

СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМА УСИЛИТЕЛЕЙ КЛАССА АВ

Ключевые слова: стабилизация, режим, напряжение, смещение, отсечка, искажения, детектор минимальных значений суммы токов плеч.

Введение

Усилители класса АВ наиболее распространены среди линейных усилителей, поскольку, оставаясь наиболее простым видом усилителей, в идеале позволяют сочетать высокую экономичность усилителей класса В с неискажающим усилением усилителей класса А. Однако формирование необходимого для этого напряжения смещения транзисторов, поддерживающего плечи двухтактного каскада на грани открывания положительными и отрицательными полуволнами сигнала или в режиме слабого контролируемого открывания, было и остается основной проблемой построения таких усилителей, проблемой стабилизации их параметров. Объясняется это нестабильностью управляющих характеристик транзисторов, их зависимостью и от температуры, и от уровня сигнала, и от разброса или дрейфа параметров тех же транзисторов. Речь в [1] идет не столько о стабилизации, сколько об обеспечении «определенности» режима. Достигнутый практический уровень характеризует [2]. Из этих и других известных автору публикаций видно, что приемлемого схемотехнического решения стабилизации режима усилителей этого класса до сих пор нет; не сформулировано однозначного способа (правила, критерия, алгоритма) регулирования напряжения смещения, который позволял бы усилителю автоматически устанавливать для своих транзисторов оптимальное напряжение смещения. Одно из решений этой проблемы предлагается ниже.

Критерий оптимальности

Стабилизировать режим усилителей наиболее эффективно методами обратной связи путем измерения какой-то электрической величины, зависящей от напряжения смещения, сравнения её с эталонной величиной и автоматического регулирования. Но сделать это достаточно сложно: во-первых, до недавнего времени не было ясно, какое напряжение или ток, или какую их комбинацию нужно стабилизировать и, во-вторых, как это сделать наиболее простыми средствами. Стабилизировать напряжение смещения непосредственно [3] в усилителях класса АВ нельзя, т. к. оно должно быть зависимым от дрейфующего напряжения отсечки транзисторов. Попытки регулировкой напряжения смещения стабилизировать ток покоя усилителей приводили или только к частичному решению задачи [4, 5], или к созданию усилителей [6, 7], обладающих необходимой стабильностью, но по некоторым параметрам, в частности, по коэффициенту полезного действия (КПД) проигрывающим усилителям класса АВ. Классификация их как усилителей класса АВ является ошибочной. Ток этих усилителей в момент прохождения усиленного сигнала через ноль – его называют начальным током – не равен току покоя усилителей; их правильнее отнести к усилителям класса А с динамическим смещением. Для двухтактных усилителей со стабилизацией минимальных токов плеч [8], кроме того, опасно перевозбуждение. Только стабильные усилители класса АВ по всем параметрам можно

считать совершенными, находящимися вне конкуренции.

Критерий оптимальности напряжения смещения усилителей класса АВ – стабильная степень отпирания транзисторов при прохождении усиливаемого сигнала через ноль, т. е. стабильность начального тока. Такая же степень отпирания транзисторов в состоянии покоя усилителей при этом обеспечивается автоматически. Ток покоя усилителей класса АВ равен их начальному току.

Этот критерий оптимальности без его формулировки и без разделения понятий тока покоя и начального тока использован в [9]. Однако автор выбрал неудачную методику определения начального тока (в терминологии автора – тока покоя) путем его расчета с помощью операционных усилителей как разницы между измеряемыми токами плеч и нагрузки. Кроме сложности реализации и достаточно больших потерь мощности в измерительных резисторах, основной недостаток выбранной методики заключается в том, что погрешность такого определения может превосходить искомую величину. Поэтому ниже рассматривается метод измерения начального тока с помощью детектора минимальных значений суммы токов плеч усилителя.

Теоретическое обоснование

Для того, чтобы выявить возможность измерения начального тока усилителя на фоне хаотически меняющегося тока сигнала, рассмотрим изменения токов плеч двухтактного каскада и их суммы в предположении, что ток сигнала в нагрузке изменяется по простейшему синусоидальному закону:

$$i_H = I_m \sin \alpha \quad (1)$$

Здесь i_H – мгновенное значение тока на грузки, I_m – его амплитуда, $\alpha = \Omega t$ – фазовый угол, Ω – рабочая частота, t – время.

