

Упрощенный анализ буферных каскадов для входов УМЗЧ

Известно что многие УМЗЧ критичны к выходному сопротивлению источника сигнала. И если при тестировании выходное сопротивление стандартного генератора имеет выходное сопротивление 50 или 600 Ом, то реальный усилитель часто используется с потенциометром в качестве аттенюатора от 10 до 120 кОм и более. Например, потенциометр 120 кОм в среднем положении будет иметь выходное сопротивление не менее 30 кОм.

Во всех буферах с симметричным входом на входе установлен резистор 100 кОм который определяет входное сопротивление. При моделировании сопротивление источника сигнала задавалось пошагово: 50 Ом, 2,5 кОм, 5 кОм и 30 кОм.

В несимметричных буферах на БТ с целью минимизации смещения из-за тока базы на входах установлен резистор 47 кОм.

Максимальное ослабление сигнала на выходе с входным сопротивлением 100 кОм около 3 дБ, а с сопротивлением 47 кОм — примерно 5 дБ.

Проведено 3 теста: диаграмма Боде, спектр сигнала частотой 20 кГц и спектр первого периода (FCD).

Так как подавляющее большинство буферов не имеют общей ООС то спектр гармоник ограничен первыми двумя гармониками. Чтобы оценить уровень вносимых высших гармоник проведен дополнительный тест с повышенной чувствительностью (в основном в 100 раз). Из спектра видно что высшие гармоники начиная с 5-й ослаблены как минимум на 40 дБ (более чем в 100 раз).

Некоторые буферы имеют значительные выбросы ГВЗ выше 1 МГц. Так как они находятся очень далеко за звуковым диапазоном, то они уже не оказывают существенного влияния на искажения первого периода (видно по третьему тесту на FCD).

Примечание.

Все светодиоды в моделях красного свечения.

Напомню что 1 милли-‰ искажений соответствует 0,001%, а 1 микро-‰ соответственно 0,000001% например: 80u - соответствует 0,00008%, а 0,4u – 0,0000004% искажений.

Цвета соответствующие сопротивлению Ri:

50 Ом — красный;

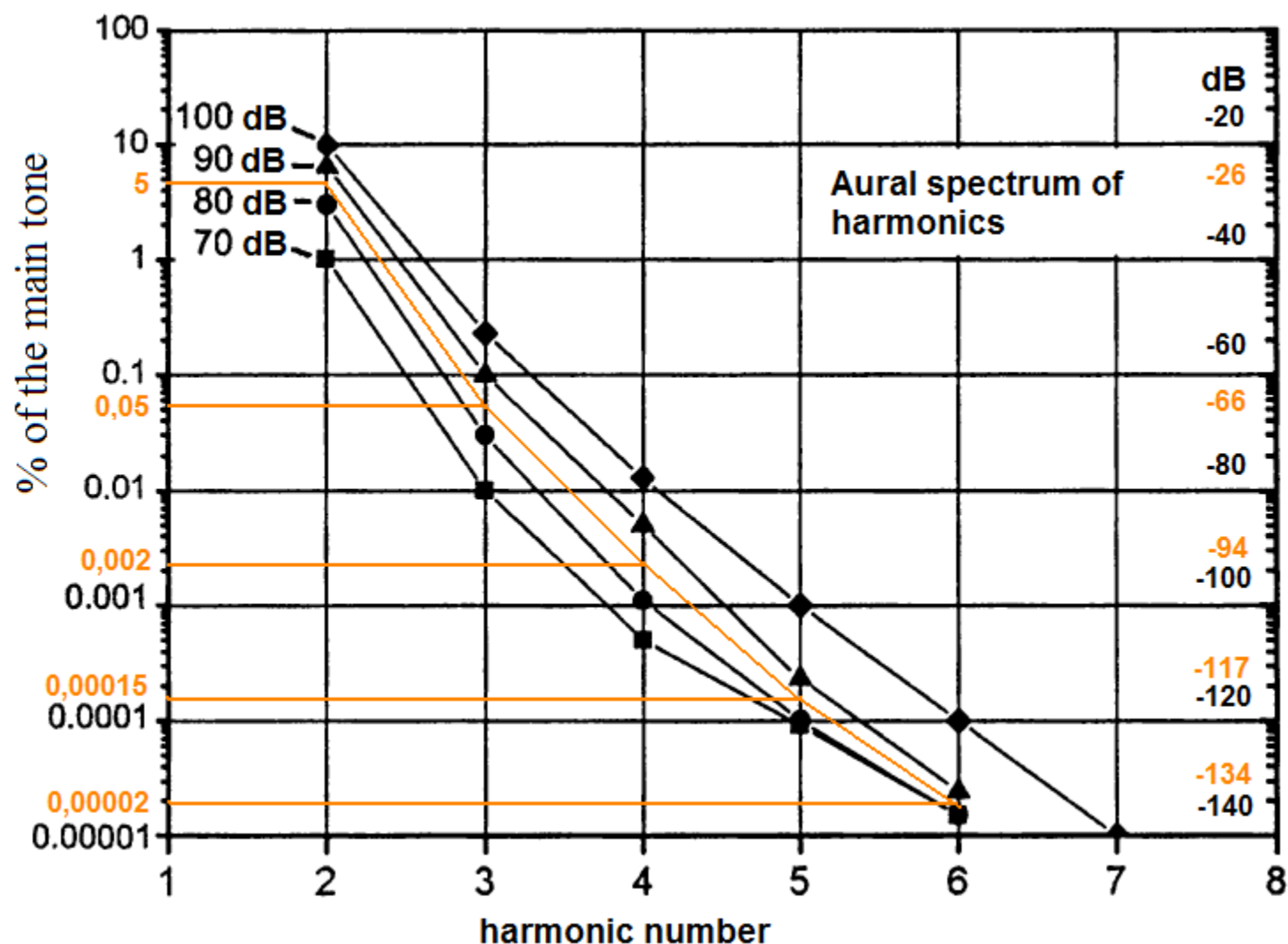
2,5 кОм — болотный;

5 кОм — синий;

30 кОм — розовый

Нагрузочная способность во многом зависит от тока покоя выходного каскада. Повышенной нагрузочной способностью обладают буфера с Дарлингтонами в выходном каскаде.

Применительно к спектру следует помнить об ауральных гармониках. Из графика ниже следует что 2-я гармоника может быть уровнем вплоть до 10 % и не вызывать раздражение (зависит от уровня звукового давления).



Из графика следует что уровни высших гармоник начиная с 5-й и выше должны быть не более 0,001 %. Не зря Джон Керл (John Curl) в первую очередь обращает внимание на нечетные гармоники, особенно на 7-ю и 9-ю, так как слух наиболее чувствителен именно к высшим гармоникам (хоть они могут быть ничтожно малой величины).

Можно предположить что простейшие буферы 02, 11 и 16 могут успешно конкурировать с более сложными.

Простой двухтактный буфер, рис. 01.

Буфер представляет собой двухтактный повторитель в котором использованы одиночные эмиттерные повторители эмиттерные цепи которых запитаны от ГСТ с током 3,5 мА. Коллекторные цепи повторителей запитаны следящим питанием от дополнительных транзисторов Q3, Q4 управляемых от противоположных плеч. Это минимизирует входную емкость и стабилизирует ГВЗ независимо от сопротивления источника сигнала, ГВЗ менее 5 нс!. Искажения ничтожно малы еще и потому что нет лишних повторителей как в параллельных повторителях. При использовании качественных электролитов такой буфер может успешно конкурировать с более сложными.

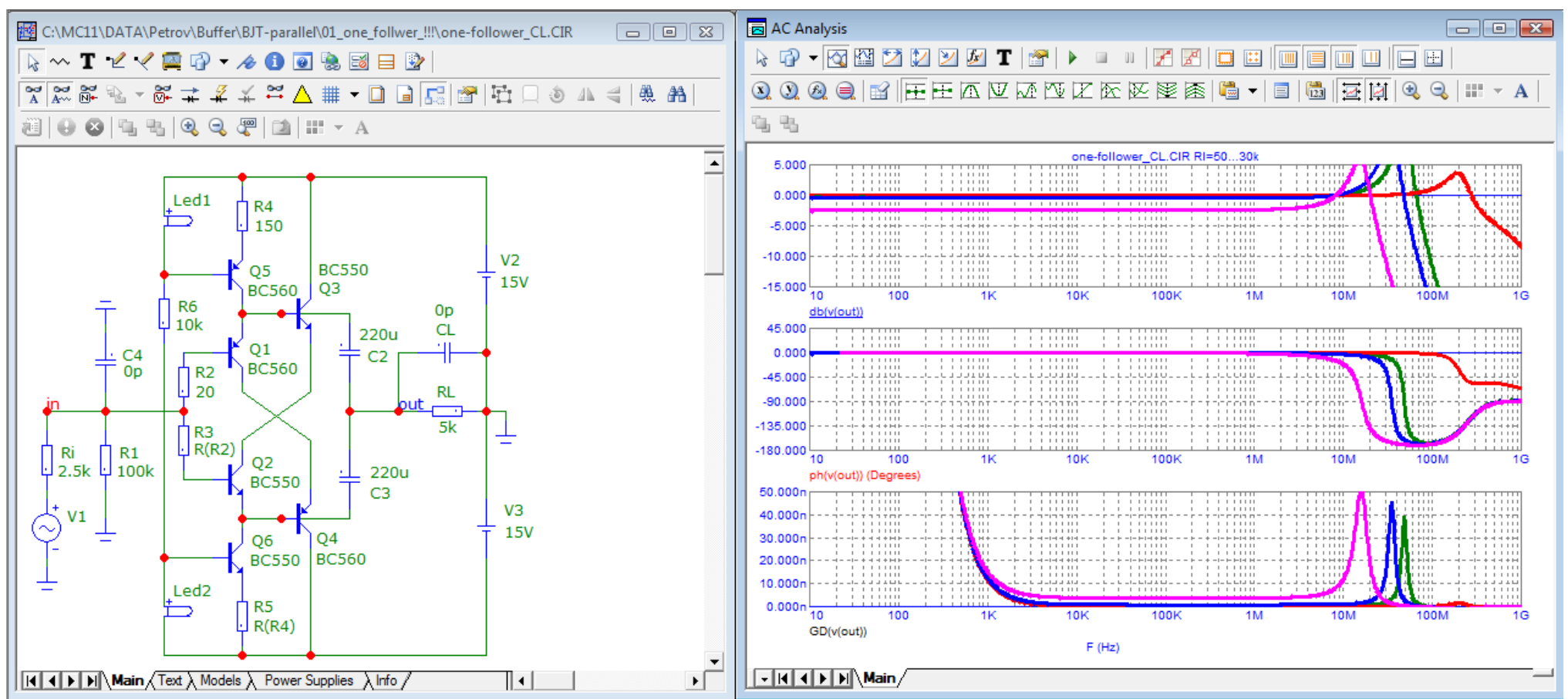


Рис. 01а) Диаграмма Бode. ГВЗ постоянно почти до 10 МГц, поэтому выбросы около 20 МГц и выше не оказывают влияния на параметры.

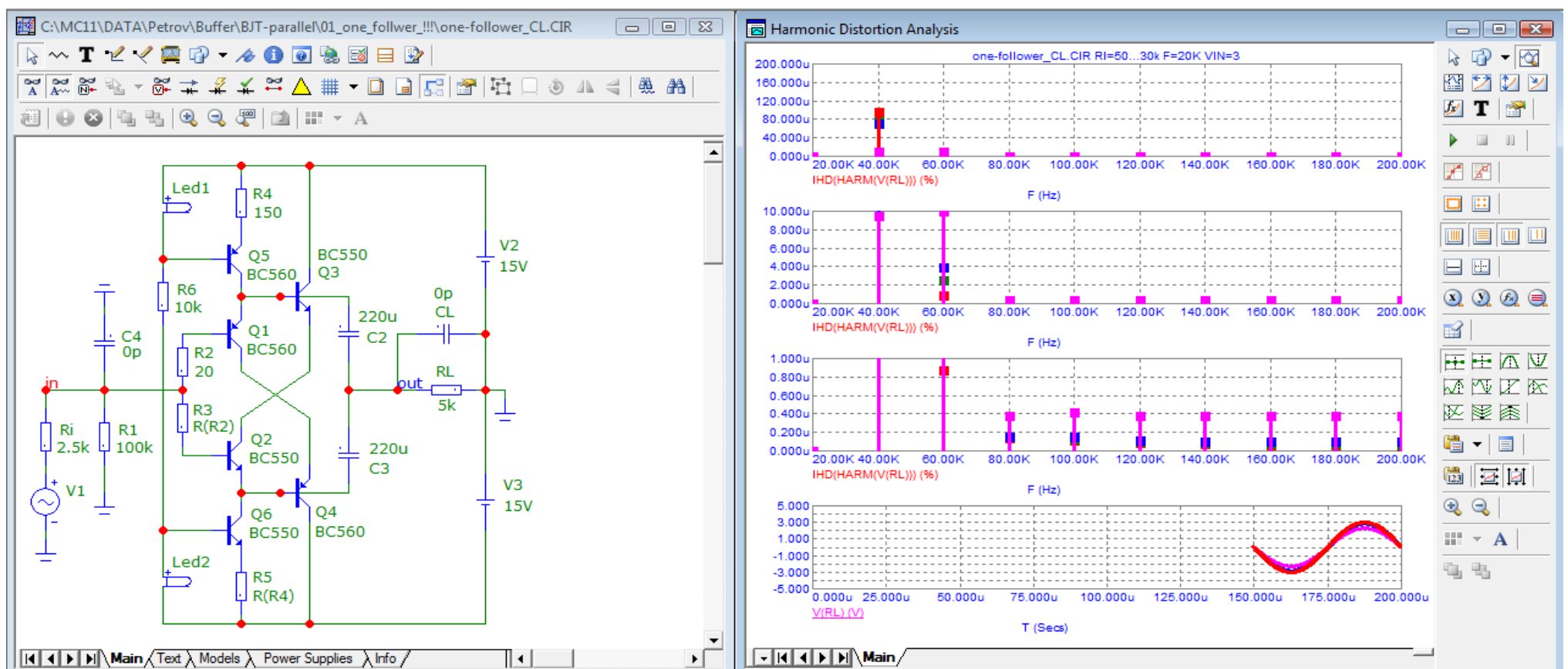


Рис. 01б) Спектр сигнала частотой 20 кГц.

В спектре по сути одна 2-я гармоника, уровень 3-й гармоники мал, а высшие гармоники существенно ослаблены. Гармоники начиная с 4-й ослаблены по сравнению со 2-й гармоникой более чем в 200 раз! (46 дБ)

Спектр первого периода (FCD) представлен на рисунке 01в)

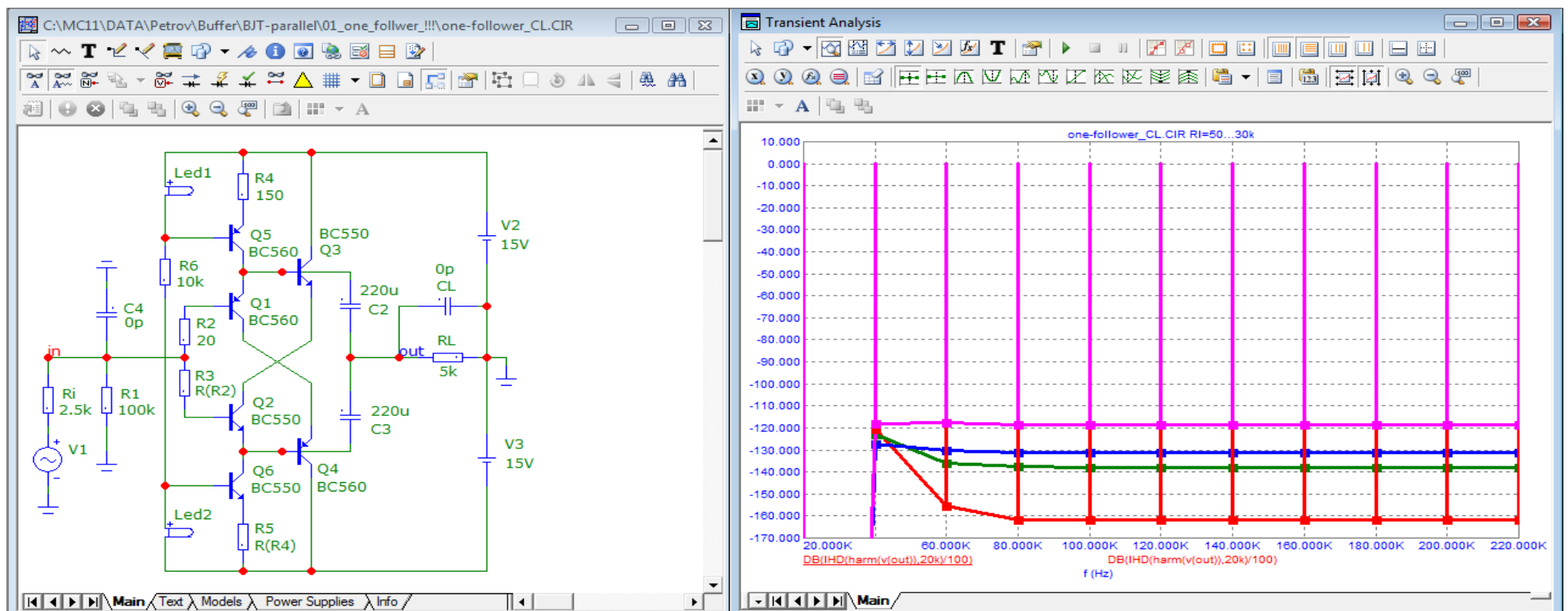


Рис. 01в) Спектр FCD

На выходе использованы электролитические конденсаторы с напряжением поляризации около 0,6...0,7 В. Измерим напряжение на этих

конденсаторах, рис. 01г)

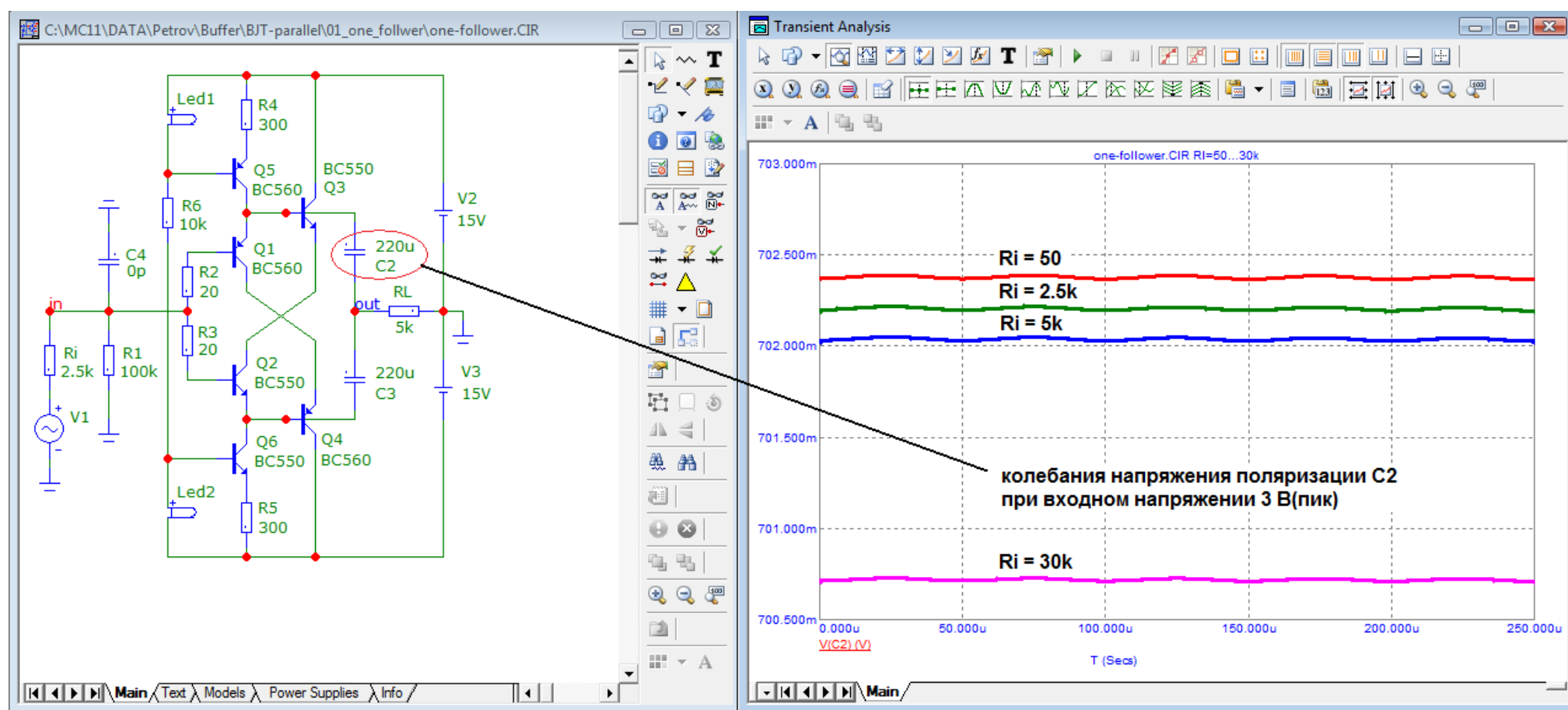


Рис. 01г) Зависимость напряжения поляризации на конденсаторе C2 от входного напряжения 3 В(пик)

Как видно из теста напряжение пульсаций на конденсаторах ничтожно мало, а значит будут ничтожно малы и вносимые ими искажения. Для снижения искажений вносимых конденсаторами целесообразно шунтировать их полипропиленовыми емкостью до 1 ... 2,2 мкФ.

Параллельный буфер без конденсаторов на выходе, рис. 02

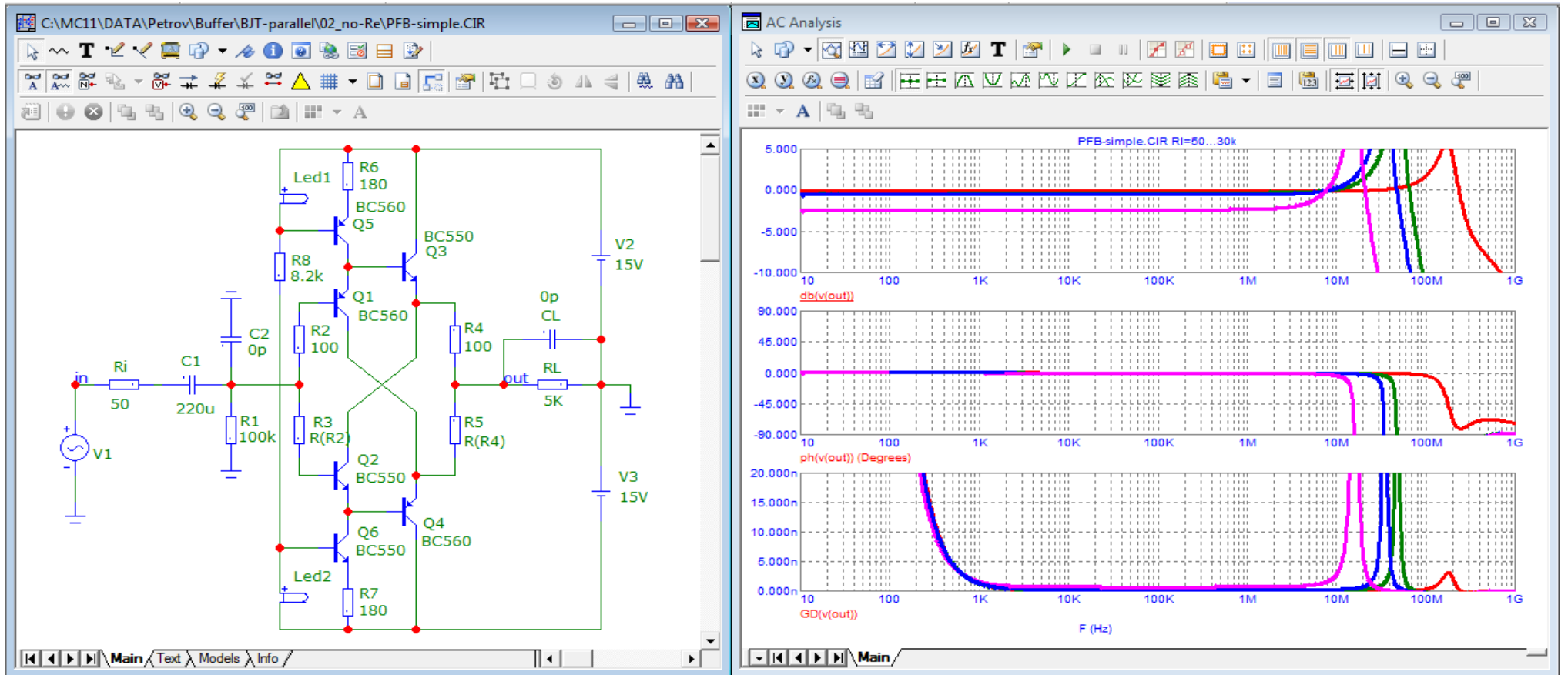


Рис. 02а) Диаграмма Бode простого параллельного повторителя. Конденсатор C1 можно исключить.

