

Выходное сопротивление УНа в составе усилителей

Большинство современных УМЗЧ, в том числе и ОУ (до 98 %), выполнены по структуре Лина, рис.1 [1].

При рассмотрении структуры усилителей и изучении работы ООС как правило не рассматриваются процессы происходящие внутри петли ООС, в частности как изменяется выходное сопротивление усилителя напряжения (УНа).

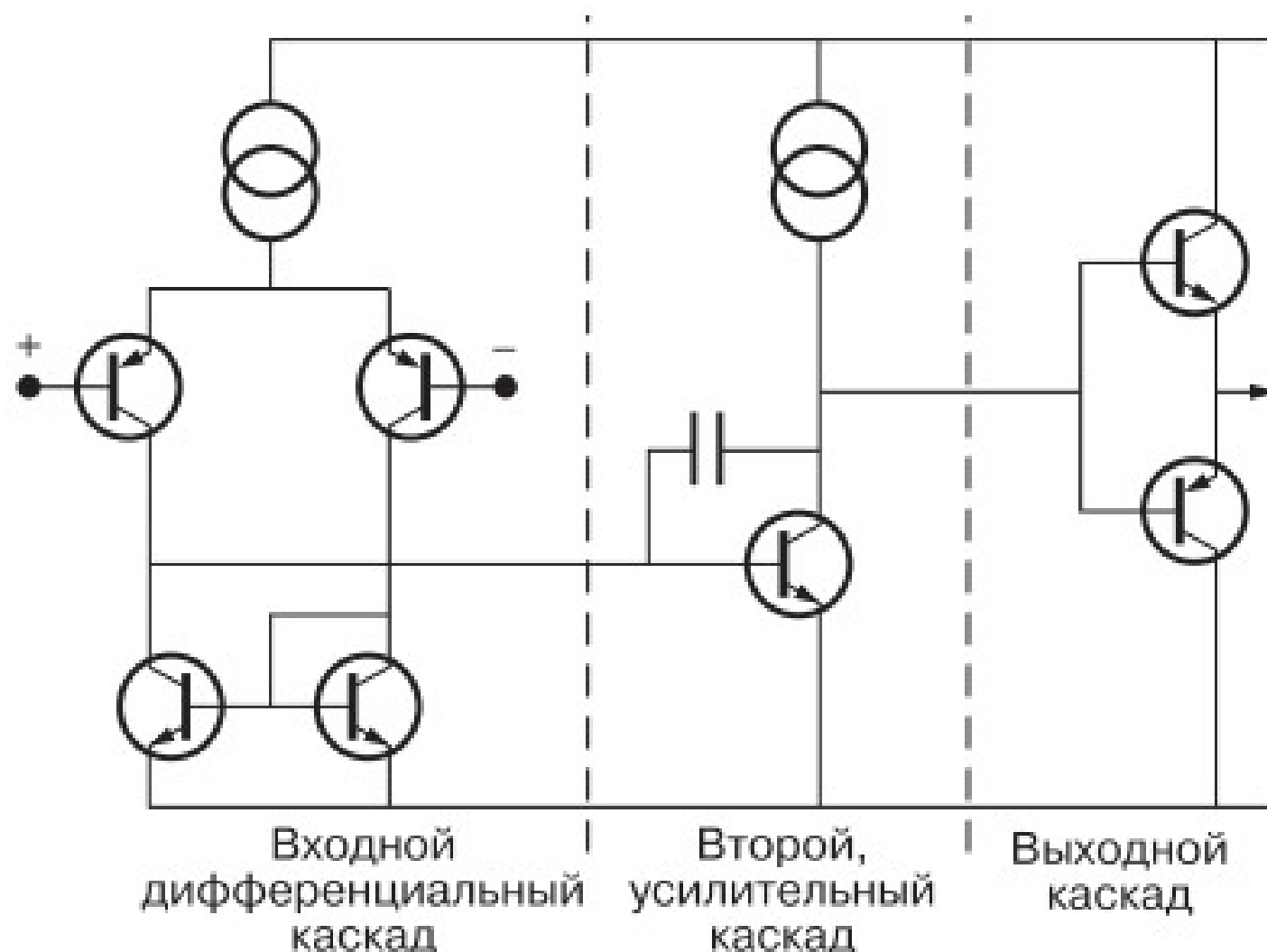


Рис. 1

Входной каскад (в данном случае дифкаскад) является преобразователем проводимости — преобразует входное напряжение в ток.

Второй каскад является преобразователем сопротивления — преобразует входной ток в напряжение. Обычно его называют усилителем напряжения, а усилителях с ТОС выполненных по классической схеме трансимпедансным, рис. 2 [2].

Третий каскад — усилитель тока, его называют выходным каскадом (ВК). Чаще всего коэффициент передачи ВК равен 1 ($K_u = 1$).

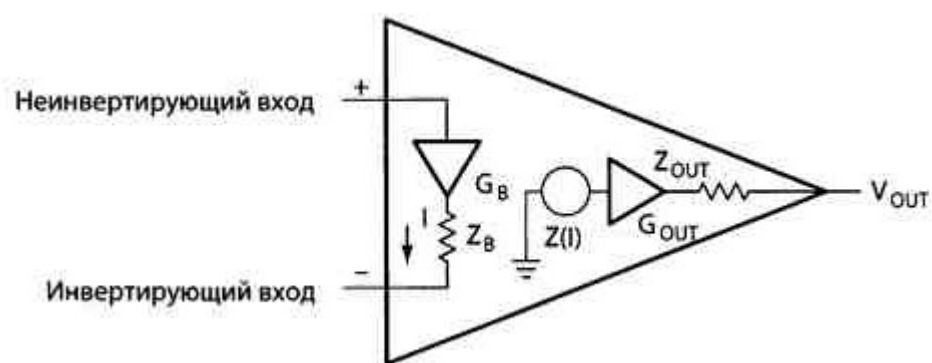


Рис. 2

Несмотря на то что второй каскад называется усилителем напряжения, тем не менее многие радиолюбители в обсуждениях на форумах высказывают мнение что он работает в режиме генератора тока. Для того чтобы разобраться в этом вопросе обратимся к нагрузочной характеристике источника напряжения, рис. 3.

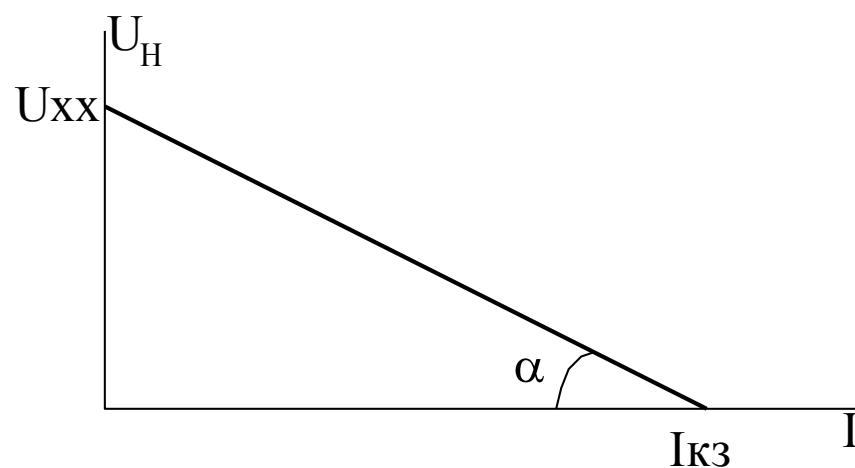


Рис. 3

По оси Y показано выходное напряжение, а по оси X выходной ток. Нагрузочная кривая пересекает ось Y при токе равном нулю (холостой ход), а ось X - при токе короткого замыкания. Ток покоя большинства УНов находится в пределах 6...30 мА. Зная выходное напряжение (примем 30 В(пик)) и сопротивление нагрузки (для УНа это входное сопротивление ВК, обычно колеблется от 75...100 кОм до десятков МОм) подсчитаем максимально возможный ток УНа:

$$I_{max} = 30 \text{ В} / 75 \text{ кОм} = 0,4 \text{ мА}.$$

Даже если в качестве нагрузки УНа служит ГСТ с током 6 мА (это максимальный пиковый ток к.з. для одной полуволны сигнала) ток выхода УНа в 15 раз меньше тока к.з. ($6 \text{ мА} / 0,4 \text{ мА} = 15$). Переменный ток холостого хода УНа ближе к нулю, чем к току к.з. Поэтому выход усилителя гораздо ближе к генератору напряжения чем к генератору тока. Поэтому во всей литературе и называется усилителем напряжения, т. е. является источником напряжения, а не тока.