Характер изменения токов в плечах двухтактного каскада изображен на рис. 1а, а суммы абсолютных значений токов – на рис. 1б.

Ток нагрузки в двухтактном каскаде определяется разностью токов плеч или суммой абсолютных значений приращенных токов плеч

$$i_H = [\Delta i_1] + [\Delta i_2] \quad (2)$$

При малых токах сигнала работают оба плеча усилителя в линейном режиме класса А. Приращения токов плеч по абсолютной величине равны половине тока нагрузки

$$[\Delta i_1] = [\Delta i_2] = 0,5 i_H = \frac{I_m}{2} \sin \alpha \quad (3)$$

и выражения для токов плеч будут

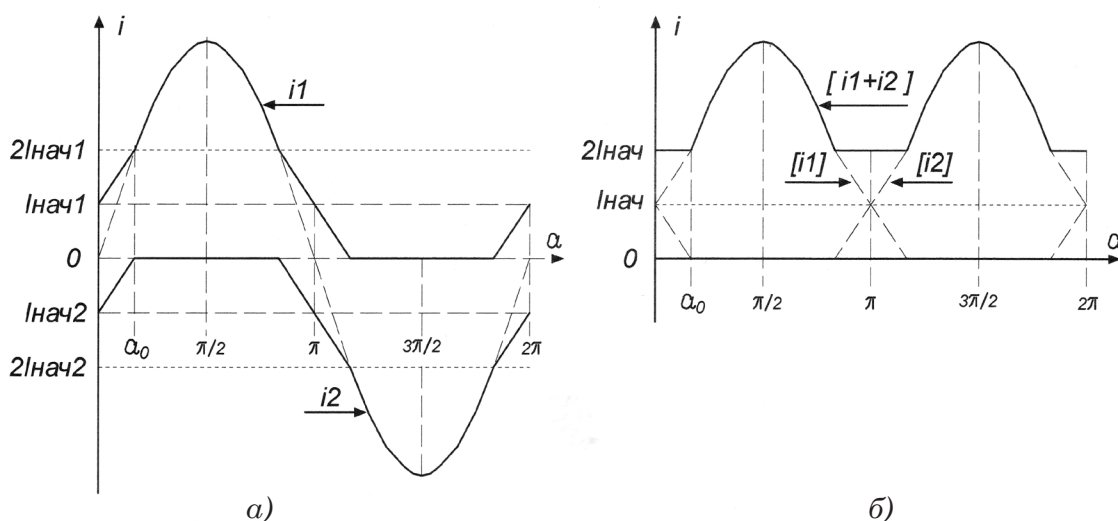


Рис. 1. Характер изменения токов в усилителе класса АВ

иметь вид

$$\begin{cases} i_1 = I_{нач} + \frac{I_m}{2} \sin \alpha \\ i_2 = I_{нач} - \frac{I_m}{2} \sin \alpha \end{cases} \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{кр} \quad (4)$$

Здесь и далее через $\alpha_{кр}$ обозначен критический фазовый угол, при превышении которого усилитель переходит из режима класса А в режим класса В.

Если все токи нормировать по отношению к максимальному току нагрузки (нормированные токи обозначены жирным шрифтом)

$$\frac{I_{нач}}{I_m} = \mathbf{I}_{нач} \text{ и } \frac{I_m}{I_m} = 1, \text{ то } \begin{cases} \mathbf{i}_1 = \mathbf{I}_{нач} + \frac{1}{2} \sin \alpha \\ \mathbf{i}_2 = \mathbf{I}_{нач} - \frac{1}{2} \sin \alpha \end{cases} \quad (5)$$

при $0 \leq \alpha \leq \alpha_{кр}$

При $\alpha = \alpha_{кр}$ ток второго плеча уменьшается до нуля, т.е.

$\mathbf{I}_{нач} - \frac{1}{2} \sin \alpha_{кр} = 0$. Из этого определяем $\alpha_{кр} = \arcsin 2\mathbf{I}_{нач}$. В режиме класса В ток нагрузки определяется приращениями тока только одного плеча

$$\begin{cases} \mathbf{i}_1 = \sin \alpha \\ \mathbf{i}_2 = 0 \end{cases} \text{при } \alpha_{кр} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \quad (6)$$

При $\alpha \geq \frac{\pi}{2}$ характер изменения токов повторяется в обратном порядке, а при $\alpha > \pi$ меняется знак тока нагрузки и инициатива в его формировании переходит ко второму плечу.