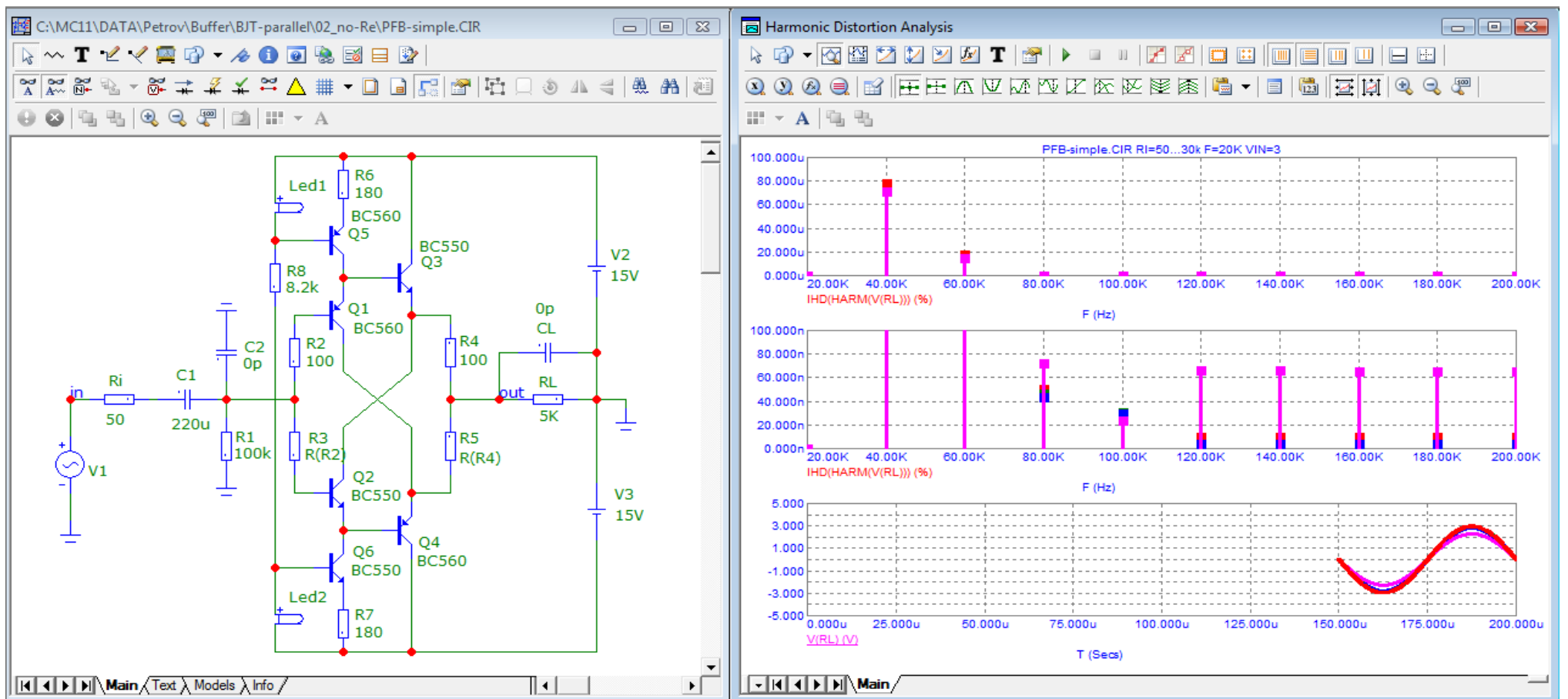


Рис. 02б) Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник более чем в 1000 раз!

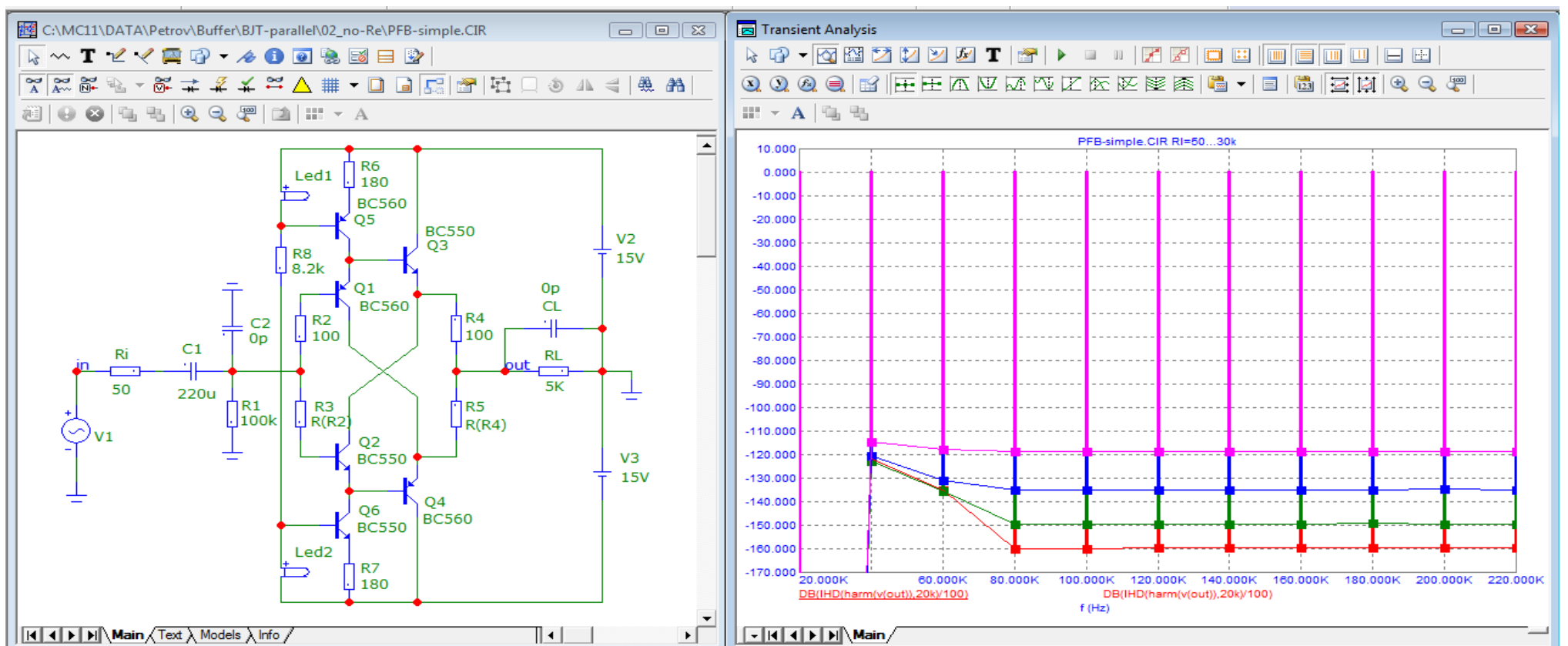


Рис. 02в) Спектр первого периода (FCD)

Параллельный повторитель со следящим питанием управляемым вольтодобавкой, рис. 03

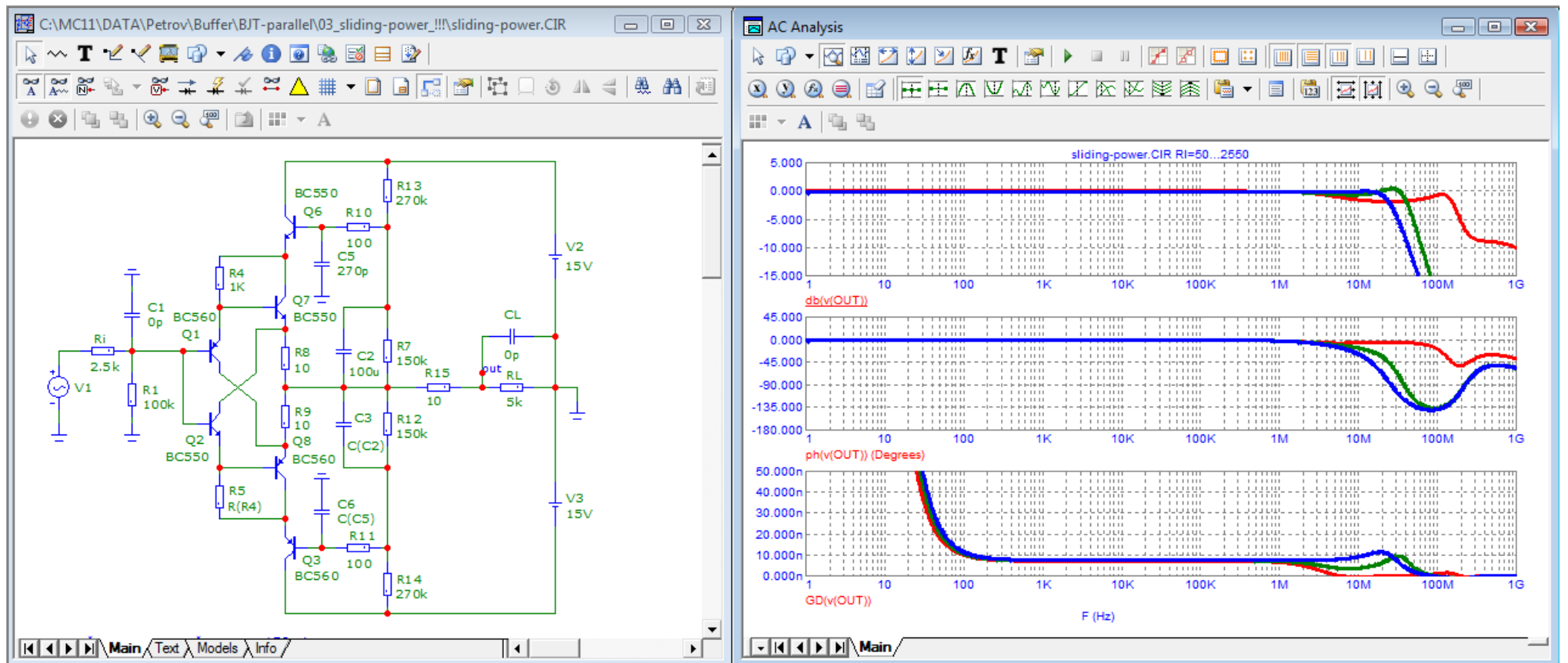


Рис. 03а) Диаграмма Бode (нет выбросов ГВЗ как в предыдущих буферах). ГВЗ практически не зависит от R_i

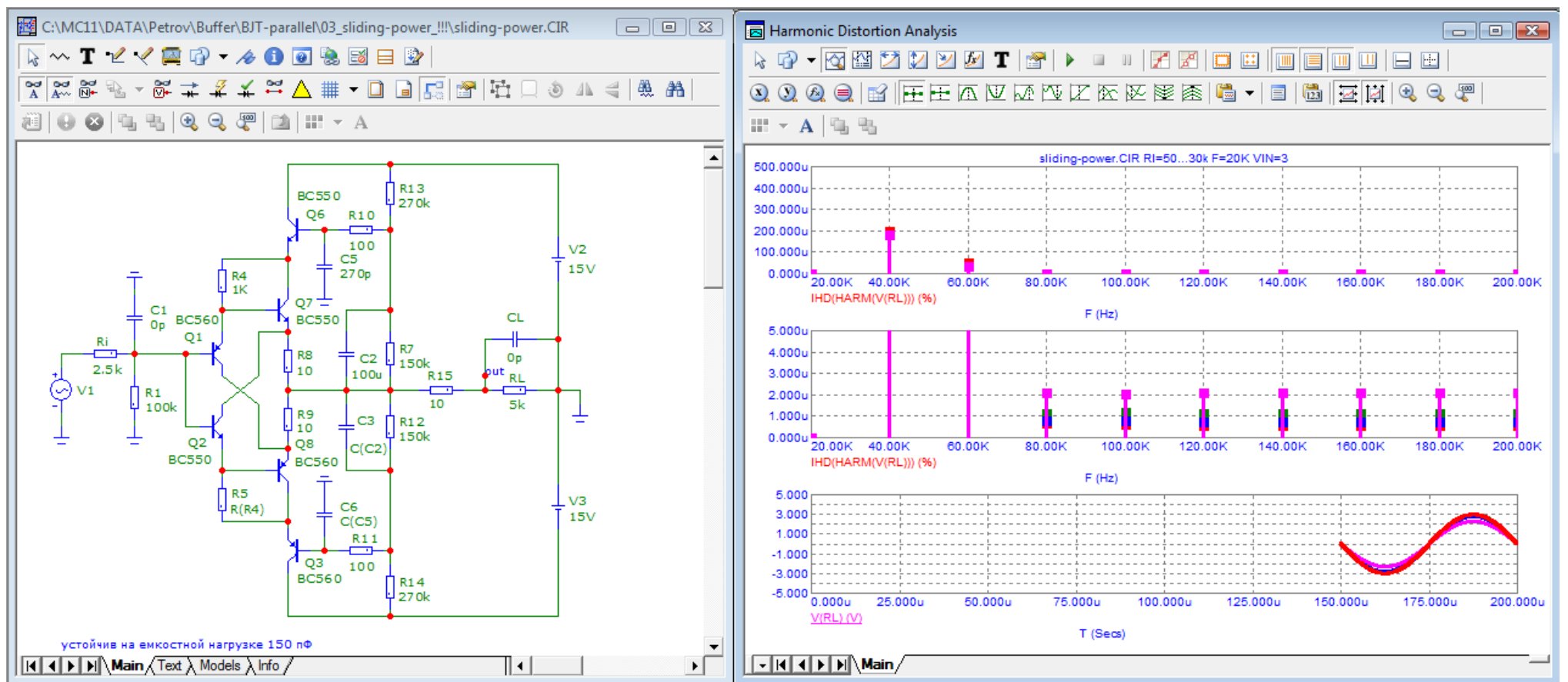


Рис. 03б) Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник по отношению ко 2-й не менее чем в 100 раз (40 дБ)

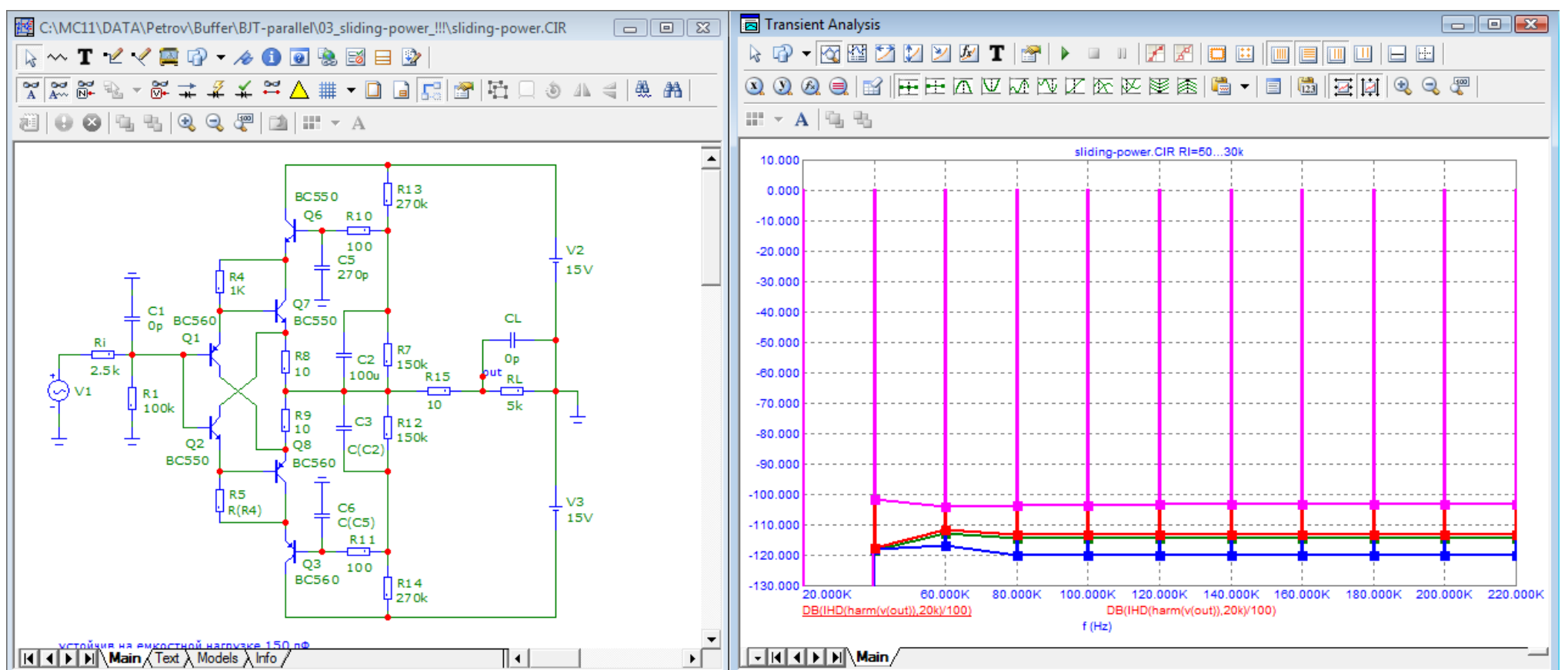


Рис. 03в) Спектр FCD

Параллельный повторитель со следящим питанием первого и второго каскада, рис. 04

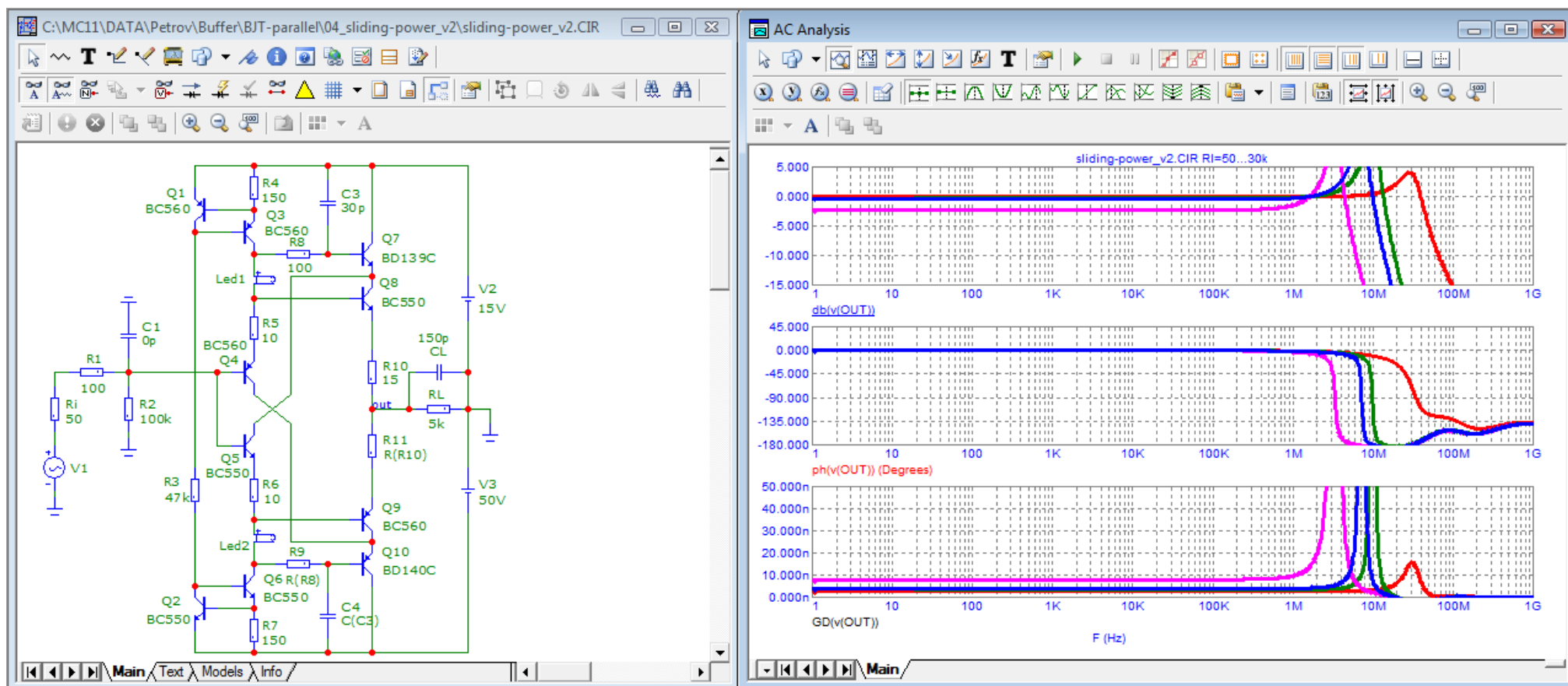


Рис. 04а) Диаграмма Боде. ГВЗ очень мало (менее 5 нс!) и постоянно до нескольких МГц

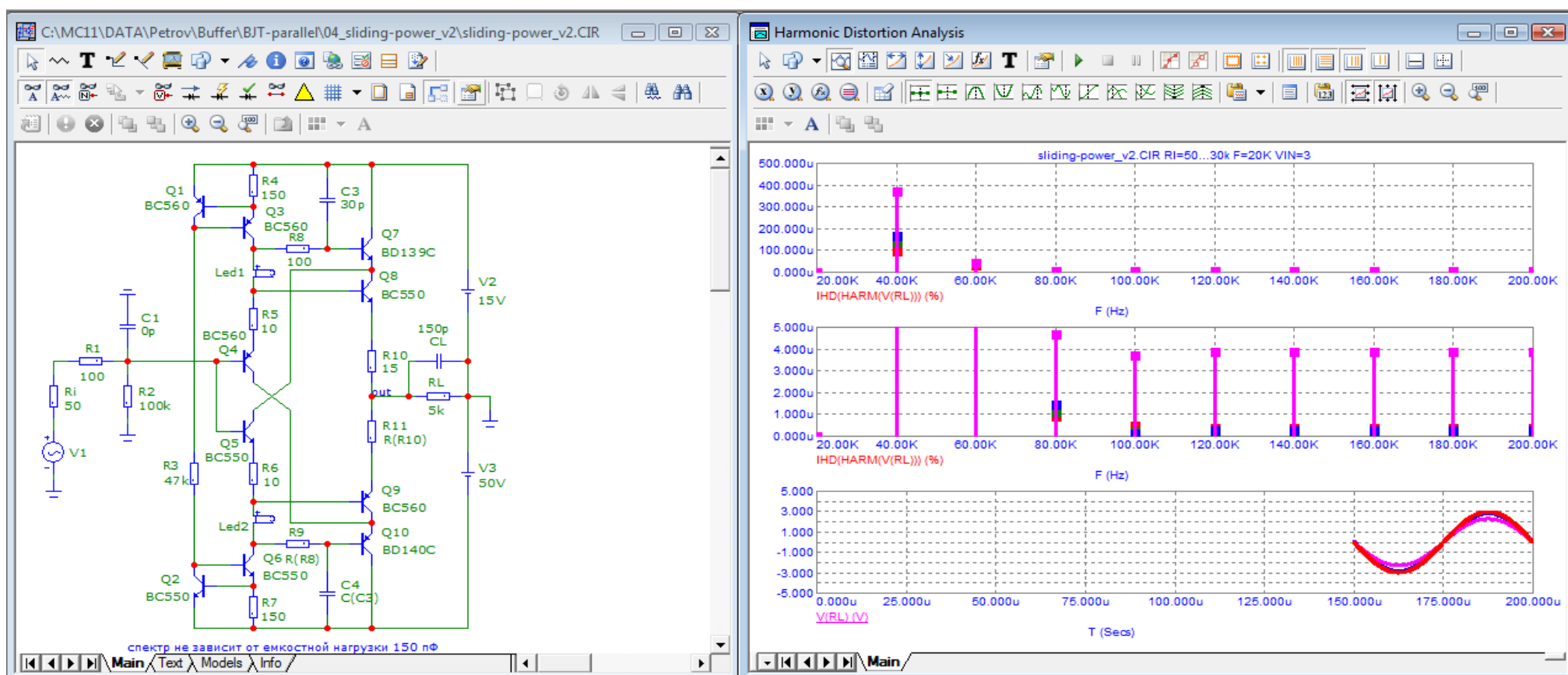


Рис. 04б) Спектр сигнала частотой 20 кГц, ослабление высших гармоник более чем 100 раз (40 дБ) по сравнению с низшими гармониками

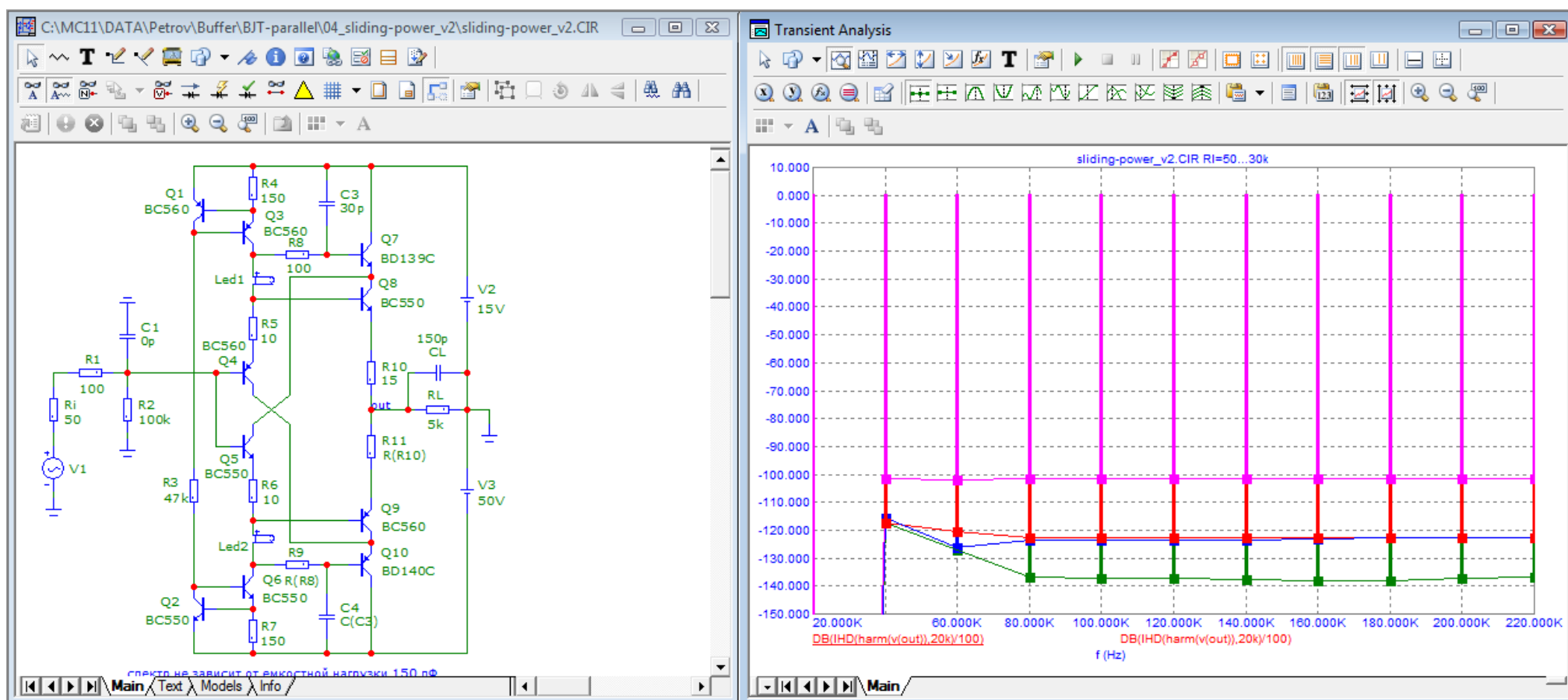


Рис. 04в) Спектр сигнала первого периода (FCD)

