



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»
(ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)

**Институт
информационных
технологий**

**Кафедра
Информационных технологий и
вычислительных систем**

ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ
ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«Электротехника, электроника и схемотехника»

СТУДЕНТА 3 КУРСА бакалавриата ГРУППЫ ИДБ-20-02
(уровень профессионального
образования)

Ердогана Дениза Ердаловича

НА ТЕМУ
Транзисторный усилительный каскад

Вариант 8

Направление: 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»
Профиль подготовки: «Программное обеспечение средств вычислительной техники и автоматизированных систем»

Отчет сдан «_____» _____ 2022 г.

Оценка _____

Преподаватель Николай Александрович Хлебалин _____
(Ф.И.О., должность, степень, звание.) (подпись)

МОСКВА 2022

Работа усилительного каскада исследуется методом моделирования в среде программы Multisim. Для проведения экспериментов, получения характеристик и определения параметров каскада соберём или используем готовую схему лабораторного макета усилительного каскада. Тип транзистора Т – 2N2222 ($\beta = BF = 153$). Сопротивление нагрузки принять $R_6 = 100 \text{ кОм}$. Использовать следующие значения конденсаторов: $C_1 = C_2 = 5 \mu\text{F}$; $C_3 = 50 \mu\text{F}$; $C_4 = 100 \text{ пФ}$.

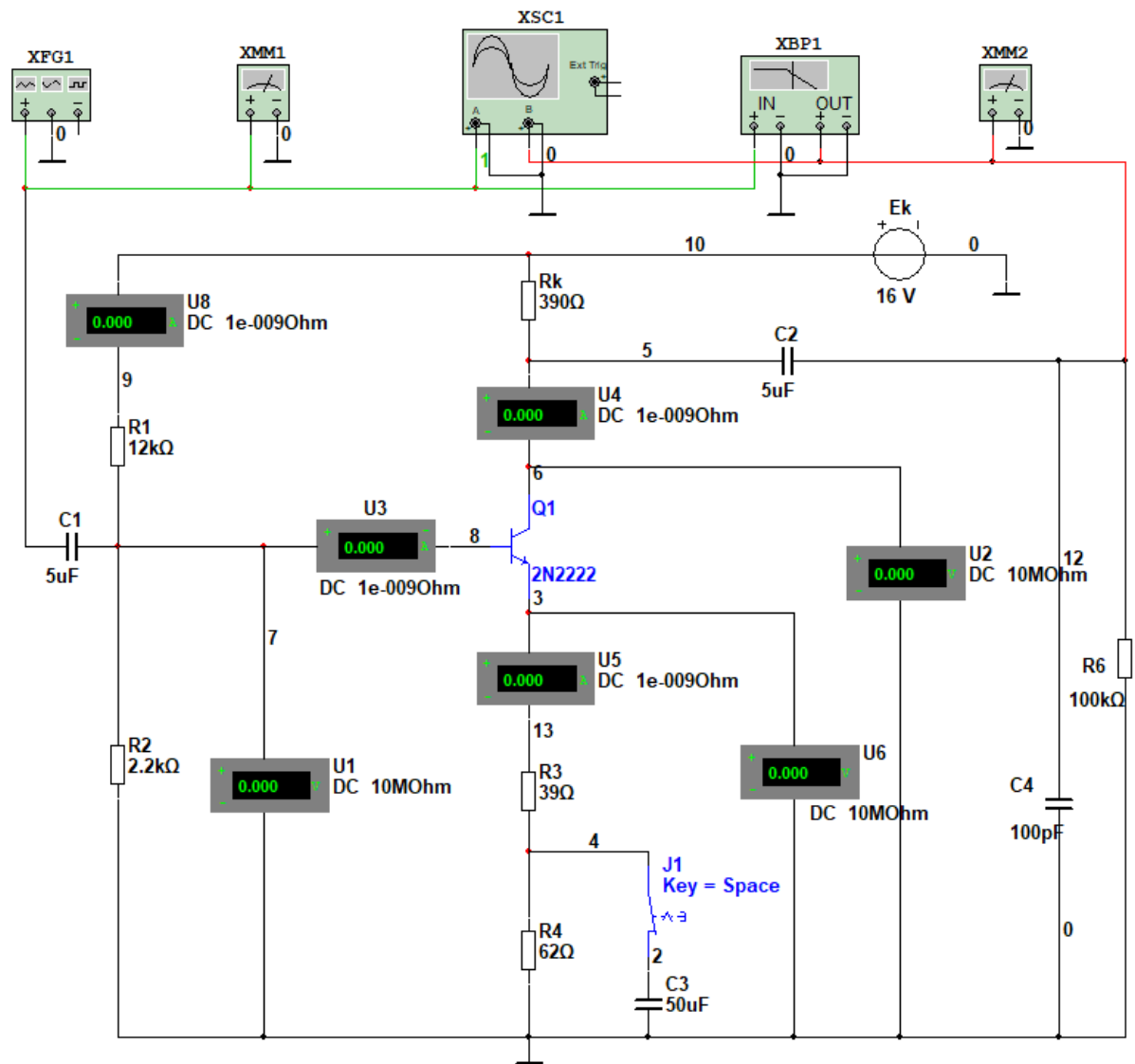


Рисунок 1. Установка требуемых параметров

На генераторе входного сигнала XFG1 (Function Generator) установим частоту (Frequency) = 1kHz и амплитуду (Amplitude) = 100mVp.

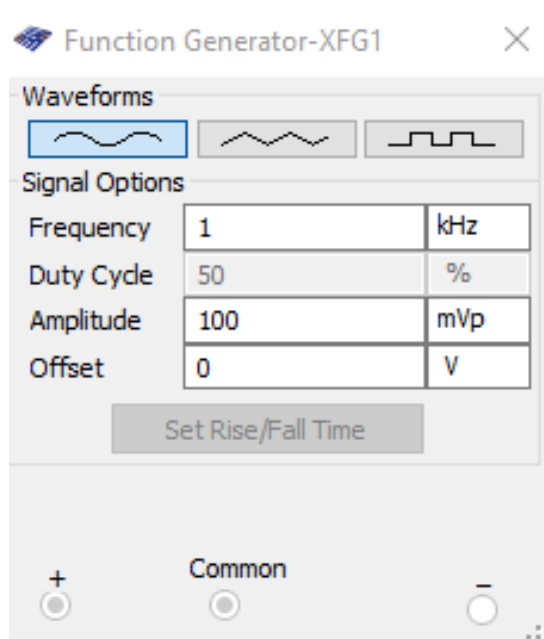


Рисунок 2. Установка требуемых параметров генератора входного сигнала

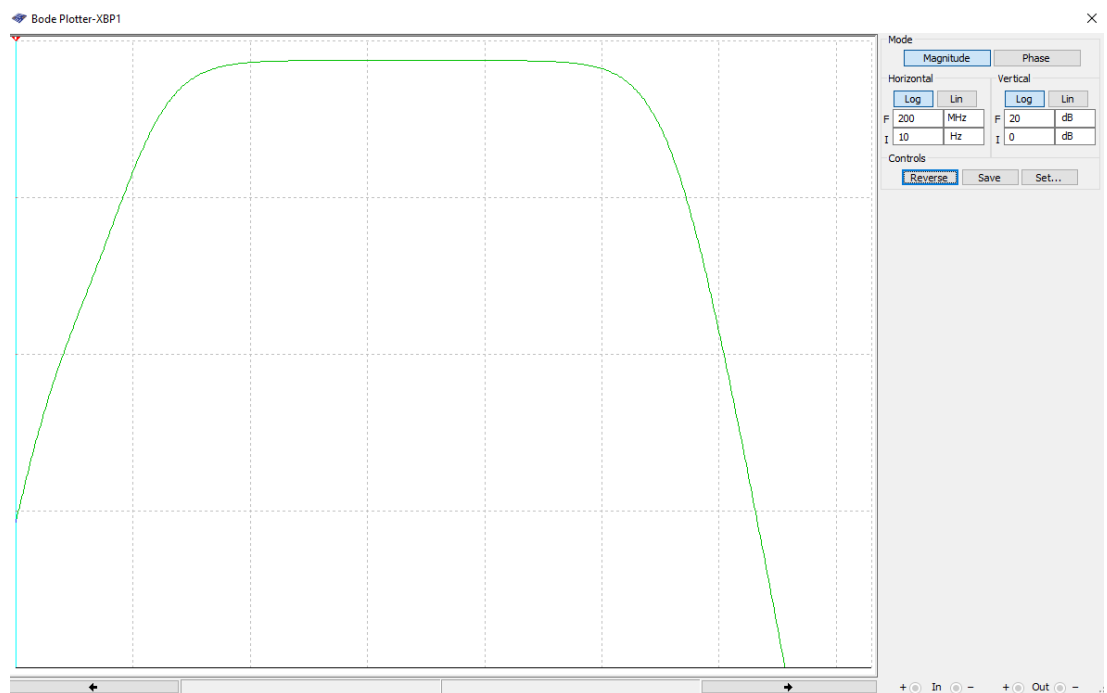


Рисунок 3. Установка требуемых параметров Bode Plotter

Выбираем номинальные значения резисторов R_1, \dots, R_4, R_K и напряжение питания E_K .

Таблица 1

$E_K, \text{ В}$	$R_1, \text{ кОм}$	$R_2, \text{ кОм}$	$R_K, \text{ Ом}$	$R_3, \text{ Ом}$	$R_4, \text{ Ом}$
16	12	2,2	390	39	62

Включим схему моделирования для того, чтобы проверить работоспособность генератора и усилительного каскада по наличию гармонических входного и выходного сигналов на экране осциллографа XSC1.

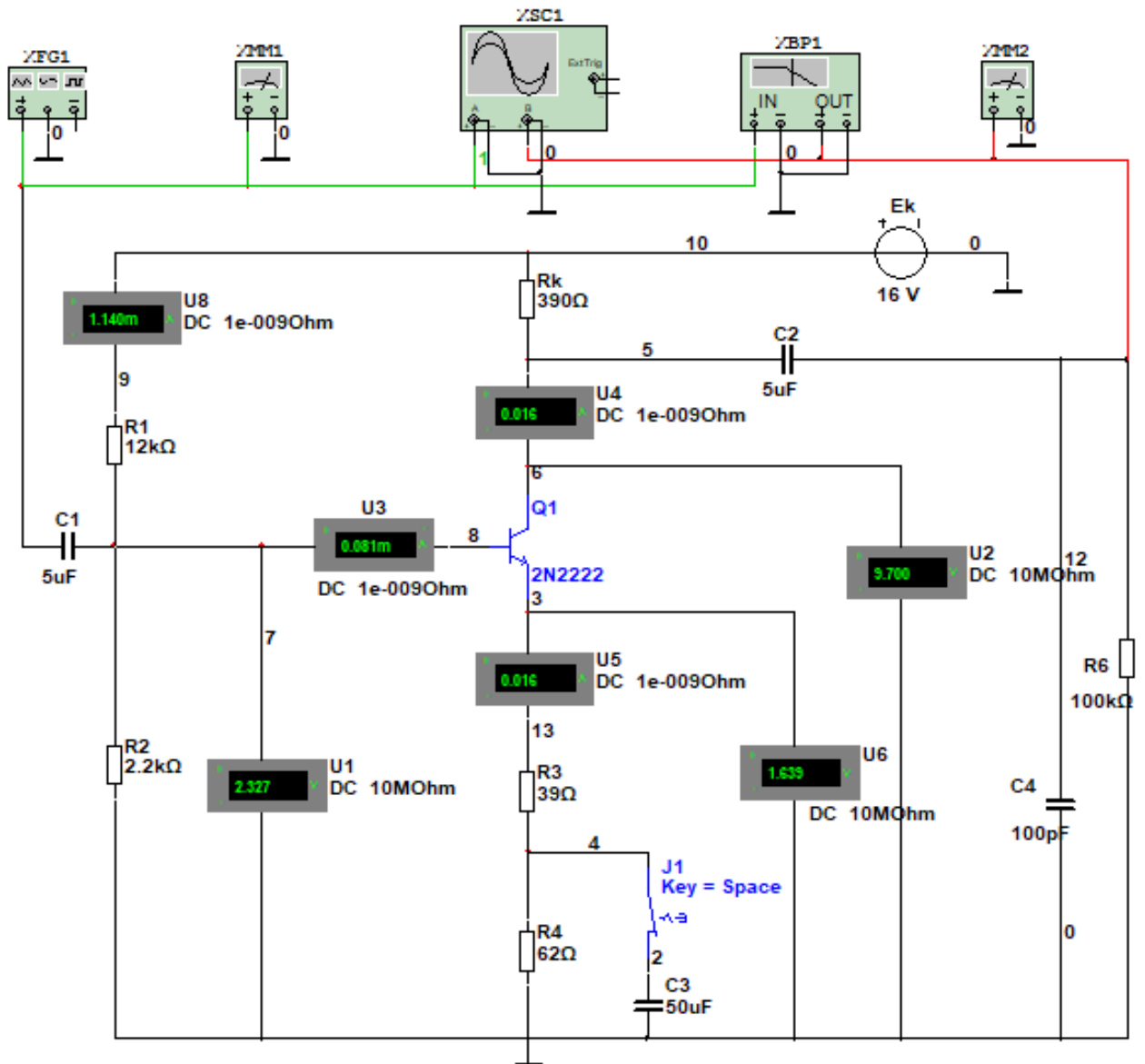


Рисунок 4. Включенная общая схема проверки при замкнутом ключе J1.

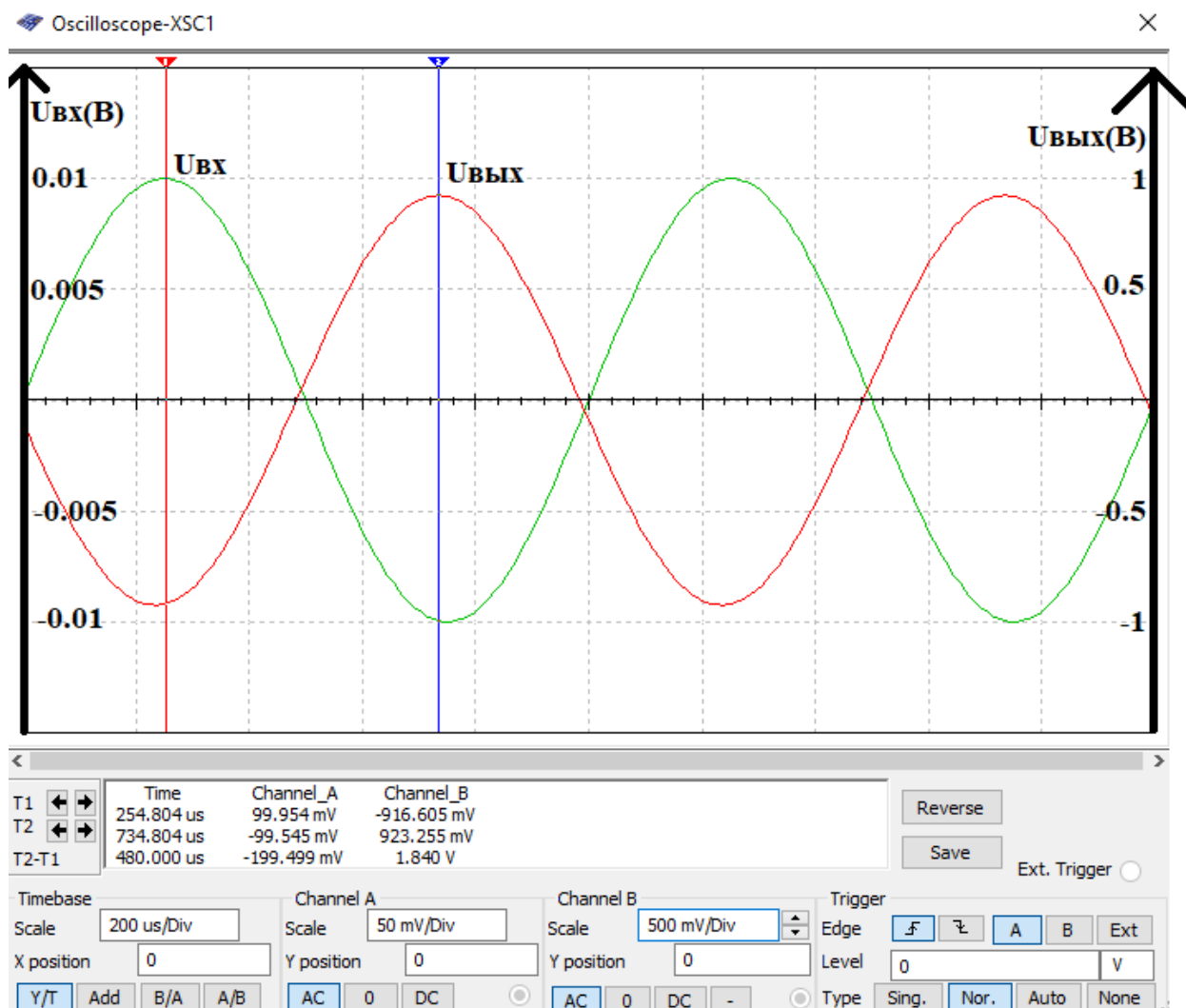


Рисунок 5. Показатели гармонических входного и выходного сигналов на экране осциллографа XSC1 (без видимых искажений)

$$U_{\text{ВЫХ}} = 923,255 \text{ mV}$$

$$U_{\text{ВХ}} = 99,954 \text{ mV}$$

Зафиксируем при помощи индикаторов напряжения и тока режим работы усилителя по постоянному току. Рассчитаем напряжения $U_{\text{кэп}}$ и $U_{\text{бэп}}$. Результаты эксперимента занести в таблицу 2.

Таблица 2

$U_{\text{кп}}(\text{В})$	$U_{\text{бп}}(\text{В})$	$U_{\text{эп}}(\text{В})$	$U_{\text{кэп}}(\text{В})$	$U_{\text{бэп}}(\text{В})$	$I_{\text{кп}}(\text{мА})$	$I_{\text{бп}}(\text{мА})$	$I_{\text{эп}}(\text{мА})$
9,700	2,327	1,639	8,061	0,688	16,000	0,081	16,000

$$U_{\text{кэп}} = U_{\text{кп}} - U_{\text{эп}} = 9,700 - 1,639 = 8,061 \text{ В}$$

$$U_{\text{бэп}} = U_{\text{бп}} - U_{\text{эп}} = 2,327 - 1,639 = 0,688 \text{ В}$$

Обозначения:

$U_{кп}$ - напряжение покоя на выводе коллектора,

$U_{бп}$ - напряжение покоя на выводе базы,

$U_{эп}$ - напряжение покоя на выводе эмиттера,

$U_{кэп}$ - напряжение покоя между коллектором и эмиттером,

$U_{бэп}$ - напряжение покоя между базой и эмиттером,

$I_{кп}$ - ток покоя коллектора,

$I_{бп}$ - ток покоя базы,

$I_{эп}$ - ток покоя эмиттера.

$$R_9 = R_3 + R_4 = 39 \text{ Ом} + 62 \text{ Ом} = 101 \text{ Ом}$$

Для построения линии нагрузки используется уравнение:

$$U_{кэп} = E_k - (R_k + R_9) * I_{кп}$$

$$E_k = 16 \text{ В}; R_9 = 101 \text{ Ом}; R_k = 390 \text{ Ом}, I_{кп} = 0,016 \text{ А}$$

$$E_k / (R_k + R_9) = 16 / (390 + 101) = 0,033 \text{ А}$$

$$U_{кэп} = 16 - (390 + 101) * 0,016 = 8,144 \text{ В}$$

Построим на выходной характеристике транзистора $I_k = F(U_{кэ})$ нагрузочную прямую и определим положение точки покоя П.

