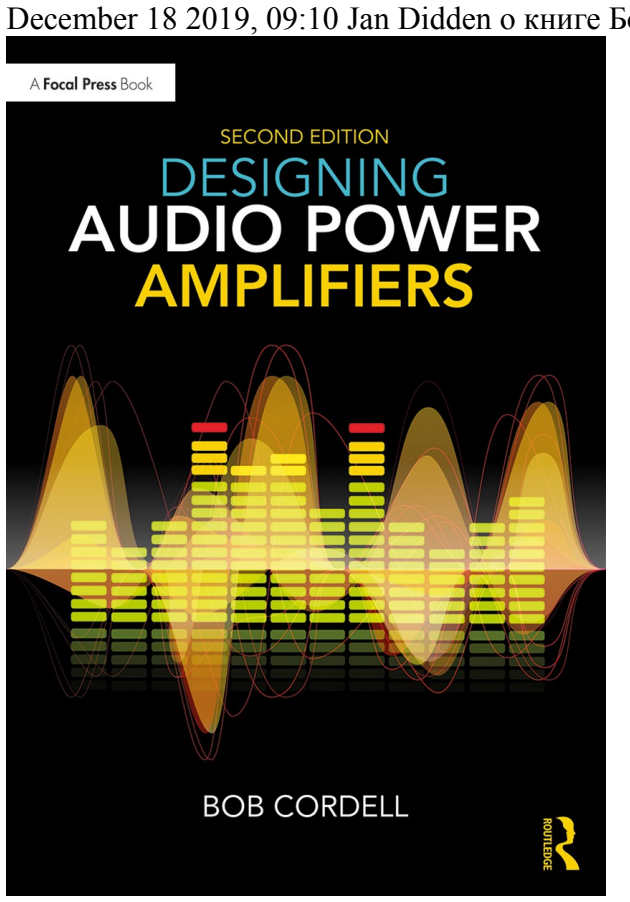
https://audioxpress.com/article/book-review-a-look-inside-bob-cordell-s-designing-audio-power-amplifiers-2nd-edition

Book Review: A Look Inside Bob Cordell's Designing Audio Power Amplifiers, 2nd Edition

December 18 2019, 09:10 Jan Didden о книге Боба Корделла



When Bob Cordell published his long-awaited first edition of Audio Power Amplifier Design, it was hailed as a significant addition to the knowledge store on the subject. Reactions of readers, both serious hobbyists as well as design professionals, made it clear that Cordell hit his mark dead center. So the second edition has been awaited with high expectations. Would Cordell be able to trump his own accomplishments? Well, let's find out. The book is divided in six main parts. There is a clear distinction in the goal of each part.

Когда Боб Корделл опубликовал свое долгожданное первое издание Audio Power Amplifier Design, оно было воспринято как значительное дополнение к базе знаний по этому вопросу. Реакция читателей, как серьезных любителей, так и профессионалов в области дизайна, ясно дала понять, что Корделл попал в самую точку. Так что второе издание ждали с большими ожиданиями. Сможет ли Корделл превзойти собственные достижения? Что ж, давайте узнаем. Книга разделена на шесть основных частей. Существует четкое различие в целях каждой части.

Part 1

"Audio Power Amplifier Basics" discusses power amplifier subjects and presents all the information needed to design a basic audio power amplifier. Topics for each chapter range from transistor types and circuits, amplifier stages, current sources, voltage references, and operational amplifiers (op-amps) to design analysis, which is a sort of pulling together of all the described factors for a complete basic amplifier design.

Часть 1

В разделе «Основы усилителя мощности звука» обсуждаются темы усилителей мощности и представлена вся информация, необходимая для проектирования базового усилителя мощности звука. Темы для каждой главы варьируются от типов и схем транзисторов, каскадов усилителей, источников тока, опорных напряжений и операционных усилителей (операционных усилителей) до анализа конструкции, который является своего рода объединением всех описанных факторов для полной базовой конструкции усилителя.

New in **Part 1** in the second edition is a full chapter to do just that: "Building an Amplifier," which goes through all stages of a basic design, building it, testing, troubleshooting, and upgrades. This is something Cordell does in several places in the book: explaining circuits and design considerations, then pulling it all together showing how the parts fit to design a complete amplifier.

*Новинкой в **части 1** второго издания является целая глава, посвященная именно этому: «Создание усилителя», в которой рассматриваются все этапы базового проекта, его сборки, тестирования, устранения неполадок и обновлений. Это то, что Корделл делает в нескольких местах книги: объясняет схемы и конструктивные соображения, а затем собирает все вместе, показывая, как части подходят для разработки полного усилителя.*

This is a very effective strategy and will help the reader quickly get to the point where he/she can apply what has been discussed. Also new in Part 1 is a chapter on noise, both from a theory as well as a practical point of view.

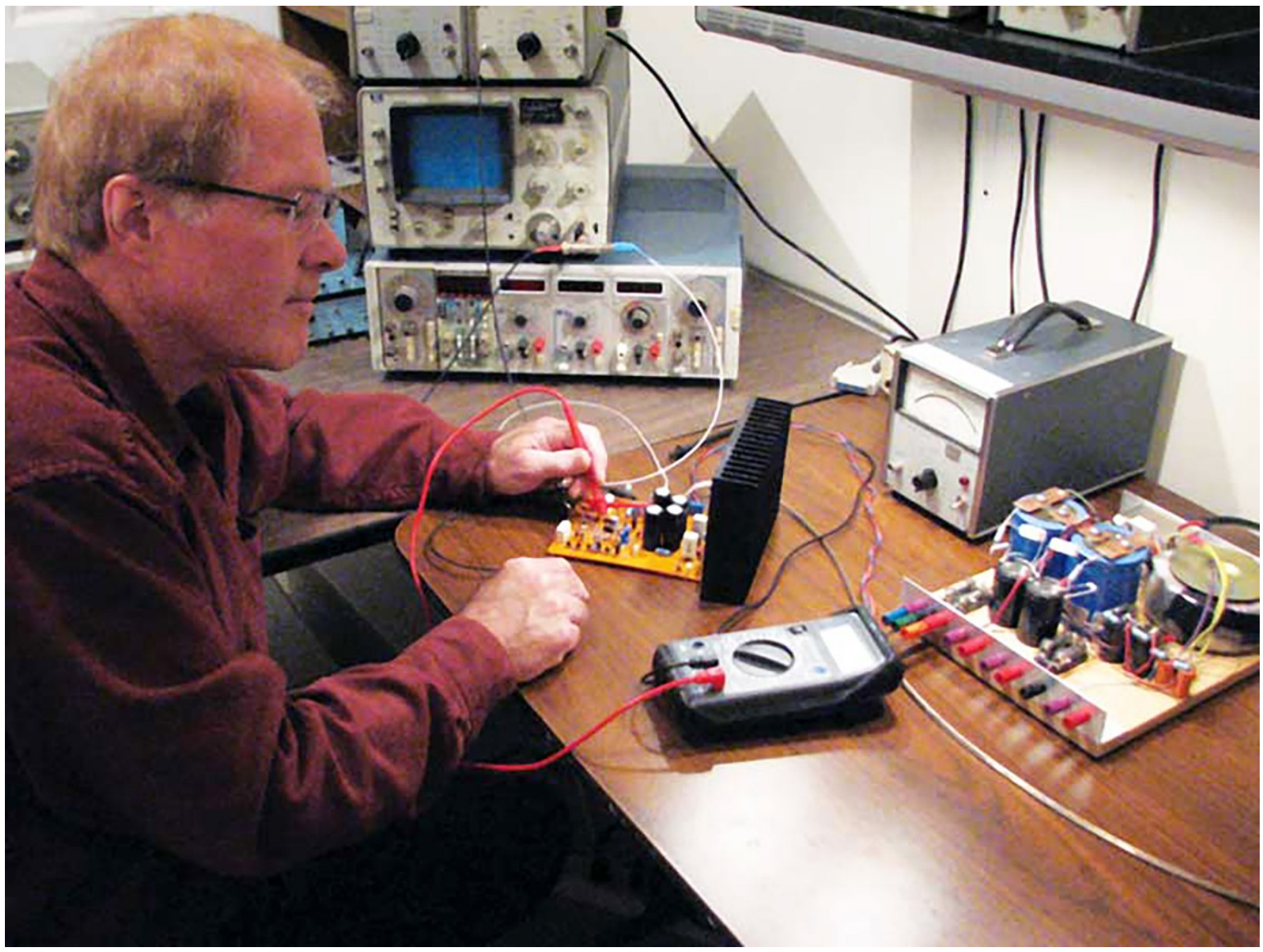
Это очень эффективная стратегия, которая поможет читателю быстро перейти к тому моменту, когда он/она сможет применить то, что было обсуждено. Также новым в Части 1 является глава о шуме, как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Part 2

"Advanced Power Amplifier Design Techniques" goes one level up, discussing advanced power amplifier design techniques. Here we find topics such as input and voltage amplifier (Vas) stages, DC servos, advanced compensation, output stages, and cross-over distortion and other sources of distortion. DC servos, you might say, what's there to say about such a mundane well-known circuit? Well, as it turns out, a lot! For all intents and purposes, the servo is in the signal path so it merits at least the same attention as the other signal-carrying parts of the amp. Servos can also influence amplifier stability and play a role in the protection system. A whole area, often only mentioned in passing, but very important if you aim for the best.

Часть 2

Раздел «Усовершенствованные методы проектирования усилителей мощности» поднимается на уровень выше, в нем обсуждаются передовые методы проектирования усилителей мощности. Здесь мы находим такие темы, как входные каскады и каскады усилителей напряжения (VAS), сервоприводы постоянного тока, расширенная компенсация, выходные каскады, перекрестные искажения и другие источники искажений. Вы можете сказать, сервоприводы постоянного тока, что можно сказать о такой приземленной известной схеме? Ну, как оказалось, много! Во всех смыслах и целях сервопривод находится на пути прохождения сигнала, поэтому он заслуживает, по крайней мере, такого же внимания, как и другие части усилителя, передающие сигнал. Сервоприводы также могут влиять на стабильность усилителя и играть роль в системе защиты. Целая область, часто упоминаемая лишь вскользь, но очень важная, если вы стремитесь к лучшему.



Bob Cordell is pictured in his shop, working on one of his many projects.
Боб Корделл изображен в своем магазине, работая над одним из своих многочисленных проектов.

Chapter 11, "Advanced Forms of Feedback Compensation," is another chapter that you must absorb and understand if you want to design well thought-out high-performance audio amplifiers. Feedback compensation is the critical factor for both high performance and stability. Designing a feedback amplifier presents the eternal compromise between high loop gain, allowing vanishing low distortion, high damping factor, and the other things we like, against increased phase shift around the loop that might endanger the amplifier stability.

***Глава 11**, «Расширенные формы компенсации обратной связи», — это еще одна глава, которую вы должны усвоить и понять, если хотите разрабатывать хорошо продуманные высокопроизводительные аудиоусилители. Компенсация обратной связи является критическим фактором как для высокой производительности, так и для стабильности. Разработка усилителя с обратной связью представляет собой вечный компромисс между высоким коэффициентом усиления контура, позволяющим свести на нет малые искажения, высоким коэффициентом демпфирования и другими вещами, которые нам нравятся, и повышенным фазовым сдвигом в контуре, который может поставить под угрозу стабильность усилителя.*

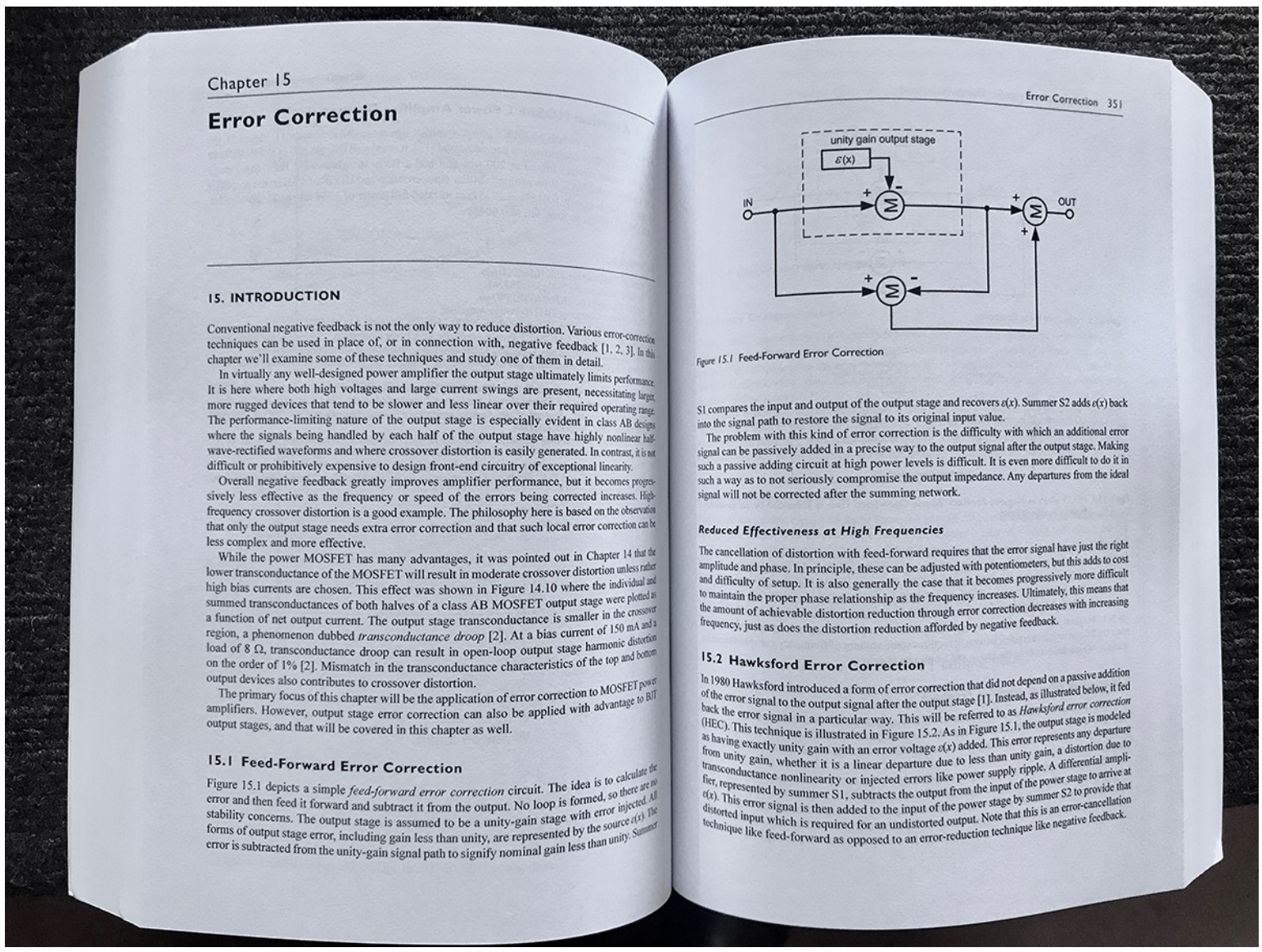
Learning about advanced compensation concepts in this chapter will help you find that optimum compromise in your own design. Here again, Cordell shows himself a master of explaining advanced concepts in simple, easy-to-understand terms, which only comes from a complete and full understanding of the subject yourself.