Повторитель со следящим питанием с помощью вольтодобавки, рис. 05

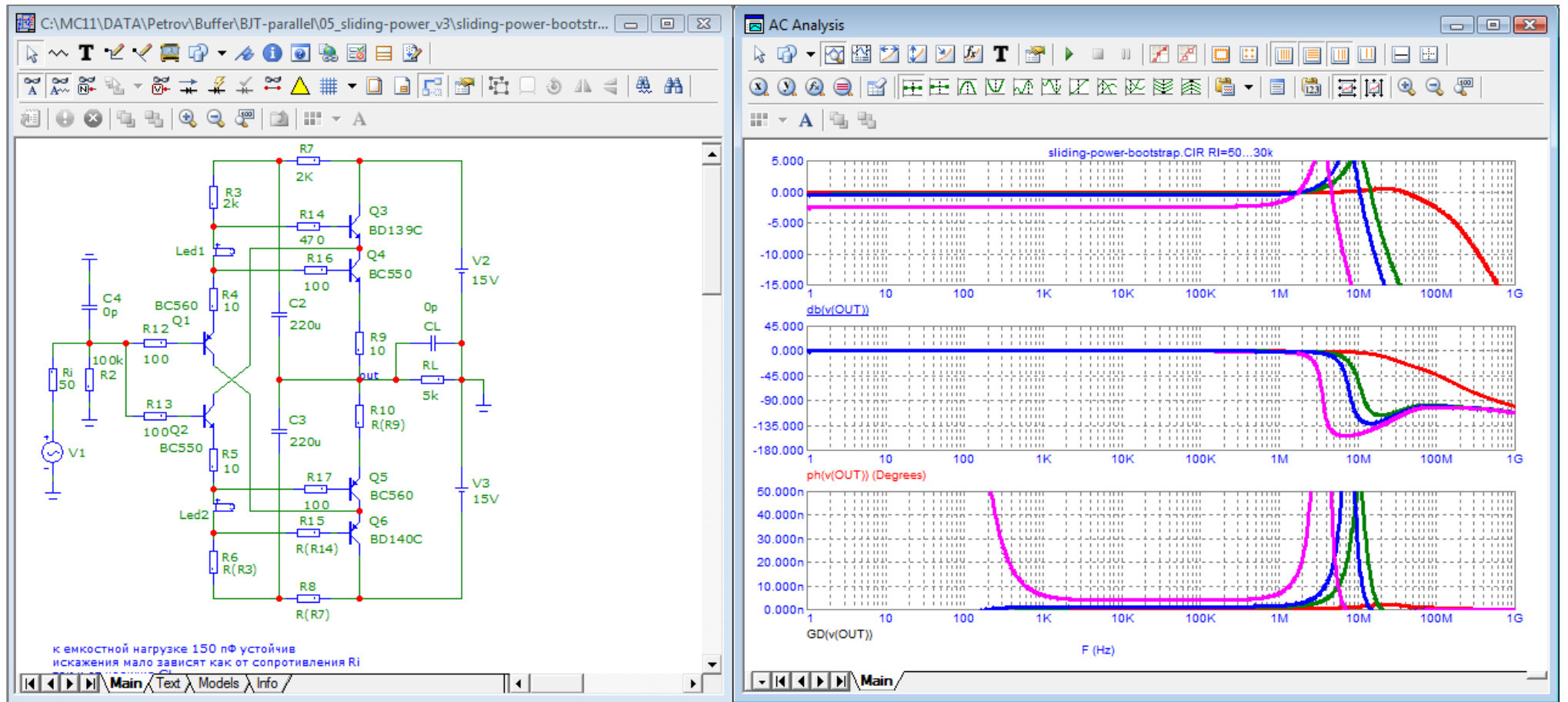


Рис. 05а). Диаграмма Боде. Быброс АЧХ выше 1 МГц меньше чем в предыдущей схеме

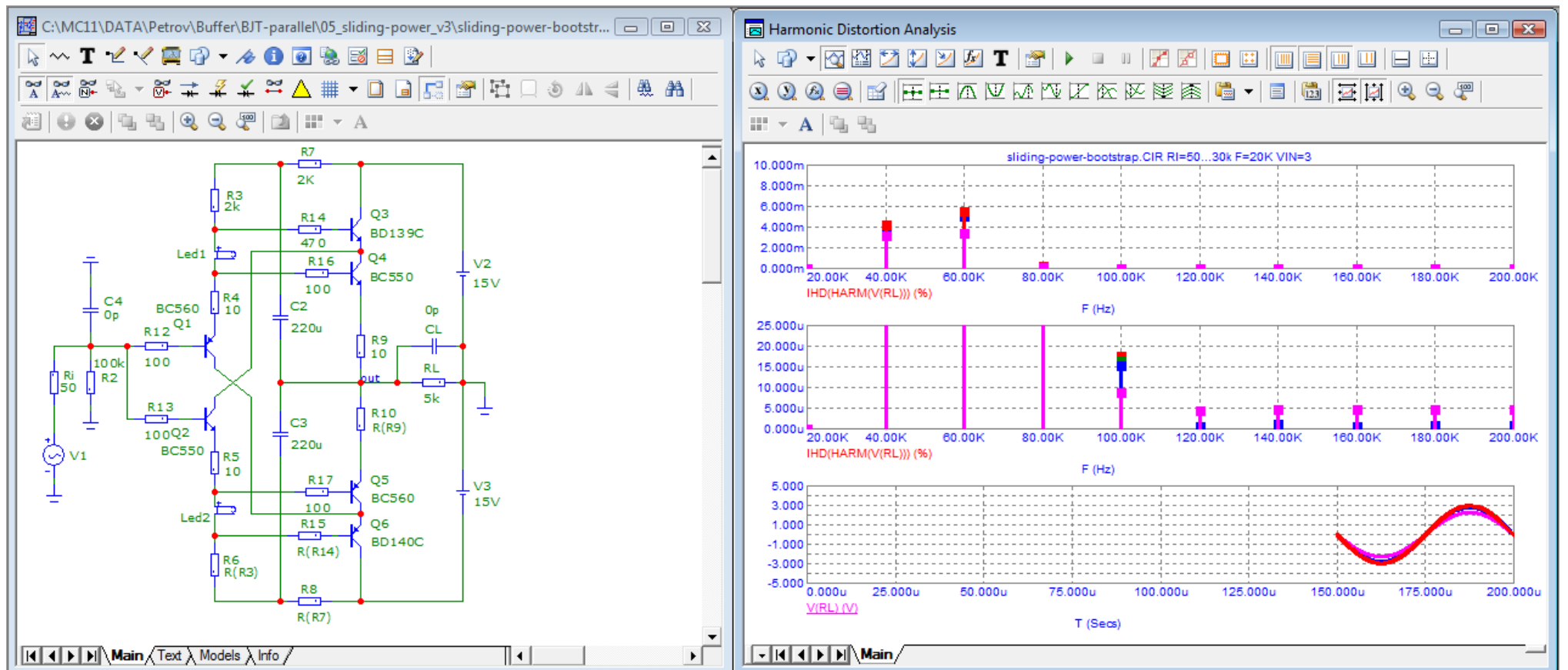


Рис. 05б) Спекр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление 5-й гармоники и выше не менее 200 раз (46 дБ)

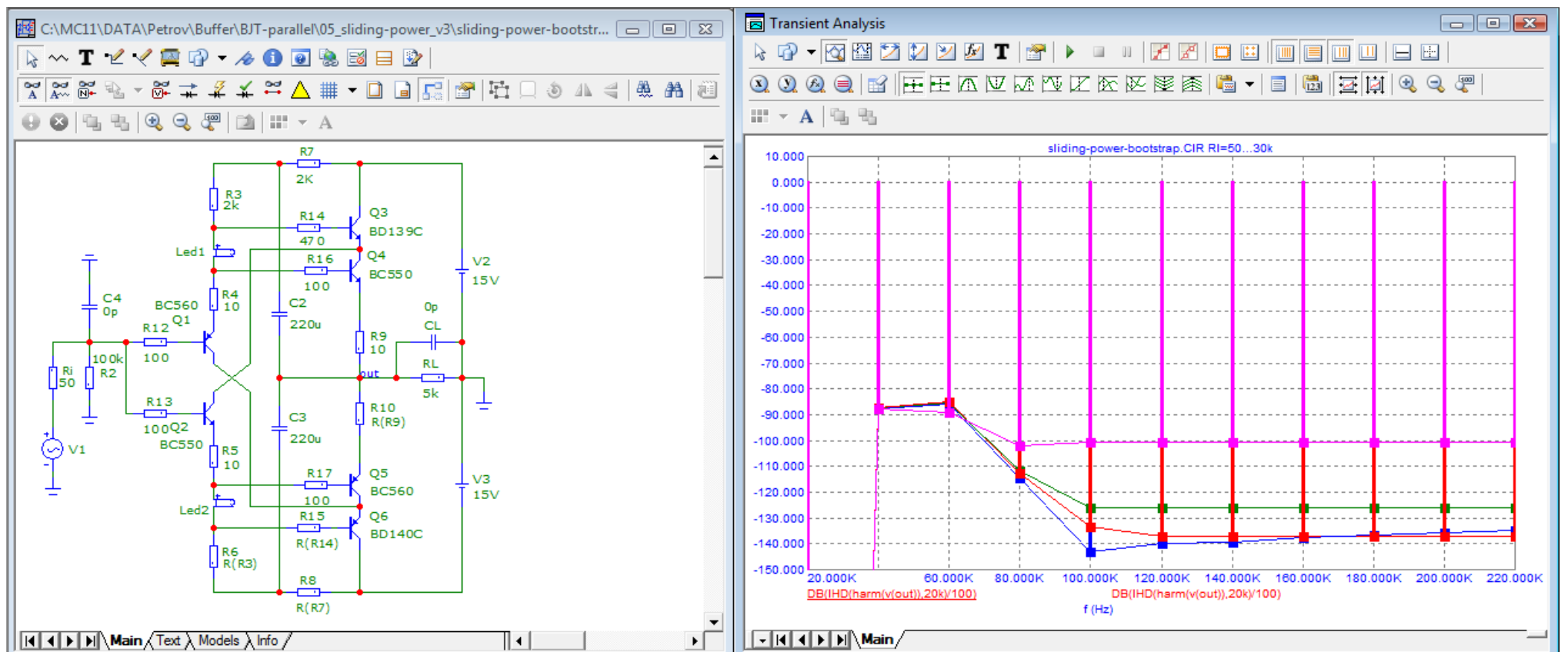


Рис. 05в) Спектр первого периода (FCD)

Параллельный повторитель с вольтодобавкой, рис. 06

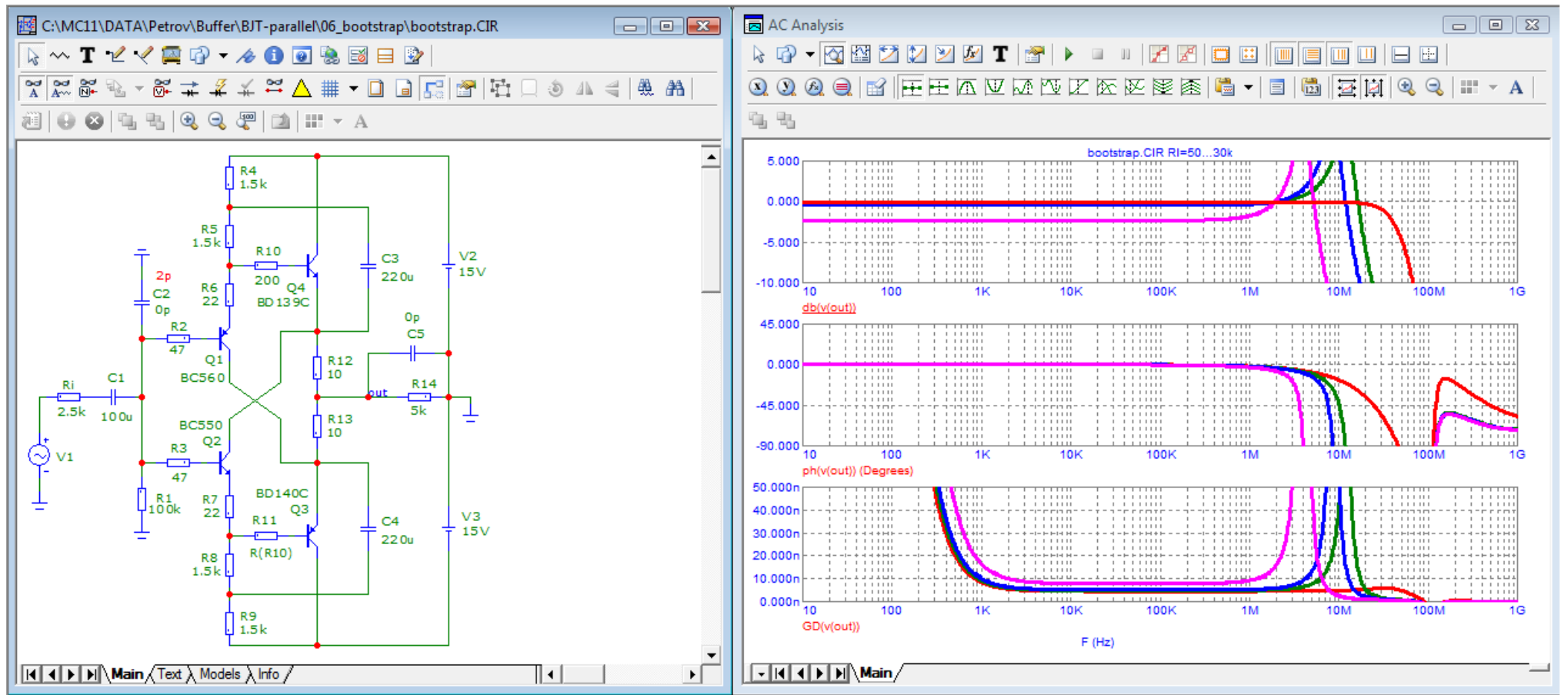


Рис. 06а) Диаграмма Боде. Конденсатор C1 можно исключить.

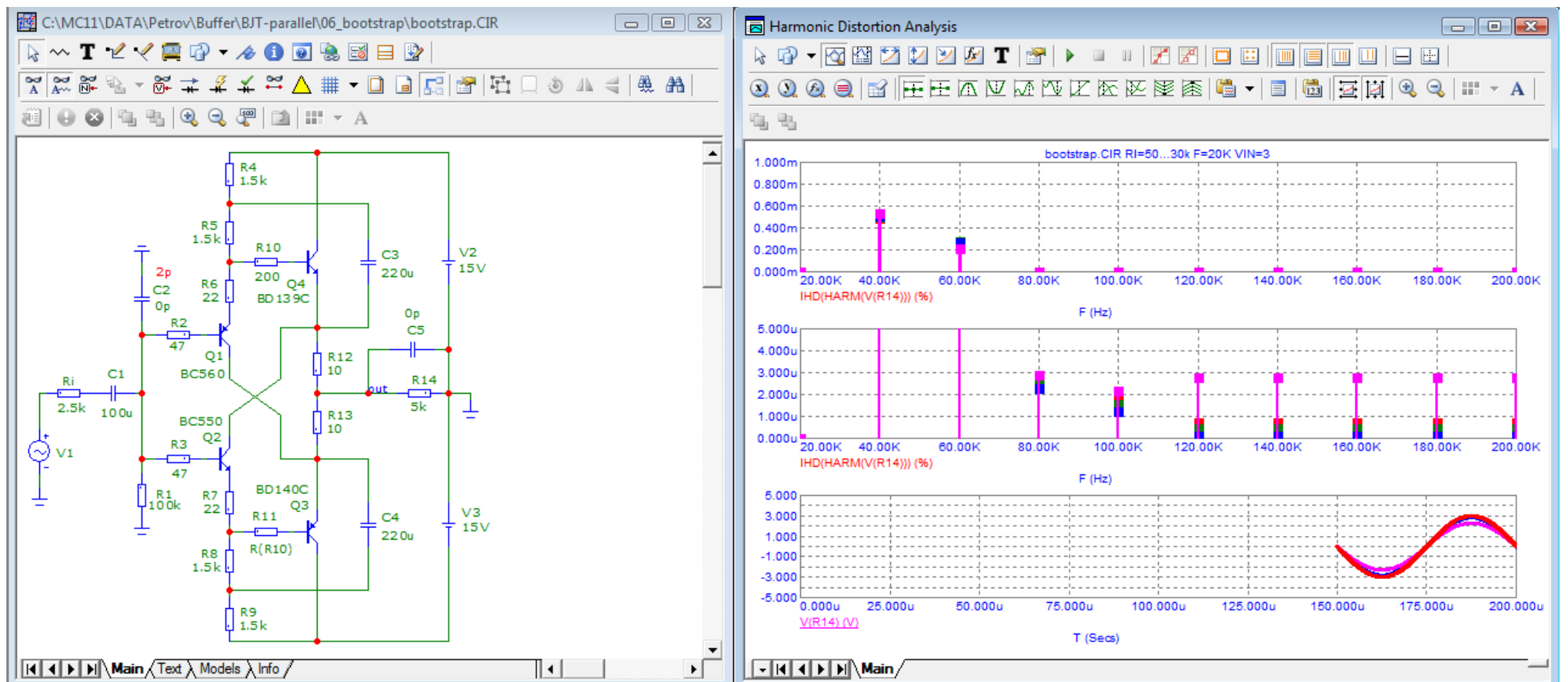


Рис. 06б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник по сравнению с 2-й гармоникой до 200 раз (46 дБ)

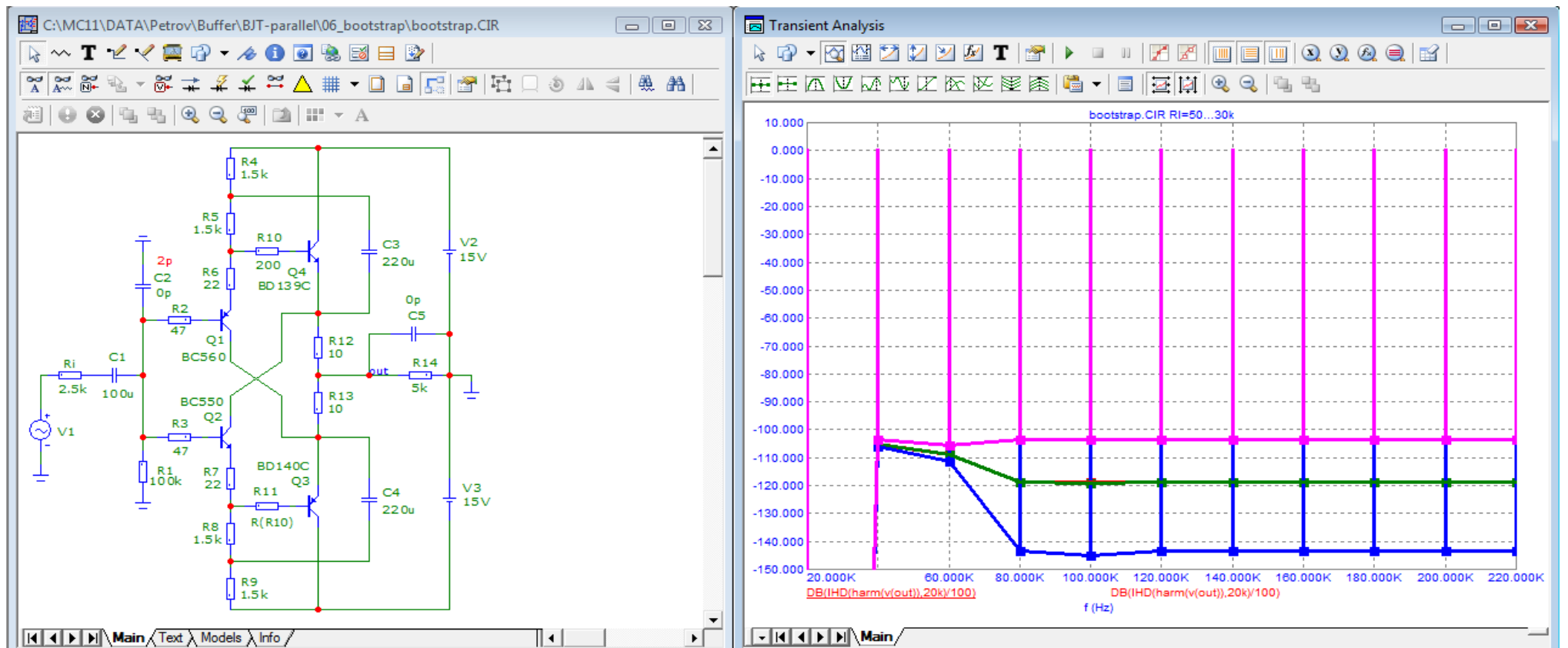


Рис. 06в) Спектр первого периода (FCD)

Параллельный повторитель с ГСТ и следящим питанием входных повторителей, рис. 07

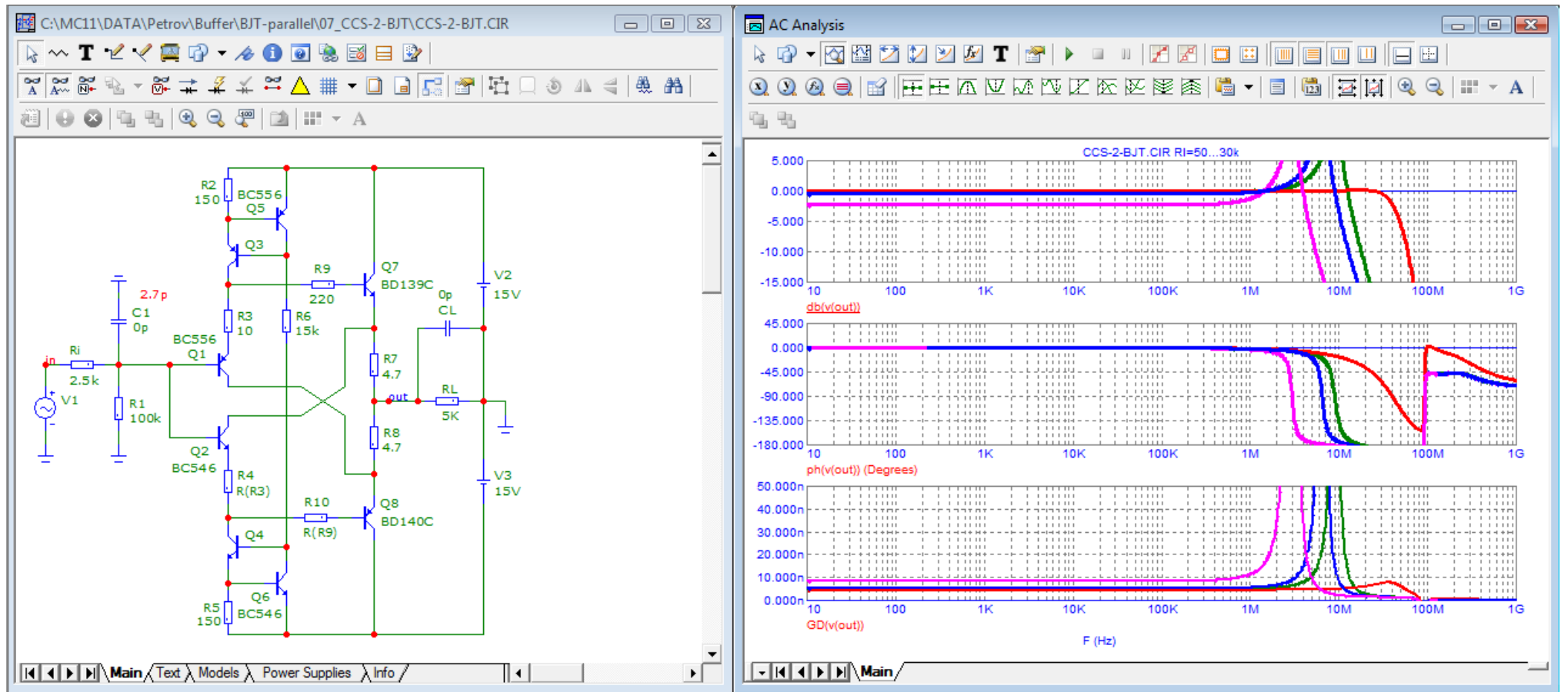


Рис. 07а) Диаграмма Бode

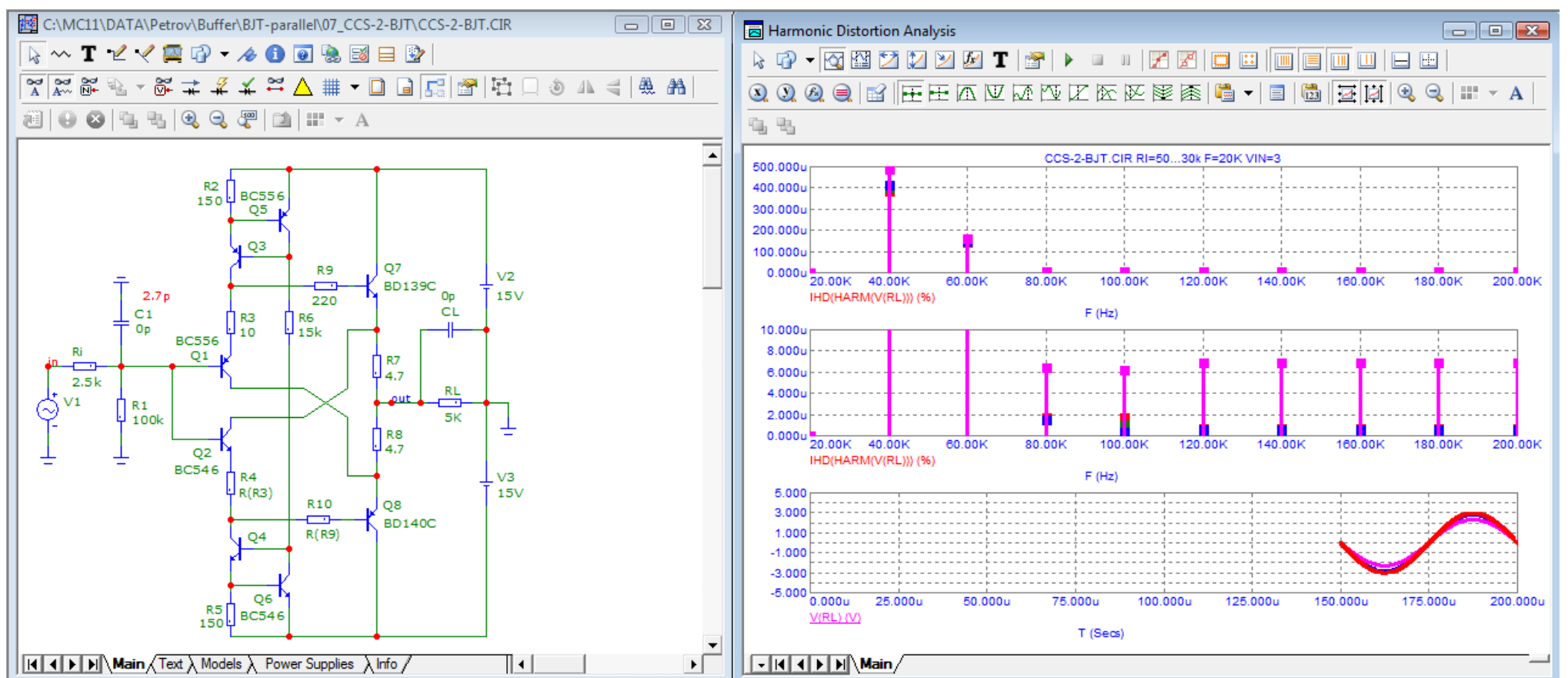


Рис. 07б) Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник около 100 раз! (40 дБ)