Вывод: значение почти совпадают. Так как имеется погрешность при округлениях в расчётах, моделировании графика и его анализе, симуляции значения с опыта немного отличаются от аналитических.

Определение характеристик усилительного каскада

Определим коэффициент усиления каскада по напряжению $K_u = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ по показаниям мультиметров XMM1 и XMM2.

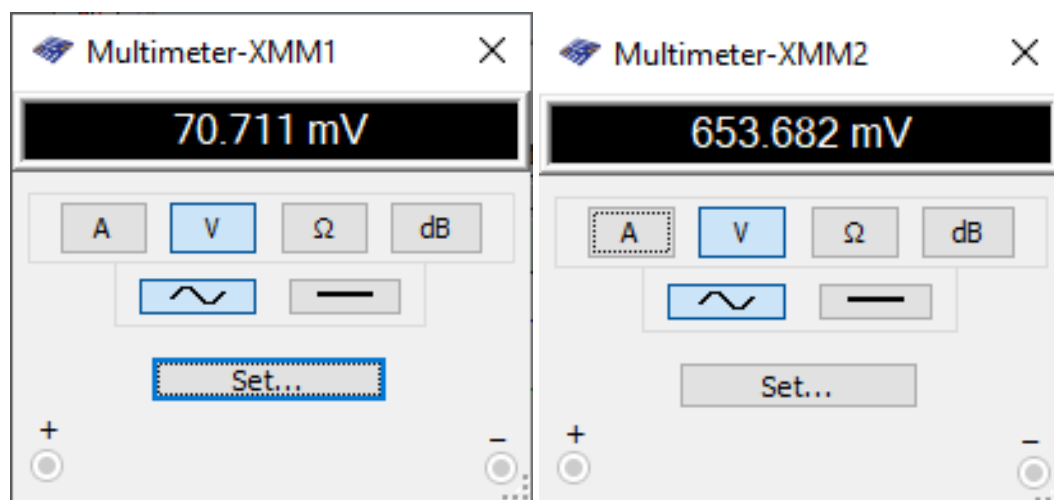


Рисунок 8. Показания Мультиметров XMM1 и XMM2

$$K_u = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = 653,682 / 70,711 = 9,244$$

Построить амплитудную характеристику $U_{\text{выхм}} = f(U_{\text{вхм}})$

Построим амплитудную характеристику $U_{\text{выхм}} = f(U_{\text{вхм}})$. Для этого, изменяя амплитуду входного напряжения в генераторе XFG1 и определяя амплитуду выходного напряжения по осциллографу XSC1, заполним таблицу:

$U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ}$	100	200	300	400	500	600	700	800
$U_{\text{ВЫХ}}, \text{ В}$	0,923	1,842	2,756	3,656	4,535	5,350	5,940	6,021

