



Звукотехника

Александр Соколов 1t308a@gmail.com

Любителям и профессионалам

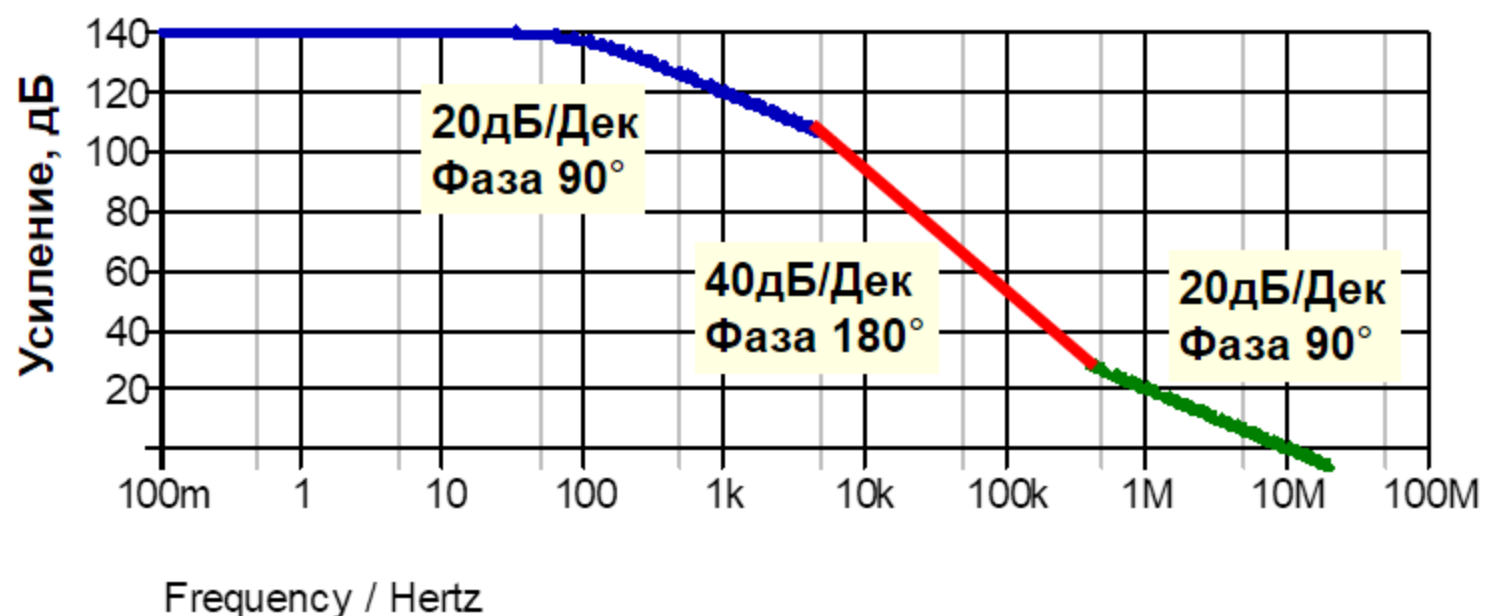
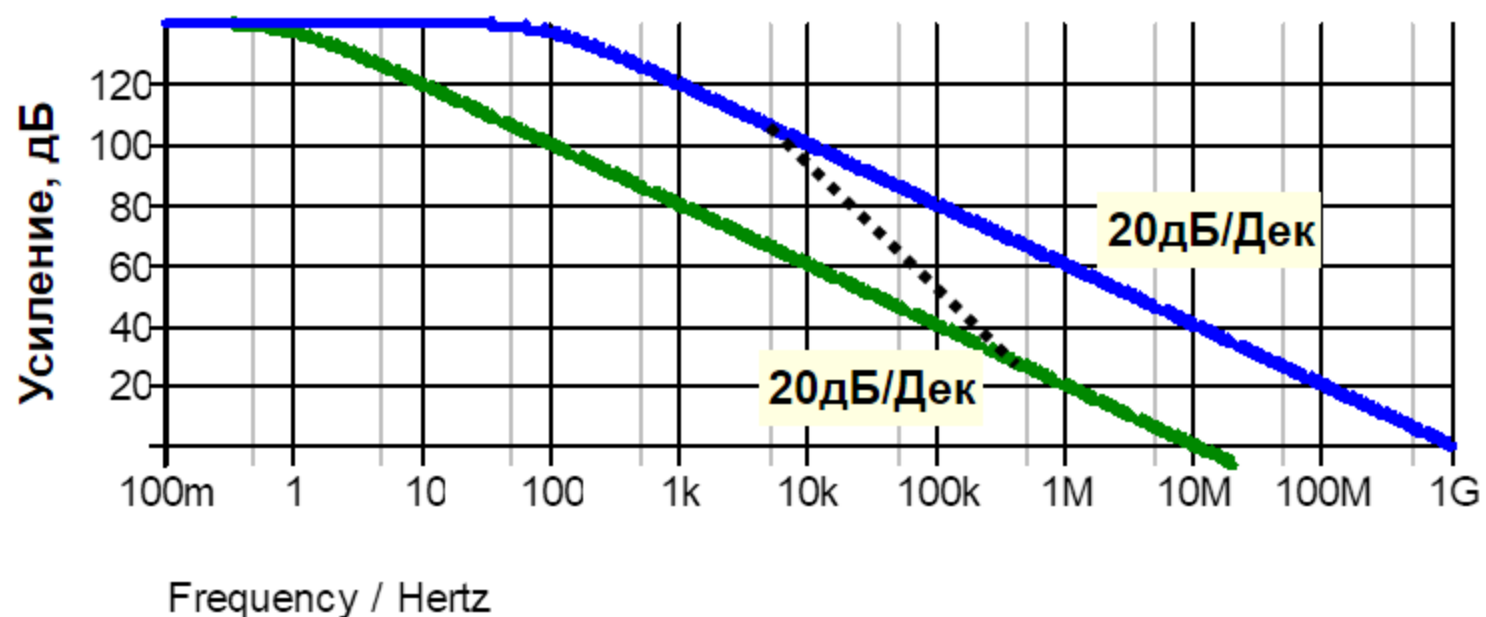


