

Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
Радиофизический факультет

**Отчёт по лабораторной работе №208**  
Параметрический резонанс

**Выполнили (420гр):**  
Горюнов О.А., Плешков Д.С., Сиднев А.А.

2022 г.

## Содержание

<b>1 Теоретическая часть</b>	<b>3</b>
1.1 Введение . . . . .	3
1.2 Качественное объяснение явления . . . . .	3
<b>2 Описание установки</b>	<b>5</b>
<b>3 Практическая часть</b>	<b>8</b>
3.1 Исследование зависимости индуктивности контура $L$ от силы тока $I$ в первичных обмотках . . . . .	8
3.2 Наблюдение нелинейных искажений . . . . .	12
3.3 Зависимость амплитуды колебаний от частоты . . . . .	22
3.4 Зависимость амплитуды колебаний от напряжения накачки . . . . .	27
3.5 Исследование модели параметрического усилителя . . . . .	30
<b>4 Вывод</b>	<b>31</b>

**Цель работы** - изучить явление параметрического резонанса в колебательном контуре на примере изменения индуктивности  $L$ .

## 1 Теоретическая часть

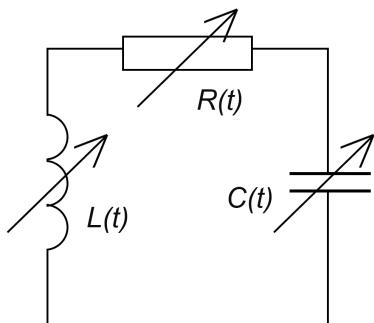
### 1.1 Введение

Резонансом в общем случае можно назвать специфическое явление, когда результат воздействия периодической внешней силы на колебательную систему существенным образом зависит от темпа воздействия, т.е. от периода силы.

Возможен резонанс другого рода, когда внешняя сила не воздействует непосредственно на колеблющую величину, а лишь изменяет параметры системы.

Таким образом, колебания в электрическом контуре можно возбудить, не прикладывая к нему извне ЭДС, если периодически изменять параметры контура (индуктивность  $L$  или ёмкость  $C$ ). Это явление называется параметрическим резонансом.

### 1.2 Качественное объяснение явления



Для выяснения качественной картины сначала рассмотрим энергетическое соотношение для контура с переменными параметрами  $L$ ,  $C$ ,  $R$  (см. рис.1). Из второго закона Киргофа в этом случае очевидно следует:

$$iR + \frac{q}{C(t)} + \frac{d}{dt}[L(t)i] = 0 \quad (1)$$

где  $q$  и  $i$  - заряд конденсатора и ток в контуре, величины  $\psi = L(t)i$  представляет собой магнитный поток в катушке. После умножения равенства (1) на  $i = \frac{dq}{dt}$  нетрудно получить соотношение:

Рис. 1:

$$\frac{dW}{dt} = -i^2 R(t) - \frac{1}{2} \left( i^2 \frac{dL}{dt} + V^2 \frac{dC}{dt} \right) \quad (2)$$

где  $W = (Li^2 + CV^2)/2$  - запасённая в контуре электромагнитная энергия, а  $V$  - напряжение на конденсаторе. Первый член в правой части соответствует джоулевым потерям. Второй же член, означает, что изменение параметров  $L$  и  $C$  во времени также влияет на энергию в контуре, т.е. силы, изменяющие эти параметры, совершают определённую работу. При уменьшении  $L$  и  $C$  электромагнитная энергия может быть увеличена без подключения к контуру внешней ЭДС.

Уменьшение параметров возможно лишь в конечных пределах, поэтому для достижения значительной раскачки колебаний этот процесс необходимо периодически повторять. При увеличении  $L$  или  $C$ , однако, электромагнитная энергия убывает. Чтобы при этом не растерять полученный энергетический выигрыш, увеличение ёмкости выгодно производить в те моменты, когда заряд конденсатора минимален (а индуктивность - когда

минимален ток) и уменьшать при максимальном заряде. При противоположных фазах (уменьшение  $C$  при малом заряде, увеличение при большом), наоборот, колебания будут быстро затухать.

Количественный расчёт этого процесса наиболее прост для скачкообразного изменения параметров. В практических устройствах обычно закон изменения параметров с достаточным приближением можно считать синусоидальным. Рассмотрим контур с постоянными  $L$  и  $R$  и с ёмкостью изменяющейся по закону:

$$C = C_0(1 + m \cos \Omega t)^{-1} \quad (3)$$

Введём новую переменную

$$S(t) = q(t)e^{\delta t}$$

где  $\delta = R/2L$  - декремент затухания контура. Тогда из равенства (1) можно получить уравнение с переменным коэффициентом:

$$\ddot{S} + \omega_k^2(1 + m' \cos \Omega t)S = 0 \quad (5)$$

где  $\omega_k^2 = \frac{1}{LC} - \delta^2 \approx \frac{1}{LC_0}$ ;  $m' = \frac{m}{LC_0} \omega_k^2 \approx m$

Соотношение (5) называют уравнением Маттье. Решение этого уравнения не может быть выражено в элементарных функциях. Существенно, что это решение в зависимости от значений  $m$ ,  $\omega_k$  и  $\Omega$  может быть как периодическим, так и монотонно нарастающим или убывающим. В общем случае согласно теореме Флоке оно может быть написано в виде:

$$S(t) = A_1 e^{\alpha t} \phi(t) + A_2 e^{-\alpha t} \phi(t) \quad (6)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  - постоянные коэффициенты, определяемые начальными условиями. Величина  $\alpha$  зависит от значений  $m$ ,  $\omega_k$ ,  $\Omega$ , а  $\phi(t)$  - некоторая преодолическая функция с периодом  $\frac{2\pi}{\Omega}$ . На рис. 3 эти области (зоны параметрического резонанса) указаны в виде заштрихованных участков. При малых  $t$  зоны генерации удовлетворяют резонансному условию

$$\Omega \approx \frac{2\omega_0}{n} \quad (7)$$

где  $n = 1, 2, 3, \dots$  - номер зоны. Характерно, что в этом случае при точном подборе частот  $\Omega$  и  $\omega_0$  возбуждение было бы возможно при сколь угодно малых  $m$ ; чем больше глубина модуляции ёмкости  $m$ , тем шире область генерации. При наличии потерь ( $\delta = 0$ ), согласно формуле (4)  $q = S e^{-\delta t}$  и область резонанса сужается, а неустойчивость теперь имеет место лишь при достаточно глубоком изменении ёмкости. На рис. 3 эти области ограничены

