

Рис. 7.6. Система усилителя, соединительных кабелей и нагрузки. Упрощенная схема усилителя со схемой Зобеля, сглаживающим выходным дросселем и резистивной нагрузкой. Усредненные значения индуктивности и сопротивления приведены для стандартного соединительного кабеля длиной 5 м

7.7. Выходные цепи

Обычные выходные цепи усилителя мощности показаны на рис. 7.6, на них же приведены стандартные значения номиналов элементов цепей. Они включают параллельно включенную цепь Зобеля (Zobel), необходимую для повышения устойчивости схемы при работе на индуктивную нагрузку, а также последовательно включенный выходной гасящий дроссель, необходимый для увеличения устойчивости схемы при работе на емкостную нагрузку.

7.7.1. Полное выходное комплексное сопротивление усилителя

Как принято обычно считать, основное влияние, которое оказывает выходное полное комплексное сопротивление, заключается в его влиянии на коэффициент ослабления (затухания). Это не так, как уже было разъяснено в главе 1. Вопреки общепринятой неуместности демонстрации этого вопроса, автор книги все же намерен остановиться на коэффициенте ослабления именно в этой части книги, чтобы продемонстрировать, как ослабляется действие несомненно впечатляющего фактора по мере того, как в работу включаются все большее количество элементов акустической системы громкоговорителей и подводных кабелей.

На рис. 7.6 приведена упрощенная схема усилителя с цепью Зобеля (Zobel), последовательно включенным выходным дросселем, а также упрощенной моделью, представляющей соединительные кабели и громкоговоритель нагрузки. Выходное полное комплексное сопротивление усилителя, выполненного на полупроводниковых интегральных микросхемах, имеет очень маленькое значение, даже в случаях использования умеренной по величине общей отрицательной ОС. Автор книги

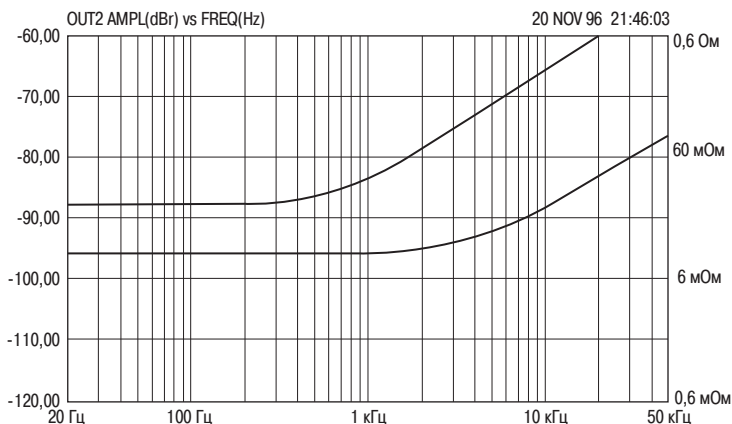


Рис. 7.7. Частотная зависимость выходного полного комплексного сопротивления «безупречного усилителя» с подключенным и отключенным выходным дросселем, имеющим индуктивность 6 мкГн. Добавление дросселя (верхняя зависимость) увеличивает как величину выходного комплексного сопротивления на плоском НЧ участке (за счет последовательно включаемого сопротивления), так и возрастающее полное комплексное сопротивление на ВЧ участке характеристики

произвел измерения «безупречного усилителя» класса В, сходного с приведенным на рис. 7.5, у которого стандартное значение коэффициента усиления отрицательной ОС составляло 29 дБ на частоте 20 кГц и возросло со скоростью 6 дБ/октаву с уменьшением частоты. На рис. 7.7 приводится частотная зависимость выходного полного комплексного сопротивления для точки измерения А перед выходным дросселем. Измерения производились при подаче сигнала 10 мА через сопротивление 600 Ом.