Сумма токов плеч

$$\begin{cases} \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 = 2\mathbf{I}_{нач} & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_{кр} \\ \mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 = \sin \alpha & \text{при } \alpha_{кр} \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \end{cases}$$

имеет постоянное минимальное значение, определяемое только начальным током усилителя

$$(\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2)_{\min} = 2\mathbf{I}_{нач}$$

Это дает возможность сформулировать

способ стабилизации:

Для стабилизации режима усилителя класса АВ при любом желаемом начальном токе необходимо и достаточно стабилизировать минимальное значение суммы токов плеч, равное двукратному значению начального тока одного плеча.

Обобщенная структурная схема

На рис. 2 приведена схема простейшего усилителя со стабилизацией начального тока по предлагаемому способу. Она получена доработкой схемы [5] путем включения в неё резистора 21 и пикового детектора на транзисторе 22. Импульсы напряжения на резисторе 21 максимальны при минимальном суммарном напряжении на резисторах 13 и 14, т. е. в режиме покоя усилителя и при прохождении сигнала через ноль. Коллекторным током транзистора 22 заряжается конденсатор 18 до напряжения, чуть ниже максимального напряжения на резисторе 21. При этом напряжение на входе регулятора напряжения смещения 9 тем больше, чем меньше суммарное напряжение на резисторах 13 и 14. При уменьшении начального тока транзисторов 7 и 8 напряжение смещения возрастает, а при их возрастании – уменьшается. В результате началь-

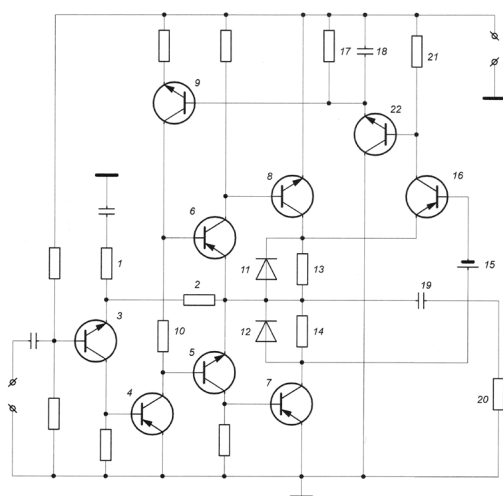


Рис. 2. Схема усилителя со стабилизацией начального тока

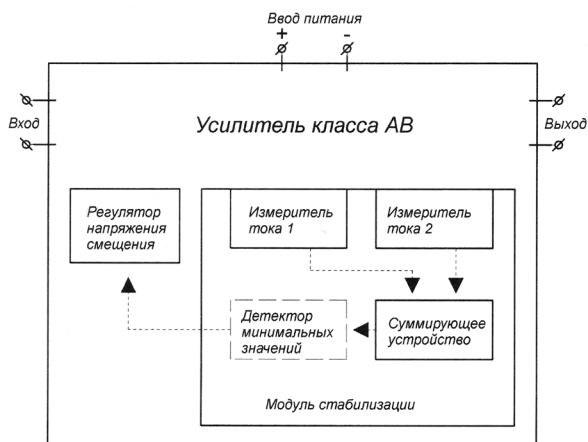


Рис. 3. Обобщенная структурная схема усилителя класса АВ со стабилизацией режима
ный ток транзисторов оконечного каскада стабилизируется на уровне тока покоя.

Вне зависимости от конкретного исполнения усилителя, будь то трансформаторный или бестрансформаторный усилитель с параллельным или последовательным включением плеч, можно назвать обязательные для стабилизации его режима элементы. Эти элементы изображены на рис. 3, часть которых применяется, в частности, в схеме усилителя, изображенного на рис. 2.

В обобщенную схему входят сам усилитель с клеммами для ввода напряжения питания и для подключения входа и

выхода, а также регулятор напряжения смещения. Все эти элементы есть и на рис. 2, за исключением клемм выхода, реально существующих, к которым подключена нагрузка 20. Регулятором напряжения смещения служат транзистор 9 с резистором 10.