Что касается трансимпеданса УНа, то хоть он и имеет размерность сопротивления (отношение выходного напряжения к входному току) он не имеет никакого отношения к выходному сопротивлению каскада. Его величина практически не зависит от состояния петли ООС и на низких и средних частотах как правило колеблется в большинстве усилителей от нескольких МОм до сотен МОм в современных ОУ. Этот параметр носит частотно зависимый характер и характеризует усиление с разомкнутой петлей ООС.

Второй вопрос который не освещен в литературе и вызывает споры на форумах это зависимость выходного сопротивления УНа от состояния петли ООС. Большинство уверено что ООС работает только на краях ее приложения, т. е. на входе усилителя и на его выходе, а выходное сопротивление УНа не зависит от состояния петли ООС. К сожалению в литературе по этому вопросу нет никакой информации.

Попробуем разобраться. На рисунке 4 показана схема популярного УМЗЧ Дугласа Селфа.

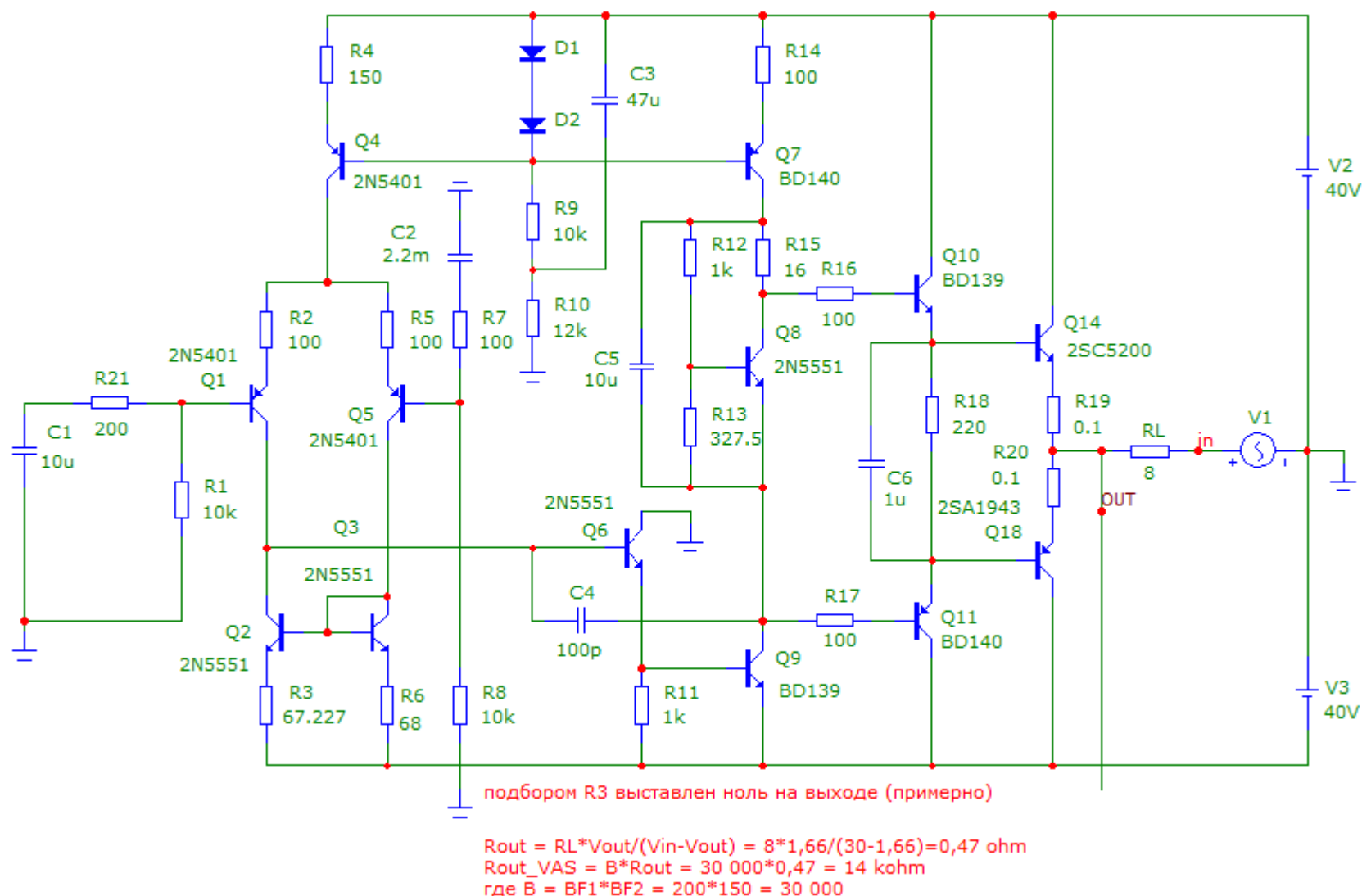


Рис. 4 (BF1 и BF2 – статические коэффициенты передачи тока базы транзисторов ВК)

Для начала измерим выходное сопротивление УМЗЧ с разомкнутой петлей ООС. Для этого вход усилителя замкнем на общий, резистор ООС отключим от выхода и также подключим к общему, выставим ноль на выходе подбором резистора R3. Подав сигнал частотой 20 Гц уровнем 30 В (пик) или 60 В от пика до пика на выходе имеем всего 3,32 В от пика до пика или 1,66 В (пик), рис. 5. В соответствии с расчетом выходное сопротивление УМЗЧ равно 0,47 Ом. Расчет приведен на схеме.