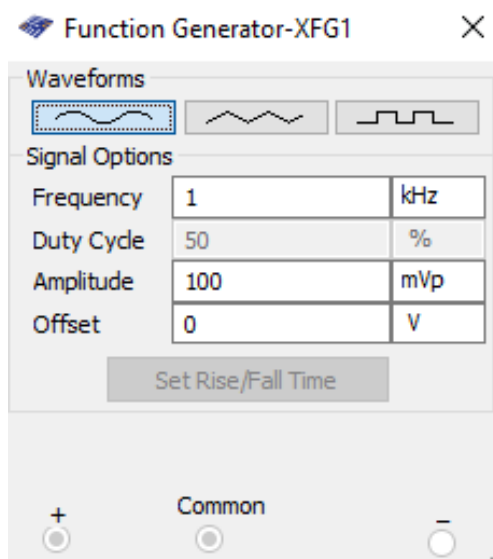


Рисунок 9. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 100 мВ

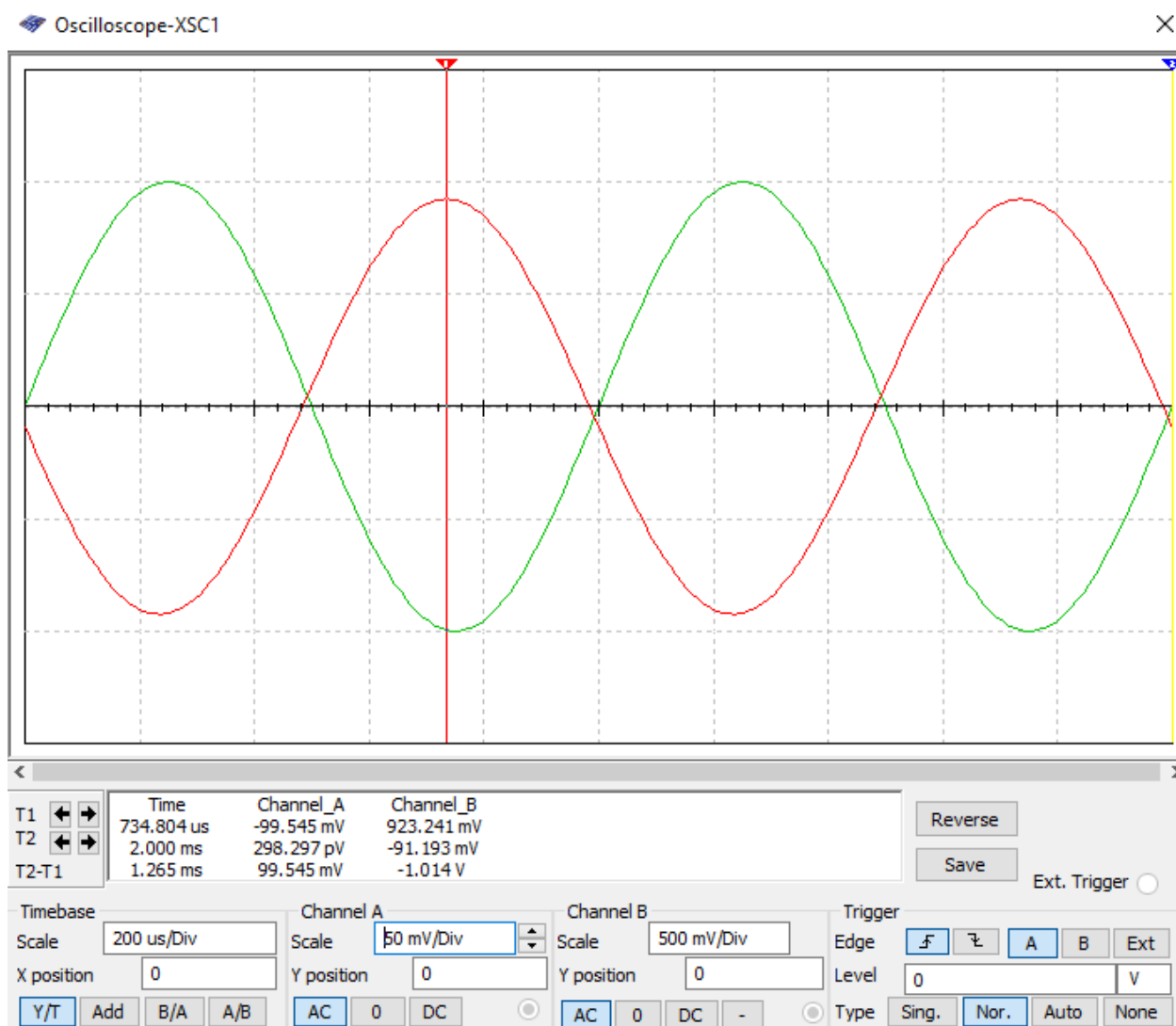


Рисунок 10. Показания осциллографа XSC1 № 1 при U_{BX} , мВ = 100 мВ

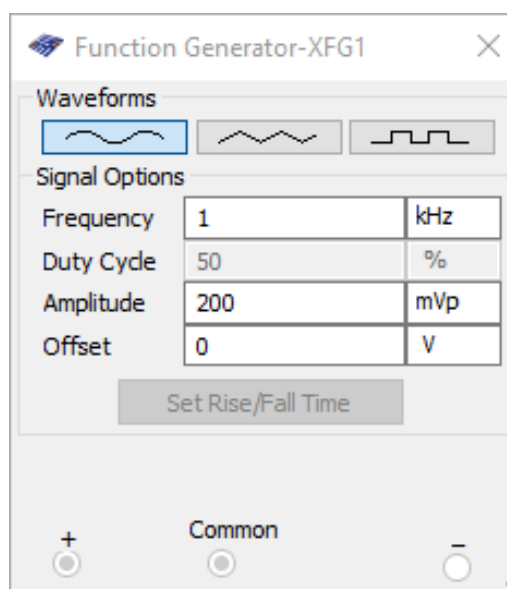


Рисунок 11. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 200 мВ

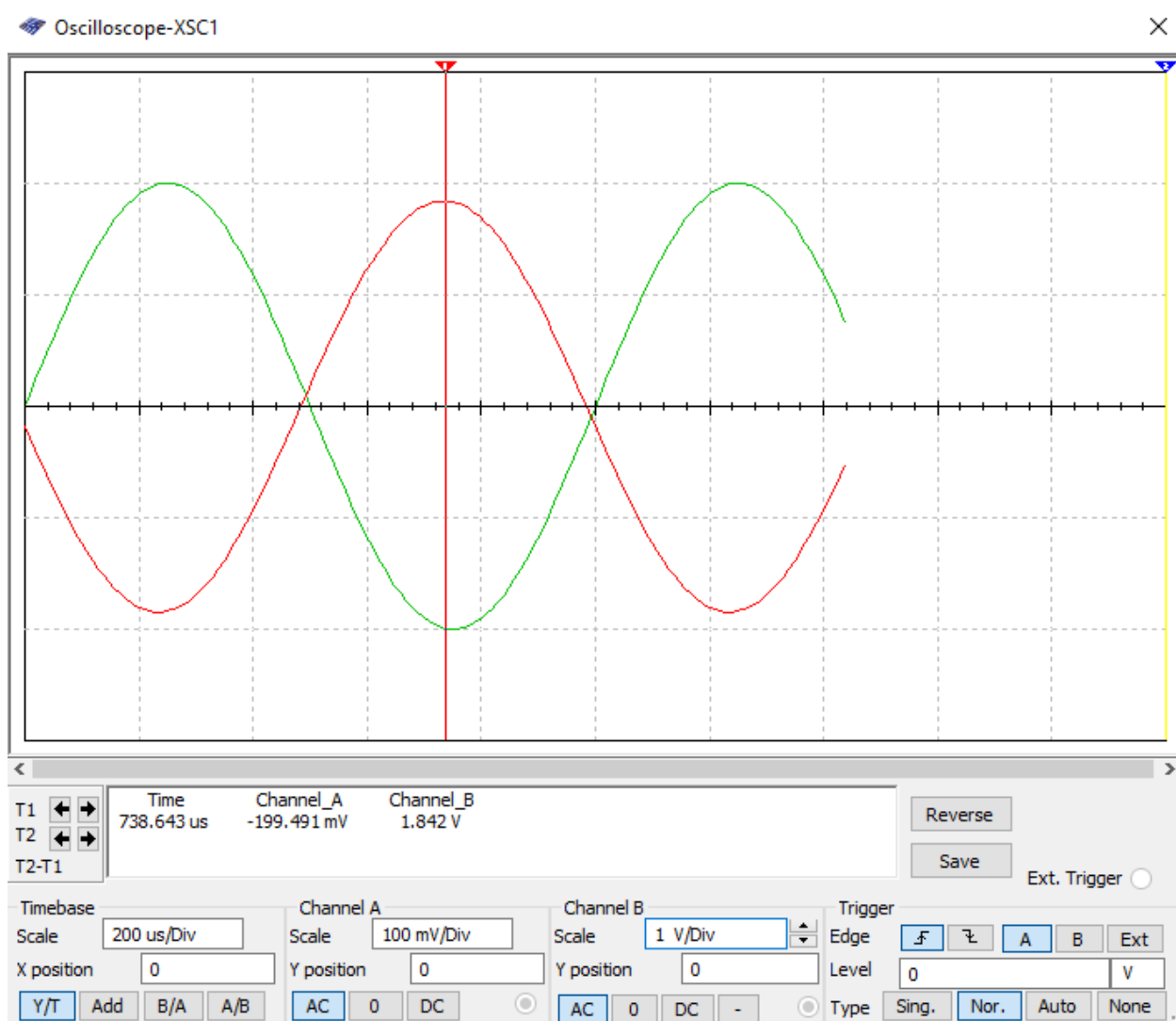


Рисунок 12. Показания осциллографа XSC1 № 2 при U_{BX} , мВ = 200 мВ

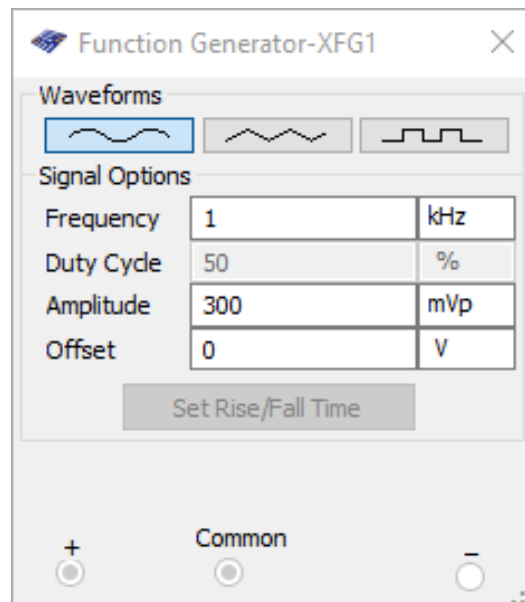


Рисунок 13. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 300 мВ

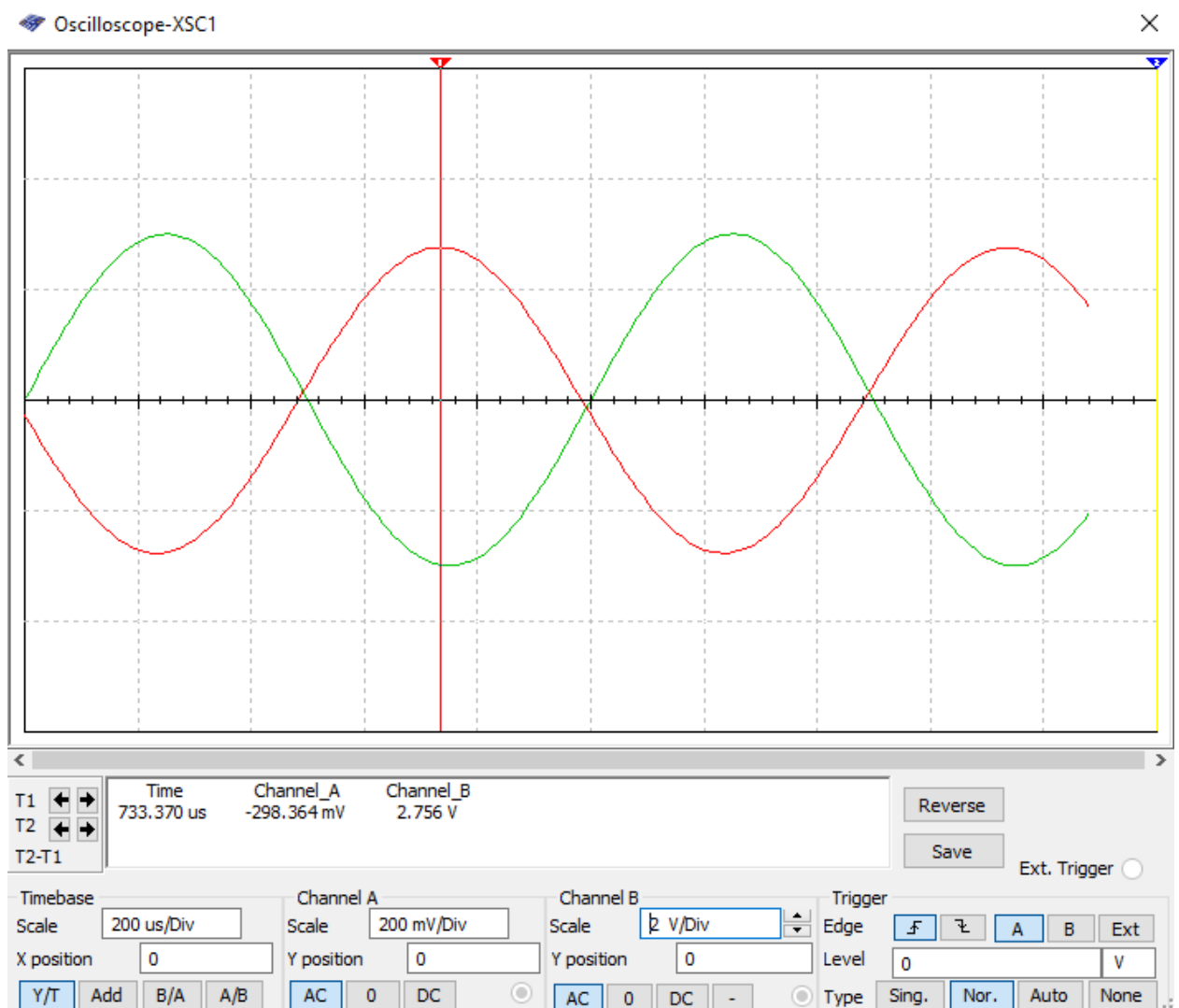


Рисунок 14. Показания осциллографа XSC1 № 3 при U_{BX} , мВ = 300 мВ

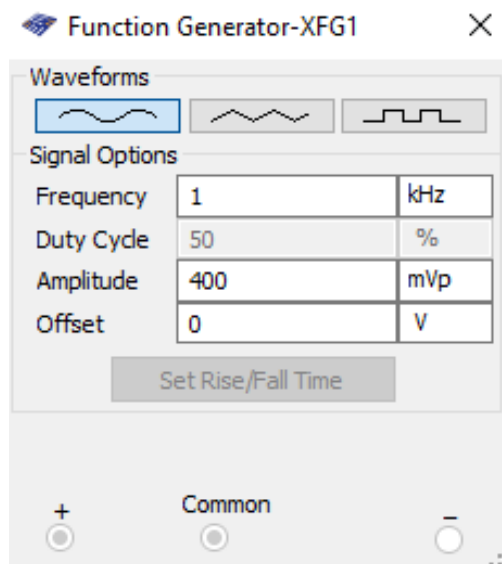


Рисунок 15. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 400 мВ

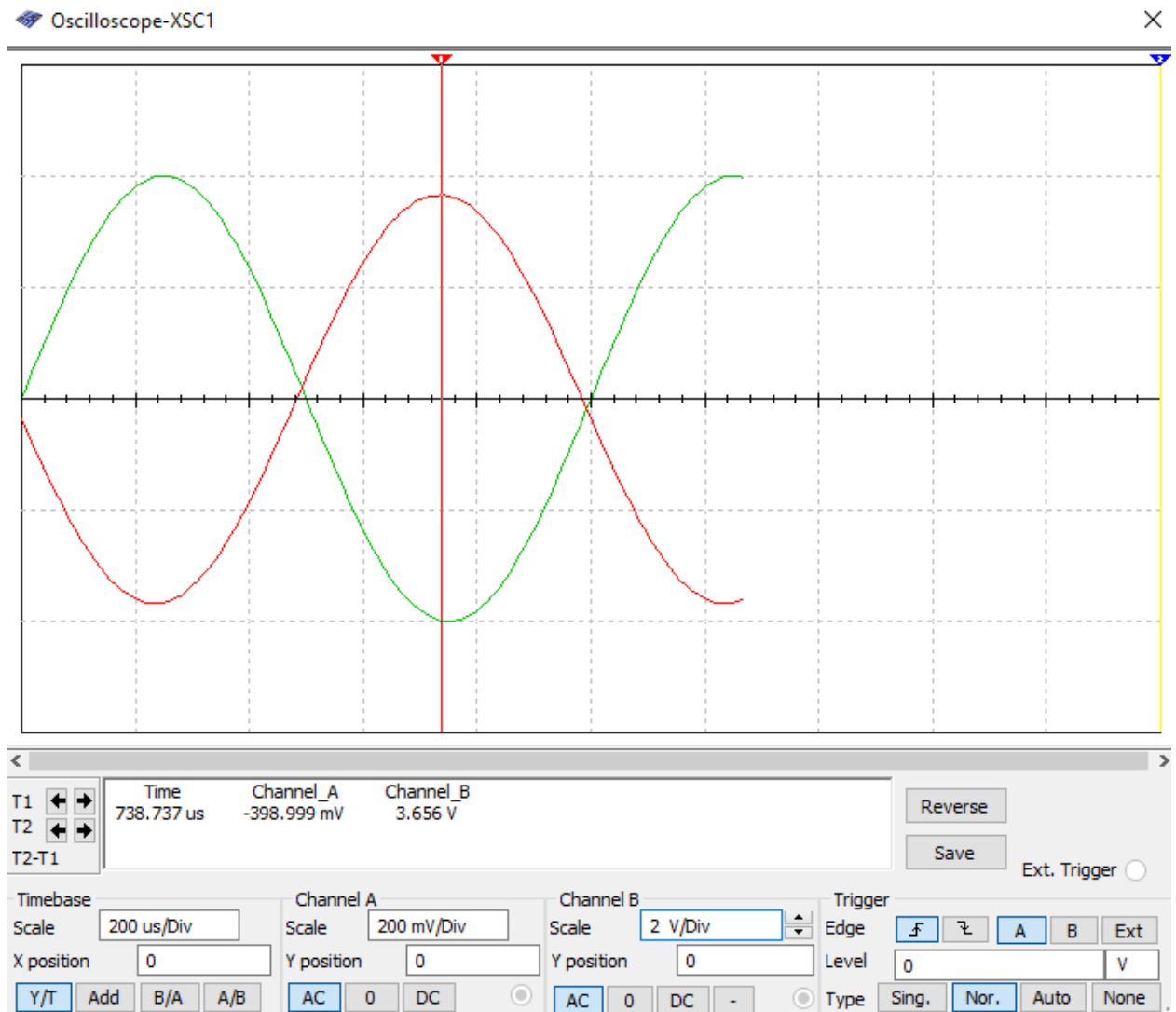


Рисунок 16. Показания осциллографа XSC1 № 4 при U_{BX} , мВ = 400 мВ
(наблюдаются очень маленькие искажения)

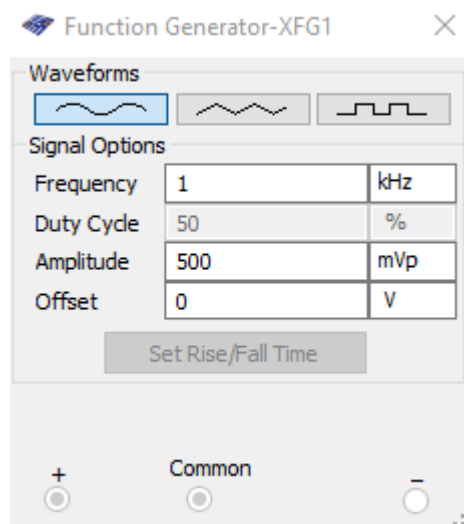


Рисунок 17. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 500 мВ

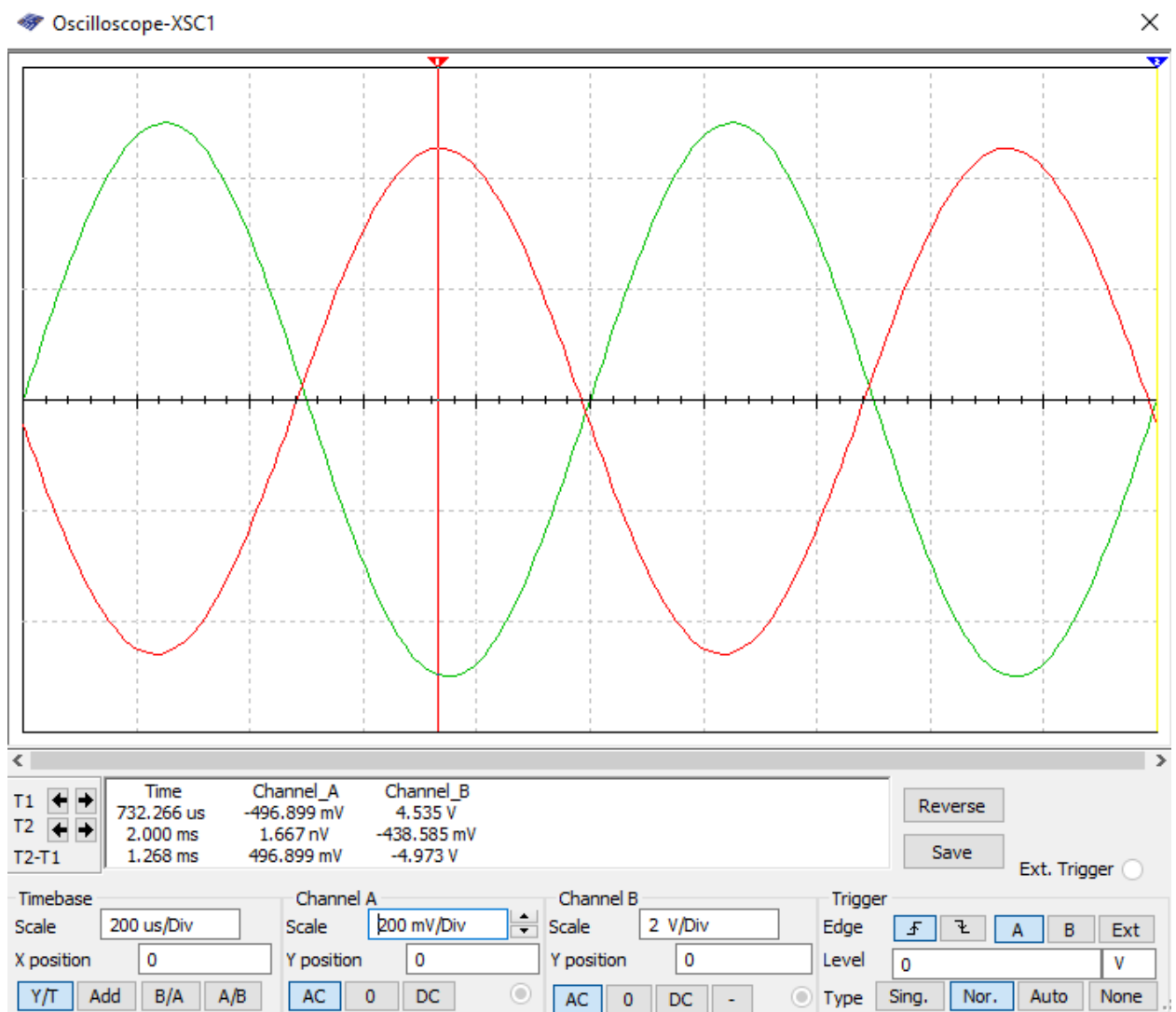


Рисунок 18. Показания осциллографа XSC1 № 5 при U_{BX} , мВ = 500 мВ

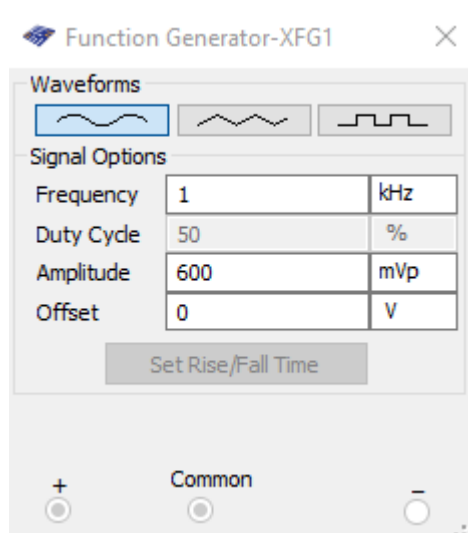


Рисунок 19. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 600 мВ

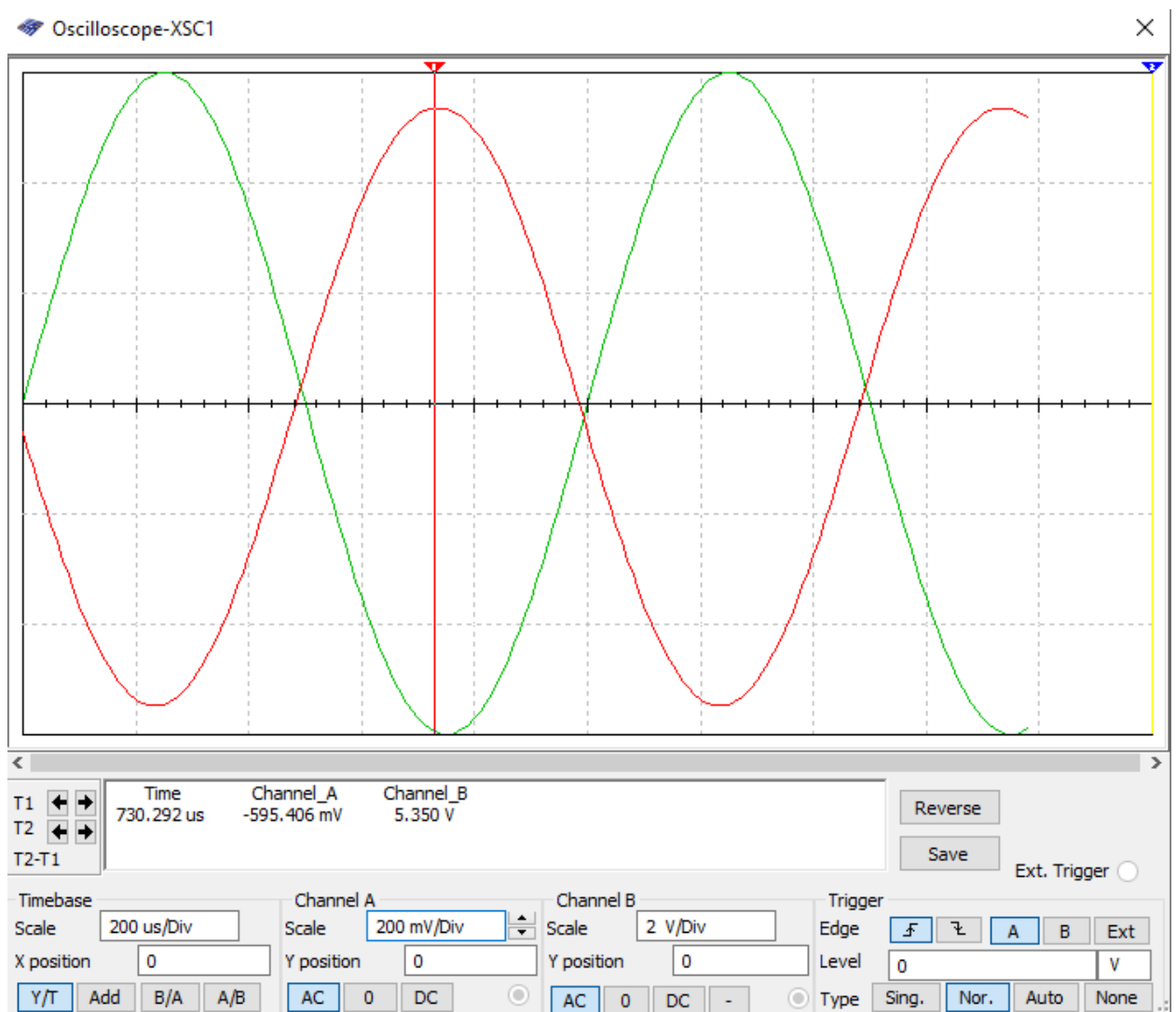


Рисунок 20. Показания осциллографа XSC1 № 6 при U_{BX} , мВ = 600 мВ

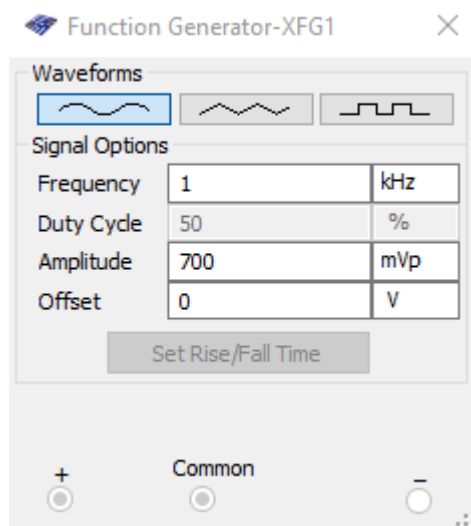


Рисунок 21. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 700 мВ

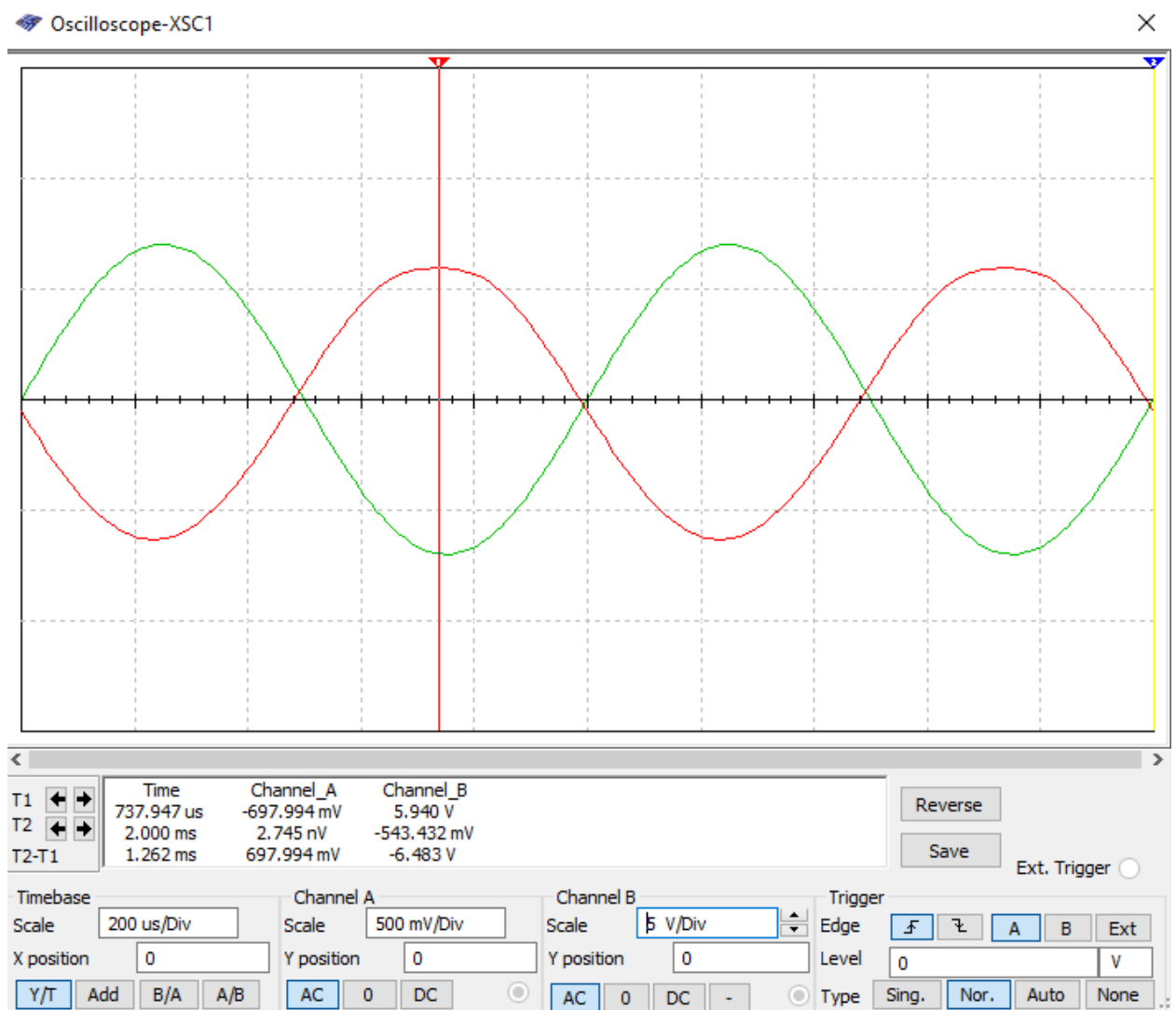


Рисунок 22. Показания осциллографа XSC1 № 7 при U_{BX} , мВ = 700 мВ

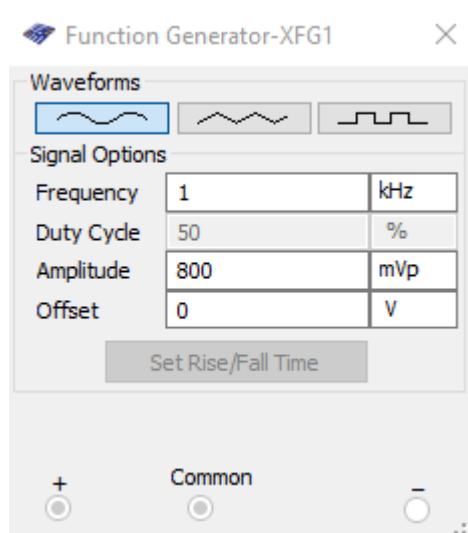


Рисунок 23. Настройки генератора входного сигнала U_{BX} , мВ = 800 мВ

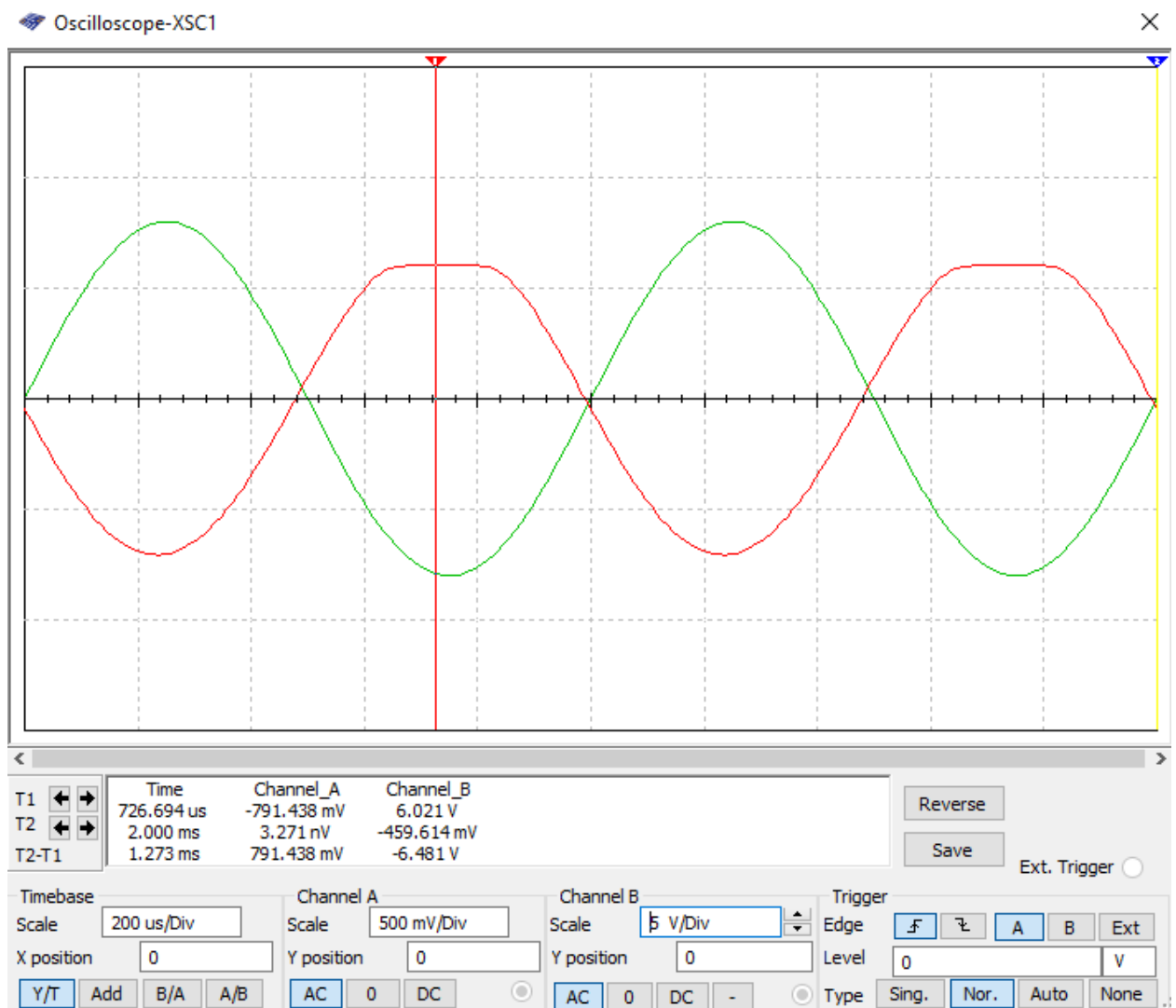


Рисунок 24. Показания осциллографа XSC1 № 8 при U_{BX} , мВ = 800 мВ

(наблюдается явные искажения)