Знакомство с расширенными концепциями компенсации в этой главе поможет вам найти оптимальный компромисс в вашей собственной конструкции. Здесь Корделл снова показывает себя мастером объяснения передовых концепций простыми, легкими для понимания терминами, которые приходят только при полном понимании предмета самостоятельно.

Part 2 also dedicates a full chapter (Chapter 15) to an extensive discussion of error correction concepts. The chapter concludes with a complete detailed, proven design utilizing error correction to get to extremely low distortion over the audio band. New in Part 2 is an additional chapter on output stages (Output Stages II). Here, Cordell addresses selected topics such as Complementary Feedback pairs, analyzes the interesting Bryston output stage, and discusses his own new development christened the DoubleCross output stage. This appears to be inspired by Douglas Self's Crossover Displacement concept (which is also discussed) — where the output stage is loaded by a DC current, displacing the crossover region away from the zero output voltage point.

***Часть 2** также посвящает целую главу (глава 15) подробному обсуждению концепций исправления ошибок. Глава завершается подробной, проверенной конструкцией, в которой используется коррекция ошибок для достижения чрезвычайно низкого уровня искажений в звуковом диапазоне. Новым в **части 2** является дополнительная глава о выходных каскадах (выходные каскады II). Здесь Корделл обращается к избранным темам, таким как пары комплементарной обратной связи, анализирует интересный выходной каскад Bryston и обсуждает свою собственную новую разработку, названную выходным каскадом DoubleCross. Это, по-видимому, вдохновлено концепцией смещения кроссовера Дугласа Селфа (которая также обсуждается), когда выходной каскад нагружается постоянным током, смещая область кроссовера от точки нулевого выходного напряжения.*

Примечание. Похоже Дидден так и не понял что Боб по сути заново изобрел колесо. Подобное решение имеет легендарный усилитель Musical Fidelity A1, его умощненная версия A1000 и другие. Решение Дугласа Селфа рассмотрено в Радиохобби 2007-01 с. 14 (Class-XD). Но подобное решение есть как «Super Class-A", "Non-Switching" и другие (например много схем Гладкого по принципу «Class-i", патент Накаямы — когда оба плеча не выключаются полностью и поочередно поддерживают заданный минимальный ток покоя).
Вот здесь приведены примеры ВК с различными подходами, в том числе и по приведенным выше:
https://www.diyaudio.com/community/threads/bipolar-bjt-transistor-families-for-audio-power-output-stages.147656/post-6910809



Chapter 15 details “Error Correction,” beginning with the sentence: “Conventional negative feedback is not the only way to reduce distortion.”
Глава 15 подробно описывает «Исправление ошибок», начиная с предложения: «Обычная отрицательная обратная связь — не единственный способ уменьшить искажение».

The reasoning behind it is crossover distortion is less audibly damaging when the signal level is appreciable. Cordell’s DoubleCross concept [I would not have chosen the term DoubleCross myself but am only too relieved he didn’t choose DoubleDutch] extends this to a symmetrical displacement of the crossover region—it is like having two output stages, each displaced to either the positive or the negative direction, and their outputs joined. It is a very clever development but much more involved than can be discussed here.

Причина этого в том, что кроссоверные искажения менее вредны для слуха, когда уровень сигнала ощутим. Концепция DoubleCross Корделла [я бы сам не выбрал термин DoubleCross, но я очень рад, что он не выбрал DoubleDutch] расширяет это до симметричного смещения области кроссовера — это похоже на наличие двух выходных каскадов, каждый из которых смещен либо в сторону положительного или отрицательного направления, и их выходы соединились. Это очень умная разработка, но гораздо более сложная, чем здесь можно обсудить.

Part 3

In “Real World Design Considerations,” Cordell starts off with a chapter (Chapter 17) dedicated to thermal design and thermal stability of the output stage. He clearly has done much investigation into so-called ThermalTrak devices—output power devices that contain an extra diode in the case, which can be used as a temperature sensor. The incorporation of such a diode in the thermal stability loop of the output stage is a major application, but since the diode provides an accurate information about the transistor junction temperature, they could also be used in a protection scheme.

Часть 3

В «Вопросах проектирования в реальных условиях» Корделл начинает с главы (глава 17), посвященной тепловому расчету и термостабильности выходного каскада. Он явно провел много исследований в области так называемых устройств ThermalTrak — устройств выходной мощности, которые содержат в корпусе дополнительный диод, который можно использовать в качестве датчика температуры. Включение такого диода в контур термостабильности выходного каскада является основным применением, но поскольку диод обеспечивает точную информацию о температуре перехода транзистора, его также можно использовать в схеме защиты.

Cordell provides detailed information and design guidelines on the use of these devices and shows that they can greatly increase the accuracy and reaction speed of thermal stabilization loops. My own experiences with similar devices [I have studied thermal track darlingtons from Sanyo, while Cordell used single BJT devices from Motorola] mostly echo Cordell’s, but I found that the thermal response speed is not fast enough to track low-frequency dissipation variations over a signal cycle or burst (see Resources). At the end of the chapter, a fully developed design is presented for a power amp taking advantage of these ThermalTrak devices.

Корделл предоставляет подробную информацию и рекомендации по использованию этих устройств и показывает, что они могут значительно повысить точность и скорость реакции контуров термостабилизации. Мой собственный опыт работы с подобными устройствами [я изучал тепловые датчики Дарлингтона от Sanyo, в то время как Cordell использовал устройства с одиночным биполярным транзистором от Motorola] в основном совпадает с опытом Cordell, но я обнаружил, что скорость теплового отклика недостаточно высока, чтобы отслеживать колебания рассеяния на низких частотах в течение сигнальный цикл или пакет (см. Ресурсы). В конце главы представлена полностью разработанная конструкция усилителя мощности, использующая преимущества этих устройств ThermalTrak.

Next is a chapter on “Safe Area and Short-Circuit Protection,” going into much detail on how to design for reliability and disaster-survival, down to mitigating the possible negative effects of having a protection relay in the speaker line. (Hint: Use a very smart feedback arrangement to enclose the relay in the feedback loop yet insure that the loop is not broken when the relay opens.)

Далее идет глава «Безопасная зона и защита от короткого замыкания», в которой подробно рассказывается о том, как проектировать для обеспечения надежности и выживания в случае бедствий, вплоть до смягчения возможных негативных последствий наличия реле защиты в линии громкоговорителей. (Совет: используйте очень разумную схему обратной связи, чтобы включить реле в петлю обратной связи, но убедитесь, что петля не разорвется, когда реле разомкнется.)

Power supplies and grounding are often neglected aspects of amplifier design. Great effort is expended to design the “World’s Best Amplifier,” only to slap on the usual transformer, rectifiers, and reservoir caps; connect all the grounds with heavy wiring, preferably in a star configuration; and assume all is well. Chapter 19 on “Power Supplies and Grounding” makes it clear that it’s more subtle than that. All aspects of transformer selection and sizing, rectifier diode selection aspects, capacitor sizing, bypassing, pre-stage voltage regulation, soft-start, grounding architectures, safety circuits, EMI aspects of power supply unit (PSU) design and safety grounds are dealt with. The chapter ends with a rather short paragraph on switched-mode power supplies, but—I should

have known better.

Источники питания и заземление часто игнорируются при проектировании усилителей. Огромные усилия были затрачены на разработку «лучшего в мире усилителя» только для того, чтобы поставить обычный трансформатор, выпрямители и крышки резервуаров; соедините все заземления толстой проводкой, желательно по схеме «звезда»; и считать, что все хорошо. Глава 19 «Источники питания и заземление» ясно показывает, что это более тонко. Рассматриваются все аспекты выбора и размеров трансформатора, аспектов выбора выпрямительного диода, размера конденсатора, шунтирования, предварительной регулировки напряжения, плавного пуска, архитектуры заземления, цепей безопасности, аспектов электромагнитных помех конструкции блока питания (PSU) и заземления безопасности. . Глава заканчивается довольно коротким абзацем об импульсных источниках питания, но — мне следовало бы знать лучше.

New in **Part 3** is a full chapter on "Switching Power Supplies" (Chapter 20). Almost 50 pages of everything from switched-mode power supply (SMPS) types; operational modes (e.g., continuous or discontinuous modes); regulated and open loop converters; half, full, and synchronous converters; EMI filtering and suppression; and power factor correction. After treating all these aspects with circuit examples and calculations, a separate section is dedicated to the actual use of these types of supplies in power amps and the intricacies of peak and average current demand and regulation. The only thing I missed in this chapter was a discussion of synchronous rectification, which can help to further improve the power supply efficiency, especially in Class A amplifiers.

*Новым в **части 3** является полная глава «Импульсные источники питания» (глава 20). Почти 50 страниц всего, от типов импульсных источников питания (SMPS); режимы работы (например, непрерывный или прерывистый режимы); регулируемые и разомкнутые преобразователи; половинные, полные и синхронные преобразователи; фильтрация и подавление электромагнитных помех; и коррекция коэффициента мощности. После рассмотрения всех этих аспектов с примерами схем и расчетами, отдельный раздел посвящен фактическому использованию этих типов источников питания в усилителях мощности, а также тонкостям пикового и среднего потребления тока и регулирования. Единственное, что я пропустил в этой главе, — это обсуждение синхронного выпрямления, которое может способствовать дальнейшему повышению эффективности источника питания, особенно в усилителях класса А.*

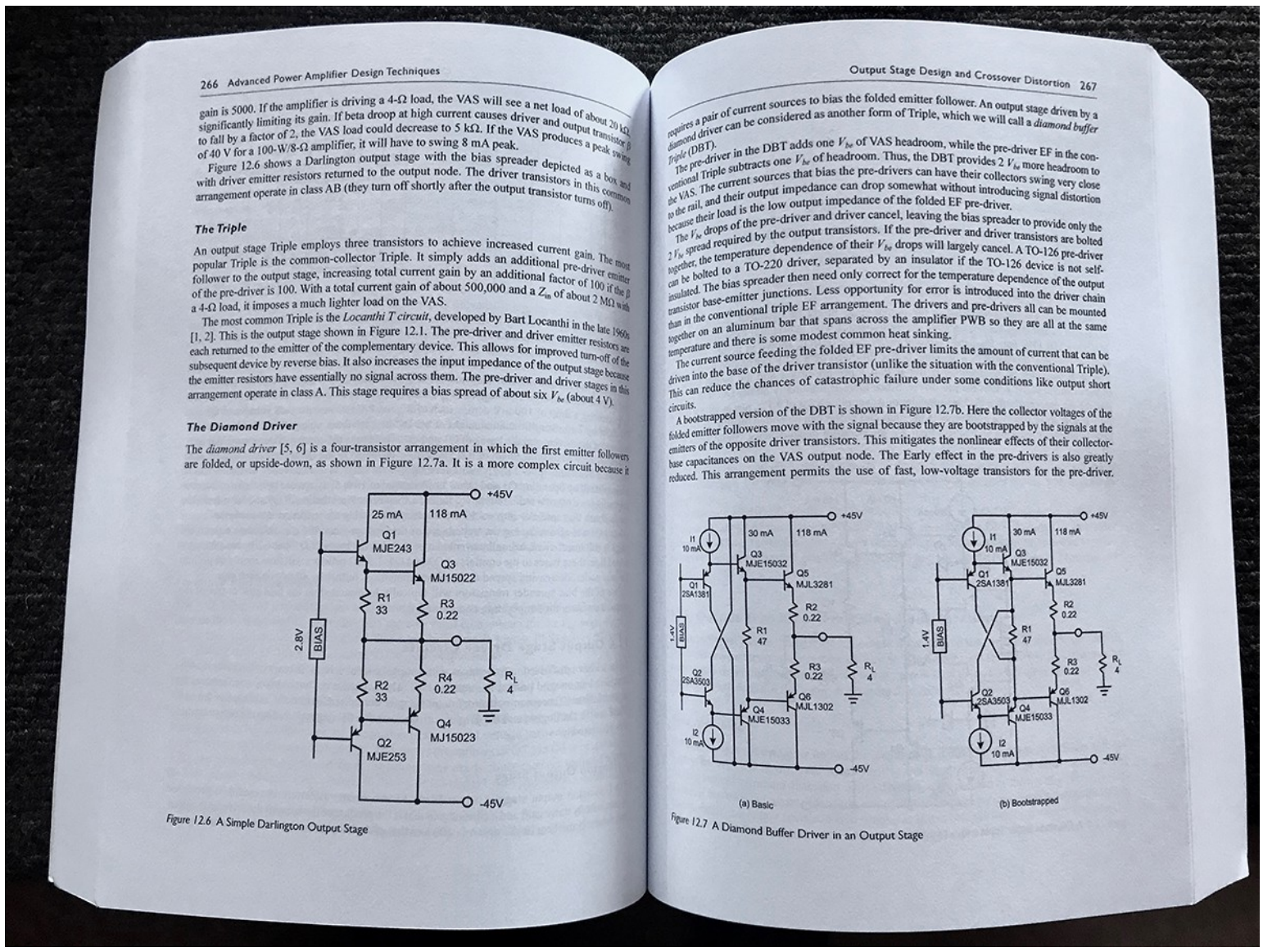


Figure 12.6 A Simple Darlington Output Stage

Figure 12.7 A Diamond Buffer Driver in an Output Stage

Schematics clearly illustrate Bob Cordell's designs as shown in this chapter on "Output Stage Design and Crossover Distortion."

Схемы ясно иллюстрируют конструкции Боба Корделла, как показано в этой главе «Проектирование выходного каскада и кроссоверные искажения».

Part 4

Part 4 is about "Simulation and Measurement," a logical combination since simulation is just measurement with other means. It starts off with two chapters on simulation, focusing on the freely available LTspice simulator originally from Linear Technology, now Analog Devices. Not just about how to make the best of the simulator itself, but also about device models, how to verify them, how to tweak them, and how to test them. This is of utmost importance because without realistic part models, a simulator is worse than useless. Cordell's website has many device models, which he himself has developed and tested.

Часть 4

Часть 4 посвящена «Моделированию и измерению», логической комбинации, поскольку симуляция — это просто измерение с помощью других средств. Он начинается с двух глав, посвященных моделированию, в которых основное внимание уделяется свободно доступному симулятору LTspice, созданному Linear Technology, а теперь Analog Devices. Не только о том, как максимально эффективно использовать симулятор, но и о моделях устройств, о том, как их проверять, настраивать и тестировать. Это крайне важно, потому что без реалистичных моделей деталей симулятор хуже, чем бесполезен. На сайте Корделла есть множество моделей устройств, которые он сам разработал и протестировал.

The sections on audio measurement are simply complete, discussing any test anyone would ever want to do on audio power amplifiers, and presents available stand-alone and PC-based test equipment. Over the years, Cordell has developed several purpose-built pieces of audio test equipment and the designs of these are available on his website www.cordellaudio.com.

