



Полевые транзисторы в выходном каскаде УМЗЧ без ОС

Александр Петров, г. Минск

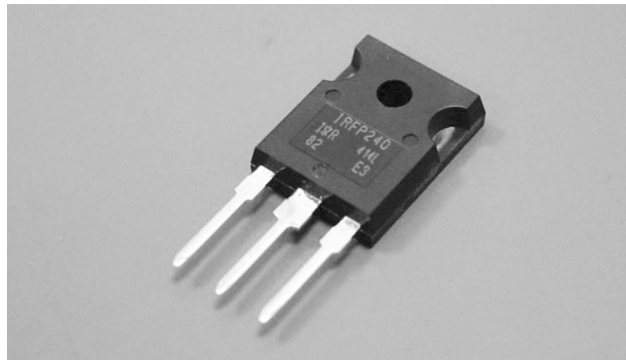
(Окончание. Начало см. в РА 4/2014)

Пара 2SK1529/2SJ200 (аналоги 2SK1530/2SJ201) показала прекрасный результат с одинарными транзисторами уже при токе покоя 1 А благодаря своей высокой комплиментарности. При использовании по 4 транзистора в плече, искажения уменьшились более чем в 2 раза, и в 3 раза повысился демпинг-фактор. В спектре гармоник присутствует преимущественно 3-я гармоника благодаря высокой идентичности транзисторов. Введение истоковых резисторов увеличивает искажения и снижает демпинг-фактор.

Пара IRFP240/IRFP9240. Эта пара также пользуется популярностью благодаря своей доступности и дешевизне. Несмотря на свою «кривизну» (табл. 1), она также показала неплохой результат. А при снижении тока покоя до 0,61 А на один транзистор результаты даже улучшились (табл. 2) – это оптимальный ток для этой пары, причем в очень узкой области. У других пар транзисторов такая точка не обнаружена. Автор объясняет это тем, что именно в этой точке происходит компенсация искажений благодаря тому, что у транзистора N-типа IRFP240 выходная вольтамперная характеристика (ВАХ) более чем квадратичная, а у транзисторов р-типа IRFP9240 до квадратичной не дотягивает (табл. 1). Но для снижения искажений на малых уровнях сигнала пришлось ввести истоковые резисторы R_s сопротивлением 0,33 Ом, что привело к снижению демпинг-фактора. Эти транзисторы благодаря своей «кривизне» также вносят преимущественно 2-ю гармонику.

В [5] отмечено, что при прекрасных измеряемых параметрах УМЗЧ с ВК на этих транзисторах звучит немusыкально (проверялось при токе покоя 300 мА), «жестко», разрушая микродинамику сигнала. Даже глубокая ООС при малых токах покоя не устраняет искажения в высокочастотной области звукового диапазона [2].

По сути, автор [4] исследовал ВК для 8-омной нагрузки в режиме, близком к режиму класса «А», для выходных напряжений до 14 В, и уверен, что если бы ВАХ ПТ были на самом деле квадратичными, то вносимые искажения были бы ничтожно малы. При попытке повторения описанных исследований необходимо учитывать, что при таком высоком напряжении питания и таких токах покоя нужны внушительные теплоотводы или их принудительная вентиляция. Отсутствие истоковых резисторов также требует более серьезного подхода к температурной стабилизации режимов, за исключением ВК на транзисторах типа Lateral.



Использование отрицательного выходного сопротивления

Исследования [5] показали, что как бы ни были малы искажения, даже у УМЗЧ без ОС с идеально настроенным корректором Хауксфорда все равно чего-то не хватает для максимально приближенного к живому звучанию. Оказалось, что именно отрицательное выходное сопротивление небольшой величины (0,2...0,3 Ом) позволяет более точно контролировать движение диффузоров ЭДГ во всем звуковом диапазоне с минимальными искажениями огибающих звукового давления, а соответственно и передавать без искажений микродинамику все нюансы музыкальных произведений.

Как оказалось, для этого достаточно соединить последовательно любой драйвер без ОС с нагрузочным резистором 20...30 кОм (это же и его выходное сопротивление), например из [7], с выходным каскадом с правильно рассчитанным корректором Хауксфорда для источника сигнала с нулевым выходным сопротивлением. При этом оптимальное отрицательное выходное сопротивление получается автоматически.