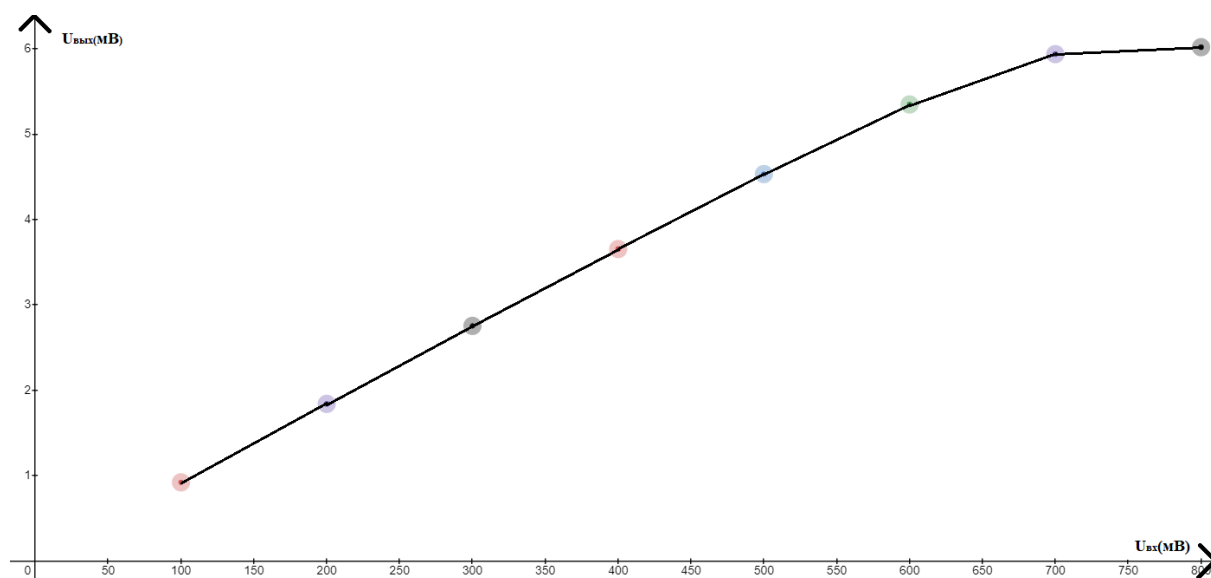


Рисунок 25. Амплитудная характеристика усилительного каскада

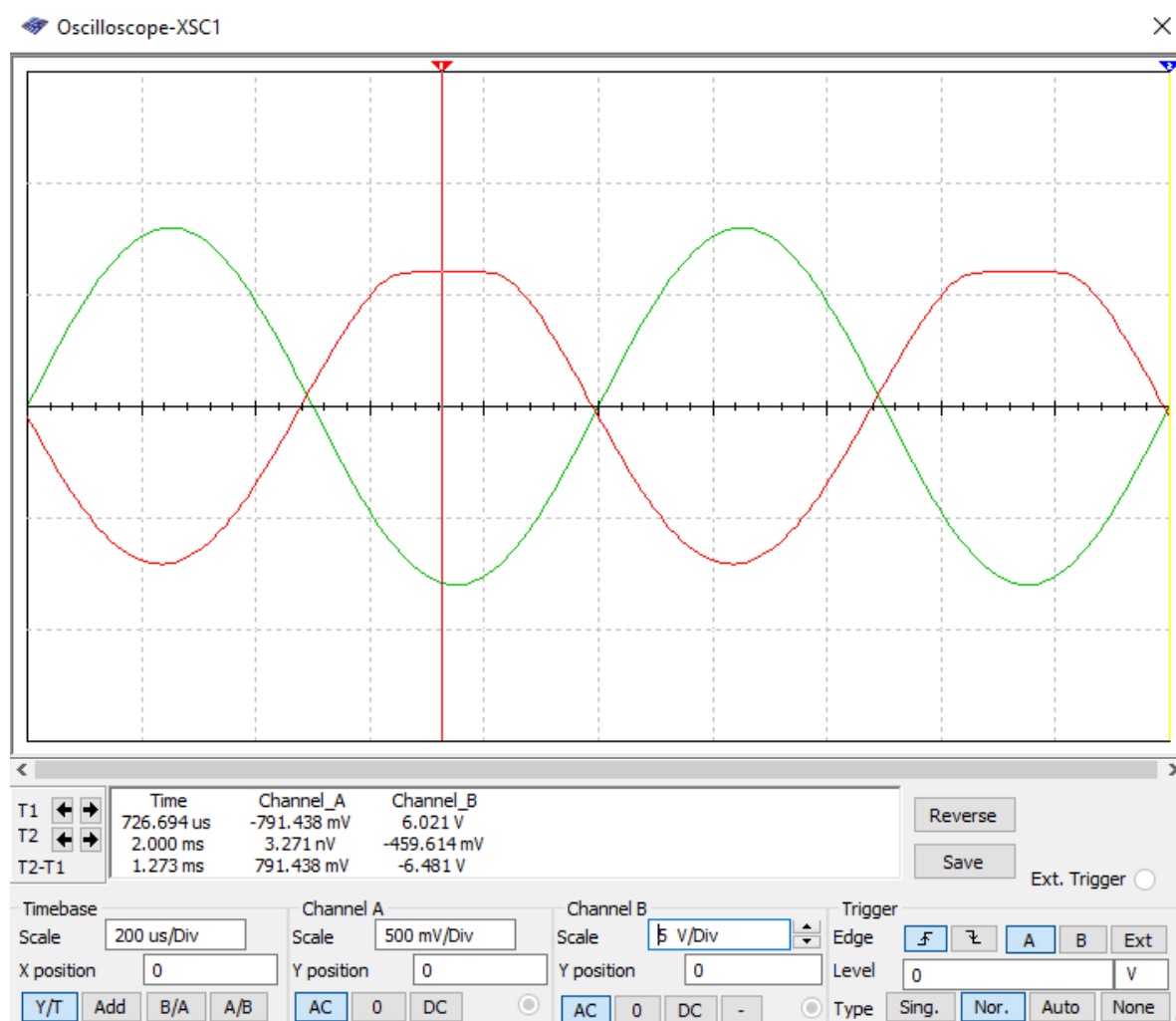


Рисунок 26. Осциллограмма с искажениями формы выходного сигнала $U_{ВХ} = 800 мВ$

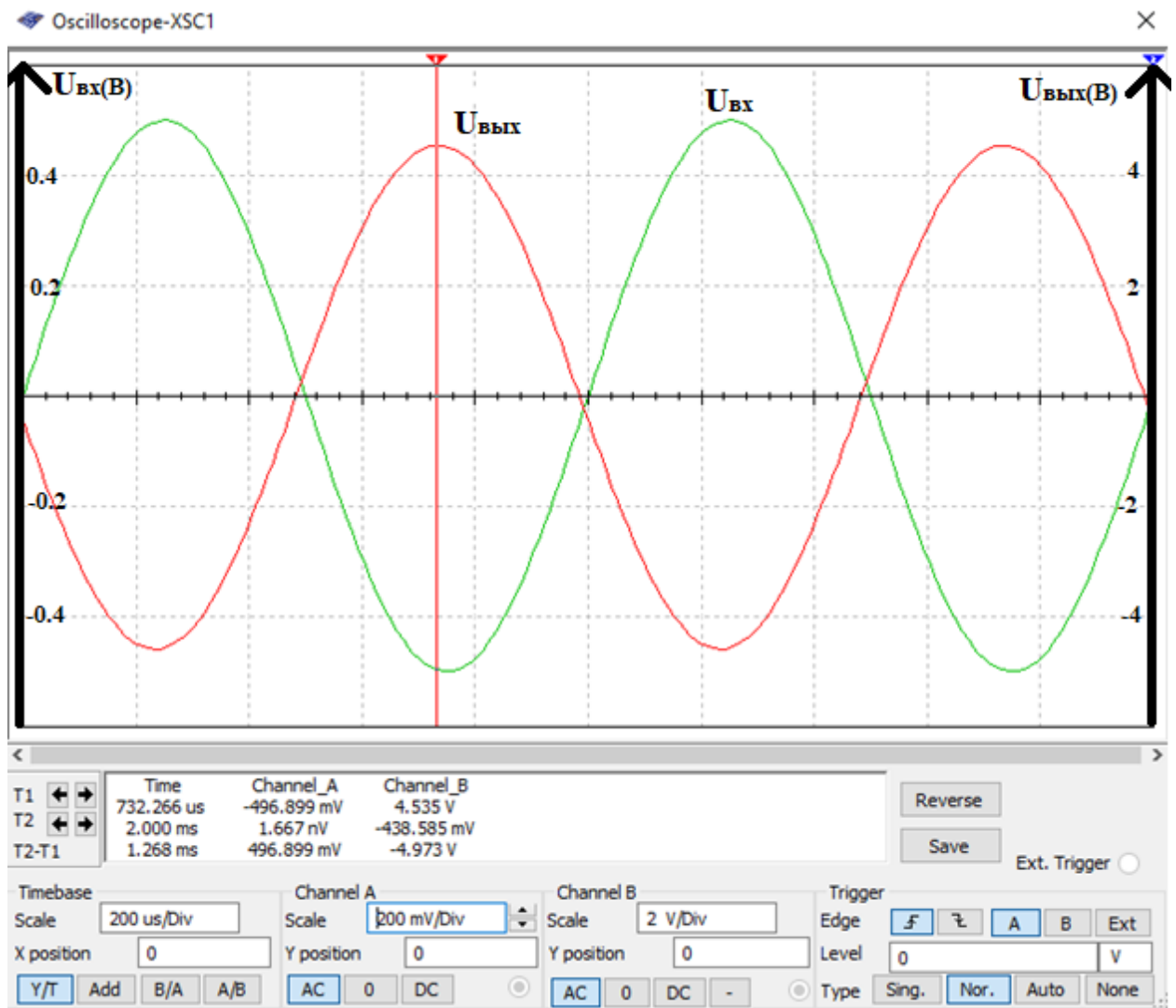


Рисунок 27. Осциллограмма при $U_{BX} = 500$ мВ (анализируя амплитудная характеристика усилительного каскада и показания осциллографа XSC1)

Максимально возможная амплитуда неискаженного выходного сигнала:

$$U_{BX.MAX} = 500 \text{ мВ.}$$

Построение логарифмической амплитудно-частотной характеристики (ЛАЧХ) $L[\text{дБ}] = F(f)$.

Построим логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) $L[\text{дБ}] = F(f)$. Установим на генераторе XFG1 амплитуду входного сигнала $U_{вхm} = 100\text{ мВ}$. Включим схему моделирования и при помощи Bode Plotter XBP1 получим ЛАЧХ усилительного каскада.

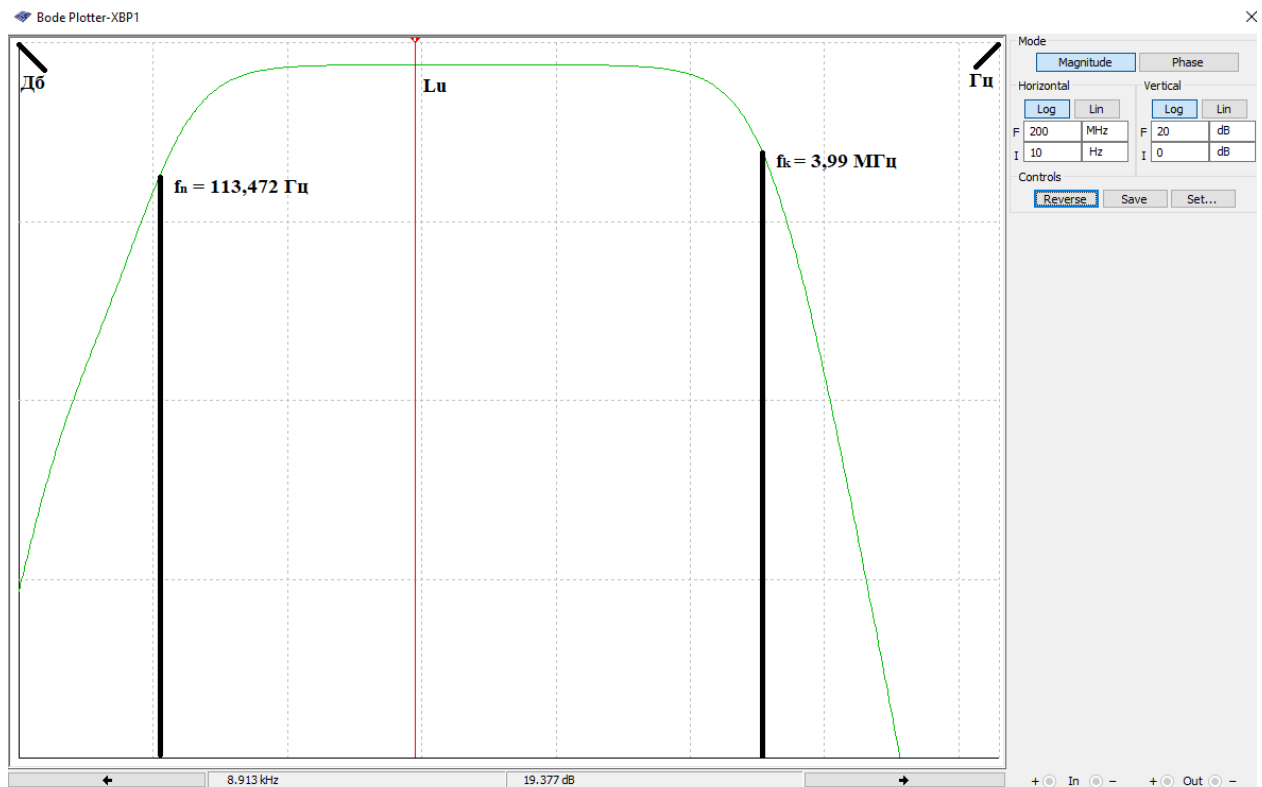


Рисунок 28. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

По ЛАЧХ мы определяем граничные частоты f_n и f_k , которыми ограничен диапазон частот для усиливаемых сигналов:

$$L_U = 19,337 \text{ dB}$$

$$L_U [\text{дБ}] = L_{UMAX} [\text{дБ}] - 3 \text{ дБ} = 19,377 - 3 = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_n = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_k = 3,99 \text{ МГц}$$

Как правило, хорошее усиление обеспечивается в пределах от 64 Гц до 12 МГц.

Включим схему моделирования при амплитуде входного сигнала $U_{вхм} = 100 \text{ мВ}$ и разомкнутом ключе J1. Рассчитаем коэффициент усиления каскада по напряжению и сравним с коэффициентом, полученным ранее.

Показания мультиметров ХММ1 и ХММ2:

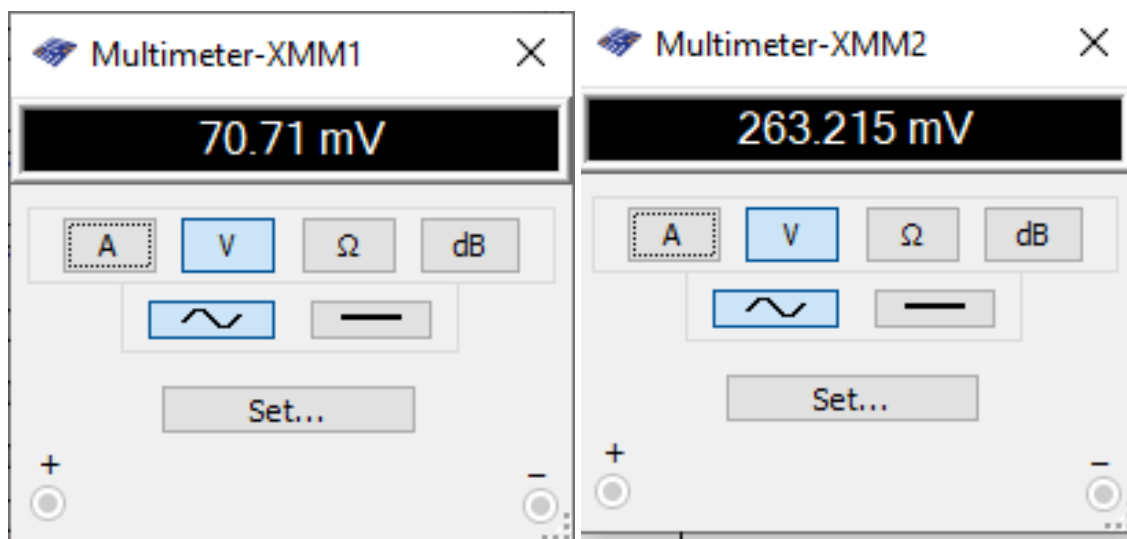


Рисунок 29. Показания мультиметров ХММ1 и ХММ2:

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = 263,215 / 70,71 = 3,723$$

Коэффициент усиления каскада меньше в разы коэффициентом рассчитанного ранее.

