

УДК 621.389

**А.А. Борисов (канд. техн. наук, доц.)**ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк  
кафедра автоматики и телекоммуникаций  
E-mail: [a.a.bor@mail.ru](mailto:a.a.bor@mail.ru)**МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ ЭКОНОМИЧНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ С СВЕРХНИЗКИМИ ИСКАЖЕНИЯМИ СИГНАЛА**

*Выполнен анализ общих принципов схемотехнических решений и соответствующих классов режимов работы усилителей низкой частоты. Предложен схемотехнический метод построения экономичных усилителей низкой частоты со сверхнизкими искажениями.*

**Ключевые слова:** рабочая точка, вольтамперная характеристика, термостабильность, широтно-импульсная модуляция, передискретизация, фазовые искажения.

**Актуальность темы**

Усилители низкой частоты находят широкое применение в качестве усилителей датчиков систем автоматики, усилителей исполнительных устройств автоматических систем, усилителей измерительных приборов, звуковых усилителей и т.д. В современных условиях технического развития (в век нанотехнологий) большое значение имеют вопросы дальнейшего совершенствования разрабатываемой аппаратуры высокого разрешения. Качество современных комплектующих, выпускаемых многочисленными фирмами, на современном этапе развития человечества близко к предельному. Цифровое преобразование позволяет осуществить высочайшее разрешение. Так, например, 32-битный ЦАП или АЦП теоретически имеет динамический диапазон более 192 дБ, 64-битный – более 385 дБ. Разрешение аналогового преобразования на сегодняшний день значительно меньше и является «узким местом» в специализированной аппаратуре высокого качества. Также здесь прослеживается тенденция зависимости качественных характеристик от энергопотребления. Поэтому тема исследования методов построения экономичных усилителей низкой частоты с сверхнизкими искажениями является актуальной.

**Краткий обзор и характеристика основных классов усилителей**

Работа на протяжении многих лет исследователей всего мира вылились в появление целого ряда классов усилителей (таблица 1). В 2002 году коллектив авторов из Донецкого университета предложил принцип снижения потерь энергии в усилителе СВЧ-диапазона, ставший основой экономичных усилителей мощности СВЧ класса N.

Таблица 1

Классы усилителей

Класс	Период возникновения	Определение класса
1	2	3
A	1920-е годы	Режим работы усилительного элемента, в котором ток, протекающий через усилительный элемент, никогда не прерывается (угол проводимости гармонического сигнала равен 360°).
AA	1986	УНЧ, сочетающий прецизионный высоколинейный усилитель класса A, мощный усилитель класса B и мостовую схему подключения нагрузки и петли отрицательной обратной связи.
AB	1920-е годы	Режим работы усилительного элемента, промежуточный между режимами A и B. Угол проводимости гармонического сигнала существенно больше 180°, но меньше 360°

©Борисов А.А., 2013

Таблица 1 (продолжение)