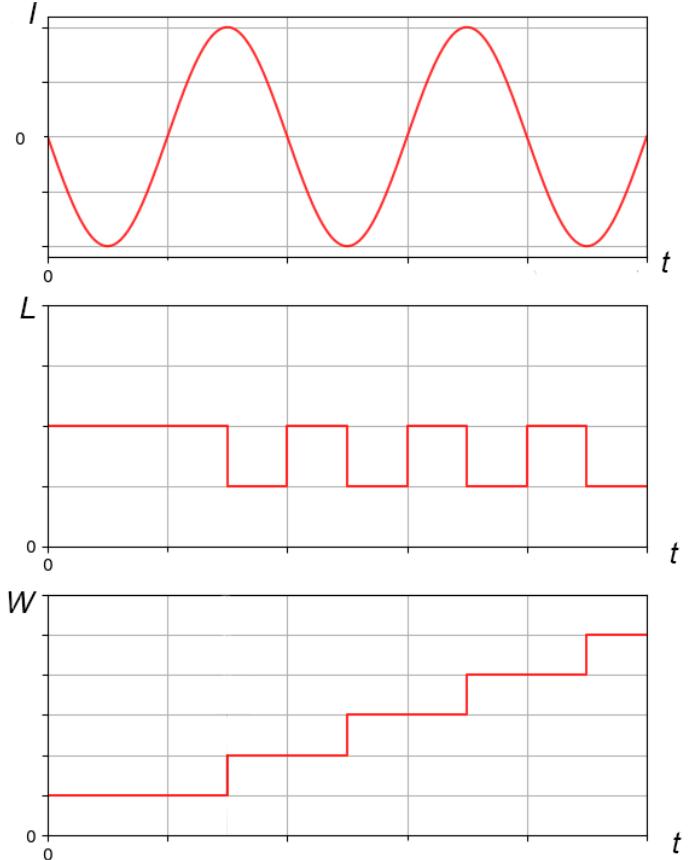


Рис. 2: Качественные графики при уменьшении  $L$ ,  $C = const$

красными линиями. Легче всего параметрическое возбуждение достигается в основной зоне ( $n = 1$ ), причём при малых  $m$  для этой зоны величина  $\alpha$  равна:

$$\alpha \approx \frac{\Omega}{8} \sqrt{m^2 - 4 \left(1 - \frac{2\omega_k}{\Omega}\right)^2} \quad (8)$$

Т.е. в середине этой зоны (при точном равенстве (7)) имеем  $\alpha = \frac{m\Omega}{8}$ . Во второй зоне

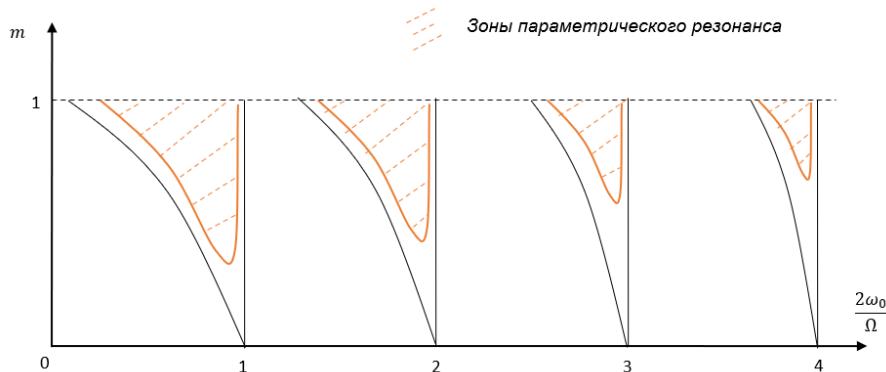


Рис. 3:

уже  $\alpha \sim m^2$ , в третьей порядка  $m^3$  и т.д. Аналогично дело обстоит и в случае контура с синусоидальной изменяющейся индуктивностью. Что же касается сопротивления  $R$ , как ясно уже из энергетических соображений, то никакое его изменение не может само по себе привести к раскачке колебаний.

## 2 Описание установки

Принципиальная схема установки приведена на рис. 5. Основная часть этой установки состоит из двух одинаковых ферритовых колец с обмотками и в упрощенном виде показана на рис. 4. На первичные обмотки этих трансформаторов, включенные последовательно, подается синусоидальное напряжение "накачки"  $V_n$  от специального генератора ГЗ, ЗГ или ГСС. Вторичные обмотки, включенные также последовательно, вместе с конденсатором  $C_1$  или  $C_2$  образуют колебательный контур. Эти обмотки подобраны и включены так, что в рабочем положении (коммутатор К в положении "работа") наводимые в них ЭДС взаимно компенсируются, поэтому колебания частоты накачки  $f_n = \Omega/2\pi$  в контуре не проходят.

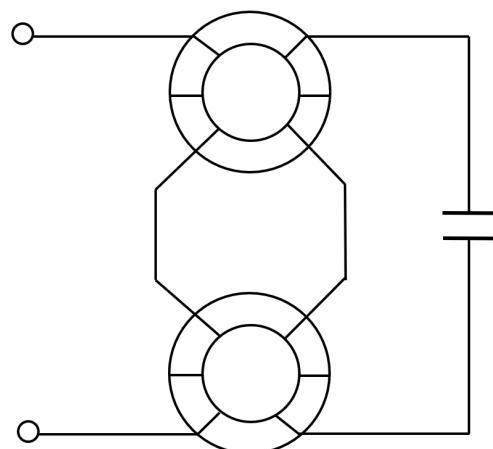


Рис. 4:

Протекающий по первичным обмоткам ток  $i_n$  создаёт переменное магнитное поле, которое периодически изменяет магнитную проницаемость  $\mu$  ферритовых сердечников и, следовательно, индуктивность как первичных ( $L_n$ ),

так и вторичных обмоток ( $L$ ). Изменение индуктивности  $L_n$  приводит непосредственно лишь к искажению формы тока  $i_n$  в этой обмотке. Из-за изменения  $L$  контура при определённых условиях может произойти параметрическое возбуждение колебаний с частотой  $f_k \neq f_n$ . Эти колебания, снимаемые с конденсатора можно обнаружить при помощи осциллографа или вольтметра.

На данной установке удается наблюдать некоторые характерные особенности нелинейных колебательных систем. В частности, при плавном изменении  $V_n$  (при фиксированных значениях  $f_n$  и  $f_k$ ) колебания в контуре возникают или исчезают скачком (так называемый "жёсткий режим"), причём срыв колебаний происходит при меньшей амплитуде накачки, чем возбуждение их.

Аналогичным образом зона параметрической генерации имеет с одной стороны резкую границу, а именно, при повышении  $f_n$  колебания в контуре возбуждаются скачком, также скачком они исчезают при убывании  $f_n$ , но при другой (меньшей) частоте. Последнее обстоятельство называется явлением "затягивания". Строгий расчет этих эффектов дается в нелинейной теории колебаний.