Построим логарифмическую амплитудно-частотную характеристику (ЛАЧХ) $L[\text{дБ}] = F(f)$. При помощи Bode Plotter ХВР1 получим ЛАЧХ усилительного каскада, определим полосу пропускания.

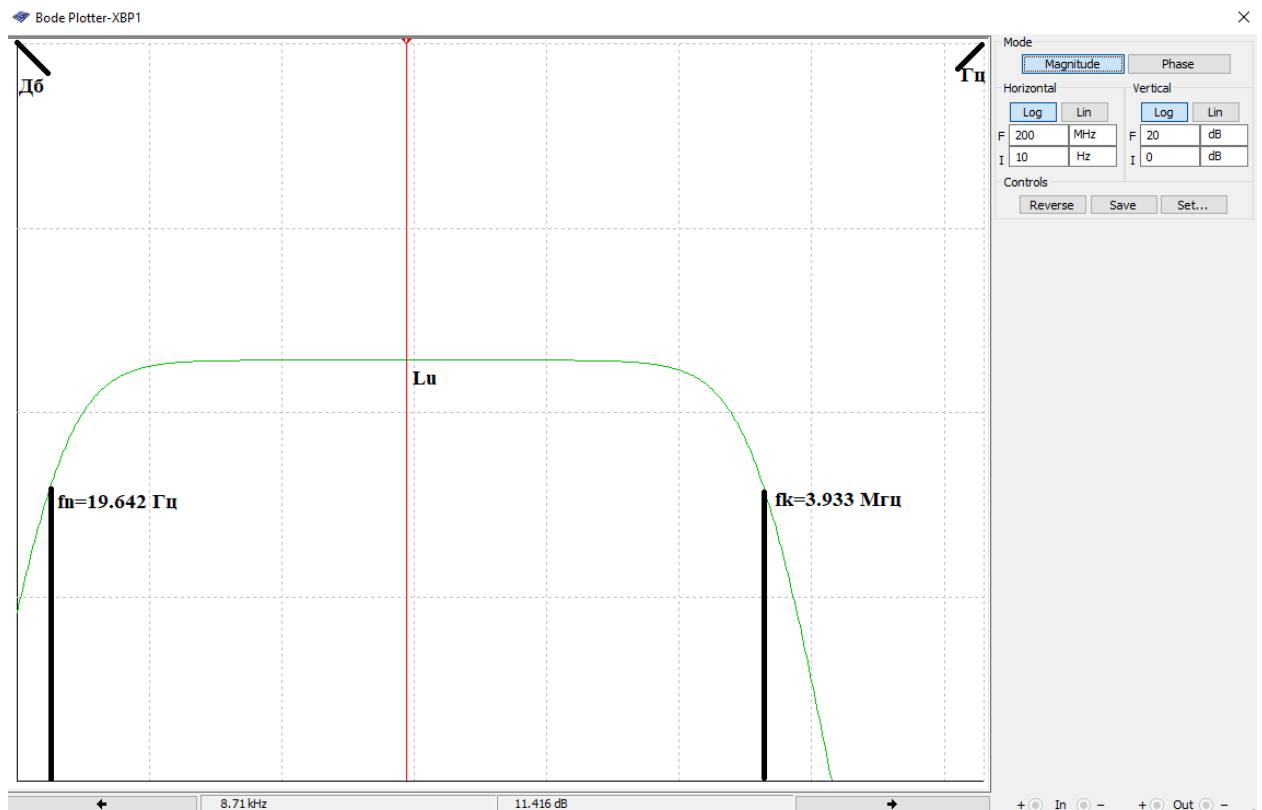


Рисунок 30. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика

$$\begin{aligned}
 L_U &= 11,416 \\
 L_U [\text{дБ}] &= L_{U.\text{MAX}} [\text{дБ}] - 3 \text{ дБ} = 11,416 - 3 = 8,416 \text{ дБ} \\
 f_n &= 19.642 \text{ Гц} \\
 f_k &= 3.933 \text{ МГц}
 \end{aligned}$$

Вывод: транзистор усиливает сигналы в определенном диапазоне частот f_n и f_k , который характеризуется коэффициентом усиления каскада K_U .

Корректировка режима покоя

Произведем корректировку режима покоя, изменяя номинальное напряжение значение резистора R1. Корректировка будет осуществляться при значении входного сигнала $U_{\text{ВХ}}, \text{ мВ} = 800 \text{ мВ}$

Подключим к нашей цепи Distortion Analyzer – XDA1.

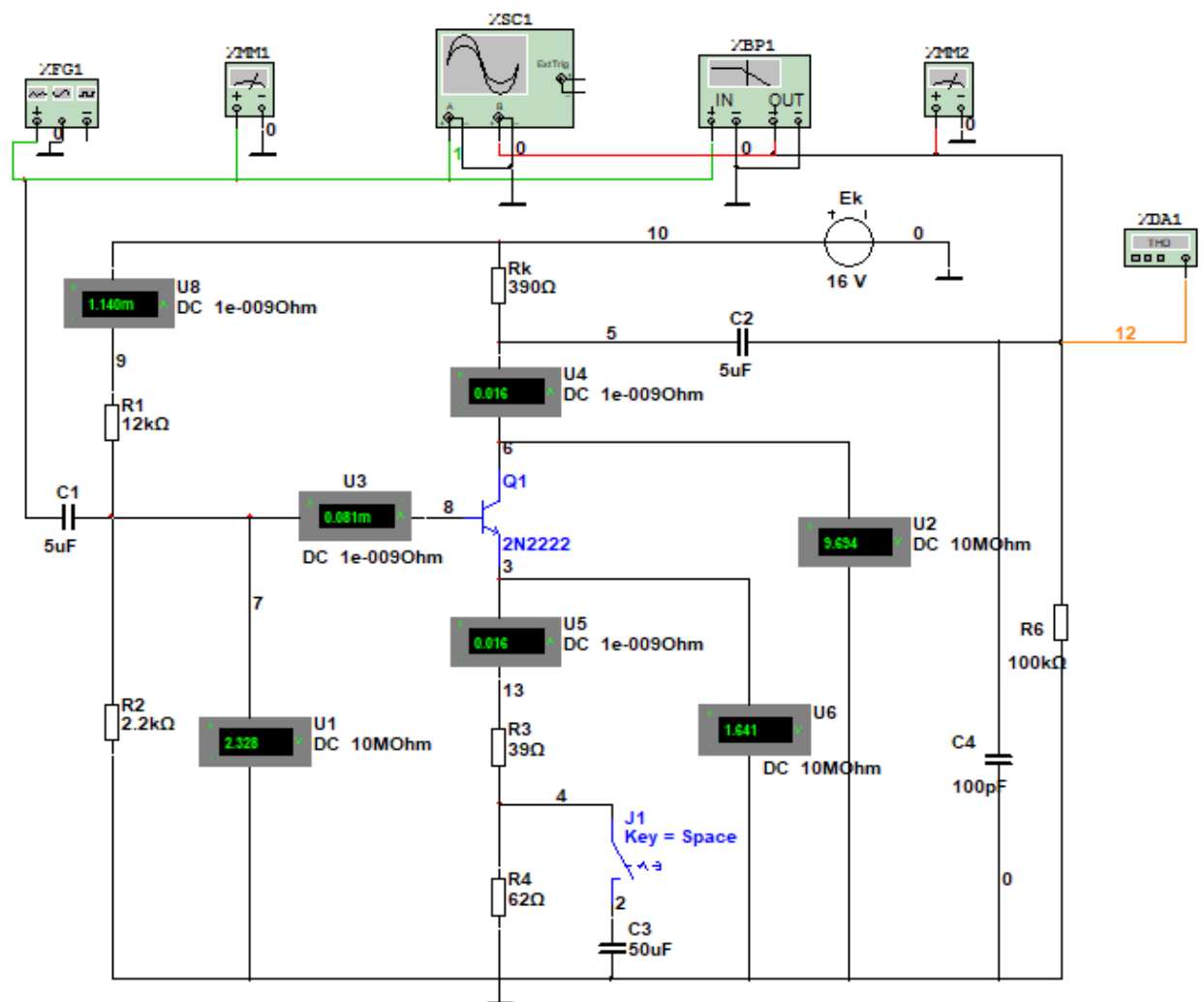


Рисунок 31. Схема с подключенным Distortion Analyzer – XDA1

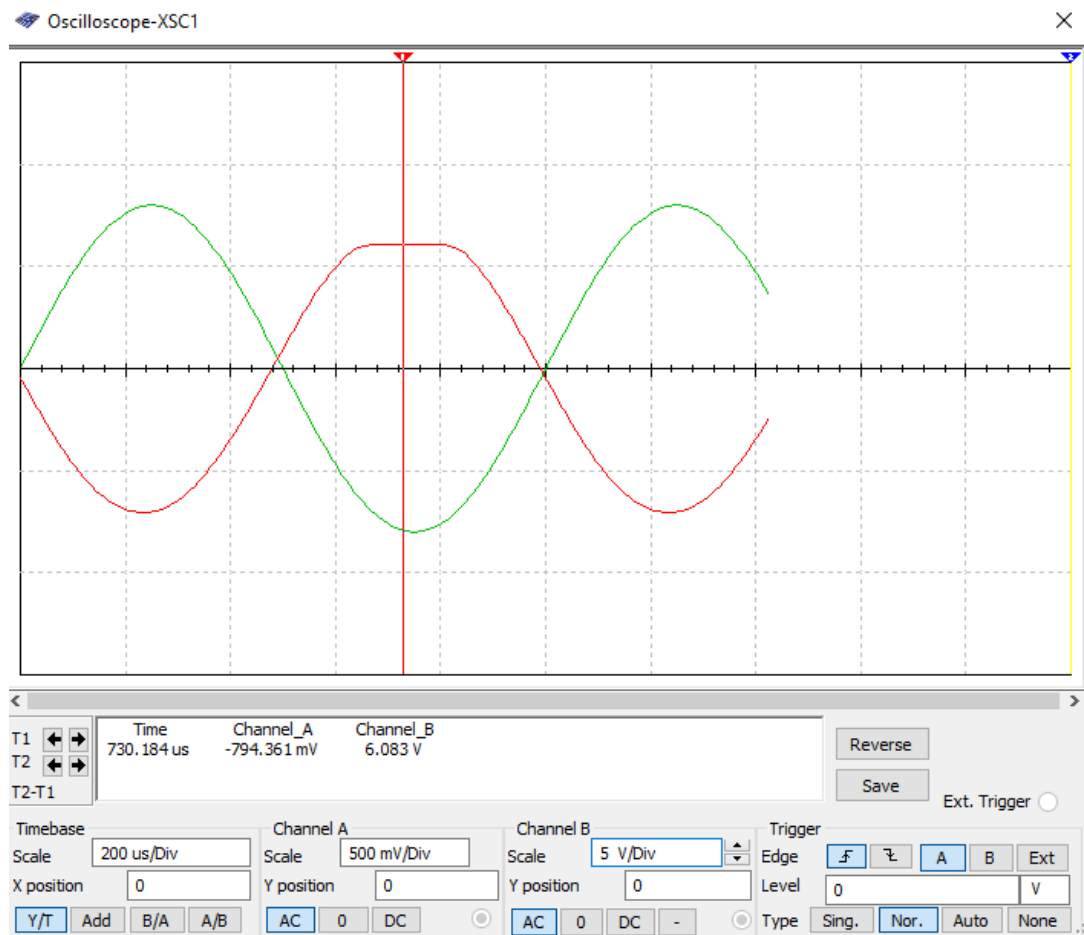


Рисунок 32. Осциллограмма при $U_{BX} = 800$ мВ (исходная)

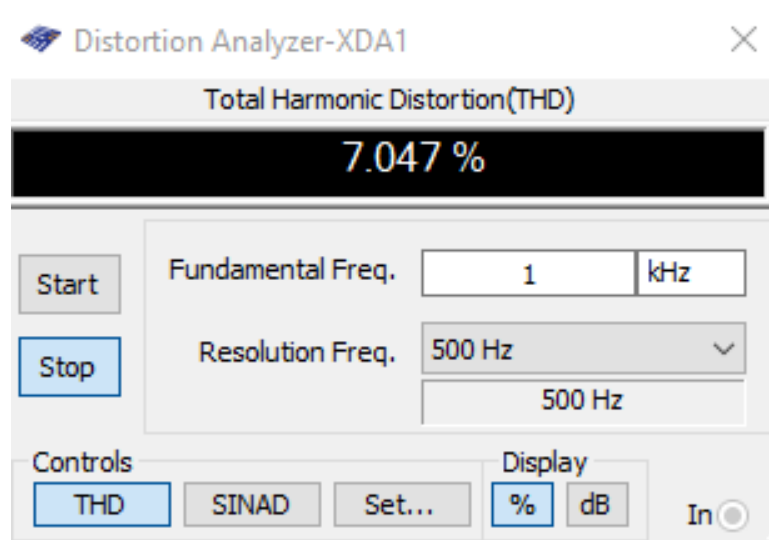


Рисунок 33. Анализатор искажений при $R1 = 12$ кОм

При $R1 = 12$ кОм, Total Harmonic Distortion (THD) = 7,047 %.

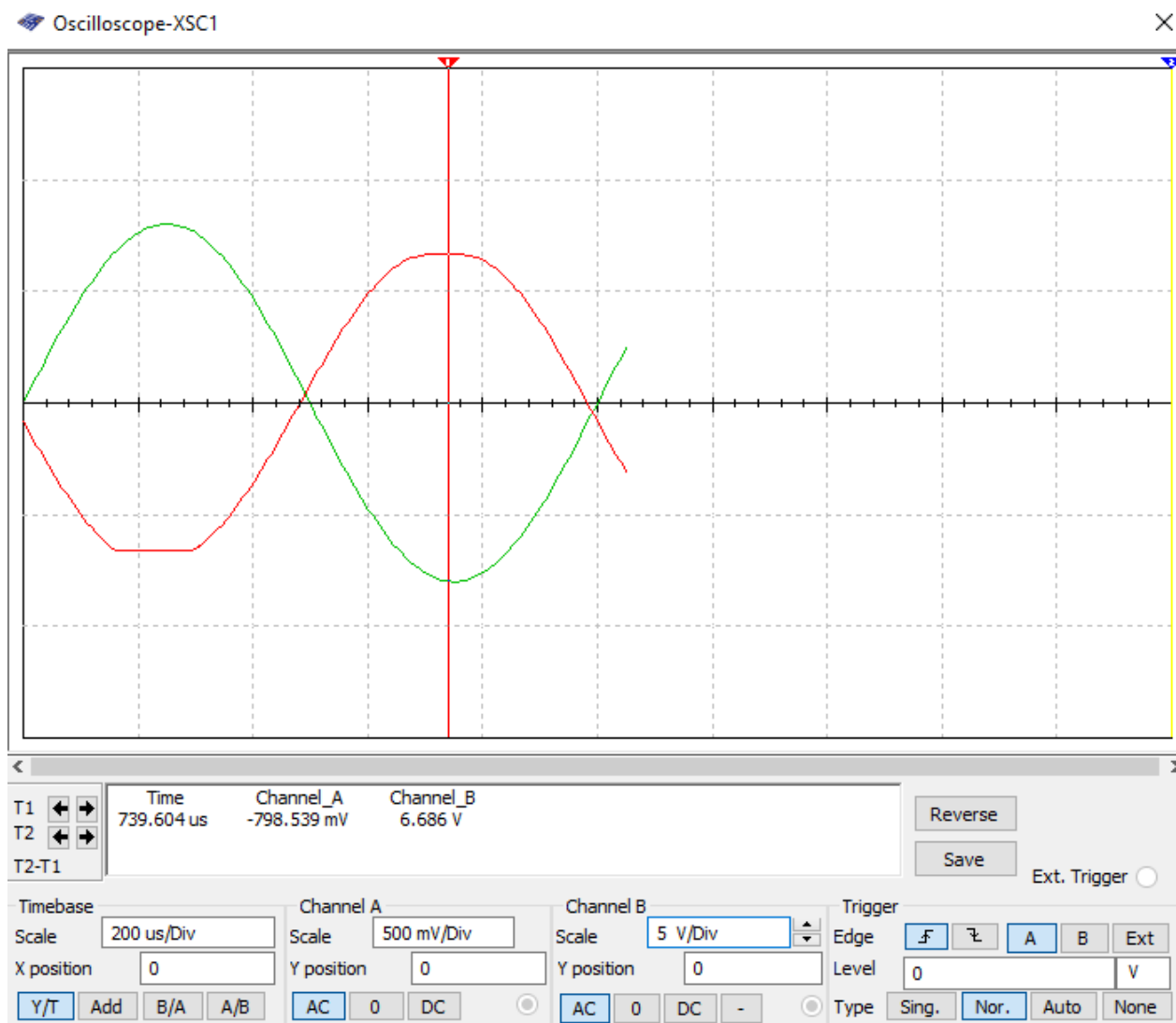


Рисунок 34. Осциллограмма при $U_{BX} = 800$ мВ (оптимальная)

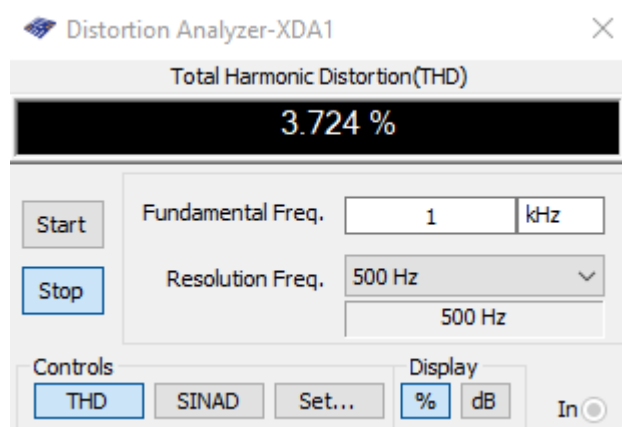


Рисунок 35. Анализатор искажений при $R1 = 9,5$ кОм

При $R1 = 9,5$ кОм, Total Harmonic Distortion (THD) = 3,724 %.

