

## 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).

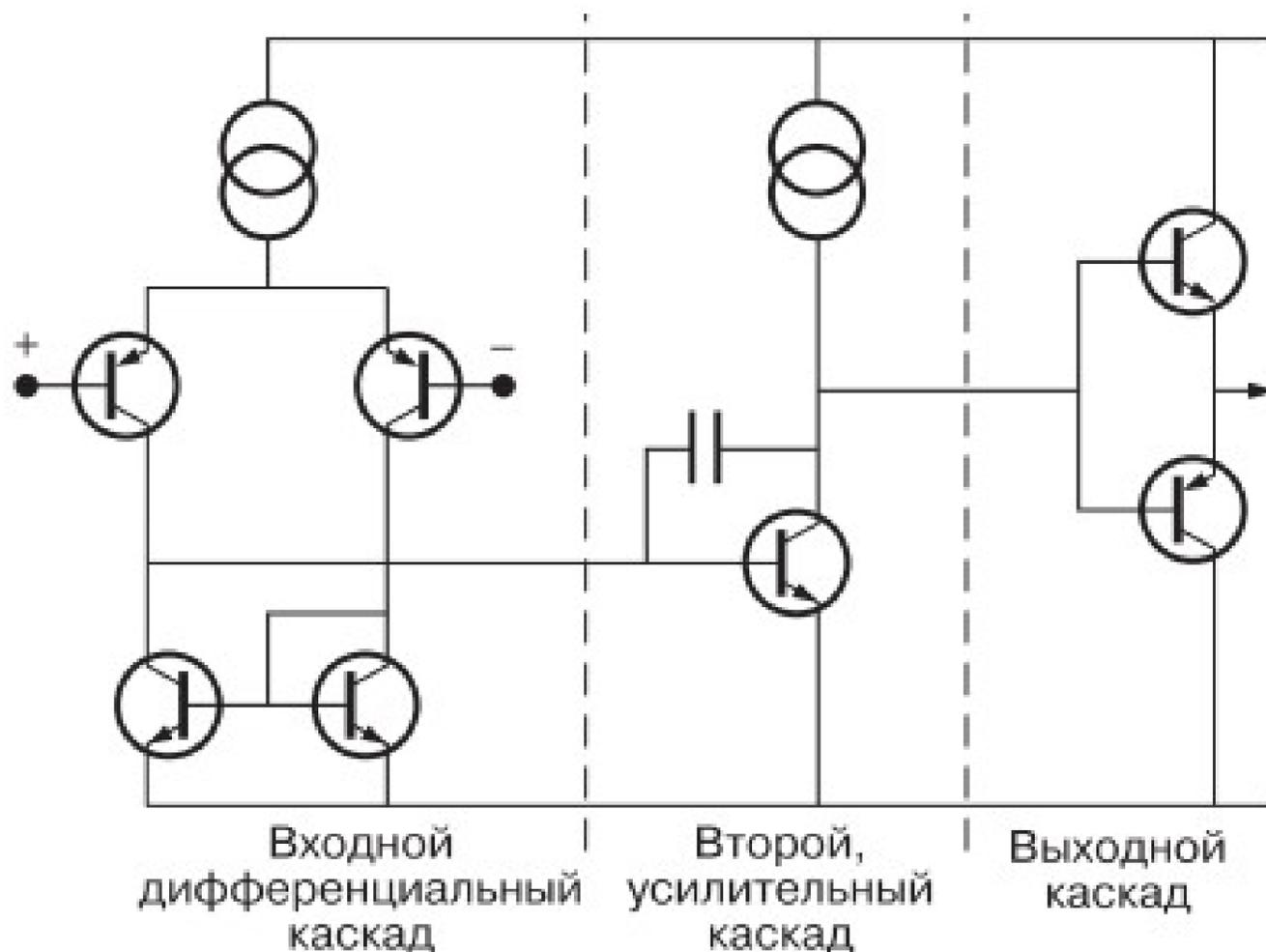


Рис. 1

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 в 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 ( $K_u = 1$ ).