В предыдущем выпуске я представил схему «народного» УНЧ Перегрин-50М с операционным усилителем на входе. Он, вроде, всем хорош, но некоторые любители вообще против применения ОУ в УМЗЧ. Да и сам я когда-то также считал. В этом выпуске я расскажу о проблемах всех сверхлинейных УНЧ с глубокой ООС, а также представлю две схемы полностью транзисторных УНЧ из семейства Сокол. Первая – сложная и гибкая схема с высокой линейностью при неглубокой ООС, и вторая – «народная» схема, предельно простая, но с очень неплохими параметрами.

Некоторые материалы этого выпуска вы вряд ли найдете еще где-либо. Я очень стараюсь объяснять как можно понятнее, но если будут вопросы, не стесняйтесь задавать.

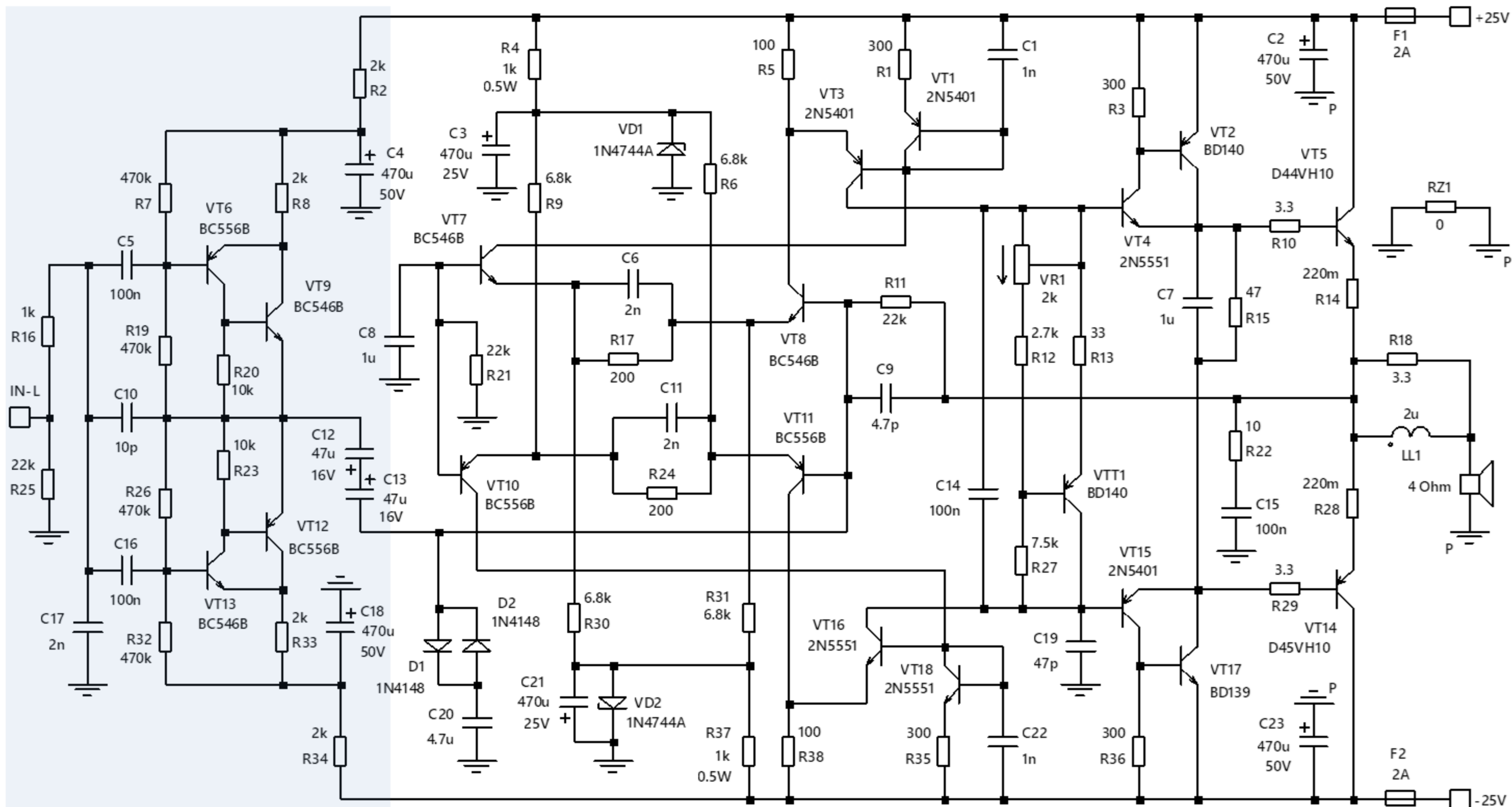
Этот выпуск в формате PDF доступен для скачивания по ссылке в заголовке.

