

Эволюция повторителей в качестве ВК для безОСного УМЗЧ

С самого начала развития ламповой схемотехники выяснилось что простому однотактному повторителю свойственны большие искажения и несимметричное выходное сопротивление. Поэтому уже в 1944 году Уайт получает патент на усовершенствованный повторитель до псевдодвухтактного. Анализ повторителей сделаем на твердотельном аналоге пентода — транзисторе типа МОСФЕТ. Во всех схемах использован один и тот же транзистор с током покоя 2,2 А (за исключением исходного повторителя в котором ток немного выше).

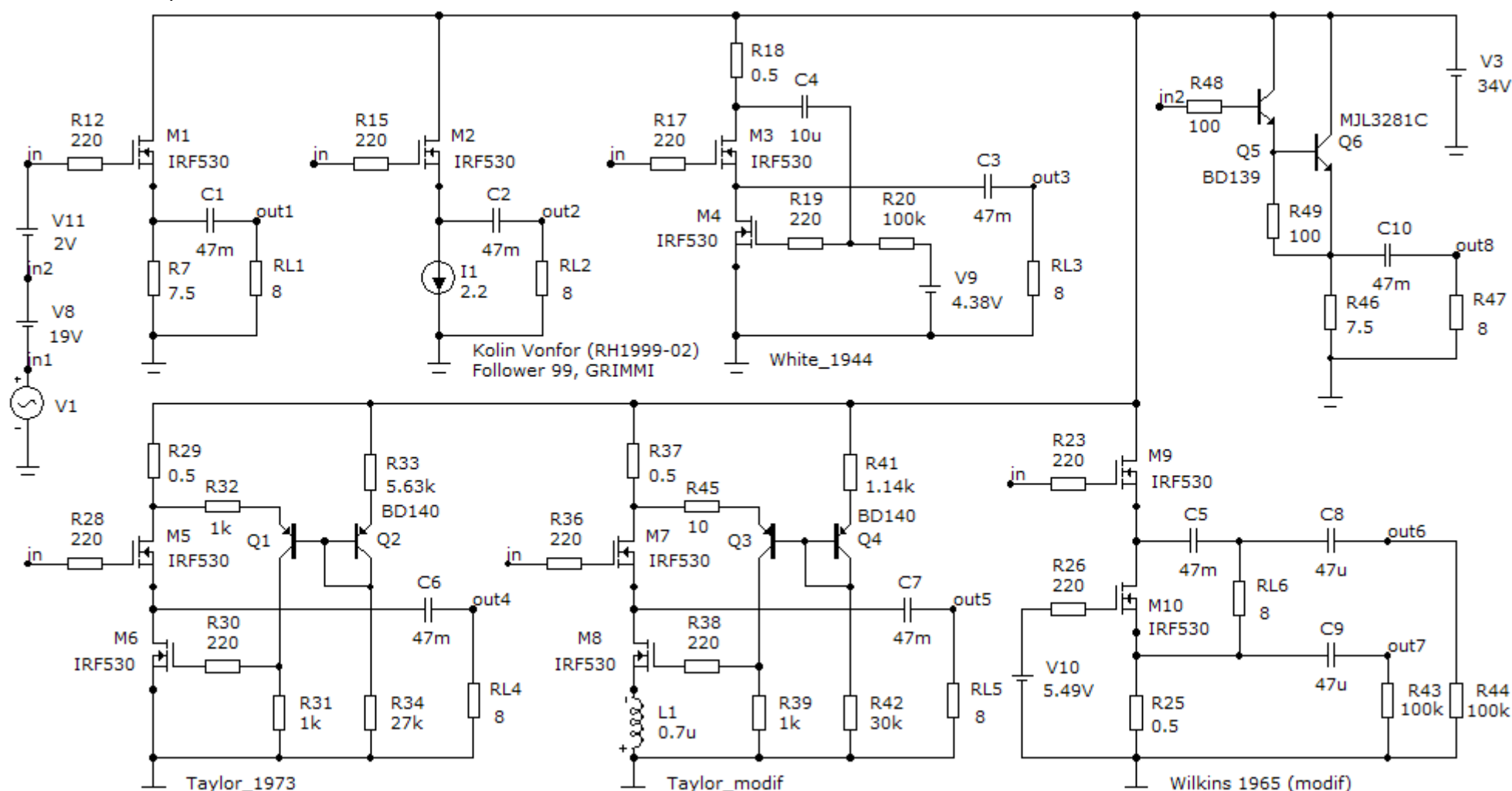


Рис. 1 Схемы повторителей

Для начала проанализируем потери сигнала со входа до выхода. По уровню потерь можно косвенно судить о выходном сопротивлении и его симметрии.

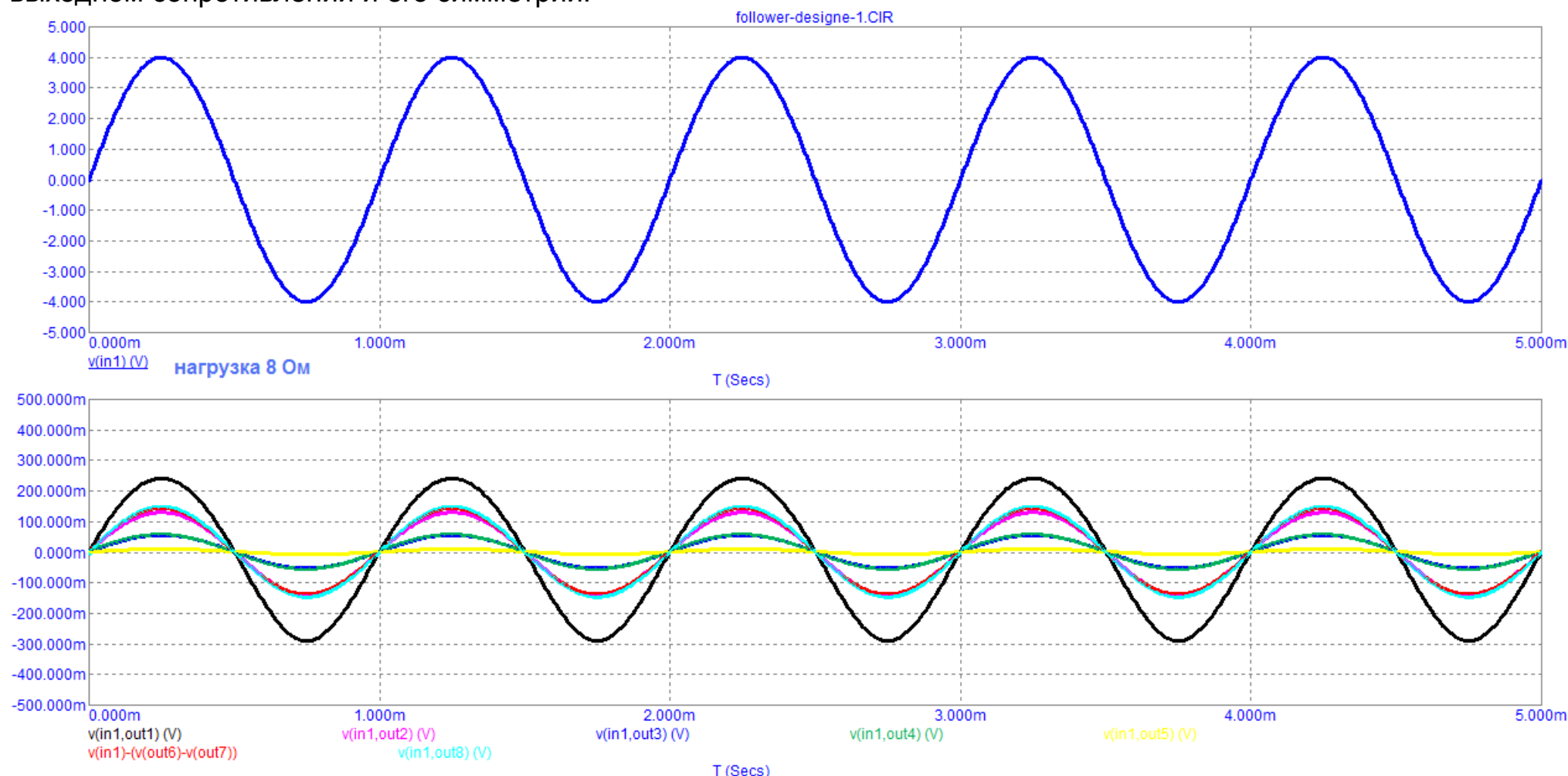
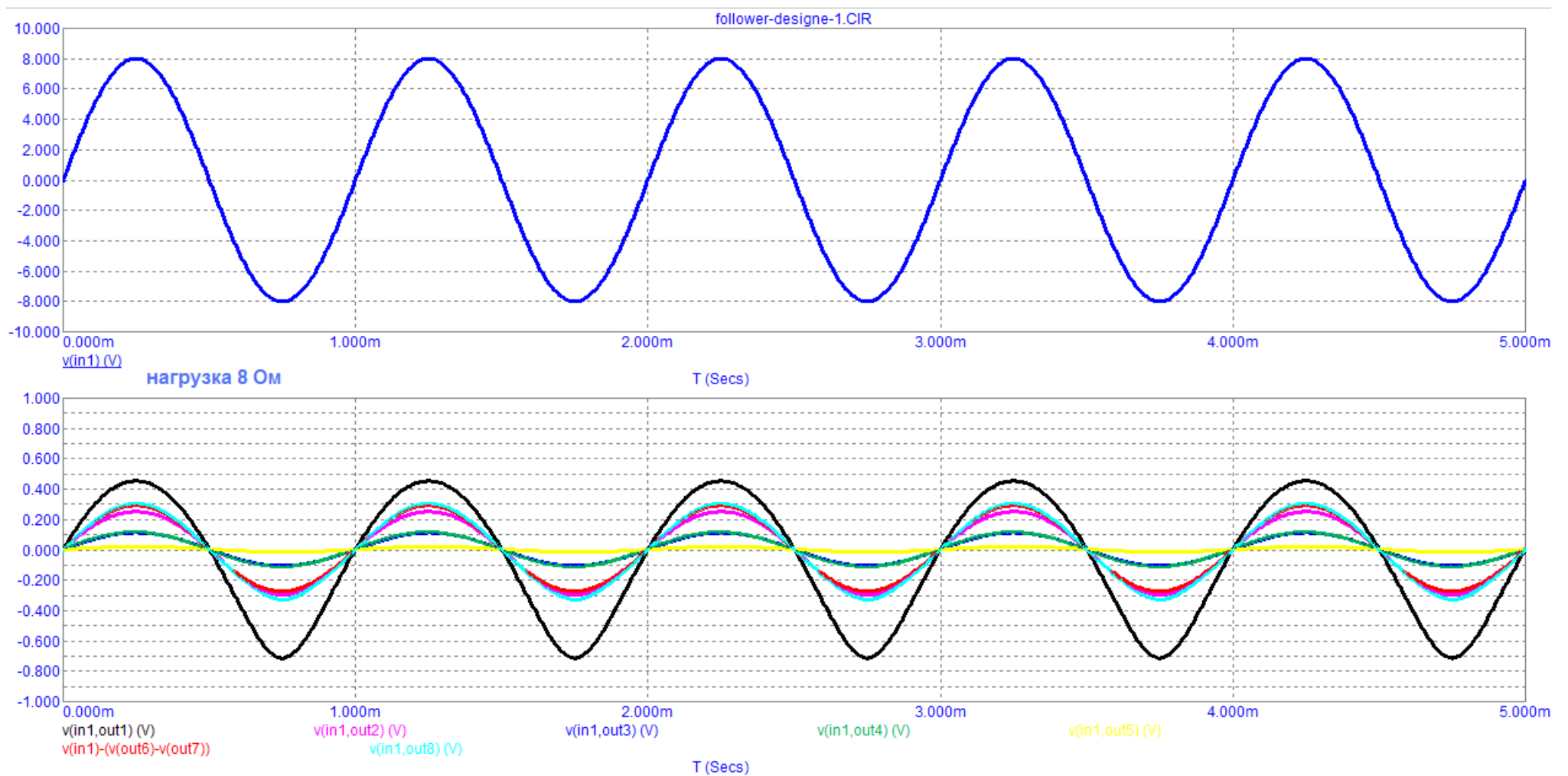