## Классы усилителей

1	2	3
<b>A/H</b>	1988	Усилитель мостовой схемы. Одна сторона моста работает в режиме А, другая в режиме G/H
<b>B</b>	1920-е годы	Режим работы усилительного элемента, в котором угол проводимости гармонического сигнала равен или несколько превышает $180^\circ$
<b>BC</b>	1930-е	Исторически — промежуточный режим между классами В (линейным) и С (импульсным). На практике этот «промежуточный» режим отвечает определению класса С и не имеет каких-либо особенностей, заслуживающих особого рассмотрения
<b>BD</b>	19xx	Двухтактный усилитель РЧ, в недонапряжённом состоянии работающий в режиме В, в перенапряжённом — в режиме D.
<b>C</b>	1920-е годы	Режим работы усилительного элемента, в котором угол проводимости гармонического сигнала меньше $180^\circ$ . Переходный режим между линейными (режим В) и импульсными (режим D) схемами.
<b>CD</b>		Синоним «смешанного режима С»
<b>D</b>	1951, идея	Полностью ключевой (импульсный) режим работы усилительных элементов. Выходное напряжение определяется скважностями управляющих импульсов, поступающих на верхнее и нижнее плечи выходного каскада
<b>DE</b>	19xx	Усилитель РЧ класса D, нагрузка которого настроена на минимизацию потерь при перезарядке выходной ёмкости ключевых транзисторов. При достаточно длинных паузах между включениями двух плеч двухтактной схемы режим DE становится аналогом режима E.
<b>E</b>	1975	Усилитель, работающий в ключевом режиме, в котором при выключении транзистора ток через него уменьшается до нуля до того, как начнёт нарастать коллекторное напряжение, и при включении транзистора это напряжение падает до нуля до того, как начнёт нарастать ток.
<b>EF</b>	19xx	Двухтактная разновидность класса F (англ. <i>Harmonic reactance amplifier, HRA</i> )
<b>F</b>		Усилители со спектральным разделением токов и напряжений. Форма тока выходного транзистора определяется несущей частотой и её чётными гармониками, форма его коллекторного или стокового напряжения — несущей и её нечётными гармониками.
<b>G</b>	1965, публикация	Транзисторный усилитель класса В с переключаемыми шинами питания. В покое и при малых уровнях выходного напряжения усилитель питается от шин с низкими напряжениями питания, а с ростом выходного подключается к шинам с большим напряжением.
<b>H</b>	1964, патент	Транзисторный усилитель класса В с плавающим напряжением шин питания. В покое и при малых уровнях выходного напряжения усилитель подключен к низковольтным шинам линейного источника питания. При росте выходного напряжения встроенный следящий импульсный преобразователь повышает напряжение на одной из шин.
<b>I</b>	1995	Двухтактный усилитель на ключевых транзисторах (развитие D) с патентованной логикой управления, в котором верхний и нижний ключ связаны с нагрузкой отдельными фильтрами
<b>J</b>	2000-е	УМЗЧ класса D, с параллельным включением вспомогательного каскада в классе В, который нейтрализует вносимые первым искажения
<b>K</b>	1998	Гибридный усилитель мощности НЧ, в котором параллельно включены прецизионный усилитель напряжения класса А и мощный токовый буфер класса D.
<b>M</b>	2000-е	Проприетарная схема дельта-сигма-модуляторов для радиопередатчиков базовых станций мобильной связи
<b>N</b>	2002	Принцип снижения потерь энергии в усилителе СВЧ-диапазона, предложенный в 2002 году коллективом авторов из Донецкого университета.
<b>S</b>	1932, патент	УНЧ, сочетающий прецизионный маломощный усилитель класса А, мощный усилитель класса В и мостовую схему подключения нагрузки и петли отрицательной обратной связи.
<b>T</b>	19xx	Интегральный усилитель класса D с патентованным алгоритмом цифровой обработки сигнала обратной связи
<b>TD</b>	2000-е	«Следящий класс D» — подвид класса D и класса H: усилитель класса В, питаемый напряжением низкой частоты, вырабатываемым усилителем класса D
<b>W</b>	2000-е	Экономичный интегральный усилитель с плавающими напряжениями питания, генерируемыми встроенными преобразователями (см. класс H)
<b>Z</b>	2000-е годы	Интегральный усилитель класса D с патентованным алгоритмом цифровой обработки сигнала обратной связи

Для низких частот наиболее широкое распространение получили усилители классов А, В, АВ, А+, Super А, G(DLD), H, D, T.

В классе А рабочая точка находится на середине линейного участка вольтамперной характеристики транзисторов, поэтому нелинейные искажения сигнала минимальны. В отсутствие сигнала через выходной каскад протекает значительный ток покоя, транзисторы в течение рабочего периода никогда не закрываются, т.е. каждый транзистор участвует в усилении обеих полувольт сигнала - и положительной, и отрицательной. Потребляемая мощность постоянна, а мощность рассеяния максимальна при малых сигналах. Термостабильность в этом режиме наихудшая.

В классе В рабочая точка выходного каскада смещена до критического значения коллекторного тока и каждую половину периода происходит переключение транзисторов - каждый из них усиливает свою "половинку" сигнала. В отсутствие сигнала транзисторы закрыты, ток покоя не протекает. Потребляемая мощность пропорциональна выходной, а мощность рассеяния приблизительно постоянна (максимально 22% от выходной). Термостабильность исключительно высокая. Самый главный недостаток, перечеркивающий все достоинства - при возбуждающих сигналах, близких к отсечке коллекторного тока транзисторов, возникают значительные переключательные искажения, с которыми не справляется никакая отрицательная обратная связь.

