

Этот материал любезно предоставил друг из Сербии (Белград) Вилсон за что я ему очень благодарен.

Машинный перевод выполнен Петровым А.А.

Analog Audio Power Amplifier Design The Method of DePalma

Проектирование аналоговых усилителей мощности звука Метод Де Пальмы

"Art which does not have the appearance of art is true art."

Old Roman saying

«Искусство, которое не имеет видимости искусства, — это истинное искусство».

Старая римская поговорка

1) Introduction

This author's experience with analog audio circuit design extends over a period of 50 years -- the era of the vacuum tube, long playing records, FM radio, tape recording, and transistors. It also includes the digital era where computers became involved with audio. Since the subject of this paper is analog audio, digital audio signal processing is not discussed.

1) Введение

Опыт автора в проектировании аналоговых аудиосхем насчитывает более 50 лет — эпоху вакуумных ламп, долгоиграющих пластинок, FM-радио, магнитофонной записи и транзисторов. Он также включает цифровую эру, когда компьютеры стали использоваться в аудио. Поскольку предметом данной работы является аналоговое аудио, цифровая обработка аудиосигналов здесь не рассматривается.

2) Historical Background

In his youth, the author was fortunate in growing up and being educated in a geographical region, east coast U.S.A., Philadelphia, New York, Boston, M.I.T. - Harvard; during a time extending from the 1940's to the late 70's. In 1954, I met David Hafler and Irving Fried, who lived near my family home in Philadelphia. Through their association and friendship I met a number of the east coast audio figures of the time. At that time David Hafler and Herb Keros were manufacturing ACROSOUND transformers for the Williamson amplifier. Later on, Hafler went on to form Dyna Company, manufacturing audio output transformers, amplifier and pre-amplifier kits, Dynakits.

2) Исторический контекст

В юности автору посчастливилось расти и получать образование в географическом регионе восточного побережья США: Филадельфия, Нью-Йорк, Бостон, Массачусетский технологический институт — Гарвард; в период с 1940-х до конца 1970-х годов. В 1954 году я познакомился с Дэвидом Хафлером и Ирвингом Фридом, которые жили недалеко от моего дома в Филадельфии. Благодаря их знакомству и дружбе я встретил многих деятелей аудиоиндустрии восточного побережья того времени. В то время Дэвид Хафлер и Герб Керос производили трансформаторы ACROSOUND для усилителей Williamson. Позже Хафлер основал компанию Дюна, занимавшуюся производством выходных аудио трансформаторов, комплектов для усилителей и предусилителей, Dynakits.

As Chief Engineer in the early vacuum tube days with Dynaco, I met and spoke with other audio designers, i.e. Stuart Hegeman, Ben Drisko, Frank McIntosh, and Henry Kloss. Out of these meetings a philosophy of design was emerging which encompassed the whole audio reproduction process. As time went on I became acquainted with Emory Cook, Rudy Bozak, Paul Weathers, Edgar Vilchur, Arthur Janszen, and Donald Chave (LOWTHER, U.K.).

В начале своей карьеры в Дюнасо, работая главным инженером в ламповой индустрии, я встречался и общался с другими аудиодизайнерами, такими как Стюарт

Хегеман, Бен Дриско, Фрэнк Макинтош и Генри Клосс. В результате этих встреч сформировалась философия проектирования, охватывающая весь процесс воспроизведения звука. Со временем я познакомился с Эмори Куком, Руди Бозаком, Полом Уэзерсом, Эдгаром Вильчуром, Артуром Янзеном и Дональдом Чейвом (LOWTHER, Великобритания).

Although my primary interest developed in the basic physical sciences, my interest in music and sound reproduction has persisted to this day. Over a period of decades, experience and introspection have resulted in the evolution of certain precepts which comprise the Method of DePalma in analog audio circuit design. The philosophy and working out of these ideas are exemplified in the three power amplifier designs presented here.

Хотя мой основной интерес сформировался в области фундаментальных физических наук, интерес к музыке и воспроизведению звука сохранился до наших дней. За десятилетия опыта и самоанализа у меня сформировались определенные принципы, составляющие метод Де Пальмы в проектировании аналоговых аудиосхем. Философия и реализация этих идей наглядно представлены в трех разработанных здесь схемах усилителей мощности.

3) Philosophy

Analog circuit design I would characterise as an Art. Digital circuit design I would characterise as a geometry. Art is said to be in the eye of the beholder, consequently it is not altogether a logic process which governs the choice of a circuit topology. The object of our desire is a pleasing and satisfying musical experience comparable on some basis with the original performance. Over the history of evolution of the artificial -- and now electro-mechanical reproduction of sound, certain notions more commonly associated with the music being reproduced injected themselves into the specification of electrical parameters.

3) Философия

*Проектирование аналоговых схем я бы охарактеризовал как искусство. Проектирование цифровых схем я бы охарактеризовал как геометрию. Говорят, что искусство — в глазах смотрящего, следовательно, выбор топологии схемы не является исключительно логическим процессом. **Цель нашего желания — получить приятный и удовлетворительный музыкальный опыт, сравнимый в некоторой степени с оригинальным исполнением.** На протяжении истории эволюции искусственного — а теперь и электромеханического — воспроизведения звука, некоторые понятия, чаще ассоциируемые с воспроизводимой музыкой, проникли в спецификацию электрических параметров.*

The ideas of stability, linearity, harmony, balance, and power express themselves in electronic circuitry. Imagery developed; it could be conceived the analog audio power amplifier expressed itself out of the properties of the reproduced music. Out of the amplifier configurations and possibilities assembleable through the known (fixed) laws of electricity and the properties of the known active amplifier devices, of these which are the musically acceptable topologies?

Идеи стабильности, линейности, гармонии, баланса и мощности находят своё выражение в электронных схемах. Развился образ; можно представить, что аналоговый усилитель мощности звука выражает себя через свойства воспроизводимой музыки. Из конфигураций и возможностей усилителей, которые можно собрать, руководствуясь известными (фиксированными) законами электричества и свойствами известных активных усилительных устройств, какие из них являются музыкально приемлемыми топологиями?

It is postulated here that the musically acceptable topologies must necessarily satisfy all the electrical laws as well as the musical ones. Conformity with musical laws converts an experiment in electromechanically induced transduction into a musical experience.

Здесь постулируется, что музыкально приемлемые топологии обязательно

должны удовлетворять всем электрическим законам, а также музыкальным. Соответствие музыкальным законам превращает эксперимент по электромеханически индуцированному преобразованию в музыкальный опыт.

4) Tubes and Transistors

Amplifiers designed using active devices, i.e. tubes and transistors, are similar in conception to modern multi-element high-speed photographic lenses. In lens design, materials with definitely non-linear properties, chromatic and spherical aberrations, are balanced off against each other to result in a magnification (gain) without chromatic aberration (flat frequency response). High signal to noise and reduced intermodulation, (modern low reflection lens coatings). The exceptional quality of modern optics speaks to the achievement of this balancing. In fact the resolution of a modern (diffraction limited) lens is regulated by the properties of the light passing through it. This principle carries over into electronics where gain and linearity can be achieved by balancing the inherent curvatures of active devices. A push-pull class A transformer coupled circuit demonstrates this. There is probably no inherent musical superiority of tubes vs transistors. All known gain - transconductance devices have separate and individual characteristics. The design problem is to interface the active elements with the circuit topology in the most harmonious manner.

4) Лампы и транзисторы

Усилители, разработанные с использованием активных устройств, т. е. ламп и транзисторов, по своей концепции схожи с современными многоэлементными высокоскоростными фотообъективами. В конструкции линз материалы с явно нелинейными свойствами, хроматической и сферической аберрациями, уравниваются друг с другом, что приводит к увеличению (усилению) без хроматической аберрации (плоская частотная характеристика). Высокое отношение сигнал/шум и уменьшенная интермодуляция (современные низкоотражающие покрытия линз). Исключительное качество современной оптики свидетельствует о достижении этого баланса. Фактически, разрешение современной (дифракционно-ограниченной) линзы регулируется свойствами света, проходящего через нее. Этот принцип переносится в электронику, где усиление и линейность могут быть достигнуты путем уравнивания присущей активным устройствам кривизны. Это демонстрирует двухтактная схема класса А с трансформаторной связью. Вероятно, нет никакого присущего лампам музыкального превосходства над транзисторами. Все известные устройства с усилением и крутизной характеристики имеют отдельные и индивидуальные параметры. Задача проектирования состоит в том, чтобы наиболее гармонично соединить активные элементы с топологией схемы.

Ninety years of development of vacuum tube circuitry during the analog era have probably resulted in better Hi-Fi than 50 years of transistor circuitry developed during a time when analog techniques are on the decline and digital technology is on the ascendency.

Девяносто лет развития ламповой схемотехники в аналоговую эпоху, вероятно, привели к созданию более качественного Hi-Fi, чем 50 лет разработки транзисторных схем в период, когда аналоговые технологии приходят в упадок, а цифровые — набирают популярность.

5) The First Circuit

The first circuit is the oldest, making use of a.c. coupling, vacuum tube active elements, transformer coupled push-pull Ultralinear output. Having stewed in the ferment of 50's golden age audio, it is a combination of tried and true with a distillation of the ideas of D.T.N. Williamson and Norman Crowhurst.