Разделы, посвященные аудиоизмерениям, просто полны, в них обсуждаются любые тесты, которые кто-либо когда-либо захочет провести на усилителях мощности звука, и представлено доступное автономное тестовое оборудование и оборудование для тестирования на базе ПК. За прошедшие годы Корделл разработал несколько специализированных устройств для тестирования звука, и их конструкции доступны на его веб-сайте www.cordellaudio.com.

Part 5

"Topics in Amplifier Design" starts off with a sensitive discussion titled "The Negative Feedback Controversy." Here, Cordell does a very good job of

dispassionately discussing the pros and cons of (global and local) negative feedback. He counters the usual arguments, that feedback "comes too late to correct what has already happened," the "distortion goes around so grows every time" (which he calls "spectral growth"), and the other usual negative attributes with facts, figures, and reasoning. Not taking a stand, he just presents the facts and lets the reader draw the (often inescapable) conclusions.

Часть 5

«Темы проектирования усилителей» начинается с деликатного обсуждения под названием «Спор об отрицательной обратной связи». Здесь Корделл делает очень хорошую работу, беспристрастно обсуждая плюсы и минусы (глобальных и локальных) негативных отзывов. Он возражает обычным аргументам, что обратная связь «приходит слишком поздно, чтобы исправить то, что уже произошло», «искажение распространяется и растет с каждым разом» (что он называет «спектральным ростом») и другие обычные негативные атрибуты фактами, цифрами. , и рассуждения. Не занимая никакой позиции, он просто представляет факты и позволяет читателю сделать (часто неизбежные) выводы.

One chapter that personally interested me is about "Amplifiers Without Negative Feedback." Cordell is well aware of the sometimes heated controversy about this subject — some swearing by it, others eschewing it as it "kills the music." Sensibly, he does not choose sides (although those who know him, know where his preferences sit), but clearly and succinctly explains the design trade-offs and challenges in attempting to design an amplifier with no feedback. Emitter degeneration and compensation around the Vas can also be considered (local) feedback and Cordell doesn't use these types here either.

Одна глава, которая лично меня заинтересовала, посвящена «Усилителям без отрицательной обратной связи». Корделл хорошо осведомлен о жарких спорах по этому поводу — одни хвалят ее, другие избегают, поскольку она «убивает музыку». Разумно, он не выбирает чью-либо сторону (хотя те, кто его знает, знают, каковы его предпочтения), но ясно и кратко объясняет компромиссы конструкции и проблемы, возникающие при попытке разработать усилитель без обратной связи. Дегенерация эмиттера и компенсация вокруг VAS также могут считаться (локальной) обратной связью, и Корделл здесь тоже не использует эти типы.

If you have never tried such an exercise, this is a real eye-opener! Somewhat oddly, after presenting a complete no-feedback amplifier, the chapter ends with another complete design that does use feedback, but concentrates on a design sporting very large open-loop bandwidth, 40 kHz in this case.

Если вы никогда не пробовали такое упражнение, это настоящее открытие! Несколько странно, что после представления законченного усилителя без обратной связи глава заканчивается еще одной полной схемой, в которой используется обратная связь, но основное внимание уделяется конструкции с очень большой полосой пропускания без обратной связи, в данном случае 40 кГц.

New in **Part 5** is a chapter on "Professional Power Amplifiers" as can be found in sound reinforcement systems for performances. The requirements for such amplifiers are different enough from home sound system amplifiers to warrant a separate discussion. In professional amplifiers, it is all about reliability, high power with small size, and high efficiency. They normally have balanced inputs for low noise with long cables, and often include some form of DSP capability for advanced protection or to configure them for the task at hand.

*Новым в **части 5** является глава «Профессиональные усилители мощности», которые можно найти в системах звукоусиления для выступлений. Требования к таким усилителям достаточно отличаются от требований к усилителям домашней звуковой системы, поэтому требуют отдельного обсуждения. В профессиональных усилителях все зависит от надежности, большой мощности при малых размерах и высокой эффективности. Обычно они имеют симметричные входы для низкого уровня шума с длинными кабелями и часто включают в себя некоторую форму DSP-возможностей для расширенной защиты или для настройки их для конкретной задачи.*

Part 6

"Class D Amplifiers" is dedicated to the many aspects of Class D amplifiers and is a very complete overview of the technology and technical issues. Cordell starts with a discussion of basic audio Class D concepts, progressing to a chapter on design issues like filtering, sources of distortions, bus pumping and the specifics of closing a feedback loop around the output filter. Alternative Class D modulators and the requirements for measuring the performance and efficiency of Class D amplifiers round out the chapter, the part, and indeed the book.

Часть 6

Раздел «Усилители класса D» посвящен многим аспектам усилителей класса D и представляет собой очень полный обзор технологии и технических вопросов. Корделл начинает с обсуждения основных концепций аудио класса D, переходя к главе, посвященной вопросам проектирования, таким как фильтрация, источники искажений, накачка шины и особенности замыкания контура обратной связи вокруг выходного фильтра. Альтернативные модуляторы класса D и требования к измерению производительности и эффективности усилителей класса D завершают главу, часть и даже книгу.

The Upshot

So there you have it. There is so much in this book that our review can only scratch the surface, but you can think of any subject in power amp design and be sure that somewhere within its pages Cordell explains it and tells you how to get the best out of it. Almost 800 pages is A Lot!

Итог

Итак, у вас есть это. В этой книге так много всего, что наш обзор может только коснуться поверхности, но вы можете подумать о любой теме проектирования усилителей мощности и быть уверенными, что где-то на ее страницах Корделл объяснит это и расскажет, как извлечь из этого максимальную пользу. Почти 800 страниц - это много!

I should also mention each chapter concludes with an extensive list of reference articles and papers. These are invaluable, allowing one to dig deeper into the relevant topics. Many of these references are freely available on the Internet and on Cordell's own website. What remains now is to answer the question we posed at the beginning: does this second edition meet or exceed the very high standard set by the first edition back in 2011? I'd say it does.

Я должен также упомянуть, что каждая глава завершается обширным списком справочных статей и статей. Они бесценны, позволяя глубже погрузиться в соответствующие темы. Многие из этих ссылок находятся в свободном доступе в Интернете и на собственном веб-сайте Корделла. Теперь остается ответить на вопрос, который мы поставили в начале: соответствует ли это второе издание очень высокому стандарту, установленному первым изданием еще в 2011 году, или превосходит его? Я бы сказал, что да.

Cordell has clearly listened to the comments and suggestions of his readers. Existing sections are expanded, concepts clarified, new material added, to the point where it has become a one-stop shop for the serious audio power amp designer.

Корделл явно прислушивался к комментариям и предложениям своих читателей. Существующие разделы расширены, концепции прояснены, добавлены новые материалы до такой степени, что он стал универсальным магазином для серьезного разработчика аудио усилителей мощности.

The book is not cheap, edging up to the $100 mark, but really, with a book like this, the price is only of limited relevance. You just can't get around it if you are serious about audio power amplifier design. You need it. Period. **AX**

Книга недешевая, доходит до отметки в 100 долларов, но на самом деле для такой книги цена имеет лишь ограниченное значение. Вы просто не можете обойти это, если вы серьезно относитесь к конструкции усилителя мощности звука. Вам это нужно.

Примечание. Судя по презентации усилителя BC-1 (см. ссылку ниже) в книге нет ничего нового, так как усилитель не что иное как типовой усилитель Дугласа Селфа с типовой коррекцией Миллером и умощненным ВК.

Resources

J. Didden, "Dynamic Measurement of Power Amp Quiescent Current—Instrumentation and Findings," Linear Audio, Volume 8, April 1, 2015.

Designing Audio Power Amplifiers, 2nd Edition
By Bob Cordell
Focal Press, June 2019
Paperback, 772 pages
ISBN 978-1138555440

This review was originally published in audioXpress, October 2019.
Этот обзор был первоначально опубликован в audioXpress в октябре 2019 года.

Презентацию этого усилителя можно посмотреть здесь:
https://www.youtube.com/watch?v=UxTmGzg-1rg

Bob Cordell BC 1 BAF 2019 Final
Bob Cordell discusses the inner workings of his BC-1 amp at Burning Amp 2019
Боб Корделл обсуждает внутреннюю работу своего усилителя BC-1 на Burning Amp 2019.

BC-1 Featured Improvements

- current mirror load with “helper” transistor
- clamping diodes on IPS output
- 2-transistor (2T) VAS
- locanthi T-circuit 3-EF output stage
- fast output transistors
- high driver bias current
- dual Vbe multipier bias speader
- “natural” current limiting
- comprehensive protection circuit

Избранные улучшения BC-1
- токовая зеркальная нагрузка с «вспомогательным» транзистором
- защитные диоды на выходе IPS *(сомневаюсь что эти диоды будут когда либо работать в реальности)*
- 2-транзисторный (2T) УН *(это решение использовалось практически с самого начала развитя схемотехники)*
- выходной каскад Locanhi T-схема 3-EF («тройка» Дарлингтона) — *типовой ВК*
- быстродействующие выходные транзисторы *(другие сегодня никто и не ставит на выходе, хотя Lynx (и не только он) отмечал что более низкочастотные типа MJL21193/MJL21194 по звуку лучше)*
- высокий ток смещения драйвера *(7,7 мА; типовое значение обычно от 6 до 12 мА)*
- двойное динамическое смещение в умножителе Vbe *(такое решение использовал John Curl с первых своих разработок)*
- «естественное» ограничение тока
- комплексная схема защиты

Основные параметры:

wide frequency response: 1 Hz – 400 kHz *(этого недостаточно для нормального воспроизведения меандра частотой 20 Гц. 400 кГц по сути уже пила)*
clean 10 kHz square: 1,2 uS, no ringing
high slew rate: 50 V/uS
THD-1 < 0,001%, 1W … 100W 8 and 4 ohm
THD-20 < 0,004%, 1W … 100W 8 (0,008% 4 ohm)
S/N 100 dB, A-weighted, 9nV/√Hz input referred
damping factor > 200 to 2 kHz, 45 at 20 kHz
high output current: > 400W burst into 2 ohm

широкий частотный диапазон: 1 Гц – 400 кГц (-3 дБ) *(в малосигнальном режиме)*
чистый меандр 10 кГц: 1,2 мкс, без звона
высокая скорость нарастания: 50 В/мкс (по мнению Джона Керла хороший усилитель должен иметь SR как минимум вдвое выше)
THD-1 < 0,001%, 1Вт … 100Вт 8 и 4 Ом
THD-20 < 0,004 %, 1 Вт … 100 Вт 8 (0,008 % 4 Ом)
Отношение сигнал/шум 100 дБ, А-взвешенное, относительный вход 9 нВ/√Гц
коэффициент демпфирования > 200 до 2 кГц, 45 при 20 кГц *(следствие низкой частоты первого полюса — ниже 10 Гц)*
высокий выходной ток: > 400 Вт на 2 Ом

от себя добавлю:

Переменное напряжение синусоидальной формы можно представить с помощью вектора постоянной величины вращающегося с постоянной угловой скоростью. Сложение синусоидальных сигналов одной частоты сдвинутых во времени (также как и вычитание) не ведет к нелинейным искажениям в установившемся режиме — возникают только линейные искажения: изменяется амплитуда суммарного сигнала и его фаза. Искажения формы суммарного сигнала происходят только в начале и конце бурста, если складывать сигналы в виде бурстов.

Искажения в усилителях связанные с задержкой возникают всякий раз в моменты изменения как амплитуды вектора, так и частоты его вращения (угловой скорости вращения вектора), то есть в моменты изменения dV/dt отличные от синусоидального напряжения.

Звуковой сигнал не является синусоидальным, ноты разных инструментов имеют одну основную частоту настройки, но имеют разный набор гармоник вплоть до 18-ти. Из них первые 7...9 гармоник являются наиболее важными для формирования тембра. Каждая гармоника должна иметь свою амплитуду и быть строго на своем месте.

Известно что магнитная запись ноты одного инструмента звучит по разному при воспроизведении в прямом и обратном напрявлении, хотя и содержит один и тот же спектр.

Даже незначительные изменения группового времени задержки (tPD) приводят не просто к задержке выходного сигнала во времени (как это кажется на первый взгляд), но и к изменениям его структуры — к тонким изменениям как амплитуды отдельных гармонических составляющих сигнала, так и их фазы, к появлению новых гармонических составляющих. Особенно это касается высших гармоник к которым слух наиболее чувствителен.

По моим понятиям время задержки прохождения сигнала не должно превышать 100...130 нс. Только в этом случае есть шанс иметь малые скоростные искажения (или даже их полное отсутствие как в легендарном усилителе JLH-69). Скоростные искажения не что иное как смазывание мелких деталей звукового материала. Как бы не были малы искажения на синусоидальном сигнале, но если ГВЗ более 100 нс (чем больше тем хуже), то звук становится просто «мертвым» или стерильным от слова «кастрированным».

Именно задержка прохождения сигнала оказывает наибольшее влияние на качество звука. Это наглядно показал Боб Карвер

(https://www.stereophile.com/content/carver-challenge), который с помощью теста Дэвида Хафлера SWDT приблизил характеристики транзисторного усилителя к характеристикам лампового и тем самым сделал их качество звука идентичным. Он показал что если векторные погрешности во всем звуковом диапазоне не превышают -60 дБ, то не имеет значения на каких активных компонентах сделан усилитель: на лампах или на транзисторах.

Я убежден что для разработчика аудиоусилителей основным эталоном должен быть нормализованный входной сигнал (приведенный по уровню к выходному). При этом во всем звуковом диапазоне выходной сигнал разработанного усилителя должен отвечать требованиям теста SWDT. Только в этом случае будет достигнуто высокое качество звука. Нетрудно подсчитать какова должна быть задержка прохождения сигнала для выполнения этого условия (формулы для расчета приведены в книге Достала «Операционные усилители»).