В классе АВ рабочая точка выбрана в начале линейного участка вольтамперной характеристики транзисторов, поэтому при малых сигналах каскад работает фактически в режиме А, а в режим В переходит при достаточно сильном возбуждении. В отсутствие сигнала через выходной каскад протекает некоторый ток покоя, иногда весьма значительный. КПД при этом снижается и появляется проблема стабилизации тока покоя. Термостабильность удовлетворительная.

В среднем три четверти потребляемой мощности усилителя класса А превращается в тепло. Поэтому в начале 80-х появились усилители класса А+. Принцип работы усилителей класса А+ заключается в использовании управляемого источника питания. Выходной каскад класса А работает от "плавающего" (не связанного с "землей") источника низкого напряжения, поэтому тепловые потери в этом каскаде невелики. Средняя точка "плавающего" источника питания управляется отдельным мощным усилителем класса В, питающемся от "нормального" источника достаточно высокого напряжения. За счет совместного использования двух усилителей достигается и качество, и экономичность. Коэффициент гармоник не превышает обычно 0,003%.

Поскольку основные искажения в усилителях классов АВ и В возникают в моменты запираания-отпираания транзисторов (коммутационные искажения), необходимо исключить запираание транзисторов. Так появились усилители класса Super А или non-switching. Качество и экономичность практически такие же, как и у А+, но конструкция существенно проще.

Борьба за КПД привела к появлению усилителей с коммутируемым выходным каскадом и управляемым источником питания. Самый простой вариант - усилитель класса G. В нем используется двоякий выходной каскад в режиме АВ или В и два источника питания разного напряжения. При малой мощности (до 25-30% максимальной) работает только малосигнальная половина выходного каскада с низким напряжением питания, на пиках сигнала она передает свои функции оставшейся половине с повышенным напряжением питания. Экономичность каскада выше, чем в режиме В, искажения несколько меньше.

Усилитель класса H учитывает импульсную характеристику реальных сигналов. Выполнен с применением специальной схемы удвоения напряжения питания на пиках.

Идея, положенная в основу усилителей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) - усилителей класса D, известна еще с конца 50-х годов. Однако их создание стало возможным

лишь в середине 80-х после появления соответствующей элементной базы. В усилителях класса D возможен режим непосредственного усиления цифровых сигналов без их преобразования в аналоговую форму. Когда сигнал уже представлен в цифровом виде, информацию о величине сигнала и необходимом для его усиления напряжении питания можно получить заранее. Это используется в некоторых конструкциях, так что идея управления напряжением питания получила вторую жизнь.

Принцип работы усилителей этого класса состоит в том, что выходной каскад возбуждается импульсами прямоугольной формы. Затем последовательность прямоугольных импульсов поступает на усилитель мощности, работающий в ключевом режиме. Фильтр НЧ на выходе выделяет полезный сигнал, подавляя при этом несущую частоту, ее гармоники и боковые полосы спектра модуляции. КПД этих усилителей доходит до 92-95%. Это преимущество особенно проявляется при усилении сигналов малого уровня. Однако искажения сигналов малого уровня больше, чем среднего. Коэффициент нелинейных искажений обычно лежит в пределах от 0,01 до 0,1%, т.е. по современным меркам значительный.

Усилители класса D, подобно аналоговым, тоже разделяются по режимам. Основное разделение идет по количеству уровней выходных импульсов: два уровня (+U и -U) - режим AD и три уровня (+U, 0 и -U) - режим BD. Усилители в режиме AD подобны аналоговым усилителям класса A - потребляют значительный ток покоя. В режиме BD ток покоя отсутствует. Что же касается искажений, то они при прочих равных условиях зависят от способа модуляции и вида модулирующего сигнала. Применяется как односторонняя модуляция (смещается во времени только один фронт импульсов - передний или задний) так и двухсторонняя модуляция (смещаются во времени оба фронта импульсов симметрично относительно момента тактирования). Модулирующие сигналы могут быть двух видов: непосредственно аналоговый сигнал (случайная дискретизация, дополнительные искажения не возникают) и сигнал после схемы выборки-хранения (фиксированная дискретизация, изменения формы импульсов приводят к дополнительным нелинейным искажениям сигнала).

