего, так как сопротивление резистора R_1 может быть выбрано примерно в $h_{21э}$ раз больше при одинаковом токе нагрузки.

2. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ С НЕПРЕРЫВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

В качестве основной элементной базы в СН используются транзисторы и операционные усилители. В настоящее время отечественная промышленность выпускает интегральные СН (функционально законченные) и микросхемы управления СН (серии К142ЕН).

На рис. 8 и 9 представлены обобщенные функциональные схемы стабилизаторов напряжения с эмиттерным и коллекторным выходом РЭ, включенных последовательно с нагрузкой. Принцип действия этих стабилизаторов рассмотрен ранее.

Обобщенная функциональная схема последовательного СН с эмиттерным выходом РЭ

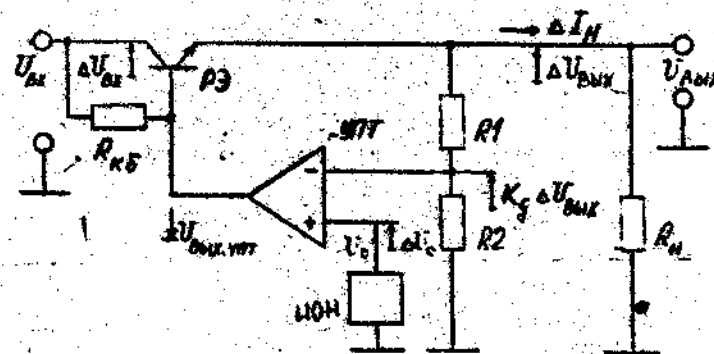


Рис. 6

Обобщенная функциональная схема последовательного СЧ с коллекторным выходом РЭ

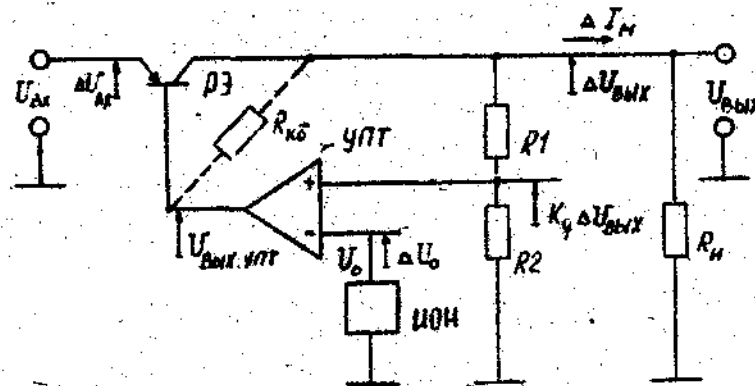


Рис. 9

Связь выходного напряжения с параметрами элементов схемы можно определить следующим образом (для схемы рис. 7):

$$(U_0 - K_2 U_{\text{вых}}) K_0 = U_{\text{вых}}, \quad (3)$$

где $K_2 = R_2 / (R_1 + R_2)$ - коэффициент передачи делителя напряжения (д1) обратной связи; K_0 - коэффициент усиления по напряжению УПТ; U_0 - напряжение источника опорного напряжения. (Выражение (3) получено в предположении, что коэффициент передачи РЭ по напряжению близок к единице).

Из выражения (3) следует, что

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_0}{K_2 + 1/K_0} \quad (4)$$

При достаточно большом K_0 выражении (4) можно представить как

$$U_{\text{вых}} \approx U_0 / K_2$$

то есть, выходное напряжение стабилизатора зависит только от опорного напряжения и параметров цепи обратной связи. Член $1/K_0$ характеризует статическую ошибку СЧ, которая тем меньше, чем больше усиление УПТ.

Для СЧ с коллекторным выходом РЭ выходное напряжение определяется аналогично (4), с той лишь разницей, что коэффициент усиления по напряжению РЭ отличается от единицы, поэтому усиление схемы определяется произведением коэффициентов усиления УПТ и РЭ.

3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПЕНСАЦИОННЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПЯЖЕНИЯ С НЕПРЕРЫВНЫМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ

К основным динамическим параметрам, характеризующим точность поддержания выходного напряжения, относятся $K_{\text{ст}}$ и K_I , которые определяются выражением (1) и (2).

Представляет интерес исследовать зависимость $K_{\text{ст}}$ и K_I от параметров элементов схемы СЧ. Для анализа можно взять две основные обобщенные схемы СЧ с эмиттерным выходом и с коллекторным выходом РЭ, представленные соответственно на рис. 7 и 8.