ОС в усилителях обазуется при подаче части выходного сигнала обратно на вход. При этом если фаза выходного сигнала противоположна фазе входного – ОС отрицательна (ООС). Но любой усилитель точно инвертирует фазу только на низких частотах, а на высоких всегда появляется дополнительный фазовый сдвиг. Чем больше величина сдвига – тем ниже устойчивость петли ООС, при 180° и более ОС вообще становится положительной и неизбежно самовозбуждение. Здесь я говорю о ФЧХ замкнутой петли ООС, а не о ФЧХ усилителя с разомкнутой петлей ООС. Это разные вещи, потому что элементы коррекции на опережение уменьшают фазовый набег в петле. Известно, что если коэффициент усиления усилителя с ООС падает с повышением частоты, неизбежно появляется фазовый сдвиг, зависящий от крутизны падения коэффициента усиления. Если он падает с наклоном 20дБ/декада, то дополнительный фазовый сдвиг равен 90° , а если 40дБ/декада, то уже 180° . Ну, и все промежуточные значения. Также известно, что если график АЧХ пересекает 0дБ с наклоном 20дБ/декада, то это идеальный случай, и запас по фазе равен 90° , что обеспечивает абсолютную устойчивость. Это еще называют однополюсной АЧХ. А вот если этот наклон равен, или выше 40дБ/декада, то запас по фазе исчезает, и усилитель самовозбуждается. Причем чем выше коэффициент усиления в петле ООС, тем шире должна быть АЧХ для обеспечения устойчивости.