Однако как показали дополнительные исследования, из-за модуляции нагрузки драйвера входным сопротивлением ВК происходит некоторое размытие КИЗ (кажущихся источников звука) при сохранении большой глубины сцены. Когда мой помощник, будучи уверенным, что виной всему проникание противоЭДС на вход УМЗЧ, для увеличения развязки включил между драйвером и ВК буферный каскад, то звук «испортился». Помощник был в шоке, что его основная идея борьбы с противоЭДС потерпела фиаско. Вот тут и пришлось разъяснить ему, что же произошло на самом деле, и подсказать, что необходимо восстановить выходное сопротивление источника сигнала, включив на входе ВК резистор, эквивалентный прежнему выходному сопротивлению драйвера.

Каким же образом можно улучшить контроль за движением диффузоров ЭДГ АС? Когда-то еще И. Сухов в УМЗЧ ВВ один из первых в нашей стране обратил внимание на компенсатор сопротивления проводов. Но это решение обычно используется в УМЗЧ с ООС. Тем не менее, повторившие это устройство остались весьма довольны улучшением качества звучания.

Усилитель с отрицательным выходным сопротивлением [5] делает примерно то же самое, но без дополнительных ОУ и дополнительных проводов от АС. Учитывая, что импеданс акустических проводов в звуковом диапазоне частот сильно зависит от конструкции кабелей, материалов, сечения проводников, а также от скин-эффекта и эффекта близости проводников в кабеле [8], оптимальное отрицательное выходное сопротивление УМЗЧ может колебаться в небольших пределах.

УМЗЧ с корректором Хауксфорда

Чтобы свести к минимуму эту зависимость, можно ввести дополнительный третий провод небольшого сечения и подключить его к корректору искажений Хауксфорда, как показано на **рис.2**.

Выходной каскад **рис.2** представляет собой прощенный вариант ВК из [5], исключены элементы защиты от перегрузки и короткого замыкания в нагрузке. Ток покоя 300 мА выставляют резистором R22, а оптимальное выходное сопротивление – резистором R13 и R3 по коэффициенту передачи с входа до нагрузки $0 \pm 0,1$ дБ. Точка

соединения резисторов R19, R20 подключена к дополнительному контакту (клемме) выходного разъема на АС. Резистор R27 служит для обеспечения режимов работы ВК при отключенной АС. При этом благодаря дополнительному проводу сигнал ошибки на корректор Хауксфорда снимается не с выхода ВК, а непосредственно с нагрузки. При этом имеется возможность обойтись минимальным отрицательным выходным сопротивлением, а всю «силу» корректора направить на снижение искажений, что еще больше повысит качество звуковоспроизведения.

Доработка УМЗЧ, описанного в [9]

А теперь обратимся к выходному каскаду из [9] (**рис.3**). От величины R1 зависит полоса пропускания, и его значение не должно быть выше 10 кОм, оптимальное значение в пределах 1...2 кОм. ВК предназначен для работы с драйвером с низким выходным сопротивлением, не выше 1 кОм. Источник тока I_1 можно заменить резистором 47 кОм.

Оказывается, если и здесь использовать этот же подход, можно прекрасно скомпенсировать все капризы импеданса акустического кабеля с помощью несложной доработки. На **рис.3** сопротивления проводов акустического кабеля условно обозначены как R_{w1} и R_{w2} и добавлен резистор R18, который служит для сохранения режимов работы ВК при отключенной нагрузке, а также добавлен резистор R20*, примерно равный омическому сопротивлению одной из жил кабеля $R_{w1}=R_{w2}=R_w$.