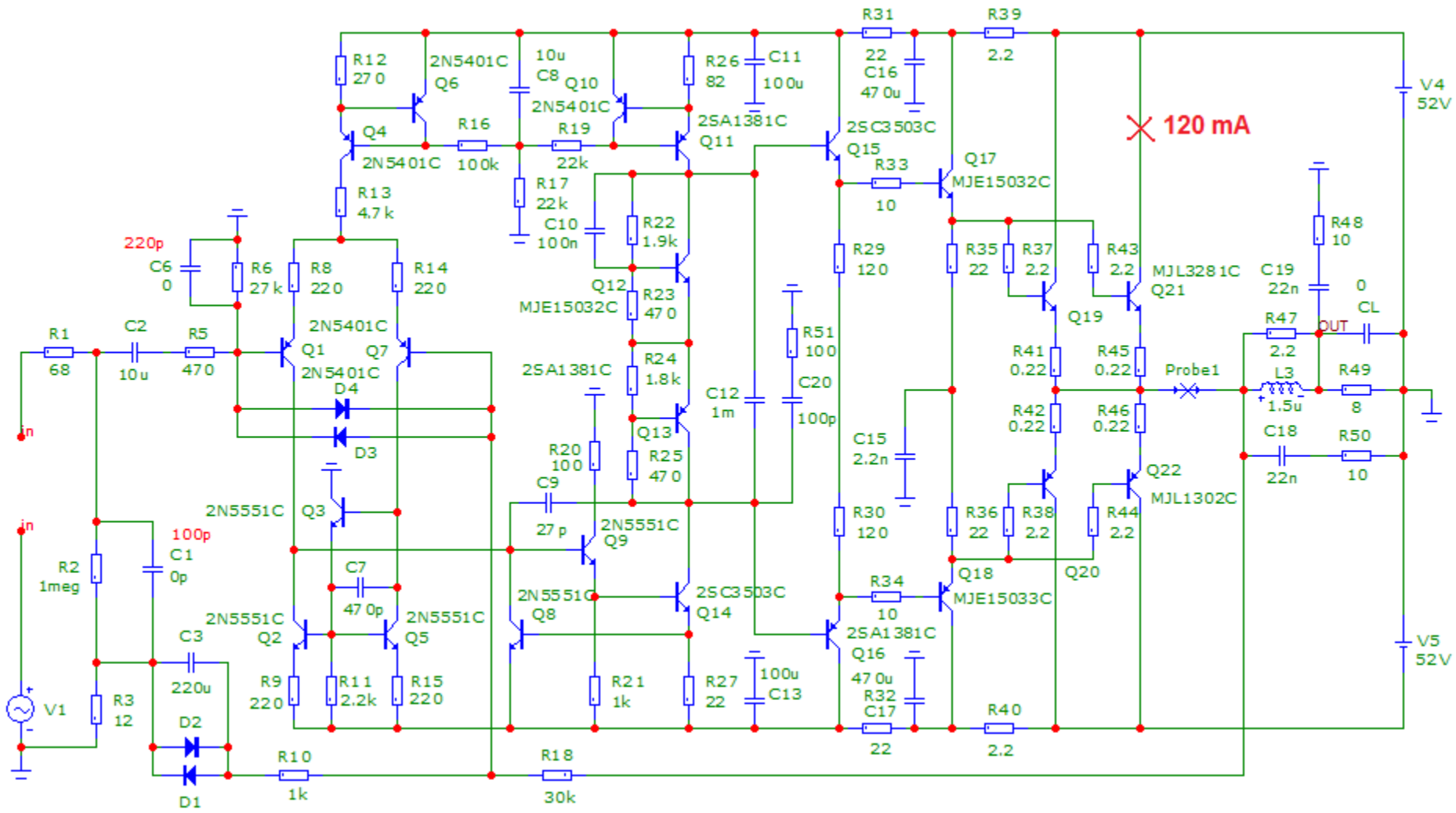
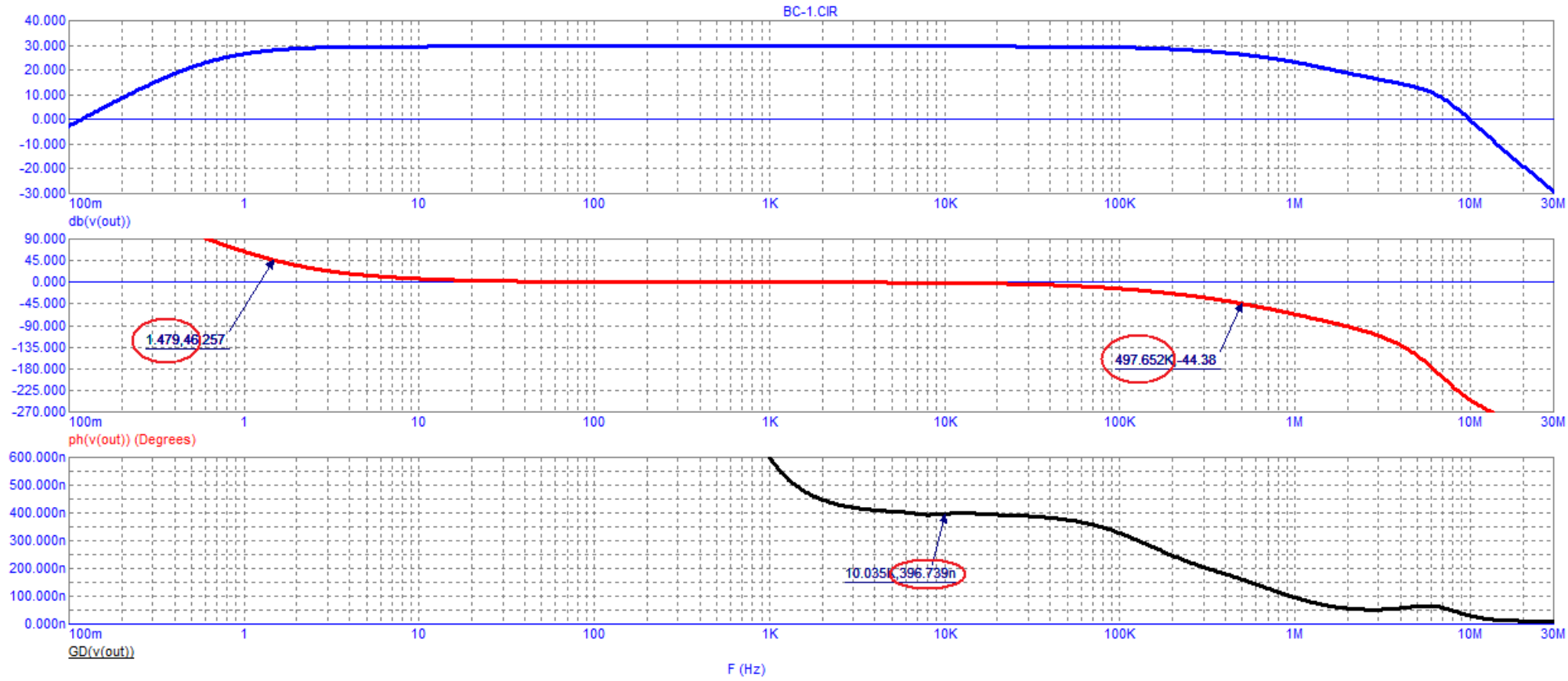


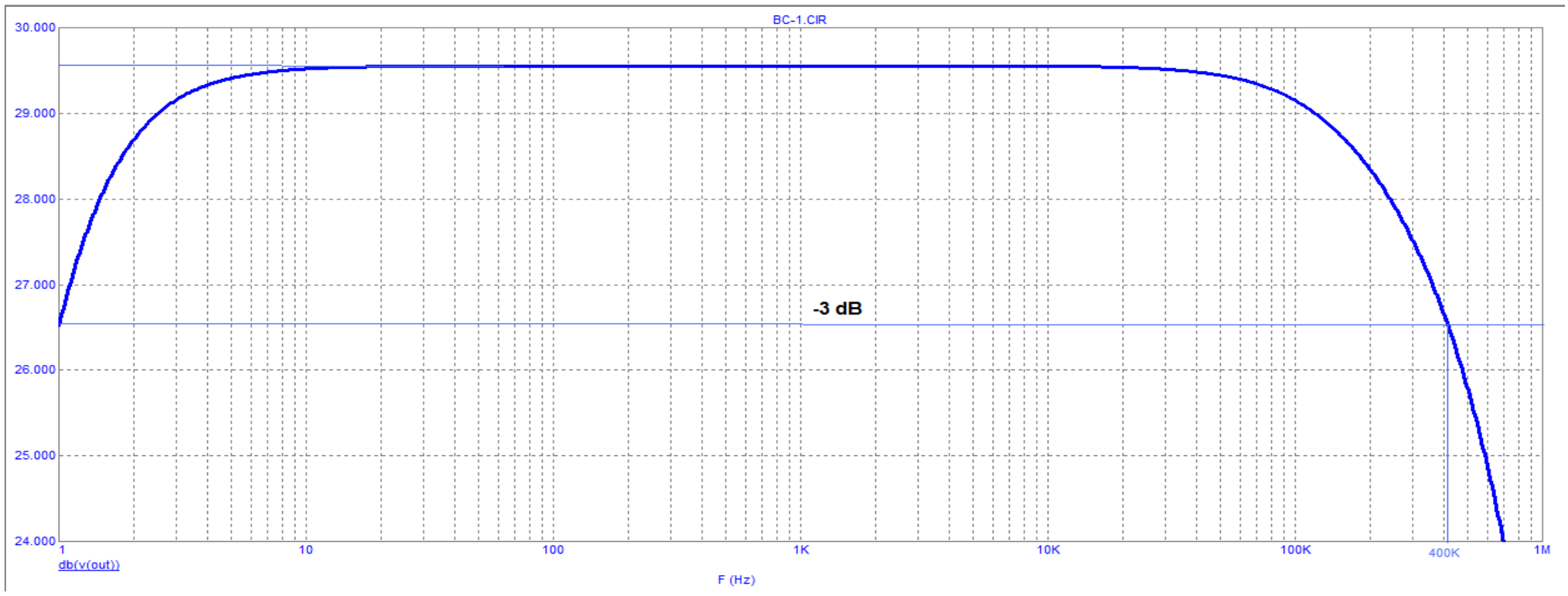
Схема принципиально не отличается от типовой схемы Дугласа Селфа, за исключением умощненного ВК, Странно что к этой схеме надо было идти всю жизнь.

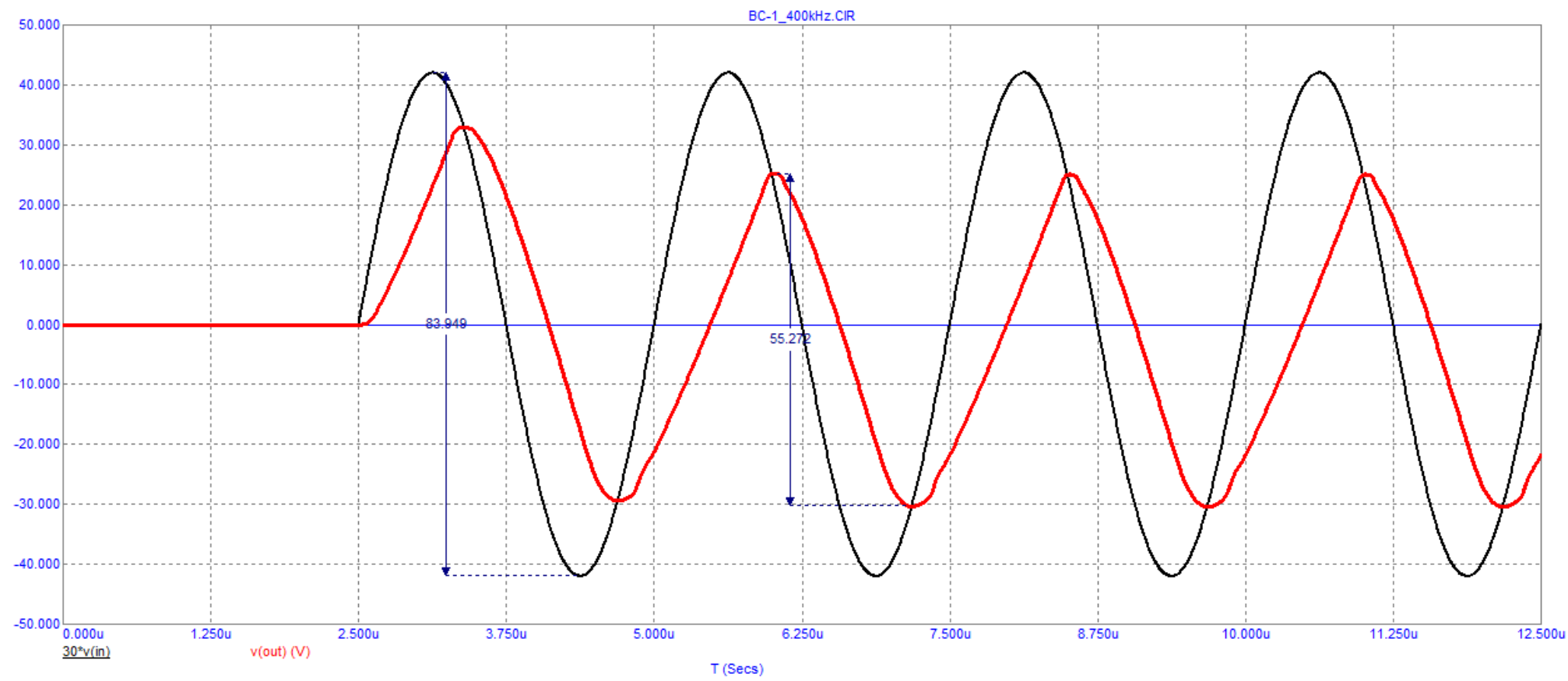


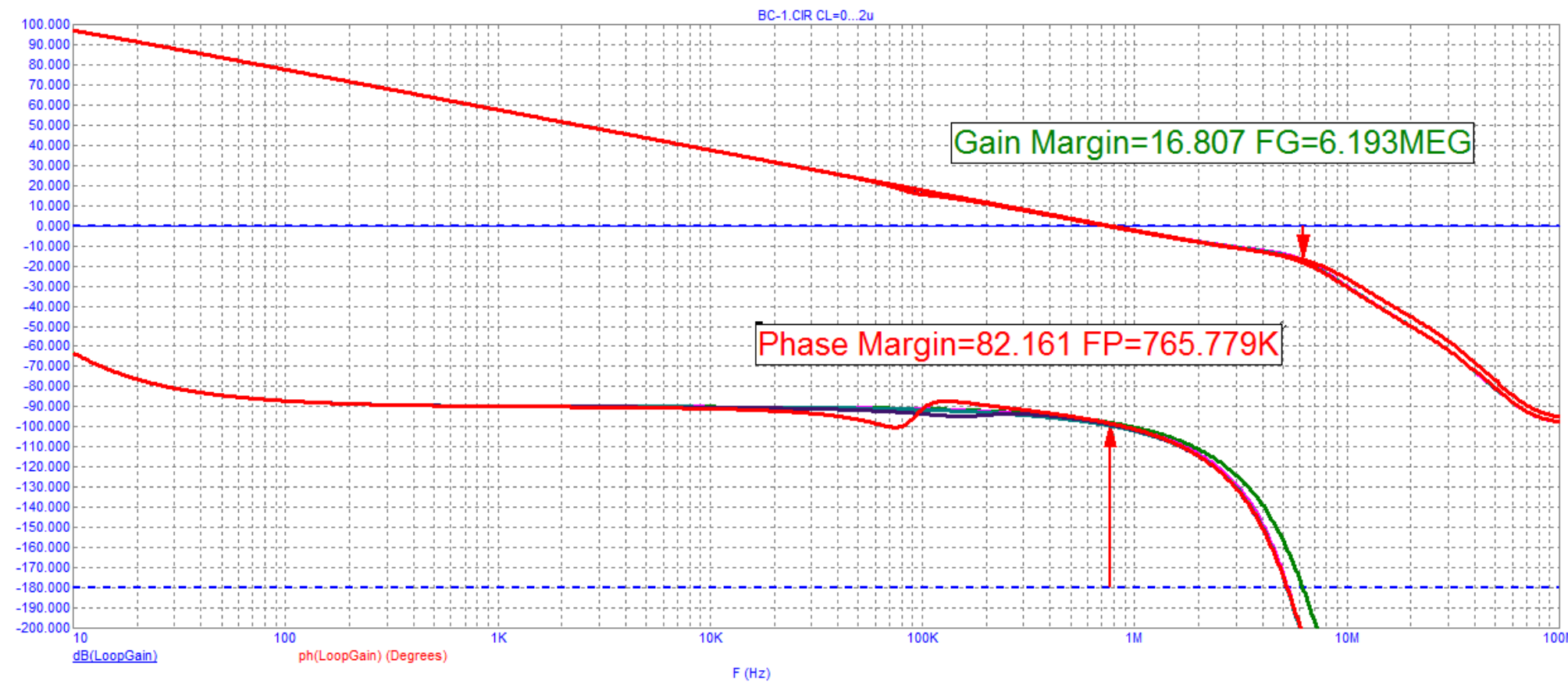
малосигнальная полоса равна 500 кГц, но на нагрузке 8 Ом на частоте 400 кГц по сути уже пила

Задержка прохождения сигнала без C1 и C6 почти 400 нс что в 4 раза выше предельно допустимого уровня для референсных усилителей

Если измерять на уровне -3дБ то получим малосигнальную полосу в соответсвии с заявленной автором: 1 Гц — 400 кГц. Правда на частоте 400 кГц уже есть признаки TIM-искажений во всей красе.