Выходное полное комплексное сопротивление на низкой частоте составляет примерно 9 мОм (на нагрузке 8 Ом коэффициент ослабления составляет 890). Если рассматривать это в перспективе, то один метр толстого кабеля, предназначенного для подключения оборудования типа 32/02 (32 жилы диаметром 0,2 мм) имеет сопротивление 16,9 мОм. Собственное сопротивление соединительных кабелей в усилителе может равняться или даже превосходить на низких частотах выходное полное комплексное сопротивление усилителя.

Скорость увеличения выходного полного комплексного сопротивления составляет 6 дБ/октаву для частот, превышающих 3 кГц, по мере снижения коэффициента усиления общей отрицательной ОС, достигая значения 36 мОм на частоте 20 кГц. Сопряженная частота 3 кГц не совпадает с частотой доминантного полюса усилителя, которая значительно ниже и находится около значения 10 Гц.

Выходное полное комплексное сопротивление замкнутой цепи (ОС) для любого усилителя определяется значением полного комплексного сопротивления разомкнутой цепи и коэффициентом усиления отрицательной обратной связи.

Полное комплексное выходное сопротивление не является просто полным комплексным выходным сопротивлением одного лишь выходного каскада, так как последний возбуждается каскадом усиления напряжения, то поэтому в точке А, изображенной на рис. 7.6, необходимо учитывать значительное по величине и зависимое от частоты собственное сопротивление источника тока. Когда стандартные каскады эмиттерного повторителя и дополняющей парной обратной связи, СФР, возбуждаются от источника с нулевым комплексным сопротивлением, то в обоих случаях можно грубо оценить значение полного комплексного выходного сопротивления как находящееся в пределах 150–180 мОм. Это при условии, что сопротивления эмиттерных резисторов R_e составляют 0,1 Ом. Увеличение сопротивления R_e до 0,22 Ом увеличивает значение полного комплексного выходного сопротивления до величины 230 – 280 мОм, доказывая, что эти резисторы на практике составляют основную часть полного комплексного выходного сопротивления. Выходные устройства и предоконечный каскада оказывают при этом небольшое влияние.

Если среднее значение полного комплексного выходного сопротивления при разомкнутой цепи (ОС) составляет 200 мОм, а коэффициент усиления отрицательной ОС на частоте 20 кГц составляет 29 дБ, или увеличивается в 28 раз, то можно было бы ожидать, что полное комплексное выходное сопротивление при замкнутой цепи будет составлять приблизительно величину, равную частному от деления 200:28, т.е. 7 мОм. Так как в действительности это значение составляет примерно 33 мОм на данной частоте, то становится очевидным, что дело обстоит несколько сложнее, чем дает простой и приближенный анализ. В реальном усилителе выходной каскад не питается от источника с нулевым сопротивлением, а совсем наоборот, питается от источника с высоким сопротивлением, которое снижается пропорционально частоте. Для рассматриваемого автором «безупречного усилителя» класса В оно снижается от 3 кОм на частоте 1 кГц до примерно 220 Ом на частоте 20 кГц. Полное комплексное сопротивление источника величиной 220 Ом обеспечивает полное комплексное выходное сопротивление при разомкнутой цепи (ОС) порядка 1 Ом, которое при уменьшении на коэффициент, равный 28 при действии общей обратной связи, дает значение 35 мОм. Это значение достаточно хорошо совпадает с величиной, измеряемой на частоте 20 кГц в точке В, показанной на схеме рис. 7.6.

Все эти измеряемые значения полного комплексного выходного сопротивления при замкнутой цепи являются очень низкими по сравнению с другими полными комплексными сопротивлениями в системе усилитель - соединительные кабели - громкоговоритель. И, как будет показано, в большинстве случаев ими можно будет пренебречь.