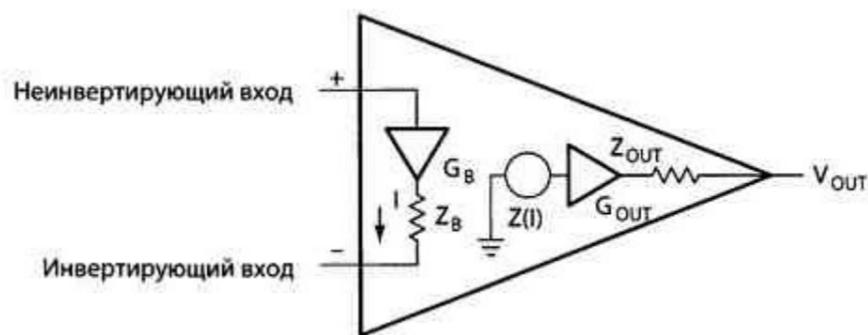


Рис. 2

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.

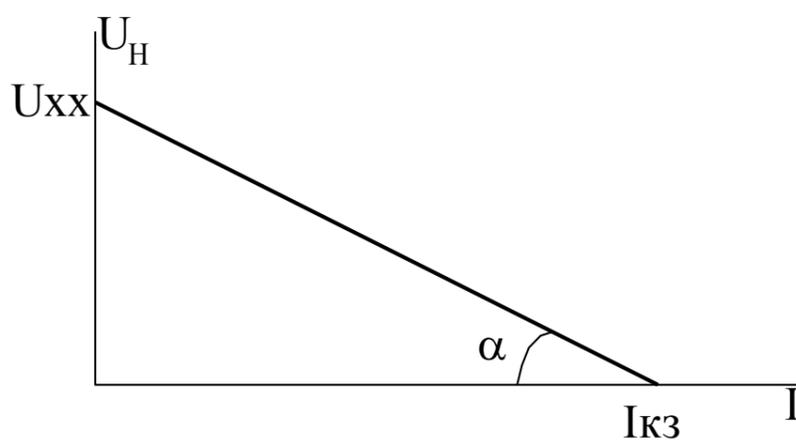


Рис. 3

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 переменный 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. ( $6 \text{ мА} / 0,4 \text{ мА} = 15$ ). Т.о. максимальный переменный ток выхода УНа ближе к нулю, чем к току к.з., т. е. является источником напряжения, а не тока. Поэтому во всей литературе и называется усилителем напряжения,

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. Этот параметр мало зависит от частоты, состояния петли ООС и характеризует крутизну коэффициента преобразования ток-напряжение и в большинстве усилителей колеблется от нескольких МОм до сотен МОм в современных ОУ. Например трансимпеданс УНа усилителя [1] на частоте 1 кГц при нагрузке 8 Ом с разомкнутой петлей ООС равен около 3,4 МОм, а при нагрузке 4 Ома 2,8 МОма. При замкнутой петле ООС при нагрузке 8 Ом трансимпеданс снижается до 2,6 МОм. Частотно зависимый характер носит входное напряжение на входе входного каскада необходимое для обеспечения одного и того же входного тока в трансимпедансный каскад. В отличие от УНа по схеме Лина благодаря отражателю тока в усилителях с ТОС выполненных по классической схеме входной ток трансимпедансного каскада слабее зависит от нагрузки УМЗЧ.

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. На самом деле не меняется трансимпеданс. К сожалению в литературе по этому вопросу нет никакой информации.