Измерителям токов 1 и 2 двух плеч усилителя на рис. 2 соответствуют резисторы 13 и 14; суммирующее устройство реализовано последовательным включением этих резисторов: с них снимается напряжение, пропорциональное сумме токов плеч. В дополнение к этим элементам добавлен детектор минимальных значений суммы токов плеч, реализованный усилительным каскадом 16, инвертирующим минимальное суммарное напряжение на резисторах 13 и 14 в максимальное напряжение на резисторе 21, и пиковым детектором на транзисторе 22 с инерционным звеном 17, 18 на выходе.

Все эти элементы целесообразно объединить в специальный модуль стабилизации, поскольку именно этими элементами в комплексе стабилизируется начальный ток усилителя любой величины и обеспечивается равенство этого тока току покоя. В усилении сигнала эти элементы не участвуют. В схеме на рис. 2 этого не сделано, чтобы не загромождать ранее разработан-

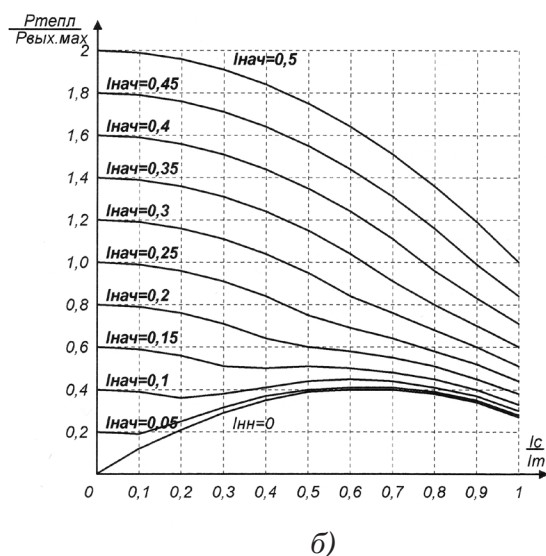
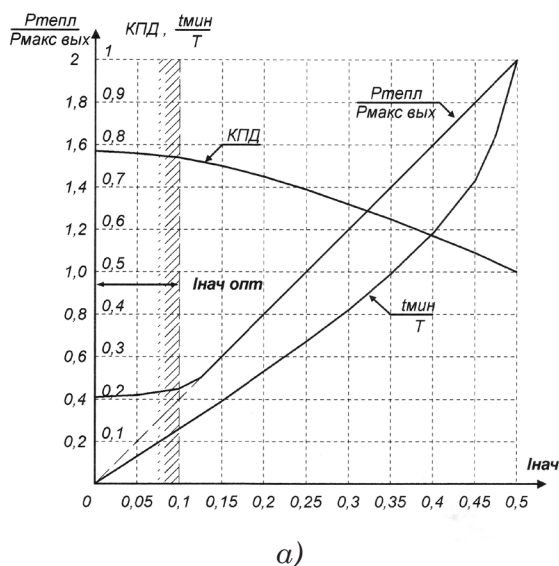


Рис. 4. Зависимости основных параметров усилителя от начального тока и от тока сигнала

ную схему. Ниже дано описание более совершенного модуля стабилизации.

Выбор начального тока

Обеспечив возможность стабилизации начального тока любой величины, далее нам необходимо обосновать выбор какого-то одного значения этого тока или допустимого диапазона его изменения. Для выбора оптимальной величины $I_{нач}$ рассмотрим зависимости основных параметров усилителя класса АВ от величины начального тока, меняющегося в максимальных пределах, т.е. от 0 (класс В) до $0,5I_m$ (класс А) и от амплитуды тока сигнала.

Расчетные графики зависимости этих параметров от начального тока усилителя изображены на рис. 4а.

Кривая КПД характеризует зависимость максимального коэффициента полезного действия усилителя от выбранного значения начального тока. При его увеличении максимальный КПД снижается от 0,785, свойственного усилителям класса В, до 0,5, свойственного усилителям класса А.

Кривая $\frac{P_{тепл}}{P_{макс. вых}}$ характеризует величину максимальной тепловой мощности, выделяемой на усилительных элементах, от выбранного начального тока усилителя. При начальных токах 0,13 от максимального тока нагрузки и более максимальная тепловая мощность определяется именно этим током в состоянии покоя усилителя (восходящий прямолинейный участок). При меньших начальных токах максимальная тепловая мощность определяется, в основном, мощностью от переменного тока сигнала, выделяемой на усилительных элементах. Она не может быть меньше 0,405 от максимальной выходной мощности усилителя, характерной для усилителей чистого класса В (при $I_{нач} = 0$).