В схеме «безупречного усилителя», приведенного в разделе 6.6 книги, имеется выходной дроссель, имеющий индуктивность примерно 6 мкГн. Его задача заключается в том, чтобы абсолютно гарантировать устойчивость при всех возможных

емкостных нагрузках, поэтому индуктивность (самоиндукция) находится в самом верху допустимого диапазона. Это значение ограничено ВЧ срезом при работе на нагрузку с самым низким возбуждаемым сопротивлением. Этот реально существующий элемент, состоящий из 20 витков медного провода с диаметром 1,5 мм, намотанных на каркасе диаметром 25,4 мм, имеет сопротивление по постоянному току, равное 19 мОм. Это небольшое дополнительное сопротивление поднимает плоский участок на зависимости полного комплексного сопротивления до значения 24 мОм и на практике определяет НЧ полное комплексное выходное сопротивление, которое измеряется на выводах усилителя (точка С на схеме). Оно также резко уменьшает «воображаемый» коэффициент ослабления со значения 890 до 330.

В действительности индуктивность катушки выталкивает еще выше возрастающую часть на зависимости полного комплексного сопротивления. Полное выходное комплексное сопротивление начинает возрастать в этих условиях с частоты 700 Гц с постоянным значением 6 дБ/октаву, достигая значения 0,6 Ом на частоте 20 кГц (см. рис. 7.7).

7.7.2. Обеспечение минимального значения полного комплексного входного сопротивления усилителя

Данный продукт плохо продуман, но не по той причине, что в нем оптимизированы динамические параметры громкоговорителя, (хотя, по правде говоря, этого и не сделано вовсе), а по той причине, что в нем сведены к минимуму изменения частотной характеристики, вызванные изменениями сопротивления катушки громкоговорителя. Без сомнений, образчик такого должен быть непременно рассмотрен.

Из рассмотрения рис. 7.7 совершенно очевидно следует, что полное комплексное выходное сопротивление исходного усилителя, скорее всего, будет меньше, чем сопротивление дросселя, в силу чего последний должен быть рассмотрен в первую очередь. Необходимо определить минимальное значение полного комплексного выходного сопротивления из условий устойчивости при емкостной нагрузке, потому что меньшее по величине значение индуктивности означает меньшее количество витков провода и меньшее по величине сопротивление. Некоторые подходы к решению данной проблемы рассмотрены в следующем разделе. Следует, однако, отметить, что индуктивность обычной однослойной катушки зависит от количества витков во второй степени, поэтому уменьшение индуктивности вдвое уменьшает количество витков, а следовательно, и последовательно включенного сопротивления, только на величину, равную значению корня квадратного из двух. Провод же, из которого наматывается катушка дросселя, должен иметь максимальное возможное сечение, определяемое компромиссом между ценой и качеством.

Также желательно свести к минимуму сопротивление внутренних проводов усилителя, а также уделить особое внимание любым источникам дополнительного сопротивления, вносимого выходными шинами, штекерами для подключения акустической системы и т.д. Когда негативное влияние этих факторов будет уменьшено настолько, насколько позволяют стоимость и опыт, то, скорее всего, полное комплексное сопротивление реального усилителя будет составлять самую меньшую часть из общей величины.

7.7.3. Цепь Зобеля

Все усилители мощности, за исключением, пожалуй, самых элементарных, для повышения устойчивости имеют в своей схеме цепь Зобеля. Эта самая простая, но, пожалуй, и самая таинственная цепь, включает в себя последовательно включенные резистор и конденсатор между выходной шиной и землей. Она всегда подключается со стороны внутренней (т.е. до дросселя) точки выходного дросселя, хотя в ряде схем имеется вторая схема Зобеля после выходного дросселя; все попытки понять смысл последнего нововведения не проливают на данный вопрос ни капли света. Сопротивление резистора почти приближается к величине полного комплексного сопротивления нагрузки и обычно составляет от 4,7 до 10 Ом. Емкость конденсатора почти всегда равняется 100 нФ, поэтому такое постоянство в этих значениях в свете существующего на практике огромного разнообразия схем усилителей мощности позволяет предположить, что эти величины не являются такими уж и критическими. Действительно, ряд исследований позволяют предположить, что действительная причина заключается в том, что такие традиционно используемые величины элементов цепи действительно очень близки к требуемым.