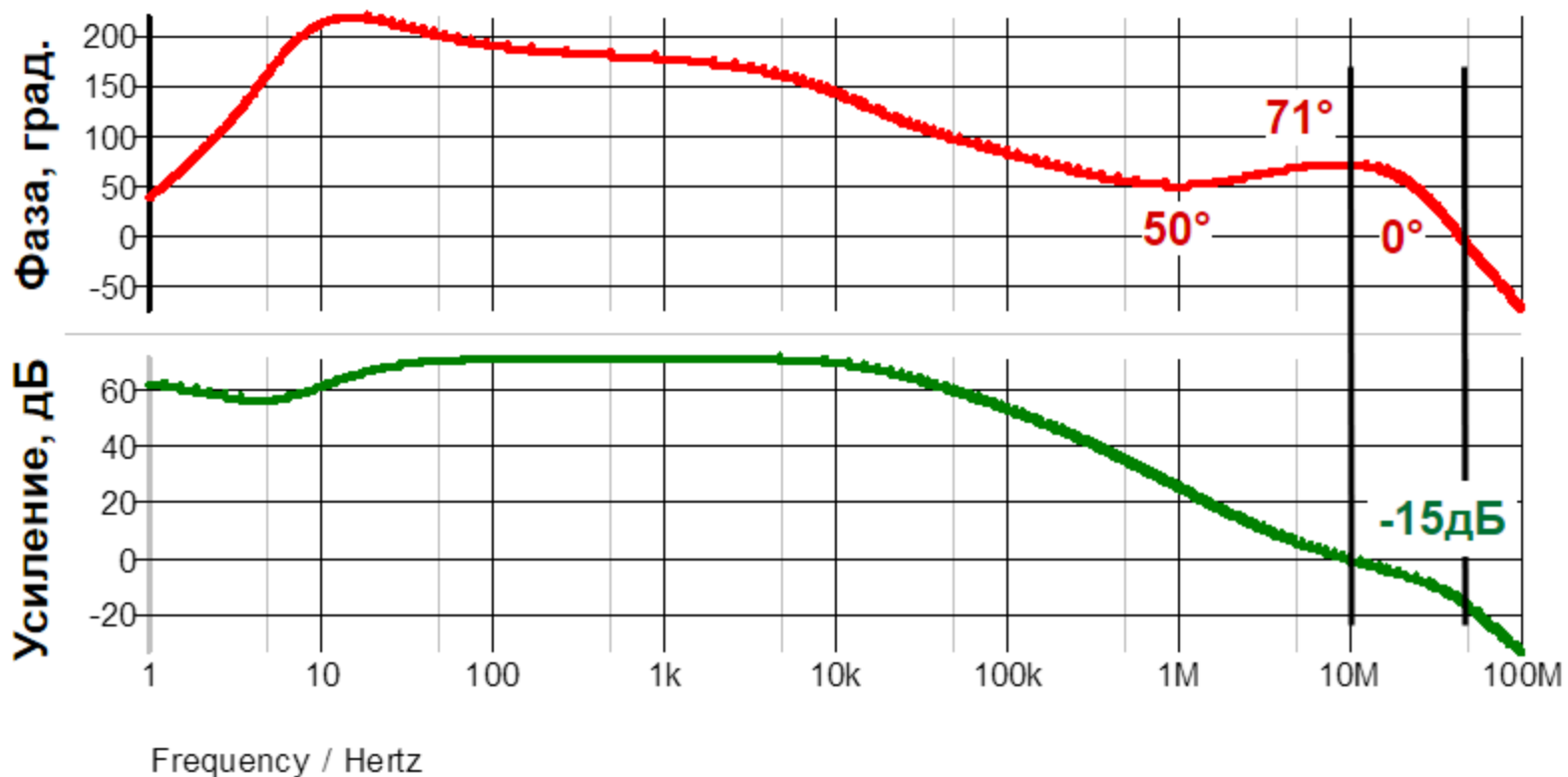
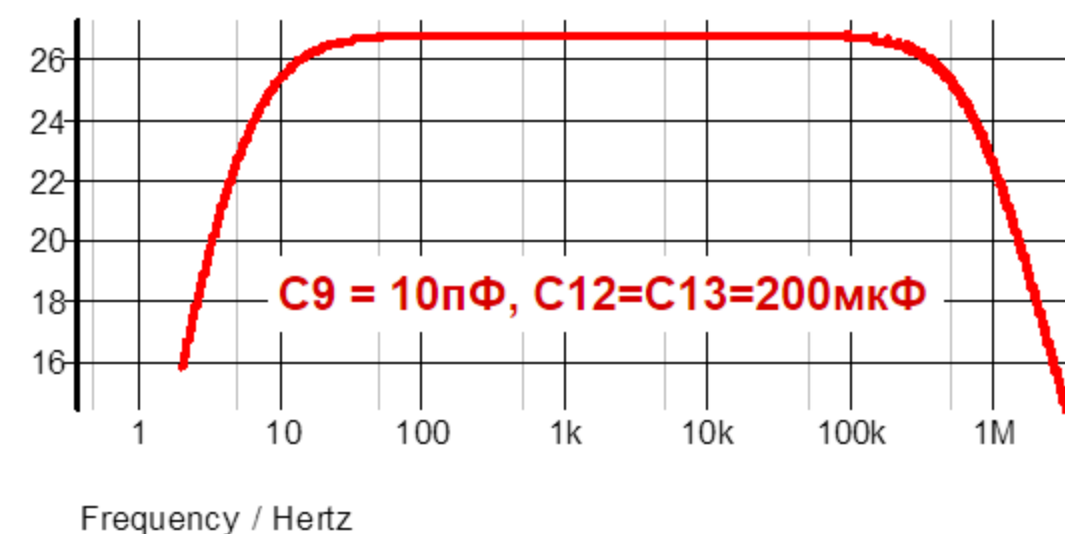
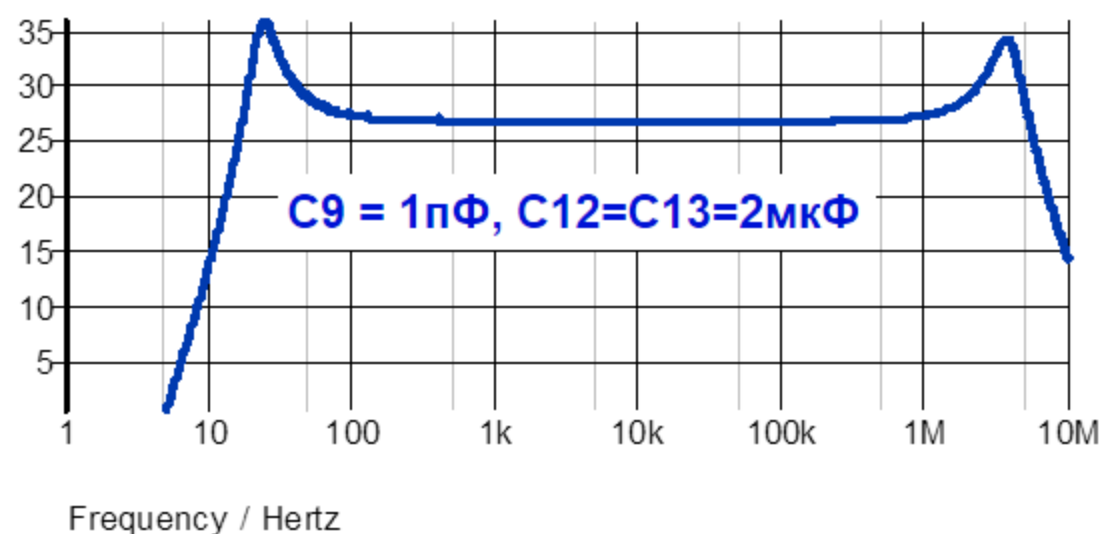
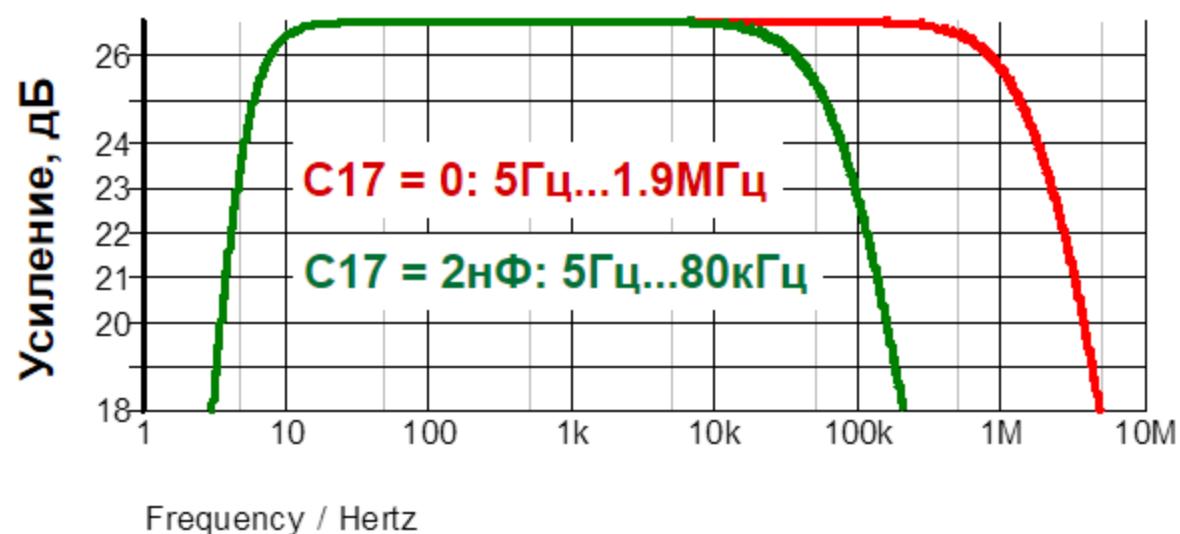
А теперь представим себе УМЗЧ с ОУ на входе и замкнутой петлей ООС. Усиление в петле на низких частотах достигает 140дБ. Для обеспечения абсолютной устойчивости петли ООС наклон АЧХ при пересечении 0дБ усиления должен быть 20дБ/декада. При этом требуемая форма АЧХ в основном зависит от частотных свойств мощных выходных транзисторов. При современных комплементарных биполярных транзисторах реальный предел ширины полосы петли ООС не выше 10МГц, а при полевых транзисторах – существенно ниже из-за огромной емкости затвористок (на этот счет есть фундаментальное исследование “AN-1645 LM4702 Driving a MOSFET Output Stage” от Texas Instruments). Итак, предел 10МГц. Простейшая форма АЧХ показана зеленой линией на верхнем графике. Но здесь проблема – спад АЧХ начинается уже с 1Гц! Такой усилитель будет иметь совершенно неудовлетворительные динамические характеристики и плохое звучание. Имеется множество литературы на этот счет. Вот синяя кривая намного лучше, но требует нереальной