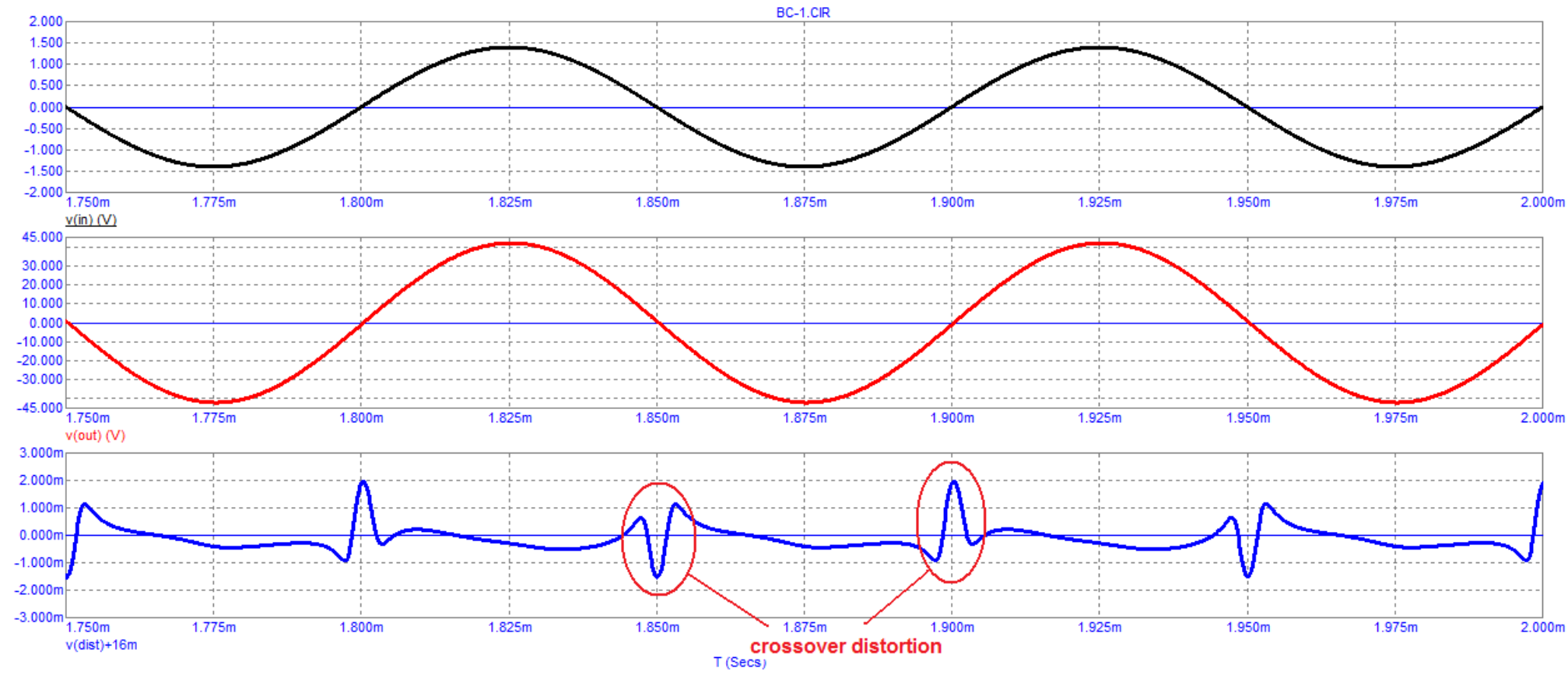




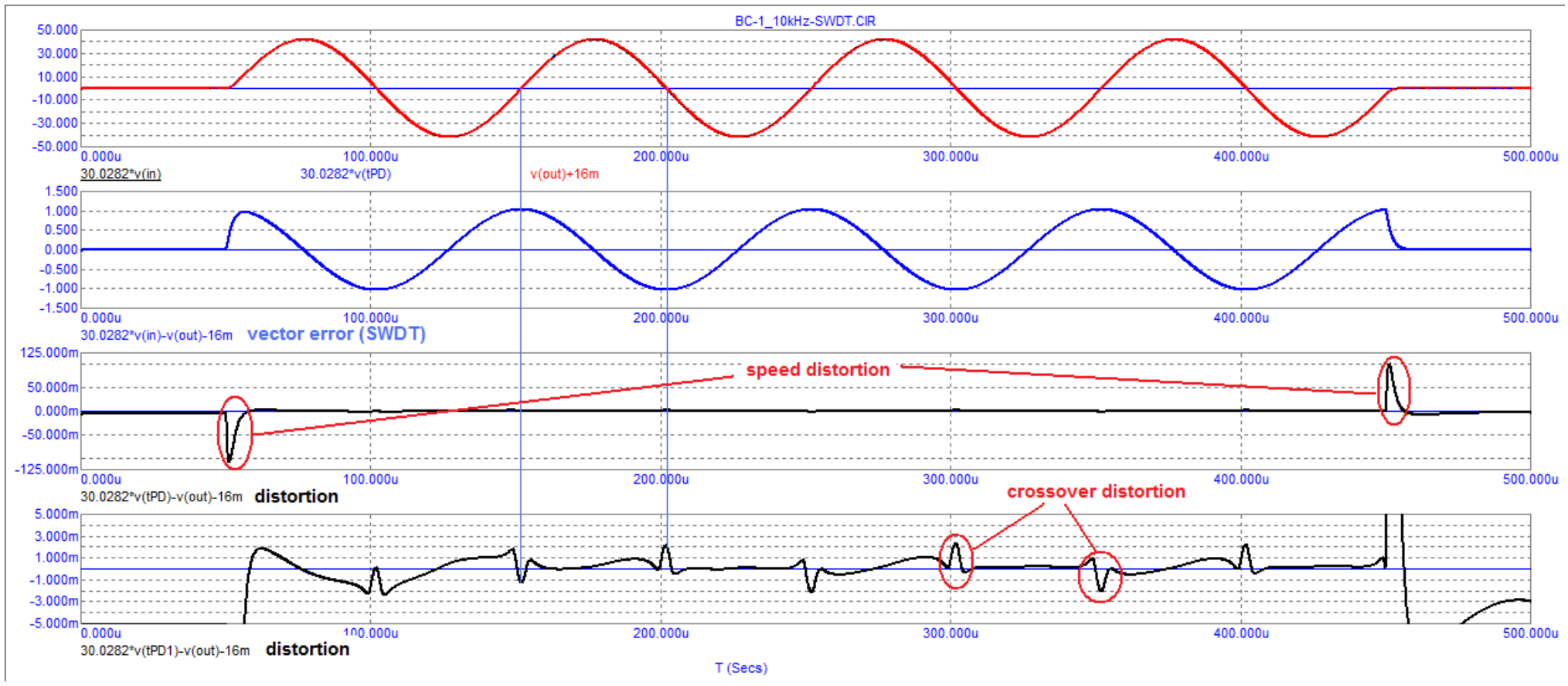
Петлевое усиление на частоте 20 кГц всего 30 дБ
На реактивной нагрузке (до 2 мкФ) модель достаточно устойчива

Разное петлевое усиление и фазовый сдвиг на 90 градусов негативно сказывается на выходном сопротивлении усилителя — его импеданс

носит индуктивный характер. Выходное сопротивление также сдвинуто на 90 градусов во всем звуковом диапазоне и оно не в состоянии адекватно реагировать на быстрые изменения формы сигнала внешнего воздействия, наиболее сильно проявляется на сигналах импульсного характера.



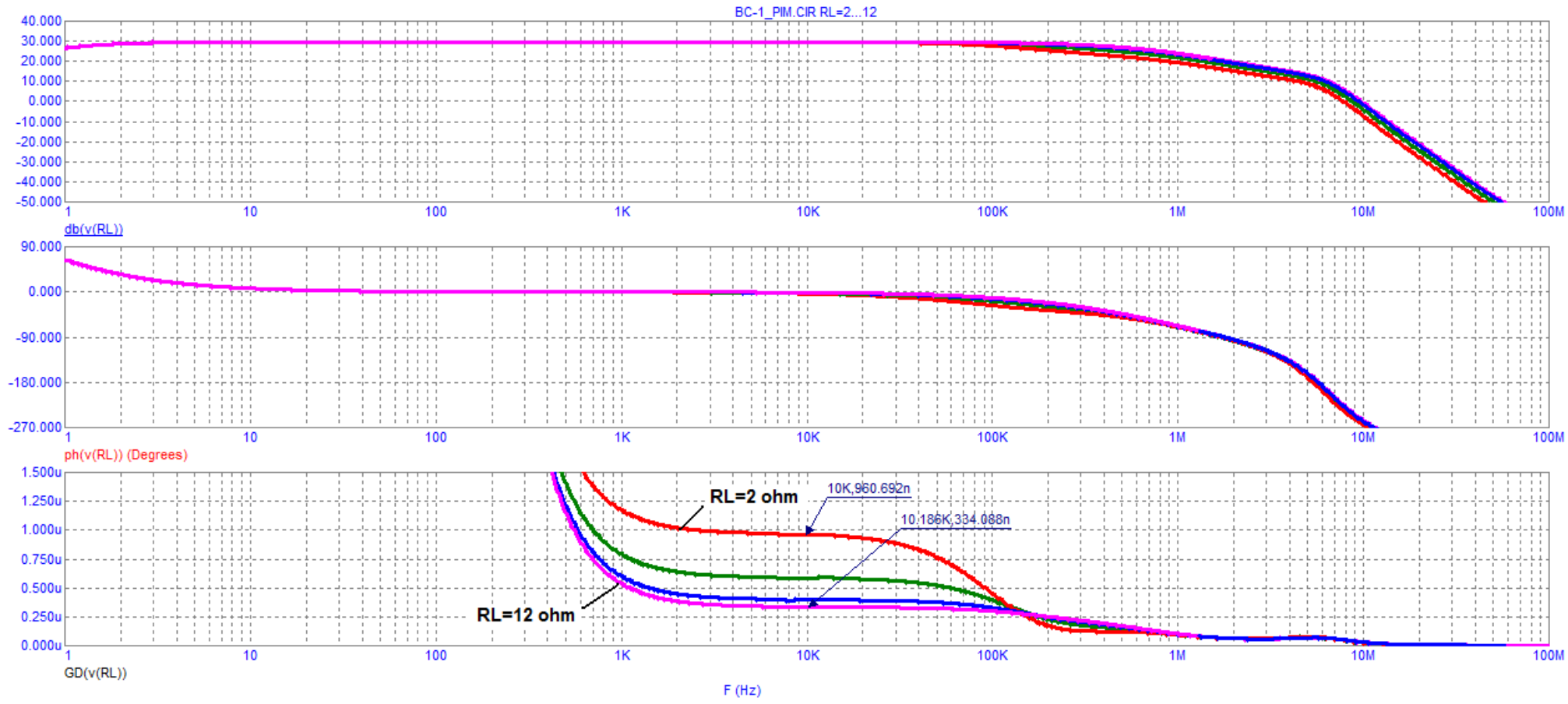
На частоте 10 кГц в спектре в основном коммутационные искажения. Это и не удивительно. Из-за большой задержки прохождения сигнала и больших резисторов в эмиттерах транзисторов ВК (по 0,22 Ома) ООС не справляется с коммутационными искажениями.



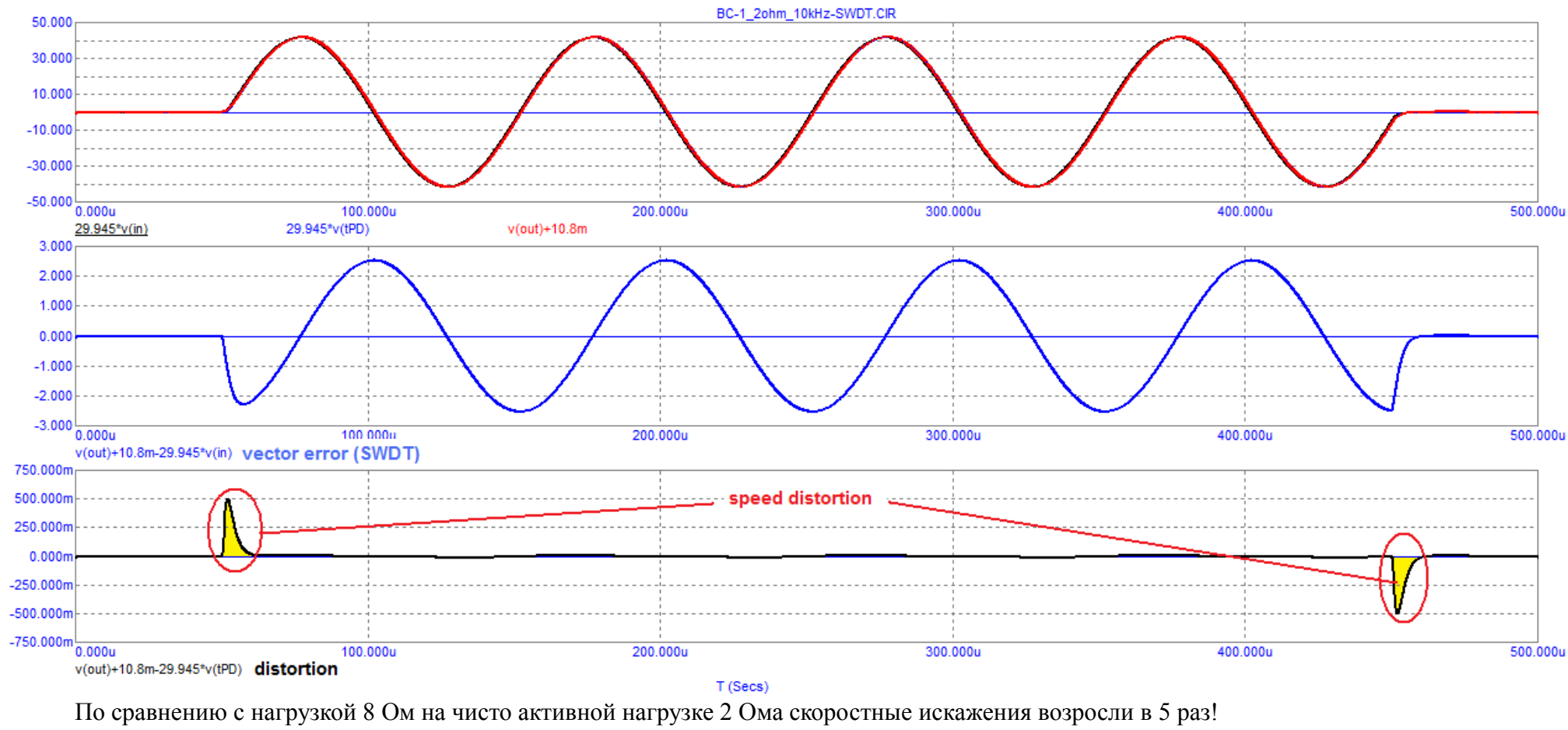
По Хафлеру векторная погрешность на частоте 10 кГц должна быть не более -60 дБ (ослабление в 1000 раз), т. е. векторная погрешность не должна превышать 42 В/1000 = 42 мВ. На самом деле имеем в 25 раз больше.