3.1. Стабилизатор напряжения с эмиттерным выходом регулирующего элемента

Прежде чем приступить к анализу схемы СЧ по рис. 1, сделаем следующие замечания.

На нестабильность выходного напряжения при изменении входного наиболее существенным образом влияет прямое прохождение входного возмущения на выход схемы и нестабильность источника опорного напряжения (ИОН). (Нестабильность выходного напряжения ИОН, обусловленная температурным изменением исследоваться не будет.)

Очевидно, что $K_{\text{ст}}$ должен существенно зависеть от того, как запитан ИОН - со входа или с выхода СЧ.

3.1.1. Определение $K_{\text{ст}}$ при питании ИОН со входа СЧ

При наличии возмущения $\Delta U_{\text{вх}}$ на входе СЧ часть его попадает на управляющий вход РЭ через сопротивление $R_{\text{кб}}$ (рис. 8). В общем случае сопротивление $R_{\text{кб}}$ представляет собой параллельное соединение дифференциальных сопротивлений коллектор-база тран-

эмиттера РЭ и источника тока, задающего ток управляющего входа РЭ (в нашем случае - ток базы). Следовательно, часть входного возмущения, попадающего на вход управления РЭ, можно определить через коэффициент прямой передачи $K_{пр}$:

$$\Delta U_{пр} = \Delta U_{эл} K_{пр}. \quad (4)$$

В свою очередь

$$K_{пр} = R_{элв} / (R_{кв} + R_{элв}),$$

где $R_{элв}$ - эквивалентное сопротивление на входе РЭ.

Для схемы включения РЭ с общим коллектором можно считать, что

$$R_{элв} = R_{вых.упт} \parallel R_H (h_{212} + 1), \quad (5)$$

где $R_{вых.упт}$ - выходное сопротивление усилителя постоянного тока; R_H - сопротивление нагрузки. (Выражение (5) не учитывает влияния дифференциального сопротивления эмиттера РЭ, так как оно пренебрежимо мало, однако, если на выходе РЭ включен датчик тока или токвой защиты его сопротивление должно быть учтено).

Одновременно с напряжением $\Delta U_{пр}$ на управляющий вход РЭ поступает приращение напряжения с выхода усилителя постоянного тока (УПТ), обусловленное приращением опорного напряжения ΔU_0 и выходного напряжения стабилизатора $\Delta U_{вых}$:

$$\Delta U_{вых.упт} = (\Delta U_0 - K_g \Delta U_{вых}) K_0, \quad (6)$$

где $K_g = R_2 / (R_1 + R_2)$ - коэффициент передачи делителя напряжения обратной связи на резисторах R_1, R_2 (рис. 8); K_0 - коэффициент усиления УПТ.

С целью упрощения дальнейшего анализа определим коэффициент стабилизации не через относительные, а через абсолютные приращения:

$$K'_{ст} = \Delta U_{эл} / \Delta U_{вых}. \quad (7)$$

Тогда для приращения напряжения на выходе ИОН можно записать:

$$\Delta U_0 = \Delta U_{эл} / K'_{он}, \quad (8)$$

где $K'_{он}$ - коэффициент стабилизации ИОН, определенный по условию (7).

С учетом того, что коэффициент передачи по напряжению РЭ $K_{пр} \approx 1$ (эмиттерный повторитель), а напряжения $\Delta U_{пр}$ и $\Delta U_{вых.упт}$ на входе РЭ суммируются, можно записать:

$$\Delta U_{эл} = \Delta U_{пр} + \Delta U_{вых.упт},$$

откуда, с учетом выражений (4), (6) и (8), получаем:

$$\Delta U_{вых} = \Delta U_{эл} K_{пр} + \left(\frac{\Delta U_{эл}}{K'_{он}} - K_g \Delta U_{вых} \right) K_0. \quad (9)$$

Из соотношения (9), после несложных преобразований находим, что

$$K'_{ст} = \frac{\Delta U_{эл}}{\Delta U_{вых}} = \frac{1 + T_0}{K_{пр} + T_0 / K_g K'_{он}}, \quad (10)$$

где $T_0 = K_g K_0$ - петлевое усиление в схеме СЧ.

Вполне очевидно, что $K_{пр} < 1$. Если в этом случае $T_0 \gg 1$, достаточно легко выполняется условие $T_0 / K_g K'_{он} \gg K_{пр}$. Тогда из выражения (10) следует:

$$K'_{ст} \approx K_g K'_{он}, \quad (11)$$

то есть, в этом случае коэффициент стабилизации СЧ полностью определяется стабильностью источника опорного напряжения.