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

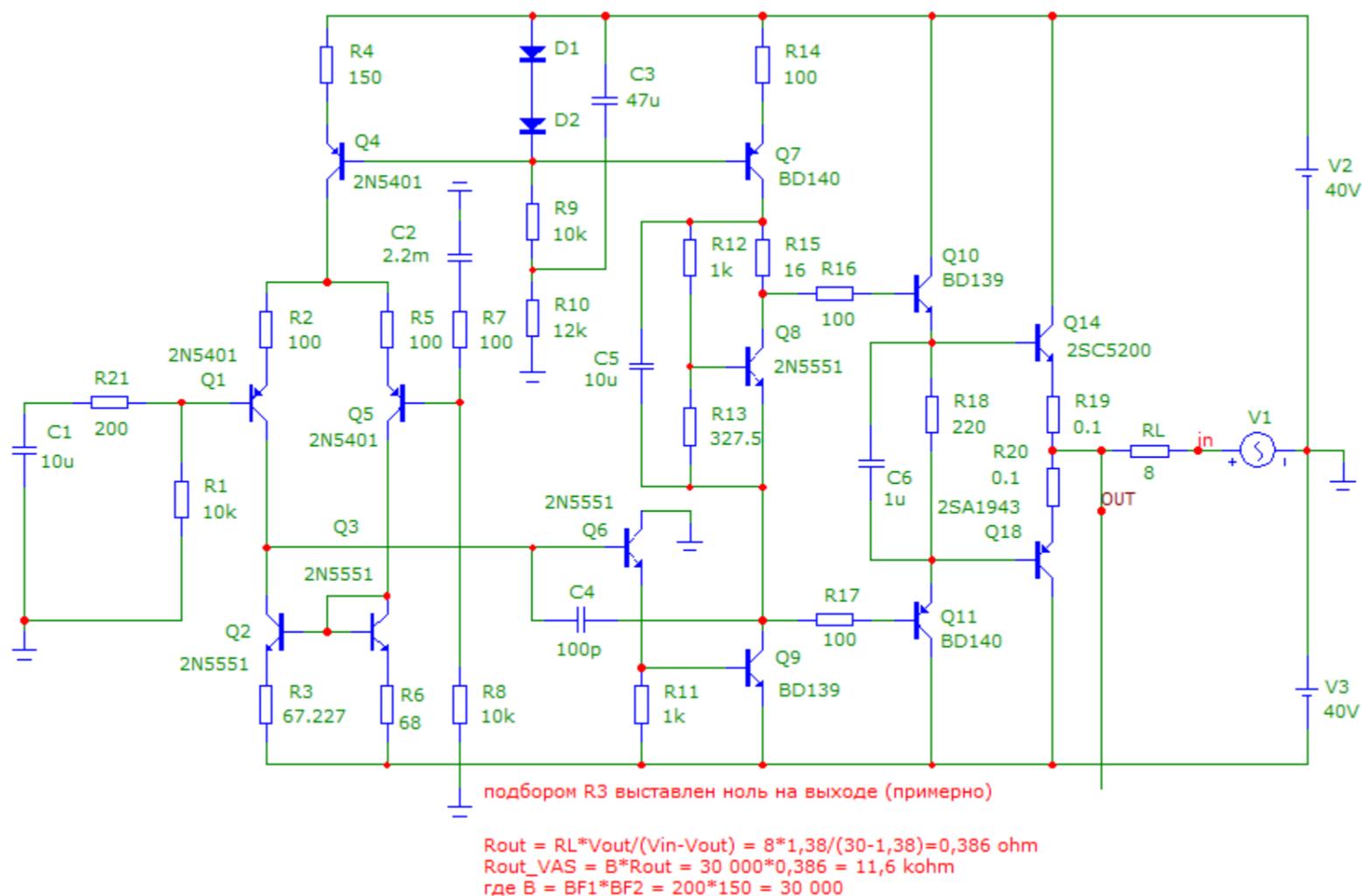


Рис. 4 (BF1 и BF2 – статические коэффициенты передачи тока базы транзисторов ВК)

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 2,752 В от пика до пика или 1,38 В (пик), рис. 5. В соответствии с расчетом выходное сопротивление УМЗЧ равно 0,386 Ом. Расчет приведен на схеме.