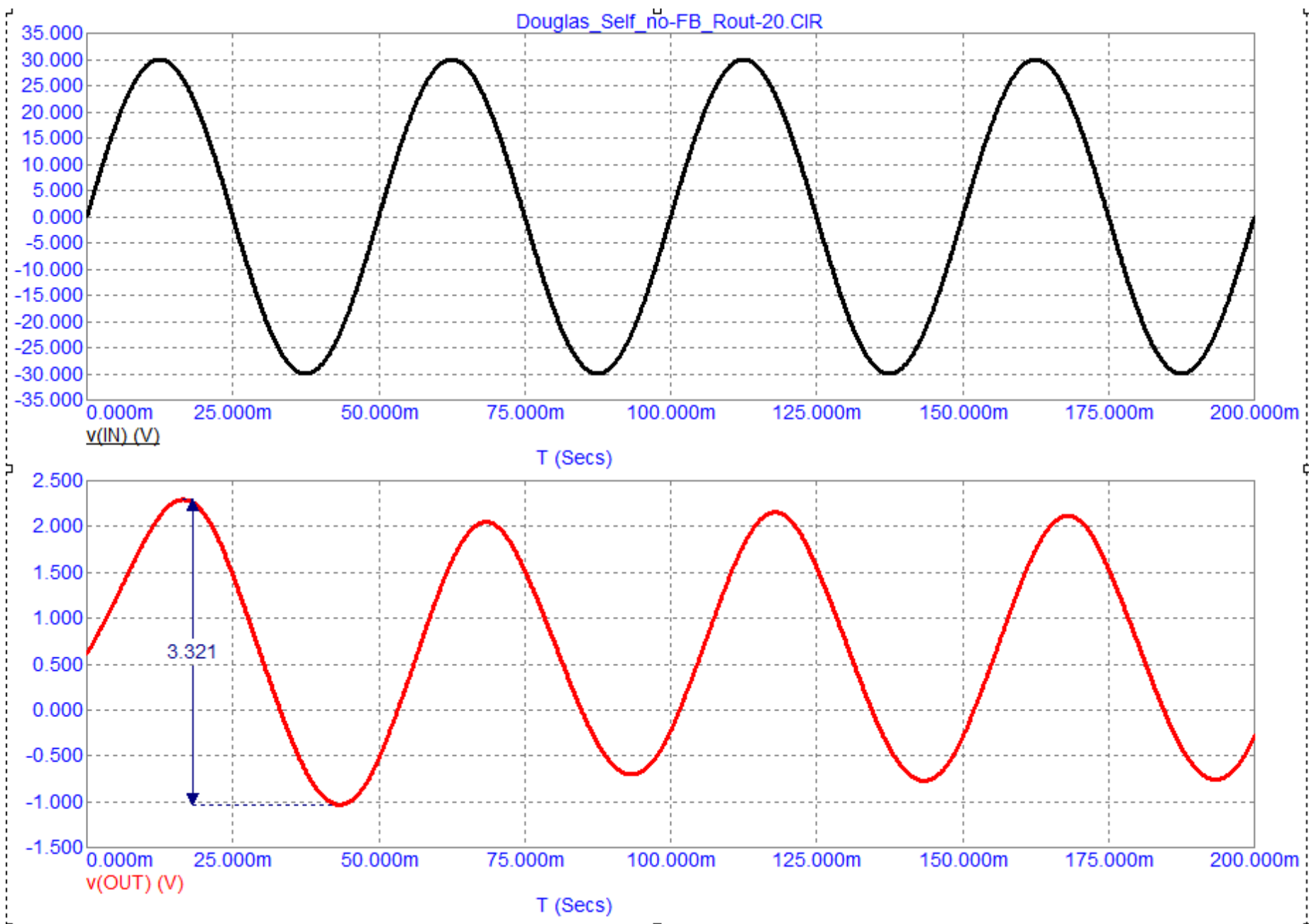


Рис. 5

Расчет выходного сопротивления УНа также приведен на схеме рис. 4, согласно расчета оно равно всего 14 кОм, а не МОмы как предполагалось.

Измерим выходное сопротивление УНа с разомкнутой петлей ООС таким же способом как и выходного сопротивления УМЗЧ в целом, рис. 6

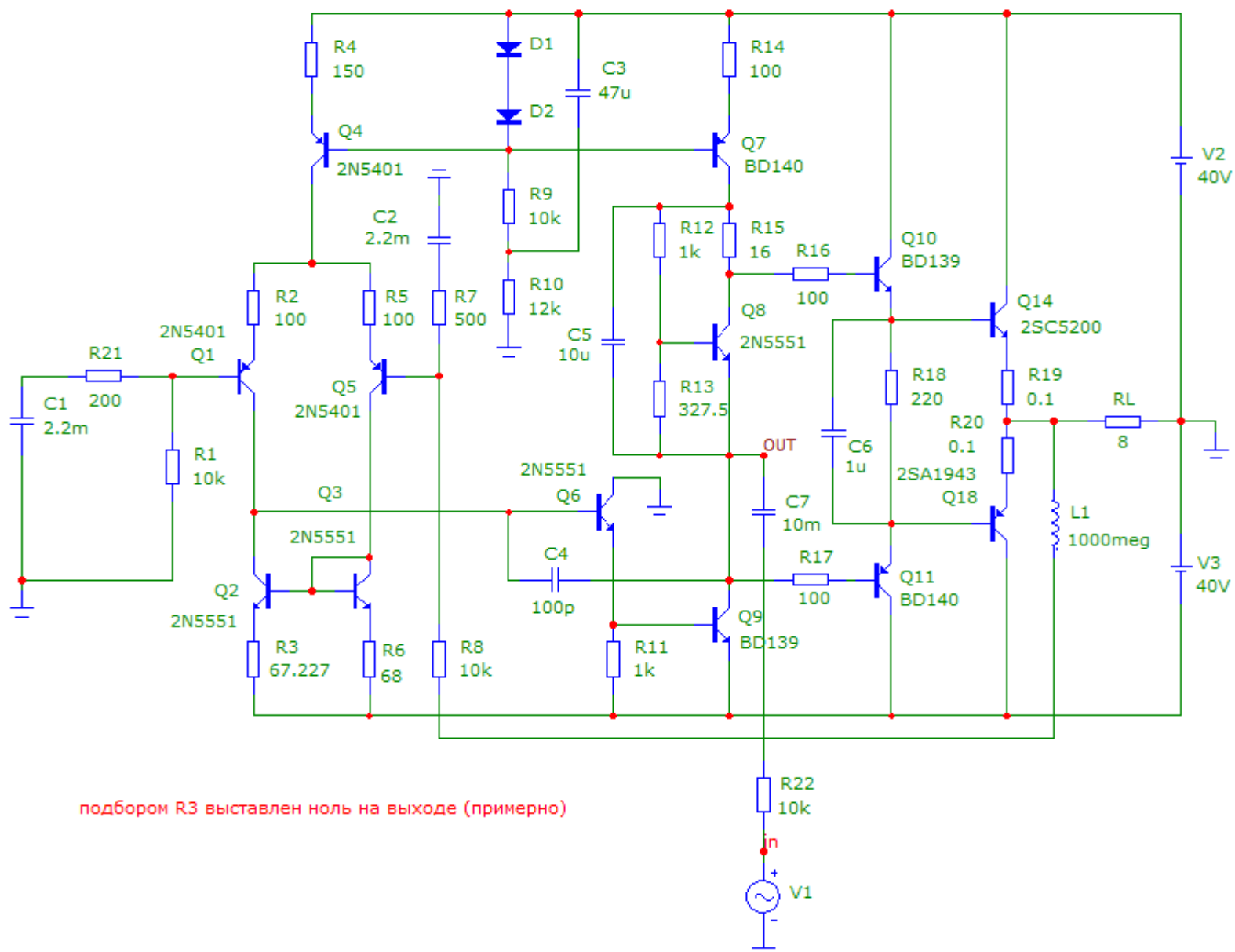


Рис. 6

Подберем резистор R22 так чтобы на выходе УНа напряжение было в 2 раза меньше чем сигнал генератора, рис. 7.

