

ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

© 2020 г. В. Н. Вьюхин

*Институт автоматики и электрометрии СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1
e-mail: vvn@iae.nsk.su*

Поступила в редакцию 13.06.2019 г.

После доработки 17.06.2019 г.

Принята к публикации 19.06.2019 г.

Представлены результаты разработки высоковольтного усилителя малой мощности для измерителя вольт-амперных характеристик высокоомных полупроводниковых и кристаллических структур. Диапазон выходного напряжения 0–500 В в однополярном и 0 ± 250 В в двуполярном режимах, ток нагрузки до 5 мА, длительность фронта 10 мкс. Источник питания 300 В выполнен на базе обратногоходового повышающего импульсного преобразователя напряжения.

DOI: 10.31857/S0032816219060259

При разработке прибора для измерения вольтамперных характеристик высокоомных структур наиболее проблемным оказался высоковольтный (в.в.) усилитель. Промышленные в.в.-усилители, например, фирмы APEX [1] рассчитаны на мощные нагрузки. В.в.-усилитель [2], выполненный по схеме модулятор—в.в.-трансформатор 1:100—демодулятор, не имеет стабилизирующей обратной связи, поэтому выходное напряжение сильно зависит от нагрузки, кроме того, его электрическая схема достаточно громоздка. В.в. линейные усилители [3] рассчитаны на мощные киловольтные нагрузки и имеют большое время установления масштаба миллисекунд.

Разработанный в.в.-усилитель содержит интегральный операционный усилитель (о.у.) и секцию в.в.-транзисторов, причем сигнал для возбуждения секции в.в.-транзисторов снимается с выводов питания о.у. Такая схема в.в.-усилителя известна [4], однако практическая реализация и методика расчета на напряжение до 500 В отсутствуют. Принципиальная схема усилителя приведена на рис. 1. Эксперименты показали, что такая схема обеспечивает более высокие динамические характеристики и лучшую устойчивость по сравнению с использованием выхода о.у. для возбуждения секции в.в.-транзисторов.

Исследовались усилители с двумя широко распространенными о.у.: прецизионный AD2177, имеющий ток питания 0.4 мА и единичную полосу частот 1.3 МГц, и TL082 — ток питания 1.4 мА, единичная полоса частот 5 МГц. Отметим, что применение микросхем сдвоенных о.у. здесь не обязательно.

Транзисторы T_1, T_2 работают в режиме повторителя тока, транзисторы T_3, T_4 — в режиме генератора тока. В.в.-усилитель на рис. 1 можно рассматривать как двухкаскадный. Выход 1-го каскада с резистора R_4 преобразуется транзистором T_3 в ток с коэффициентом

$$I_{T_3} = (U_{o.v.}/R_7)R_4/R_8,$$

где $U_{\text{о.у.}}$ — напряжение на выходе о.у. Здесь и далее полагаем, что “положительная” и “отрицательная” части схемы рис. 1 симметричны, а ток по-

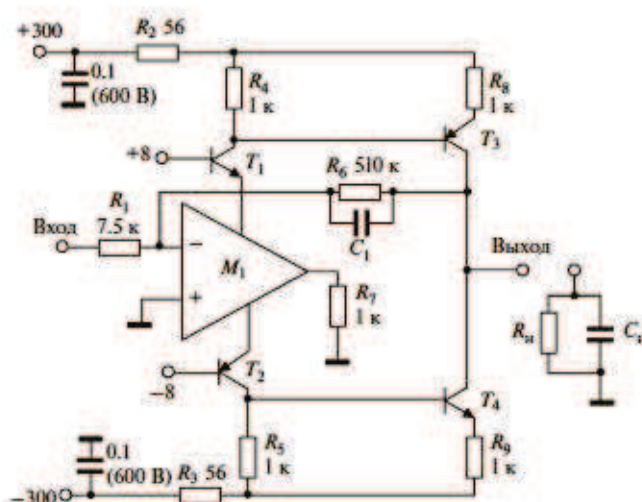


Рис. 1. Принципиальная схема в.в.-усилителя. M_1 – TL082 (AD2177); T_1, T_4 – TSC966, T_2, T_3 – TSA1765; R_1, R_3 – датчики тока, R_H, C_H – нагрузка.