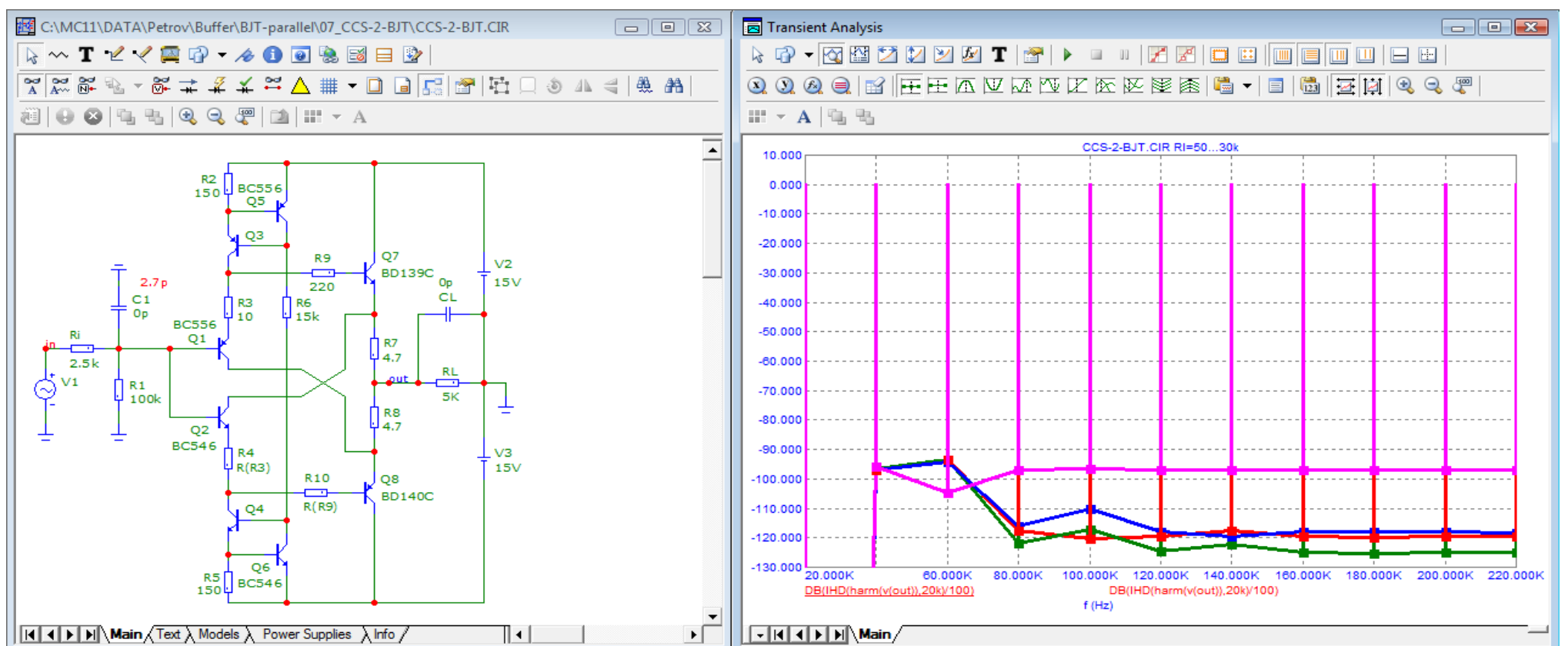


Рис. 07в). Спектр первого периода (FCD)

Параллельный повторитель с Дарлингтоном на входе, рис. 08

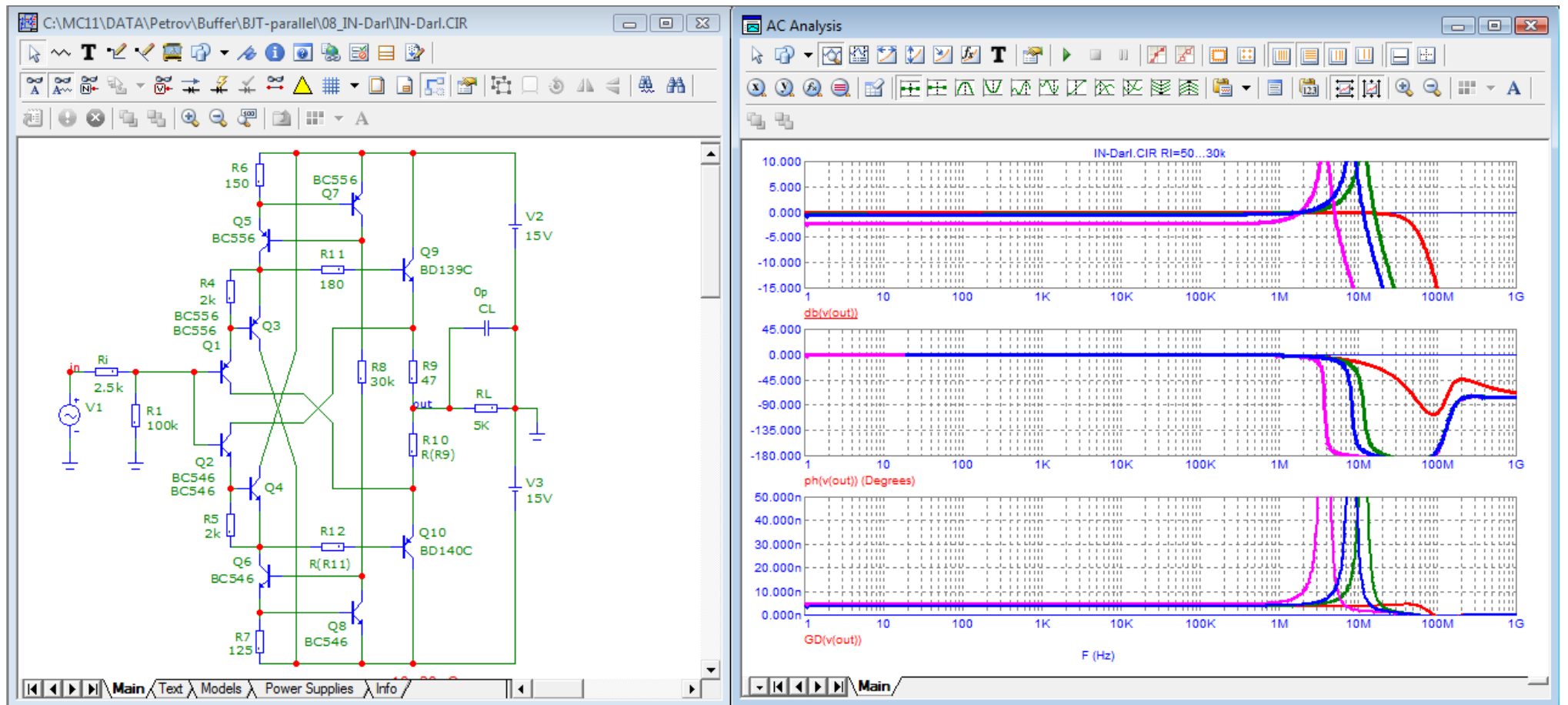


Рис. 08а). Диаграмма Бode. ГВЗ мало зависит от сопротивления источника сигнала.

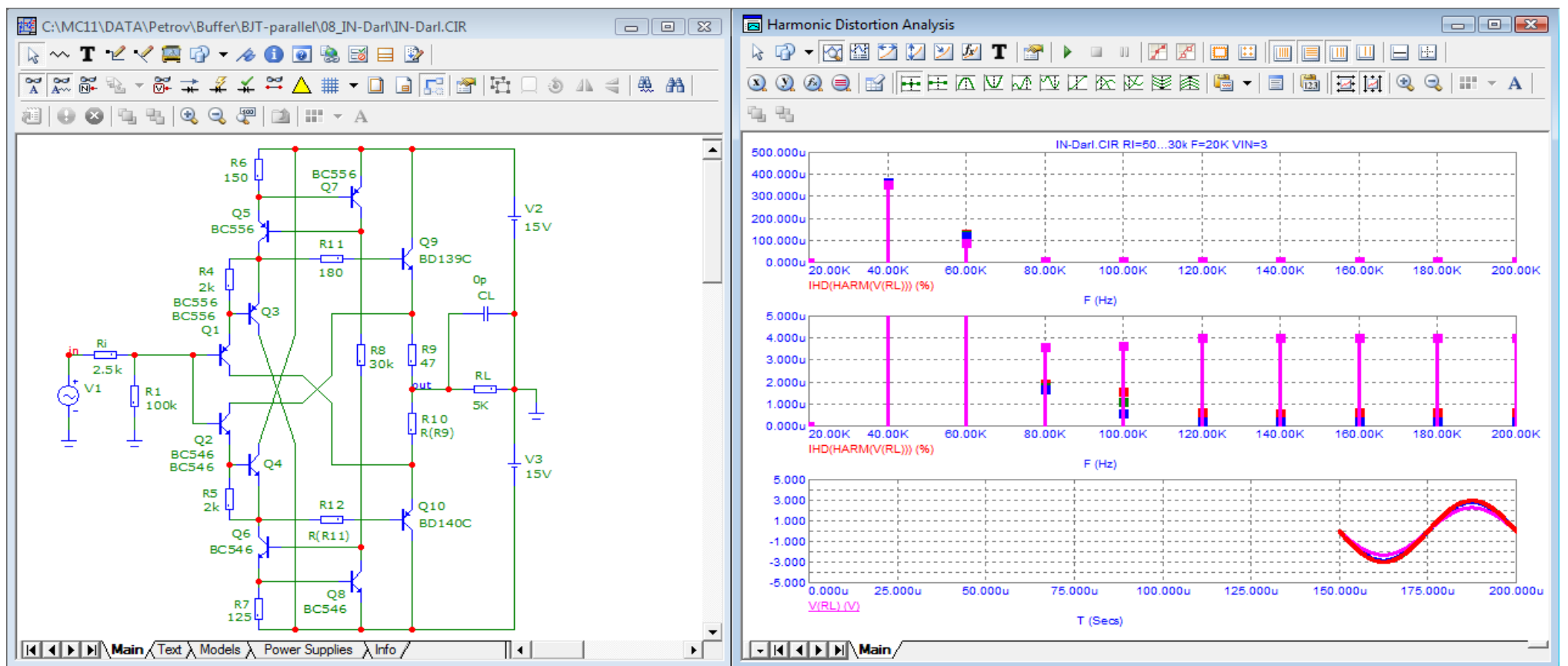


Рис. 08б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник 100 раз (40 дБ)

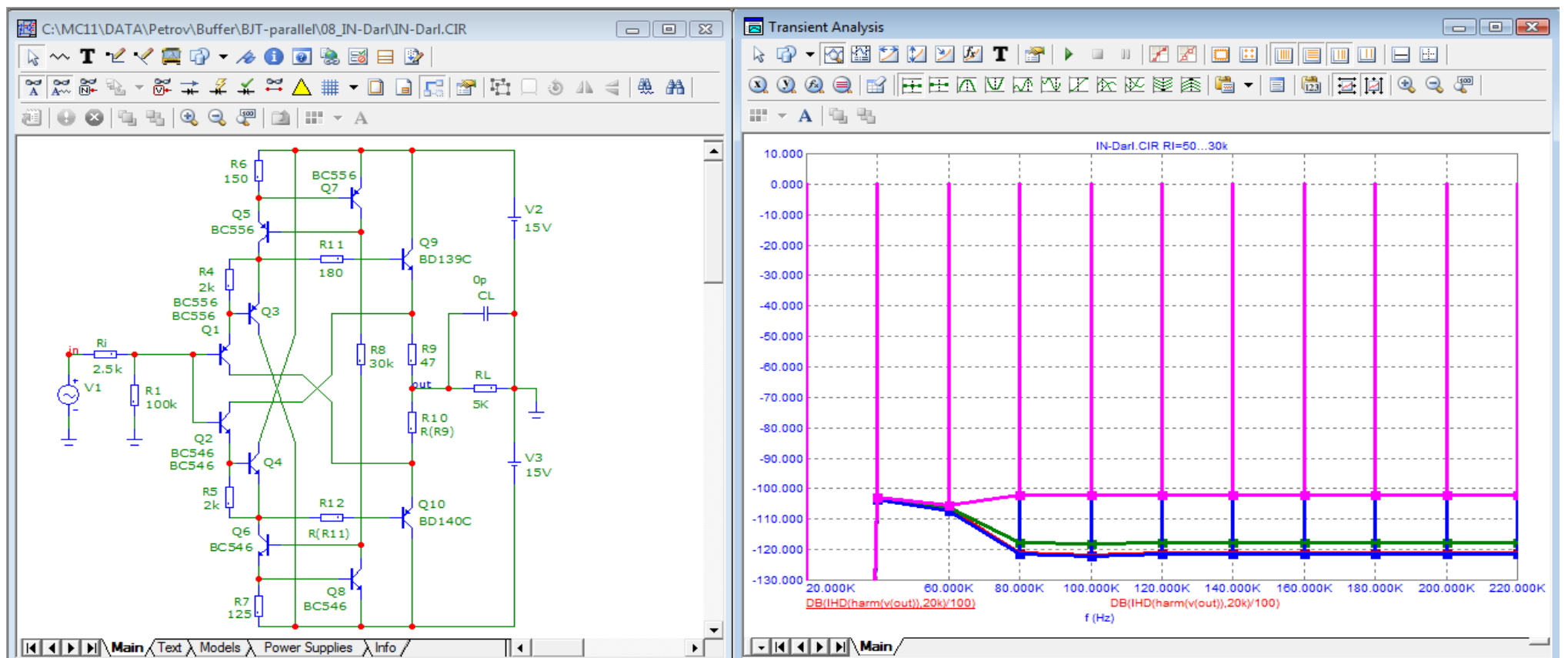


Рис. 08в). Спектр первого периода (FCD)

Параллельный повторитель с Дарлингтоном во втором каскаде, рис. 09

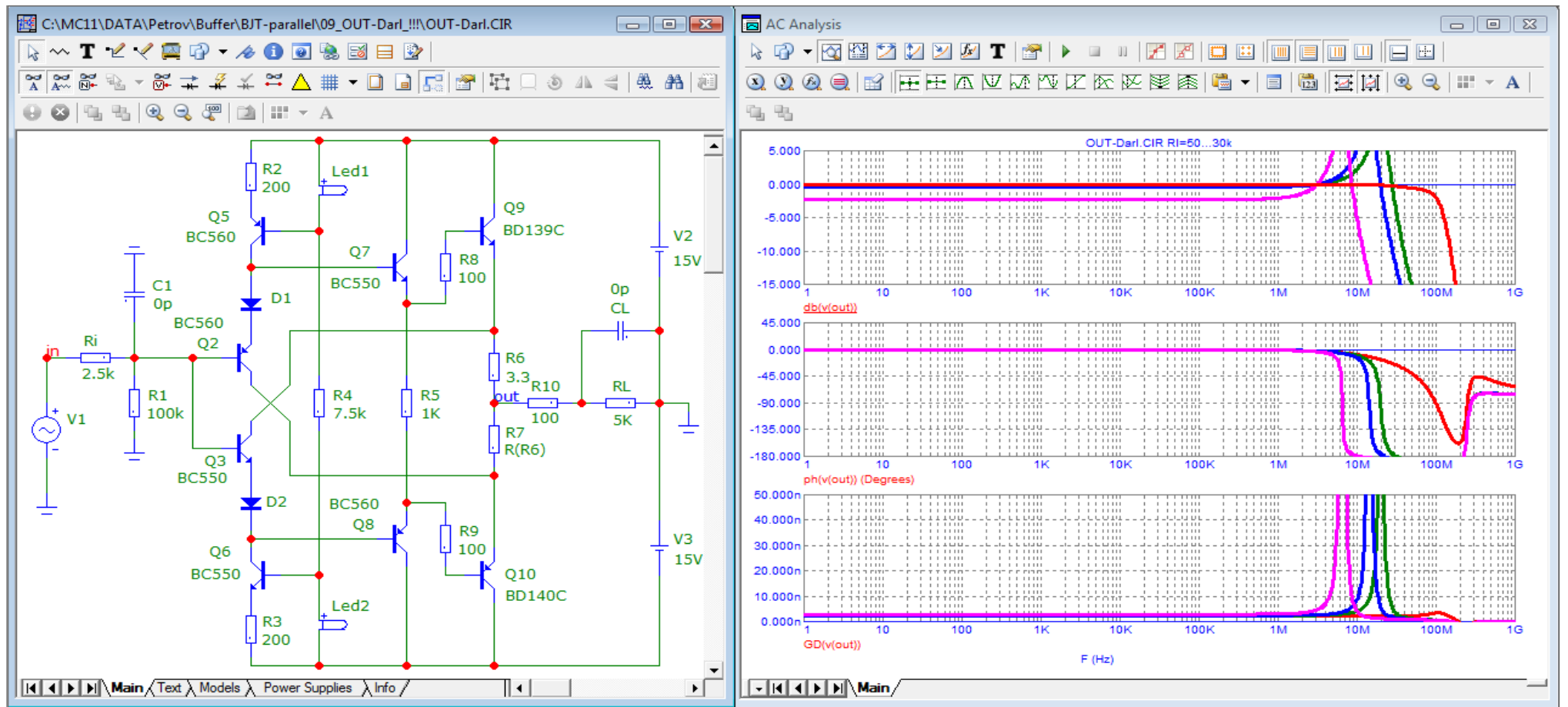


Рис. 09а). Диаграмма Бode. ГВЗ мало зависит от сопротивления источника сигнала.

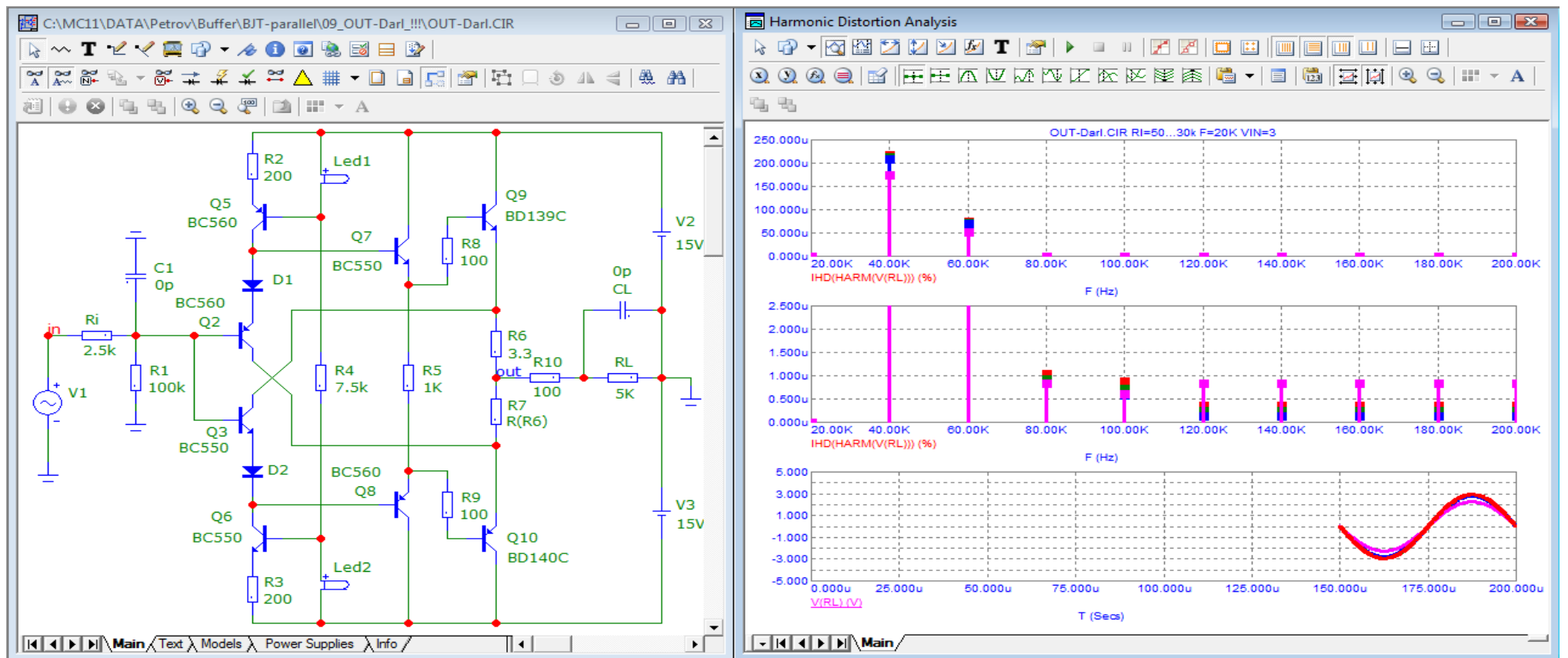


Рис. 09б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник не менее 200 раз (46 дБ)

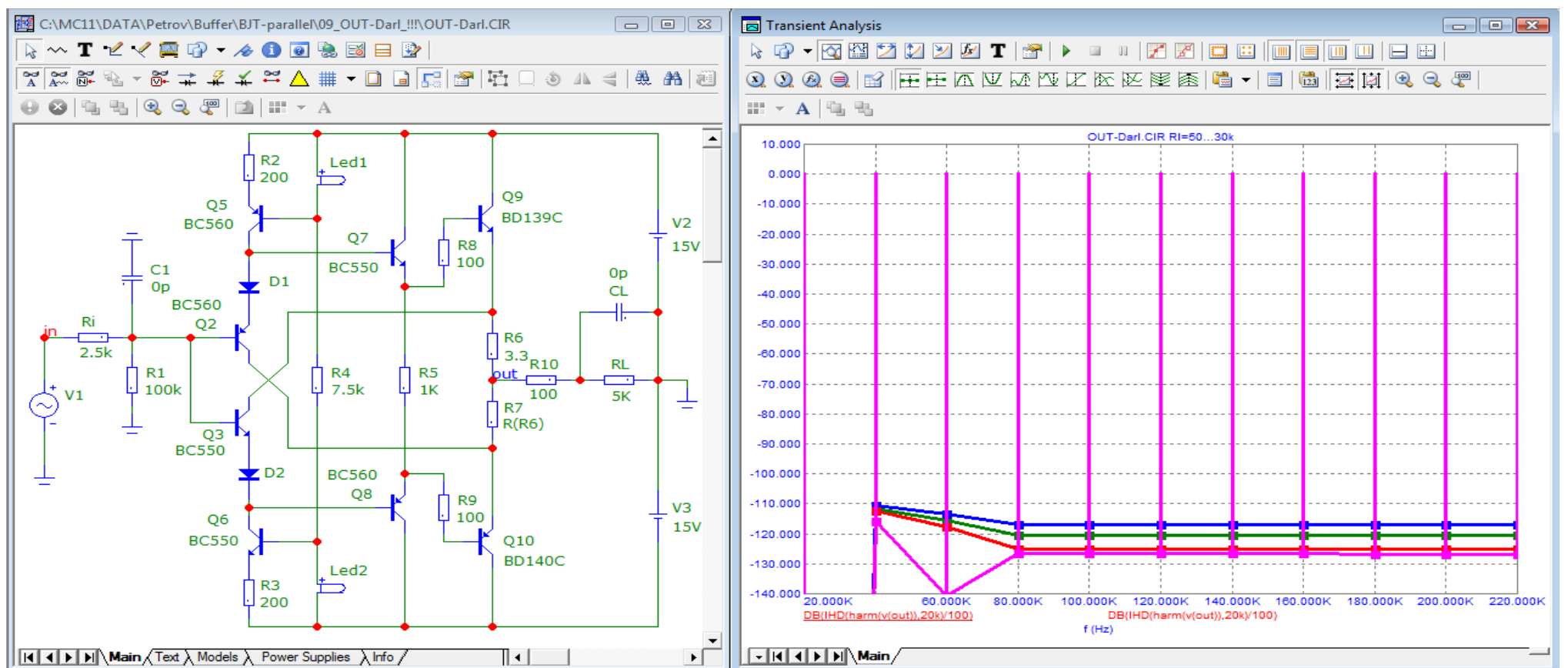


Рис. 09в). Спектр первого периода (FCD)