Рис. 2. Входное напряжение 4 В (пик), нагрузка 8 Ом (мощность 1 Вт)

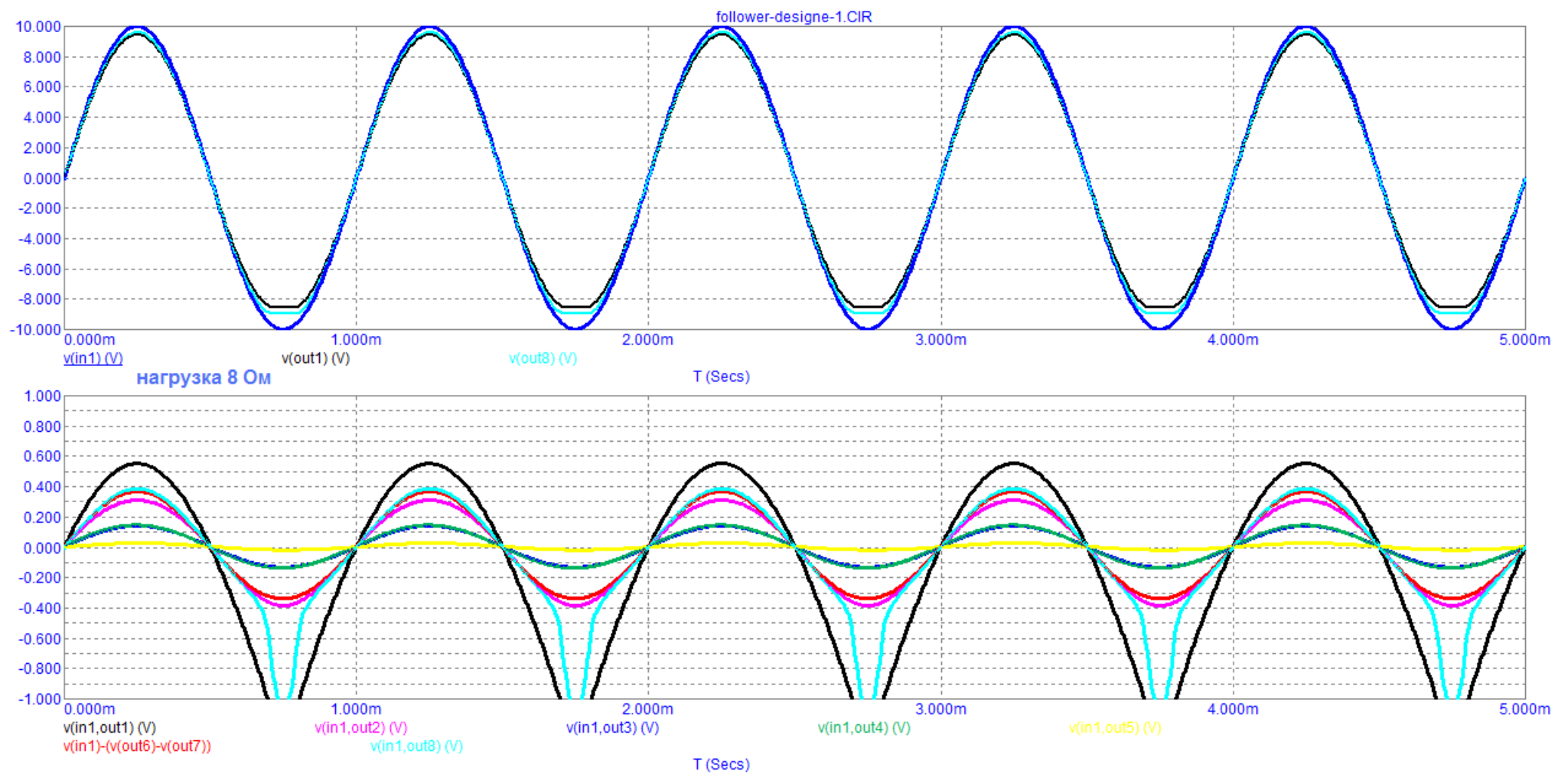
Судя по потерям наименьшее выходное сопротивление имеет повторитель с выходом 5 (желтая линия), на втором месте выход 3 (синяя) и выход 4 (зеленая) — они практически сливаются. Далее, имеют примерно одинаковые свойства выходы 2, RL6 и выход 8 (электрик). Самое высокое выходное сопротивление имеет повторитель с выходом 1, причем явно асимметричное (для отрицательной полуволны выходное сопротивление выше).

Увеличим напряжение сигнала до 8 Вольт и снова сделаем анализ, рис. 3.



С ростом входного напряжения в 2 раза выросли и потери примерно в 2 раза, причем на выходе 1 потери на отрицательной полуволне выросли больше чем в 2 раза, что говорит о росте выходного сопротивления для отрицательной полуволны.

Ну и наконец увеличим входное напряжение до 10 В, рис. 4.



Из рисунка видно что простейшие повторители как на ПТ (МОСФЕТ), так и БТ (BJT) начинают клипировать. Причем повторитель на БТ (выход 8 - электрик) вплоть до клипирования сохраняет выходное сопротивление примерно постоянным, в то время как повторитель на ПТ (выход 1 — черная) при примерно таком же напряжении ограничения начинает увеличивать выходное сопротивление примерно с четверти нижней полуволны.

Учитывая что реальная нагрузка носит комплексный характер и может просаживаться сделаем то же самое на нагрузке 4 Ома, рис. 5-7.