Скоростные искажения более 100 мВ! или 0,24% что много выше нелинейных искажений на синусе в установившемся режиме (0,001%).

В 80-х годах прошлого века Боб Кордел опроверг теорию возникновения фазовой модуляции (PIM) выдвинутую Матти Отала и Джоном Керлом и не допустил публикации их материалов в AES. Но попробуем разобраться так ли это на самом деле. В параметрах на усилитель ВС-1 автор указывает высокую нагрузочную способность усилителя и способность работать на нагрузку 2 Ома. Снимем диаграмму Боде с разными нагрузками

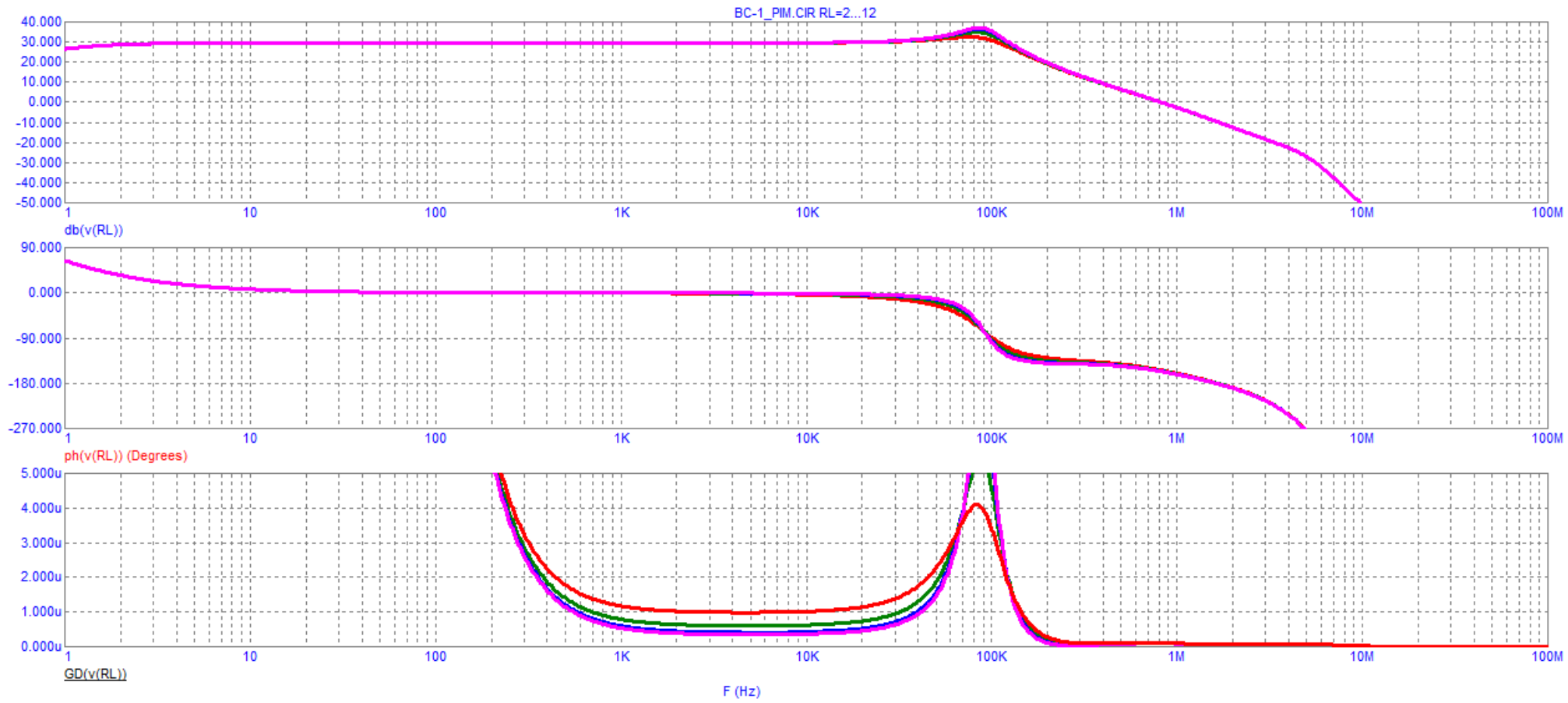


Из диаграммы Боде видно что при просадке сопротивления нагрузки ГВЗ возрастает в 3 раза. Мы видим девиацию ГВЗ (задержки прохождения сигнала), что же это как не фазовая модуляция. Посмотрим как это скажется на скоростных искажениях



По сравнению с нагрузкой 8 Ом на чисто активной нагрузке 2 Ома скоростные искажения возросли в 5 раз!

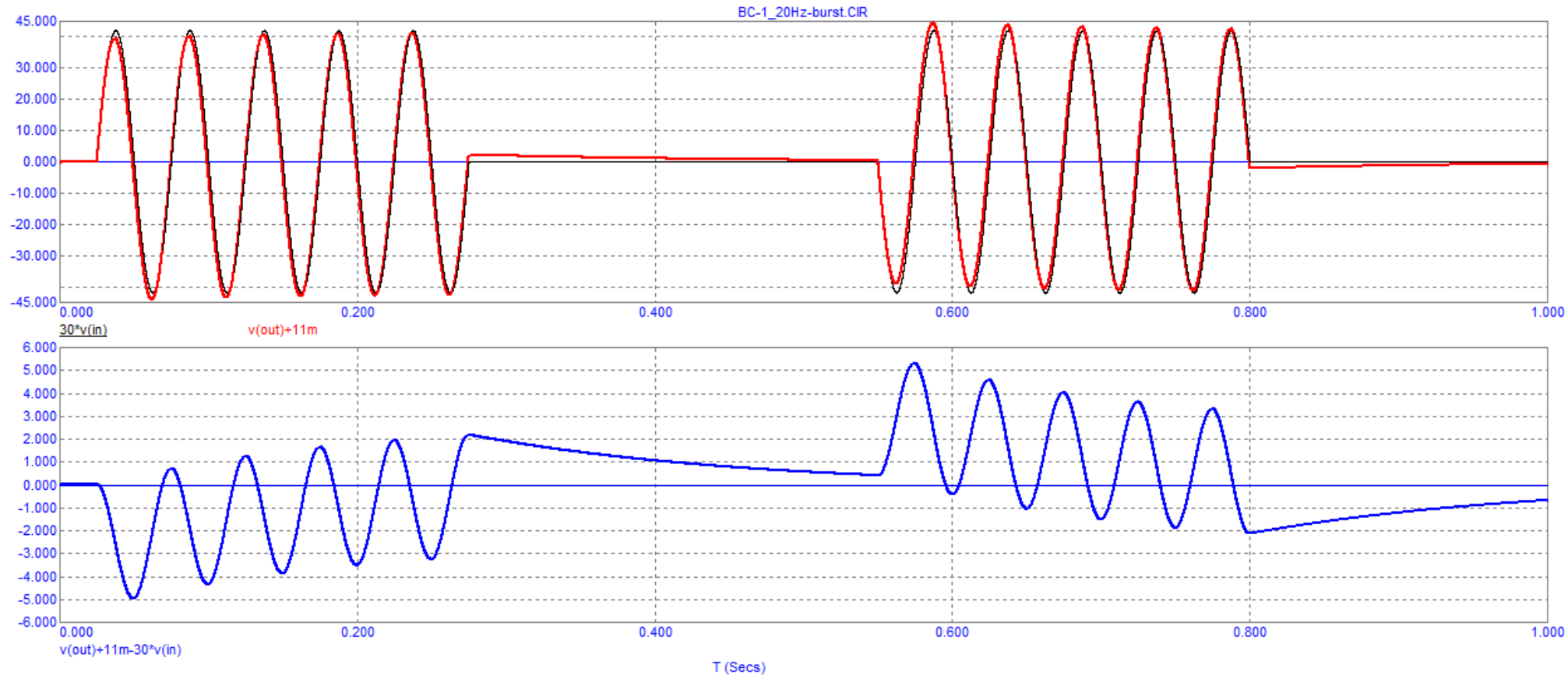
Известно что реальная нагрузка обладает сложным импедансом, в том числе и реактивным. Посмотрим как будет вести себя усилитель с дополнительной реактивной нагрузкой 2 мкФ



Из диаграммы Боде видно что добавление реактивной нагрузки многократно увеличивает ГВЗ на частоте резонанса (выходной

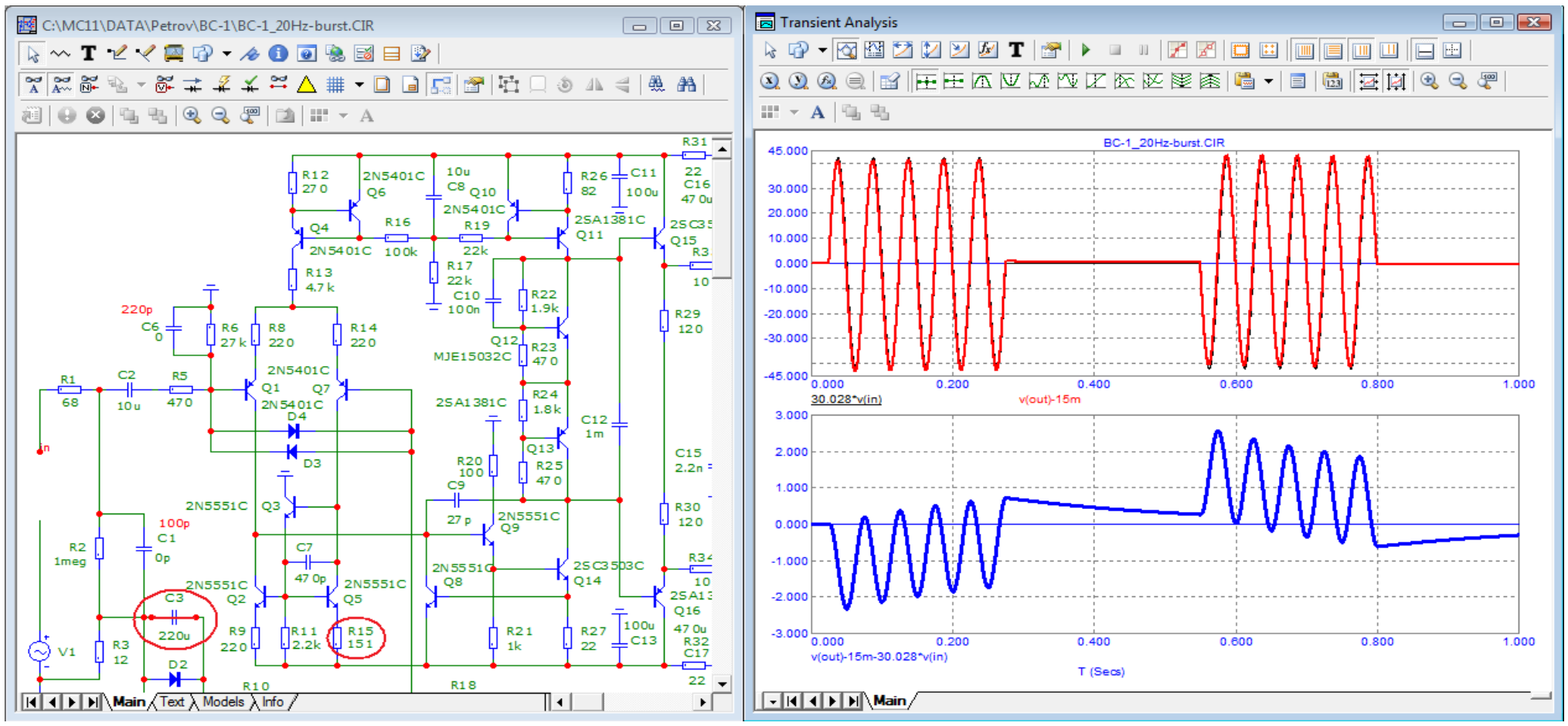
индуктивный импеданс — емкостной импеданс нагрузки) что приведет к еще большим колебаниям скоростных искажений.