Работа цепи Зобеля (иногда также называемой ячейкой Боучера) обсуждается нечасто, при этом обычно говорится, что она необходима для защиты от слишком большой индуктивной составляющей в реактивном сопротивлении, присутствующей на выходе усилителя, из-за вклада от звуковой катушки громкоговорителя. При этом подразумевается, что это может привести к увеличению ВЧ неустойчивости. Достаточно просто увидеть на чисто интуитивном уровне, как емкостная нагрузка усилителя с определенным значением выходного сопротивления может привести к ВЧ неустойчивости, внося дополнительный сдвиг по фазе в контур общей отрицательной ОС, однако, гораздо менее очевидно, почему индуктивная нагрузка приводит к возникновению самой проблемы; если емкостная нагрузка уменьшает границы стабильности, то представляется вполне разумным предположить, что индуктивная нагрузка данные границы будет расширять.

Исходя из вышеизложенного, автор книги посчитал необходимым выполнить ряд экспериментов, в которых он удалил стандартную цепь Зобеля, состоящую из резистора с сопротивлением 10 Ом и конденсатора 0,1 мкФ, из «безупречного усилителя» класса В с дополняющей парной обратной связью, СРФ, на выходе и стандартным значением коэффициента усиления отрицательной ОС, равным 32 дБ на частоте 20 кГц. При величине резистивной нагрузки 8 Ом суммарный коэффициент нелинейных искажений и устойчивость усилителя не изменились. Однако, когда последовательно был включен дроссель с индуктивностью 0,47 мкГн, чтобы смоделировать в первом приближении моноблочный громкоговоритель, были получены доказательства неустойчивости выходного каскада в области очень высоких частот, но совершенно определенно не возникало неустойчивости Найквиста в цепи общей отрицательной ОС.

Также автор книги попытался уменьшить нагрузку, оказываемую на выход цепью Зобеля. Однако увеличение последовательно включаемого сопротивления до 22 Ом предоставило некоторые доказательства возникновения проблем с устойчивостью, и поэтому автор был вынужден прийти к неутешительному выводу, что

стандартные значения цепи лежат очень близко к истинному значению. Действительно, при использовании стандартной цепи Зобеля, состоящей из резистора с сопротивлением 10 Ом и конденсатора с емкостью 0,1 мкФ, дополнительная нагрузка, подключаемая к усилителю, на ВЧ не является большой; для выходного напряжения 1 В на частоте 10 кГц цепь Зобеля потребляет 6,3 мА, его величина возрастает до 12,4 мА на частоте 20 кГц (вполне неплохо, если сравнивать с током 125 мА во всем частотном диапазоне для резистора с сопротивлением 8 Ом). Эти токи могут быть просто увеличены до реального выходного уровня, что позволит определить номинальное значение мощности для резистора цепи Зобеля. Таким образом, усилитель, имеющий на выходе напряжение 20 В среднеквадратического значения, должен быть способен пропускать ток величиной 248 мА среднеквадратического значения на частоте 20 кГц и рассеивать мощность 0,62 Вт. Поэтому может быть выбран элемент с мощностью рассеяния 1 Вт.

На практике максимальное воздействие на резистор цепи Зобеля оказывается во время ВЧ неустойчивости, так как возбуждение усилителя чаще всего наблюдается в диапазоне частот 50–500 кГц. Поэтому выбор резистора должен производиться так, чтобы противостоять этому хотя бы в течение непродолжительного времени, пока остальные меры не станут ощутимо действенными. Поэтому выбор резистора, рассчитанного на номинальное значение мощности от 3 до 5 Вт, является самым обычным.

Чтобы завершить данный раздел, следует отметить, что практически нет никаких сомнений, что цепь Зобеля необходимо использовать при любой нагрузке, которая хотя бы наполовину имеет индуктивный характер. Резистор может быть стандартным проволочным, рассчитанным на мощность рассеяния 5 Вт или более, это предотвратит его выгорание при возникновении ВЧ неустойчивости усилителя. Проволочный резистор может снизить эффективность работы цепи Зобеля на очень высоких частотах, однако, на практике его использование более чем удовлетворительно, цепь Зобеля продолжает эффективно оказывать стабилизирующее воздействие при работе с индуктивной нагрузкой.