Буфер с эмиттерными связями во входном каскаде и ООС, а также с Дарлингтоном на выходе, рис. 10

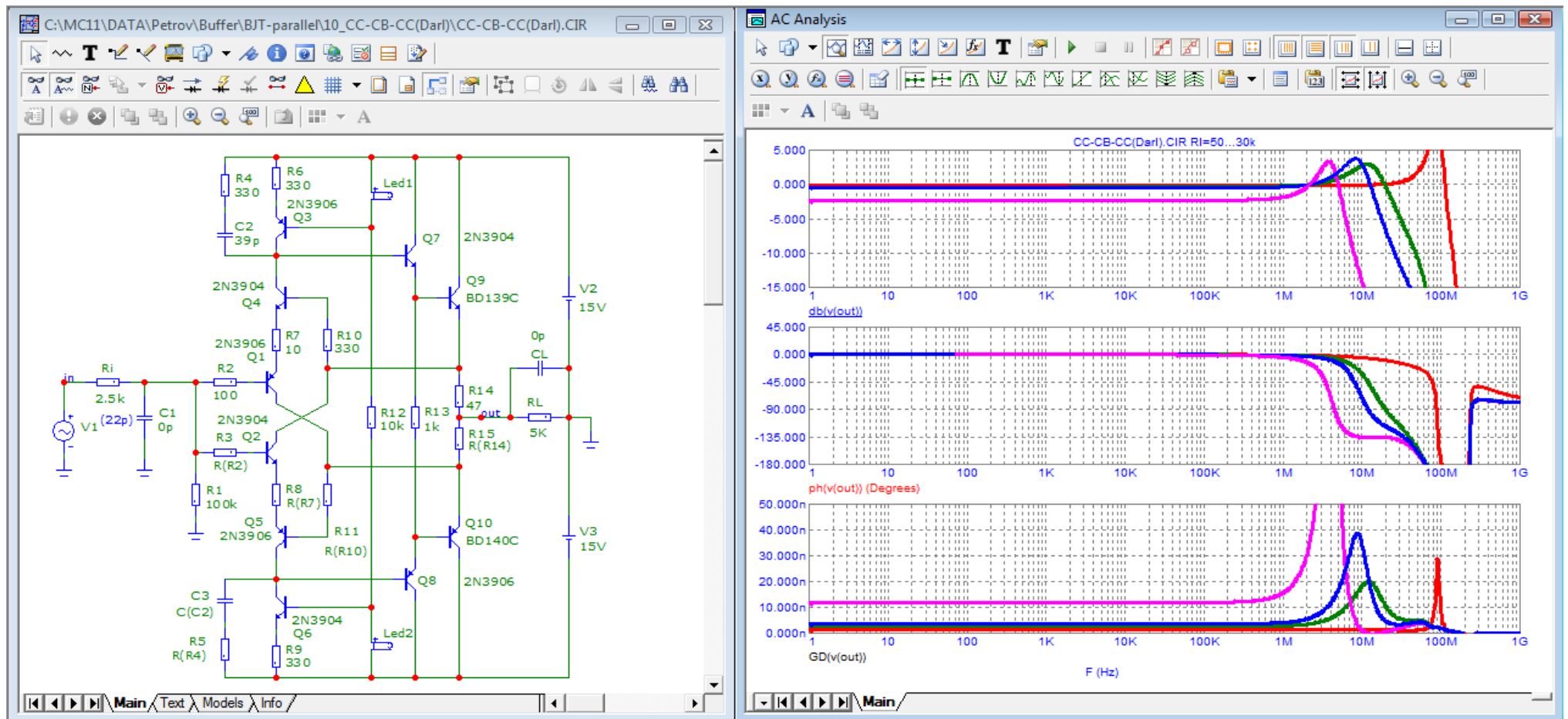


Рис. 10а). Диаграмма Боде

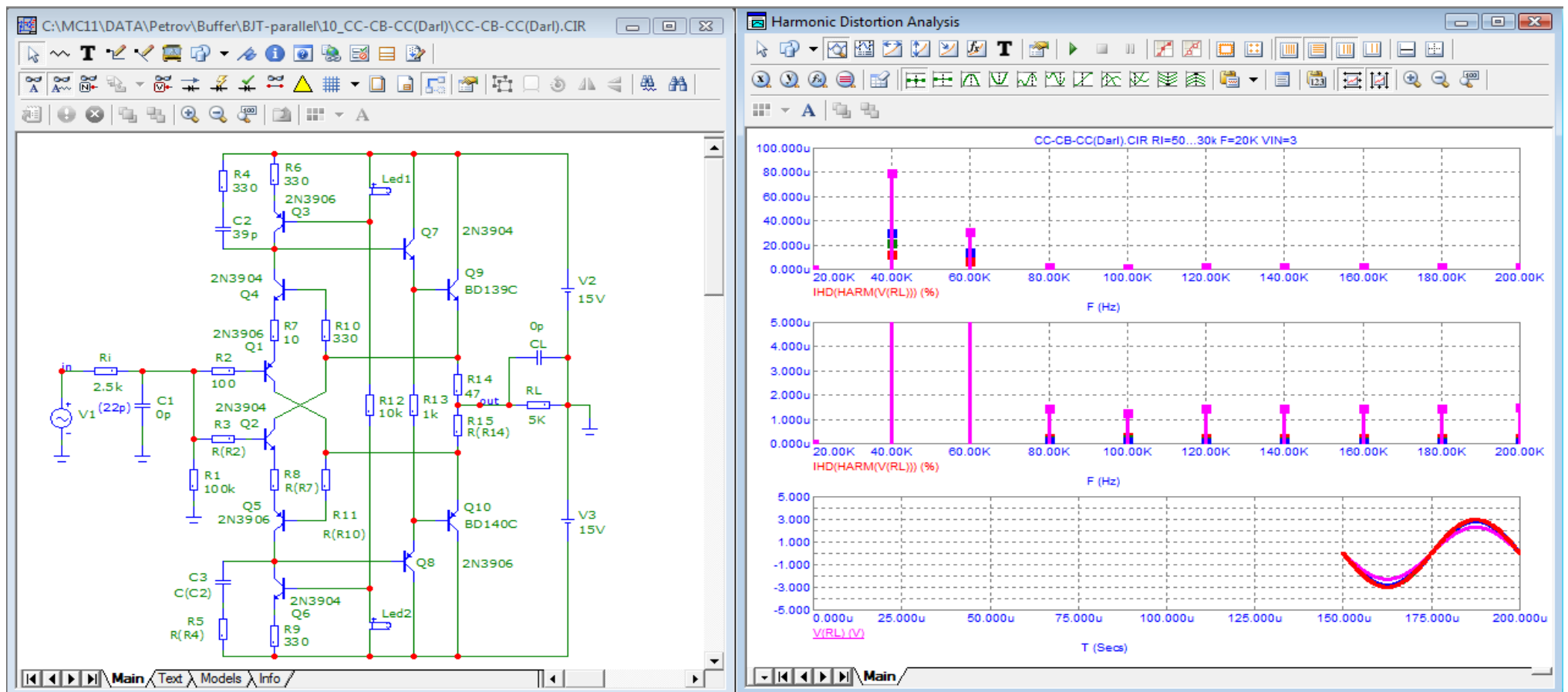


Рис. 10б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник не менее чем в 80 раз

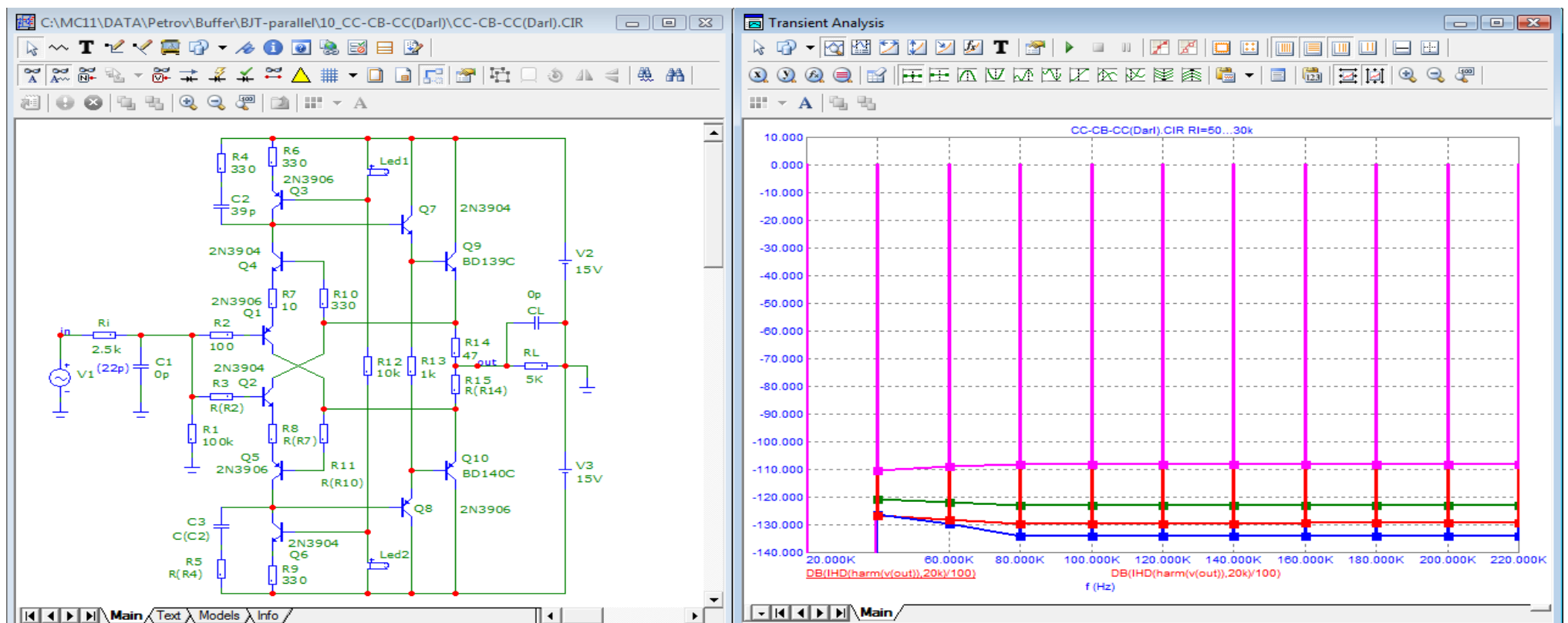


Рис. 10в) Спектр первого периода (FCD)

Простой буфер на 2-х JFET-транзисторах, рис. 11

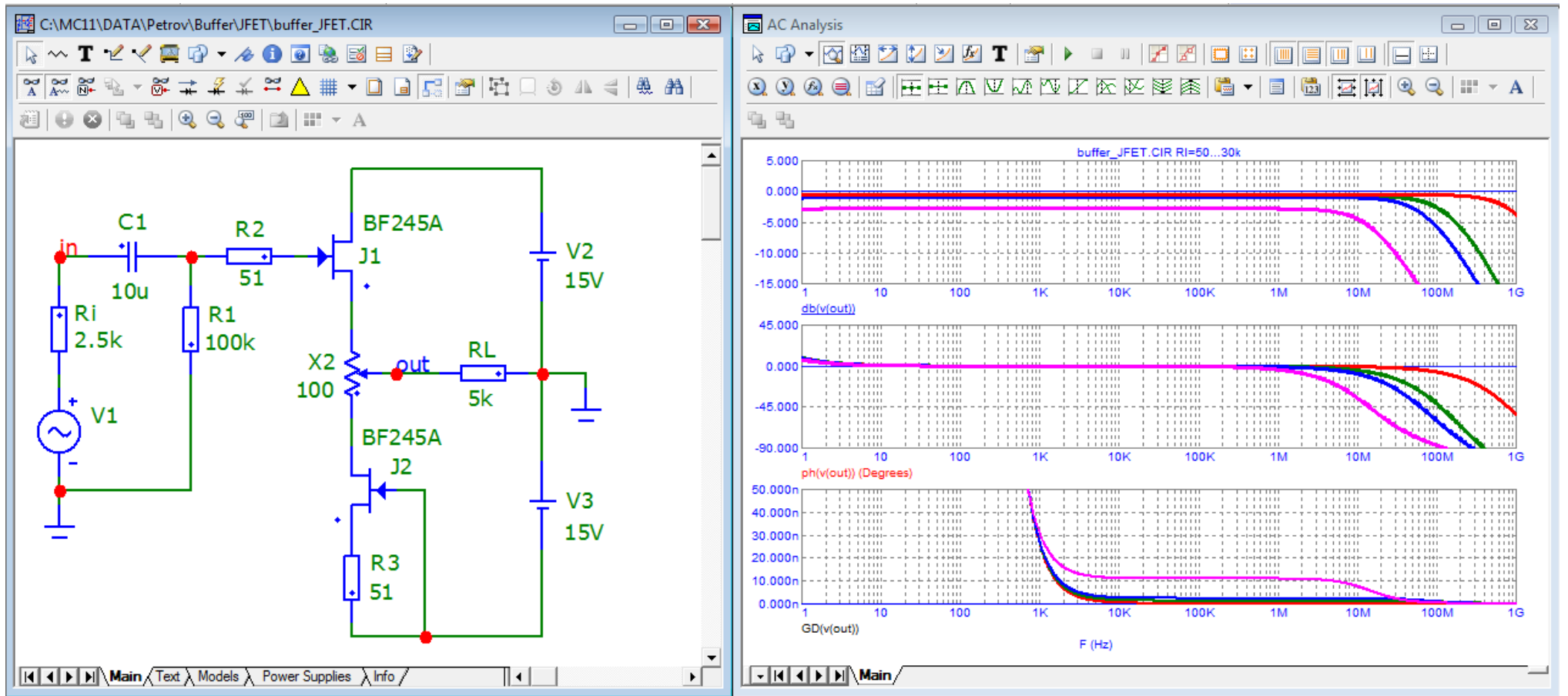


Рис. 11а). Диаграмма Бode. Характеристики без выбросов в области ВЧ.

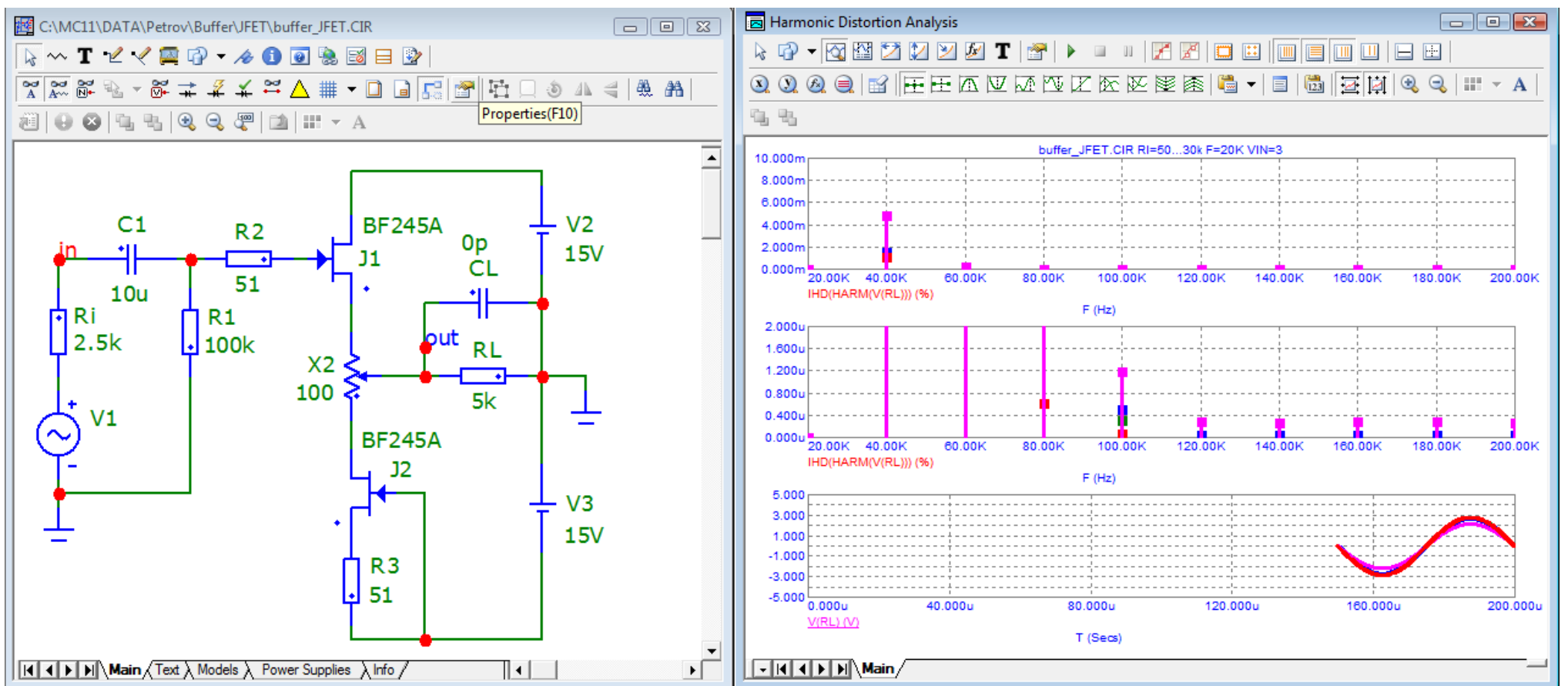


Рис. 11б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление 5-й гармоники почти в 4000! раз, а более высоких и того больше.

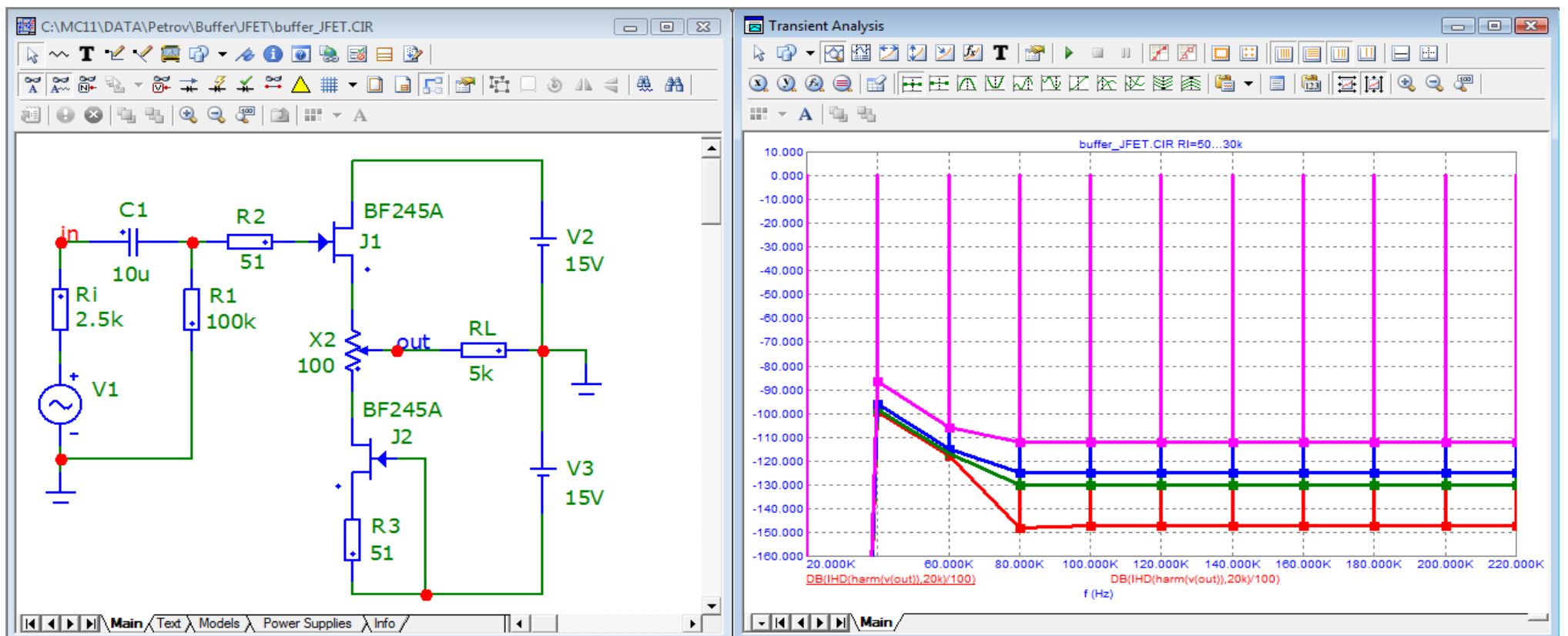


Рис. 11в). Спектр первого периода (FCD)

Буферный каскад с повышенной нагрузочной способностью, рис. 12

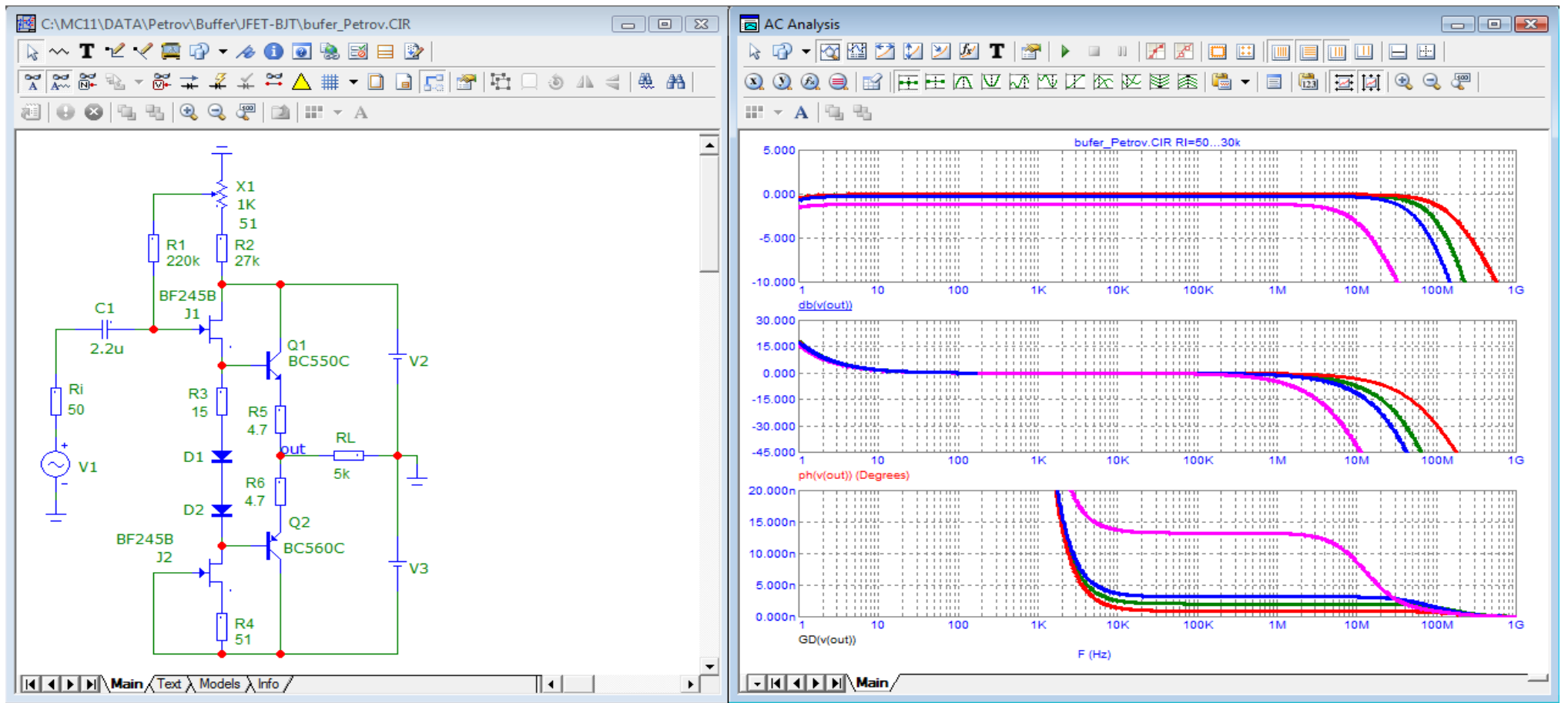


Рис. 12а). Диаграмма Боде. Зависимость ГВЗ немного выше, но также без выбросов.