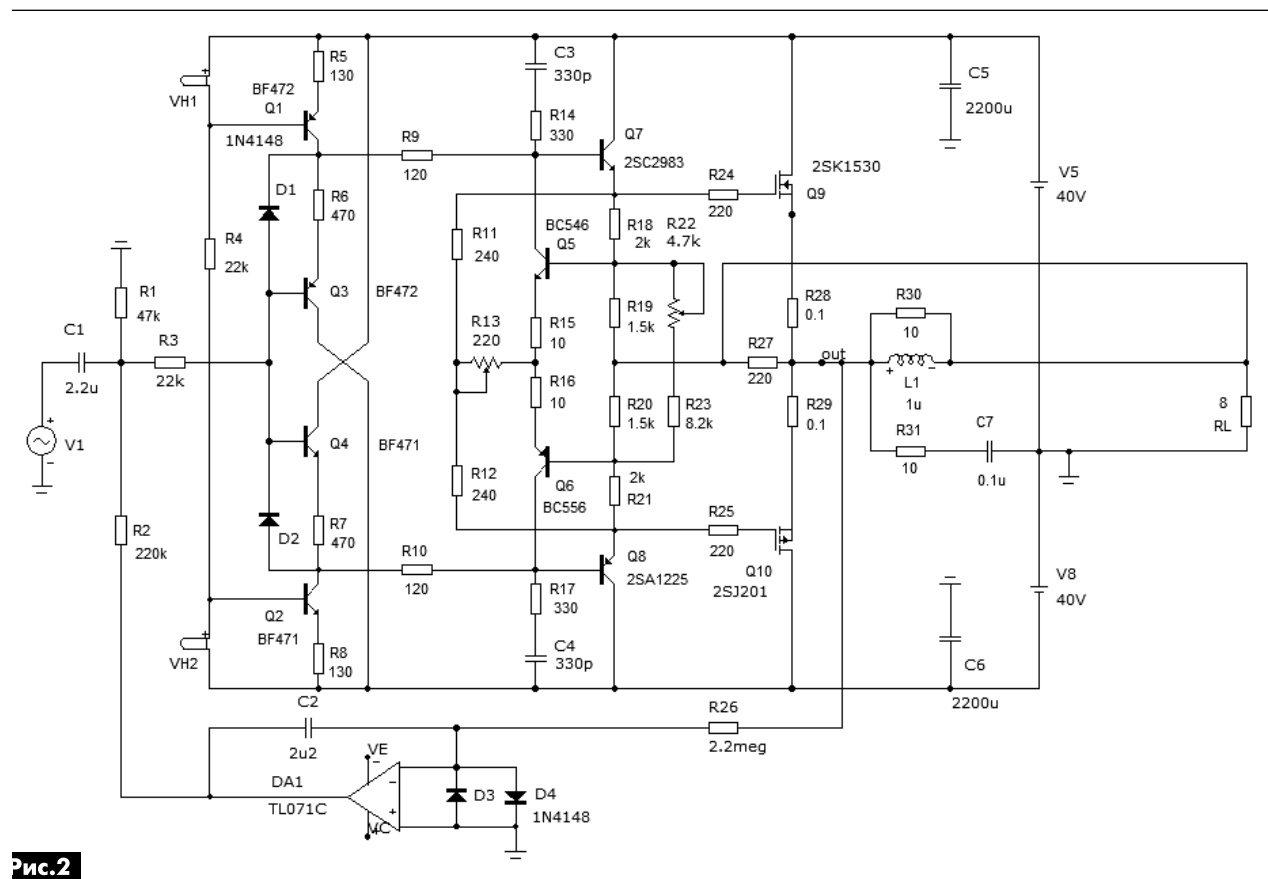
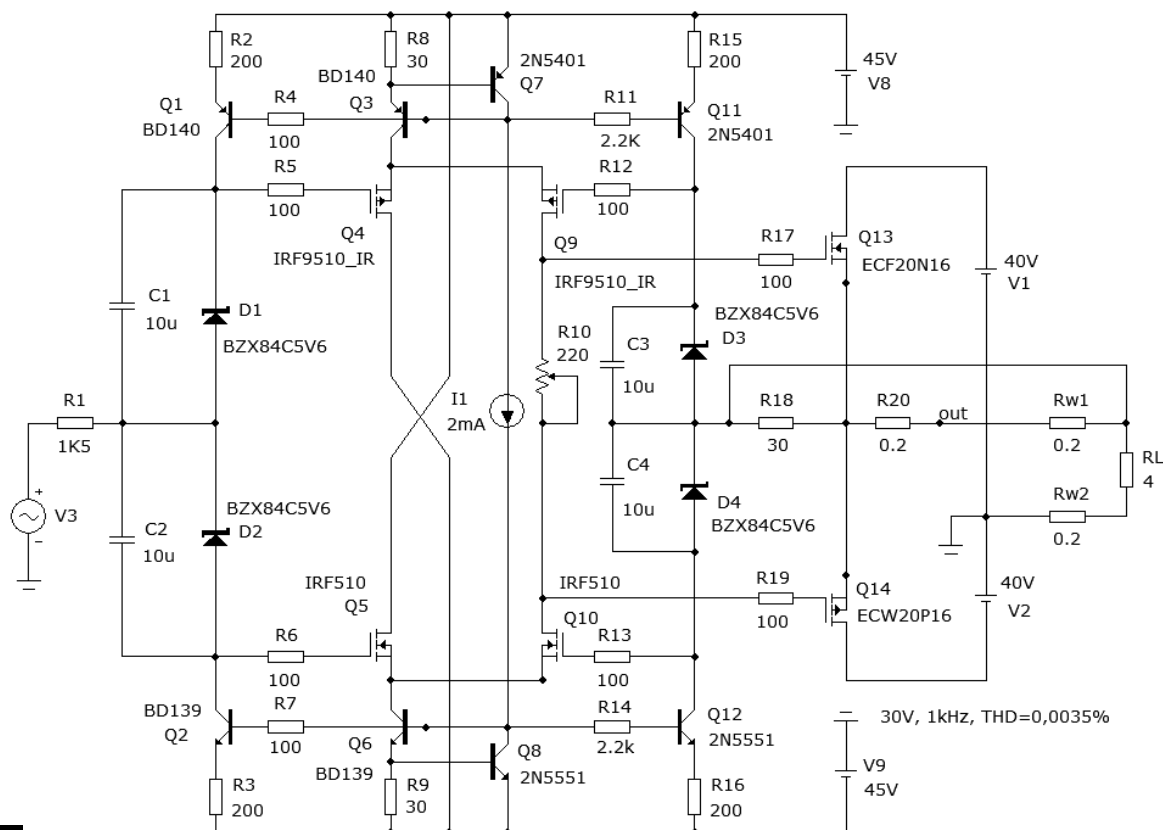