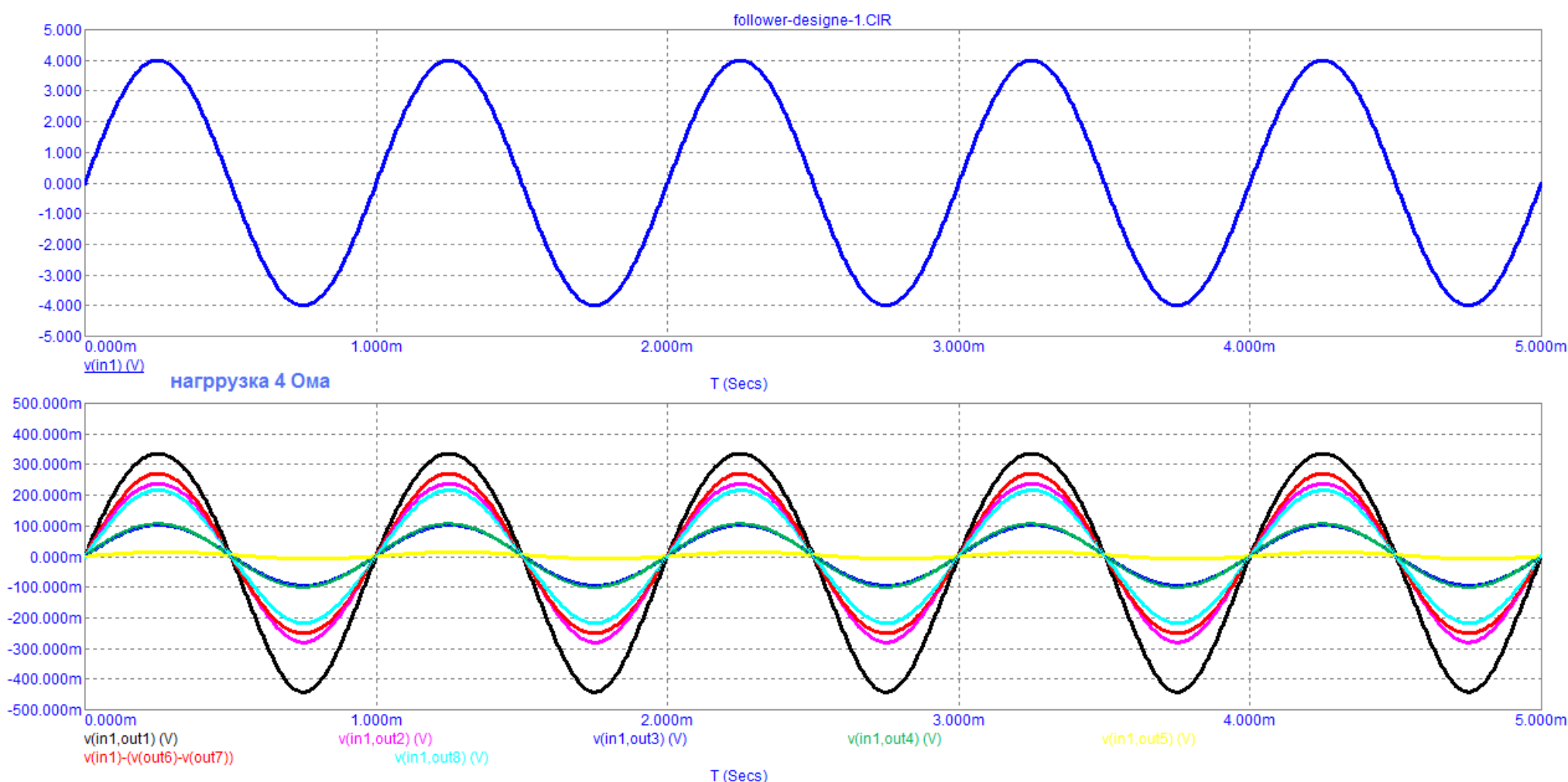


Рис. 5. Входное напряжение 4 В (пик), нагрузка 4 Ом (мощность 2 Вт)

Из рисунка видно, что с ростом тока нагрузки в два раза потери в повторителе на БТ (электрик) возросли всего лишь в 1,5 раза, оставаясь при этом симметричными, что говорит об уменьшении выходного сопротивления с ростом тока нагрузки. Потери на выходах 3 и 4 (повторители Уайта и Тейлора) возросли ровно в два раза. В то же время выходное сопротивление повторителей на выходах 2 (с генератором тока - фиолетовая) и на нагрузке RL6 (модификация повторителя Вилкинса — красная) начинают расходиться в разные стороны.

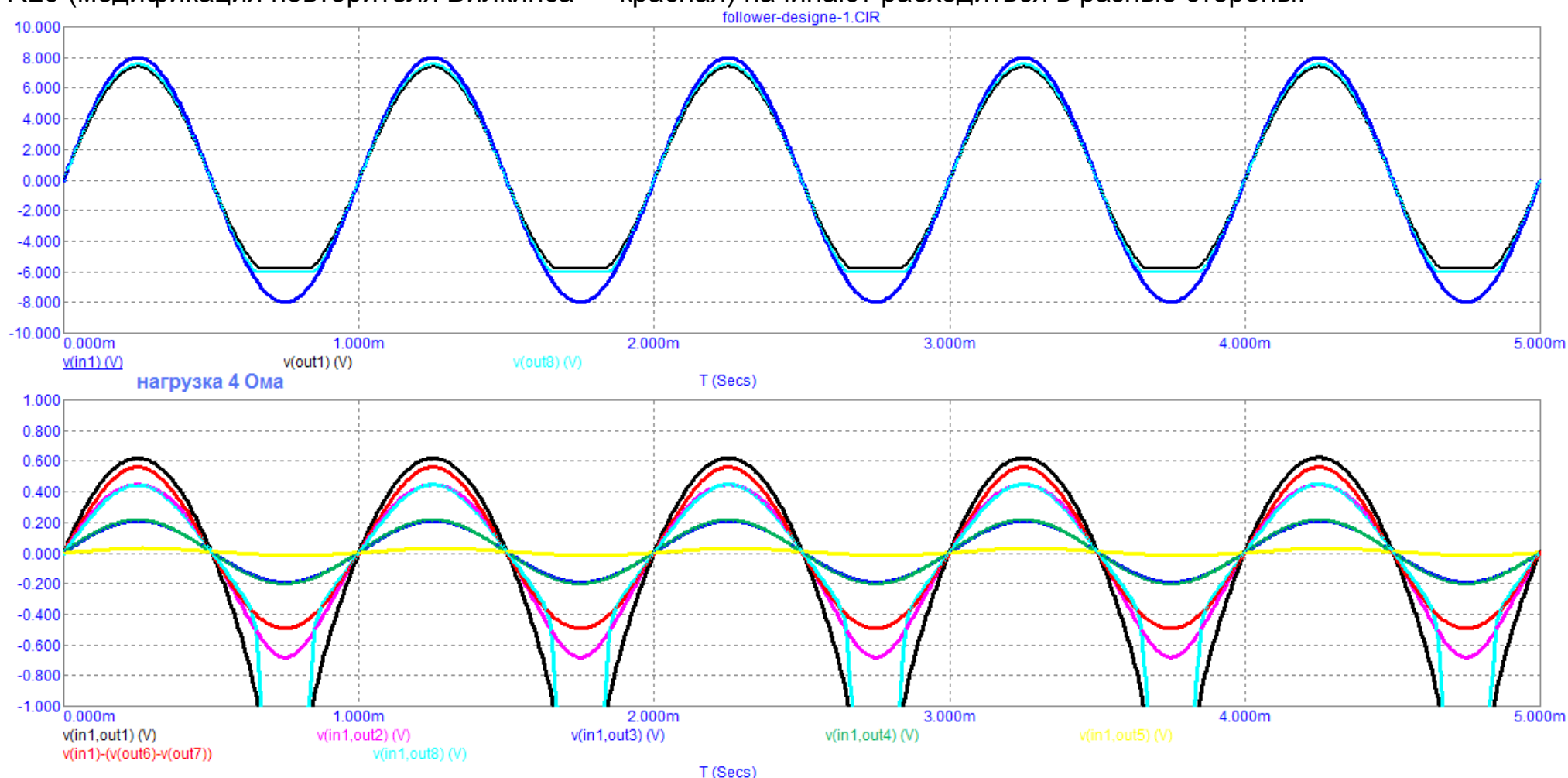


Рис. 6. Входное напряжение 8 В (пик), нагрузка 4 Ом (мощность 8 Вт)

Дальнейшее увеличение тока нагрузки никак не сказалось на выходном сопротивлении повторителей Уайта и Тейлора (по сути одно и то же решение в разной реализации). В то же время однотактные повторители уже начинают односторонне клипировать на отрицательной полувольте. Как показал в ранее приводимом источнике Линн Олсон («Гармоники стоящие за цифрой искажений») одностороннее клипирование двухтонального сигнала приводит к появлению удаленных интермодов, в то время как симметричное клипирование приводит к появлению в большей степени близлежащих интермодов, которые при малой величине могут маскироваться, а при превышении порога слышимости приводить к каше в звуке.