Кривая $\frac{t_{мин}}{T}$ характеризует относительную продолжительность (в долях периода) минимума суммы токов плеч в зави-

симости от начального тока

$$\frac{t_{мин}}{T} = \frac{a_0}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} a_0 = \frac{2}{\pi} \arcsin I_{нач} \quad (9)$$

Эта зависимость характеризует необходимое быстродействие (время считывания) детектора минимальных значений. Продолжительность минимума суммы токов тем больше, а требования к пиковому детектору соответственно тем ниже, чем больше начальный ток. В классе А пиковый детектор вообще не нужен. С уменьшением начального тока требования к пиковому детектору естественно возрастают.

На рис. 4б изображена зависимость тепловой мощности, выделяемой на усилительных элементах, от величины тока сигнала при разных начальных токах усилителя. На этих кривых наглядно видна зона оптимальных величин начального тока. Ею можно считать токи от 0 до $0,1 I_m$.

При максимальном токе этого диапазона гарантированно отсутствуют искажения типа ступенька, а тепловая мощность, выделяющаяся на усилительных элементах в режиме покоя, не превосходит мощности, выделяемой на них в режиме сильного сигнала. Во всем возможном диапазоне токов сигнала она колеблется вокруг значения $0,4 P_{вых. макс}$ и максимально превосходит максимальную тепловую мощность усилителей класса В только на 10%, оставаясь меньше максимальной тепловой мощности усилителей класса А в 4,5 раза. Максимальный КПД усилителя с таким начальным током равен 0,77, что только на 2% ниже, чем в усилителях класса В. Дальнейшее увеличение начального тока, хотя и допустимо, не дает никакого энергетического выигрыша и почти не снижает искажений. Уменьшение же начального тока желательно с точки зрения снижения тепловых потерь мощности в режиме покоя. Решение о целесообразности этого принимает разработчик. Непосредственная стабилиза-

ция начального тока устраняет опасность работы с напряжениями смещения, полностью запирающими усилитель, и, тем самым, опасность разрыва цепи общей отрицательной обратной связи (ООС). Нелинейные искажения уменьшаются ООС и могут быть проконтролированы при настройке усилителя. Начальный ток усилителя при этом может быть установлен значительно меньшим, чем $0,1 I_m$.

Динамический диапазон усиливаемых сигналов, выводящих усилитель из режима класса А в режим класса АВ, равен $\frac{I_m}{2I_{нач}}$. При начальном токе $0,1 I_m$ он составляет 14 дБ, а при начальном токе $0,05 I_m$ – 20 дБ. Если мы посмотрим осциллографом усиливаемый сигнал, то увидим пики величиной и 14, и 20 дБ от среднеквадратичного уровня сигнала. Это означает, что если максимальная выходная мощность усилителей используется для неискажающего воспроизведения именно этих пиков, то большую часть времени усилитель работает при достаточно малых уровнях сигнала, т. е. в режиме класса А. Этим оправдывается снижение тока покоя и, соответственно, потребляемой мощности в этом режиме. Максимальное значение начального тока

рекомендуемого диапазона выделено на рис. 4а штриховкой.

Экспериментальный усилитель

На рис. 5 представлена схема высококачественного усилителя средней мощности, нагрузкой которого служит акустическая система S-30.

При рассмотрении схемы можно считать замкнутыми накоротко контакты 1 и 2, а также 5 и 6 модуля стабилизации. Контакты 3 и 4 являются противофазными выходами для управления источниками напряжения смещения.

Особенностями самого усилителя являются использование в качестве оконечных мощных полевых транзисторов и симметричность для обеих полярностей усиливаемого сигнала. Напряжения смещения для полевых транзисторов образуются на резисторах R17 и R18 токами транзисторов VT1 и VT2, а их автоматическая регулировка – синхронной регулировкой токов предварительных каскадов усилителя транзисторами VT3 и VT4. Резисторы R15, R16, R19 и R20 служат для повышения динамической стабильности транзисторов, элементы C10, R21, R22 и L1 – для коррекции частотной характеристики системы.