5) Первая схема

Первая схема — самая старая, в ней используется связь по переменному току, активные элементы на вакуумных лампах и двухтактный выход с трансформаторной связью. Созданная в духе золотой эры аудио 50-х годов, она представляет собой сочетание проверенных временем решений и квинтэссенцию идей Д.Т.Н. Уильямсона и Нормана Кроухерста.

The driver circuitry is the input pentode direct coupled to a triode split load phase inverter. The pentode section, (6AN8), operates at a low plate voltage making for satisfactory direct coupling to the phase inverter grid. Low frequency gain and phase shift is controlled by the size of the screen bypass capacitor.

Схема управления представляет собой входной пентод, напрямую связанный с фазоинвертором с триодной разделенной нагрузкой. Пентодная секция (6AN8) работает при низком анодном напряжении, что обеспечивает удовлетворительную прямую связь с сетью фазоинвертора. Усиление на низких частотах и фазовый сдвиг регулируются размером шунтирующего конденсатора экрана.

It is well known that even though signal current is common to both the cathode and plate load resistor of the split load phase inverter, because of the differing incremental impedances at the cathode and plate the circuit can become unbalanced at high audio frequencies. A circuit has been devised, figure (1), to provide low impedance drive to the output tubes as well as correct the high-frequency unbalance of the phase inverter. In this circuit the voltage output is controlled through the upper (cathode follower) grids and the current in the load by the drive to the lower tubes' grids.

Хорошо известно, что, несмотря на то, что сигнальный ток является общим для катодного и анодного резисторов нагрузки фазоинвертора с отдельной нагрузкой, из-за различий в инкрементальных импедансах на катоде и аноде схема может стать несбалансированной на высоких звуковых частотах. Была разработана схема (рис. 1), обеспечивающая низкоимпедансное питание выходных ламп, а также корректирующая высокочастотный дисбаланс фазоинвертора. В этой схеме выходное напряжение регулируется через верхние (катодные повторители) сетки, а ток в нагрузке — через питание сеток нижних ламп.

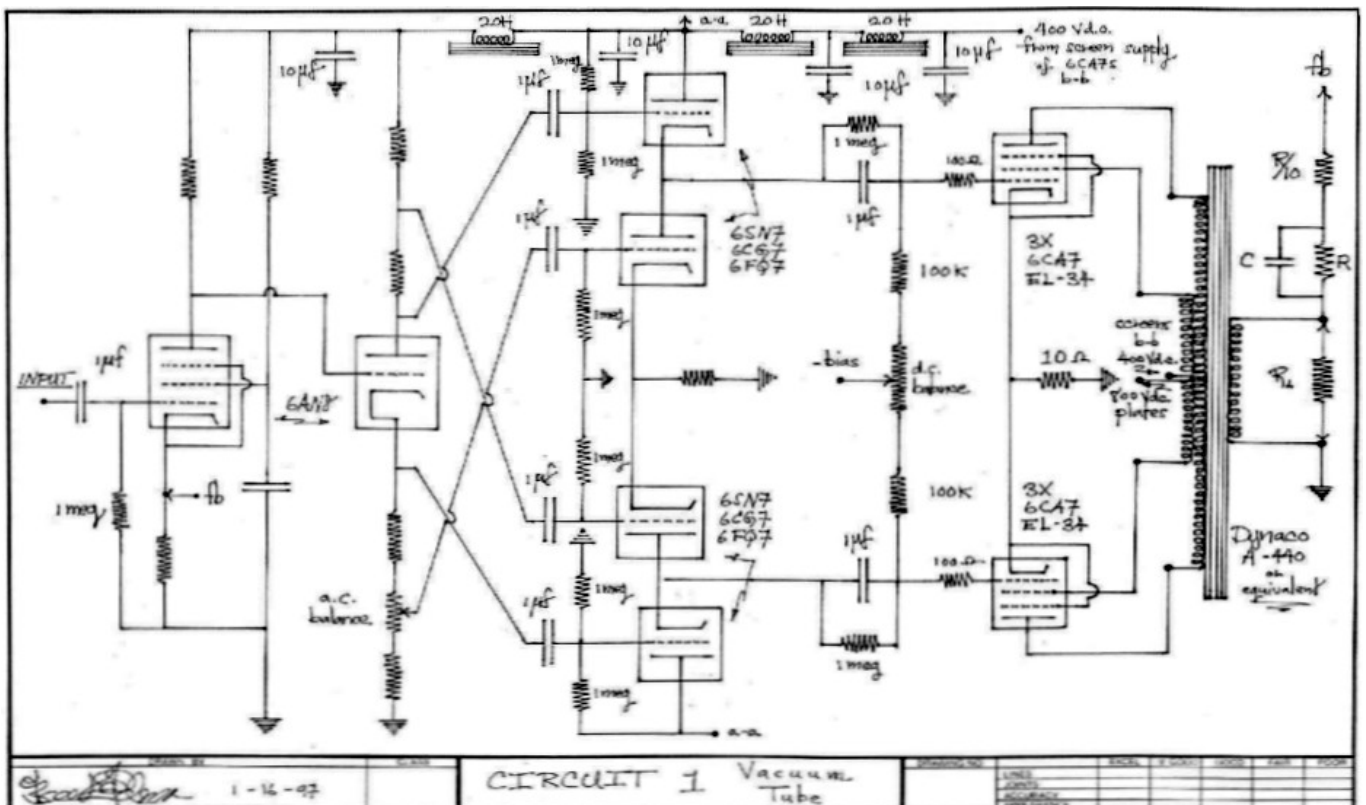


Fig. 1

With the combination as shown using a 6AN8 inverter driver and two 6SN7s, 6CG7s, or 6FQ7s, the frequency response is identical for both sides, minus 3db @ 35kc.

При использовании показанной комбинации с инверторным драйвером 6AN8 и двумя лампами 6SN7, 6CG7 или 6FQ7 частотная характеристика идентична для обеих

сторон, за исключением разницы в 3 дБ на частоте 35 кГц.

Driver output impedance is 600 ohms. The fraction of the plate or cathode load resistor of the inverter stage tapped off to drive the lower tubes' grids is determined by experiment. The drive to one of the lower tube's grids is adjusted for a.c. balance or lowest distortion.

Выходное сопротивление драйвера составляет 600 Ом. Доля резистора анодной или катодной нагрузки инверторного каскада, отводимая для управления сетками нижних ламп, определяется экспериментально. Напряжение на сетке одной из нижних ламп регулируется для достижения баланса переменного тока или минимальных искажений.

Coupling to the output tubes' grids is via a "step network" which gives zero phase shift at d.c. This is important for stability. Output is push-pull Ultralinear with a tertiary winding for differing plate and screen voltages. Negative fixed grid bias voltage is supplied to the output tubes by a separate d.c. power supply.

Связь с сетками выходных ламп осуществляется через «ступенчатую схему», которая обеспечивает нулевой фазовый сдвиг на постоянном токе. Это важно для стабильности. Выходной сигнал представляет собой двухтактную ультралинейную схему с третичной обмоткой для различных напряжений на аноде и сетке. Отрицательное фиксированное напряжение смещения сетки подается на выходные лампы от отдельного источника постоянного тока.

The output cathodes are tied to ground through a 10 ohm wire-wound common cathode resistor. The size of this resistor regulates output stage distortion at high levels. Distortion at high levels is reduced at the expense of a small increase in low level I.M. The 10 ohm value represents a compromise.

Выходные катоды соединены с землей через проволочный резистор с общим катодом сопротивлением 10 Ом. Величина этого резистора регулирует искажения выходного каскада на высоких уровнях. Искажения на высоких уровнях уменьшаются за счет небольшого увеличения интермодуляционных искажений на низких уровнях. Значение 10 Ом представляет собой компромисс.

It is essential for Hi-Fi use that the voltages applied to the circuit build up gradually. Voltage surges can cause flashovers in the output tubes which could damage delicate loudspeakers.

Для использования в Hi-Fi-системах крайне важно, чтобы напряжение, подаваемое на схему, нарастало постепенно. Скачки напряжения могут вызвать пробой в выходных лампах, что может повредить чувствительные акустические системы.

The Power Supply

The all vacuum tube first circuit requires a rather elaborate power supply. At full output, 250-300 watts, it must be able to maintain the output tube plates at 800 volts and the screens at 400 v.d.c. The low level stages and the driver circuit are isolated via L-C filtering from the output tube plate circuit.

Источник питания

Первая схема, полностью состоящая из вакуумных ламп, требует довольно сложного источника питания. При полной выходной мощности 250-300 Вт он должен обеспечивать напряжение на анодах выходных ламп на уровне 800 Вольт и на сетках — 400 Вольт постоянного тока. Низкоуровневые каскады и схема драйвера изолированы от цепи анода выходной лампы с помощью L-C фильтра.

With single ended stages in the input driving a class AB output stage unwanted feedback through the power supply sicklies over the audio image.

При использовании одноктактных каскадов на входе, управляющих выходным каскадом класса АВ, нежелательная обратная связь через блок питания приводит к ухудшению качества звукового изображения.

It goes without saying that d.c. delivered to all amplifier stages must be pure d.c. without ripple. Under certain conditions the effects of power supply ripple under load may be ameliorated by complementary (transistor) circuitry. On the other hand there is no substitute for pure d.c.