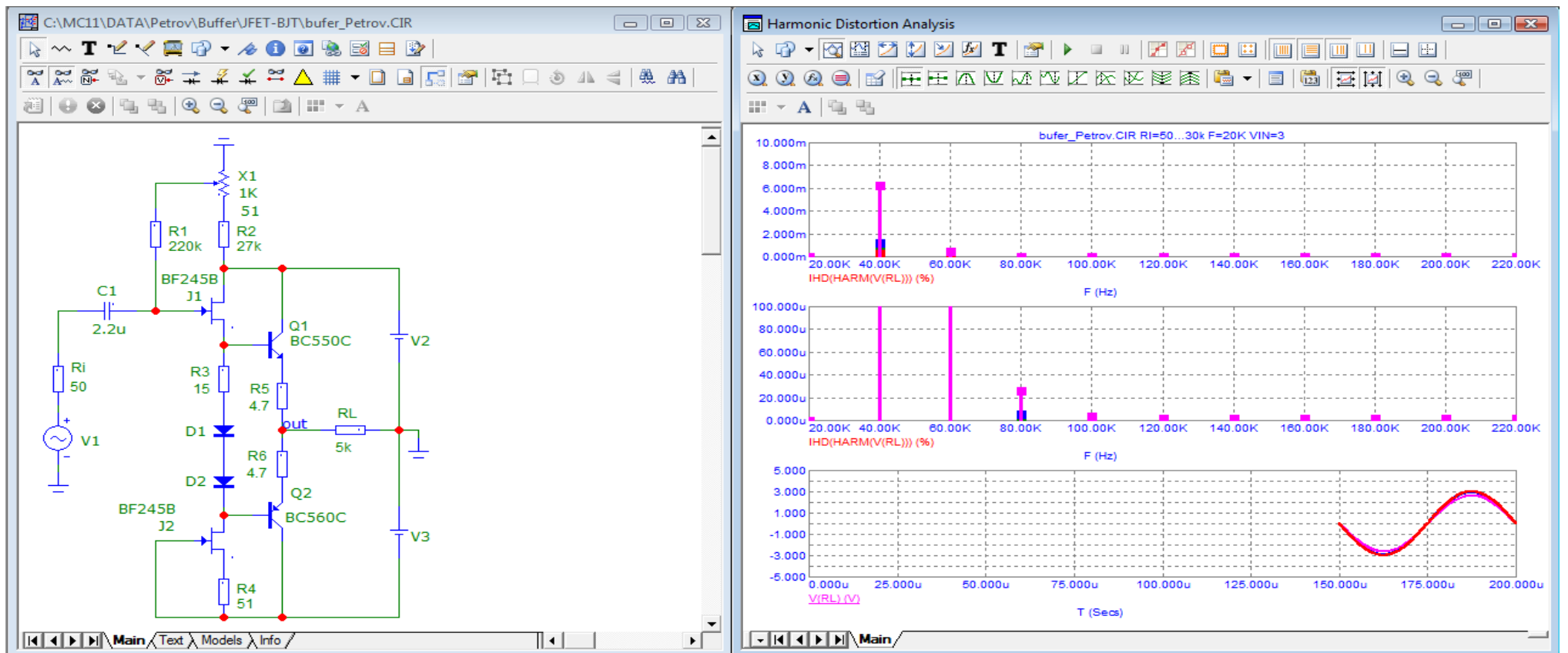


Рис. 12б). Спектр сигнала частоты 20 кГц. Ослабление 5-й гармоники более чем в 300 раз (50 дБ), а высших гармоник и того больше

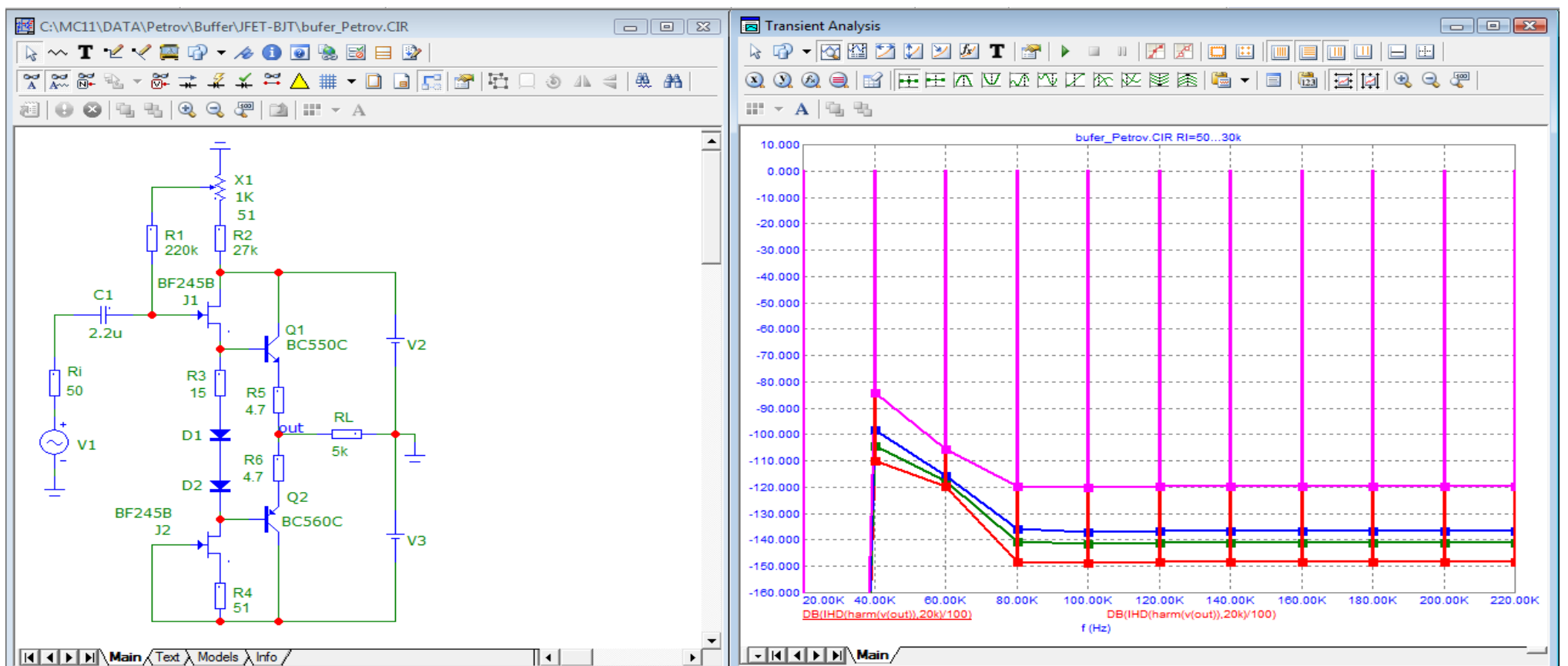


Рис. 12в). Спектр первого периода (FCD)

Буфер с симметричным входным каскадом и следящим питанием, рис. 13

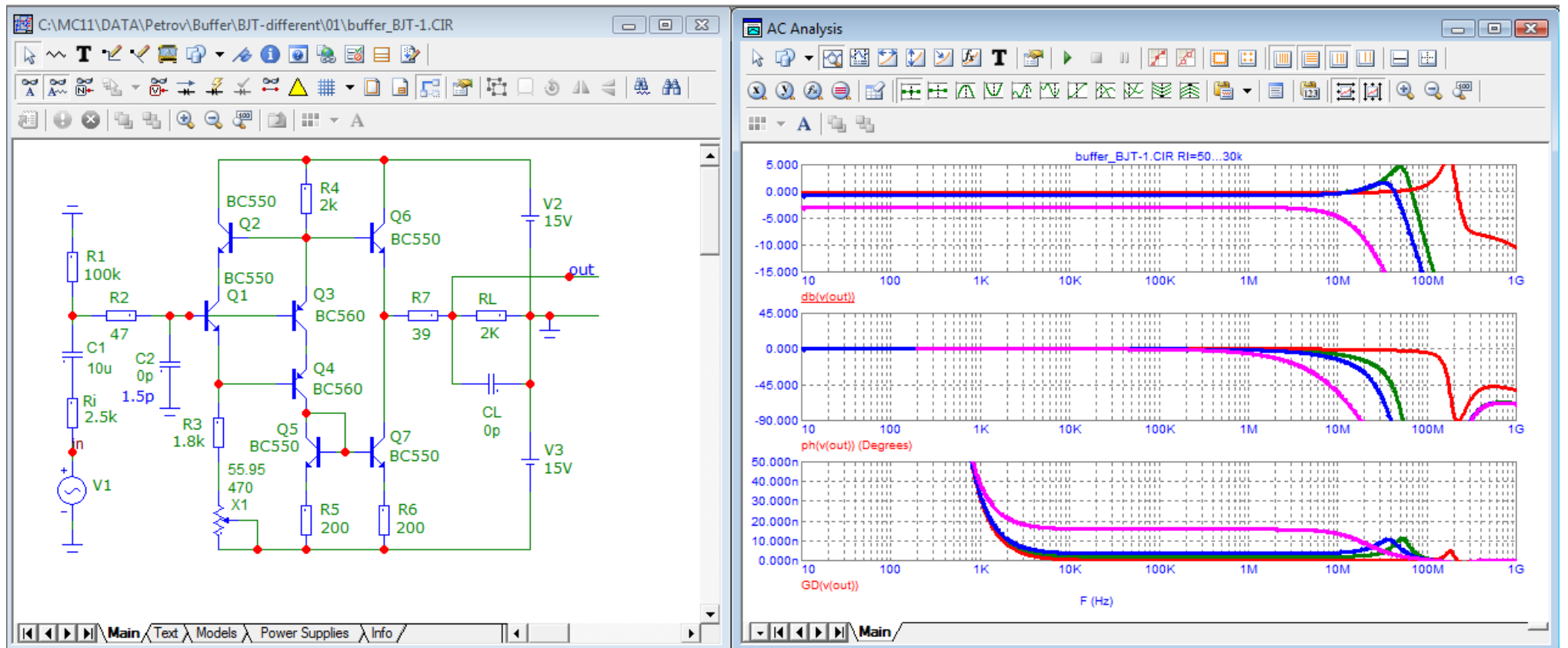


Рис. 13а). Диаграмма Бode. ГВЗ постоянно до 10 МГц и не имеет выбросов. Базовые токи Q1 и Q3 взаимно компенсируются.

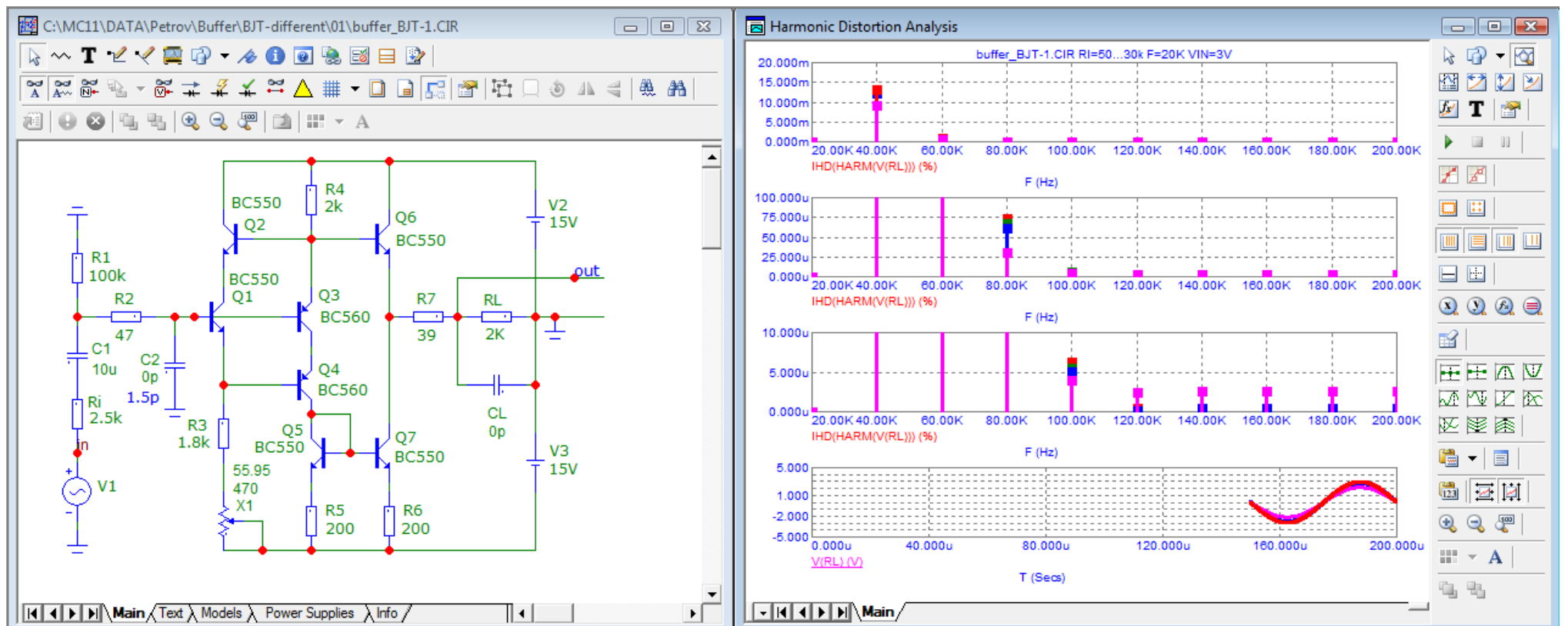


Рис. 13б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление 4-й гармоники в 150 раз, а более высших около 1000 раз (70 дБ) по отношению 2-й

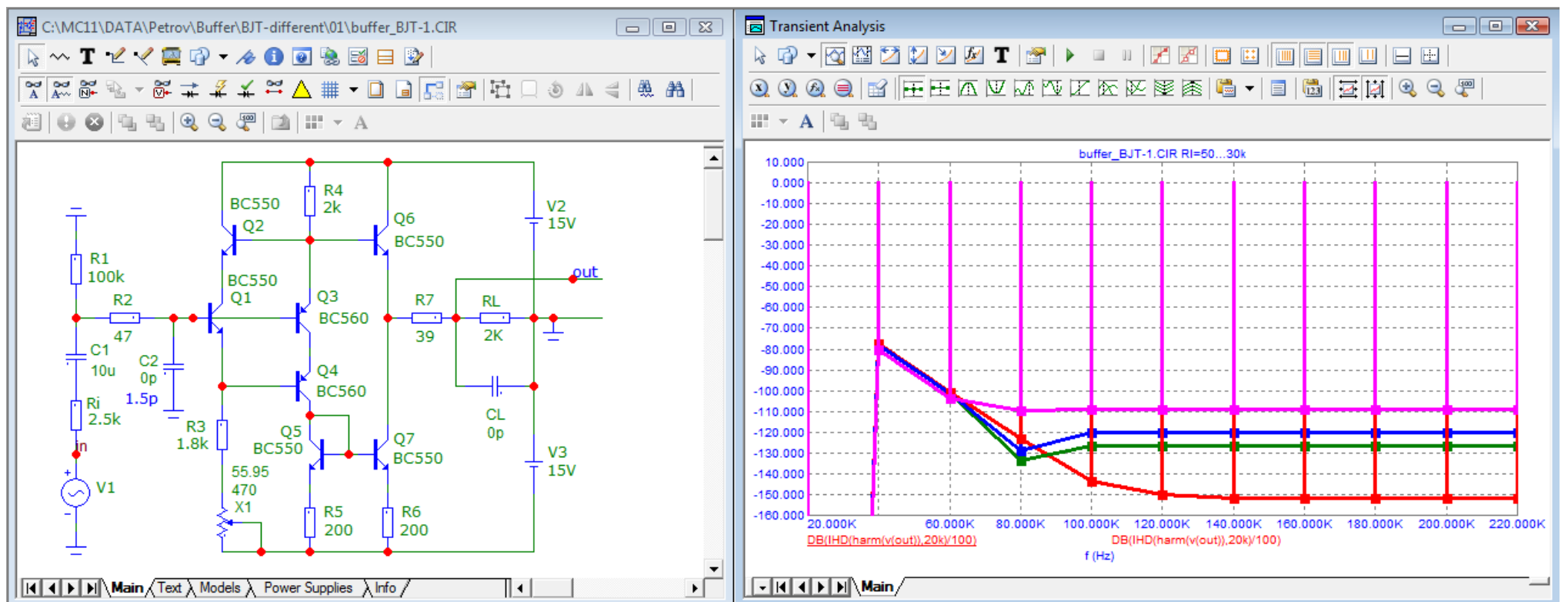


Рис. 13в). Спектр первого периода (FCD)

Буфер со следящим питанием входного каскада, рис. 14

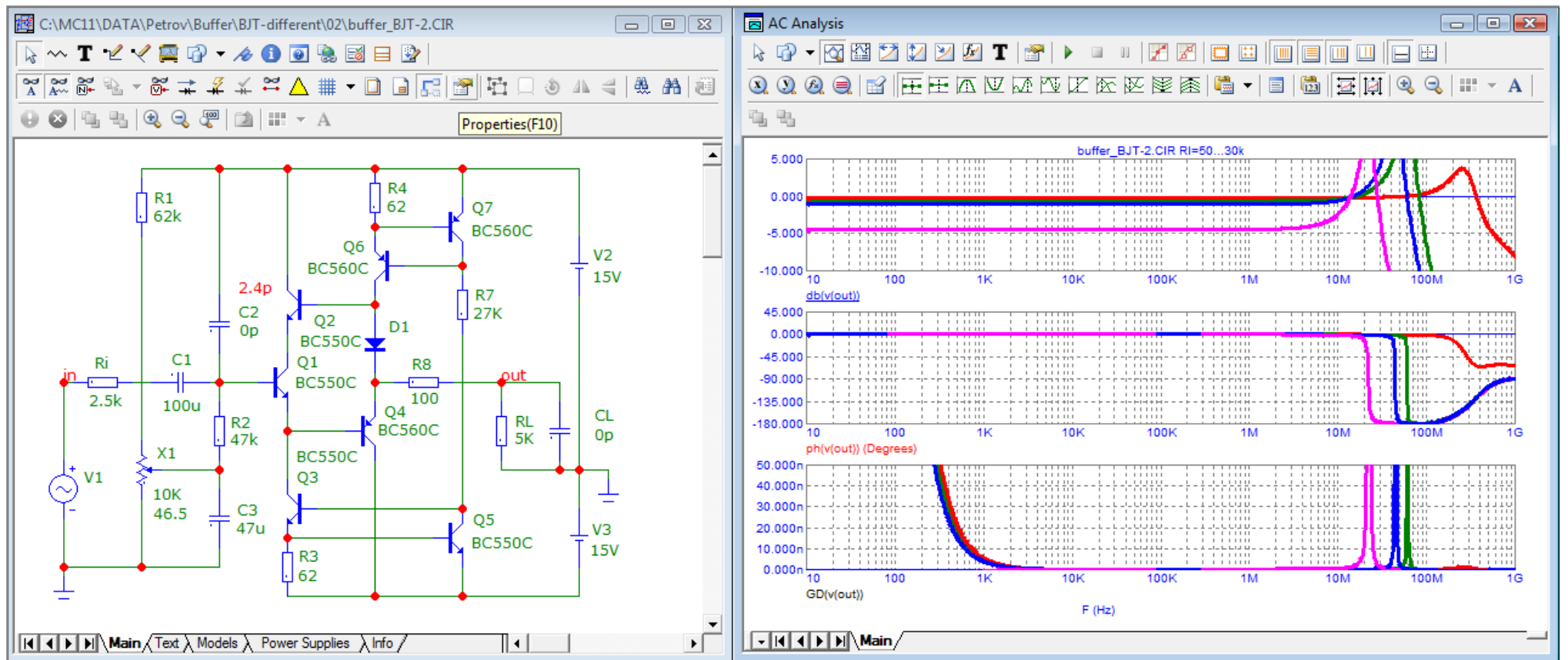


Рис. 14а). Диаграмма Бode. ГВЗ ничтожно мало и мало зависит от сопротивления источника сигнала благодаря следящему питанию.

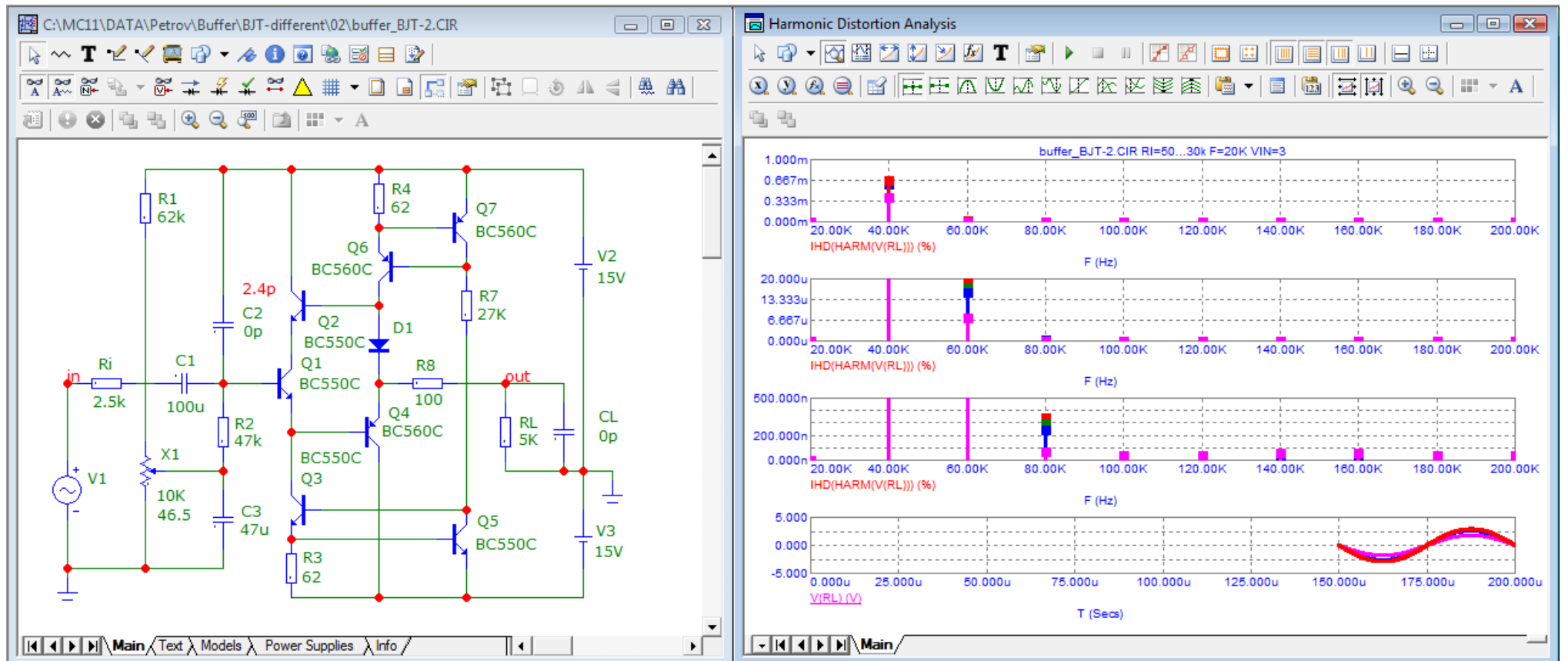


Рис. 14б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Дополнительное ослабление высших гармоник по отношению к низшим около 1000 раз.

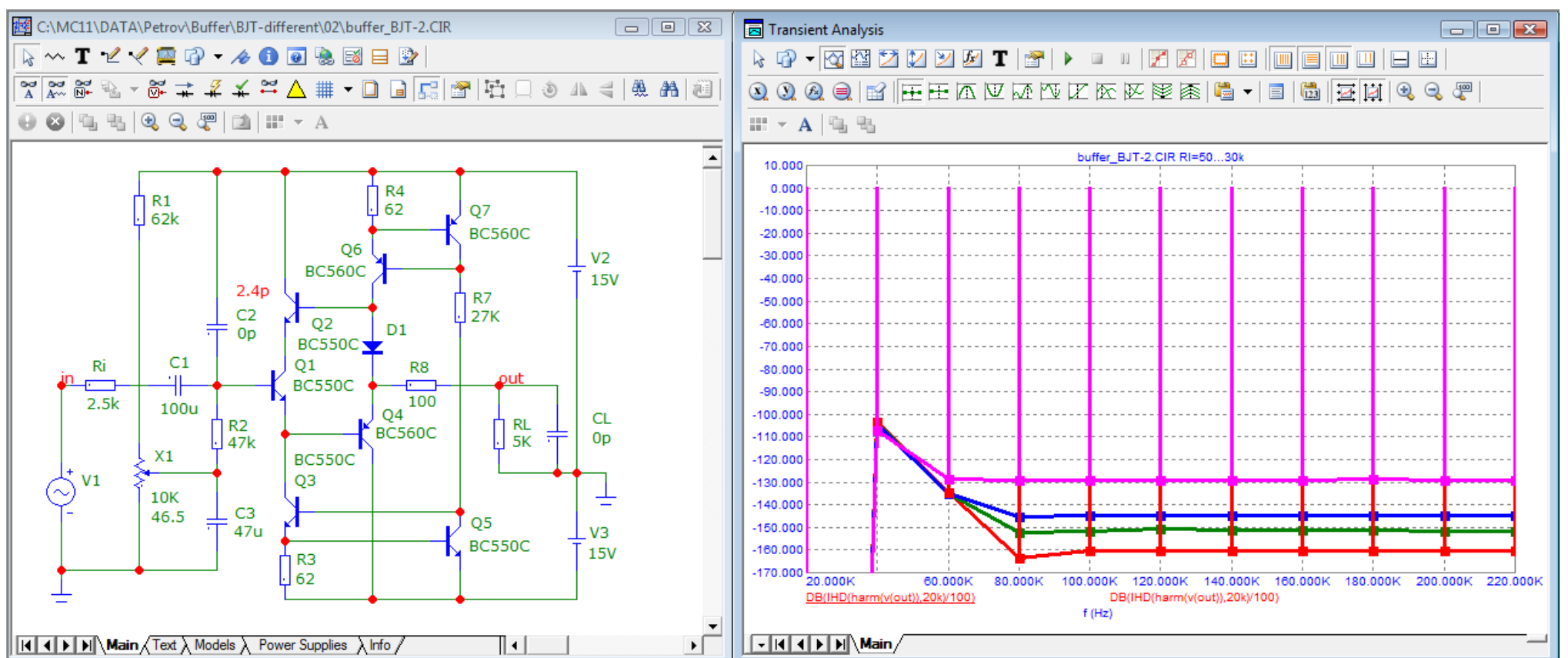


Рис. 14в). Спектр первого периода (FCD). Высшие гармоники ничтожно малы даже на первом периоде.