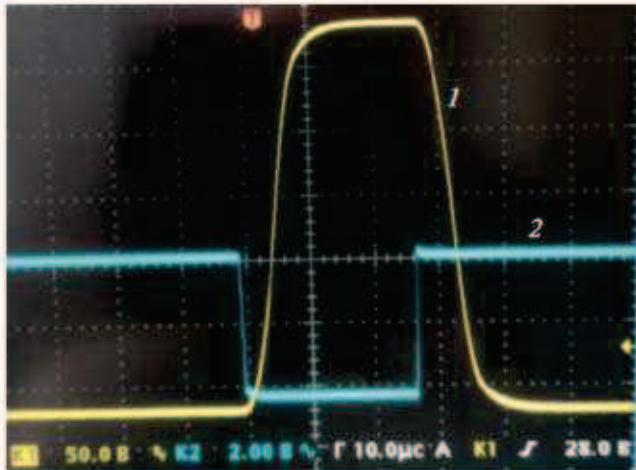


Рис. 2. Осциллограмма сигналов в.в.-усилителя на о.у. TL082: на выходе (1) и входе (2). Масштаб по вертикали 50 В/деление (1) и 2 В/деление (2), по горизонтали – 10 мкс/деление.

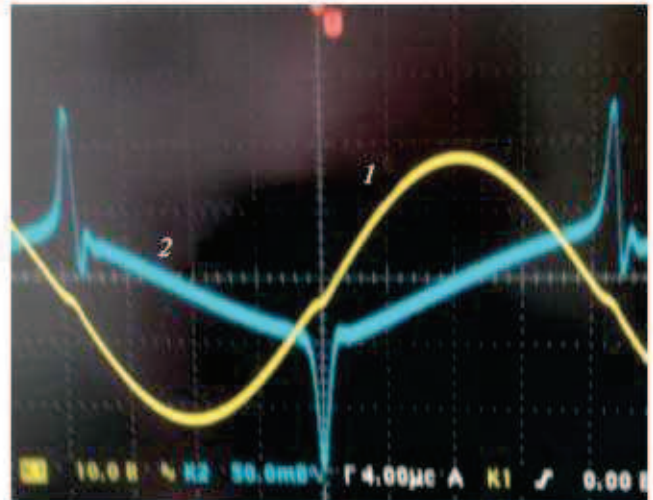


Рис. 3. Осциллограмма сигналов в.в.-усилителя на о.у. AD2177: 1 – на выходе о.у., 2 – на инверсном входе усилителя. Масштаб по вертикали 10 В/деление (1) и 50 мВ/деление (2), по горизонтали – 4 мкс/деление.

коя о.у. не учитывается, поскольку он не участвует в формировании выходного сигнала.

При разомкнутой обратной связи модули амплитудно-частотной характеристики (а.ч.х.) 1-го и 2-го каскадов в.в.-усилителя определяются по следующим выражениям:

$$K_1 = K_{o.y.} R_4/R_7 = (f_i/f) R_4/R_7,$$

$$K_2 = K_0/\sqrt{(1 + f/f_s)^2},$$

где $K_{o.y.}$ – модуль а.ч.х. о.у., f_i – частота единичного усиления о.у., $K_0 = R_0/R_7$ – коэффициент усиления 2-го каскада на постоянном токе, R_0 – параллельное соединение выходного сопротивления усилителя, нагрузки и резистора обратной связи R_6 , $f_s = 2C_k R_0$ – частота среза (полюса) второй ступени, C_k – емкость коллектора транзисторов T_3 , T_4 . Экспериментально полученное значение выходного сопротивления транзисторов T_3 , $T_4 \sim 250$ кОм на частоте 50 кГц, частота среза выходного каскада 50 кГц.

А.ч.х. усилителя двухполюсная, следовательно, даже при малом коэффициенте обратной связи R_1/R_6 (большом усилении), при замыкании цепи обратной связи возможна неустойчивая работа, чему способствует емкостная нагрузка. Корректирующий конденсатор C_1 и резистор R_6 формируют корректирующий нуль а.ч.х. на частоте $f_{кор} = 1/(2\pi R_6 C_1)$.

Усилитель с использованием о.у. AD2177 менее устойчив и требует более высокого значения корректирующего конденсатора по сравнению с вариантом, использующим о.у. TL082. Типичны для емкостной нагрузки до 30 пФ значения $C_1 = 2.7$ пФ и 4.3 пФ соответственно для о.у. TL082 и AD2177. При отсутствии емкостной нагрузки в.в.-

усилитель на о.у. TL082 может работать без коррекции. При неопределенной емкости нагрузки значение корректирующей емкости необходимо подбирать или использовать переменный конденсатор емкостью 2–10 пФ для TL082 и 4–20 пФ для AD2177. Подстройка осуществляется при подаче на вход импульса и достижения желаемой формы переходной характеристики усилителя.