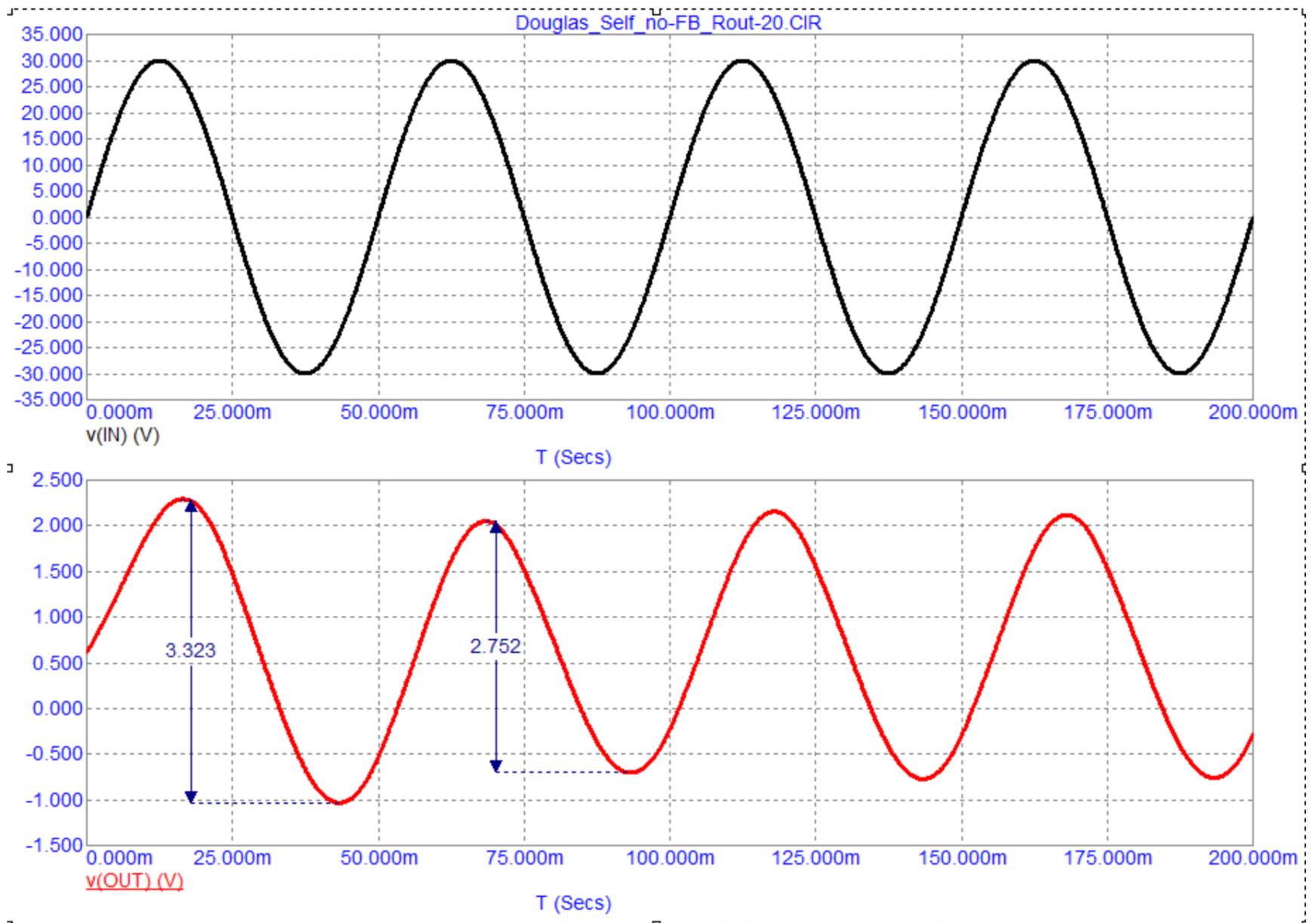


Рис. 5

Расчет выходного сопротивления УНа также приведен на схеме рис. 4, согласно расчета оно равно всего 11,6 кОм, а не МОмы как предполагалось. Выходное сопротивление на частоте 1 и 10 кГц оказалось еще ниже — 6 кОм.