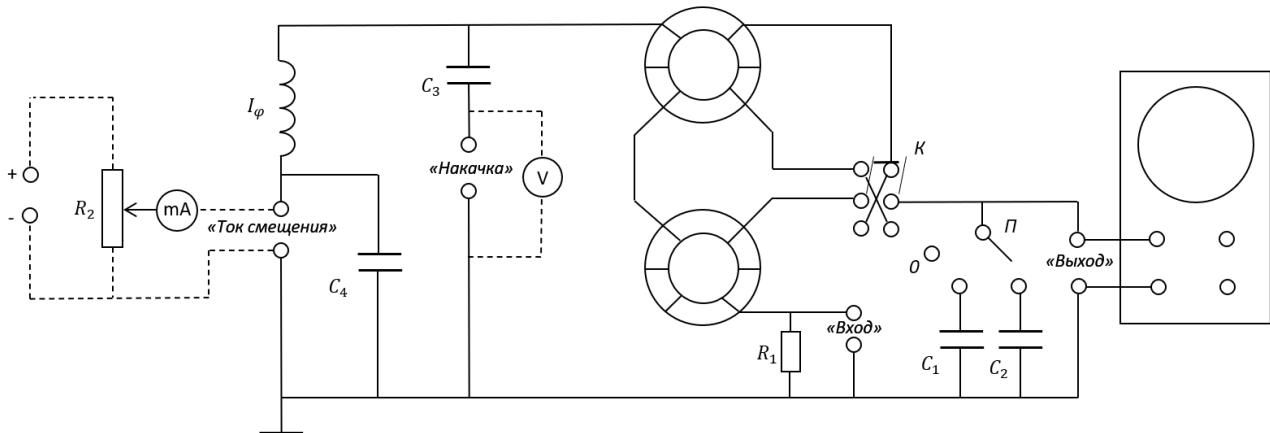


Рис. 5: Принципиальная схема установки

Остальные элементы схемы имеют вспомогательное значение. К клеммам "ток смещения" подводится (через потенциометр  $R_2$ ) напряжение от батареи аккумуляторов, благодаря чему через первичные обмотки катушек протекает постоянный ток  $i_0$ . Последний необходим по двум причинам. Во-первых, в отсутствие постоянной составляющей тока  $i_n$  изменение индуктивности происходило бы с частотой в два раза большей, чем частота генератора "накачки" (потому что значения  $\mu$  и  $L$  зависят лишь от величины напряженности магнитного поля, а не его направления). Кроме того, регулировкой тока смещения можно плавно изменять резонансную частоту контура  $f_k$ .

Дроссель  $L_\phi$  (катушка самоиндукции с железным сердечником) и электролитический конденсатор  $C_4$  представляют собой фильтр, не пропускающий колебания от генератора "накачки" через источник постоянного напряжения; на ток смещения этот фильтр не влияет. Аналогично, переходная емкость  $C_3$  не пропускает постоянный ток через генератор "накачки".

Сопротивление  $R_1$ , включенное последовательно с контуром, является нагрузкой для генератора сигнала, подключаемого к клеммам "вход". Этот вход может быть использован

для снятия кривой обычного резонанса в последовательной контуре и для подачи сигнала при исследовании модели параметрического усилителя.

Переключатель "П" позволяет изменять диапазон частот собственных колебаний контура путем изменения емкости и, в частности, вообще отключать емкость, что нужно для контрольных измерений. Для последней цели предназначен и коммутатор "К". Как уже указывалось, в положении "работа" вторичные обмотки катушек включаются в противофазе, в другом же положении тумблера ("контроль") они включаются в фазе и напряжение от генератора накачки непосредственно передается в колебательный контур, так что катушки при этом вместе работают как обычный трансформатор, в этом случае в контуре устанавливаются вынужденные колебания, частота которых совпадает с частотой генератора.

Максимальная раскачка вынужденных колебаний здесь происходит при обычных условиях  $f_n \approx f_k$ . При больших  $V_n$ , когда начинаются нелинейные искажения, возможны резонансы на обертонах  $f_n$  (т.е. при  $f_k \approx nf_n$ , где  $n = 1, 2, 3, 4, \dots$ ).

***B практической части***  $V_n \equiv U_n$ ,  $f_n \equiv \nu$ .

### 3 Практическая часть

#### 3.1 Исследование зависимости индуктивности контура $L$ от силы тока $I$ в первичных обмотках

Зависимость $L$ от $I$ (при увеличении)									
$\nu$ , Гц	$I$ , мА	$L$ , мГн	$\Delta L$ , мГн	$\Delta I$ , мА	$\nu$ , Гц	$I$ , мА	$L$ , мГн	$\Delta L$ , мГн	$\Delta I$ , мА
4050	20	1,544	0,0763	4,5	9400	220	0,287	0,0061	4,5
4700	40	1,147	0,0488	-	8900	200	0,320	0,0072	-
5350	60	0,885	0,0331	-	8500	180	0,351	0,0083	-
5850	80	0,740	0,0253	-	8000	160	0,396	0,0099	-
6500	100	0,600	0,0185	-	7500	140	0,450	0,0120	-
7000	120	0,517	0,0147	-	7050	120	0,510	0,0145	-
7400	140	0,463	0,0125	-	6500	100	0,600	0,0185	-
8000	160	0,396	0,0099	-	5950	80	0,715	0,0241	-
8450	180	0,355	0,0084	-	5400	60	0,869	0,0322	-
8900	200	0,320	0,0072	-	4700	40	1,147	0,0488	-
9300	220	0,293	0,0063	-	4000	20	1,583	0,0792	-
9750	240	0,266	0,0055	-	-	-	-	-	-

Абсолютная погрешность силы тока определяется по классу точности амперметра. Максимальное значение шкалы 300, класс точности 1,5%:

$$\Delta I = 0,015 * 300 = 4,5 \text{ мА}$$

Индуктивность можно определить по формуле:

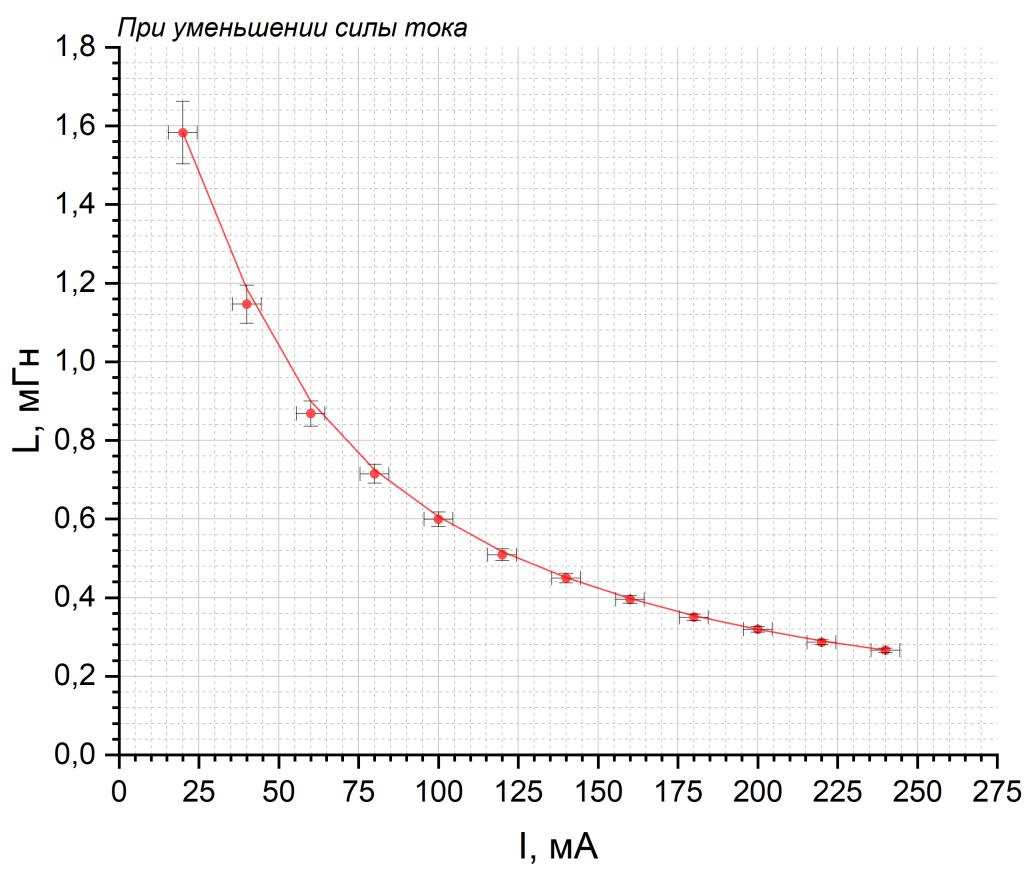
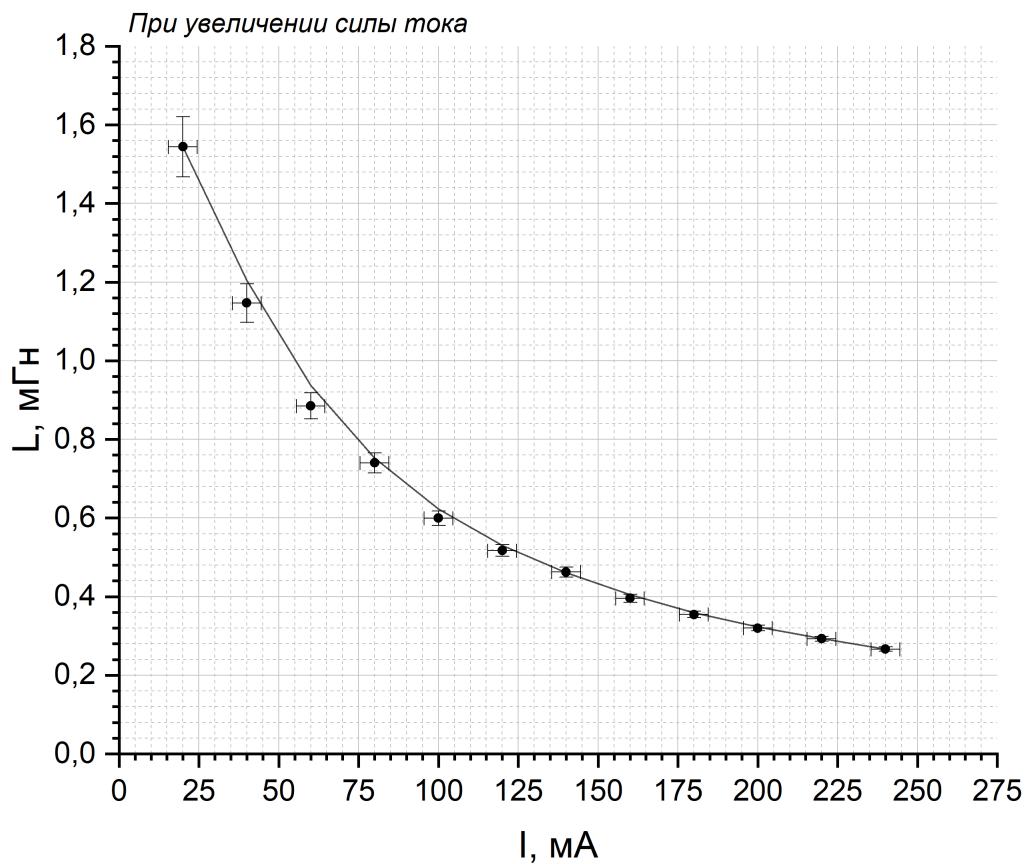
$$L = \frac{1}{4\pi^2 C \nu^2}$$