7.7.4. Выходной дроссель

Только для самых простых моделей усилителей мощности считается обычным делом непосредственное подключение выходного каскада к внешней нагрузке. Такое непосредственное подключение возможно осуществлять, как правило, для усилителей, у которых небольшой коэффициент усиления ОС и у которого достаточно большие границы устойчивости Найквиста, определяемые реактивной нагрузкой.

Многие годы разработчики схем относились с большой настороженностью к ситуации, когда к их усилителям подключалась емкостная по характеру нагрузка; характерно смятение, которое исходит к моменту самого первого примера использования на практике электростатического громкоговорителя фирмы Квуд Акустик (Quad Acoustic), которое весьма непродуманно было смоделировано простым параллельным включением конденсатора емкостью 2 мкФ с тестовой и обычной резистивной нагрузкой, имеющей величину 8 Ом. На самом же деле,

действительное полное комплексное сопротивление нагрузки, представляемой электростатическим громкоговорителем, имеет гораздо более сложный характер, чем предложенный вариант, в основном из-за повышающего трансформатора, необходимого для того, чтобы развить необходимое напряжение возбуждения, при этом использование лишь только одного конденсатора с емкостью 2 мкФ может вызывать неустойчивость усилителя, если не будут предприняты специальные защитные меры.

Когда параллельно резистивной нагрузке подключается описанным способом конденсатор и при этом не используется согласующий выходной дроссель, то, как обычно было получено на практике, величина емкости конденсатора, вызывающего максимальный дестабилизирующий эффект, находится гораздо ближе к значению 100 нФ, а вовсе не 2 мкФ.

Наиболее эффективной защитной мерой против такой формы неустойчивости является использование небольшого дросселя с воздушным сердечником, подключаемого последовательно с выходом усилителя. Такой способ изолирует усилитель от параллельно подключенной емкости, не вызывая при этом значительных потерь в акустическом частотном диапазоне. Величина индуктивности обычно лежит в пределах 1–7 мкГн, верхний предел определяется необходимостью избежать значительного спада характеристики на высокой частоте при использовании нагрузки с сопротивлением 4 Ом. При рассмотрении варианта нагрузок величиной 2 Ом верхнее предельное значение должно быть уменьшено, как минимум, вдвое.

Обычным методом считается тестирование переходных характеристик усилителя с использованием сигнала прямоугольной формы и выходной нагрузки, имеющей параллельно включенные элементы с сопротивлением 8 Ом и емкостью 2 мкФ, которая необходима для моделирования условий применения электростатического громкоговорителя, при этом такие условия рассматриваются в качестве самых требовательных. Однако на выходе усилителя присутствует дроссель, и при наличии значительной емкостной составляющей в нагрузке они вместе образуют резонансный контур, определяя наличие пика на частотной характеристике в высокочастотной области, а также перегрузку (максимальный по амплитуде выброс неустановившегося переходного процесса) и затухающий переходной процесс («звон») на крутых фронтах импульсов.

Таким образом, подобные тесты на самом деле вовсе не дают истинной картины при исследовании частотной характеристики усилителя. Что касается затухающих переходных колебаний («звона»), которые практически всегда наблюдаются при проведении испытаний с подобной емкостной нагрузкой, их появление связано с возникновением резонанса между выходной индуктивностью и используемым при тестировании конденсатором и не имеет ничего общего со стабильностью усилителя. Затухающие колебания обычно наблюдается на частотах около 40 кГц или около того, что является слишком медленным процессом, чтобы порицать из-за них любой усилитель с нормально выполненной коррекцией. Наличие затухающих переходных колебаний в частотной характеристике определяется выходными цепями, даже в том случае, если характеристики самого усилителя идеальны.