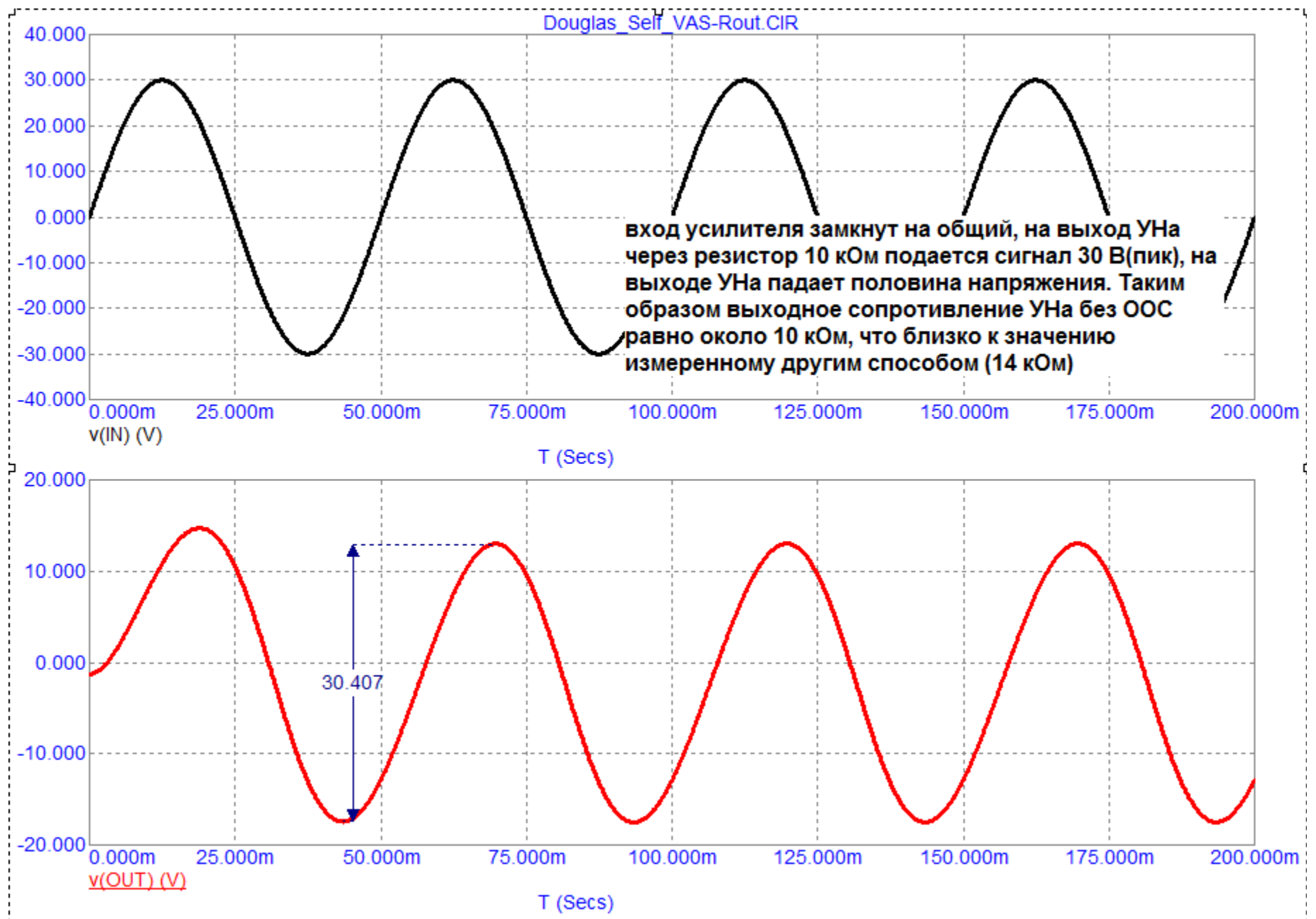


Рис. 7

Как видим сопротивление УНа измеренное вторым способом еще ниже, всего 10 кОм. Напомню что расчетом через выходное сопротивление оно равно 14 кОм. В любом случае разница не так уж и велика, можно считать в пределах погрешности измерений.

Известно что выходное сопротивление современных ОУ колеблется от долей Ома до десятков Ом. Но это вовсе не значит что ОУ может работать на такую нагрузку, точно так же как и УМЗЧ с выходным сопротивлением сотые или тысячные доли Ома не может работать на такую нагрузку.

Выходное сопротивление УНа в петле ООС настолько мало что измерить его проблематично. Опять же не путать с нагрузочной способностью. И это не удивительно, так как ток покоя УНа гораздо больше тока покоя ВК ОУ. **Можно конечно рассчитать на конкретной частоте с учетом графика петлевого усиления (снижение в соответствии с глубиной ООС на данной частоте) или через выходное сопротивление УМЗЧ в целом.**

Есть немало УМЗЧ в которых роль усилителя тока совмещена с УН, например Радиолюбби 2000-01 с. 9, а также ряд других УМЗЧ с токовой ООС, например рис. 8. Ток покоя около 1,8 А.

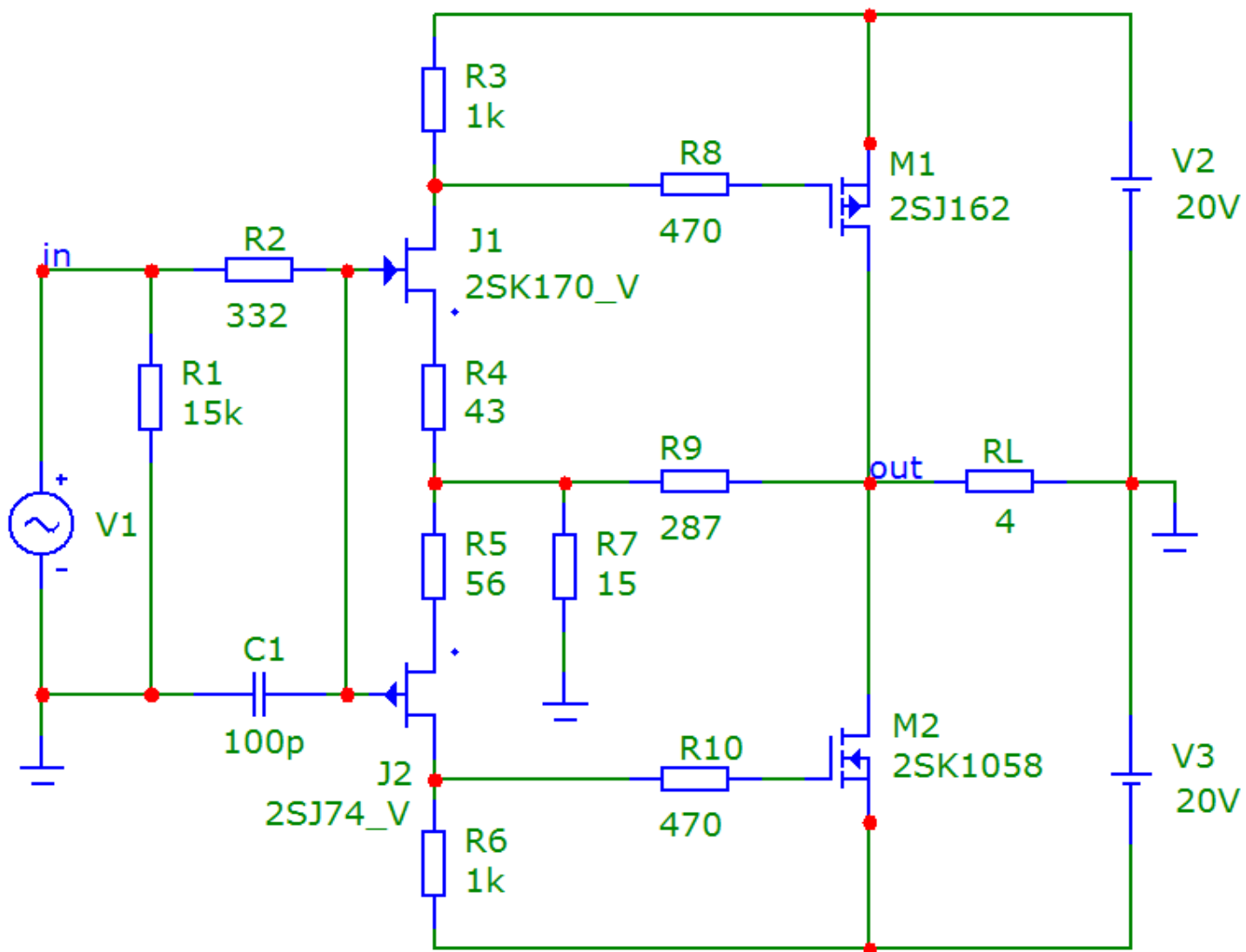


Рис. 8

Измерим выходное сопротивление такого усилителя с замкнутой и разомкнутой петлей ООС, рис. 9 и 10 соответственно