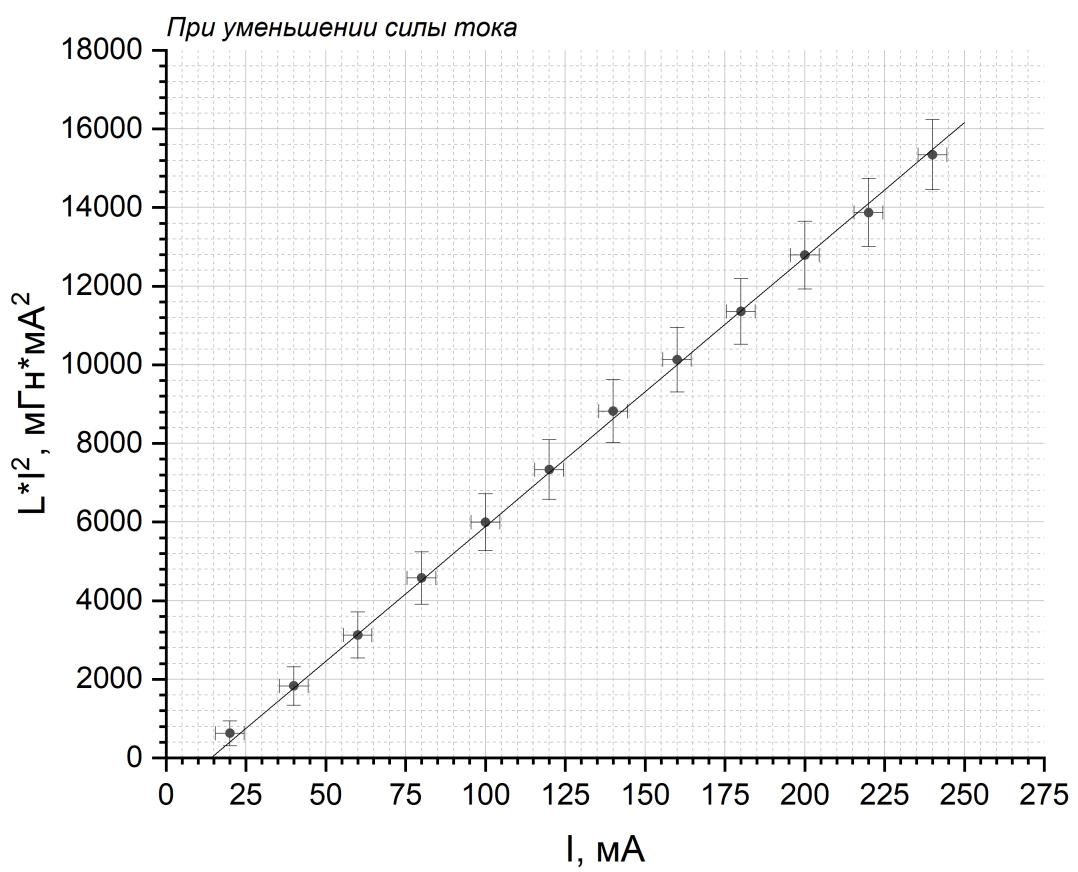
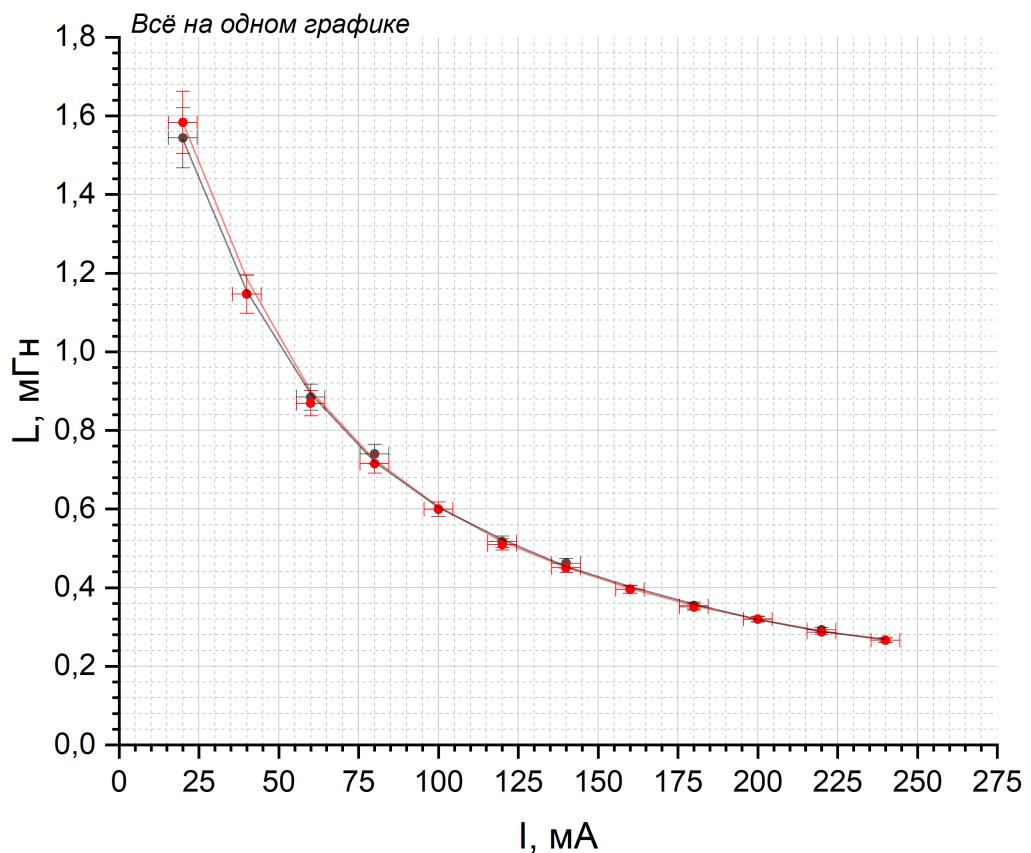
Тогда абсолютную погрешность индуктивности можно определить как:

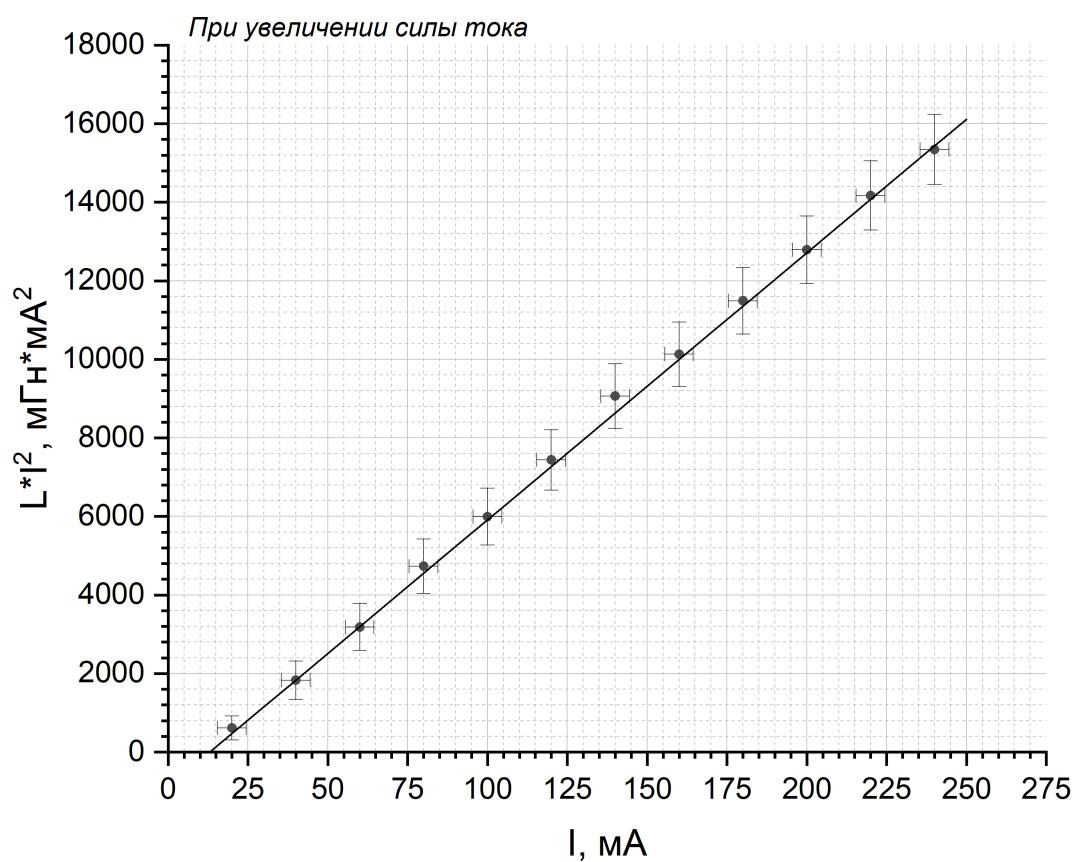
$$\Delta L = L \cdot \delta L = L \cdot 2\delta\nu = L \cdot \frac{2\Delta\nu}{\nu}$$

где  $\Delta\nu = 100$  Гц - цена деления шкалы на генераторе.

Ниже приведены экспериментальные графики  $L(I)$  при увеличении силы тока и при его обратном уменьшении. Причём, если построить зависимость  $LI^2(I)$ , то графиком будет являться прямая.