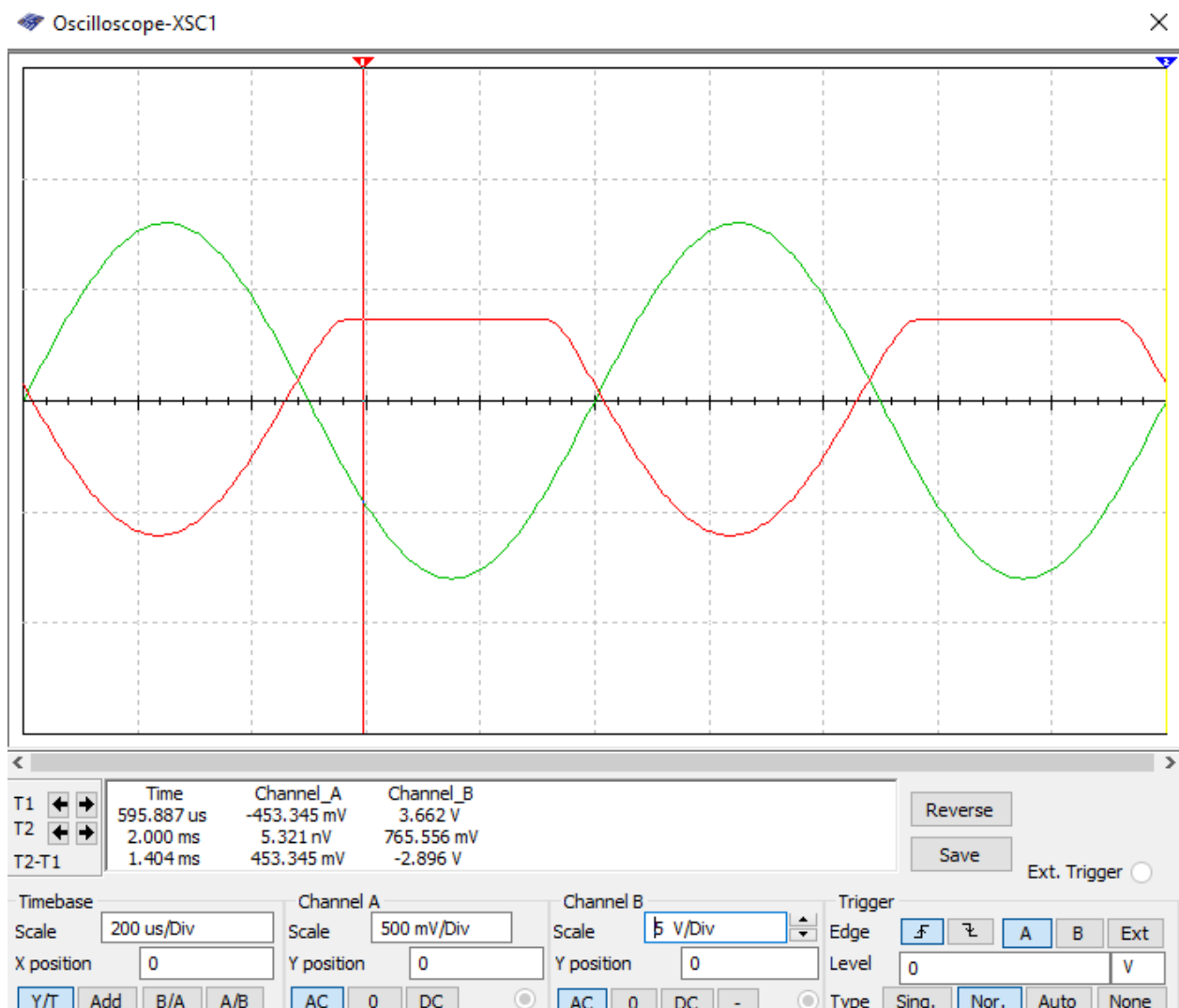


Рисунок 36. Осциллограмма при $U_{BX} = 800$ мВ (отклонённая в другую сторону)

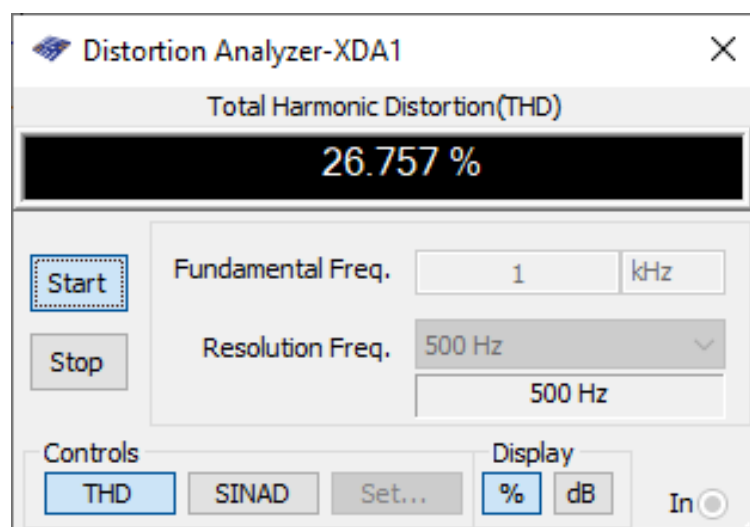


Рисунок 37. Анализатор искажений при $R1 = 20$ кОм

При $R1 = 20$ кОм, Total Harmonic Distortion (THD) = 26,757 %.

Вывод: При уменьшении R_1 гармоническое искажение снижается, в результате чего работа каскадного усилителя нормализуется, проведённые исследования подтвердили теоретические данные.

Анализ влияния параметров элементов R_6 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 на частотные свойства усилителя

Проведем для своего варианта анализ влияния параметров элементов R_6 , C_1 , C_2 , C_3 , C_4 на частотные свойства усилителя.

Начнём с R_6 :

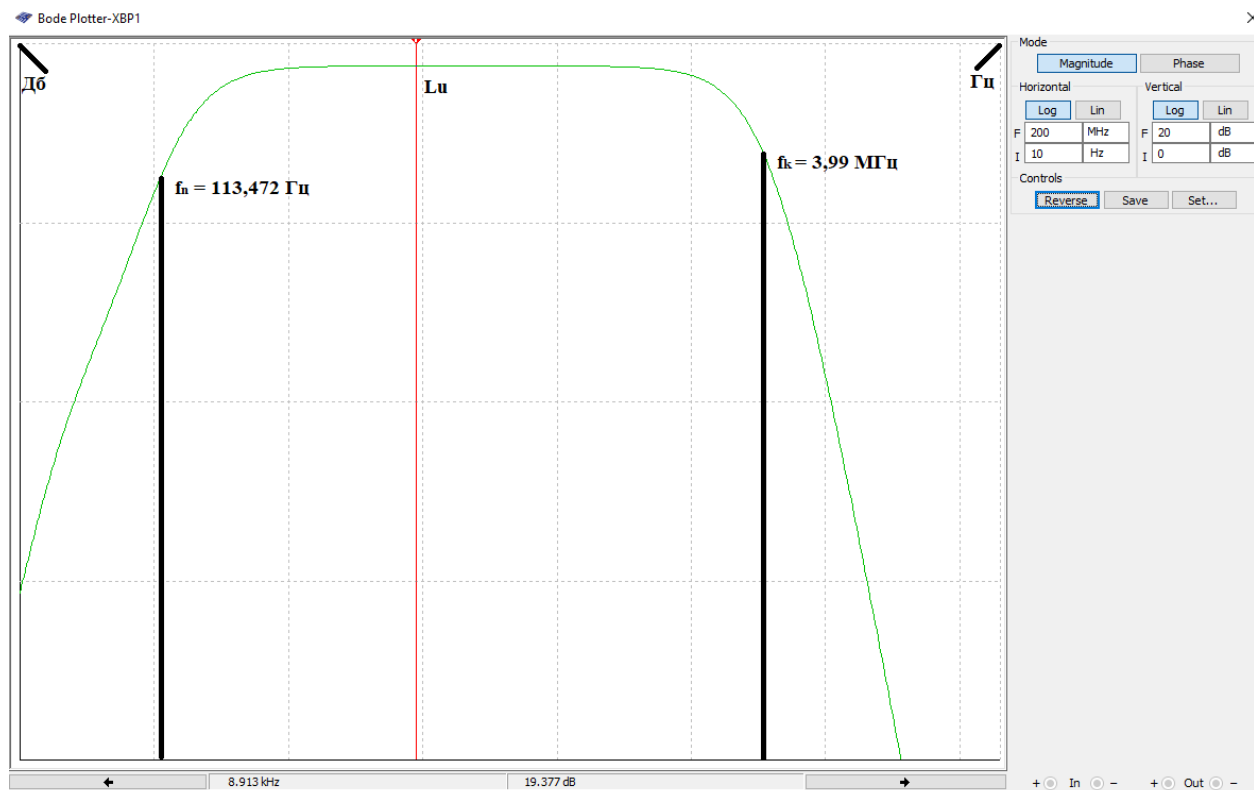


Рисунок 38. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $R_6 = 100 \Omega$ (номинальное)

$$K_U = 653,301 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_n = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_k = 3,99 \text{ МГц}$$

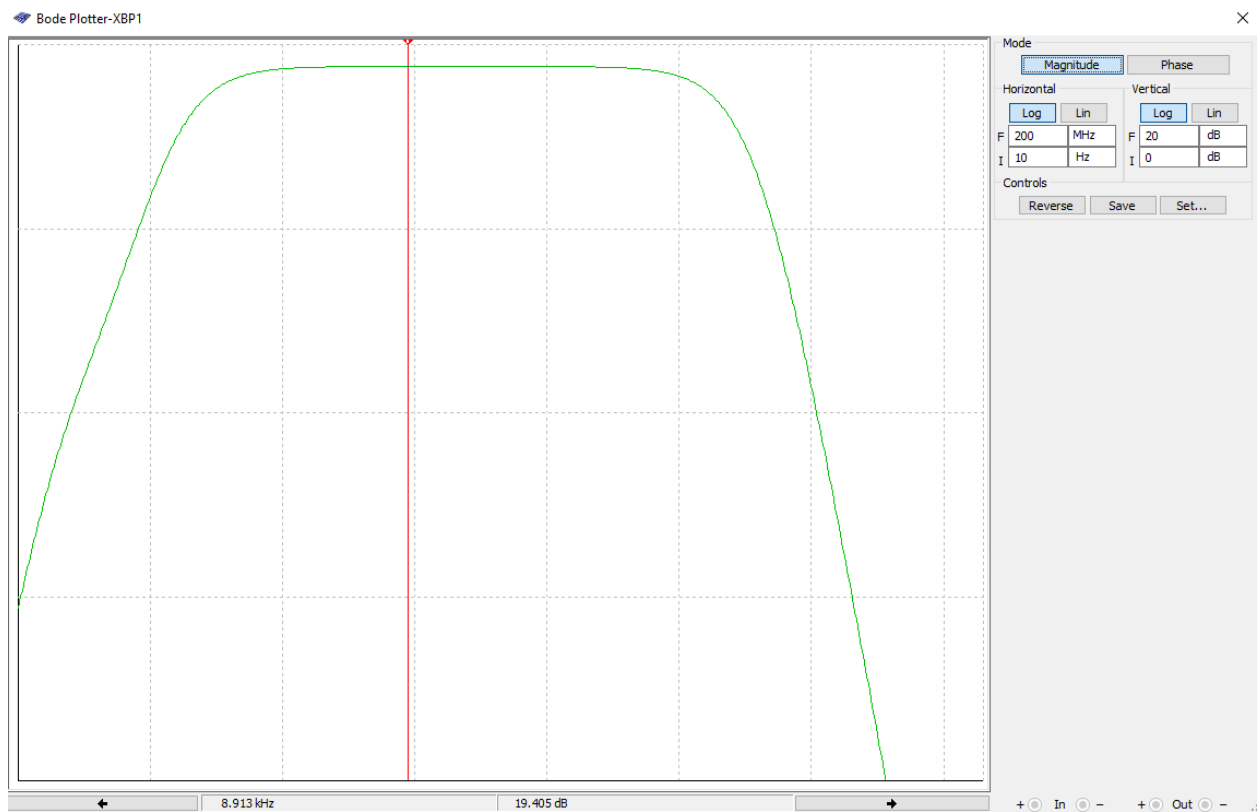


Рисунок 39. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $R_6=500\Omega$ (увеличенный от номинального)

$$K_U = 655,380 / 70,711 = 9,268$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,405 \text{ dB}$$

$$f_H = 114,686 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,940 \text{ МГц}$$

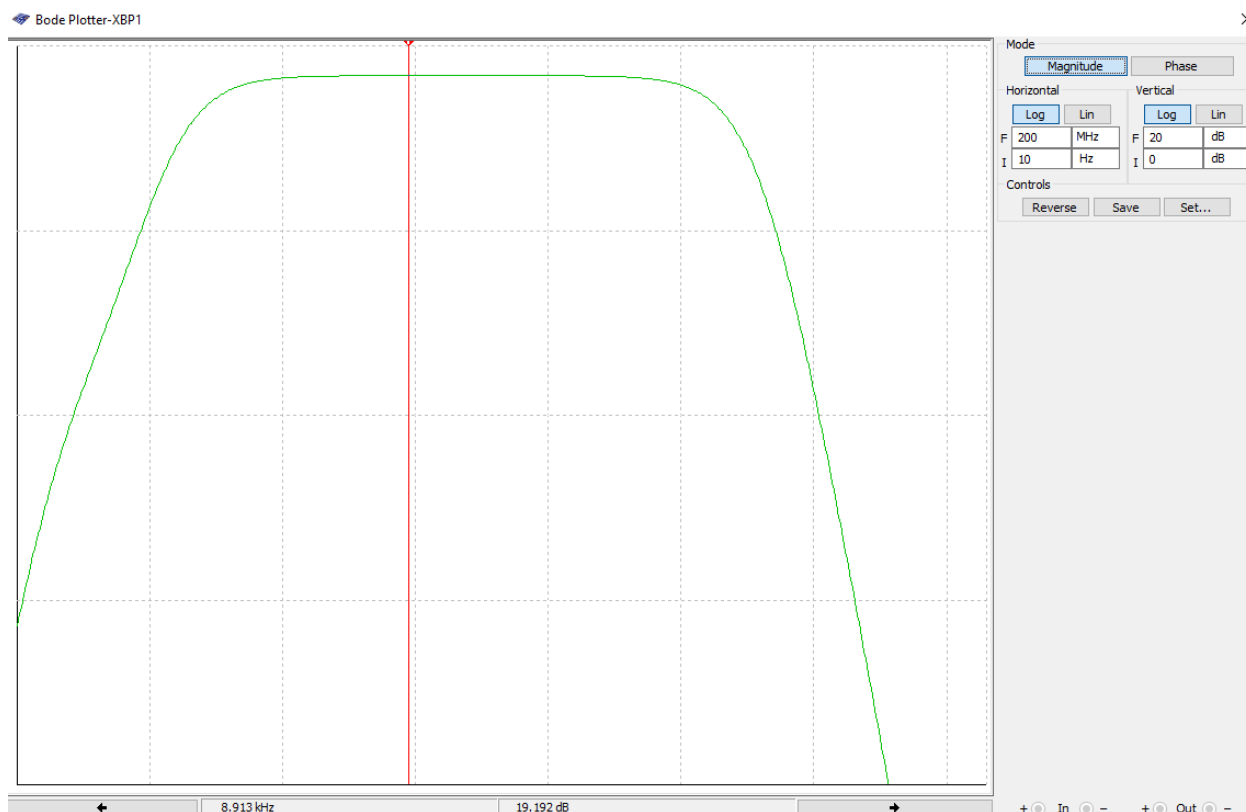


Рисунок 40. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $R_6 = 15Q$ (уменьшение от номинального)

$$K_U = 639,707 / 70,711 = 9,047$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,192 \text{ dB}$$

$$f_H = 114,731 \text{ Гц}$$

$$f_k = 4,038 \text{ МГц}$$

Вывод: изменение R_6 влияет немного на K_U (уменьшение R_6 увеличивает K_U) и L_U (уменьшение R_6 уменьшает L_U), f_k (уменьшение R_6 увеличивает f_k), судя по проведённому опыту.

Для получения нужного напряжения смещения R_6 имеет обычно большое сопротивление. Такой тип смещения называют смещением, фиксированным током базы. Основная информация бралась из источника: <https://radiostorage.net/4724-kak-rabotaet-usilitelnyj-kaskad-na-tranzistore-nachinayushchim.html>.

Работаем с C1:

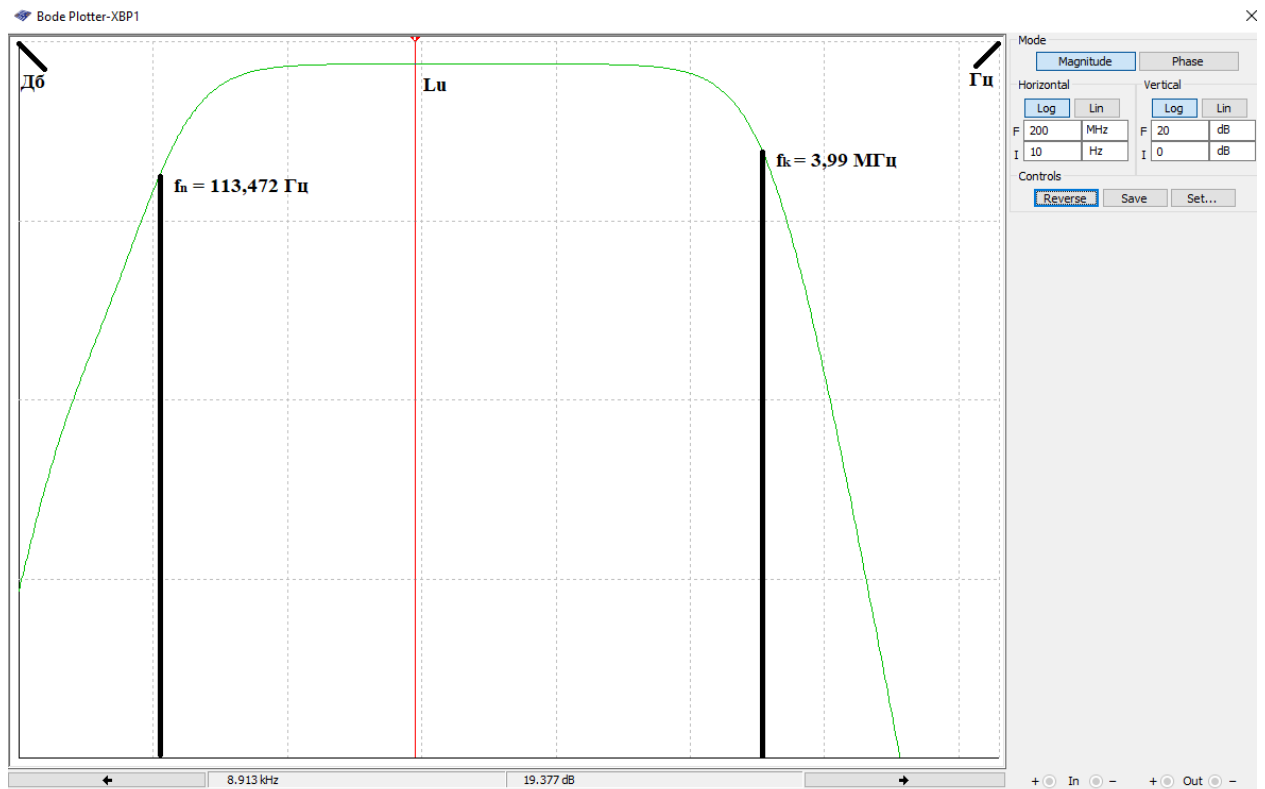


Рисунок 41. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C1=5\mu F$ (номинальное)

$$K_U = 653,301 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_n = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_k = 3,99 \text{ МГц}$$