Само собой разумеется, что постоянный ток, подаваемый на все каскады усилителя, должен быть чистым постоянным током без пульсаций. При определенных условиях влияние пульсаций напряжения питания под нагрузкой может быть смягчено с помощью комплементарной (транзисторной) схемы. С другой стороны, заменить чистый постоянный ток невозможно.

For circuit one the power transformer provides 800 v.a.c. center tapped to a full wave bridge rectifier composed of four 6AU4 damper diodes. Under light load, quiescent conditions for the amplifier, this circuit gives one-thousand volts for the plates of the output EL34s. The transformer center tap gives 1/2 voltage, i.e. 500 volts d.c. for the screens.

В первой схеме силовой трансформатор обеспечивает напряжение 800 В переменного тока с центральным отводом, подаваемое на полноволновой мостовой выпрямитель, состоящий из четырех демпфирующих диодов 6AU4. При малой нагрузке и в режиме покоя усилителя эта схема выдает тысячу Вольт на аноды выходных ламп EL34. Центральный отвод трансформатора обеспечивает половину напряжения, т.е. 500 Вольт постоянного тока, на экраны.

Individual filtering of the plate and screen busses is by two stages each of pi section 15 henry chokes with 10 microfarad paper filtering capacitors, except for the input capacitor which is 5 microfarads. The 500 volt buss is further filtered by two more pi sections using 20 henry chokes and 10 microfarad paper capacitors. This line feeds the driver section of the circuit. The B+ for the input 6AN8 triode-pentode is further isolated with another pi section using a 20 henry choke and a 10 microfarad filter capacitor.

Индивидуальная фильтрация анодной и экранной шин осуществляется двумя каскадами, каждый из которых состоит из 15-генри дросселей и 10 микрофарадных бумажных фильтрующих конденсаторов, за исключением входного конденсатора, емкость которого составляет 5 микрофарад. Шина 500 Вольт дополнительно фильтруется двумя другими 15-генри дросселями и 10 микрофарадными бумажными конденсаторами. Эта линия питает управляющую секцию схемы. Напряжение B+ для входного триода-пентода 6AN8 дополнительно изолируется еще одним 15-генри дросселем и 10-микрофарадным фильтрующим конденсатором.

Output tube negative grid bias is supplied from a separate half wave silicon diode rectifier working into a single pi section filter using a 20 henry choke and 100 microfarad low-voltage electrolytics.

Отрицательное смещение сетки выходной лампы обеспечивается отдельным полуволновым кремниевым диодным выпрямителем, работающим в одноканальном П-образном фильтре, использующем дроссель на 20 генри и низковольтные электролитические конденсаторы на 100 микрофарад.

The 6AU4 damper diodes have good enough heater cathode insulation so that they may be operated from a common 6.3 v.a.c. winding. The slow warm-up of the heavy duty filaments applies the high voltage to the circuit with a smoothly rising voltage build-up. A separate 6.3 v.a.c. winding supplies the filaments of the power amp.

Демпфирующие диоды 6AU4 имеют достаточно хорошую изоляцию катода и нагревателя, что позволяет использовать их от общей обмотки 6,3 В переменного тока. Медленный нагрев мощных нитей накала обеспечивает подачу высокого напряжения в схему с плавным нарастанием. Отдельная обмотка 6,3 В переменного тока питает нити накала усилителя мощности.

Use of high-voltage paper filter capacitors gives essentially unlimited lifespan as compared to electrolytics which are good for about 20 years when operated within ratings. Use of paper capacitors will ensure a constant, low power supply internal impedance over the audio range.

*Использование высоковольтных бумажных фильтрующих конденсаторов обеспечивает практически неограниченный срок службы по сравнению с электролитическими, которые при работе в пределах номинальных параметров служат около 20 лет. **Использование бумажных конденсаторов гарантирует постоянное низкое внутреннее сопротивление источника питания в звуковом диапазоне.***

The power supply should provide two functions. Firstly to supply steady d.c. to all stages, and secondly to isolate the stages in such a way that unwanted feedback loops are not set up between them. This is especially important with single ended low level stages. Because of complementarity, transistor stages can be balanced to eliminate common mode (power supply) fluctuations from the output. Tubes come in one sex only so that the balancing operation is much more difficult, leading to the use of differential circuitry which has its own complications.

Источник питания должен выполнять две функции. Во-первых, обеспечивать стабильное постоянное напряжение на всех каскадах, и во-вторых, изолировать каскады таким образом, чтобы между ними не возникали нежелательные петли обратной связи. Это особенно важно для однотактных каскадов низкого уровня. Благодаря комплементарности транзисторные каскады можно балансировать для устранения синфазных (питательных) колебаний на выходе. Лампы выпускаются только одного типа, поэтому операция балансировки значительно усложняется, что приводит к использованию дифференциальных схем, которые имеют свои собственные сложности.

It is hard to make general statements about power supplies for audio amplifiers. Even with perfect balance, intermodulation can result if a gain parameter is sensitive to current. The pentode-like characteristics of solid-state devices make them less sensitive to power supply voltage fluctuations than triode vacuum tubes.

Сложно делать общие заявления о блоках питания для аудиоусилителей. Даже при идеальной балансировке может возникать интермодуляция, если параметр усиления чувствителен к току. Пентодоподобные характеристики твердотельных устройств делают их менее чувствительными к колебаниям напряжения питания, чем триодные вакуумные лампы.

Suffice it to say that power supply configuration and topology is just as important as amplifier design. If there is complementarity in vacuum tube circuit design it is expressed in the relationship of the active circuit to its power supply. It is in this that the musical as well as the electrical laws are satisfied.

Достаточно сказать, что конфигурация и топология источника питания так же важны, как и конструкция усилителя. Если в проектировании ламповых схем и существует взаимодополняемость, то она выражается во взаимосвязи активной схемы с источником питания. Именно в этом и заключаются как музыкальные, так и электрические законы.

Negative Feedback

In the circuit described 20db of negative feedback is taken from the output transformer secondary 8 ohm tap to the cathode of the input pentode. The circuit is set up by adjustment of the feedback resistor bypass capacitor to produce a critically damped 20kc square wave into an 8 ohm non-inductive load. The feedback network is a step circuit to prevent excessive high-frequency feedback in a range where internal amplifier and transformer phase shifts could produce oscillation, especially with capacitor (electrostatic loudspeaker) loading.

Отрицательная обратная связь

В описанной схеме отрицательная обратная связь 20 дБ снимается со вторичной обмотки выходного трансформатора (8 Ом) и подается на катод входного пентода. Схема настраивается путем регулировки резистора обратной связи, шунтирующего конденсатор, для получения критически затухающего прямоугольного сигнала частотой 20 кГц на неиндуктивной нагрузке 8 Ом. Схема обратной связи представляет собой ступенчатую схему для предотвращения чрезмерной высокочастотной обратной связи в диапазоне, где внутренние фазовые сдвиги усилителя и трансформатора могут вызывать колебания, особенно при емкостной нагрузке (электростатический громкоговоритель).

With all other low-frequency time constants as indicated a low-frequency 2 c.p.s. d.c. function generator is used for the adjustment of the screen bypass of the input pentode. Perfect reproduction of the low-frequency square wave is what is desired. In this circuit with 20db of

overall negative feedback this capacitor should be adjusted to reproduce the 2 c.p.s. square wave at the output without slope or tilt. Too large a screen bypass capacitor will produce overshoot, indicating an undesirable peak in low-frequency response. These tests must be done at a low signal level into an 8 ohm load to avoid saturation of the core of the output transformer.

При всех остальных указанных низкочастотных постоянных времени для регулировки экранирующей обмотки входного пентода используется генератор функций постоянного тока с частотой 2 Гц. Желательно идеальное воспроизведение низкочастотной прямоугольной волны. В этой схеме с общей отрицательной обратной связью 20 дБ этот конденсатор следует отрегулировать таким образом, чтобы на выходе получалась прямоугольная волна с частотой 2 Гц без наклона или искажения. Слишком большой конденсатор экранирующей обмотки приведет к выбросу, указывающему на нежелательный пик в низкочастотной характеристике. Эти испытания необходимо проводить при низком уровне сигнала на нагрузке 8 Ом, чтобы избежать насыщения сердечника выходного трансформатора.

In some respects circuit one is derived from the earlier (1948) Williamson amplifier design. The Williamson amplifier could exhibit a constant low-frequency oscillation resulting in a "breathing" action of woofer cones moving in and out, triggered by wow or rumble in the reproduction of long-play vinyl discs.

В некоторых отношениях первая схема заимствована из более ранней (1948 г.) конструкции усилителя Уильямсона. Усилитель Уильямсона мог демонстрировать постоянные низкочастотные колебания, приводящие к «дыханию» диффузоров низкочастотных динамиков, которые перемещались вперед и назад, что вызывало детонацию или гул при воспроизведении долгоиграющих виниловых пластинок.

The Williamson amplifier was stabilised by the use of "step" network coupling of the driver plates to the output tube grids. This modification corrected the low-frequency phase response and was originated by Norman Crowhurst.

Стабилизация усилителя Уильямсона достигалась за счет использования ступенчатой связи между анодом драйвера и сетками выходных ламп. Эта модификация корректировала фазовую характеристику на низких частотах и была разработана Норманом Кроухерстом.

Circuit one incorporates step circuit coupling to the output tube grids as well as the low-frequency phase and gain adjustment afforded by variation of the screen bypass capacitor of the input pentode.