полосы 1ГГц! И вот изобретательные конструкторы придумали выход: АЧХ будет начинаться синей кривой, до 5кГц, а заканчиваться зеленой, от 400кГц до 10МГц, как показано пунктиром на верхнем графике. При этом и АЧХ в звуковом диапазоне великолепна, и устойчивость гарантирована! Достигается такой трюк при помощи сложной коррекции на опережение и запаздывание одновременно. Но вот незадача, на АЧХ неизбежно появляется участок с наклоном намного выше 20дБ/декада, в данном случае аж 40дБ/декада, как показано на нижнем графике красной линией. Это наглядный пример, а не реальная ситуация. В реальных конструкциях графики АЧХ и ФЧХ не прямые, а изогнутые, и коррекцию подбирают так, чтобы фаза не проваливалась до 180° , оставаясь на минимуме хотя бы 170° . Это и есть особенность всех сверхлинейных УМЗЧ с глубокой ООС, в особенности, с ОУ на входе, включая ВВ Сухова и Перегрины, за исключением «народного» Перегрин-50М, где глубина общей ООС резко снижена, а нужная линейность достигнута путем применения локальной ООС и линейных токовых зеркал. Хотя вред от провала на ФЧХ не доказан, и я его не обнаружил, все равно многих он напрягает.