К группе цифровых, помимо усилителей класса D, относится и разработка фирмы Tripath Technology - усилители класса T. Алгоритм их работы аналогичен, но частота дискретизации не постоянна, а зависит от частоты и уровня входных сигналов (используется одна из разновидностей дельта-модуляции).

#### **Описание проблемы и задачи исследования**

Подавляющее число современных усилителей низкой частоты (УНЧ) выполнено по классической схеме дифференциального операционного усилителя с большим коэффициентом усиления, выходным каскадом в классе АВ и относительно глубокой обратной связью. Такое схемотехническое решение позволяет при относительно высоком КПД получить приемлемые в большинстве случаев гармонические (нелинейные, интермодуляционные) и динамические искажения. Ограничением параметров усилителя здесь является искусственное ограничение его быстродействия без ООС из условий обеспечения устойчивости. Определенное улучшение качественных параметров возможно за счёт уменьшения глубины обратной связи и одновременно перевода элементов в более линейные режимы. Однако это как правило приводит к снижению КПД. Предельным случаем является чистый класс А без обратной связи, имеющий самый низкий КПД и которому свойственны характерные недостатки - температурная нестабильность, чувствительность к пульсациям питания и т.д. Более сложные схемотехнически усилители других классов частично решают некоторые проблемы, но значительных преимуществ не дают. Поэтому, самыми качественными в настоящее время считаются усилители работающие в чистом классе А, хотя и их разрешение относительно невысоко.

Цель и задачи исследования - разработать схемотехнику построения экономичных усилителей низкой частоты с сверхнизкими искажениями.

### Решение задачи

В результате системного анализа схемотехнических решений различных усилителей предложен способ уменьшения искажений УНЧ путём их компенсации методом выделения и сложения в противофазе с основным сигналом.

Поставленная цель достигается благодаря тому, что в схеме включающей выделение искажений основного усилителя 1 (рис.1), например, путём вычитания выходного сигнала ослабленного аттенюатором 2 из входного (или путём их сложения для инвертирующего усилителя), искажения усиливаются дополнительным усилителем 3 в число раз  $N$  превышающее усиление  $K$  основного усилителя.

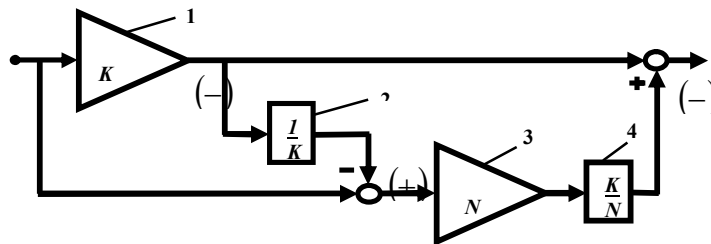
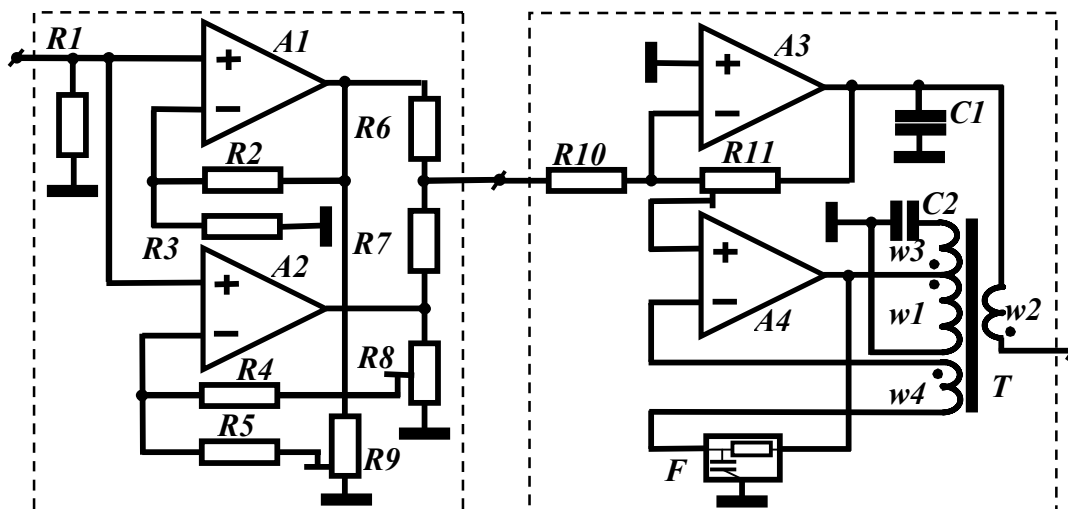