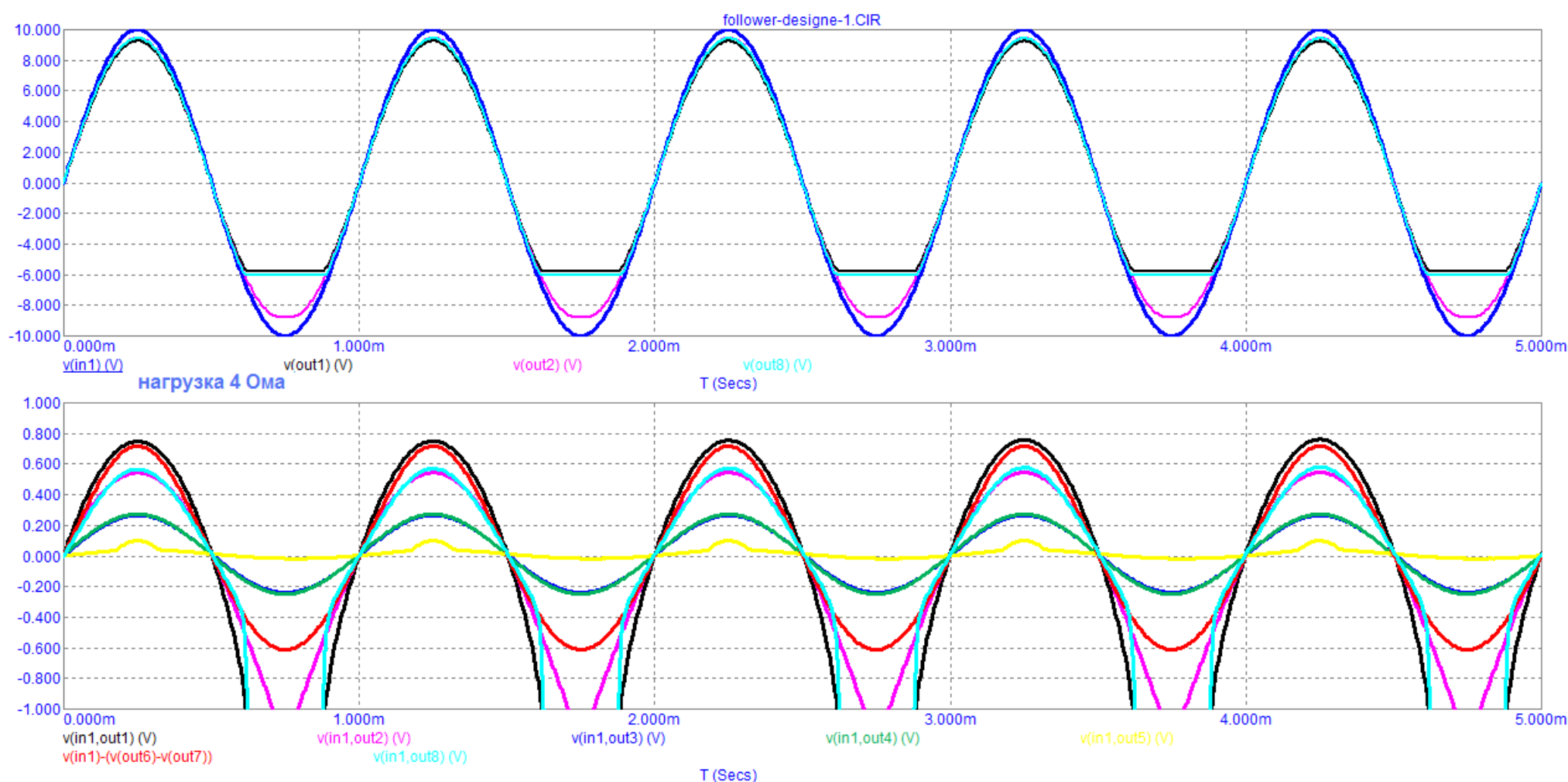


Рис. 7. Входное напряжение 10 В (пик), нагрузка 4 Ом (мощность 12,5 Вт)

Из рисунка 7 видно, что выходное сопротивление практически постоянно у повторителей выход 3 (синяя) и выход 4 (зеленая) линии потерь которых сливаются. Для нагрузки RL6 выросло выходное сопротивление для положительной полуволны выросло и приблизилось к выходному сопротивлению первого повторителя (выход 1). Исчерпал лимит тока выхода и выход 2 (с генератором тока) и начал клипирование отрицательной полуволны. Выход 5 (желтая) также начал увеличивать выходное сопротивление на вершине положительной полуволны. Характер потерь не дает полного представления о вносимых искажениях, поэтому проведем анализ на нагрузке 8 Ом при входном напряжении 8 Вольт.

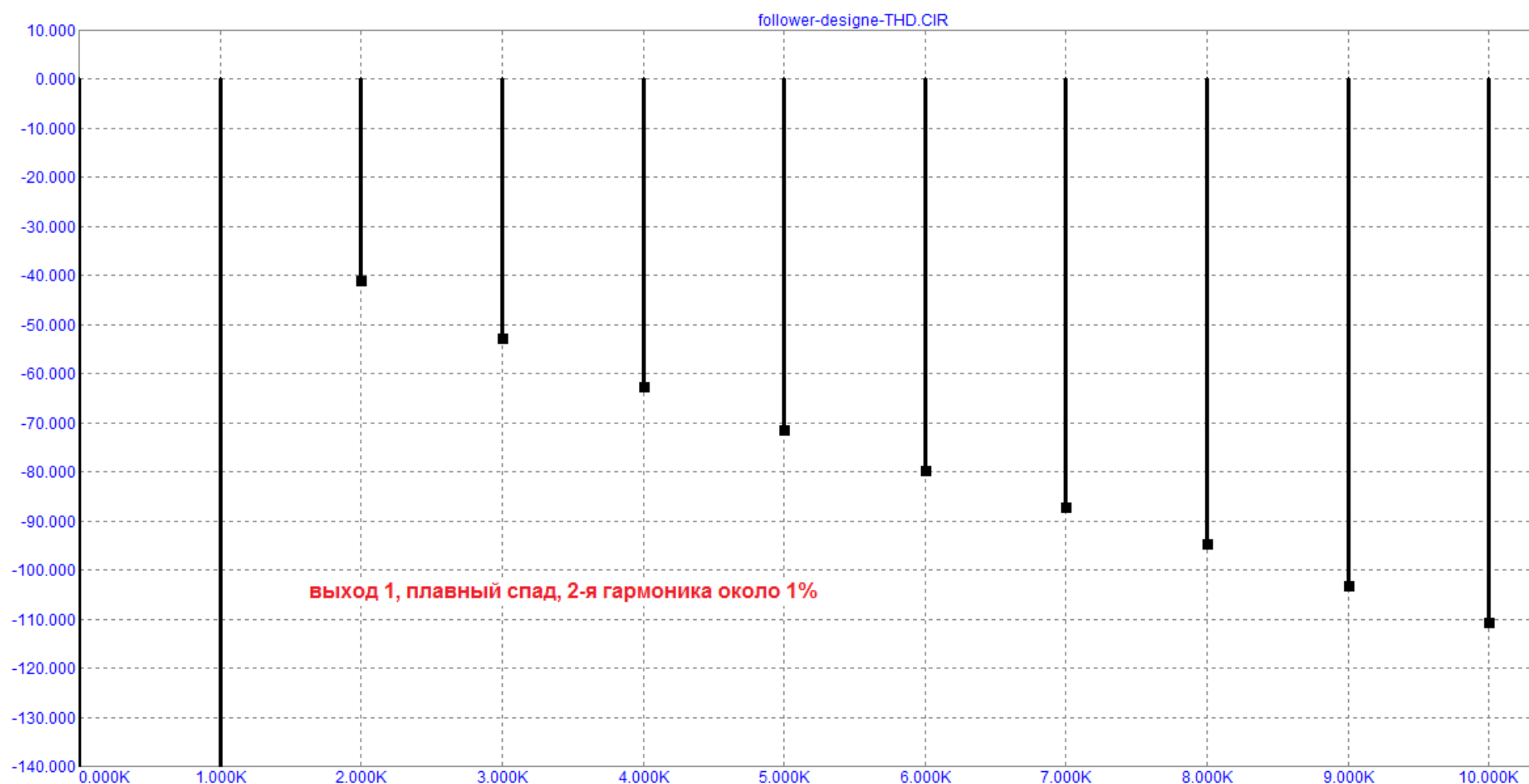


Рис. 8. Спектр гармоник на выходе 1

Относительно большой уровень второй гармоники, плавный, протяженный спад высших гармоник