Схема состоит из ИТУН (выделено) и основного усилителя типа Сокол, но с добавленными элементами R17, C6 и R24, C11 для снижения усиления и линейаризации входного двойного дифкаскада. Изменяя величины этих элементов можно в широких пределах менять усиление и частотную характеристику входного каскада без изменения его режима по постоянному току. Токвые зеркала на VT1, VT3, VT16, VT18 с двойным управлением по эмиттеру и по базе управляют выходным каскадом. Дискретный ИТУН имеет очень высокую линейность и крутизну преобразования 1mA/V при выходном сопротивлении 100к. Для избежания дрейфа тока покоя после включения, пары VT1, VT3 и VT16, VT18 должны попарно иметь хороший тепловой контакт друг с другом. Ноль на выходе при необходимости устанавливают точным подбором R9 или R30. Я решил не ставить дополнительный переменный резистор. Ток покоя 100mA устанавливают многооборотным VR1. VTT1 установлен на общем



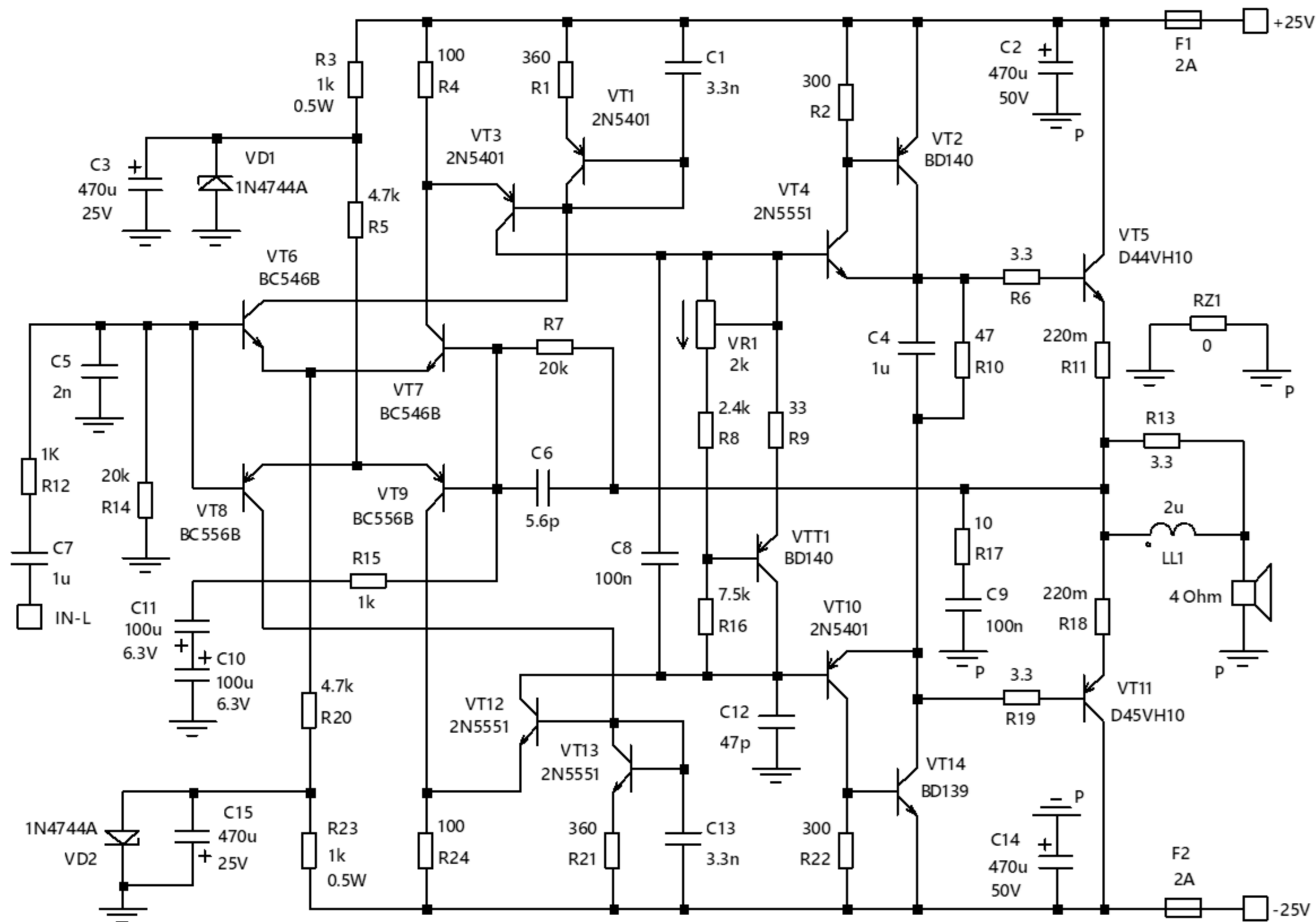
радиаторе выходных транзисторов VT2, VT5, VT17, VT14. Частотная характеристика петли ООС зависит от величин корректирующих конденсаторов C1, C6, C9, C11, C19, C22. Изменяя величины этих конденсаторов можно получить почти любую желаемую форму АЧХ и ФЧХ. Питание ±25В от нестабилизированного источника, максимальная выходная мощность на нагрузке 4 Ом 50Вт. Основной усилитель имеет токовый вход и почти нулевое входное сопротивление, идеально подходящее для работы совместно с ИТУН. Входной ток при максимальной выходной мощности 1mA в пике, что соответствует пиковому входному напряжению 1В. Конденсаторы C12 и C13 танталовые, соединены последовательно плюс к плюсу, образуя неполярный танталовый конденсатор