Максимальный выходной ток $I_{макс}$ при закороченном на нуль выходе и максимальная скорость нарастания выходного напряжения $V_{нар}$ определяются соотношениями:

$$I_{макс} = U_{отс}/R_7,$$

$$V_{нар} = I_{макс}/C_{out},$$

где $U_{отс}$ – выходное напряжение отсечки о.у. ($U_{отс} = 5.5$ В для рис. 1), C_{out} – полная выходная емкость усилителя. Полоса частот в.в.-усилителя на о.у. TL082 равна 60 кГц при $R_{ii} = 100$ кОм, $C_{ii} = 130$ пФ, $C_1 = 4.3$ пФ. На рис. 2 представлена осциллограмма выходного импульса в.в.-усилителя на о.у. TL082 при названных выше условиях. Частотные свойства усилителя определяются, в основном, выходным каскадом на транзисторах и подбором корректирующей емкости, поэтому частотная характеристика в.в.-усилителя на о.у. AD2177 ненамного ниже приведенной для усилителя на о.у. TL082. Приведенное ко входу в.в.-усилителя смещение нуля равно 4 мВ для усилителя на о.у. TL082 и <100 мкВ для усилителя на о.у. AD2177.

Экспериментально обнаружено искажение выходного сигнала в усилителе на о.у. AD2177. Искажения хорошо просматриваются (как и остальные переходные процессы) на инверсном

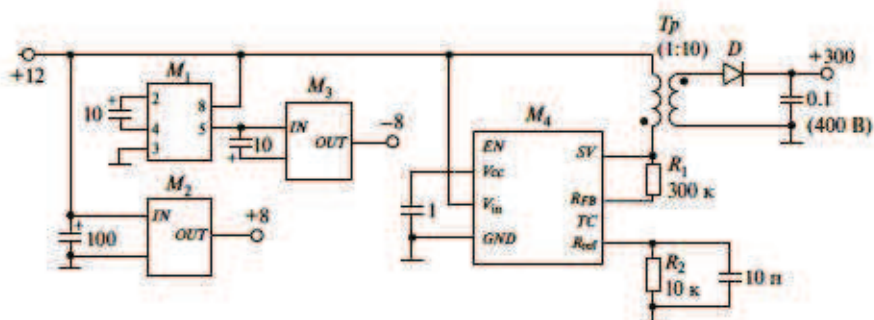


Рис. 4. Принципиальная схема источника питания. M_1 – ICL7662, M_2 – 78L08, M_3 – 79L08, M_4 – LT8304-1; D – BA158G; T_p – SUMIDA 13324-T087.

входе о.у. и имеют вид положительных и отрицательных импульсов постоянной площади – при повышении частоты синусоидального сигнала амплитуда растет, а длительность уменьшается, и наоборот. Вид искажений при подаче на вход синусоидального сигнала показан на осциллограмме рис. 3. Источником искажений является “обнуление” тока транзисторов T_3 , T_4 , когда “отрицательный” выходной ток усилителя равен режимному току о.у., а выходное напряжение о.у. равно нулю. В однополярном включении, при положительном выходном напряжении, данный эффект отсутствует. В усилителе на о.у. TL082 указанный эффект не наблюдается на рабочих частотах. При сравнении двух рассмотренных вариантов построения в.в.-усилителя на базе о.у. видно, что усилитель на о.у. AD2177 имеет очень малое смещение и дрейф нуля, но требует более тщательного подбора корректирующей емкости и может работать только в однополярном режиме.

Источник питания, схема которого приведена на рис. 4, имеет в своем составе первичный источник питания – сетевой адаптер +12 В с последующим стабилизатором, зарядовый инвертор на –12 В (микросхема M_1), линейные стабилизаторы M_2 , M_3 . Источник высокого напряжения +300 В выполнен по схеме повышающего обратноходового преобразователя, в котором роль накопительного дросселя выполняет первичная обмотка трансформатора T_p . Микросхема преобразователя M_4 дополни-

тельно содержит компоненты, позволяющие регулировать выходное напряжение. В момент запитывания ключевого транзистора на его стоке (выводе SV в M_4) формируется импульс, амплитуда которого равна выходному напряжению, деленному на коэффициент трансформации. Этот уровень фиксируется, преобразуется в ток и используется в петле обратной связи для регулировки выходного напряжения, равного R_1/R_2 вольт. Источник питания –300 В аналогичен источнику +300 В. Более простое решение доступно при использовании нового продукта – трансформатора с двумя вторичными обмотками SUMIDA 10380-T030. При работе в однополярном режиме источники +300 В и –300 В соединяются последовательно, на оставшийся вывод в.в.-усилителя подается 12 В.

Описанный в.в.-усилитель используется для измерения вольт-амперных характеристик и импеданса высокоомных структур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://www.apexanalog.com>
2. Сакалаускас С., Вайтонис З., Пукас Р. // ПТЭ. 2007. № 3. С. 61.
3. Ренков В.В. Препринт ИЯФ СО РАН 2010-32. Новосибирск, 2010.
4. www.leoniv.diod.club/articles/hvamp/hvamp.html