Рисунок 1 – Принцип компенсации искажений усилителя

Затем выходной сигнал дополнительного усилителя 3 ослабляется аттенюатором или трансформатором (предпочтительно в мощных усилителях) 4 в число раз  $N/K$ , т. е. равное отношению коэффициента усиления дополнительного усилителя 3 к коэффициенту усиления основного усилителя 1 (на рис.1 усиливается в  $K/N$  раз, что эквивалентно ослаблению в  $N/K$  раз) и складывается (в противофазе для инвертирующего основного усилителя) с выходным сигналом усилителя 1.

С целью минимизации собственных искажений в контуре усиления сигнала искажений, целесообразно минимизировать фазовые искажения выходного трансформатора (например, путём подключения параллельно основной обмотке, через конденсаторы, дополнительных обмоток) и охватить его отрицательной обратной связью (при этом коэффициент трансформации может быть частотнозависимым). В широкополосном усилителе мощности, с целью снижения габаритов, массы и фазовых искажений выходного трансформатора, целесообразно подавить низкочастотные составляющие спектра сигнала искажений и рассчитать трансформатор на соответствующий частотный диапазон. Выход полупроводникового основного усилителя мощности с экономичным режимом работы выходного каскада шунтируют  $RC$ -цепочкой или конденсатором для уменьшения выходного сопротивления усилителя высокочастотному напряжению при малых уровнях сигнала. Относительно малая мощность дополнительного усилителя предопределяет его выполнение быстродействующим и с режимом класса А (выходной каскад может быть как двухтактным, так и одноктактным). Как правило, основной усилитель мощности целесообразно выполнять с небольшим коэффициентом усиления по напряжению и осуществлять предварительное усиление напряжения входного сигнала. В сверхмощных усилителях искажения дополнительного усилителя также компенсируют предлагаемым способом. В определённых случаях при выделении сигнала искажений целесообразна фазовая коррекция входного сигнала.

В качестве примера реализации предложенного способа, на рис.2 представлена принципиальная схема усилителя мощности с компенсацией искажений. Рассмотрен вариант выполнения усилителей А1-А4 по классической схеме, которая предполагает наличие общей отрицательной обратной связи (цепи питания и обеспечивающие устойчивость усилителей не показаны).



Рисунк 2 – Пример принципиальной схемы усилителя с компенсацией искажений

Усилитель состоит из предварительного усилителя напряжения (в неинвертирующем варианте) на операционных усилителях  $A1, A2$  и усилителя мощности (в инвертирующем варианте) на  $A3, A4$  ( $A4$  – менее мощный, например, операционный). Резисторы  $R2, R3$  определяют коэффициент усиления основного усилителя напряжения  $A1$ , а  $R8$  (при  $R4=R5$ ) – дополнительного усилителя сигнала искажений  $A2$ . Резисторы  $R6, R7$  выполняют роль аттенуаторов и сумматора выходных сигналов усилителей  $A1, A2$ , а  $R9$  аттенуатора выходного сигнала усилителя  $A1$ . Коэффициент усиления основного усилителя мощности определяют резисторы  $R10, R11$ . Трансформатор  $T$ , с минимизированными фазовыми искажениями (элементы  $w3, C2$ ), охвачен отрицательной обратной связью через специальную дополнительную обмотку  $w4$ . При этом:  $w2/w4 \cong R11/(R10+r)$ , где  $r$  – выходное сопротивление предварительного усилителя напряжения. Фильтр  $F$  (предпочтительно активный высокого порядка) служит для создания отрицательной обратной связи по постоянному и низкочастотному напряжению в усилителе  $A4$  и определяет полосу частот компенсации искажений.