### 3.2 Наблюдение нелинейных искажений

В данной части работы наблюдалось изменение формы вынужденных колебаний на "выходе" при изменении напряжения накачки  $V_n$  на разных конденсаторах. А также посмотрели как влияет изменение частоты и тока смещения.

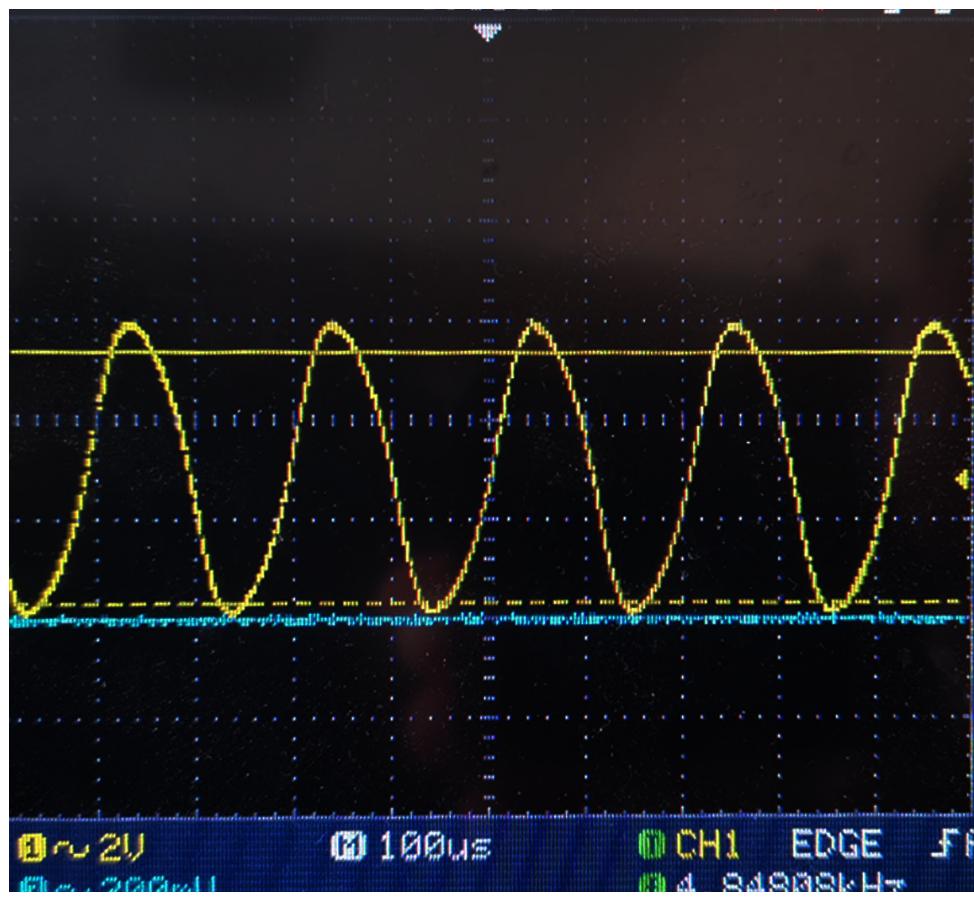
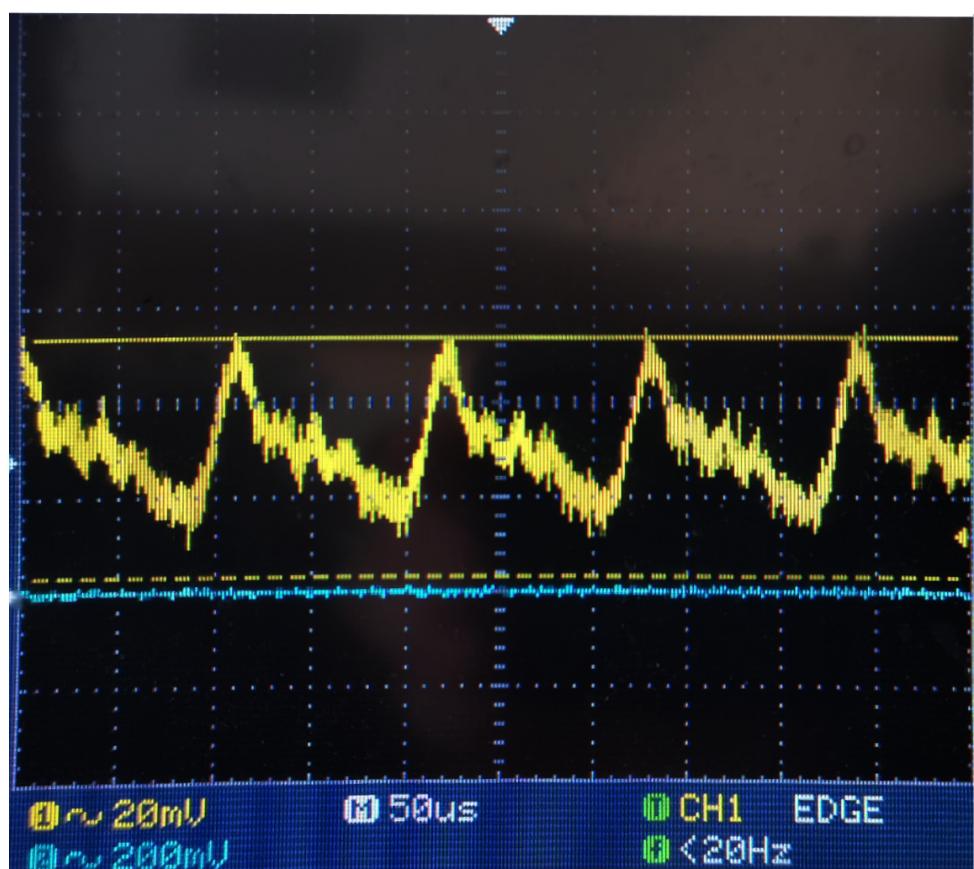
$$C_2 = 1 \text{ мкФ} \quad C_1 = 0,01 \text{ мкФ}$$