Буферный каскад по структуре Triangle (<https://www.tubecad.com/2021/08/blog0543.htm>), рис. 15

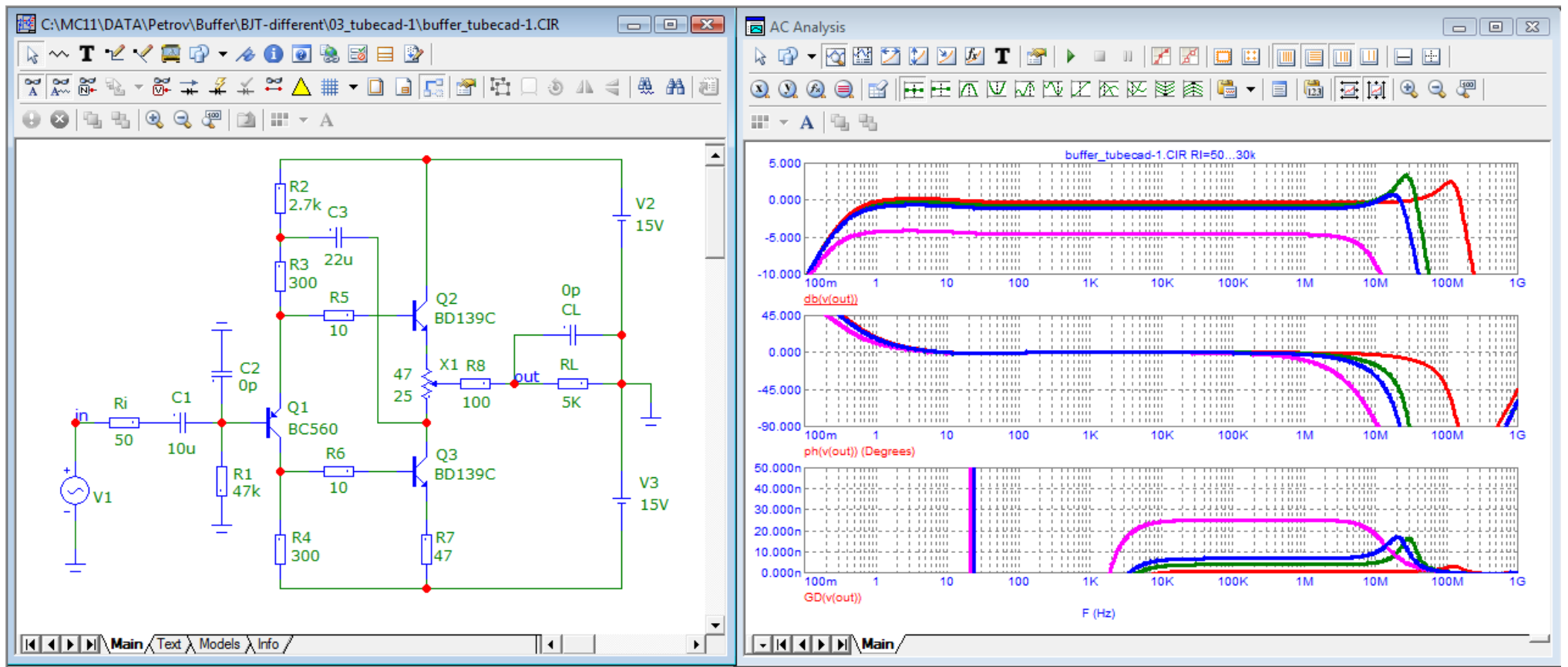


Рис. 15а). Диаграмма Бode. ГВЗ постоянно до нескольких МГц, нет больших выбросов выше 1 МГц.

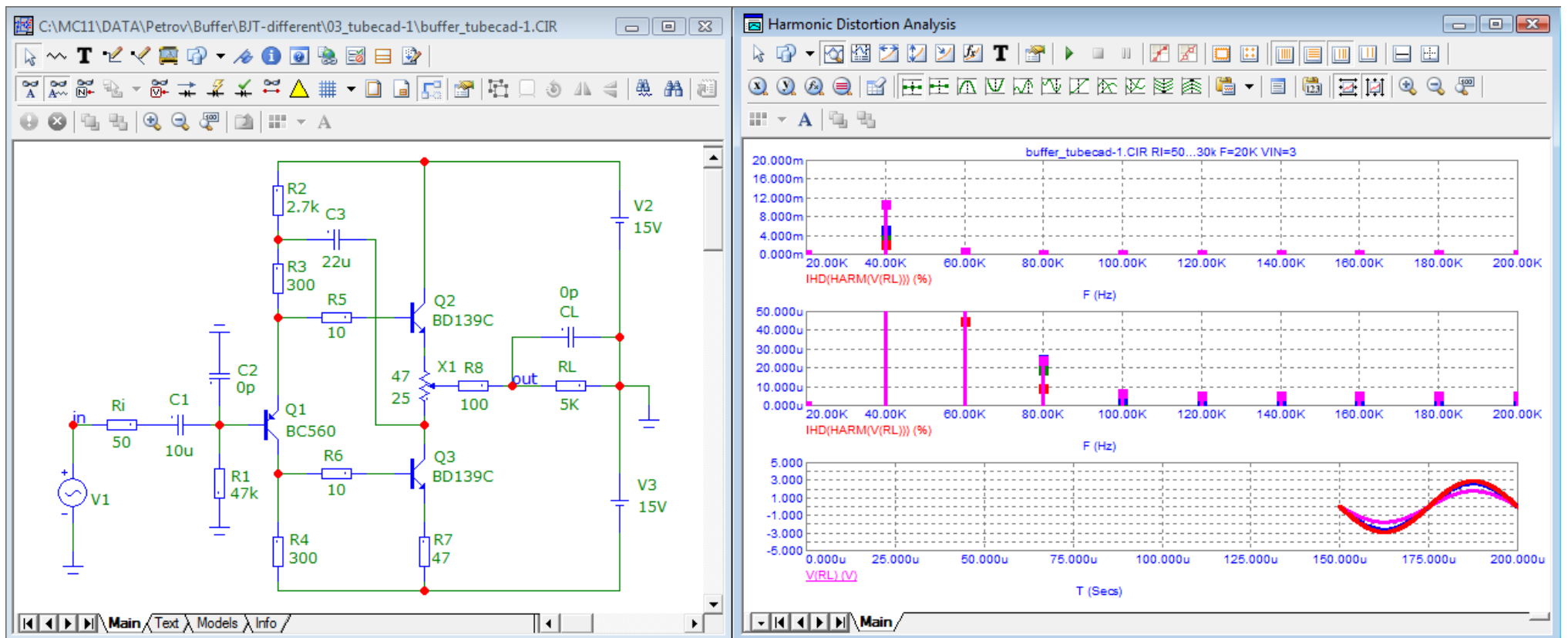


Рис. 15б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление 5-й гармоники и выше по отношению ко 2-й не менее 1000 раз! (70 дБ)

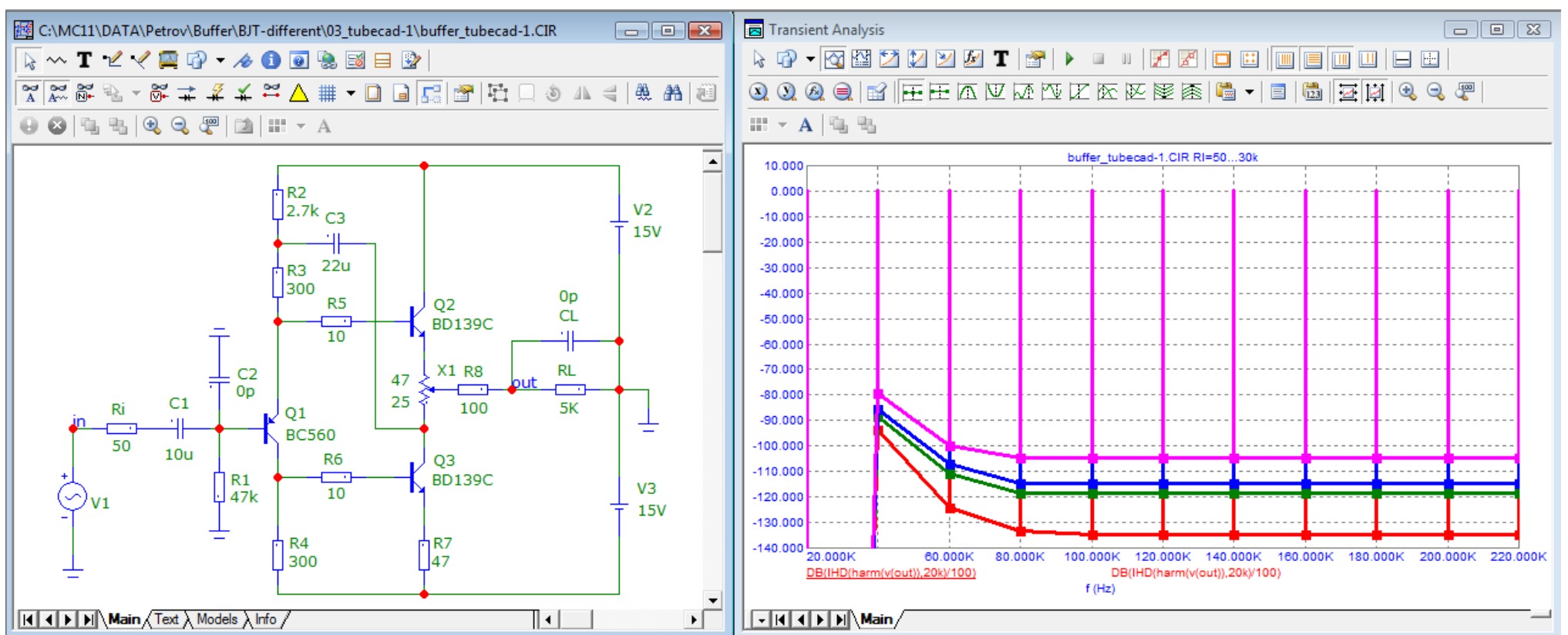


Рис. 15в). Спектр первого периода (FCD)

Буферный каскад по структуре Triangle с управляемыми ГСТ, рис. 16

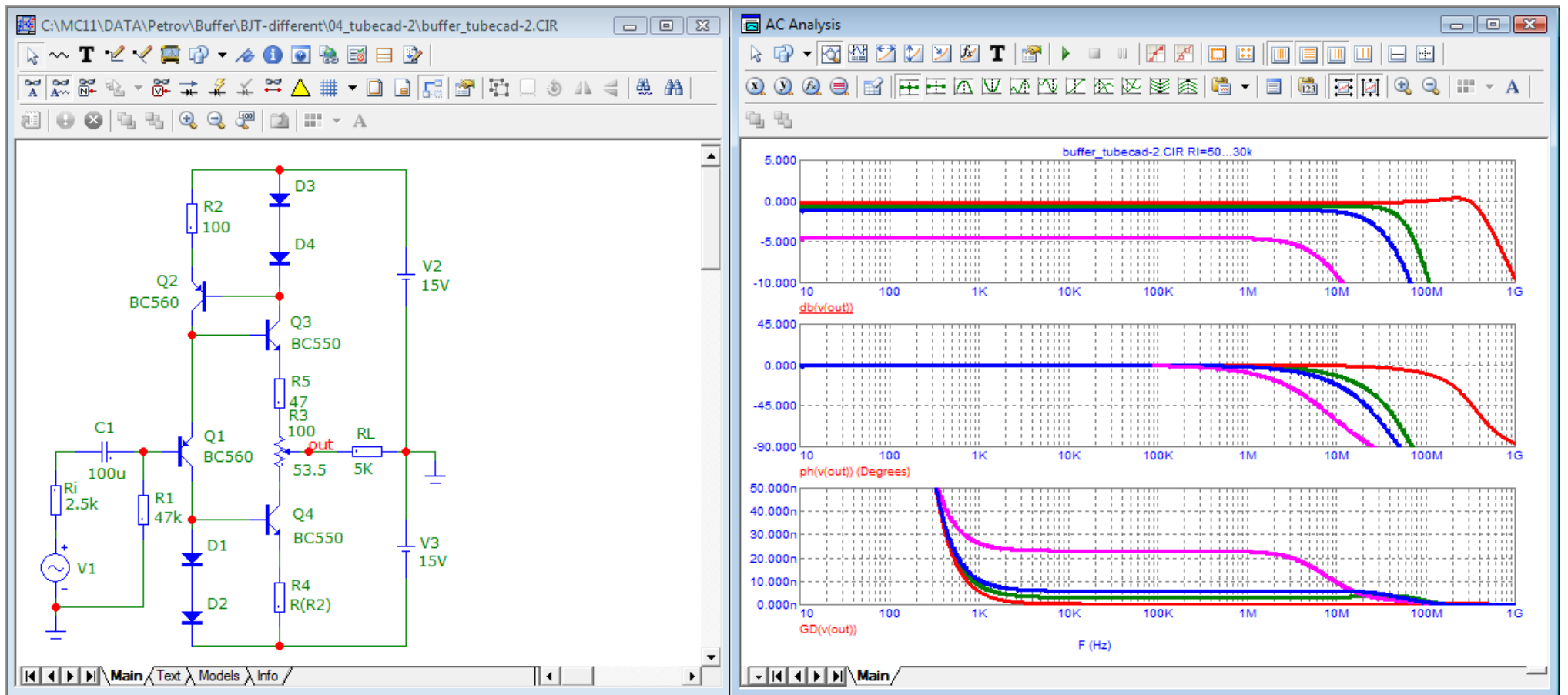


Рис. 16а). Диаграмма Бode. Все характеристики без выбросов.

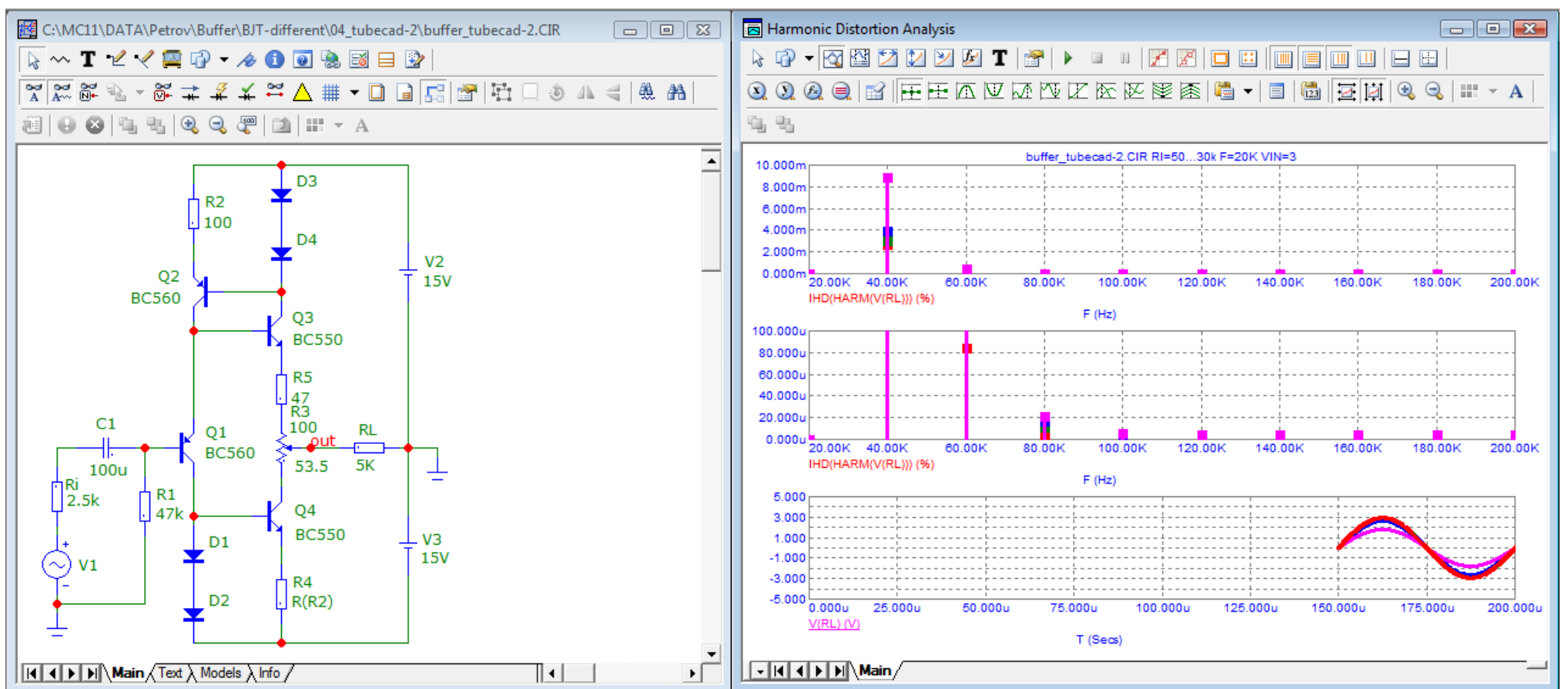


Рис. 16б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Ослабление высших гармоник более чем в 500 раз по отношению к 2-й гармонике

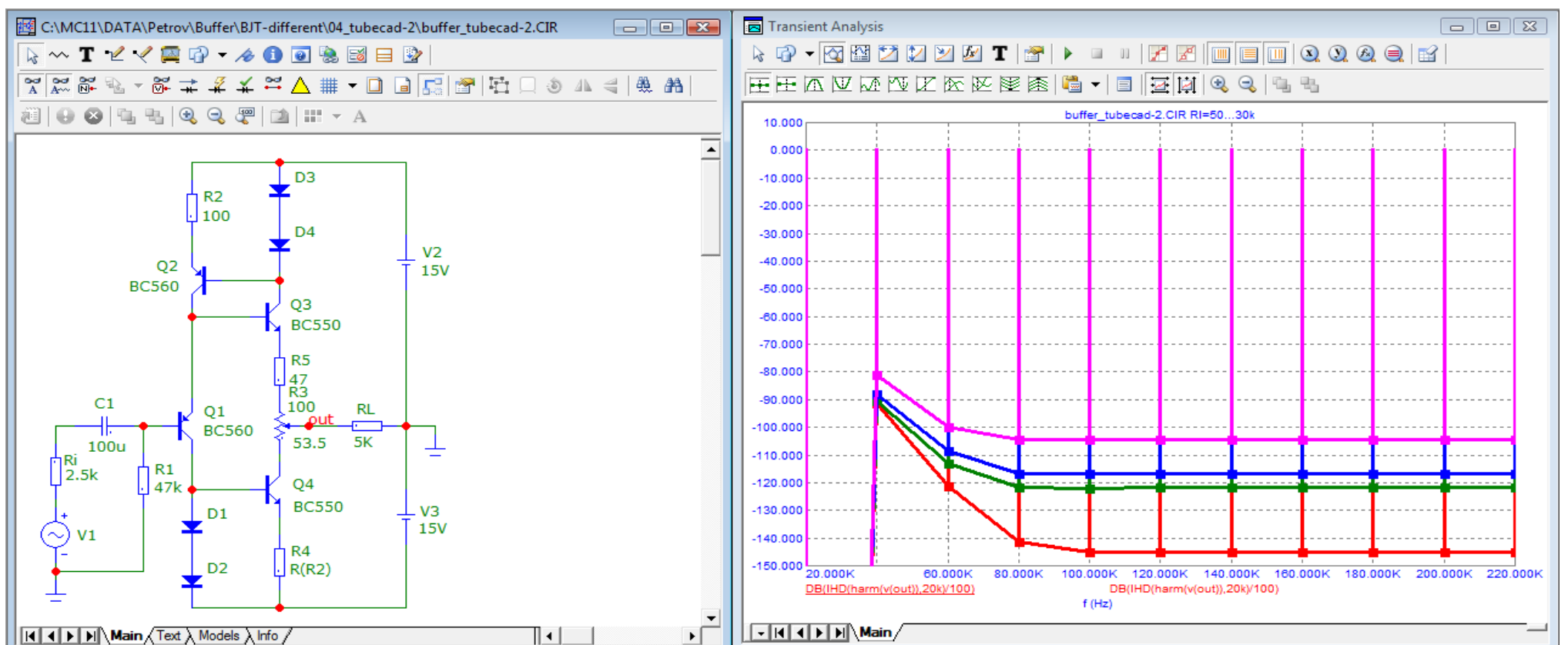
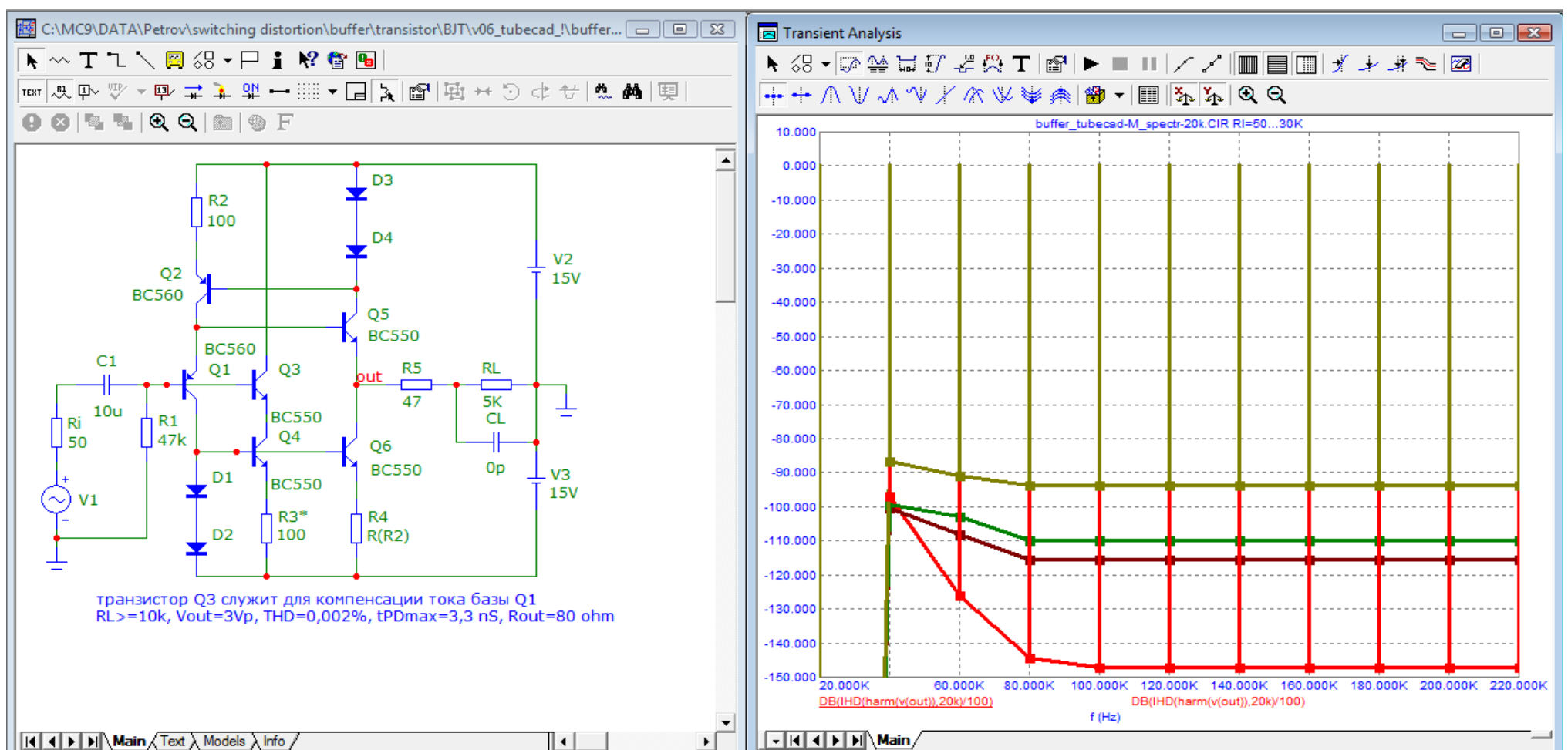
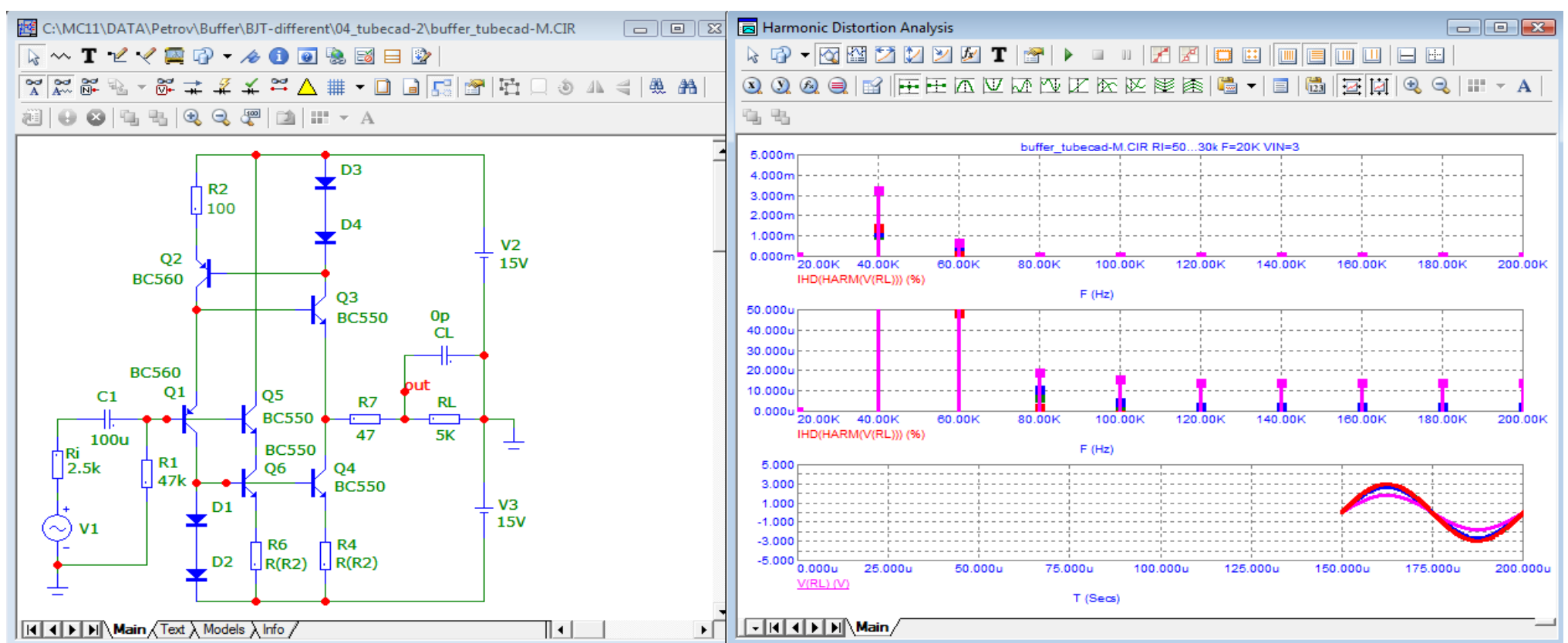
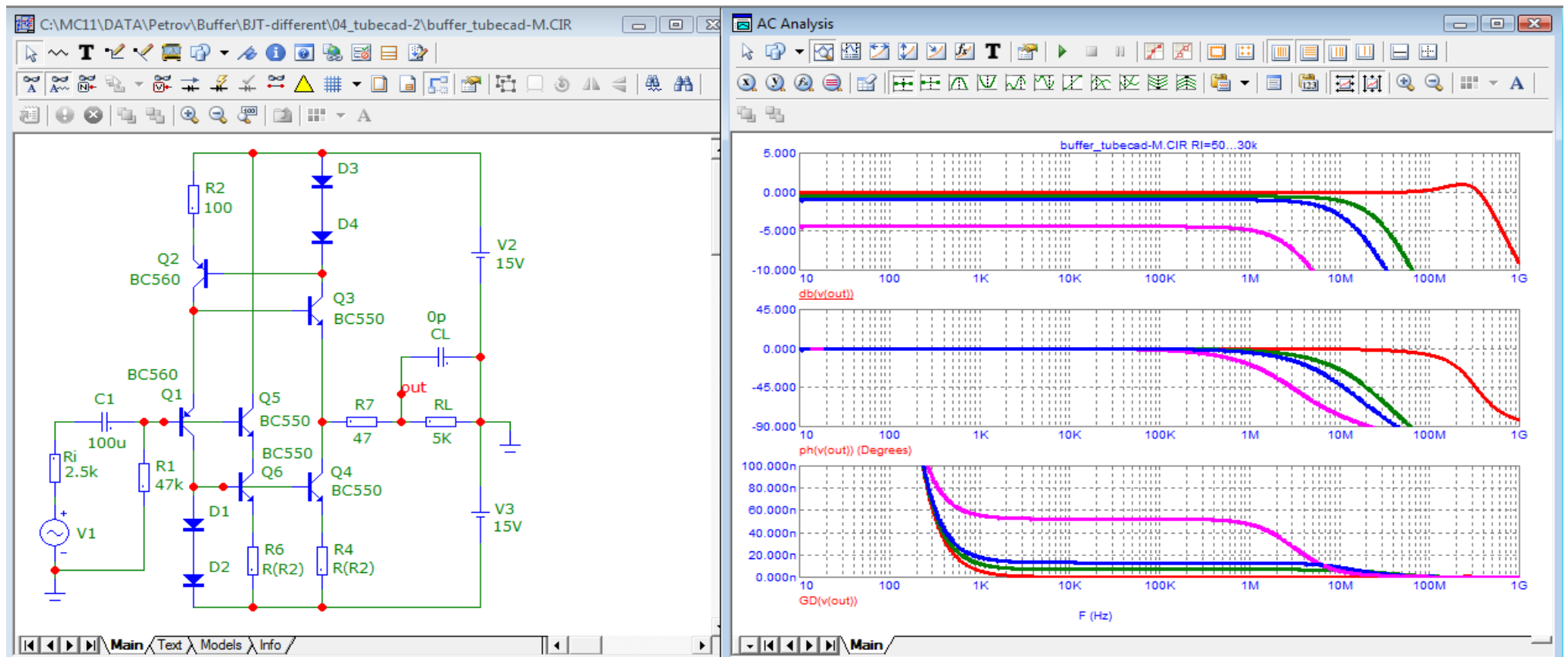