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

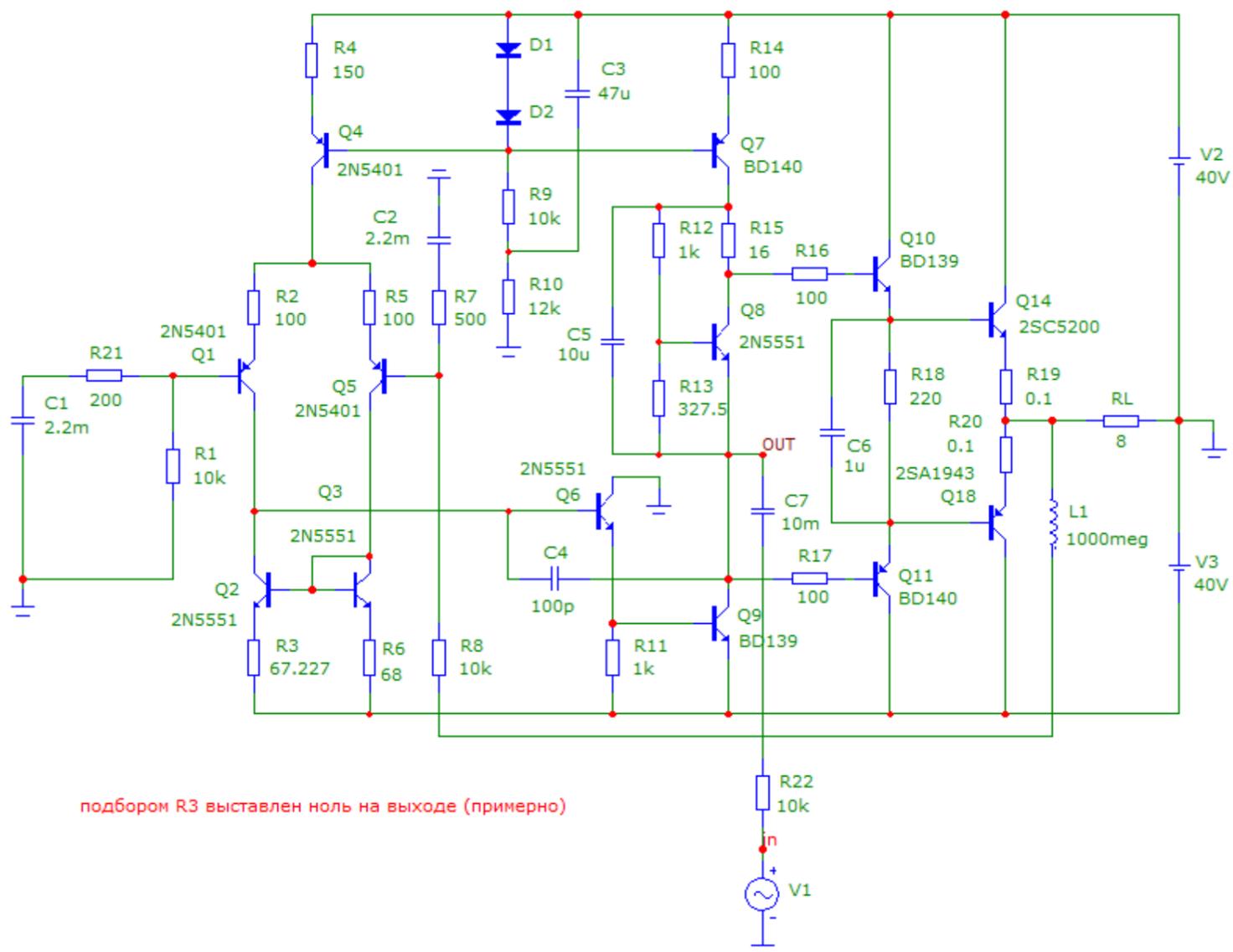


Рис. 6

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

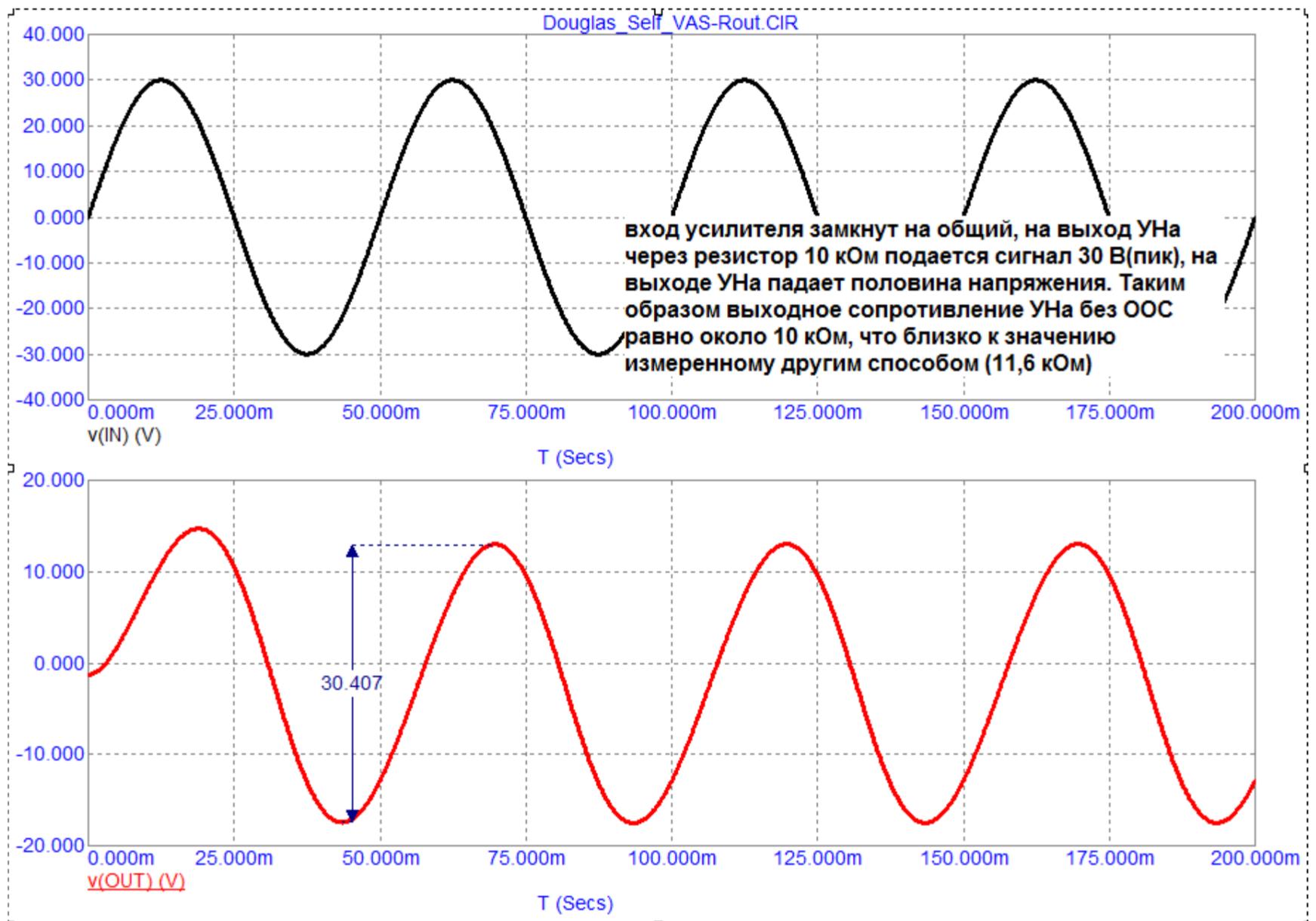


Рис. 7

Как видим сопротивление УНа измеренное вторым способом еще ниже, всего 10 кОм. Напомню что расчетом через выходное сопротивление оно равно 11,6 кОм. В любом случае разница не так уж и велика, можно считать в пределах погрешности измерений.

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.

#### 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