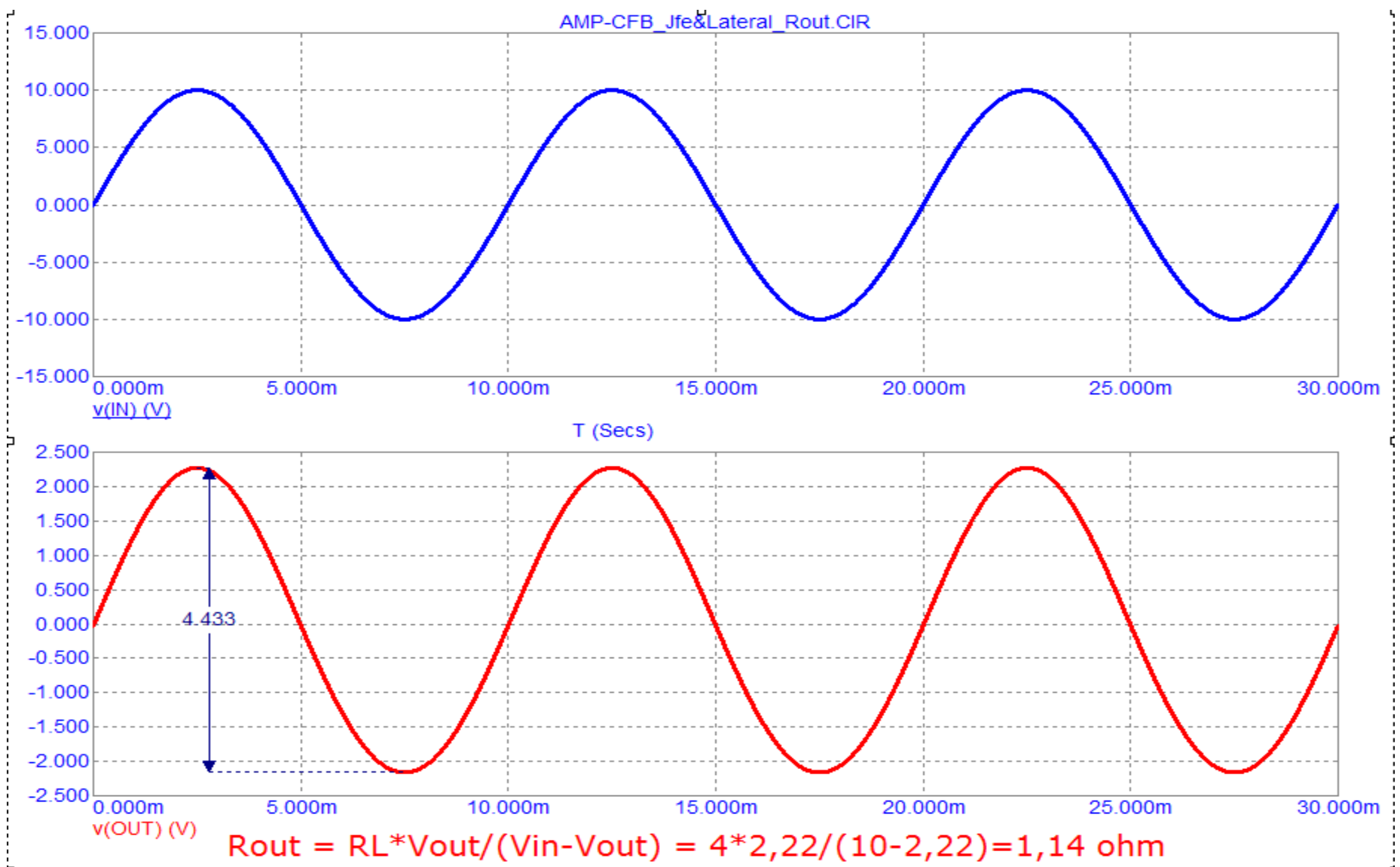


Рис. 9

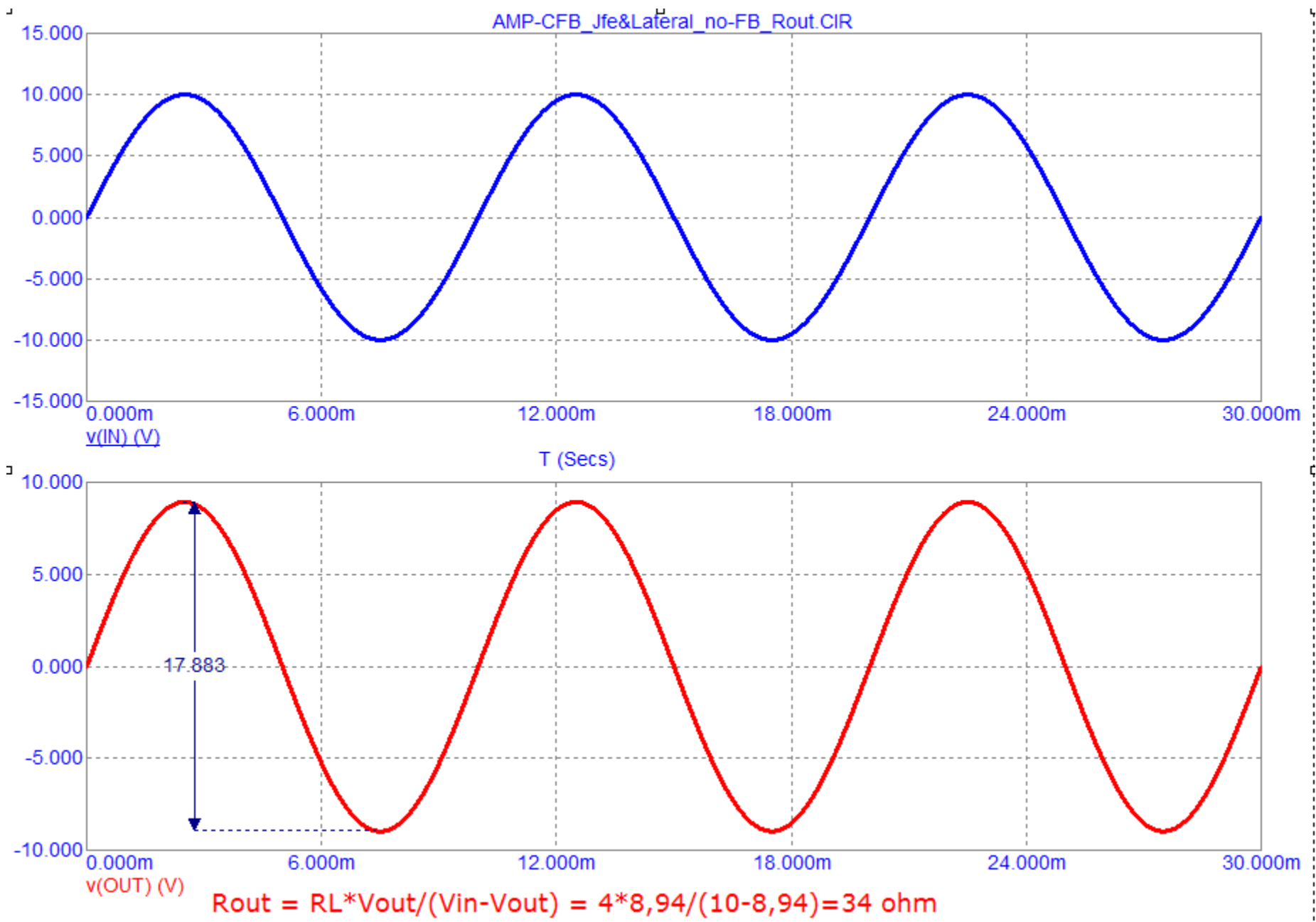


Рис. 10

Как видно из тестов выходное сопротивление УМЗЧ с разомкнутой ООС равно 34 Ома, которое снижается до 1,14 Ома при замыкании петли ООС.

Для того чтобы понять поведение такого УНа (и ВК по совместительству) в петле ООС дабавим на выходе двухтактный истоковый повторитель (K=1), рис. 11 и аналогичным способом измерим его выходное сопротивление, рис. 12