Поскольку в большинстве случаев $T_0 \gg 1$, выражение (10) можно представить в следующем виде:

$$\frac{1}{K'_{ст}} = \frac{1}{K'_{ст,пр}} + \frac{1}{K'_{ст,он}},$$

где $1/K'_{ст,пр} = K_{пр} / (1 + T_0)$ - нестабильность, обусловленная при прохождении возмущения со входа на выход СЧ при условии абсолютной стабильности ИОН; $1/K'_{ст,он} = T_0 / (1 + T_0) K_g K'_{он} \approx (K_g K'_{он})^{-1}$.

составляющая нестабильности выходного напряжения СН, обусловленная нестабильностью напряжения на выходе ИОН.

3.1.2. Определение K_{cr} при питании ИОН с выхода СН

Используя методику, приведенную выше, можно легко получить выражение для K'_{cr} при условии, что ИОН получает питание с выхода СН. Необходимо только учесть, что K'_{on} в этом случае определяется как

$$K'_{on} = \Delta U_{вых} / \Delta U_o. \quad (12)$$

С учетом выражений (4), (6) и (12) можно записать:

$$\Delta U_{вых} = \Delta U_{ох} K_{np} + \left(\frac{\Delta U_{вых}}{K'_{on}} - K_g \Delta U_{вых} \right) K_o,$$

откуда после преобразований получаем:

$$K'_{cr} = \frac{1}{K_{np}} \left(1 + T_u - \frac{T_u}{K_g K'_{on}} \right). \quad (13)$$

Из выражения (13) следует, что собственная нестабильность ИОН в этом случае существенно меньше сказывается на нестабильности выходного напряжения стабилизатора, но пренебречь влиянием K'_{on} можно лишь только тогда, когда $T_u \gg 1$ и $K_g K'_{on} \gg 1$. Если эти условия выполняются, соотношение (13) можно представить как

$$K'_{cr} \approx \frac{1}{K_{np}} T_u \left(1 - \frac{1}{K_g K'_{on}} \right) \approx \frac{T_u}{K_{np}}. \quad (14)$$

Только в этом случае можно утверждать, что коэффициент стабилизации полностью определяется петлевым усилением и коэффициентом прямой передачи разомкнутого стабилизатора.

Выводы.

Для повышения коэффициента стабилизации выходного напряжения необходимо:

1. Снижать коэффициент прямой передачи.
2. Повышать петлевое усиление за счет увеличения коэффициента усиления УПТ или (и) за счет увеличения коэффициента передачи делителя напряжения обратной связи до максимально возможного значения, равного единице.
3. Повышать стабильность выходного напряжения ИОН.
4. Стремиться подключать вход питания ИОН к выходу СН, реализуя для ИОН принцип построения "стабилизатора в стабилизаторе".

3.2. Стабилизатор напряжения с коллекторным выходом регулирующего элемента

Выражения для K_{cr} в случае СН с коллекторным выходом РЭ можно получить, используя методику, приведенную выше. Необходимо только учесть, что РЭ имеет коэффициент усиления по напряжению $K_{p2} \neq 1$. Кроме того, для входного возмущения $\Delta U_{ох}$ РЭ (рис. 9) включен по схеме с общей базой (ОБ), а для компенсирующего напряжения $\Delta U_{вых.упт}$ - по схеме с общим эмиттером (ОЭ).

3.2.1. Определение K_{cr} при питании ИОН со входа СН

Учитывая, что K_{p2} для схемы с ОБ и схемы с ОЭ численно равны, схема с ОБ не инвертирует, а схема с ОЭ - инвертирует фазу входного сигнала, результирующее приращение выходного напряжения можно найти так

$$\Delta U_{вых} = (\Delta U_{ох} - \Delta U_{вых.упт}) K_{p2}. \quad (15)$$

При определении K_{p2} необходимо учесть конечное выходное сопротивление УПТ, что приведет к следующему выражению:

$$|K_{p2}| \approx \frac{R_{н2} (h_{212} + 1)}{R_{вых.упт} + R_{ох.р2}}, \quad (16)$$

где $R_{н2}$ - эквивалентное сопротивление нагрузки СН, с учетом того, что параллельно собственному сопротивлению нагрузки подключено выходное сопротивление РЭ; $R_{ох.р2} \approx r_2 (h_{212} + 1)$ - входное сопротивление транзистора РЭ в схеме с ОЭ; r_2 - дифферен-

пальное сопротивление эмиттера транзистора РЭ.