Рис.2



Рис.3



Тогда выходное напряжение в истоках Q13, Q14 будет выше на величину ошибки, равную падению напряжения на кабеле:

$$\Delta U_{\text{out}} = 2I_{\text{out}} \cdot R_w \quad (5)$$

Таким образом, благодаря несложной доработке, путем введения дополнительного третьего провода можно скомпенсировать импеданс акустического кабеля. А еще лучше использовать витую пару, подключив ее, как показано на **рис.4**.

Причем с такой доработкой все кабели (и дорогие, и дешевые) будут «звучать» одинаково. Этот прием обычно используют при разработке печатных плат УМЗЧ, сигнал ООС берут непосредственно с выхода для минимизации искажений и получения демпинг-фактора по максимуму. Резистором R10 выставляют ток покоя в пределах 80...120 мА. Благодаря глубокой ООС внутри ВК, нет необходимости делать из УМЗЧ калорифер. Если использовать в качестве выходных транзисторов ПТ типа Lateral, то температурной стабилизации рабочей точки не требуется. В соответствии с графиками, приведенными в даташитах, их термостабильная точка находится в районе 100...120 мА.

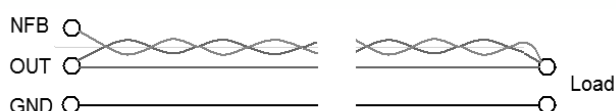


Рис.4

Выход этого ВК прекрасно справляется с внешней нагрузкой. Не будем забывать, что электродинамические головки используемые в акустических системах – это не только реактивная нагрузка, но и генератор сигнала как мощный микрофон, и как генератор ЭДС из-за инерционных свойств подвижной системы. Но рассмотрение этого уже выходит за рамки данной статьи.

Диаграмма Бode показана на **рис.5**, из которого видно, что коэффициент передачи немного выше 1 (больше чем 0 дБ) благодаря использованию третьего провода, что свидетельствует об отрицательном выходном сопротивлении непосредственно на выходе УМЗЧ. Полоса пропускания не менее 1 МГц, зависит от суммарного сопротивления резистора R1 и выходного сопротивления драйвера.

Спектр гармоник показан на **рис.6** при выходном напряжении 30 В. Причем в спектре только одна вторая гармоника уровнем 0,003%. При меньшем выходном напряжении искажения ничтожно малы.