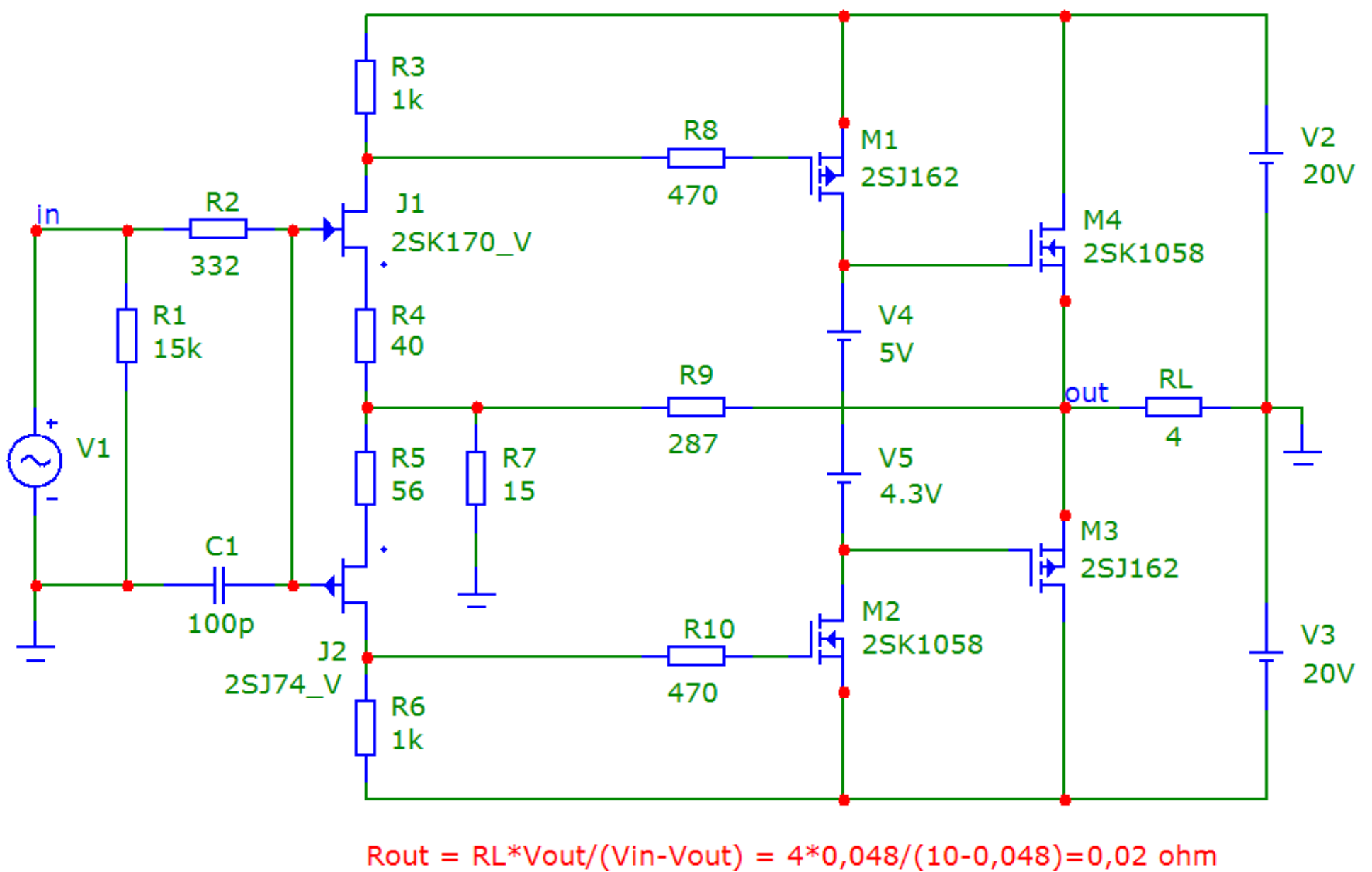


Рис. 11

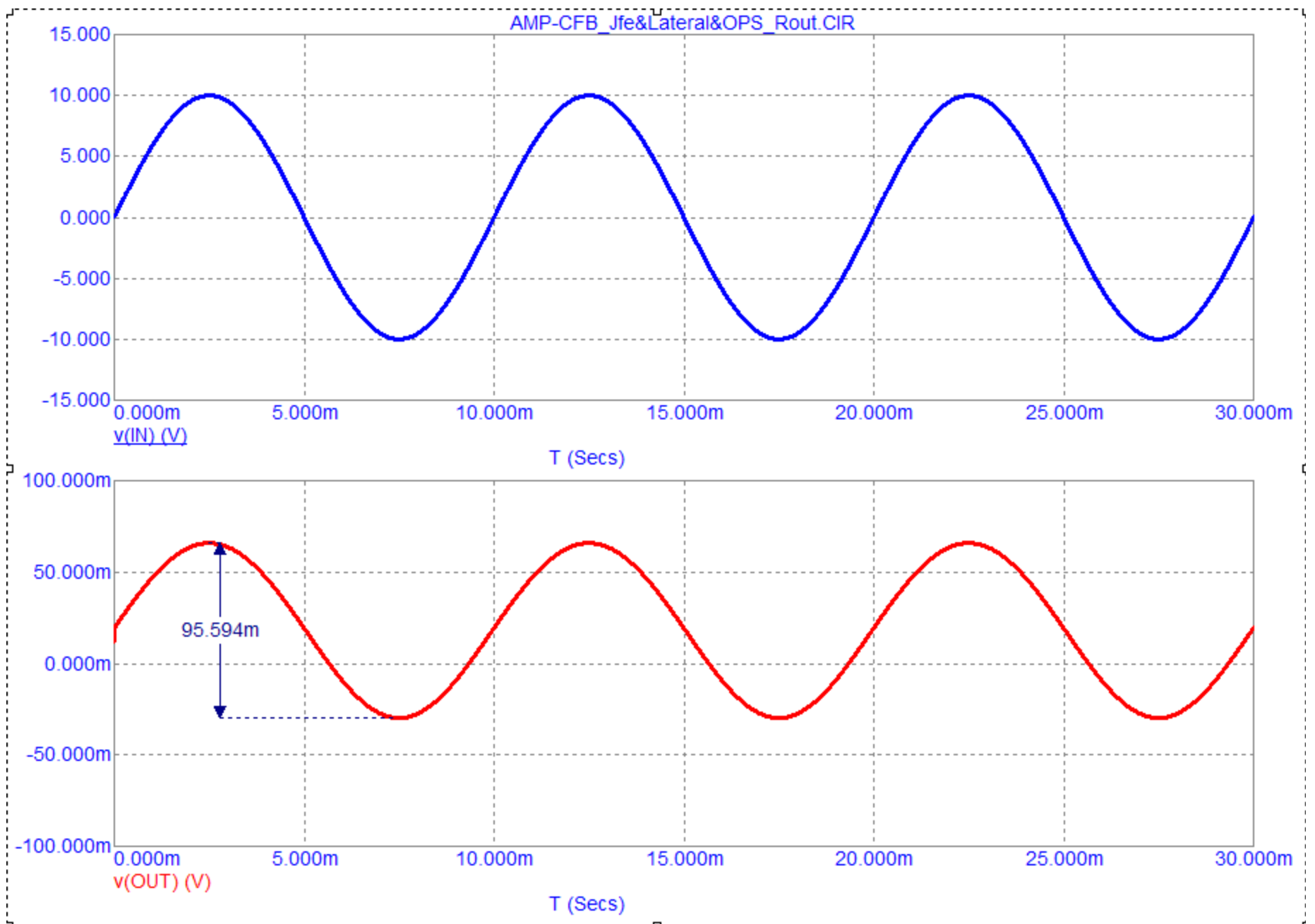


Рис. 12

Измеренное выходное сопротивление такого усилителя равно всего 0,02 Ома (уменьшилось в 55 раз). Представим себе доработанный усилитель в соответствии со структурной схемой рис. 13