Первая схема включает в себя ступенчатую связь с сетками выходных ламп, а также регулировку фазы и усиления на низких частотах, обеспечиваемую изменением емкости шунтирующего конденсатора входного пентода.

In a vacuum tube amplifier there is essentially zero time delay between the signal grid drive and a current response at the plate. This not the case with transistors where the flow of charge carriers through solid semi-conductors is much slower than electrons moving through a vacuum.

В ламповом усилителе задержка между подачей сигнала на сетку и током на аноде практически равна нулю. В транзисторах же ситуация иная: поток носителей заряда через твердые полупроводники намного медленнее, чем движение электронов в вакууме.

The limitation in the use of negative feedback to reduce distortion occurs because of phase shifts in the circuit elements adding up to 180 degrees at subsonic and ultrasonic frequencies and thus turning negative feedback into positive feedback. This is especially true when an output transformer is one of the circuit elements. Experience has shown that 20db of feedback is optimum in a circuit where it takes 30 - 35db to make the circuit oscillate. Negative feedback is very useful in distortion reduction if not overdone.

Ограничение в использовании отрицательной обратной связи для уменьшения искажений возникает из-за фазовых сдвигов в элементах схемы, суммирующихся до 180 градусов на дозвуковых и ультразвуковых частотах, что превращает отрицательную обратную связь в положительную. Это особенно актуально, когда одним из элементов схемы является выходной трансформатор. Опыт показывает, что 20 дБ обратной связи является оптимальным значением в схеме, где для генерации колебаний

требуется 30-35 дБ. Отрицательная обратная связь очень полезна для уменьшения искажений, если её не переусердствовать.

DePalma likes to design his circuits so that there is only one voltage gain stage, i.e. the input pentode. The subsequent stages are unity gain cathode followers.

Де Пальма предпочитает проектировать свои схемы таким образом, чтобы в них был только один каскад усиления по напряжению, то есть входной пентод. Последующие каскады представляют собой катодные повторители с коэффициентом усиления, равным единице.

Discussion

Listening tests by this author have determined that different power output tube types have different sounds. Different brands of the same tube also sound different. The two generic tube types are the beam tetrode and the pentode exemplified by the KT-66 and the EL-34/6CA7. The KT-66 has a sweet, smooth sound, and the EL-34 a sound which has been characterised as dry. I do not prefer the sound of the 6L6, 6550 or KT-88. I think the EL-34 pentode originally manufactured by Philips and later by U.K. Mullard, and German Telefunken, is the best audio tube ever made. For what it's worth, I listen to a stereo system with one channel EL-34s and the other KT-66s.

Обсуждение

Проведенные автором тесты на прослушивание показали, что разные типы выходных ламп имеют разное звучание. Разные марки одной и той же лампы также звучат по-разному. Двумя основными типами ламп являются лучевой тетрод и пентод, примерами которых являются KT-66 и EL-34/6CA7. KT-66 обладает приятным, мягким звучанием, а EL-34 — сухим. Мне не нравится звучание 6L6, 6550 или KT-88. Я считаю, что пентод EL-34, первоначально производившийся Philips, а позже британской компанией Mullard и немецкой Telefunken, — лучшая аудиолампа из когда-либо созданных. К слову, я слушаю стереосистему, в одном канале которой используются EL-34, а в другом — KT-66.

Vacuum tubes have long reliable lifespans when operated within ratings, and especially at high voltages and low currents. The fastest way to shorten power tube life is to over-dissipate the tubes.

Вакуумные лампы обладают длительным и надежным сроком службы при работе в пределах номинальных параметров, особенно при высоких напряжениях и низких токах. Самый быстрый способ сократить срок службы силовых ламп — это чрезмерное рассеивание энергии.

There was a time in the history of audio power amplifier design when output tubes were run at excessively high currents to achieve low I.M. distortion. This led to short tube life necessitating replacement every six months or so of continuous listening to maintain specs.

В истории проектирования усилителей мощности был период, когда выходные лампы работали при чрезмерно высоких токах для достижения низкого уровня интермодуляционных искажений. Это приводило к сокращению срока службы ламп, что требовало их замены примерно каждые шесть месяцев непрерывного прослушивания для поддержания технических характеристик.

A trend developed of operating plates and screens at the same voltage. At the same time, amplifier manufacturers tried to maximise output power, necessary because of the extremely low acoustical efficiency of acoustic-suspension, AR, KLH, and electrostatic type loudspeakers. Operation of plates and screens at the same voltages, obtained from Ultralinear tapings on the audio output transformer primary, leads to a dangerously unstable situation as plates and screens are taken up to the 500 volt level. Excessive electron current can cause the screen wires to become incandescent, increasing tube current to destruction. The screens of EL-34s should be in the "shade" of the control grid wires. Later versions of EL-34s manufactured in the 80's and 90's may not be as carefully assembled as the original Philips construction.

Наметилась тенденция к работе акустических панелей и экранов при одном и том же напряжении. Одновременно производители усилителей стремились максимизировать выходную мощность, необходимую из-за крайне низкой акустической

эффективности акустических подвесных, AR, KLN и электростатических громкоговорителей. Работа акустических панелей и экранов при одном и том же напряжении, получаемом от отводов Ultralinear на первичной обмотке выходного аудио трансформатора, приводит к опасно нестабильной ситуации, когда напряжение на панелях и экранах достигает уровня 500 Вольт. Чрезмерный ток электронов может привести к раскалению проводов экранов, увеличивая ток лампы до предела её прочности. Экраны ламп EL-34 должны находиться в «тени» проводов управляющей сетки. Более поздние версии ламп EL-34, выпущенные в 80-х и 90-х годах, могут быть собраны не так тщательно, как оригинальная конструкция Philips.

The best way to get high power and low distortion is to operate EL-34s at high voltage. The EL-34 can give 100 watts/pair with 800 volts on the plates and 400 on the screens. This necessitates a tertiary screen winding on the output transformer. The best transformer for this purpose is the Dynaco A-440, or one of its clones. At the 800-400 plate - screen voltage ratio this transformer can give 300 watts output between 30 cycles and 15kc, 200 watts 20-20kc.

Наилучший способ получить высокую мощность и низкие искажения — это использовать лампы EL-34 при высоком напряжении. Лампа EL-34 может выдавать 100 Вт/пару при напряжении 800 В на анодах и 400 В на сетке. Для этого необходима третья обмотка сетки на выходном трансформаторе. Лучшим трансформатором для этой цели является Динако А-440 или один из его аналогов. При соотношении напряжения анод-сетка 800-400 этот трансформатор может выдавать 300 Вт выходной мощности в диапазоне от 30 Гц до 15 кГц и 200 Вт в диапазоне от 20 Гц до 20 кГц.

In the amplifier design described no load voltages on the output tube plates and screens are 1000, 500 respectively. Over the 40 years of experience I have had with this design no special problems have developed with the exception that these voltages should be applied with a controlled build-up which is obtainable from the vacuum tube damper diode rectifiers which are employed. Tubes also flash occasionally from loose internal particles. A few sharp raps generally loosens them.

В описанной конструкции усилителя напряжения холостого хода на анодах и экранах выходных ламп составляют 1000 и 500 В соответственно. За 40 лет работы с этой конструкцией особых проблем не возникало, за исключением того, что эти напряжения следует подавать с контролируемым нарастанием, которое достигается за счет используемых вакуумных ламповых диодных выпрямителей. Лампы также иногда загораются из-за отслоившихся внутренних частиц. Несколько резких стуков обычно помогают их разъединить.

DePalma and Hafler discovered the distortion reducing properties of a small common cathode resistor in class AB circuits when they were looking for an easy way for the customer to set the output stage bias. A 12 ohm resistor equated to a 1.56 v.d.c. drop which was equal to the voltage of a 1.5 volt dry, zinc-carbon cell. It also turned out that this resistor reduced high level I.M. by 2/3, down to .25 percent, while low level, one-watt I.M. was only perceptibly increased.

ДеПальма и Хафлер обнаружили свойства небольшого резистора с общим катодом, снижающие искажения в схемах класса АВ, когда искали простой способ для потребителя установить смещение выходного каскада. Резистор сопротивлением 12 Ом соответствовал падению напряжения 1,56 В постоянного тока, что равнялось напряжению 1,5-Вольтовой сухой цинково-углеродной батарейки. Также выяснилось, что этот резистор снижает интермодуляционные искажения при высоких уровнях на 2/3, до 0,25 процента, в то время как интермодуляционные искажения при низких уровнях, составляющие один Ватт, лишь заметно увеличивались.

Use of a 10-12 ohm common cathode resistor in class AB push-pull audio power output stages allows a reduction in quiescent static current to achieve the same distortion at maximum output. Any reduction in tube current will increase tube life. A small common cathode resistor together with high-voltage, 800-400, operation of the EL-34 can result in a tube life in excess of 20 years.

Использование резистора с общим катодом 10-12 Ом в двухтактных выходных каскадах усилителя мощности звука класса АВ позволяет уменьшить статический ток покоя и добиться того же уровня искажений при максимальной выходной

мощности. Любое уменьшение тока лампы увеличивает срок ее службы. Небольшой резистор с общим катодом в сочетании с работой лампы EL-34 под высоким напряжением (800-400 В) может обеспечить срок службы лампы более 20 лет.