Все параметры измеряю на модели в симуляторе Simetrix. Методы измерений описаны в предыдущем видеовыпуске, повторяться не буду. Начну с частотных характеристик сквозного тракта, от входа до выхода. На левом графике показана АЧХ до индуктора LL1 при отсутствии и наличии C17 на входе. Конечно, в УНЧ без ОУ на входе полоса намного шире, чем при его наличии, но на звучание это повлиять не может. Покажу влияние конденсаторов C9, C12 и C13 на форму АЧХ без C17 на входе. Уменьшаю C9 до 1пФ, а C12 и C13 до 2мкФ. График в середине. Появились 2 пика на АЧХ, один на 52Гц, второй на 3МГц, которые показывают на склонность к самовозбуждению на этих частотах, да еще и начнется бубнение из-за подъема на НЧ. Теперь увеличу C9 до 10пФ, а C12 и C13 до 200мкФ. График справа. На низких частотах все чисто, как и на исходном левом графике, а на высоких – пик пропал, но верхняя граничная частота снизилась от 1.9МГц до 700кГц. У ИТУН имеется необычная особенность, при уменьшении емкости разделительного конденсатора между ИТУН и входом усилителя низкие частоты не убывают, а поднимаются, что, кажется, противоречит привычной логике, но это так. ИТУН – это не обычный предусилитель. Что касается C9, то существует его оптимальная величина, при которой АЧХ наиболее широкая и плоская, при этом отсутствует склонность к самовозбуждению на высокой частоте.



Перехожу к АЧХ и ФЧХ петли ООС. Графики слева. Напомню что АЧХ и ФЧХ петли ООС, это не то же самое, что АЧХ и ФЧХ усилителя с разорванной обратной связью. Дело в том, что корректирующая цепочка R11, C9 уменьшает фазовый сдвиг в петле на 60°. Об этом подробнее в предыдущем выпуске. График слева. Усиление в петле ООС, или глубина ООС, всего 70дБ, это относительно небольшая величина по сравнению с 120-140дБ в сверхлинейниках. Но даже при такой неглубокой ООС удалось получить при половинной мощности КНИ=0.0003% на 1кГц и 0.0001% на 10кГц в полосе 20кГц и 0.0005% без ограничения полосы. В отличие от Перегрин-50М, здесь КНИ почти не зависит от частоты в звуковом диапазоне. Запас по фазе составляет 71°, а запас по усилению -15дБ. Минимальное значение фазы 50°. Все это превосходит даже жесткие стандарты NASA для наземной аппаратуры. Там допускается минимальный запас по фазе 45° и по усилению -10дБ. Так что, устойчивость против самовозбуждения просто запредельная. Остальные параметры УНЧ Сокол-50 приведены в конце презентации.

В предыдущем выпуске я представил народный УНЧ Перегрин-50М, простой, неприхотливый и надежный, как автомат Калашникова. Он всем хорош, но есть любители, которые и на дух не переносят наличие ОУ в УМЗЧ. Специально для них я разработал простой вариант Сокол-50М без ИТУН на входе. Для упрощения, усилитель выполнен по неинвертирующей схеме, и, следовательно, входной каскад подвержен влиянию синфазного сигнала с амплитудой до 1В. Для подавления синфазного сигнала обычно используют источники стабильного тока в эмиттерах диффкаскадов. Но это – дополнительные детали. Я сделал проще, вместо источников тока поставил резисторы R5 и R20. При этом синфазный сигнал достаточно хорошо подавляется токовыми зеркалами с двойным управлением на



транзисторах VT1, VT3, VT12, VT13. Такие зеркала я применяю во всех УНЧ серии Сокол. Я, разумеется, проверил, насколько резисторы работают хуже источников тока в этой схеме. Результат проверки показал, что линейность оказалась практически одинаковой в обоих случаях. Токовые зеркала успешно раскачивают комбинированный выходной каскад, такой же, как в предыдущей схеме. Мне нравится этот выходной каскад, поэтому я применяю его во всех своих разработках УМЗЧ. В схеме всего два основных конденсатора коррекции АЧХ, это С6, делающий коррекцию на опережение по фазе, и С12, создающий запаздывание по фазе. Еще на ФЧХ влияют конденсаторы С1 и С13. Эти конденсаторы нивелируют вредное влияние емкости коллектор-база транзисторов VT3 и VT12, которые на высоких частотах теряют двойное управление, и управляются только по эмиттерам, образуя схему с ОБ. Термокомпенсирующий транзистор VTT1 расположен на радиаторе мощных транзисторов VT2, VT5, VT14, VT11. Пары транзисторов токовых зеркал должны иметь хороший тепловой контакт между корпусами для исключения дрейфа тока покоя после включения, потому что транзисторы VT3 и VT12 заметно нагреваются, из-за чего медленно нарастает ток покоя, если также не нагревать VT1 и VT13, которые сами не греются. Скоростные параметры и устойчивость аналогичны таковым предыдущего более сложного варианта, но линейность, конечно, значительно хуже.