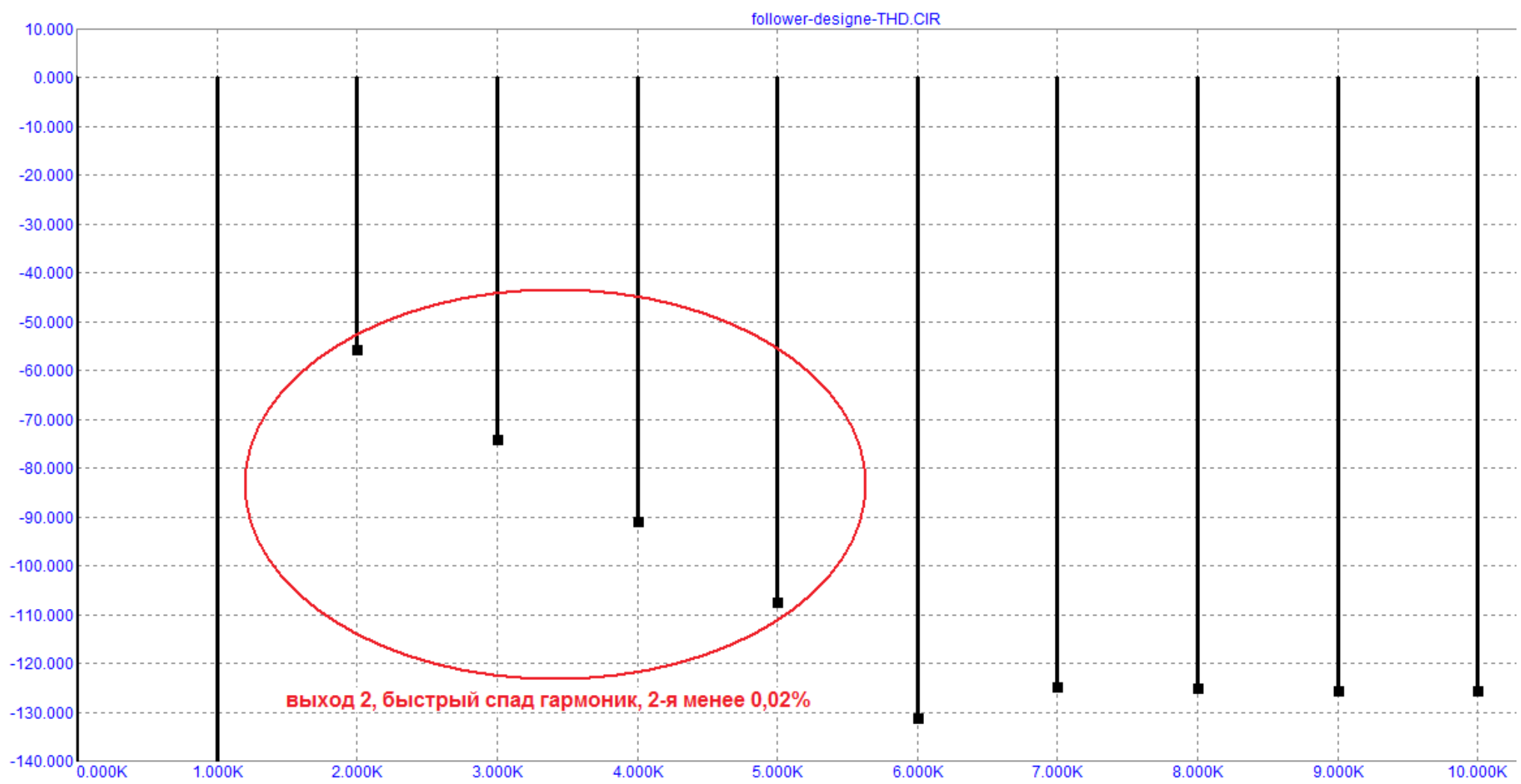


Рис. 9. Спектр гармоник на выходе 2

Небольшой уровень второй гармоники, быстрый спад высших гармоник

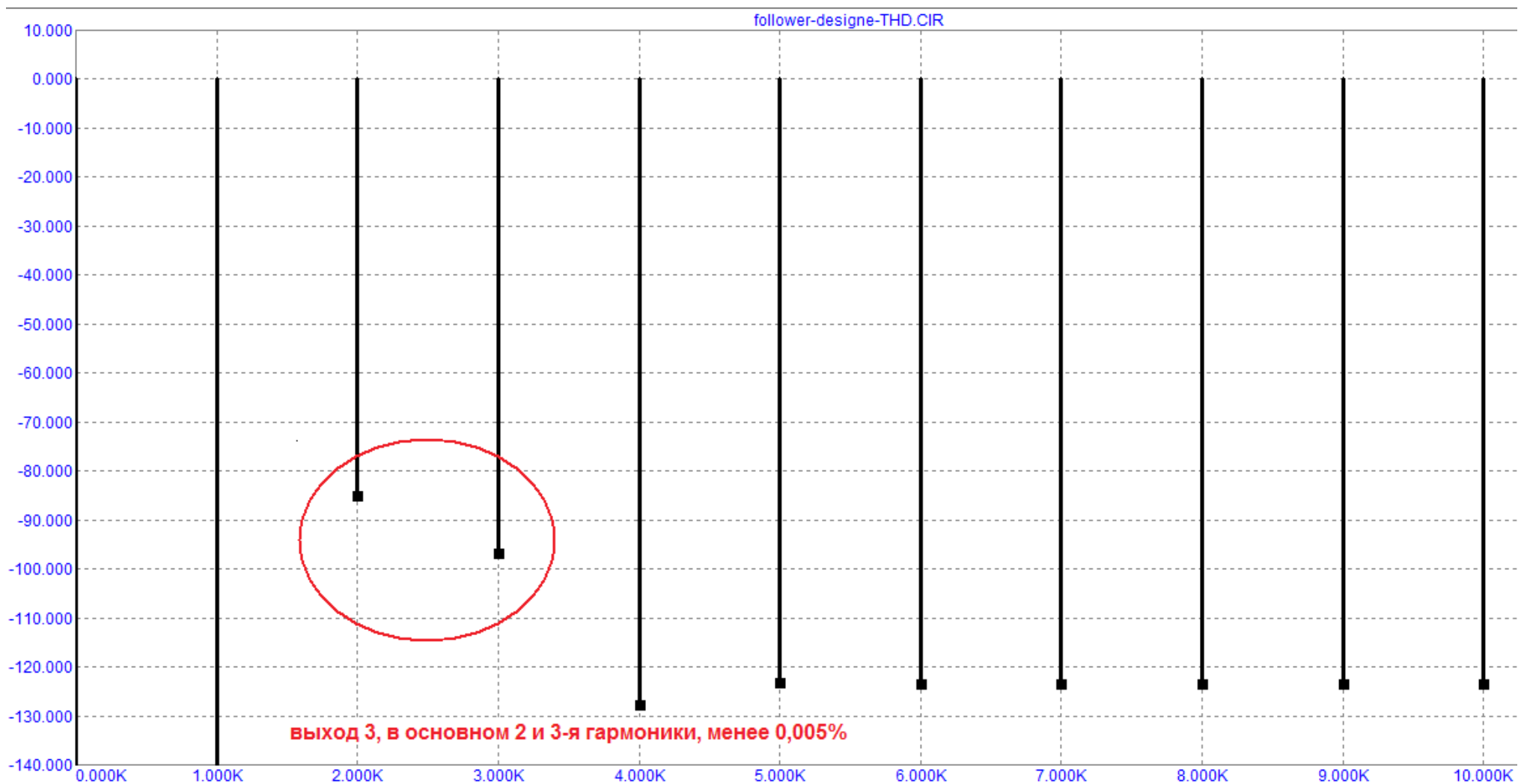


Рис. 10. Спектр гармоник на выходе 3

Малый уровень искажений с коротким спадающим «хвостом»