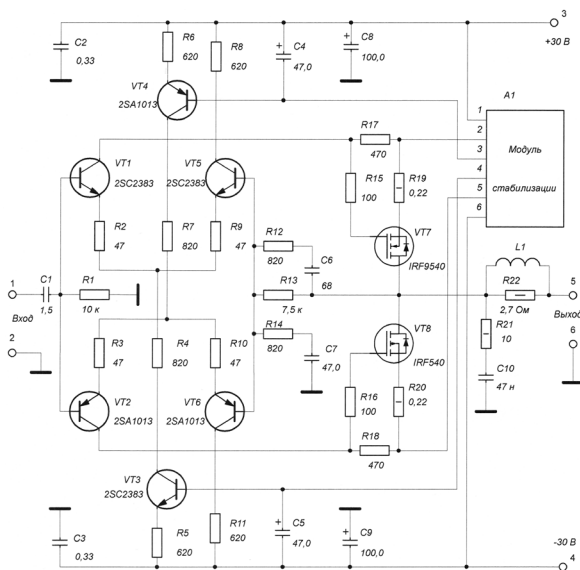


Рис. 5. Схема усилителя средней мощности

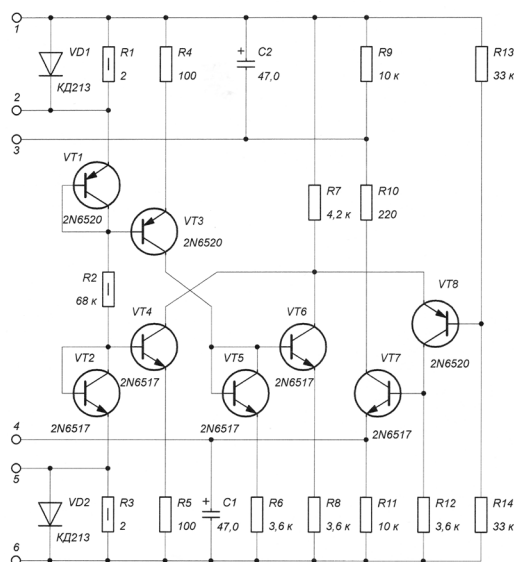


Рис. 6. Схема усилителя средней мощности

Модуль стабилизации

Модуль стабилизации для симметричной схемы усилителя имеет изолированные от нагрузки измерители токов плеч, а в качестве источника опорного напряжения используется общий источник питания; кроме того, модуль имеет два противофазных выхода. Схема модуля изображена на рис. 6.

Измерителями малых токов плеч усилителя служат резисторы $R1$ и $R3$, шунтированные, как и в схеме на рис. 2, кремниевыми диодами $VD1$ и $VD2$ для обхода большими токами нагрузки. Для суммирования используются уменьшенные копии этих токов, сформированные транзисторами $VT3$ и $VT4$ с токозадающими резисторами $R4$ и $R5$. Транзисторы $VT1$ и $VT2$ служат для компенсации напряжения база-эмиттер транзисторов $VT3$ и $VT4$. Благодаря им напряжение на резисторах $R4$ и $R5$ можно считать равными напряжениям на резисторах $R1$ и $R3$, а коэффициент передачи тока от измерителей к копирующим каскадам равным отношению сопротивлений резисторов $R1$ к $R4$ и $R3$ к $R5$.

Суммирующее устройство реализовано резистором $R7$. Копия тока нижнего плеча подается на него непосредственно коллектором $VT4$, а копия тока верхнего плеча – транзистором $VT3$ через токовое зеркало на транзисторах $VT5$, $VT6$ с резисторами $R6$ и $R8$. Токи транзисторов $VT4$ и $VT6$ вычитаются из тока транзистора $VT8$, создаваемого резистором $R7$. Минимум суммы токов $VT4$ и $VT6$ при этом превращается в максимум тока $VT8$, то есть в максимум напряжения на резисторе $R12$ при прохождении усиленного сигнала через ноль и в режиме покоя усилителя.