The important parameter in vacuum tube life is bulb temperature. Output tube temperatures high enough to burn fingers when touching the bulb evaporate getters on the inside of the envelope. These tubes eventually become gassy and lose emission. Anyone serious about vacuum tube amplifier design must either contemplate manufacturing his own tubes or developing circuits which maximise the performance and life of the existing remaining stocks.

Важным параметром, определяющим срок службы вакуумных ламп, является температура колбы. При высоких температурах выходной лампы, способных обжечь пальцы при прикосновении к колбе, испаряются геттеры на внутренней стороне колбы. В конечном итоге такие лампы начинают выделять газ и теряют излучение. Любой, кто всерьез занимается проектированием ламповых усилителей, должен либо задуматься о собственном производстве ламп, либо о разработке схем, которые максимально увеличивают производительность и срок службы имеющихся запасов.

In the early days of Hi-Fi the earth had not reached its limit of planetary resources. Economic considerations had not yet reached a limit where price and "performance" were intra-convertible or even relevant. The important fact was to achieve musical performance for one's Hi-Fi system. The contemporary aphorism is not whether it is musical but good value for the money. As we drift into our uncertain future we have lost touch with music.

В первые годы существования Hi-Fi-техники Земля ещё не исчерпала свои планетарные ресурсы. Экономические соображения ещё не достигли того предела, когда цена и «качество» стали бы взаимозаменяемыми или даже актуальными. Важным фактором было достижение музыкального звучания от своей Hi-Fi-системы. Современный афоризм гласит не о том, музыкальна ли она, а о том, насколько она выгодна за свои деньги. Двигаясь в наше неопределённое будущее, мы утратили связь с музыкой.

6) The Second Circuit

The second circuit was developed as a hybrid tube-transistor audio power amplifier. In the original design a DynaKit 6AN8 voltage amplifier phase splitter drove a 6360 single envelope twin tetrode, Ultralinear connected. The output transformer was a Dynaco A-410 modified with normally paralleled 16 ohm secondaries separated. These windings drove one or more pairs of same sex transistors in the manner shown, figure (2).

6) Вторая схема

Вторая схема была разработана как гибридный лампово-транзисторный усилитель мощности звука. В первоначальной конструкции фазовый разделитель напряжения DynaKit 6AN8 управлял однофазным тетродом 6360 с ультралинейной схемой. Выходной трансформатор представлял собой модифицированный Динако А-410 с параллельно соединенными вторичными обмотками сопротивлением 16 Ом. Эти обмотки управляли одной или несколькими парами транзисторов одного типа, как показано на рисунке (2).

A single power transformer with two capacitively isolated 40 volt windings and a 250 volt winding for the two tube phase inverter driver was used. The 6360 power stage need only put out a few watts to drive the transistors to saturation. In the circuit constructed a bypassed common cathode resistor provided bias.

Использовался один силовой трансформатор с двумя емкостно изолированными обмотками на 40 вольт и обмоткой на 250 вольт для драйвера двухлампового фазоинвертора. Силовому каскаду на микросхеме 6360 требовалось выдавать всего несколько ватт для насыщения транзисторов. В собранной схеме смещение обеспечивалось зашунтированным резистором с общим катодом.

The second circuit can also be driven by a transistorised voltage-amp-phase-inverter-driver. The salient features of this output circuit are that identical same sex transistors can be used and because of the floating nature of the transformer coupled drive, either end of the output load resistor may be grounded. Negative feedback to the input stage cathode (6AN8) is

taken from the ungrounded end. Either same sex bipolars or FETs can be used in this circuit.

Вторая схема также может управляться транзисторным драйвером фазоинвертора с усилителем напряжения. Отличительными особенностями этой выходной схемы являются возможность использования одинаковых транзисторов одного типа, а также то, что из-за плавающего характера трансформаторно-связанного управления любой конец выходного нагрузочного резистора может быть заземлен. Отрицательная обратная связь с катодом входного каскада (6AN8) снимается с незаземленного конца. В этой схеме могут использоваться как биполярные транзисторы одного типа, так и полевые транзисторы.

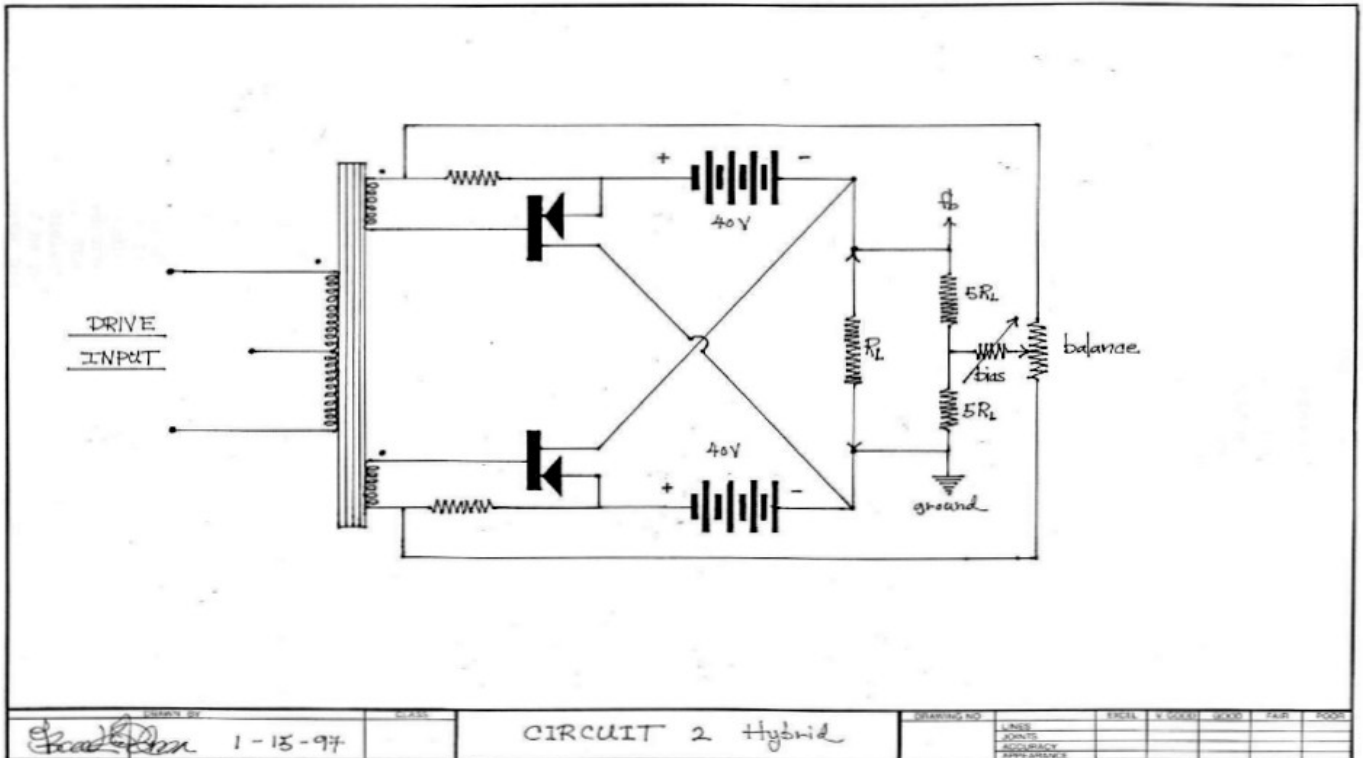


Fig. 2

Philosophy

Vacuum tubes come in only one gender. Transistors can be N type or P type. An N type transistor can be synthesised from a P type and vice-versa, by what is known as a quasi-complementary circuit. Quasi-complementary circuits using combinations of N and P type transistors work well but direct fabrication of fairly well matched N and P type complementary power transistor pairs has put these circuits on the back burner.

Философия

Вакуумные лампы бывают только одного типа. Транзисторы могут быть N-типа или P-типа. N-транзистор можно синтезировать из P-транзистора и наоборот, используя так называемую квазикомплементарную схему. Квазикомплементарные схемы, использующие комбинации N- и P-транзисторов, работают хорошо, но прямое изготовление достаточно хорошо согласованных пар комплементарных силовых транзисторов N- и P-типа отодвинуло эти схемы на второй план.

Of course a purist designing class B transistorised audio power circuitry would never consider using complementary pairs, being that the matching is not perfect. On the other hand this necessitates the use of an audio driver transformer, the imperfections of which limit the amount of overall usable negative feedback.

Конечно, пурист, проектирующий транзисторные схемы питания аудиоцепей класса B, никогда не стал бы использовать комплементарные пары, поскольку согласование не идеально. С другой стороны, это требует использования трансформатора драйвера аудиосигнала, несовершенства которого ограничивают количество полезной отрицательной обратной связи.

The reason I consider the transformer coupled driver circuit acceptable is that exact matching of the output power transistors is possible. This in itself minimises even order harmonic distortion. Small low-power, 10 watts or less, driver transformers have excellent frequency response extending to 100kc for the A-410. Capacitive effects between windings and their attendant resonances in a small transformer are well outside the audio range.

Причина, по которой я считаю схему драйвера с трансформаторной связью приемлемой, заключается в возможности точного согласования выходных силовых транзисторов. Это само по себе минимизирует гармонические искажения четных порядков. Небольшие маломощные драйверные трансформаторы (10 Вт или меньше) обладают превосходной частотной характеристикой, простирающейся до 100 кГц для А-410. Емкостные эффекты между обмотками и связанные с ними резонансы в небольшом трансформаторе находятся далеко за пределами звукового диапазона.