Поэтому говорить о референсном усилении звуковых сигналов не приходится **(какие бы дифирамбы не пел Корделлу Ян Дидден).**

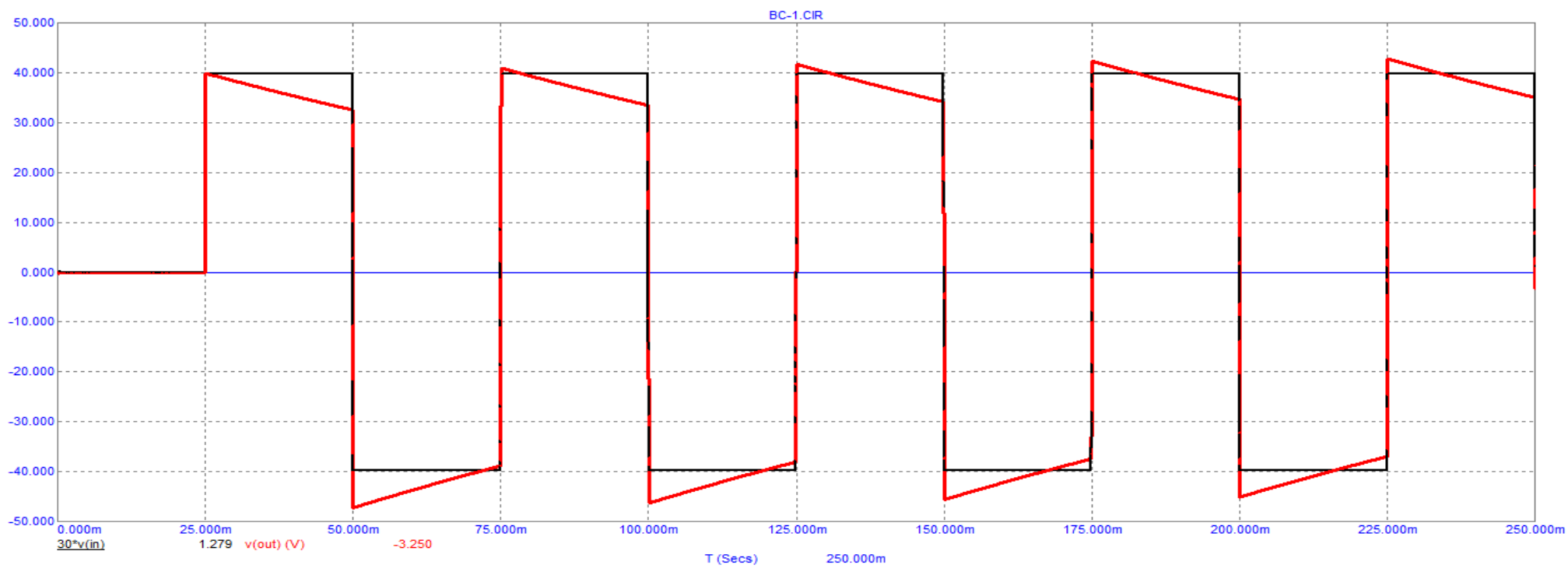


Постоянка летает плюс минус 2,5 В! В то время как по мнению «золотоухих» более 25 мВ уже слышно

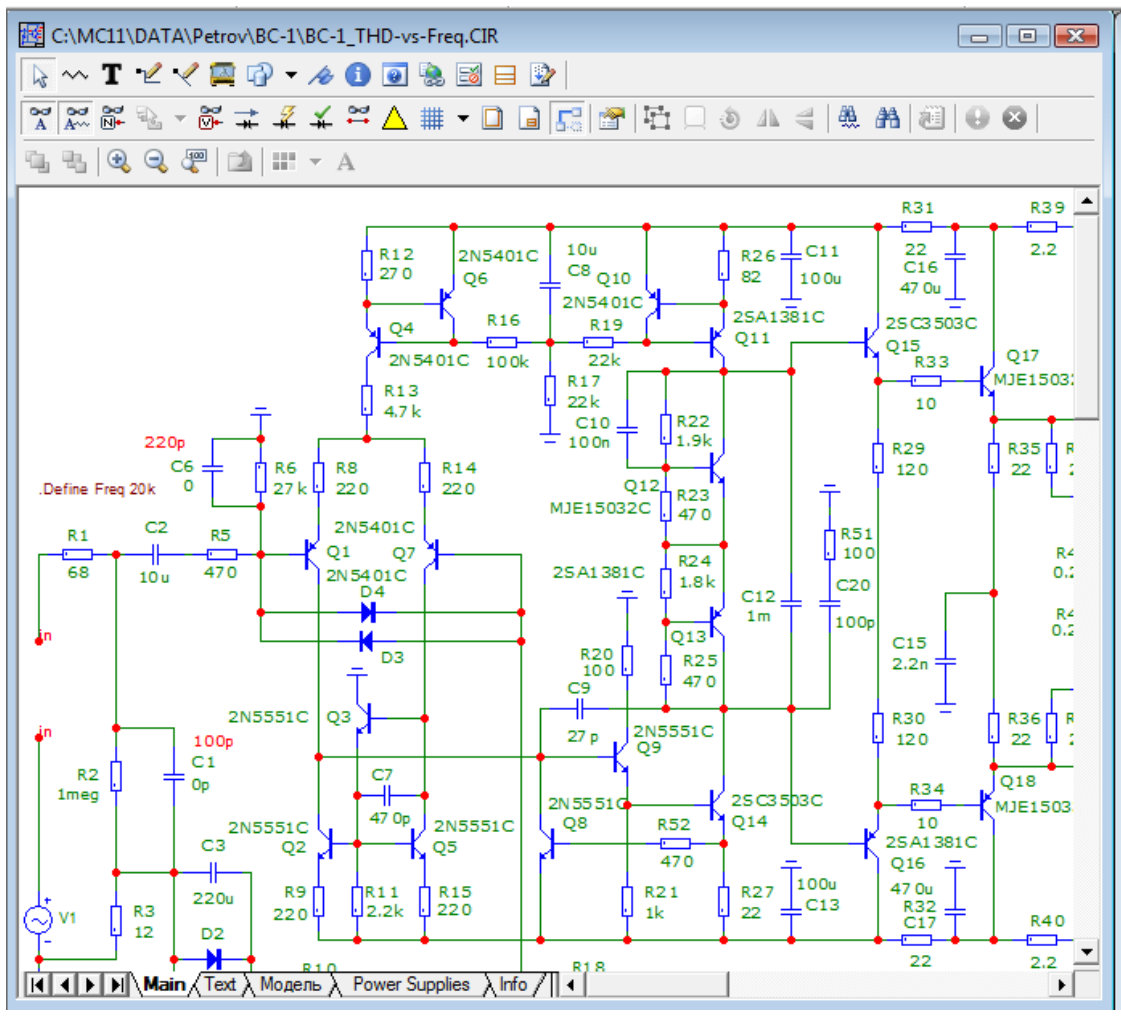
Удаление конденсатора в цепи ООС позволяет уменьшить болтанку почти в 2,5 раза. Именно так и поступили разработчики ряда усилителей Harman Kardon (HK660, HK680, HK870 и другие).

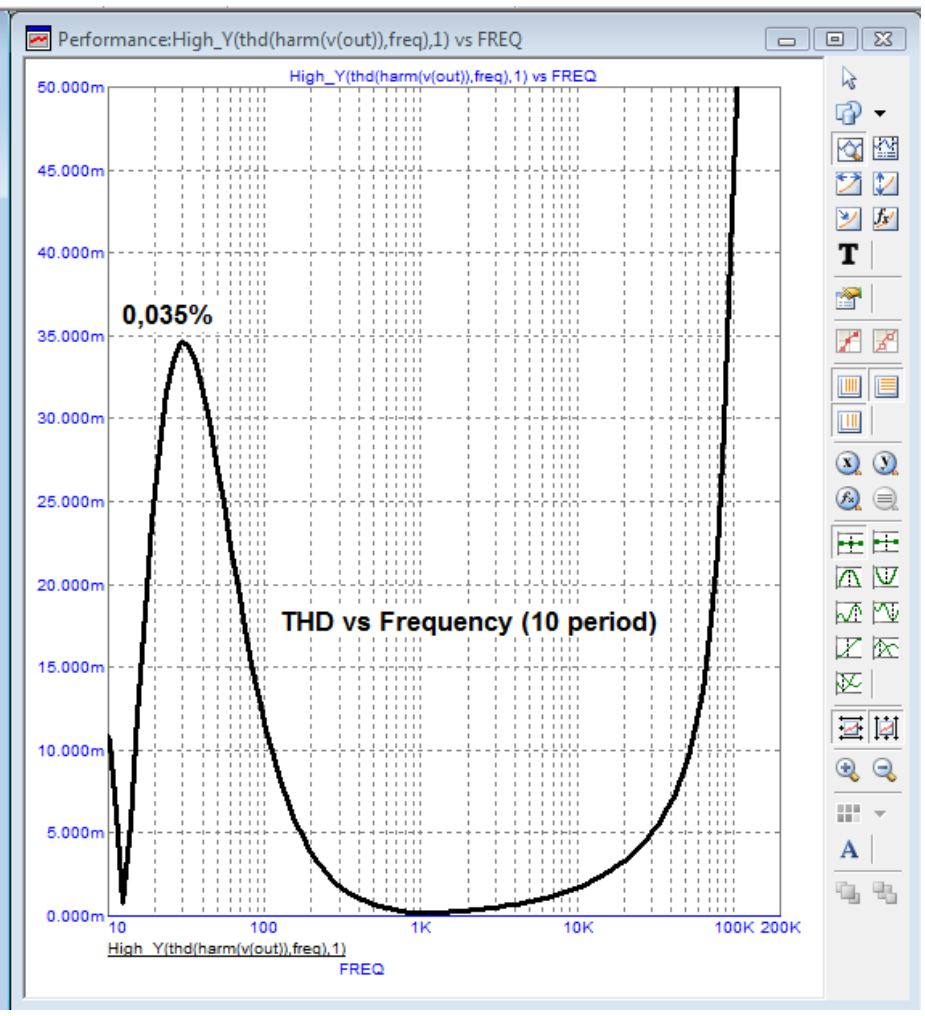


Полосы снизу 1 Гц недостаточно чтобы нормально, без существенных искажений формы сигнала, воспроизводить меандр частотой 20 Гц.

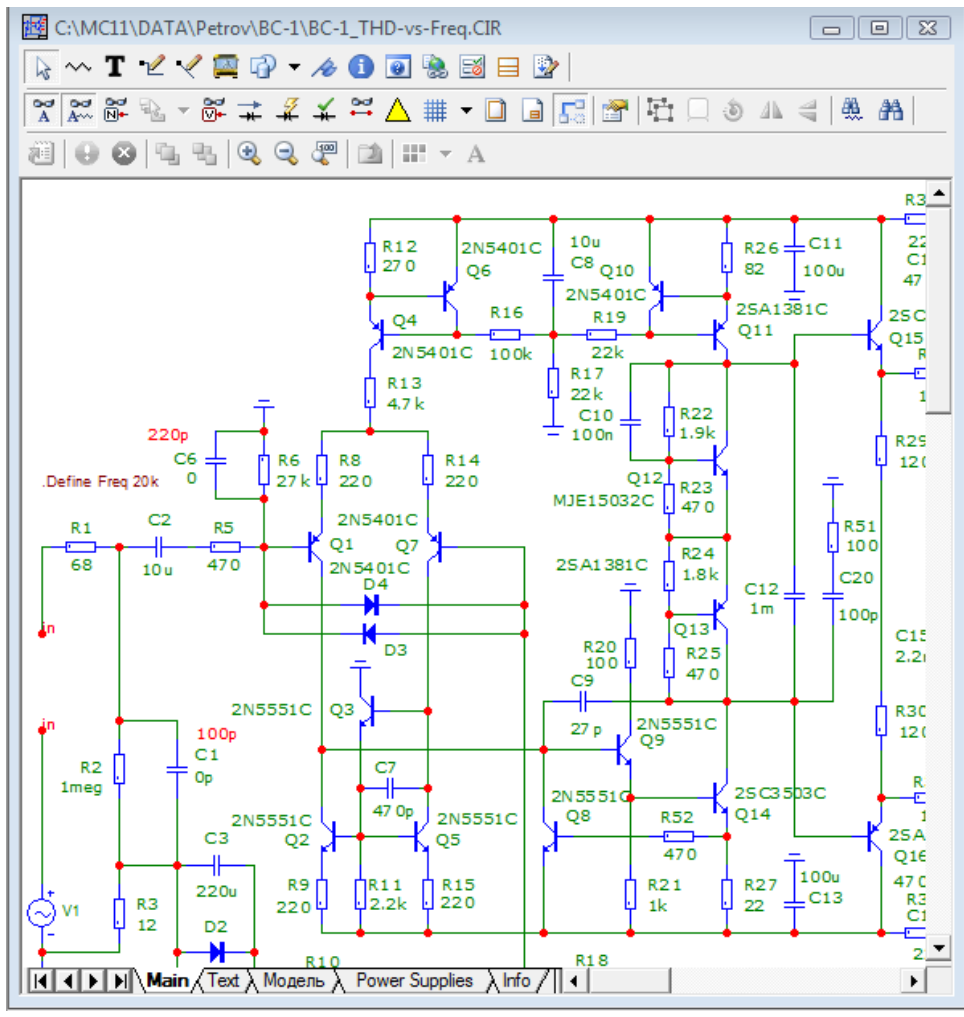


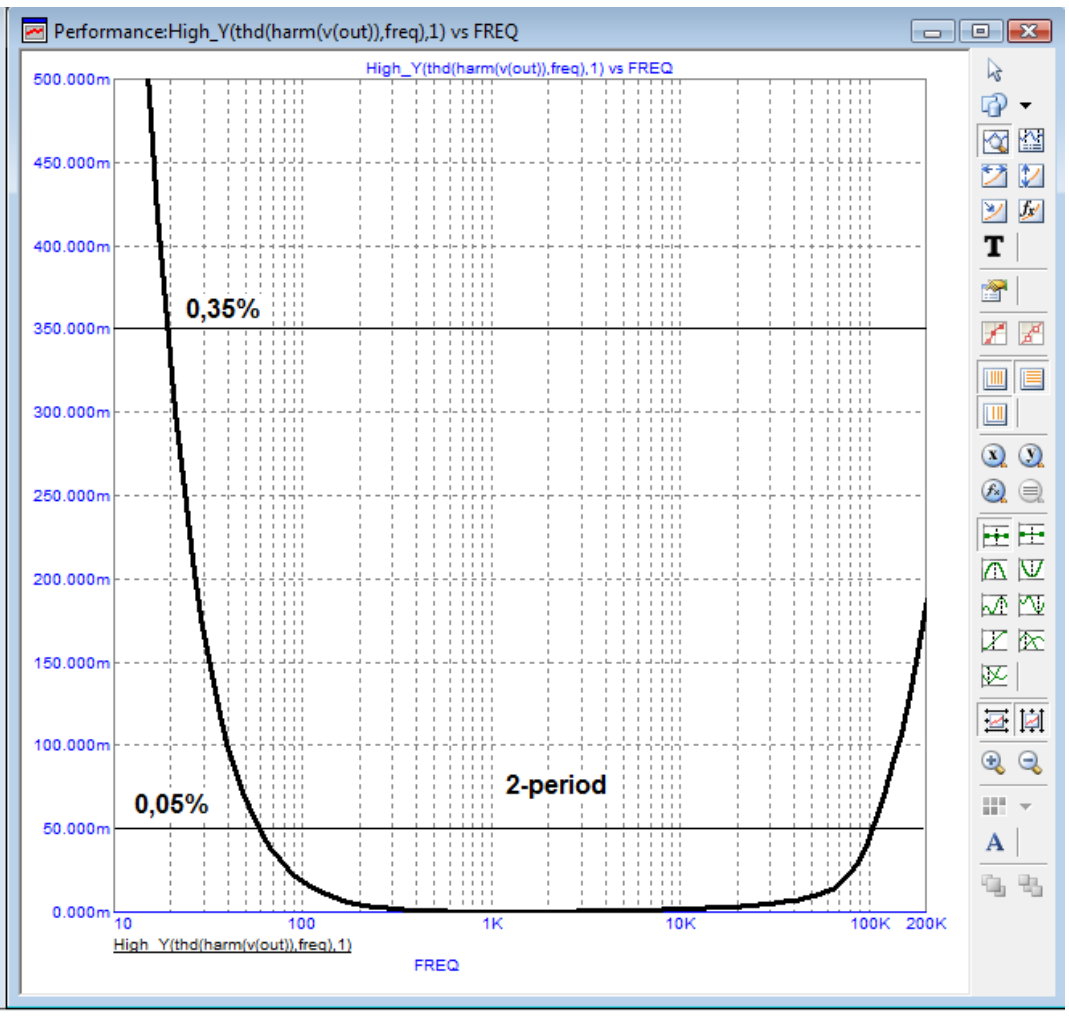
Измерим зависимость общих гармонических искажений от частоты на 10-м периоде





Минимальные искажения на частоте 1 кГц, выше и ниже этой частоты искажения растут. На первых периодах уровень искажений еще выше. Искажения малы только в установившемся режиме.