Литература

- Петров А. Усилители напряжения без ООС // Радиоаматор. – 2011. – №9.
- Петров А. Аналоговые межблочные и акустические кабели. Мифы и реальность // Радиоаматор. – 2013. – №2, №3, №4.
- Петров А. Взгляд на искажения, вносимые УМЗЧ изнутри // Радиоаматор. – 2011. – №4.

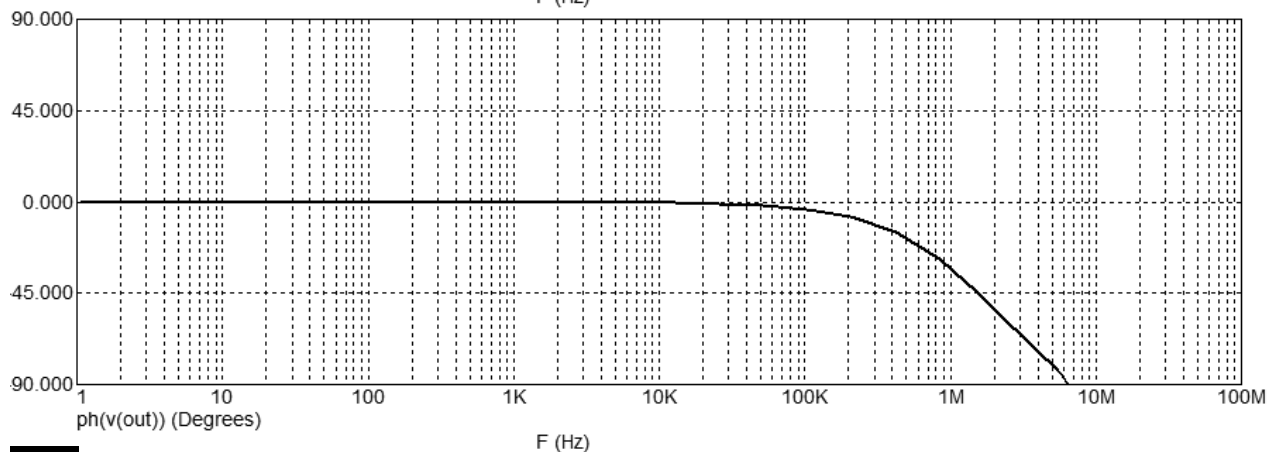
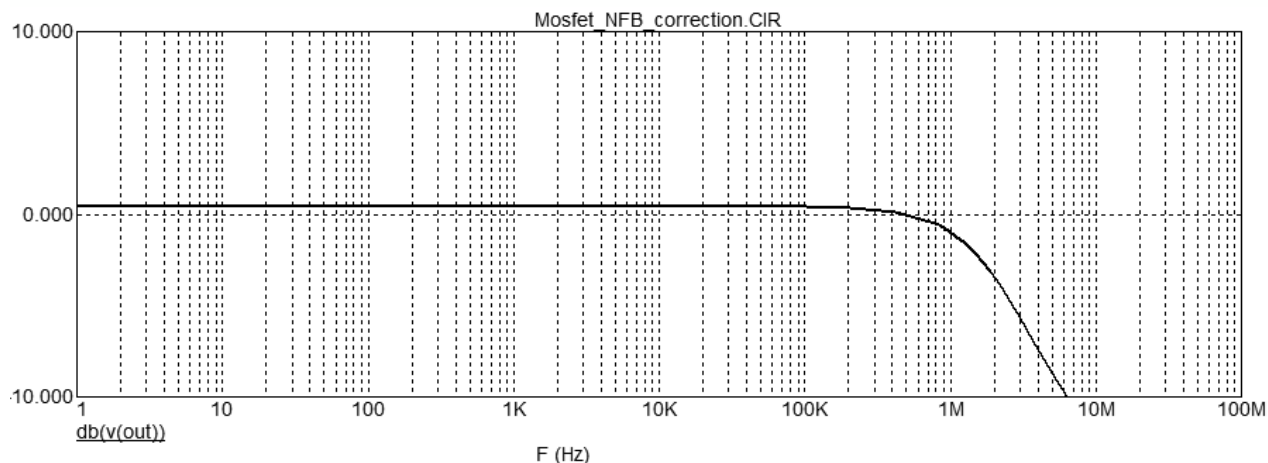