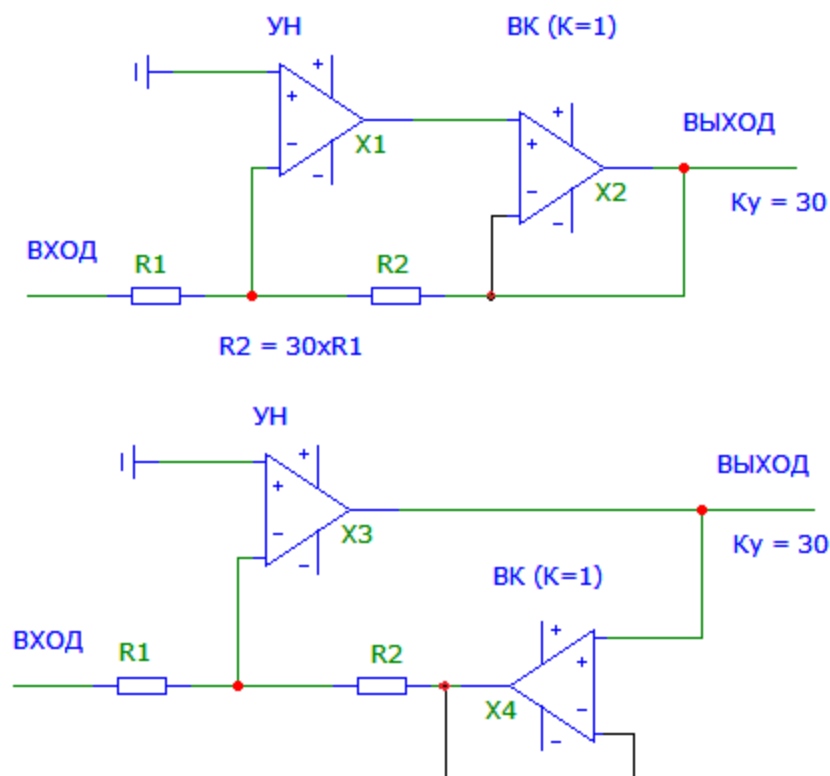
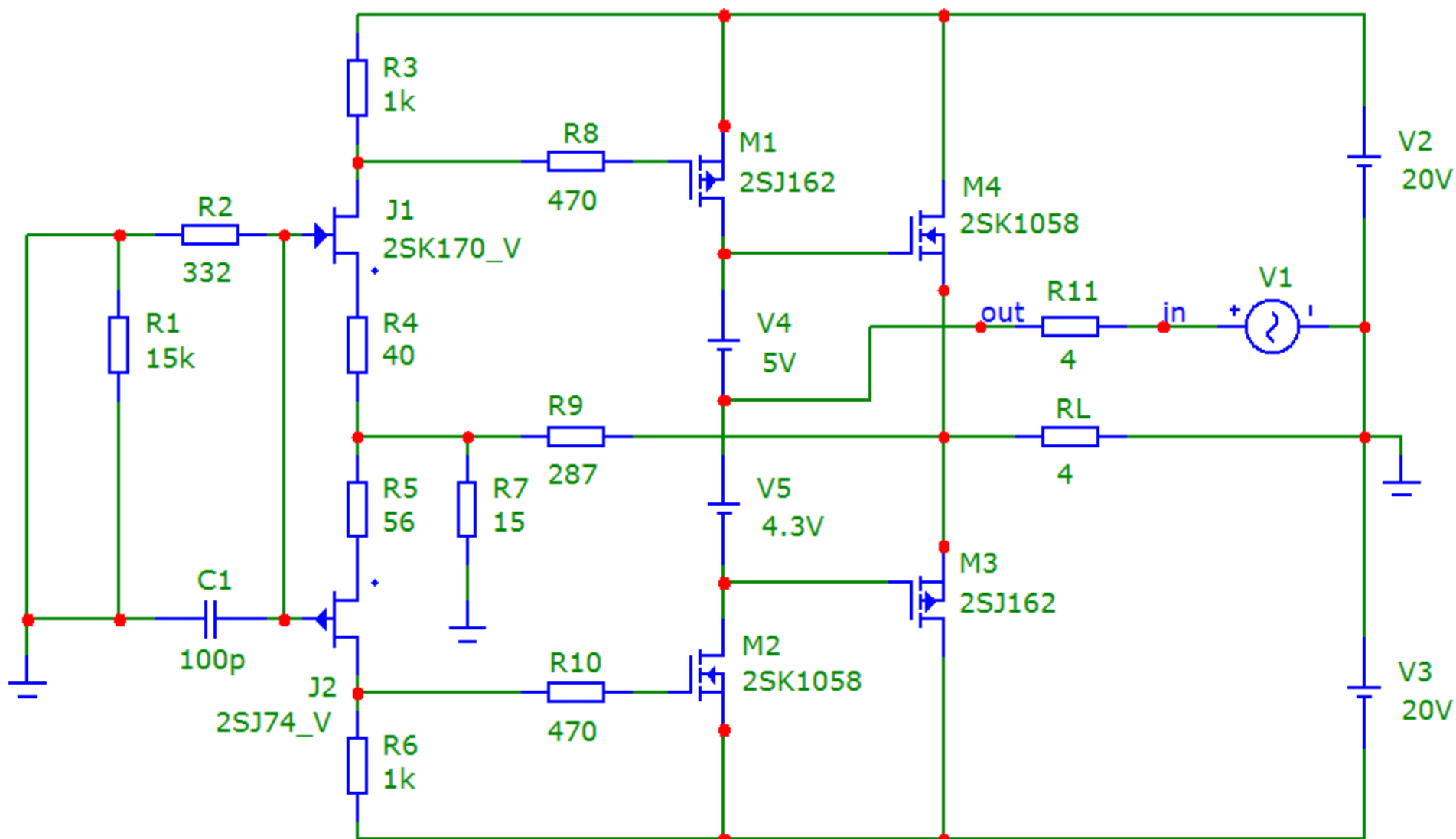


Рис. 13

На рисунке 14 показана одна и та же структурная схема, но чтобы понятнее было что происходит на выходе АНа ВК с коэффициентом передачи $K_y=1$ включен в цепь ООС. Так как повторитель не меняет глубину ООС то можно считать что мы вправе измерить выходное УНа в петле ООС традиционным способом, рис. 14. Источники смещения V_4, V_5 взяты равными напряжениям затвор-исток транзисторов M_1, M_2 для обеспечения такого же тока покоя и сохранения нуля на выходе.



$$R_{out} = R_L \cdot V_{out} / (V_{in} - V_{out}) = 4 \cdot 2,46 / (10 - 2,46) = 1,3 \text{ ohm}$$

Рис. 14

Результат теста показан на рис. 15

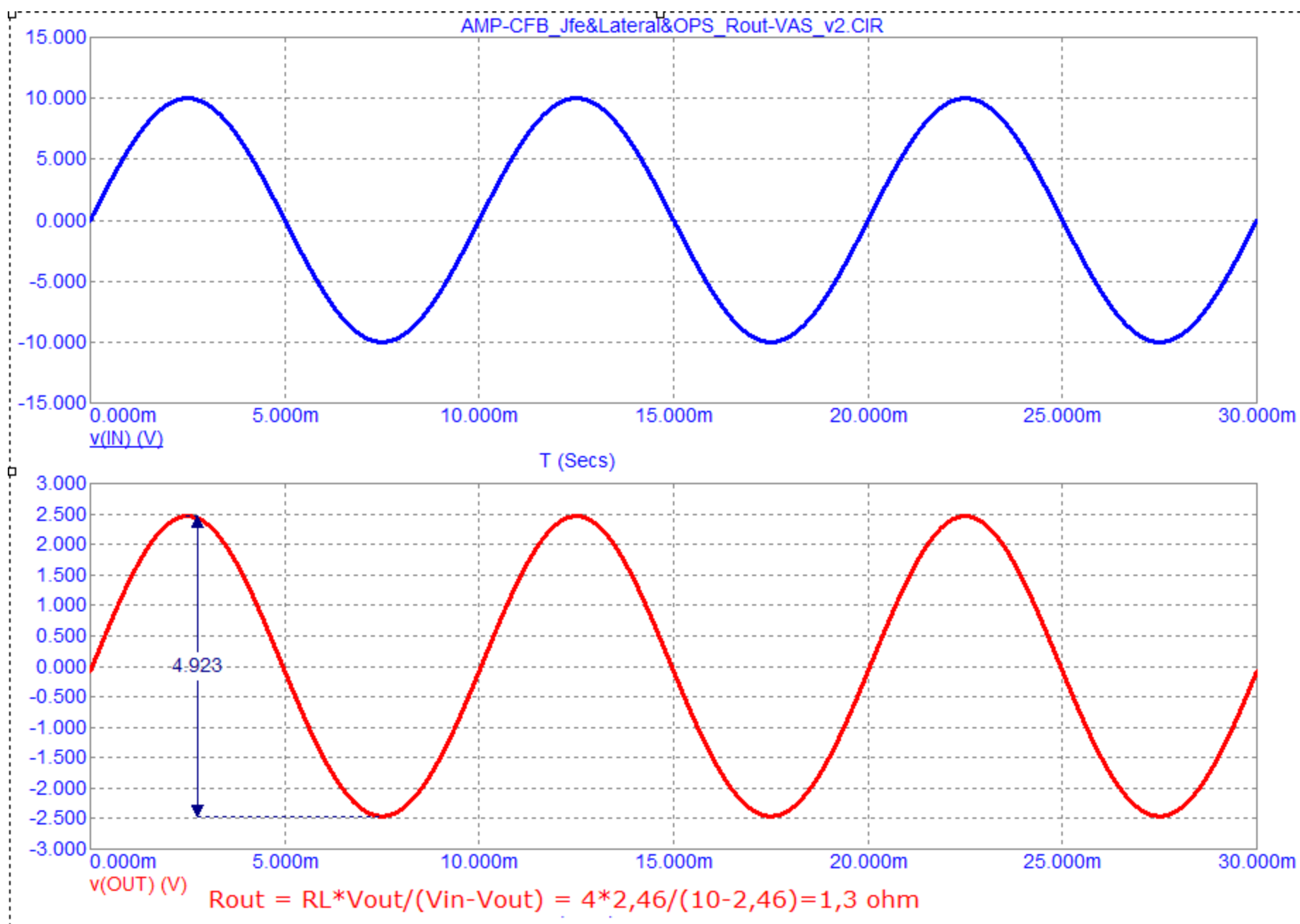


Рис. 15

Есть другой способ измерения выходного сопротивления способом нагрузки, если позволяет нагрузочная способность. В данном случае нагрузочная способность УНа работающего в классе А достаточно высокая, поэтому нагрузим его выход на расчетное выходное сопротивление (рис. 16), по крайней мере виртуально можем себе позволить, при этом выходное напряжение должно снизиться в 2 раза (на 6 дБ), диаграмма Боде - рис. 17.