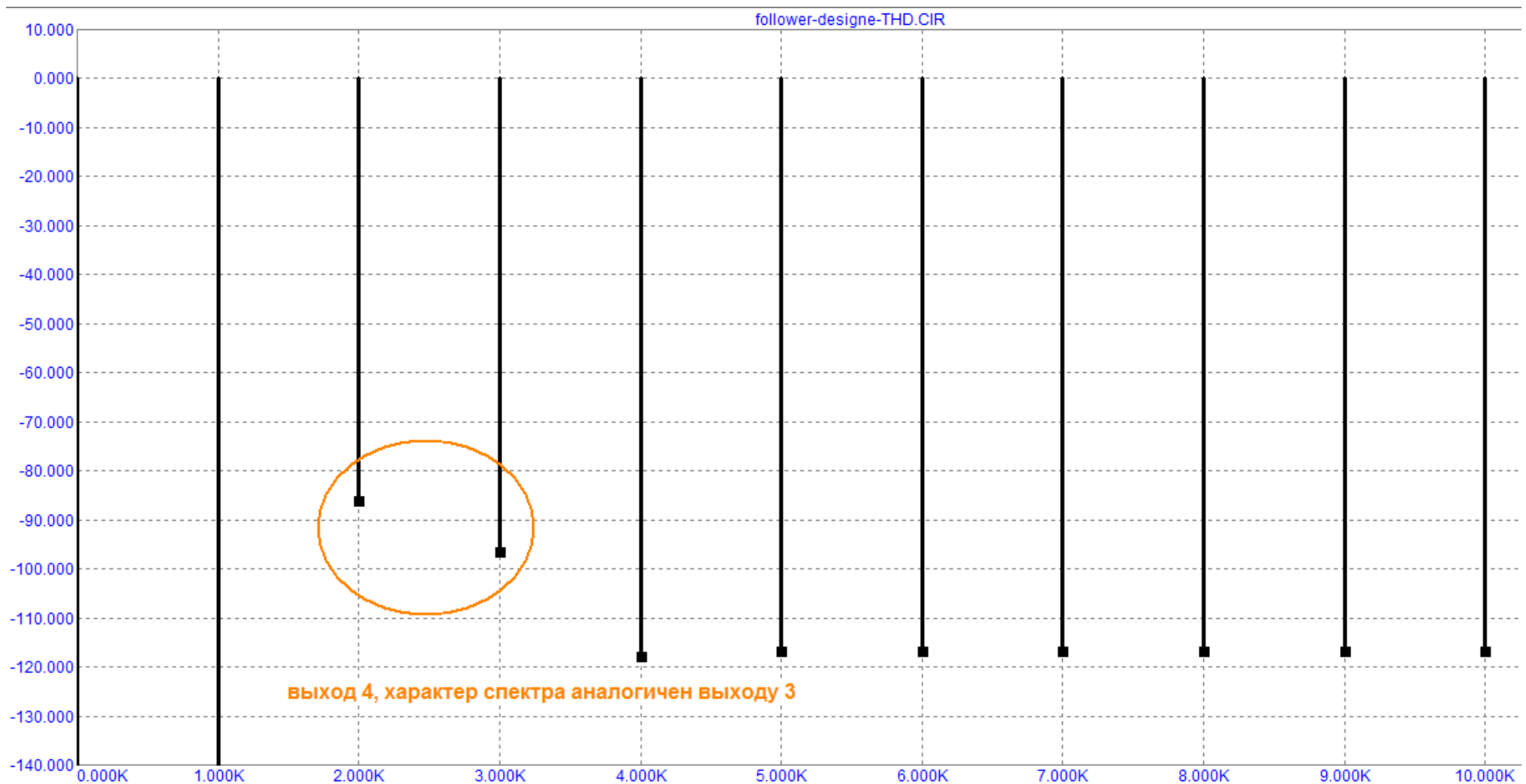


Рис. 11. Спектр гармоник на выходе 4

Уровень искажений и их характер похож на искажения на выходе 3. И это не удивительно, так как суть работы одинаковая, только другая реализация предложенная Тейлором с появлением pnp-транзисторов.

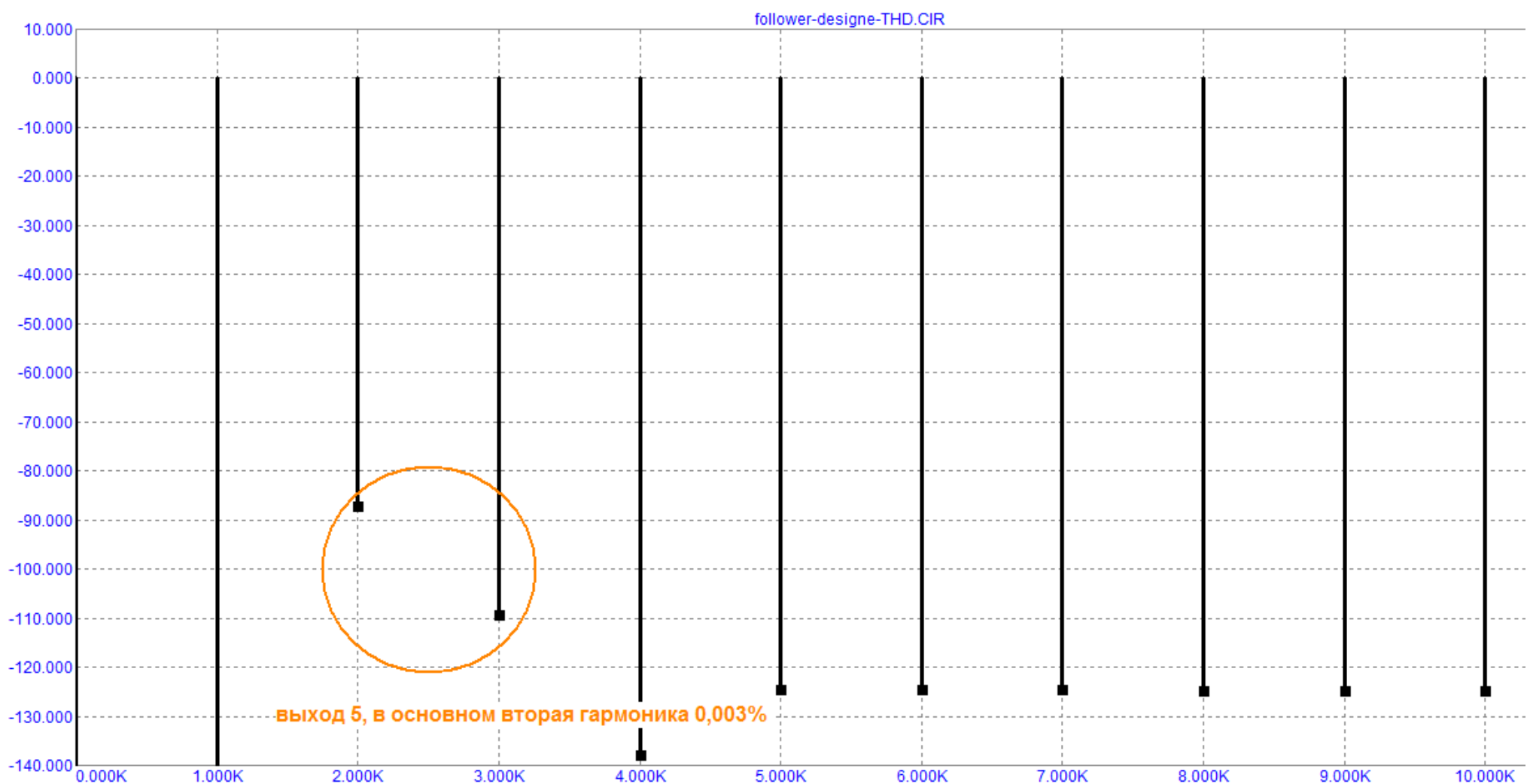


Рис. 12. Спектр гармоник на выходе 5

Если перевести входной транзистор повторителя в режим близкий к генератору тока, то в спектре гармоник остается практически одна вторая гармоника очень низкого уровня.

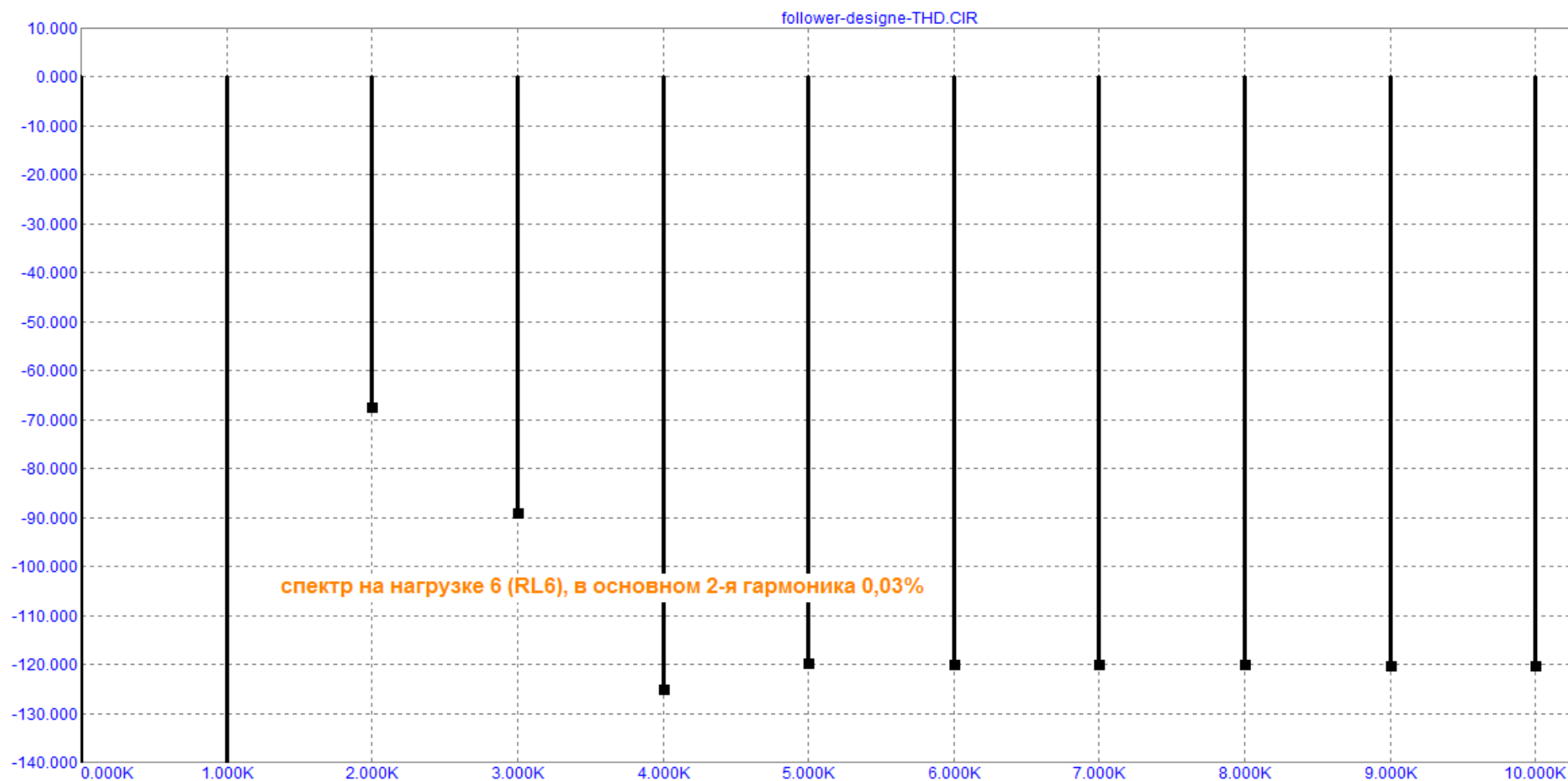


Рис. 13. Спектр гармоник на шестой нагрузке (RL6)

Такое решение несколько уступает повторителю Уайта как по выходному сопротивлению, так и по искажениям.