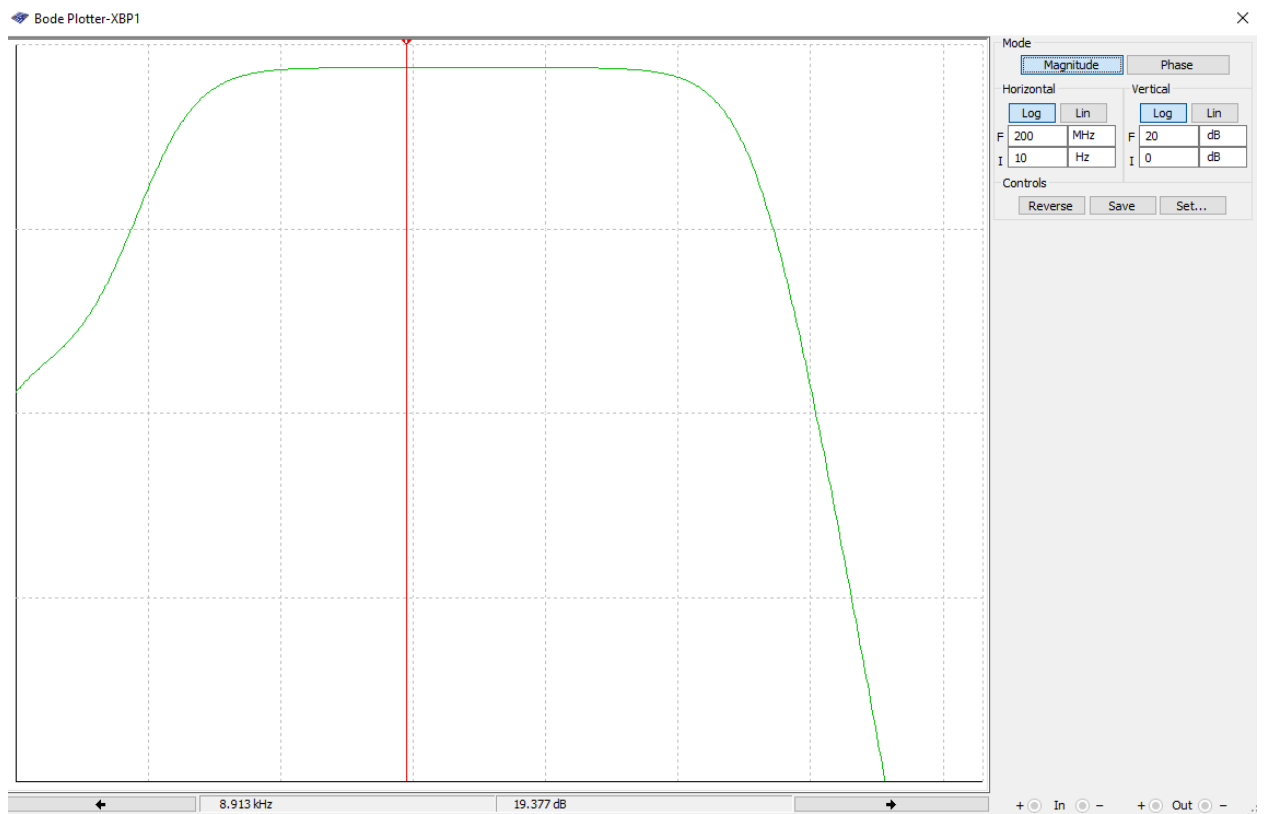


Рисунок 41. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C1=20\mu F$ (больше номинального)

$$K_U = 653,677 / 70,711 = 9,244$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 106,291 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,99 \text{ МГц}$$

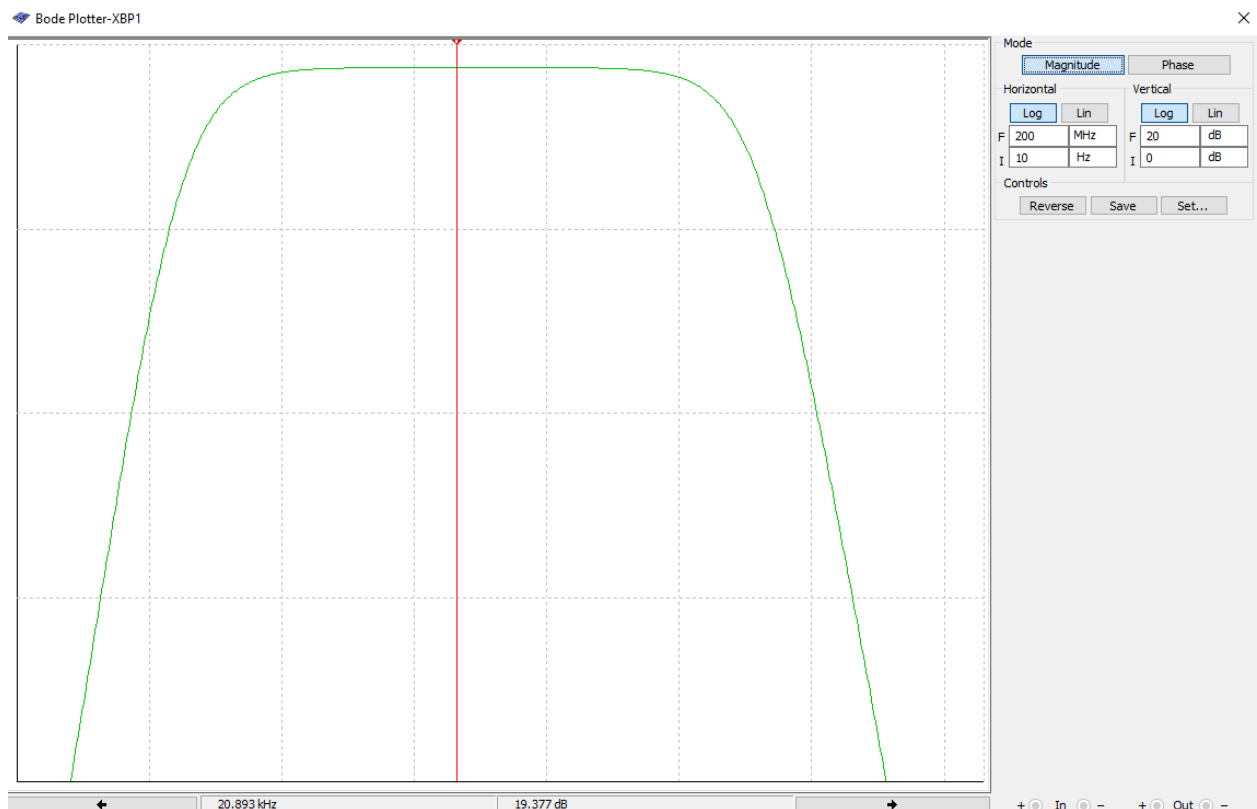


Рисунок 42. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C1=1\mu F$ (меньше номинального)

$$K_U = 648,105 / 70,711 = 9,166$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 181,677 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,989 \text{ МГц}$$

Вывод: изменение $C1$ влияет, в первую очередь, на f_H (увеличение $C1$ ведёт к увеличению f_H), как на значение так на приращение начальной частотной границы. $C1$, передающему колебания усиленного переменного напряжения на следующий каскад. Информация бралась с: <https://cyberpedia.su/13xc29f.html>

Поработаем с C2:

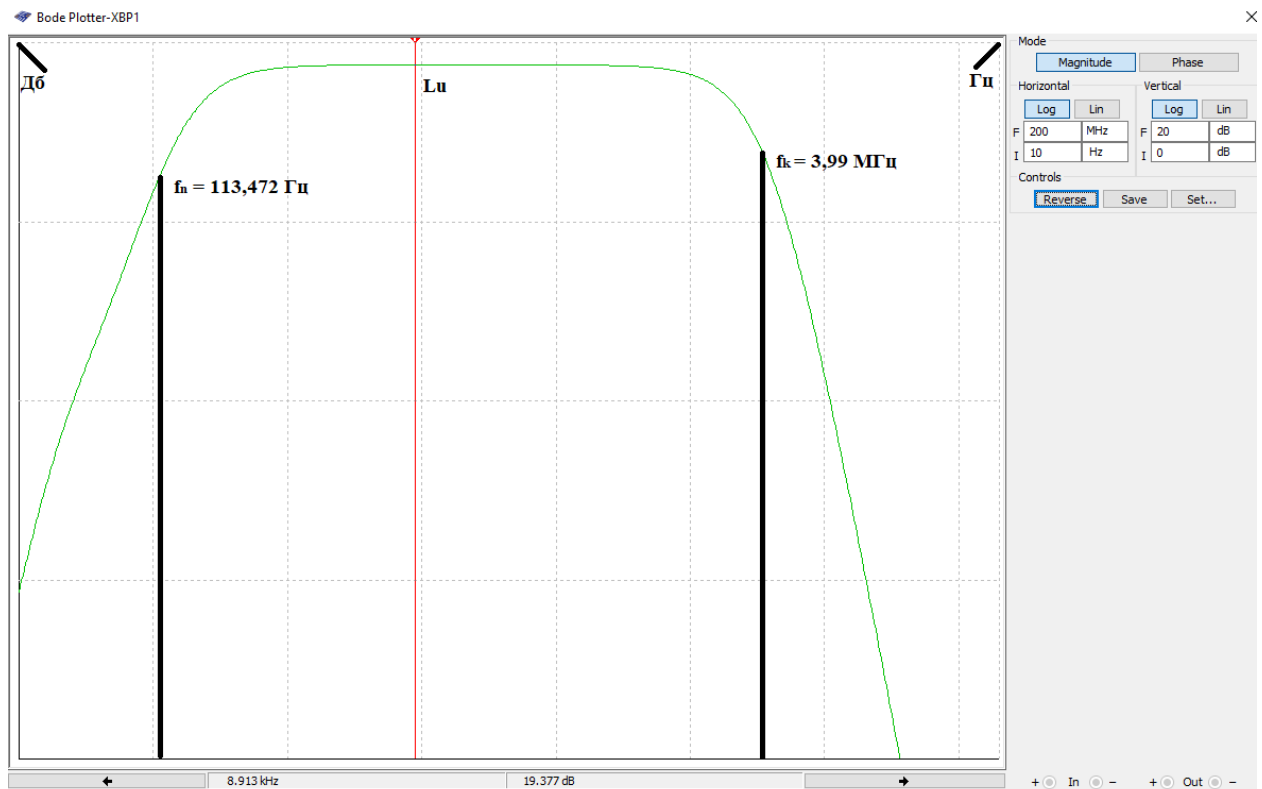


Рисунок 43. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C2=5\mu F$ (номинальное)

$$K_U = 653,301 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,99 \text{ МГц}$$

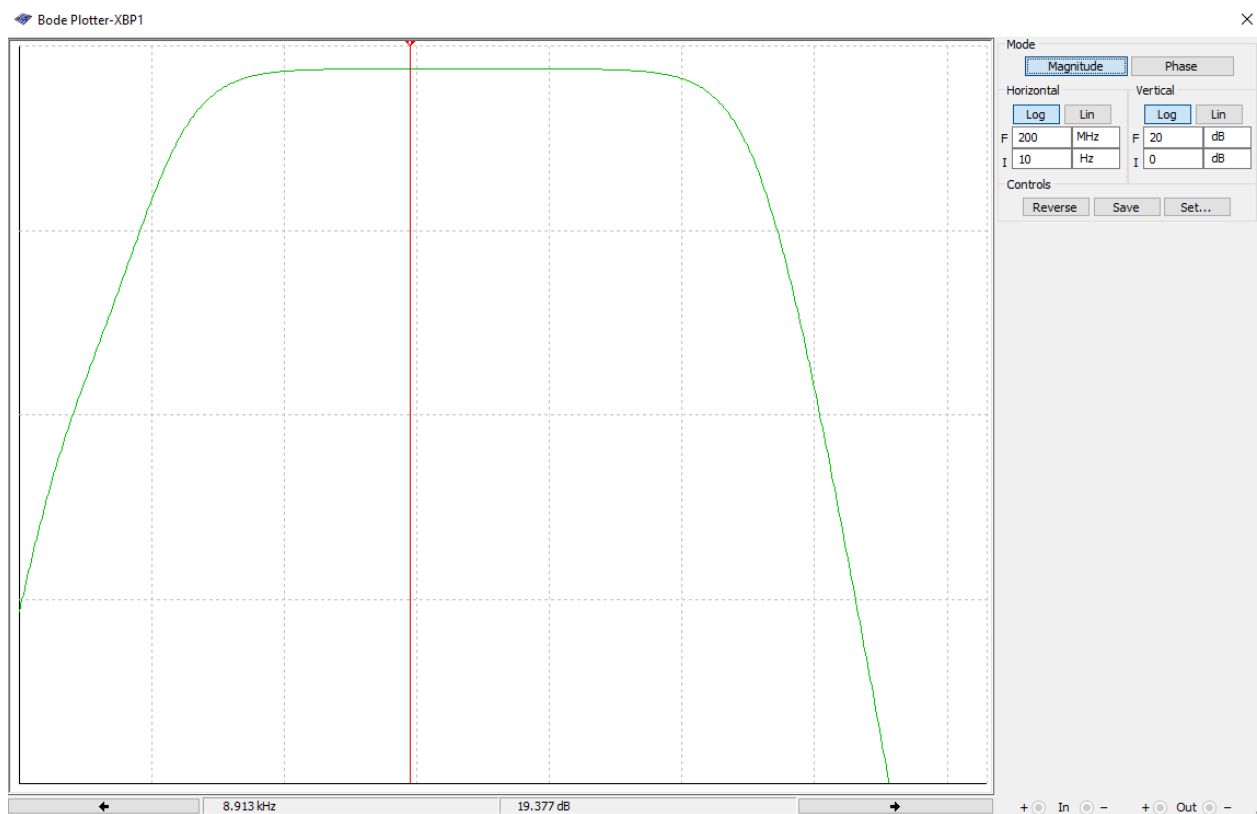


Рисунок 43. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C2=20\mu F$ (больше номинальное)

$$K_U = 653,306 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 113,467 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,960 \text{ МГц}$$

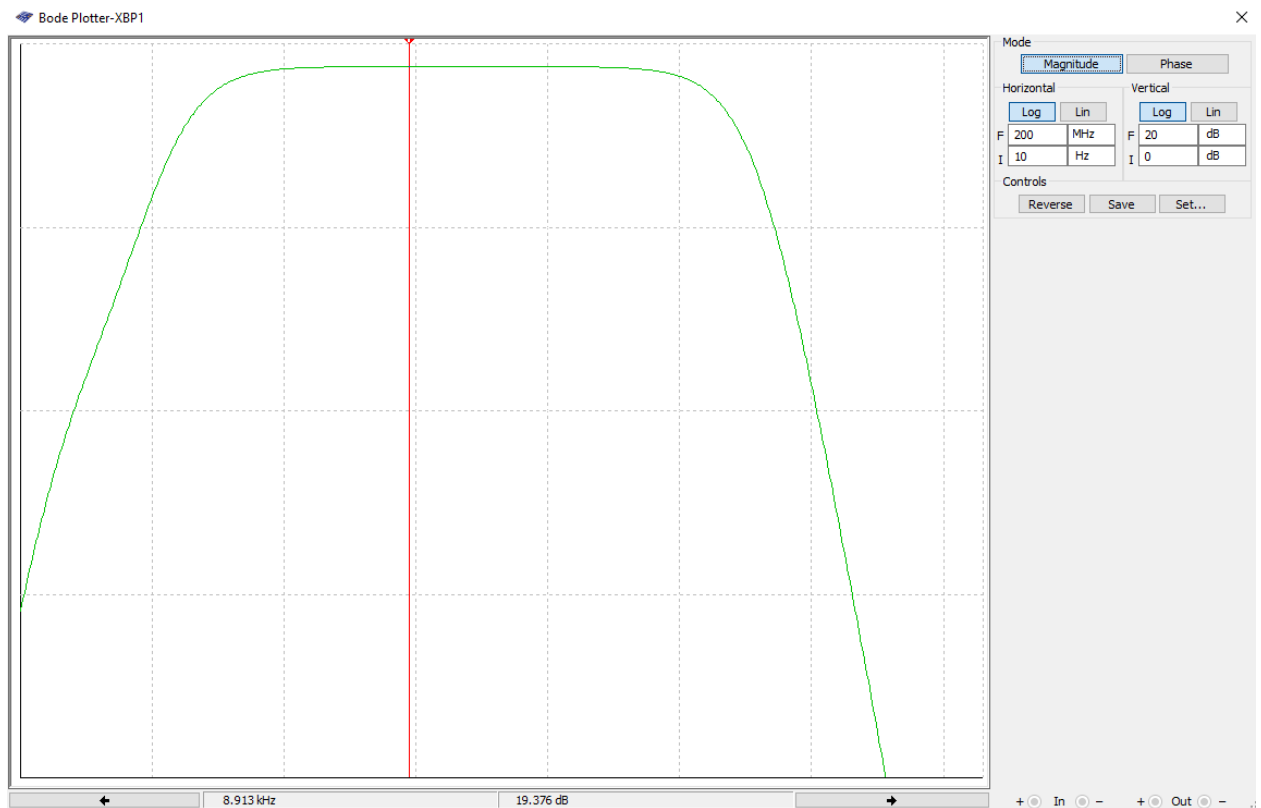


Рисунок 44. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C2=1\mu F$ (меньше номинальное)

$$K_U = 653,241 / 70,711 = 9,237$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,376 \text{ dB}$$

$$f_H = 114,692 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,954 \text{ МГц}$$

Вывод: входной *разделительный* конденсатор 2 необходим для того, чтобы предотвратить протекание постоянного тока между входными цепями и базой транзистора, обеспечив при этом свободное прохождение переменного тока. Таким образом, заданный режим покоя (статический режим) транзистора не будет влиять на статические режимы предыдущего и последующего каскадов.