Динамические искажения низкочастотных сигналов определяются быстродействием дополнительного усилителя искажений, которое должно быть как можно выше (тысячи вольт за микросекунду). Разрешающая способность усилителя практически определяется точностью настройки и качеством пассивных компонентов. Важной отличительной характеристикой предлагаемого решения является возможность выполнения основного усилителя в экономичном классе D.

Международный патентный поиск, выполненный Федеральным институтом промышленной собственности (г. Москва), позволил сделать вывод, что наиболее близкие решения описаны в патентах США № 3471798 [1] американской компании Bell Telephone Laboratories применительно к высокочастотным усилителям и № 4447790 [2] японской компании Nippon Columbia Kabushikikaisha. Однако предложенный способ имеет существенные отличия, что предопределило оформление соответствующей международной заявки на изобретение [3] и получение декларационного патента Украины [4].

#### Список использованной литературы

1. Feed-forward amplifier: патент 3471798 США, МПК H03F 1/26, 3/68, 1/100. / Н. Seidel; заявитель Н. Seidel; патентообладатель «Bell Telephone Laboratories». - № 693546; заявл. 26.12.67; опубл. 07.10.69.

2. Distortion eliminating circuit: патент 4447790 США, МПК<sup>3</sup> H03F 1/26, 3/26 / R. Fukuda; заявитель R. Fukuda; патентообладатель Nippon Columbia Kabushikikaisha. - № 309578; заявл. 08.10.81; опубл. 08.05.84.
3. Спосіб компенсації искажених усилителя: Международная заявка на изобретение PCT/UA03/00011 / Борисов А.А.; заявитель Борисов А.А.; заявл. 25.03.03; опубл. 06.11.03, Бюл. № 03/092156.
4. Спосіб компенсації спотворень підсилювача: патент 72936 Україна, МПК<sup>7</sup> H03F 1/02, 1/32, 3/68. / Борисов О.О.; заявитель и патентообладатель Борисов А.А. - № 2002043409; заявл. 24.04.02; опубл. 16.05.05, Бюл. № 5.

Надійшла до редакції:  
25.04.2013

Рецензент:  
д-р техн. наук, проф. Воронцов О.Г.

**О.О. Борисов**

*ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»*

*Метод побудови економічних підсилювачів низької частоти з наднизькими спотвореннями. Виконано аналіз загальних принципів схемотехнічних рішень і відповідних класів режимів роботи підсилювачів низької частоти. Запропоновано схемотехнічний метод побудови економічних підсилювачів низької частоти з наднизькими спотвореннями.*

*Ключові слова: робоча точка, вольт-амперна характеристика, термостабільність, широко-імпульсна модуляція, передискретизація, фазові спотворення.*

**A.A. Borisov**

*Donetsk National Technical University*

*Method of Constructing Efficient Low-frequency Amplifiers with Ultra-low Distortion. General principles of circuit design and corresponding classes of low-frequency amplifiers modes are analyzed. Circuit design method for constructing efficient low-frequency amplifiers with ultra-low distortion are proposed. The goal is achieved due to the fact that in the selection circuit consisting of the main amplifier the distortion is amplified by the number of times exceeding the main amplifier gain, and then an additional output amplifier signal is reduced by an attenuator or a transformer by the number of times equal to the ratio of auxiliary amplifier effort coefficient to the main amplifier gain coefficient. In order to minimize its distortion in the loop of signal gain distortion, it is advisable to minimize the phase distortion of the output transformer and cover it with a shallow negative feedback. In a wideband power amplifier in order to reduce size, weight and phase distortion of the output transformer, it is advisable to suppress low frequency components of the signal distortion, and to calculate the corresponding transformer frequency band. The output of the main semiconductor amplifier in power-efficient mode is shunted with a RC-chain or a capacitor to reduce the output resistance to high-frequency voltage at low signal levels. The relatively low power auxiliary amplifier determines its performance and high-speed mode. Dynamic distortions of low-frequency signals are determined by the speed of auxiliary distortion amplifier, which must be as high as possible (thousands of volts per microsecond). In the heavy-duty auxiliary amplifiers the distortion is amplified using the proposed method. The resolution of the amplifier is determined by setting accuracy and the quality of passive components.*

*Keywords: current-voltage characteristics, thermal stability, pulse-width modulation, oversampling, phase distortions.*