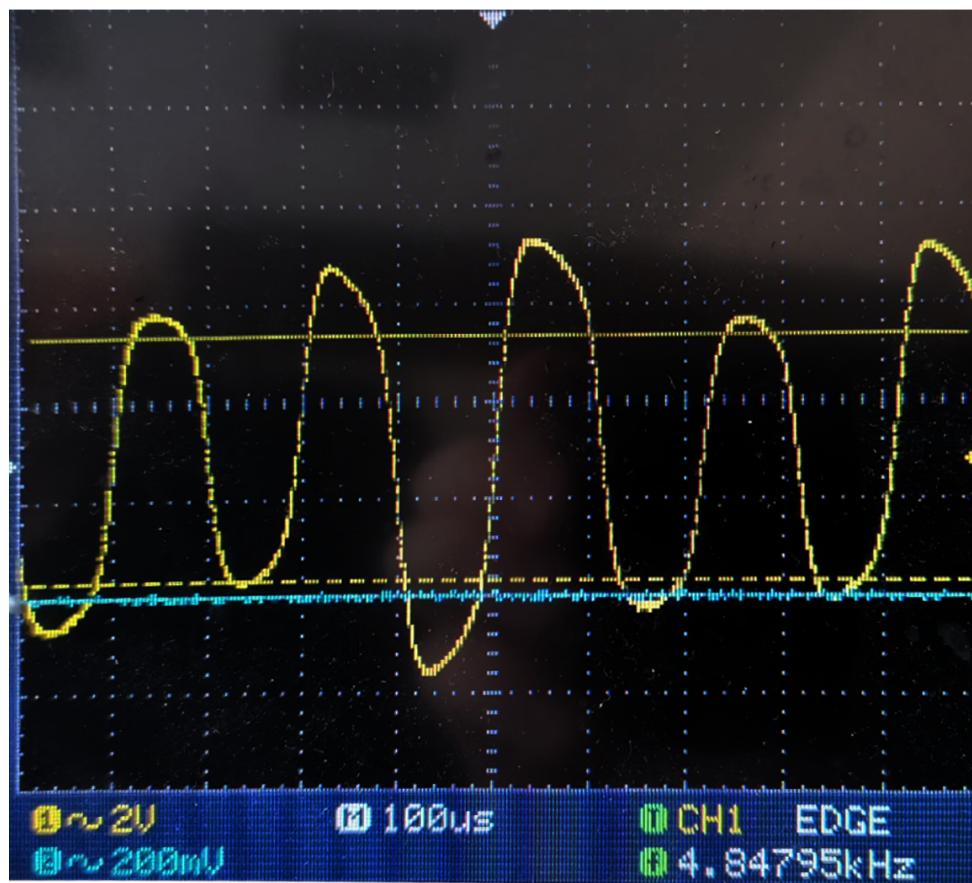
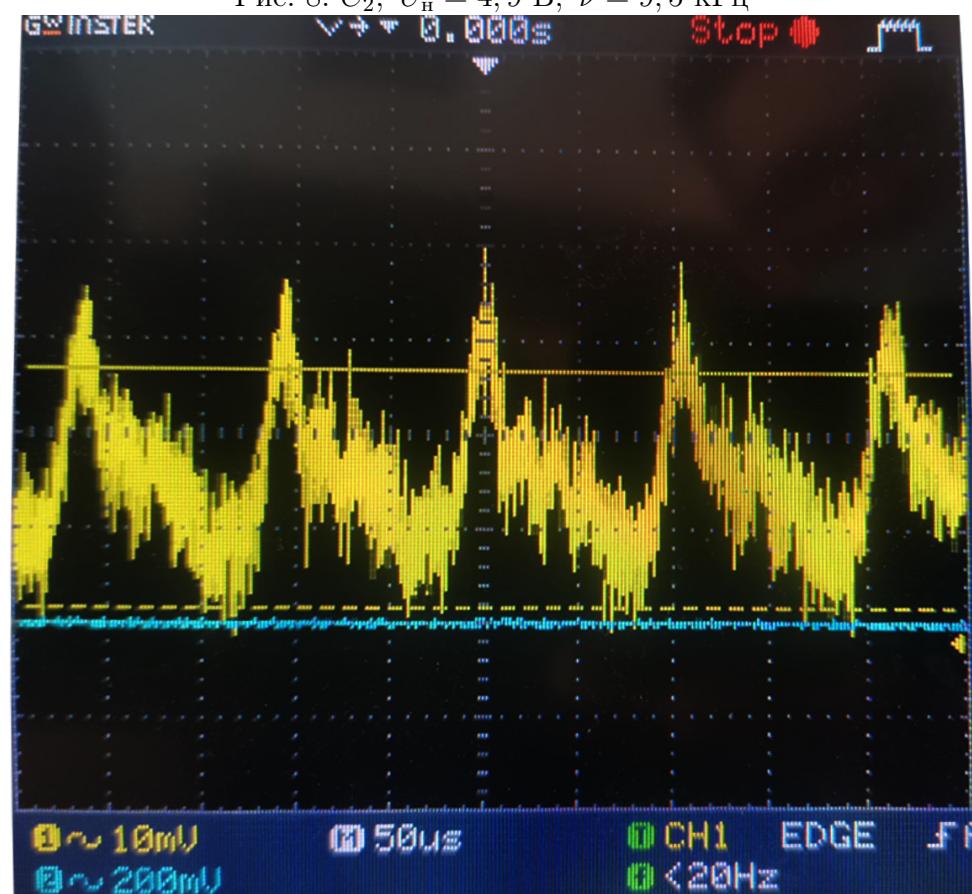
При  $C_2$  начинаем с напряжения накачки  $U_n = 1.7$  В, нелинейные искажения начинаются при  $U_n = 4,9$  В ( $\nu = 9.5$  кГц).