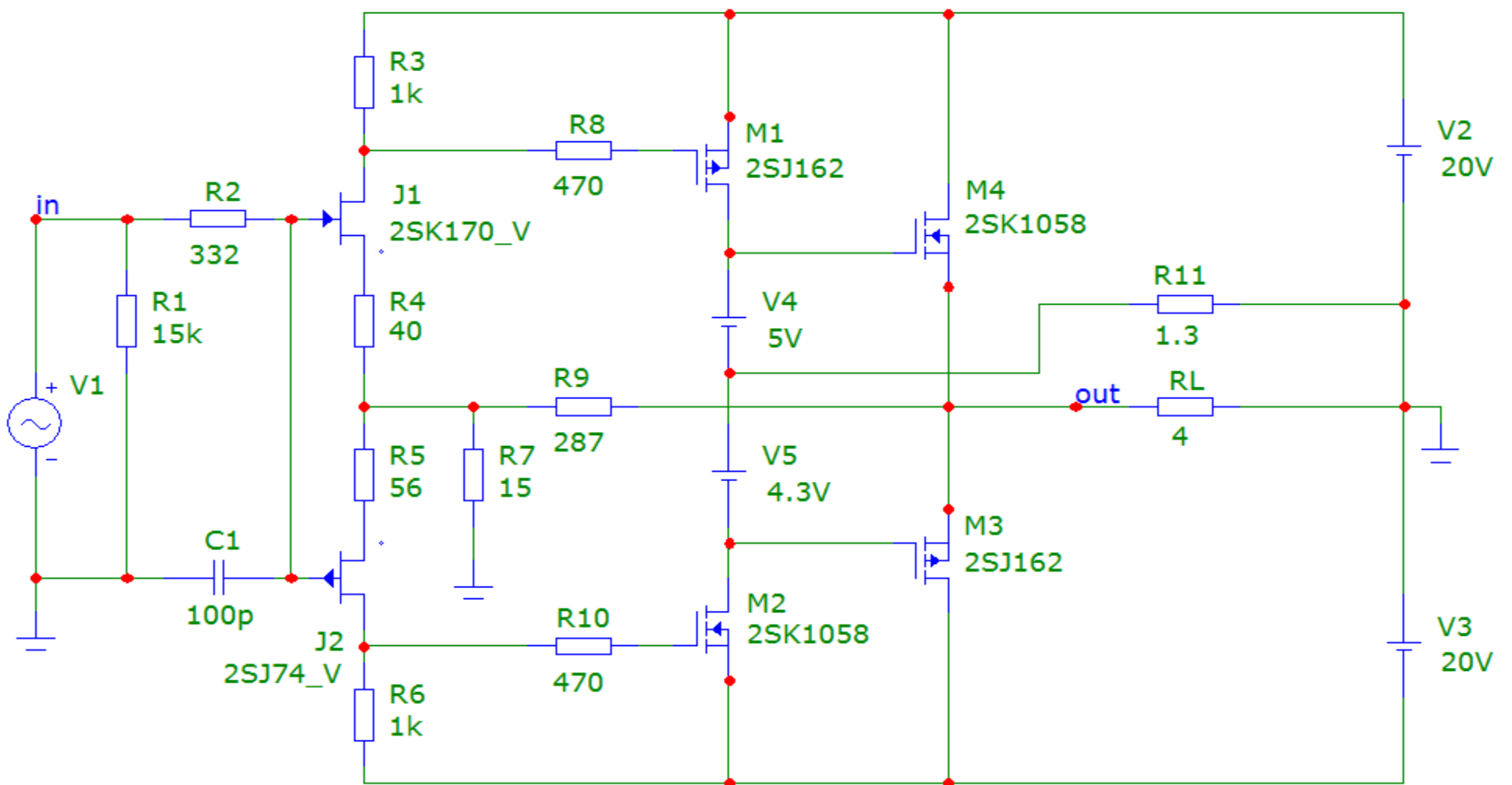


Рис. 16

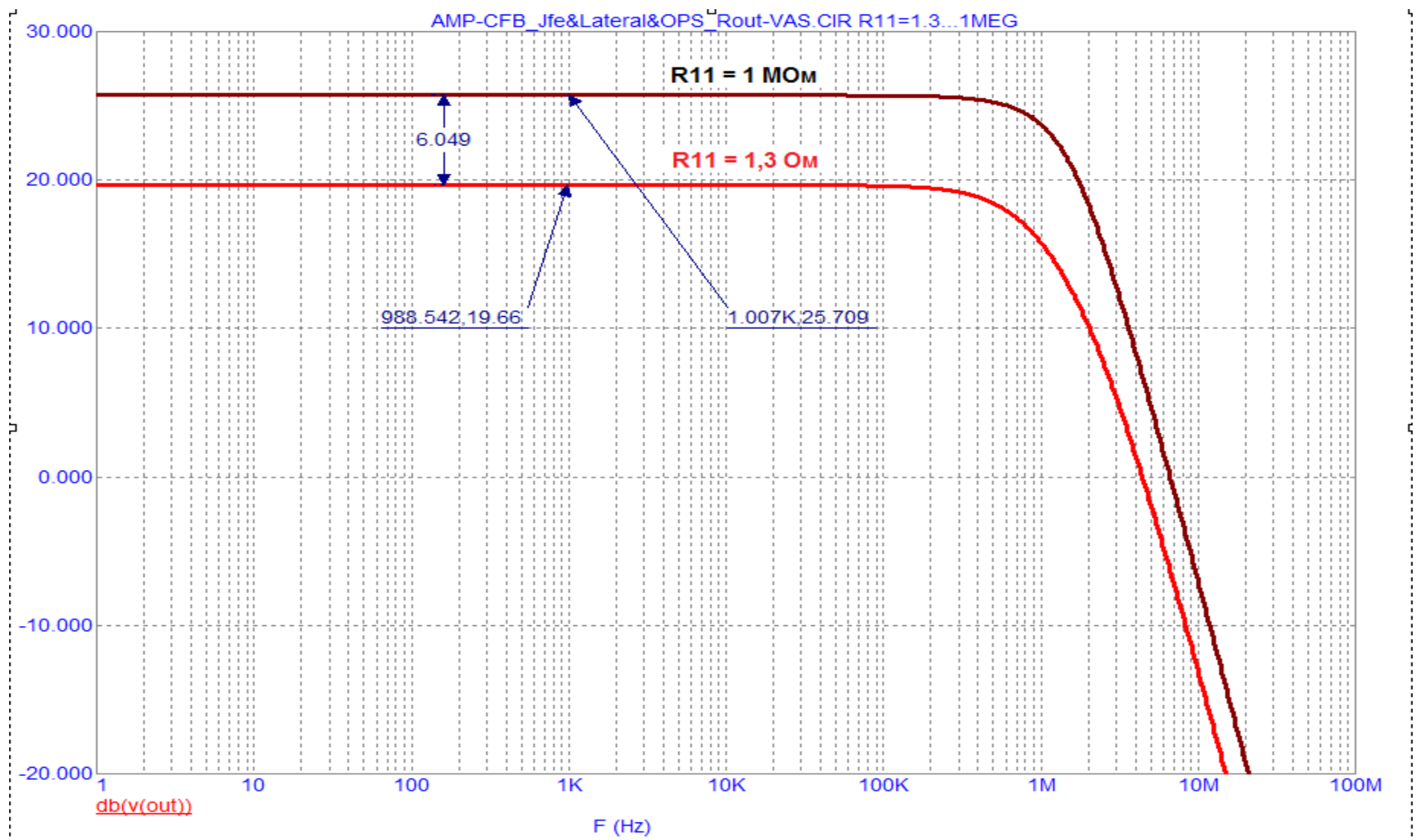


Рис. 17

Из диаграммы Бode видно что при изменении сопротивления нагрузки R11 с 1 MOhm до 1,3 Ом усиление УМЗЧ снижается на 6 дБ (в 2 раза) что и требовалось доказать.

Как показал анализ выходное сопротивление УНa в петле ООС уменьшается в соответствии с теорией и равно точно такому же значению как в усилителе без ВК где УН совмещал в себе функцию усилителя тока.

Литература:

1. Д,Селф, Проектирование усилителей мощности звуковой частоты, М, 2009
2. Б.Картер, Р.Манчини, Операционные усилители для всех, М, ДОДЭКА, 2011

С уважением,
Александр Петров