С учетом выражений (6) и (8) соотношение (15) можно представить следующим образом:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \left[\Delta U_{\text{вх}} - \left(\Delta U_{\text{вых}} K_g - \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{K_{\text{оо}}} \right) K_o \right] K_{\text{РЭ}}, \quad (17)$$

откуда после преобразований получаем:

$$K_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{\text{вых}}} = \frac{1 + T_o}{K_{\text{РЭ}} + T_o / K_g K_{\text{оо}}}, \quad (18)$$

где $T_o = K_g K_{\text{РЭ}} K_o$ - петлевое усиление схемы СЧ.

Если выполняется условие $T_o \gg 1$, то выражение (18) может быть преобразовано к следующему:

$$K_{\text{СТ}} \approx \frac{K_g K_o}{1 + K_o / K_{\text{оо}}} \approx K_g K_{\text{оо}}', \quad (19)$$

то есть, получен результат, аналогичный (11), что вполне закономерно: при питании ИОН со входа СЧ должны быть приняты соответствующие меры к повышению стабильности источника опорного напряжения.

3.2.2. Определение $K_{\text{СТ}}$ при питании ИОН с выхода СЧ

Как и в случае СЧ с эмиттерным выходом РЭ, учитывая выражения (6) и (12), соотношение (15) можно представить в виде:

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вх}} K_{\text{РЭ}} - \Delta U_{\text{вых}} K_g K_o K_{\text{РЭ}} + \Delta U_{\text{вых}} K_o K_{\text{РЭ}} K_g / K_{\text{оо}} K_g, \quad (20)$$

откуда, после соответствующих преобразований, получим:

$$K_{\text{СТ}} = \frac{1}{K_{\text{РЭ}}} \left(1 + T_o - T_o / K_g K_{\text{оо}}' \right). \quad (21)$$

Если выполняется условие $T_o \gg 1$, то выражение (21) можно упростить:

$$K_{\text{СТ}} = K_g K_o \left(1 - \frac{1}{K_g K_{\text{оо}}'} \right). \quad (22)$$

Типичное значение $K_{\text{оо}}' = 20$ при выполнении ИОН на основе стабилитрона, K_g обычно больше 0,5, поэтому влияние $K_{\text{оо}}'$ на $K_{\text{СТ}}$ невелико, то есть:

$$K_{\text{СТ}} \approx K_g K_o. \quad (23)$$

Выводы.

1. Выражения, показывающие зависимость $K_{\text{СТ}}$ от параметров элементов в СЧ с коллекторным и эмиттерным выходом РЭ имеют аналогичный вид.

2. При одинаковом коэффициенте усиления по напряжению УПТ в СЧ с эмиттерным выходом $K_{\text{СТ}}$ выше, чем в СЧ с коллекторным выходом (сравните (23) и (14)).

3. Методы повышения $K_{\text{СТ}}$ аналогичны предыдущему случаю.

3.3. Нестабильность выходного напряжения при изменении тока нагрузки стабилизатора

Если представить выражение (2) в виде:

$$K_I = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}} \frac{I_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}},$$

то станет ясно, что нестабильность выходного напряжения при изменении тока нагрузки определяется выходным сопротивлением СЧ, охваченного цепью глубокой отрицательной обратной связи:

$$R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}}. \quad (24)$$

Следовательно, определение K_I можно свести к отысканию $R_{\text{вых}}$. Анализ будем проводить для случая, когда ИОН получает питание с выхода СЧ, поскольку K_I определяется при постоянном входном напряжении.

3.3.1. Определение K_I в СЧ с эмиттерным выходом РЭ

При изменении тока нагрузки на выходе СЧ появляется приращение напряжения

$$\Delta U = R_{\text{вых.р}} \Delta I_{\text{вых}}, \quad (25)$$

где $R_{\text{вых.р}}$ - выходное сопротивление СЧ, цепь ООС в котором разомкнута. В частности, для СЧ с эмиттерным выходом РЭ

$$R_{\text{вых.р}} = \left(\frac{R_{\text{вых.упт}} + r_5}{h_{213} + 1} + r_2 \right) \parallel R_H, \quad (26)$$

где r_5 - сопротивление базы РЭ; R_H - сопротивление нагрузки СН; $r_2 = \eta_T / I_{\text{вых}}$; η_T - температурный потенциал.

Приращение напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$ на выходе СН компенсируется по цепи ООС выходным напряжением УПТ (6).