Larger and bigger audio output transformers normally used in the range 100 - 500 watts have definite high-frequency resonance and leakage problems which limit the overall amount of negative feedback which can be used. For example, the 250 watt output of the first circuit can be obtained at about .5% I.M. using 20db of negative feedback. Oscillation would occur at 32db feedback. In the second circuit 100 watts could be obtained from a pair of diffused-base bipolars @ .25% I.M. In this design 25db of feedback could be used with oscillation occurring at 35db.

Более крупные и мощные выходные трансформаторы для аудиосигналов, обычно используемые в диапазоне 100–500 Вт, имеют явные проблемы с высокочастотным резонансом и утечкой, что ограничивает общее количество используемой отрицательной обратной связи. Например, выходная мощность 250 Вт первой схемы может быть получена при интермодуляционных искажениях около 0,5% с использованием отрицательной обратной связи 20 дБ. Генерация будет происходить при обратной связи 32 дБ. Во второй схеме 100 Вт можно получить от пары биполярных ламп с диффузионным основанием при интермодуляционных искажениях 0,25%. В этой конструкции можно использовать обратную связь 25 дБ, при этом генерация будет происходить при 35 дБ.

Because of stored base charge and propagation delay effects, negative feedback is not as effective in distortion reduction for transistorised power amplifiers as for tube-transformer designs. In the same vein, excessive negative feedback may create non-harmonious distortion in transistor circuits. Consequently whatever the design, the principle should be to obtain the lowest distortion before feedback is applied. Negative feedback as a cure for distortion when properly applied can have non-harmonious and destructive (oscillatory) side effects if overused.

Из-за накопленного заряда базы и эффектов задержки распространения отрицательная обратная связь не так эффективна в снижении искажений в транзисторных усилителях мощности, как в лампово-трансформаторных схемах. Аналогично, чрезмерная отрицательная обратная связь может создавать негармоничные искажения в транзисторных схемах. Следовательно, независимо от конструкции, принцип должен заключаться в достижении минимальных искажений до применения обратной связи. Отрицательная обратная связь как средство устранения искажений, при правильном применении, может иметь негармоничные и разрушительные (колебательные) побочные эффекты при чрезмерном использовании.

I like the second circuit because it can employ same sex matched and balanced transistor pairs to achieve any desired output power. Even though a small low-power driver transformer is required, the problems it solves more than compensate for the few ills a well designed and constructed audio transformer produces.

Мне нравится вторая схема, потому что в ней можно использовать пары транзисторов одного типа, подобранных по мощности, для достижения любой желаемой выходной мощности. Хотя для этого требуется небольшой маломощный трансформатор драйвера, решаемые им проблемы с лихвой компенсируют немногочисленные недостатки хорошо спроектированного и изготовленного аудио трансформатора.

As is well known, the vanishingly small distortions which can be obtained in fully transistorised audio power amps are not necessarily reflected in their audio listening quality.

Как известно, ничтожно малые искажения, которые могут быть получены в полностью транзисторных усилителях мощности, не обязательно отражаются на качестве звучания.

7) The Third Circuit

The third circuit was developed to fully utilise complementary symmetry matched P and N type field-effect transistors. Using these devices, a fully d.c. coupled audio power amp was designed. In recent years audio quality has been adversely affected by the use of plastic dielectric coupling capacitors. There are well known memory and electric hysteresis effects in plastic dielectrics. If coupling capacitors are used in audio circuits they should be paper or metalised paper dielectric. Of course, d.c. coupling removes all capacitors as shown in the third circuit, figure (3).

7) Третья схема

Третья схема была разработана для полного использования комплементарных симметрично согласованных полевых транзисторов P- и N-типа. С помощью этих устройств был разработан полностью связанный по постоянному току усилитель мощности звука. В последние годы качество звука ухудшилось из-за использования разделительных конденсаторов с пластиковым диэлектриком. В пластиковых диэлектриках хорошо известны эффекты памяти и электрического гистерезиса. Если в аудиосхемах используются разделительные конденсаторы, они должны быть бумажными или металлизированными бумажными диэлектриками. Конечно, связь по постоянному току исключает все конденсаторы, как показано на третьей схеме, рисунок (3).

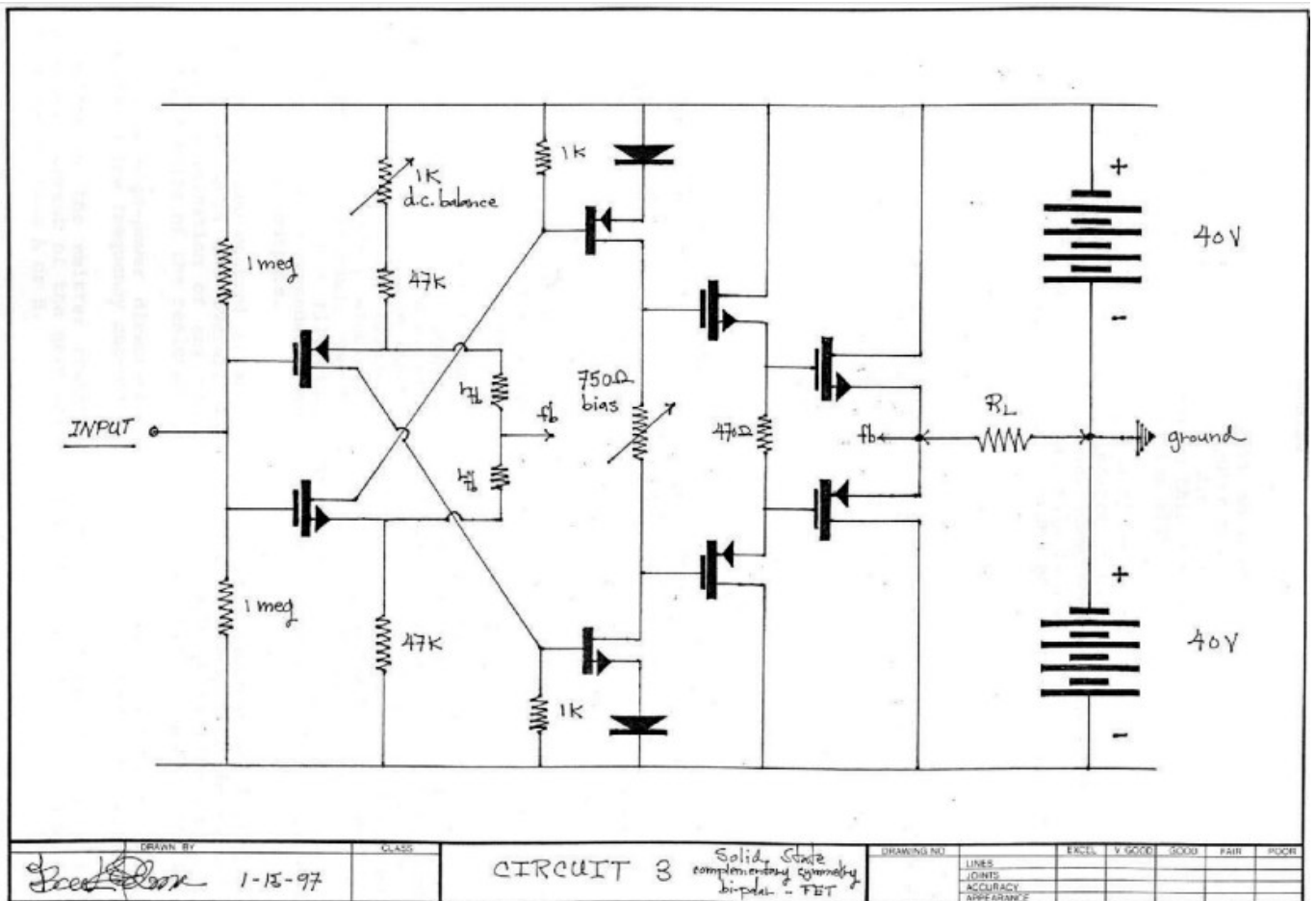


Fig. 3

In this circuit the musical as well as electrical laws are followed. Complementary symmetry, FETs and bipolar transistors are all utilised in a completely balanced, symmetric, d.c. coupled configuration. The experienced designer will see that in this circuit complementary

symmetry bipolars can be substituted for all the FETs.

В этой схеме соблюдаются как музыкальные, так и электрические законы. В полностью сбалансированной, симметричной конфигурации с постоянным током используются комплементарная симметрия, полевые транзисторы и биполярные транзисторы. Опытный разработчик увидит, что в этой схеме комплементарная симметрия позволяет заменить все полевые транзисторы.

In order to achieve d.c. coupling the first stage of this circuit has a voltage gain of less than unity. Bipolars or FETs may be used here. The second stage is the voltage gain stage. Complementary bipolars should be used here to insure maximum voltage, rail to rail, drive. The second stage is interesting because it is a combination of two driven current sources using each other as load resistor.

Для обеспечения связи по постоянному току первый каскад этой схемы имеет коэффициент усиления по напряжению меньше единицы. Здесь можно использовать биполярные транзисторы или полевые транзисторы. Вторым каскадом — это каскад усиления по напряжению. Здесь следует использовать комплементарные биполярные транзисторы для обеспечения максимального напряжения управления от шины до шины. Вторым каскадом интересен тем, что представляет собой комбинацию двух управляемых источников тока, использующих друг друга в качестве нагрузочных резисторов.