Сводные данные в таблице. Чисто транзисторные Соколы далеко обходят Перегрин с ОУ на входе по всем скоростным параметрам, особенно, по задержке сигнала в петле ООС. Однако, по линейности на низких и средних частотах Перегрин далеко впереди, хотя на 10кГц сложный Сокол-50 опережает Перегрин. Еще у Соколов глубина ООС почти не зависит от частоты, а у Перегриня зависит, и сильно. Важно это или нет – не знаю. Имеется один очень важный фактор у сложного Сокола-50 и Перегриня-50М, а именно возможность подстройки глубины ООС изменением величин резисторов, поэтому всегда возможно устранить возникшее самовозбуждение. А вот в простом Соколе-50М этого ресурса нет, возможны только ограниченные манипуляции с конденсаторами коррекции, не всегда успешные.

Параметр	Сокол-50	Сокол-50М	Перегрин-50М
Максимальная выходная мощность на нагрузке 4 Ом, Вт	50	50	50
Нижняя граница полосы пропускания на уровне -3дБ, Гц	5	5	5
Верхняя граница полосы пропускания без ФНЧ на входе и дросселя на выходе, кГц	1900	1900	590
Коэффициент нелинейных искажений при половинной мощности на 1кГц, тысячных долей %	0.3	0.6	0.1
Коэффициент нелинейных искажений при половинной мощности на 10кГц, тысячных долей %	0.1	0.7	0.4
Коэффициент нелинейных искажений при 1Вт мощности на 1кГц, тысячных долей %	0.07	0.25	0.03
Коэффициент нелинейных искажений при 1Вт мощности на 10кГц, тысячных долей %	0.15	0.2	0.2
Скорость нарастания выходного напряжения без ФНЧ на входе и дросселя на выходе, В/мкс	117	77	74
Задержка распространения сигнала в петле ООС, нс	20	20	400
Запас устойчивости по фазе, градус	71	74	70
Запас устойчивости по усилению, дБ	-15	-16	-19
Глубина отрицательной обратной связи (усиление в петле ООС) на 1кГц / 10кГц, дБ	70 / 69	64 / 62	92 / 70
Подавление пульсаций питающих напряжений ±25В, дБ	60	60	137
Клип на выходе при двойной перегрузке по входу при 10кГц синусоидальном сигнале	Чистый	Чистый	Чистый
Щелчок в колонках при включении усилителя в сеть	Нет	Нет	Есть тихий

1. Можно ли повысить выходную мощность?
Да, можно до 200Вт без существенных изменений, но придется использовать более мощные транзисторы, радиаторы большого размера и более мощный блок питания.
2. ИТУН – что это и зачем он нужен? Где получить подробную информацию о нем?
Есть видео на моем канале «Вопросы и ответы #1». Там и ссылка на PDF файл.
3. Где взять печатную плату?
Это дело каждого, я не делал разводки.
4. Был ли собран рабочий прототип?
Нет, я его не делал, вся работа проделана в симуляторе Simetrix. И я считаю это более адекватным исследованием, чем макетирование, благодаря возможности моделирования разброса параметров компонентов. УНЧ Перегрин-50, уже многократно собранный, показал весьма точное совпадение результатов практических измерений с результатами моделирования.
5. Смещение нуля на выходе больше 20мВ. Что делать?
Подключить резистор 200к параллельно R5 (R9 в сложной схеме). Если смещение уменьшилось, или поменяло знак, подобрать оптимальную величину этого резистора и припаять его. Если смещение только увеличилось, проделать то же, но с R20 (R30).
6. Усилитель возбуждился. Что делать?
Если это сложный Сокол-50, то увеличить резисторы R17 и R24 одновременно сначала до 300 Ом и, при необходимости, далее, пока не исчезнет возбужд. Если это Сокол-50М, то поставить второй конденсатор 47пФ между базой VT4 и землей.
7. Можно ли применить на выходе транзисторы КТ818Г и КТ819Г?
Нет, нельзя, они слишком медленные. В Перегрине это было возможно, в Соколе – нет
8. Какой смысл собирать сложный Сокол-50, когда простой Сокол-50М тоже имеет вполне неплохие параметры?
Это вопрос идеологии и спортивного интереса. Сложный Сокол-50 быстрее, и линейнее на высших частотах звукового диапазона. Кроме того, он, как ни странно, более терпим к некачественным деталям, и может оказаться проще в налаживании. Можно ли услышать разницу между ними? Не знаю, я бы точно не услышал, я и 15кГц уже не слышу, но точно знаю, что встречаются златоухие, которые слышат невероятно тонкие оттенки звучания.



Благодарю за внимание.
До свидания и до следующих встреч.
Вопросы и пожелания сюда: 1t308a@gmail.com