Ну и наконец транзисторный вариант однотактного повторителя (выход 8), рис. 14.

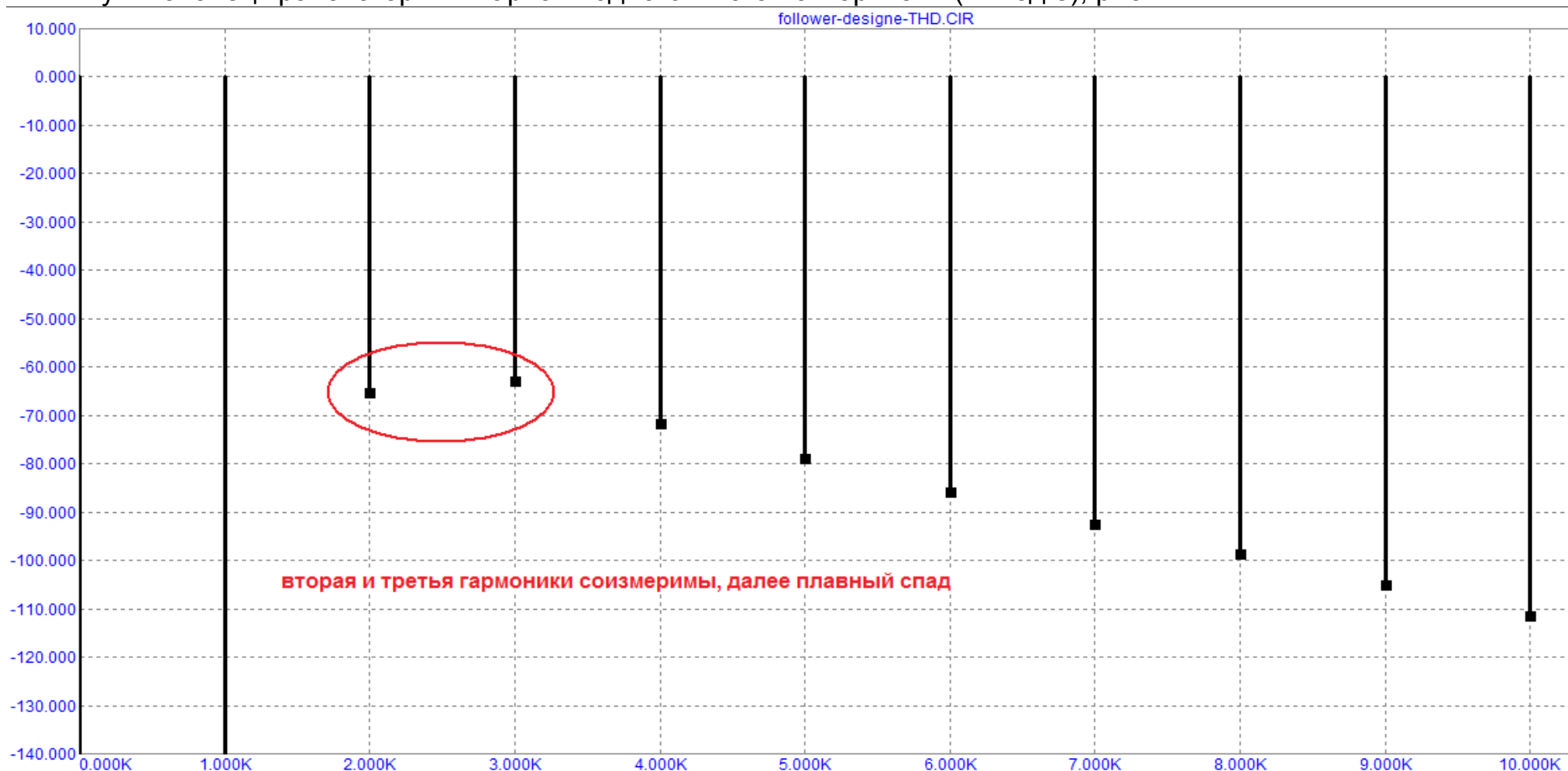


Рис. 14. Спектр гармоник на выходе 8

Как видим из рисунка 8 повторитель вносит сравнительно небольшие искажения, выходное сопротивление в значительной степени симметрично как для положительной, так и для отрицательной полуволны, что и обуславливает сравнительно высокий уровень третьей гармоники, соизмеримый с уровнем второй.

Для удобства сравнения результаты анализа сведены в таблицу 1 (Кг, дБ)

Выход	2-я	3-я	4-я	5-я	6-я	7-я	8-я	9-я	10-я
Выход 1	-42	-53	-63	-72	-80	-88	-95	-104	-111
Выход 2	-56	-74	-91	-108	-131	-125	-125	-125	-125
Выход 3	-85	-97	-128	-123	-123	-123	-123	-123	-123
Выход 4	-87	-97	-118	-117	-117	-117	-117	-117	-117
Выход 5	-87	-109	-138	-124	-124	-124	-124	-124	-124
RL6	-68	-89	-125	-120	-120	-120	-120	-120	-120
Выход 8	-66	-63	-72	-78	-86	-92	-98	-105	-112

Что касается «дифискажений Рубальского», выделяемых с помощью специально разработанного фильтра Сергеем Рубальским при подаче двухтонального сигнала частотой 100 Гц и 50 кГц (в данном случае 100 Гц амплитудой 5 В (пик) и 50 кГц амплитудой 4 В) то для всех повторителей, кроме выход 1 и 8 они носят примерно одинаковый характер, рис. 15.