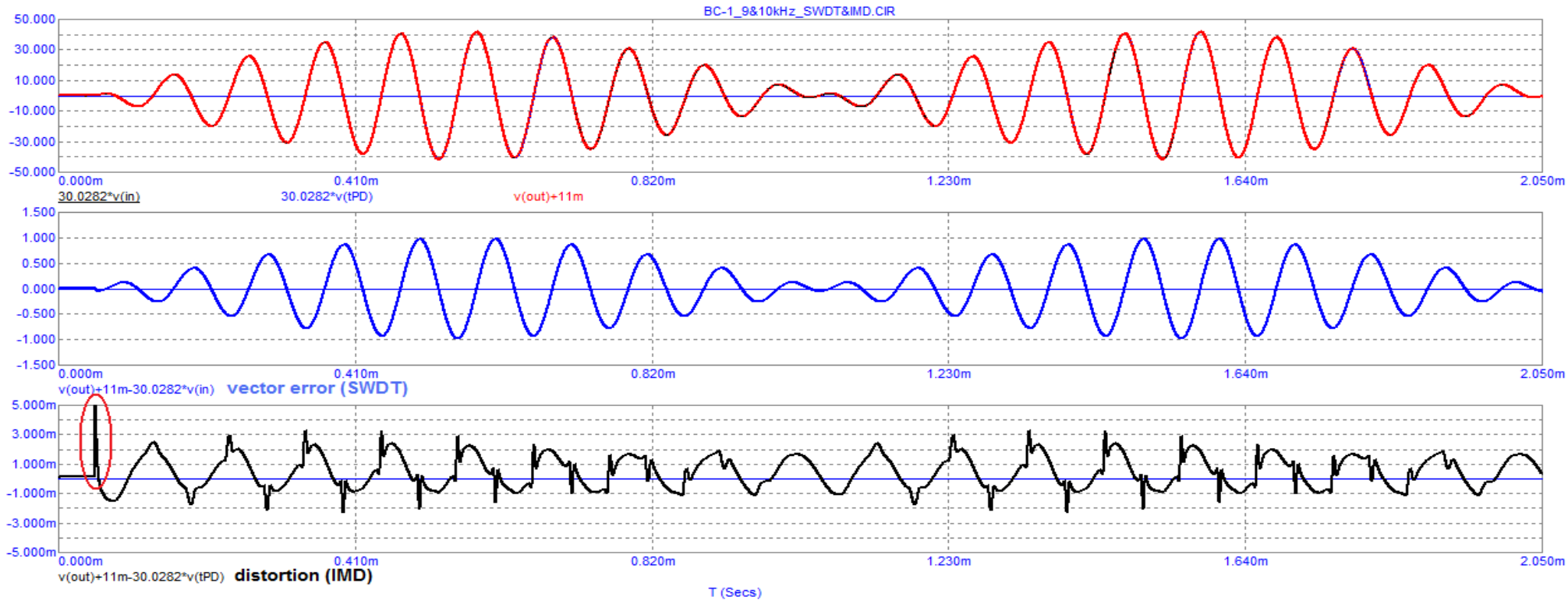


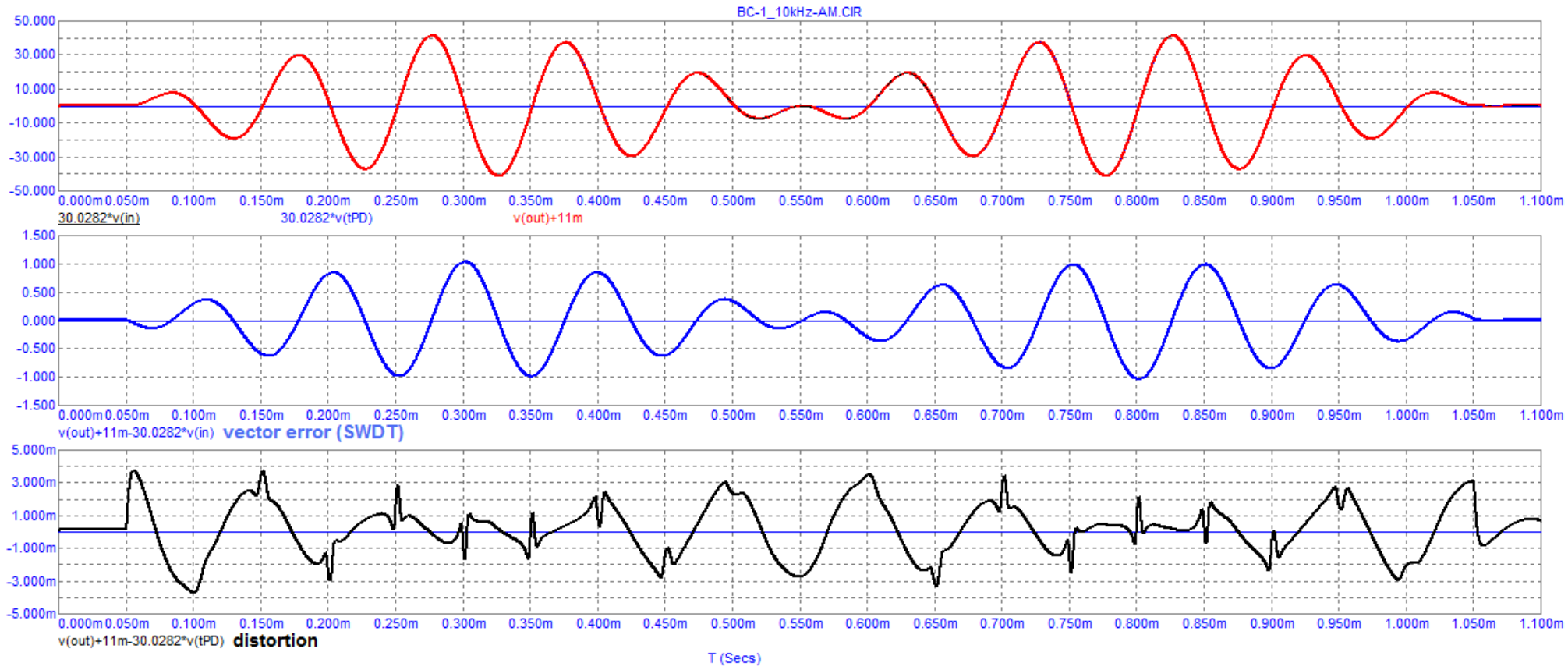


На 10-м периоде на частоте 20 Гц уровень THD = 0,025%, а на 2-м периоде они равны уже 0,35%!

Если измерить искажения на частоте 20 Гц в установившемся режиме то они ничтожно малы — 0,000002%.

В дополнение проведем тесты SWDT с помощью двухтонального сигнала 9 и 10 кГц и с помощью амплитудно-модулированного сигнала частотой 10 кГц

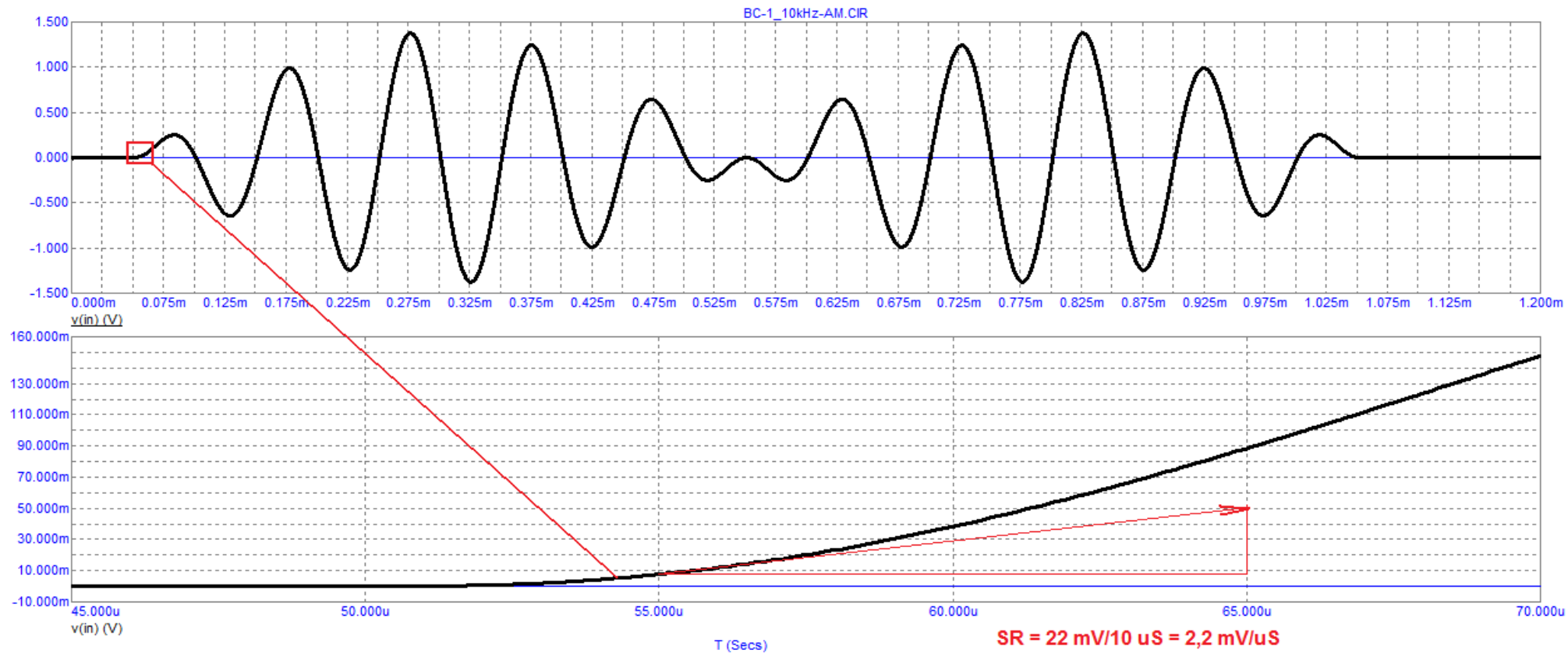




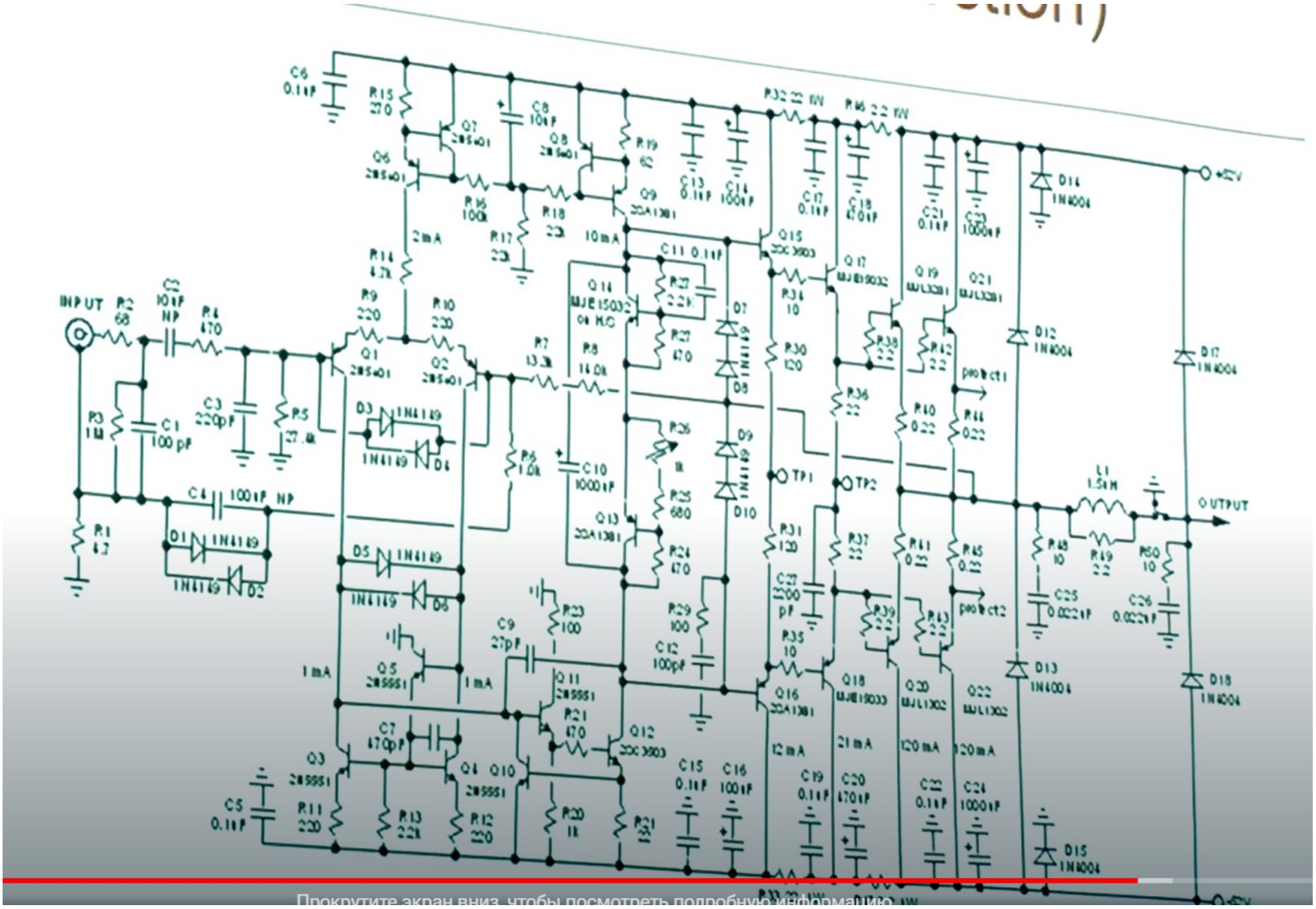
Если сравнить искажения бурста частотой 10 кГц и амплитудно-модулированного сигнала 10 кГц, то можно обнаружить что **максимальные искажения возникают именно на участках сигнала с малым уровнем, где относительные изменения вектора образующего сигнал максимальны а скорость нарастания сигнала минимальна!**

Мне возражают уважаемые специалисты, мол я подаю сигналы у которых в начале сверхзвуковые составляющие, мол именно поэтому и такие искажения.
https://www.diyaudio.com/community/threads/bob-cordells-power-amplifier-book.171159/post-6954587

Но обратите внимание что и в середине сигнала (где нет разрыва фазы) точно такие же уровни искажений как и в начале. Пришлось показать начало сигнала в растянутом виде где видно что скорость нарастания входного сигнала ничтожно мала — доли мВ/мкс, т. е. ни о каких сверхзвуковых частотах или высоких скоростях нарастания не может быть и речи.



Ниже приведена схема с презентации



Краткий анализ выполнил

Александр Петров