Рис. 16в). Спектр первого периода (FCD)

Буферный каскад Triangle с компенсацией входного базового тока, рис. 17



Недостаток оригинальной схемы в том что резистор на входе за счет тока базы создает небольшое смещение. Это смещение можно компенсировать если дополнить схему еще одним транзистором другой проводимости желательно с таким же коэффициентом передачи тока базы. Базовые токи компенсируют друг друга и смещение будет сведено к нулю. При необходимости смещение можно убрать подбором резистора R3.

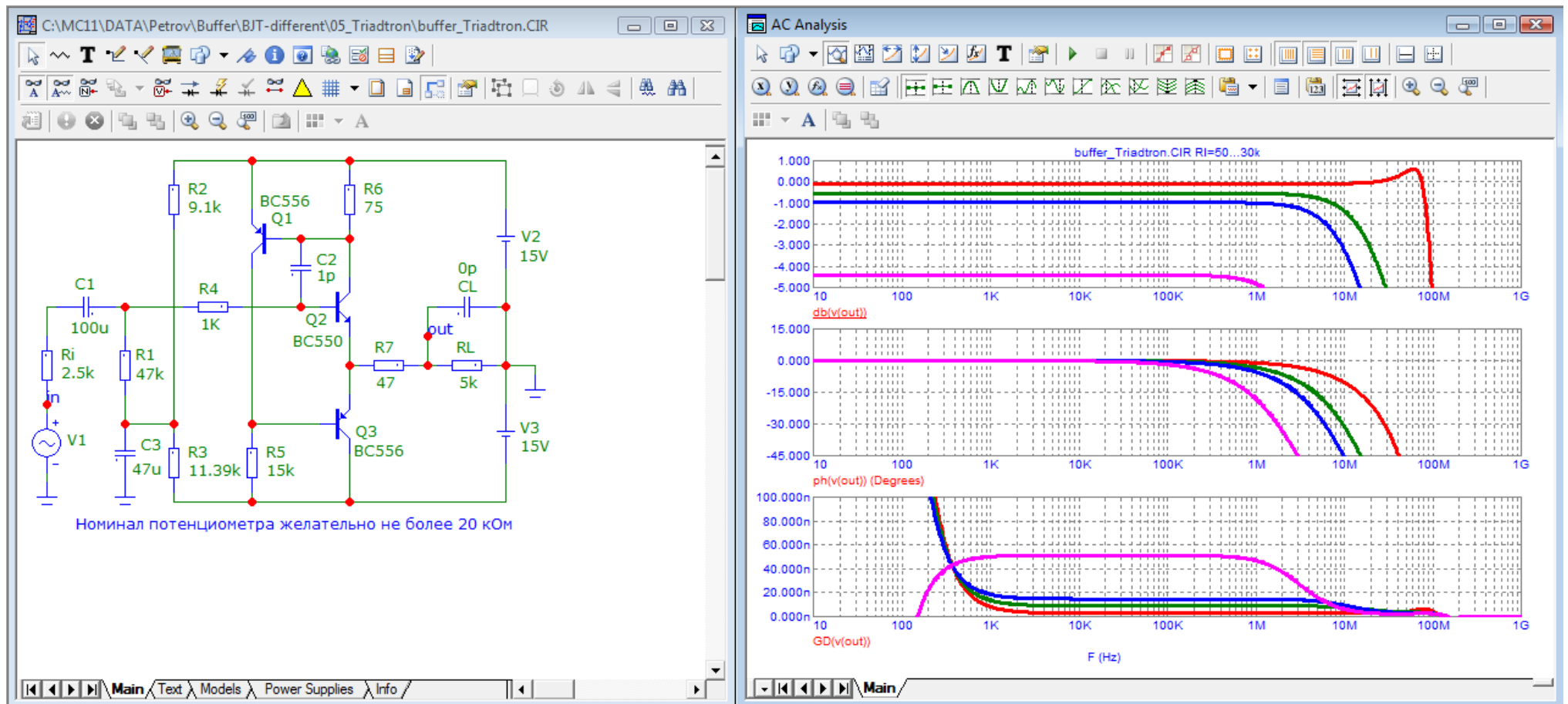


Рис. 18а). Диаграмма Бode. Иммет хорошие характеристики с минимальной коррекцией C2 (1 пФ).

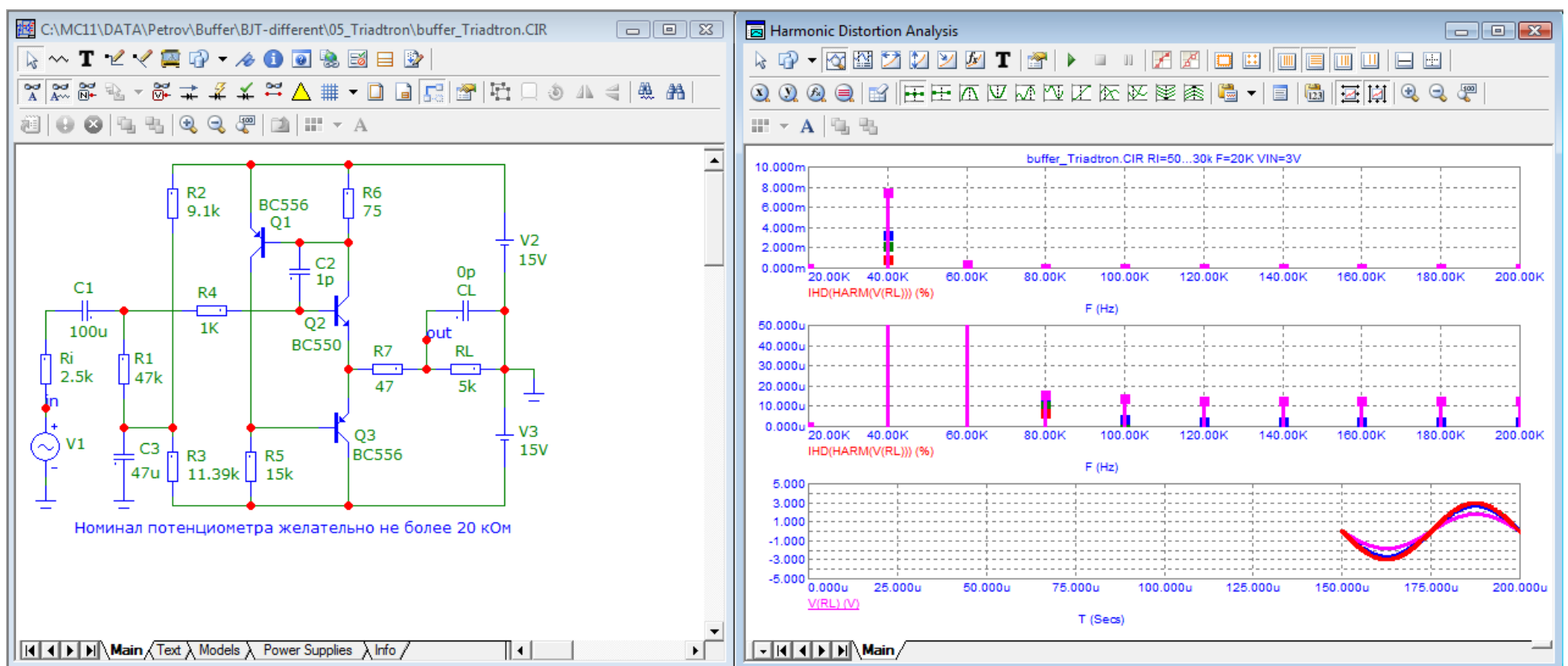


Рис. 18б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Дополнительное ослабление высших гармоник не менее 400 раз.

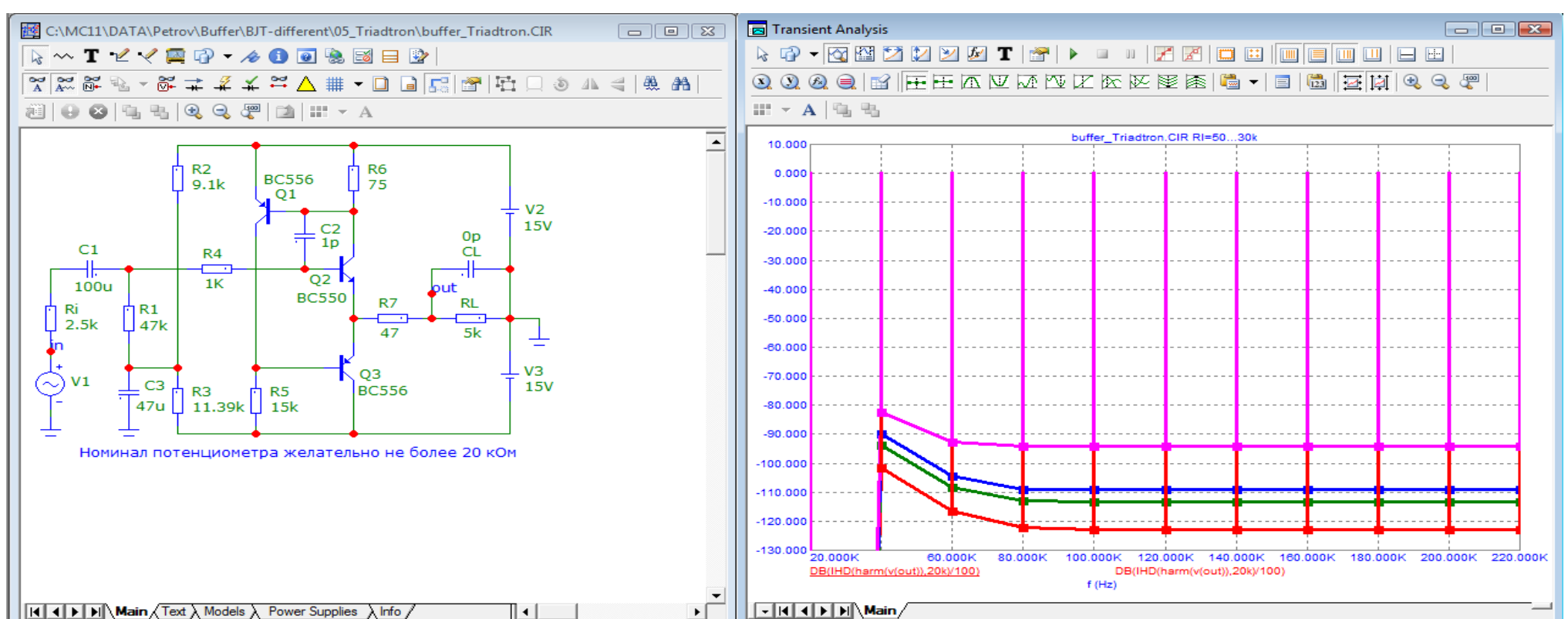


Рис. 18в). Спектр первого периода (FCD).

Буферный каскад по структурной схеме ОУ и 100% общей ООС, рис. 19

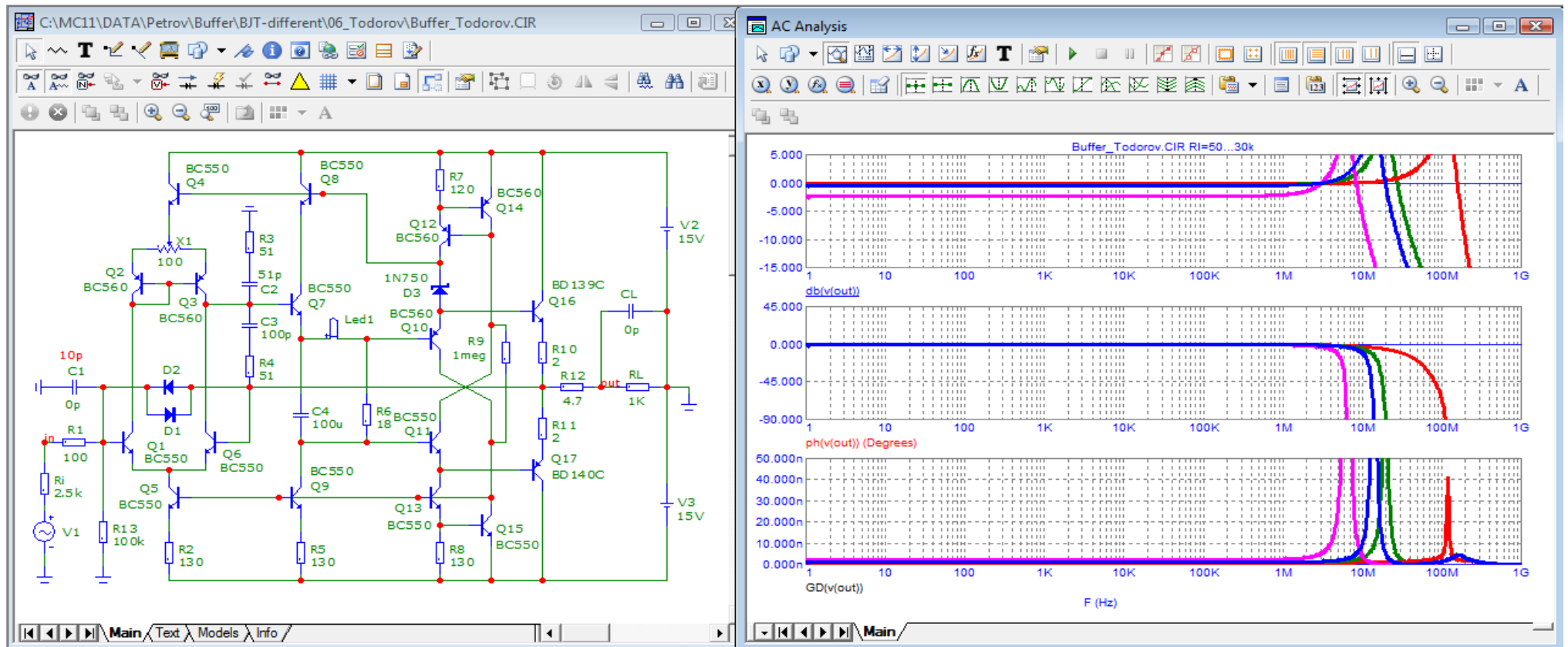


Рис. 19а). Диаграмма Бode. ГВЗ очень мало (несколько нс) и постоянно до нескольких МГц.

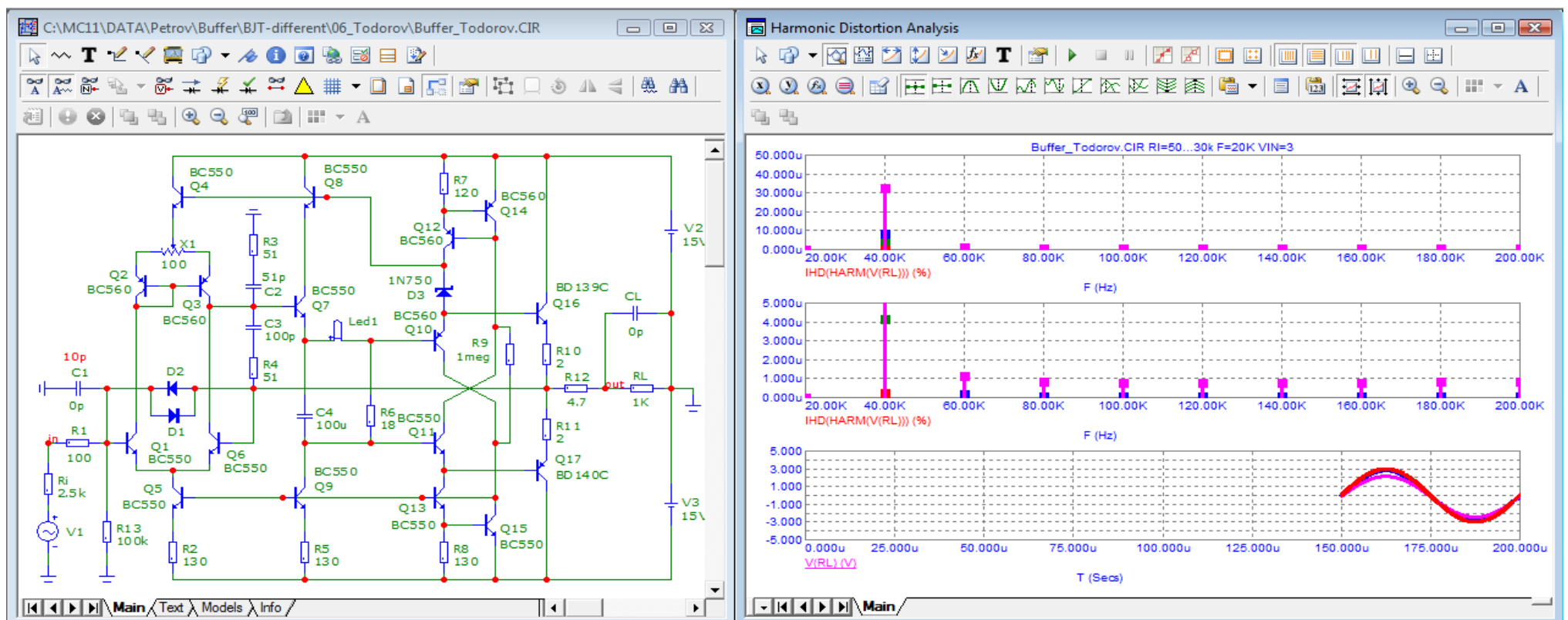


Рис. 19б). Спектр сигнала частотой 20 кГц. Дополнительное ослабление высших гармоник более 30 раз (30 дБ)

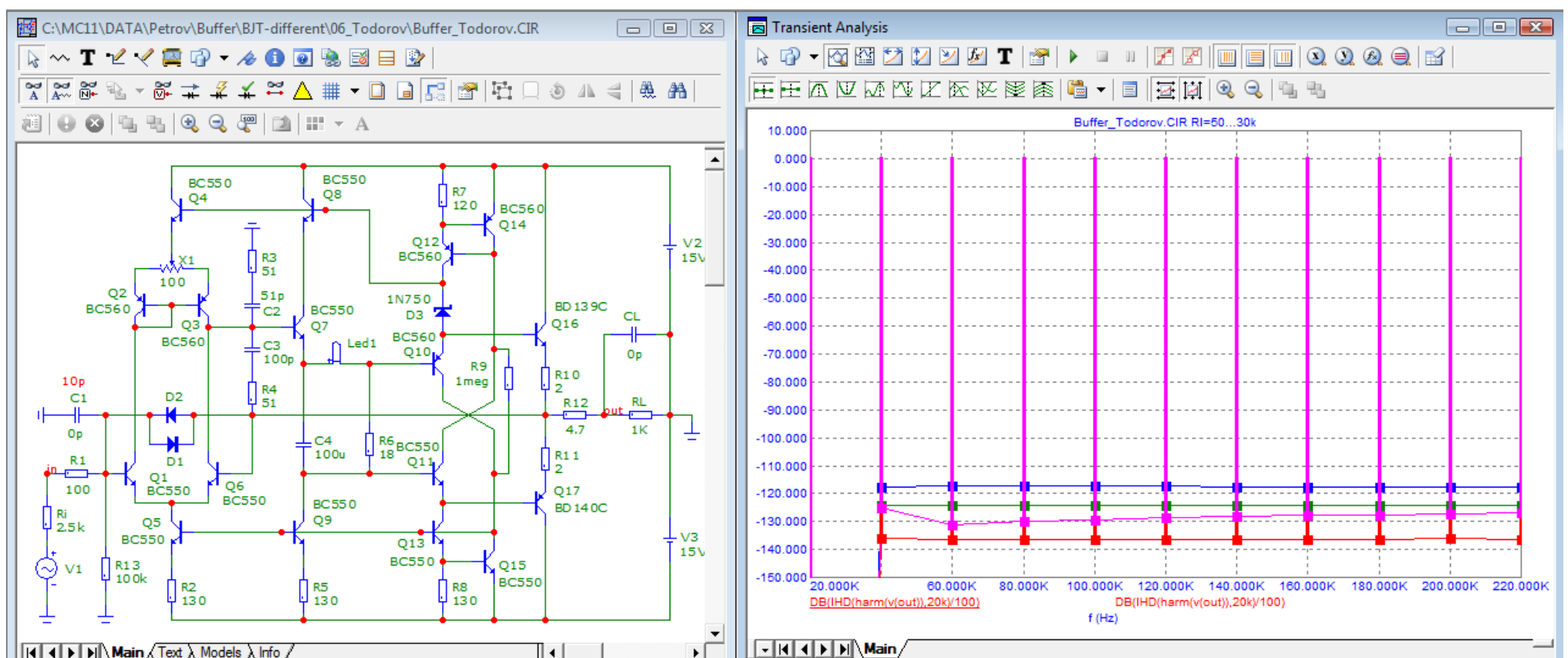


Рис. 19в). Спектр сигнала первого периода (FCD). В отличие от безОСных буферов здесь все гармоники имеют одинаковый уровень, хоть и очень низкий благодаря ничтожно малому значению t_{PD} (time Propagation Delay).

Краткий обзор буферов и их беглый анализ выполнил Александр Петров