Поскольку коэффициент передачи РЭ близок к единице, результирующее приращение выходного напряжения можно представить как

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta I_{\text{вых}} R_{\text{вых.р}} - (\Delta U_0 - \Delta U_{\text{вых}} K_g) K_0. \quad (27)$$

С учетом выражения (8) из (27) можно получить, что

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}} = \frac{R_{\text{вых.р}}}{(1 + T_0 - T_0 / K_g K'_{00})}. \quad (28)$$

Если считать, что $\Delta U_0 = 0$ или $T_0 \gg K_g K'_{00}$, то выражение (28) упрощается:

$$R_{\text{вых}} \approx \frac{R_{\text{вых.р}}}{1 + T_0}. \quad (29)$$

Этот результат известен из теории автоматического регулирования и является общим для систем с отрицательной обратной связью.

3.3.2. Определение K_g в СН с коллекторным выходом РЭ

По аналогии с предыдущим случаем, изменение выходного напряжения при изменении тока нагрузки можно определить как

$$\Delta U_{\text{вых}} = \Delta I_{\text{вых}} R_{\text{вых.р}} - (\Delta U_{\text{вых}} K_g - \Delta U_{\text{вых}} / K'_{00}) K_0 K_{\text{РЭ}}, \quad (30)$$

откуда можно найти, что

$$R_{\text{вых}} = R_{\text{вых.р}} / (1 + T_0 - T_0 / K_g K'_{00}). \quad (31)$$

Результат по форме аналогичен предыдущему, за исключением того, что $R_{\text{вых.р}}$ в этом случае определяется из соотношения:

$$R_{\text{вых.р}} = R_{\text{кБ}} \parallel R_H. \quad (32)$$

Отметим, что R_H во всех случаях должно включать в себя сопротивление делителя напряжения обратной связи и ИОН, запитанного с выхода СН.

При питании ИОН со входа СН будет получен результат, аналогичный (29), поскольку ΔU_0 в этом случае равно нулю.

Выводы.

1. Отрицательная обратная связь снижает выходное сопротивление разомкнутого стабилизатора в $(1 + T_0)$ раз, при условии, что неустойчивость ИОН отсутствует.

2. Неустойчивость ИОН эквивалентна снижению петлевого усиления, что приводит к появлению дополнительной неустойчивости выходного напряжения стабилизатора при изменении тока нагрузки.

3. По форме выражения для $R_{\text{вых}}$ в СН с эмиттерным и коллекторным выходом РЭ одинаковы. Однако, в общем случае, $R_{\text{вых.р}}$ в СН с эмиттерным выходом РЭ может быть меньше, чем в СН с коллекторным выходом РЭ.

4. Пути снижения K_g заключаются в следующем: необходимо повышать T_0 и стабильность ИОН, а также снижать $R_{\text{вых.р}}$.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем. - М.: Советское радио, 1977.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. - М.: Высшая школа, 1980.
3. Подданин К.П. Интегральные стабилизаторы напряжения. - М.: Энергия, 1979.
4. Электропитание устройств связи: Учебник для вузов/А.А.Вокунин-ев, Б.В. Горбачев, В.Е. Китаев и др.; Под ред. В.Е. Китаева - М.: Радио и связь, 1988.
5. Источники вторичного электропитания С.С. Вукреев, В.А. Гоков-вацкий, Г.Н. Гулякович и др.; Под ред. Д.И. Конева - М.: Ра-дио и связь, 1983.
6. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника. - М.: Мир, 1982.
7. Болкенберри Л. Применение операционных усилителей линейных ин-тегральных схем. Пер. с англ. - М.: Мир, 1986.
8. Шило В.Л. Линейные интегральные схемы в радиоэлектронной аппа-ратуре. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Советское радио, 1979.
9. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справоч-ник/Т.С.Найфельт, К.Е. Мазель, Ч.И. Хусанов и др.; Под ред. Г.С. Найфельта. - М.: Радио и связь, 1986.
10. Алексеенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение пре-цизионных аналоговых ИС; - М.: Радио и связь, 1981.
11. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Ч.1. Пер. с англ. - М.: Мир, 1983.
12. Роман Э.М. Источники вторичного электропитания радиоэлектрон-ной аппаратуры. - М.: Радио и связь, 1981.
13. Применение интегральных схем: Практическое руководство. Кн. I. Пер. с англ./Под ред. А. Уильямса. - М.: Мир, 1987.
14. Старченко Е.И. Методические указания к выполнению курсовой ра-боты по дисциплине "Электротехнические устройства БРЭА" для студентов специальности 0701 "Радиотехника". - Шахты, 1986.