The diodes in the emitter circuit are used in a dual mode. Using complementary bipolars as recommended, these diodes provide temperature compensation in conjunction with the 1K base to ground resistors. The other function is to ensure the lowest base input resistance in the voltage amplifier stages. The current supplied to the gain stages by the input transistor pair divides between the base to ground resistor and the input resistance of the gain stage, i.e. the lower the base input resistance the more driver current flows into the gain stage transistors.

Диоды в эмиттерной цепи используются в сдвоенном режиме. Используя комплементарные биполярные транзисторы, как рекомендуется, эти диоды обеспечивают температурную компенсацию совместно с резисторами 1 кОм между базой и землей. Другая функция заключается в обеспечении минимального входного сопротивления базы в каскадах усиления напряжения. Ток, подаваемый на каскады усиления от пары входных транзисторов, делится между резистором база-земля и входным сопротивлением каскада усиления, т.е. чем ниже входное сопротивление базы, тем больше тока драйвера протекает через транзисторы каскада усиления.

If the base input resistance were zero, all the driver current would flow into the bases and the gain of the two-stage combination would be highest. Substitution of complementary FETs in the gain stage changes the input situation since FETs are voltage actuated.

Если бы входное сопротивление базы было равно нулю, весь ток драйвера протекал бы через базы, и коэффициент усиления двухкаскадной схемы был бы максимальным. Замена комплементарных полевых транзисторов в каскаде усиления изменяет входную ситуацию, поскольку полевые транзисторы управляются напряжением.

In the gain stage each transistor acts as the load resistor for the other. Very high gain and linearity is possible. Using bipolars, the drive output of this stage is almost peak to peak, rail to rail, less the saturation voltages and emitter diode voltage drops. The gain of this stage using bipolars is 1000-1500. Since the second stage operates as a current source a variable series resistor in the common collector circuit can be used to regulate the output stage quiescent current. As can be appreciated from the circuit schematic, any supply voltage variations either from mains fluctuations or long term thermal temperature coefficient effects in the active devices appear only as a common mode effect and do not shift the d.c. balance point of the circuit.

В каскаде усиления каждый транзистор выступает в качестве нагрузочного резистора для другого. Это позволяет добиться очень высокого коэффициента усиления и линейности. При использовании биполярных транзисторов выходной сигнал этого каскада практически совпадает по амплитуде, за вычетом напряжений насыщения и падения напряжения на эмиттерном диоде. Коэффициент усиления этого каскада при использовании биполярных транзисторов составляет 1000-1500.

Поскольку второй каскад работает как источник тока, для регулирования тока покоя выходного каскада можно использовать переменный последовательный резистор в цепи с общим коллектором. Как видно из схемы, любые колебания напряжения питания, вызванные либо колебаниями сетевого напряжения, либо долговременными эффектами температурного коэффициента активных элементов, проявляются только как синфазный эффект и не смещают точку баланса постоянного тока схемы.

Circuit three requires a power supply with exactly equal and opposite output voltages balanced against ground. This ensures, all other things being equal, that no d.c. offset will appear across the output load resistor for zero voltage input to the amplifier. A proper circuit uses a four diode full-wave bridge rectifier fed from a center-tapped power transformer secondary winding. The center-tap becomes a 1/2 voltage point which is grounded. Two 1000 microfarad electrolytics connected in series are used for filtering. The center point of the seriesed capacitors is also grounded, providing adequate filtering of the plus and minus 40 v.d.c. outputs.

Третья схема требует источника питания с точно равными и противоположно направленными выходными напряжениями, сбалансированными относительно земли. Это гарантирует, при прочих равных условиях, отсутствие постоянного смещения на выходном нагрузочном резисторе при нулевом входном напряжении усилителя. В правильной схеме используется четырехдиодный полноволновой мостовой выпрямитель, питаемый от вторичной обмотки силового трансформатора с центральным отводом. Центральным отвод становится точкой с половинным напряжением, которая заземлена. Для фильтрации используются два электролитических конденсатора емкостью 1000 микрофарад, соединенных последовательно. Центральная точка последовательно соединенных конденсаторов также заземлена, обеспечивая адекватную фильтрацию выходных напряжений плюс и минус 40 В постоянного тока.

The d.c. balance control is an internal set-up adjustment which becomes ineffective when the overall d.c. negative feedback loop is closed. Complete elimination of any remaining offset voltage is effected by a minute trimming of the resistance of one of the 1 megohm input resistors.

Регулировка баланса постоянного тока представляет собой внутреннюю настройку, которая становится неэффективной при замыкании общей отрицательной обратной связи по постоянному току. Полное устранение любого остаточного смещения напряжения достигается путем незначительной подстройки сопротивления одного из входных резисторов на 1 мегаом.

(Use of a high-power direct-coupled amplifier for high-fidelity audio requires a low frequency cut-off to prevent damage to loudspeakers.)

(Использование мощного усилителя с прямой связью для высококачественного звука требует среза на низких частотах во избежание повреждения громкоговорителей.)

Selection of the emitter resistors of the input stage determines the quiescent current of the gain stage. Interestingly, the gain stage may be operated class A or B.

Выбор эмиттерных резисторов входного каскада определяет ток покоя усилительного каскада. Интересно, что усилительный каскад может работать в режиме класса А или В.

The emitter-follower following the gain stage can be either bipolars or FETs. An important parameter here is the input capacity of these devices which can cause a high-frequency roll-off. This roll-off can be used as high-frequency phase compensation. When using FETs, their extended frequency response can lead to R.F. oscillations. This can be controlled by series "stopper" resistors of up to a few hundred ohms in the gate circuits.

В качестве эмиттерного повторителя после каскада усиления могут использоваться биполярные транзисторы или полевые транзисторы (FET). Важным параметром здесь является входная мощность этих устройств, которая может вызывать спад на высоких частотах. Этот спад можно использовать в качестве высокочастотной фазовой компенсации. При использовании полевых транзисторов их расширенный частотный диапазон может приводить к радиочастотным колебаниям.

Это можно контролировать с помощью последовательно включенных «запорных» резисторов сопротивлением до нескольких сотен Ом в цепях затвора.

With FETs in the input stage and bipolars in the gain stage, negative and positive temperature coefficients work against each other. If quiescent output stage current is temperature sensitive in the sense that d.c. compensation of the input stages does not offer complete control, then a series diode string between the output driver transistor bases (or gates) can replace the resistor control shown between the driver transistor emitters.

При использовании полевых транзисторов на входном каскаде и биполярных транзисторов на каскаде усиления отрицательные и положительные температурные коэффициенты работают друг против друга. Если ток выходного каскада в состоянии покоя чувствителен к температуре в том смысле, что компенсация постоянного тока входных каскадов не обеспечивает полного контроля, то последовательная цепочка диодов между базами (или затворами) выходных транзисторов управления может заменить резисторное управление, показанное между эмиттерами транзисторов управления.

The third circuit can drive several pairs of paralleled output transistors. A complementary symmetry FET emitter-follower drives the output transistors. The emitter-follower driver fed from the driven current source gain stage provides low distortion symmetrical rail to rail drive to the output stage. Here again complementary bipolars can be substituted for the FETs.

Третья схема может управлять несколькими парами параллельно соединенных выходных транзисторов. Выходные транзисторы управляются эмиттерным повторителем на полевых транзисторах с комплементарной симметрией. Драйвер эмиттерного повторителя, питаемый от каскада усиления с источником тока, обеспечивает симметричное управление выходным каскадом с низким уровнем искажений и напряжением от шины до шины. Здесь также можно использовать комплементарные биполярные транзисторы вместо полевых транзисторов.

The output stage can be either bipolar or FET. An alternative method of regulating quiescent current is a series diode string in the emitter circuits of the driver stage. This might be more important with a bipolar output stage since temperature compensation with negative coefficient diodes is possible. The built-in negative temperature coefficient of current in FETs renders this unnecessary. As a strictly purist comment, I do not like to use diodes in a signal path. They may be forward biased and in conduction, but they still have a non-linear current-voltage relationship as compared to a resistor.

Выходной каскад может быть биполярным или полевым транзистором (FET). Альтернативным методом регулирования тока покоя является последовательная диодная цепочка в эмиттерных цепях драйверного каскада. Это может быть более важно для биполярного выходного каскада, поскольку возможна температурная компенсация с помощью диодов с отрицательным температурным коэффициентом. Встроенный отрицательный температурный коэффициент тока в полевых транзисторах делает это ненужным. В качестве строгого замечания пуриста, я не люблю использовать диоды в сигнальном тракте. Они могут быть смещены в прямом направлении и находиться в проводимости, но у них все равно нелинейная зависимость тока от напряжения по сравнению с резистором.

Negative Feedback

Negative feedback in the third circuit is from the hot end of the load resistor (loudspeaker) to the input emitters. To obtain best square wave response and transient stability this resistor may be bypassed by a small capacitor. If the feedback resistor is connected between the two points marked fb and bypassed with a small capacitor, the identical emitter resistors in the input stage can be adjusted to be some fraction of the main feedback resistor. Thus a "step" network is created which limits feedback at high frequencies and improves stability. Experiments with this circuit showed that oscillation ensued with 55db of feedback.