Информация бралась с: <https://cyberpedia.su/13xc29f.html>

Поработаем с C3:

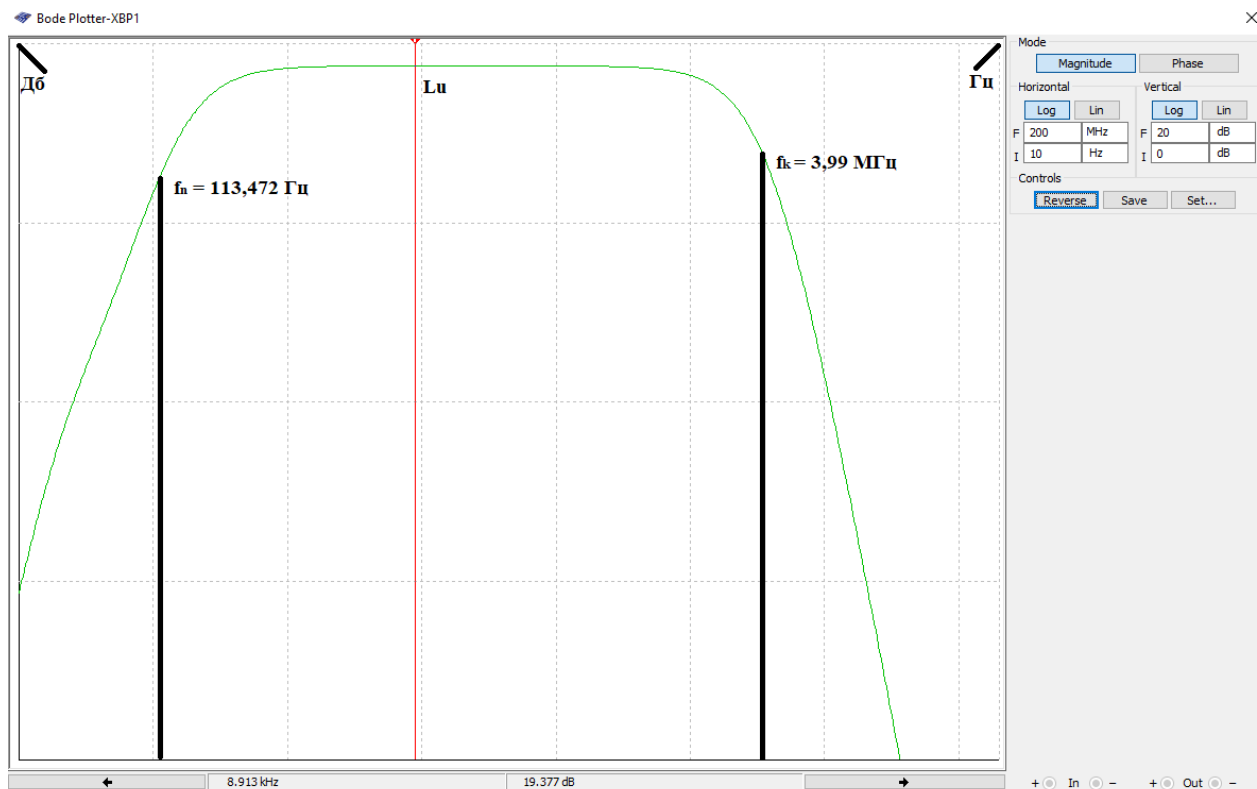


Рисунок 45. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C3=50\mu F$ (номинальное)

$$K_U = 653,301 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,99 \text{ МГц}$$

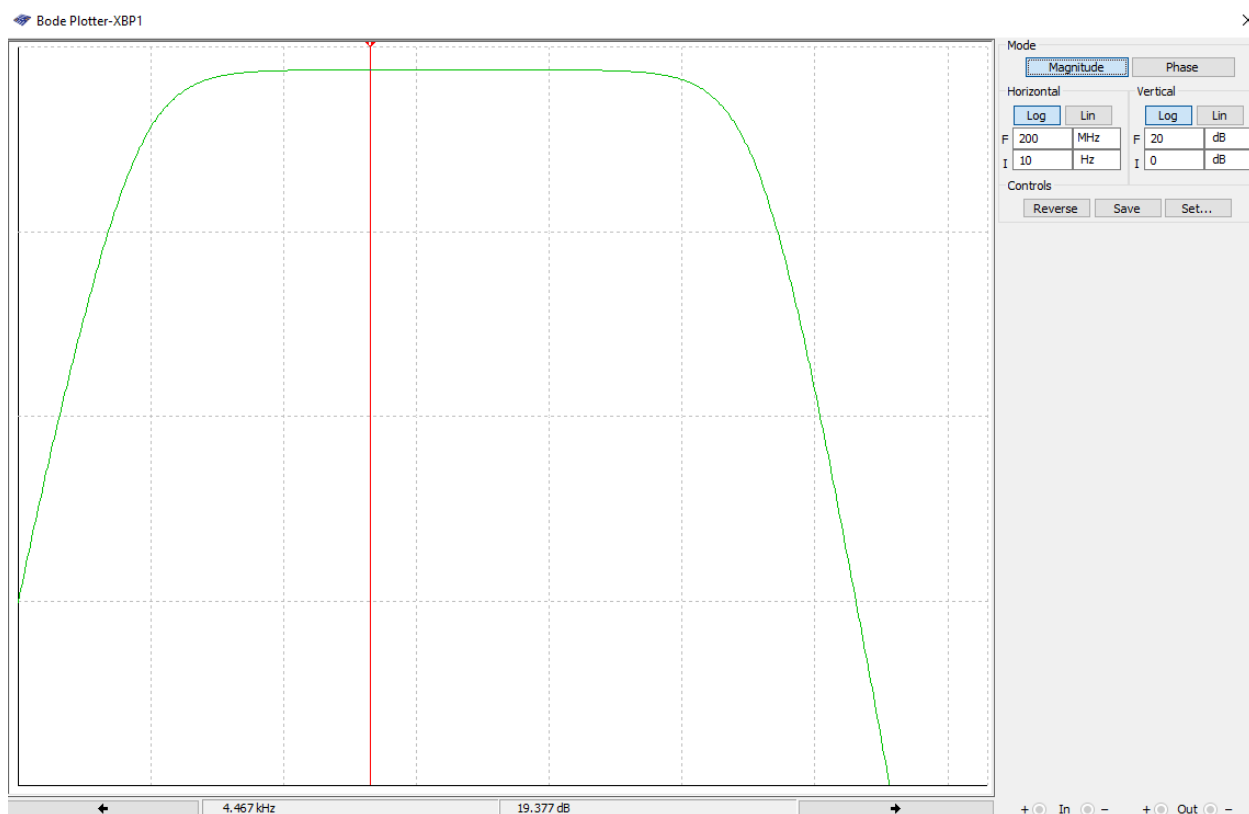


Рисунок 46. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C3=100\mu F$ (больше номинальное)

$$K_U = 656,964 / 70,711 = 9,291$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 64,521 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,953 \text{ МГц}$$

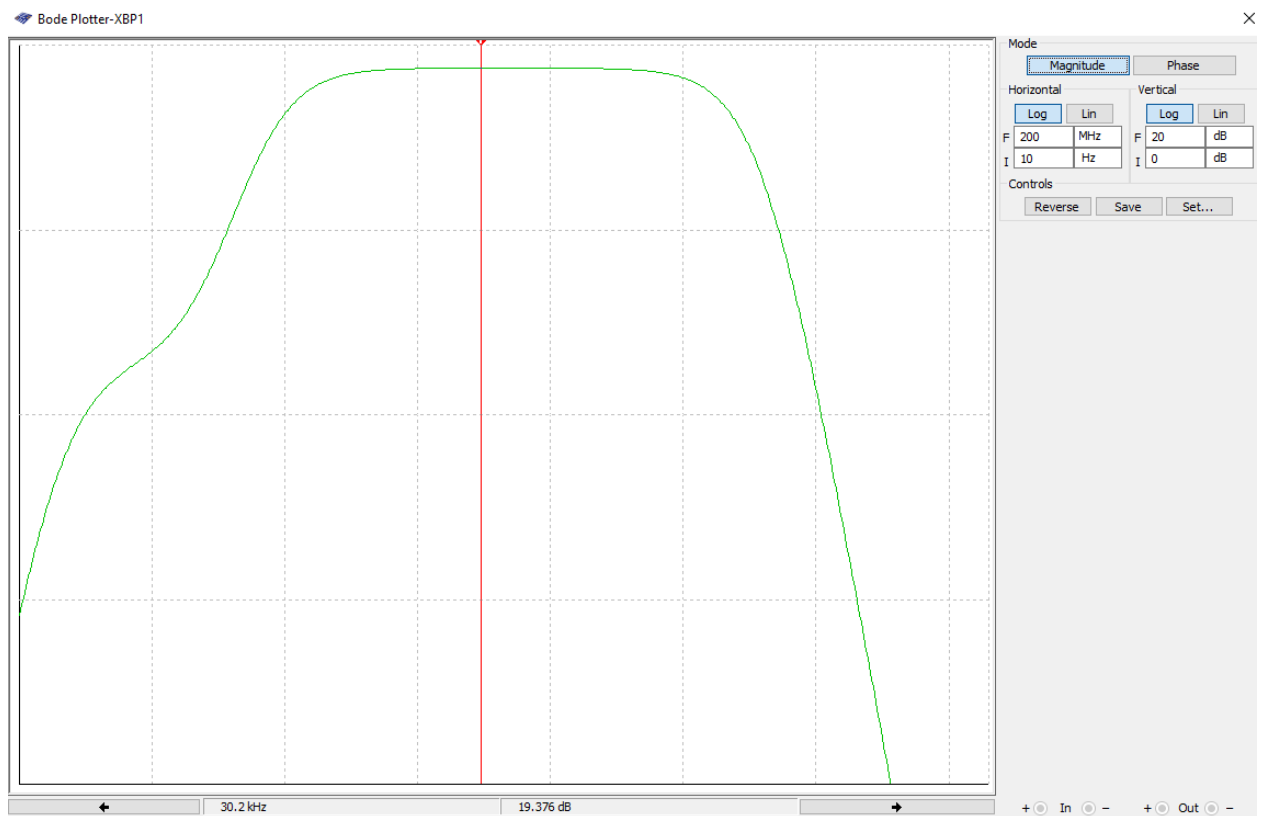


Рисунок 47. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C3=10\mu F$ (меньше номинальное)

$$K_U = 571,204 / 70,711 = 8,078$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,336 \text{ dB}$$

$$f_H = 535,722 \text{ Гц}$$

$$f_K = 3,954 \text{ МГц}$$

Вывод: изменение $C3$ явно влияет K_U (при уменьшении $C3$, K_U растёт) и на f_H (при уменьшении $C3$ растёт значение f_H).

Поработаем с C4:

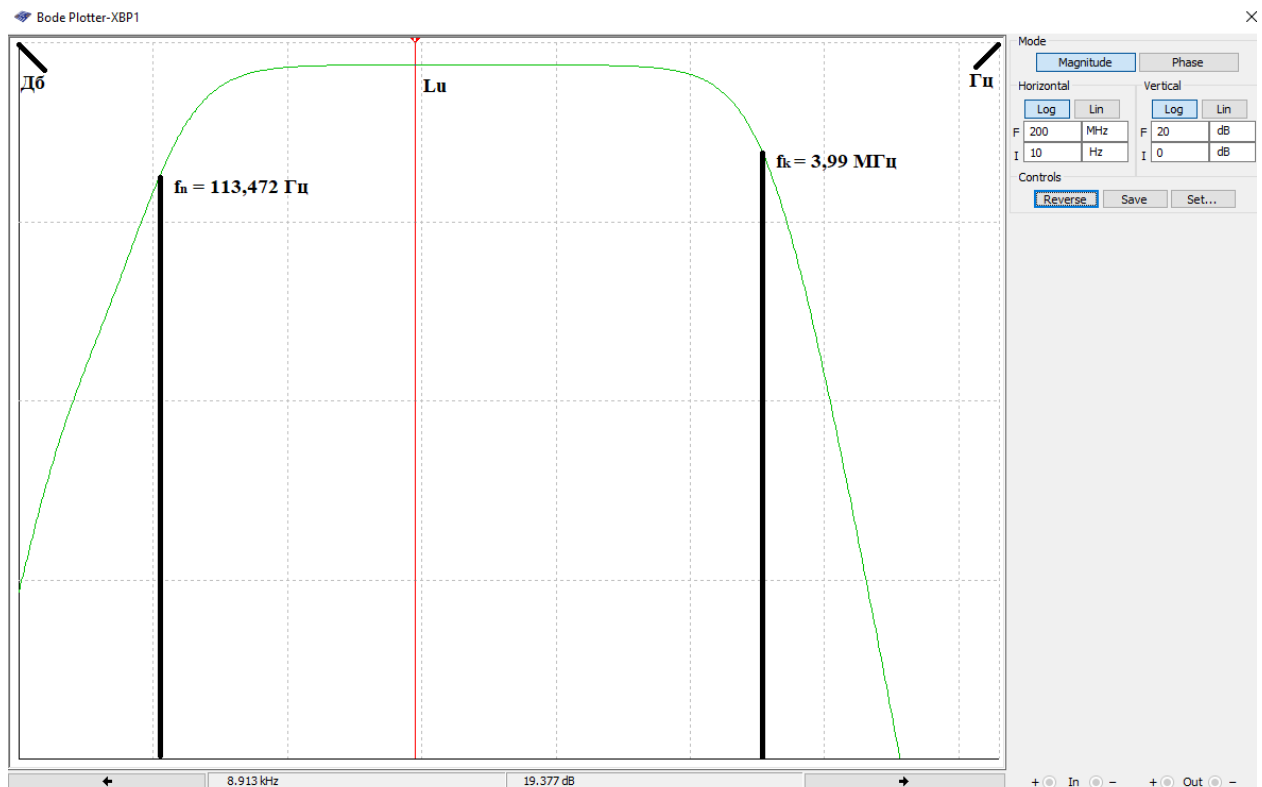


Рисунок 48. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C4=100\mu F$ (номинальное)

$$K_U = 653,301 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_n = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_k = 3,99 \text{ МГц}$$

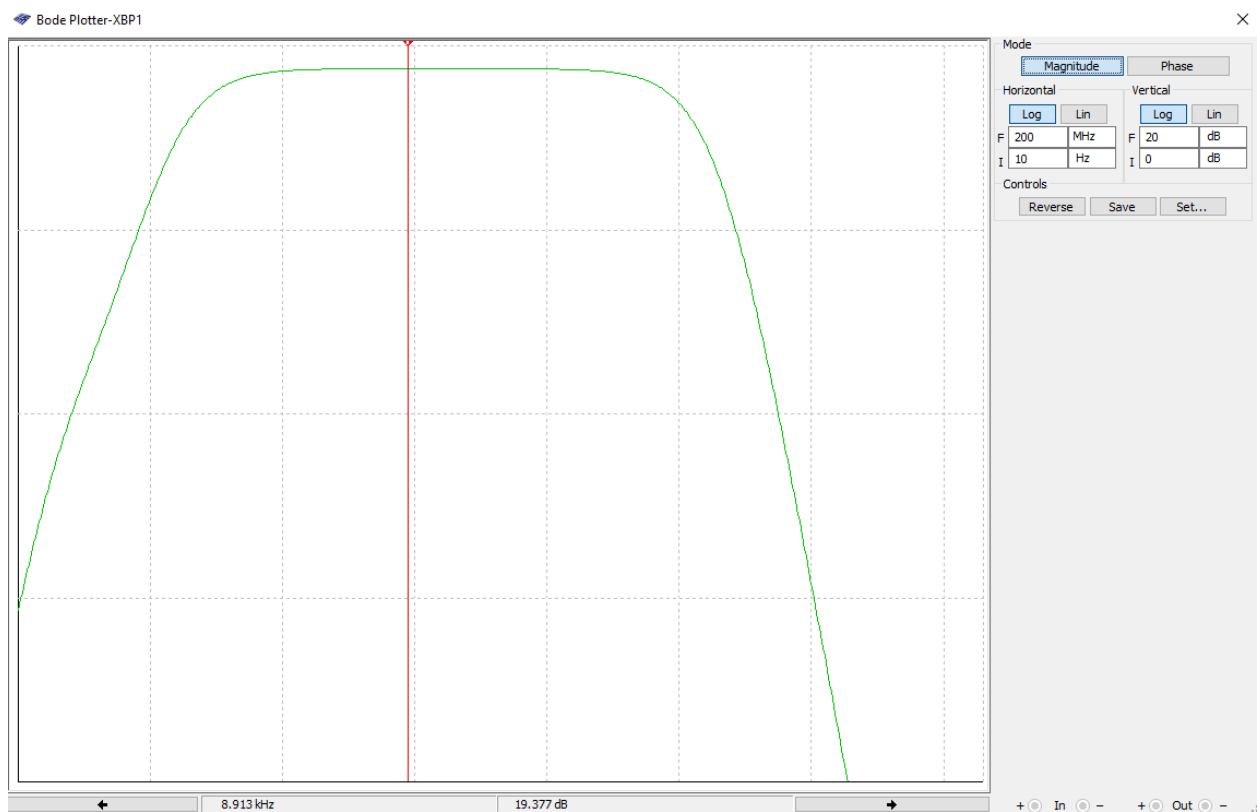


Рисунок 49. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C4=200\mu F$ (больше номинальное)

$$K_U = 653,335 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_K = 2,048 \text{ МГц}$$

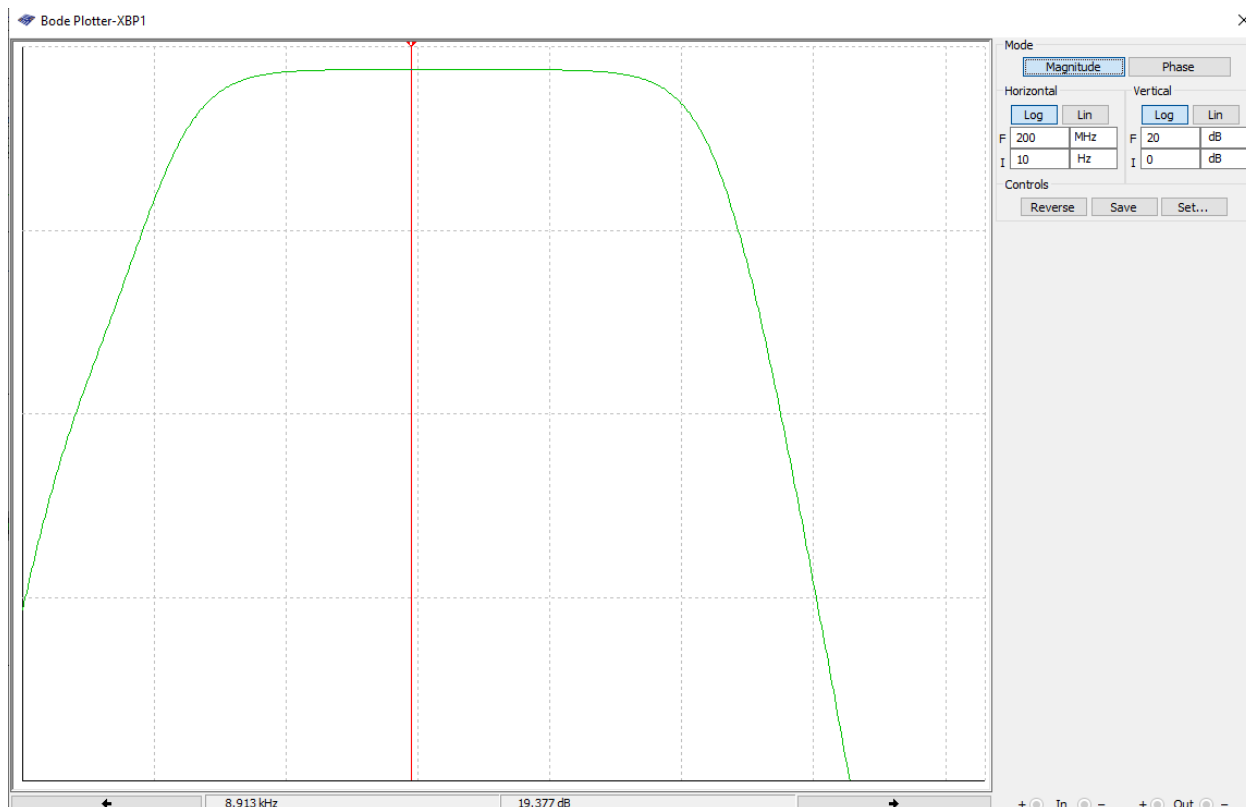


Рисунок 50. Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика при $C4=10\mu F$ (меньше номинальное)

$$K_U = 653,626 / 70,711 = 9,239$$

$$L_U [\text{Дб}] = 16,337 \text{ dB}$$

$$f_H = 113,472 \text{ Гц}$$

$$f_K = 26,972 \text{ МГц}$$

Вывод: изменение $C4$ влияет на f_K (при уменьшении $C4$ увеличивается f_K). Для исключения этого нежелательного явления на переменном токе, $R_э$ шунтируют конденсатором $C4$, что гарантирует повышение коэффициента усиления в пределах рабочей полосы частот до значения. Источник информации: (<https://elib.spbstu.ru/dl/2538.pdf/download/2538.pdf>) стр. 12

Вывод общий: Параметры элементов $R6$, $C1$, $C2$, $C3$, $C4$ влияют на частотные свойства усилителя. При изменении параметров этих элементов меняются граничные частоты f_H и f_K , пропускная полоса и $U_{\text{вых}}$, следовательно, и коэффициент усиления (подробнее про изменение про каждую характеристику смотрите выводы выше).