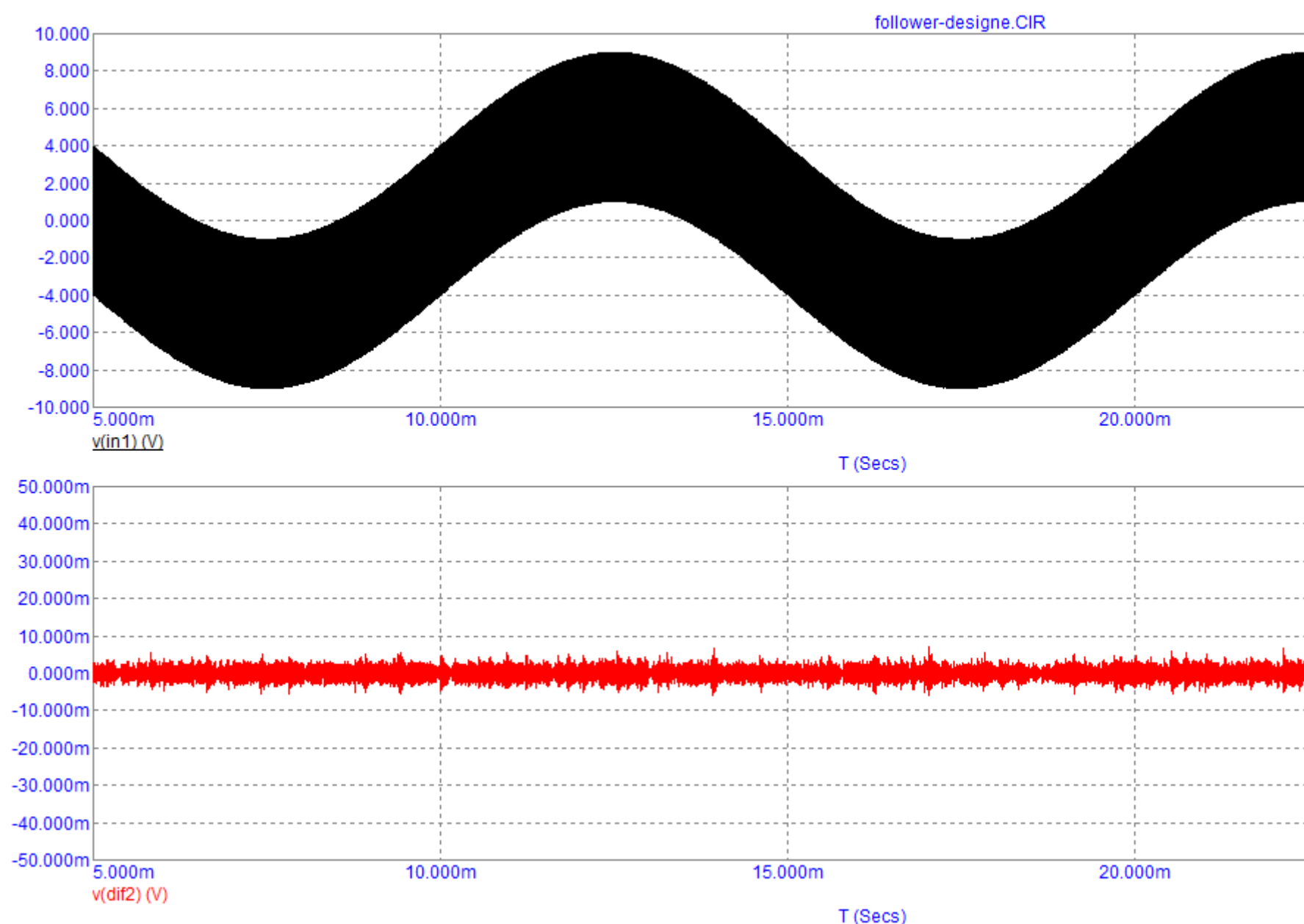


Рис. 15. Дифискажения на выходах 2, 3, 4, 5 и RL6

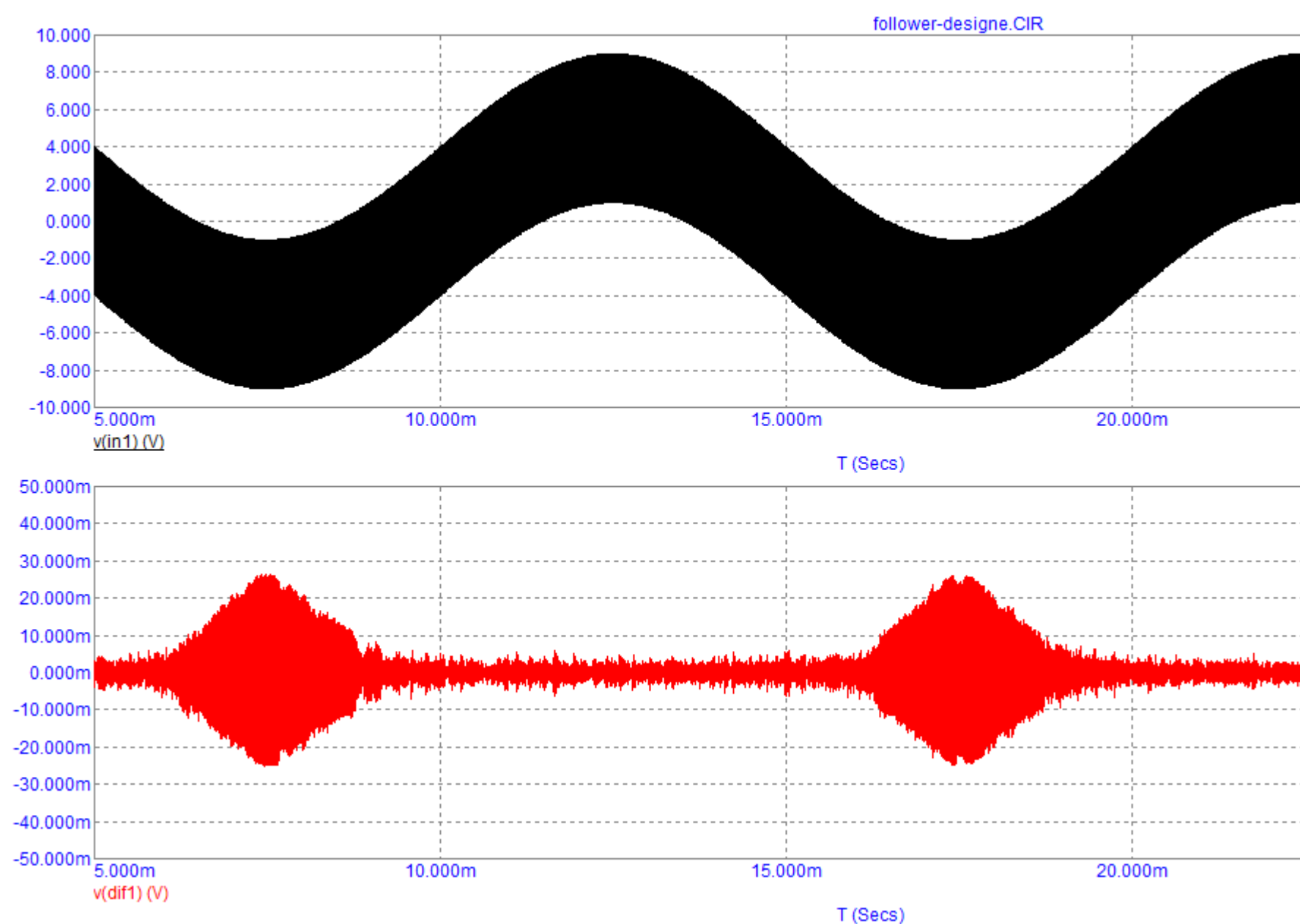


Рис. 16. Дифискажения на выходе 1

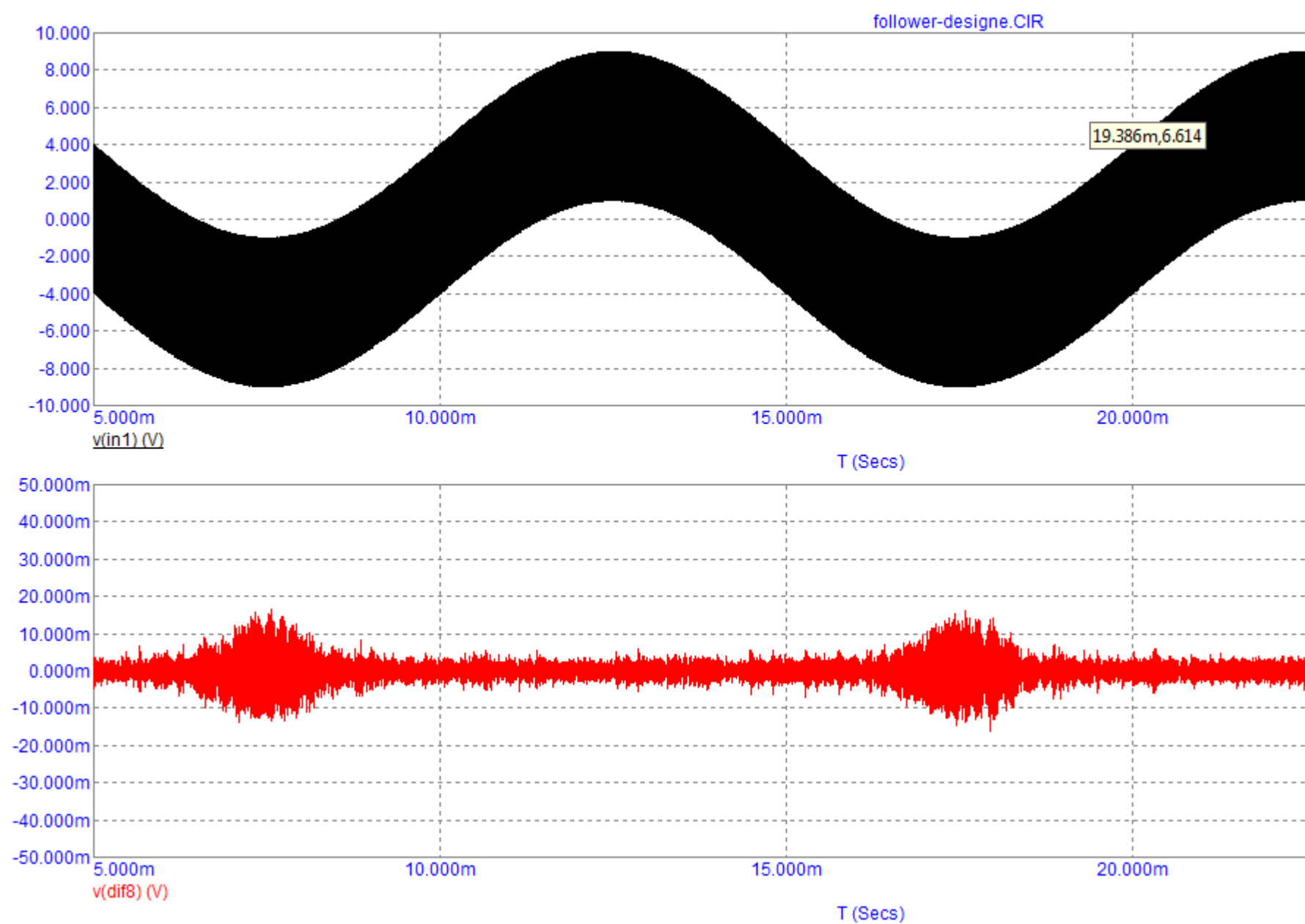


Рис. 17. Дифискажения на выходе 8

При пиковом входном напряжении 7 В и менее дифискажения всех повторителей носят примерно одинаковый характер.

Александр Петров
7 сентября 2015 года