Отрицательная обратная связь

В третьей схеме отрицательная обратная связь осуществляется от горячего конца нагрузочного резистора (громкоговорителя) к входным эмиттерам. Для получения наилучшей характеристики прямоугольного сигнала и переходной

стабильности этот резистор может быть зашунтирован небольшим конденсатором. Если резистор обратной связи подключен между двумя точками, обозначенными fb, и зашунтирован небольшим конденсатором, то одинаковые резисторы эмиттеров на входном каскаде можно отрегулировать так, чтобы они составляли некоторую долю от основного резистора обратной связи. Таким образом, создается «ступенчатая» цепь, которая ограничивает обратную связь на высоких частотах и улучшает стабильность. Эксперименты с этой схемой показали, что колебания возникали при обратной связи 55 дБ.

The designer should produce a circuit which has inherently low distortion before feedback is applied. Odd harmonic distortion can be balanced out by symmetry. Even harmonic distortion is reduced by choice of inherently linear circuitry, i.e. emitter-follower output and output driver circuits, and a linear driven current source symmetrical high-gain stage.

Разработчик должен создать схему с изначально низким уровнем искажений до применения обратной связи. Нечетные гармонические искажения можно компенсировать симметрией. Четные гармонические искажения уменьшаются за счет выбора принципиально линейной схемы, т.е. эмиттерного повторителя на выходе и выходного драйвера, а также симметричного каскада с высоким коэффициентом усиления и линейным источником тока.

With the above combination distortion does not continue to decrease above 30db of feedback. Just under clipping and at full output into 8 ohms, I.M. distortion of the third circuit is unmeasurable or in the noise level of the instrument. Power response is flat from d.c. to 100kc where the output is rolled off deliberately through internal compensation. One-half volt d.c. input drives the amplifier to full output. At 30db of negative feedback no compensating capacitor was required across the feedback resistor to produce a perfect 20kc square wave.

При указанной выше комбинации искажения не продолжают уменьшаться при обратной связи выше 30 дБ. При нагрузке чуть ниже уровня ограничения и полной выходной мощности на 8 Ом интермодуляционные искажения третьей цепи неизмеримы или находятся на уровне шума прибора. Частотная характеристика ровная от постоянного тока до 100 кГц, где выходной сигнал намеренно срезается за счет внутренней компенсации. Входное напряжение постоянного тока в полвольта обеспечивает усилитель на полную мощность. При отрицательной обратной связи 30 дБ не потребовался компенсирующий конденсатор, подключенный параллельно резистору обратной связи, для получения идеальной прямоугольной волны частотой 20 кГц.

Philosophy

The third circuit was designed to take advantage of the most advanced semi-conductor technology available today (1990's). I have felt that transistor audio power amplifiers could equal or out-perform the best vacuum tube designs. Analog audio thrived in the days of vacuum tubes, but design has turned away from analog to digital and the serious evolution of analog transistor power amplification has never taken place.

Философия

Третья схема была разработана с учетом самых передовых полупроводниковых технологий, доступных сегодня (1990-е годы). Я считал, что транзисторные усилители мощности могут сравниться или превзойти лучшие ламповые схемы. Аналоговое аудио процветало во времена ламп, но с тех пор проектирование сместилось от аналогового к цифровому, и серьезной эволюции аналоговых транзисторных усилителей мощности так и не произошло.

Transistors have made it possible to eliminate the audio power output transformer from audio amplifiers. Complementary transistors make new design options possible. The pentode-like high incremental impedance of transistor collector circuits reduces filtering requirements of power supplies. Total d.c. coupling is possible in complementary circuits thereby eliminating all coupling capacitors.

Транзисторы позволили исключить выходной трансформатор усилителя мощности звука. Комплементарные транзисторы открывают новые возможности для проектирования. Высокое инкрементальное сопротивление коллекторных цепей

транзисторов, подобное пентодному, снижает требования к фильтрации в источниках питания. В комплементарных схемах возможна полная связь по постоянному току, что исключает использование разделительных конденсаторов.

Performance

I like the sound of all three circuits, but the third circuit represents all I know about electrical and musical laws. The sound is sweet, smooth, effortless and transparent. 100 watts of audio can be gotten from 8 transistors and 6 diodes. The history of the development of electronic audio rests on the control of the flow of current, firstly via the vacuum tube grid, then by carrier injection into a back biased semi-conductor junction, finally control of transconductance via an electric field projected into a semiconductor. Other means of current control may be possible and some might be practicable.

Returning to the golden rules of audio, the simplest design with the fewest stages is preferable and if balance, complementarity, linearity and power are the musical factors I would prefer circuit 3.

Производительность

Мне нравится звучание всех трех схем, но третья схема воплощает все мои знания об электрических и музыкальных законах. Звук приятный, плавный, легкий и прозрачный. 100 ватт аудиосигнала можно получить от 8 транзисторов и 6 диодов. История развития электронного звука основана на управлении потоком тока, сначала через сетку вакуумной лампы, затем путем инжекции носителей заряда в полупроводниковый переход с обратным смещением, и, наконец, на управлении крутизной характеристики с помощью электрического поля, проецируемого на полупроводник. Могут существовать и другие способы управления током, и некоторые из них могут быть практически осуществимыми.

Возвращаясь к золотым правилам звука, предпочтительнее самая простая конструкция с наименьшим количеством каскадов, и если баланс, комплементарность, линейность и мощность являются музыкальными факторами, я бы предпочел схему 3.

A final thought

The reproduction of music electro-mechanically does not lend itself to the manipulations of the digital computer and the exigencies of apparently "perfect" analog to digital and digital to analog conversion.

В заключение:

Электромеханическое воздействие музыки не поддается манипуляциям с цифрами компьютера и требованиями, предъявляемыми к, казалось бы, «идеальному» аналого-цифровому и цифро-аналоговому преобразованию.

Offshoots of contemporary inattention to perfection are the operational and differential amplifier circuit chips. Analog design has been relegated to the ministrations of specialists who design large scale integrated circuit chips. Amplifiers are not designed but specified. Differential amplifiers are installed as input circuits where negative feedback is not applied to the same active device as the signal. This tactic, often hailed as a great freedom in the design of amps with "balanced" negative feedback, builds in irreducible distortion from a stage of amplification not includable in the negative feedback loop.

Следствием современного невнимания к совершенству стали микросхемы операционных и дифференциальных усилителей. Аналоговое проектирование было отведено в ведение специалистов, разрабатывающих микросхемы больших размеров. Усилители не проектируются, а лишь указываются в технических характеристиках. Дифференциальные усилители устанавливаются в качестве входных цепей, где отрицательная обратная связь не подается на тот же активный элемент, что и сигнал. Эта тактика, часто воспринимаемая как большая свобода при проектировании усилителей с «сбалансированной» отрицательной обратной связью, приводит к возникновению неустраняемых искажений на этапе усиления, не включаемом в петлю отрицательной обратной связи.

The degree of perfection and subtlety of design required for Hi-Fi analog audio mandates discrete design of audio circuits and the avoidance of prepackaged integrated circuits with their

attendant "commercial" mass-produced sound.

Степень совершенства и тонкости конструкции, требуемая для аналогового Hi-Fi звука, обуславливает дискретную разработку аудиосхем и отказ от готовых интегральных схем с их характерным «коммерческим» звуком массового производства.

Negative feedback must be applied in a single loop from the output load terminal to an input device. The signal and feedback must interact in the same active device. Those who care to study the subject of feedback further should read: Valley and Wallman, Vacuum Tube Amplifiers, M.I.T. Rad-Lab Series. Further wisdom on the subject of negative feedback can be gotten from the works of Norman Crowhurst.

*Отрицательная обратная связь должна подаваться в одном контуре от выходного клеммного разъема нагрузки к входному устройству. **Сигнал и обратная связь должны взаимодействовать в одном и том же активном устройстве.** Тем, кто хочет глубже изучить тему обратной связи, следует прочитать: «Вэлли и Уоллман, ламповые усилители», серия «Радиолоборатория Массачусетского технологического института». Дополнительные сведения об отрицательной обратной связи можно почерпнуть из работ Нормана Кроухерста.*

This paper has been written for professionals in the field of active analog audio circuit design. It is not intended as a "how-to" construction article. Writing a design paper is different than a scientific article. Design is the selection of an appropriately chosen set of concepts to motivate and actualise a particular function, i.e. electro-mechanical analog audio sound reproduction.

Данная статья написана для специалистов в области проектирования активных аналоговых аудиосхем. Она не является руководством по конструированию. Написание статьи о проектировании отличается от написания научной статьи. Проектирование — это выбор правильно подобранного набора концепций для обоснования и реализации конкретной функции, т. е. электромеханического аналогового воспроизведения звука.

What has been sketched out in this paper are the sets of concepts and choices DePalma would, and has, made in his pursuit of an audio image expressed electronically. Other sets of choices are available and can be woven into a rationally acceptable audio image. The choice is in the eye of the beholder and in the ear of the listener.

В данной статье изложены концепции и варианты выбора, которые Де Пальма использовал и использует в своих поисках звукового образа, выраженного электронным способом. Существуют и другие варианты, которые можно объединить в рационально приемлемый звуковой образ. Выбор зависит от взглядов слушателя и от его восприятия.

Bruce DePalma