Рис.5

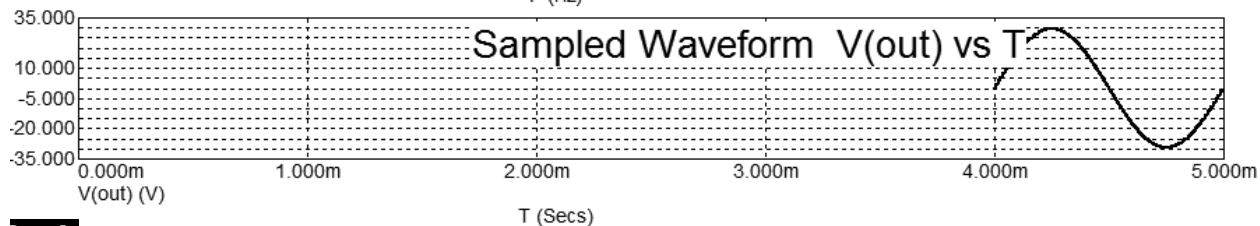
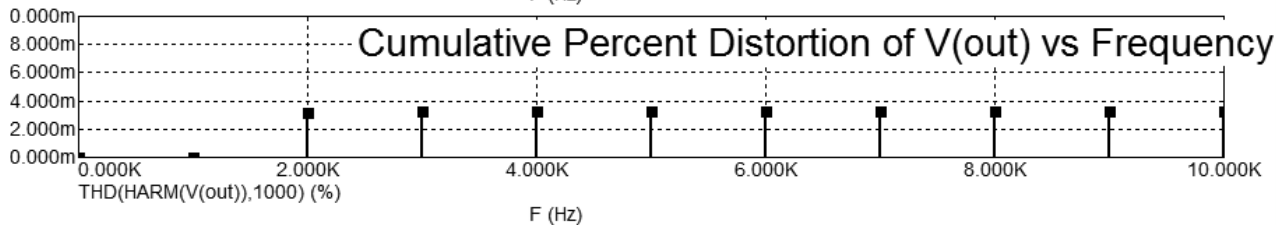
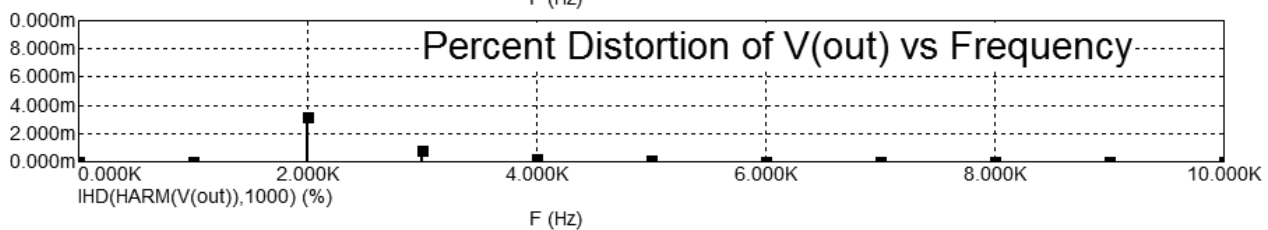
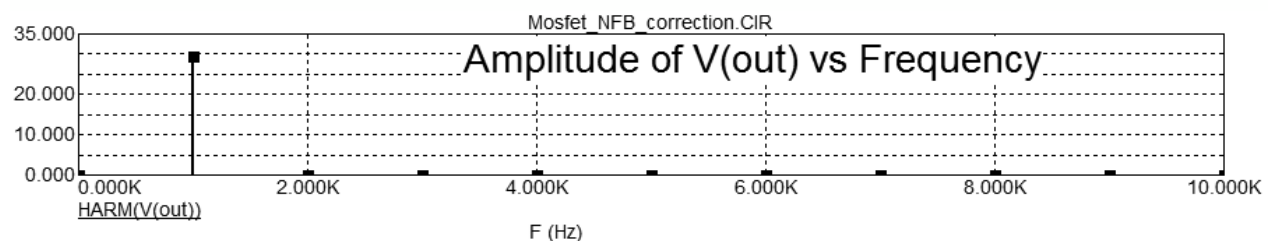


Рис.6