Пиковый детектор на транзисторе $VT7$ заряжает конденсатор $C1$ до напряжения, чуть меньшего (на $\Delta U_{\phi\phi} \approx 0,6$ В) максимального напряжения на резисторе $R12$. Это медленно меняющееся напряжение становится пропорциональным минимуму суммы токов плеч оконечного каскада усилителя. В коллекторную цепь транзи-

стора $VT7$ включена инерционная нагрузка $C2$, $R9$, точно такая же, как и в эмиттерную $C1$, $R11$. При достаточно больших емкостях конденсаторов $C1$ и $C2$ это не нарушает работу пикового детектора, но позволяет легко получить второй противофазный выход модуля стабилизации. Малое сопротивление резистора $R10$ работу пикового детектора тоже не нарушает; оно служит только для ограничения бросков тока транзистора $VT7$ при переходных процессах. Регулировка начального тока усилителя возможна подбором равных резисторов $R1$ и $R3$, а также регулировками $R7$ или $R12$. При наличии стабилизации этого тока и при допустимой его неустойчивости оперативная регулировка не является необходимой и в данном случае не предусматривается.

В формулу для проверочного расчета начального тока по выбранным и заданным параметрам элементов предложенных схем введен дополнительный индекс для обозначения схемы, к которой принадлежит тот или иной резистор (mc – модуль стабилизации, uc – собственно усилитель). Для усилителя в целом

$$I_{нач} = \frac{R4^{mc}}{R1^{mc}} \left(\frac{0,5 \cdot E_{пит} - \Delta U_{\phi\phi}}{2 \cdot R7^{mc}} - U_{отс} \frac{R5^{uc}}{R12^{mc} \cdot R17^{uc}} - \frac{\Delta U_{\phi\phi}}{R12^{mc}} \right) \quad (10)$$

Численный расчет с подстановкой в нее данных усилителя при $U_{отс} = 3,5$ В дает $I_{нач} = 102,5$ мА. Но особенно ценна возможность с помощью данной формулы оценить влияние на начальный ток усилителя дрейфа тех или иных параметров элементов усилителя и, в первую очередь, напряжения отсечки транзисторов. Совершенно недопустимое для известных усилителей изменение $U_{отс}$ на плюс/минус 20 %, которое привело бы или к выходу усилителей из строя, или к диким искажениям сигнала, в нашем случае только меняет начальный ток усилителя на минус/плюс 12,5 %, что вполне допустимо и, скорее всего, даже не будет замечено слушателями.

Заключение

Кажущая поначалу сложность модуля стабилизации оправдывается действенностью предлагаемого способа стабилизации, легкостью расчета и малой потребляемой мощностью этого модуля, и практическим отсутствием необходимости настройки усилителя. Это подтверждается и безупречной бесподстроечной работой опытного усилителя в течение нескольких лет. Схемотехническое творчество специалистов и радиолюбителей создаст, очевидно, множество новых вариантов. Но использование для стабилизации детектора минимального значения суммы токов плеч представляется автору совершенно необходимым. Такое решение может быть применено как в усилителях высокого класса и повышенной надежности, так и, благодаря его относительной простоте, действенности и свойству самонастройки, в большинстве транзисторных звучащих аппаратов, в устройствах контроля, измерения, автоматики и в специализированных микросхемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Грошев В.Я.** Методы обеспечения определенности и стабильности начального режима двухтактных усилителей на биполярных транзисторах // Радиотехника. 1989 г. № 2.
2. **Сухов Н.Е.** Радиолюбби. Лучшие конструкции УНЧ и сабвуферов своими руками. – СПб., Наука и техника, 2012.
3. **Прокофьев Б.** Стабилизация напряжения смещения // Радио. 1976 г. № 1.
4. **Моисеев В.К.** и Егоров Н.Н. Бестрансформаторный двухтактный усилитель. А.С. № 307487. Б.И. № 20, 1971 г.
5. **Ефремов В.С.** Бестрансформаторный транзисторный двухтактный усилитель класса АВ. А.С. № 663073. Б.И. № 18, 1979 г.
6. **Патент № 3497822 (США).** Кл. 330-25, № 4, 1970, т. 871.
7. **Компаненко Л.** Усилитель мощности с «нулевым» током покоя выходного каскада // Радио. 2004 г. № 4.
8. **Ефремов В.С.** Двухтактные усилители со стабилизацией минимальных токов плеч. Полупроводниковая электроника в технике связи, вып. 23. М.; Радио и связь, 1983 г.
9. **Терешин В.** Стабилизация тока покоя в усилителях мощности ЗЧ. // Радио. 1987 г. № 3.