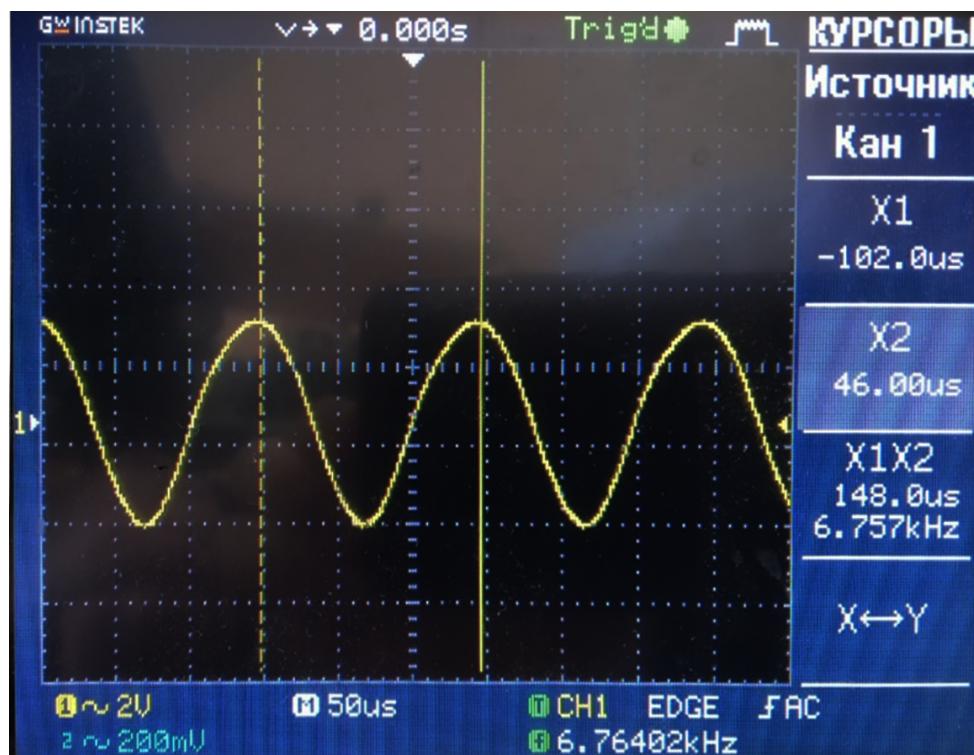
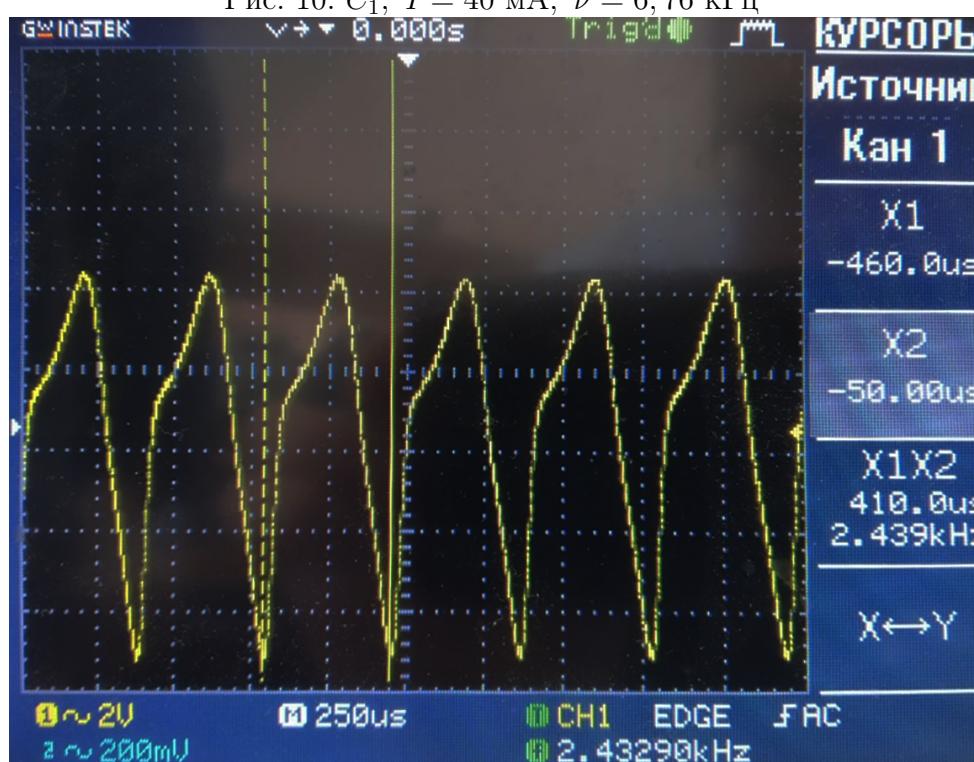
При  $C_1$  нелинейные искажения начинаются уже при  $U_n = 1$  В, а при низких значениях напряжения мешают шумы ( $\nu = 9.5$  кГц).

При токе смещения  $I = 40$  мА, на  $C_1$  искажения начинаются при  $\nu \leq 6,76$  кГц. При этом резонансная частота  $\approx 50$  кГц. Если увеличивать частоту, то искажений не будет. Аналогично и с  $C_2$ , искажения начинаются при  $\nu \leq 3,3$  кГц. При  $C = 0$  искажения начинаются при  $\nu \leq 8,6$  кГц, сильные при  $\nu \leq 2$  кГц.

При токе смещения  $I = 100$  мА, на  $C_1$  искажения при  $\nu \leq 10$  кГц, а на  $C_2$  при  $\nu \leq 4,6$  кГц. Сильные искажения в обоих случаях при  $\nu \leq 3,4$  кГц. При  $C = 0$ , сильные искажения при  $\nu \leq 6,5$  кГц.

Рис. 6:  $C_2$ ,  $U_h = 1,7$  В,  $\nu = 9,5$  кГцРис. 7:  $C_1$ ,  $U_h = 2,07$  В,  $\nu = 9,5$  кГц

Рис. 8:  $C_2$ ,  $U_h = 4,9$  В,  $\nu = 9,5$  кГцРис. 9:  $C_1$ ,  $U_h = 1,78$  В,  $\nu = 9,5$  кГц

Рис. 10:  $C_1$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 6,76$  кГцРис. 11:  $C_1$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 2,44$  кГц

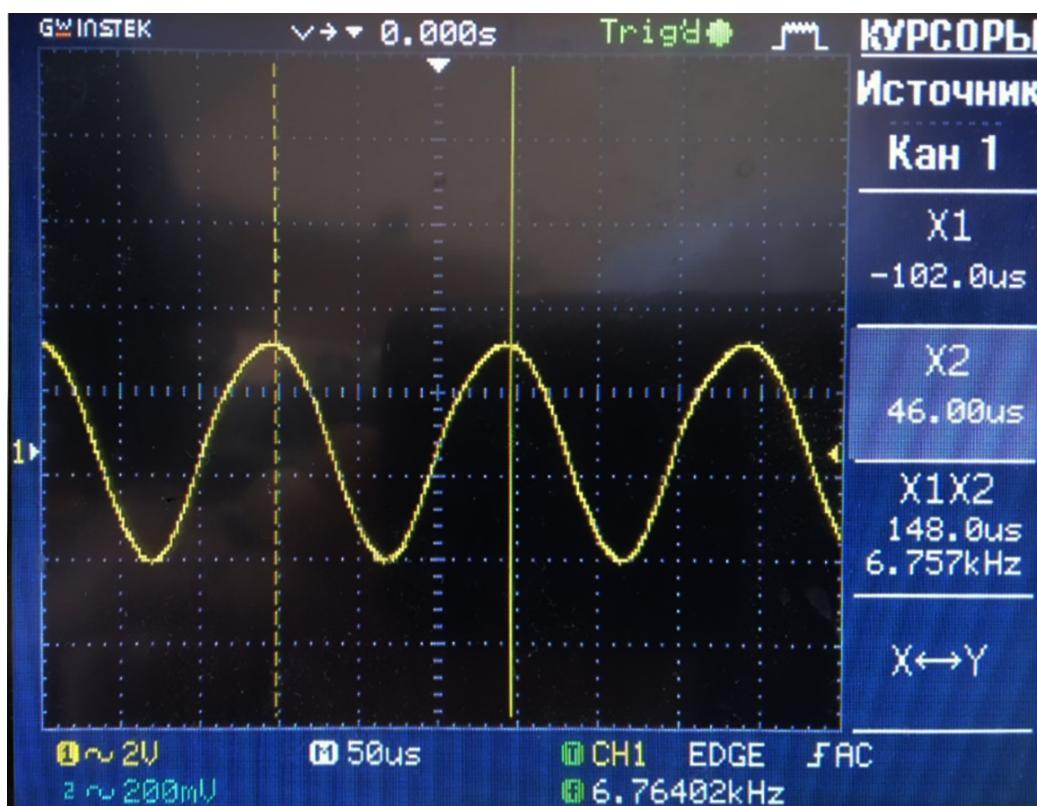
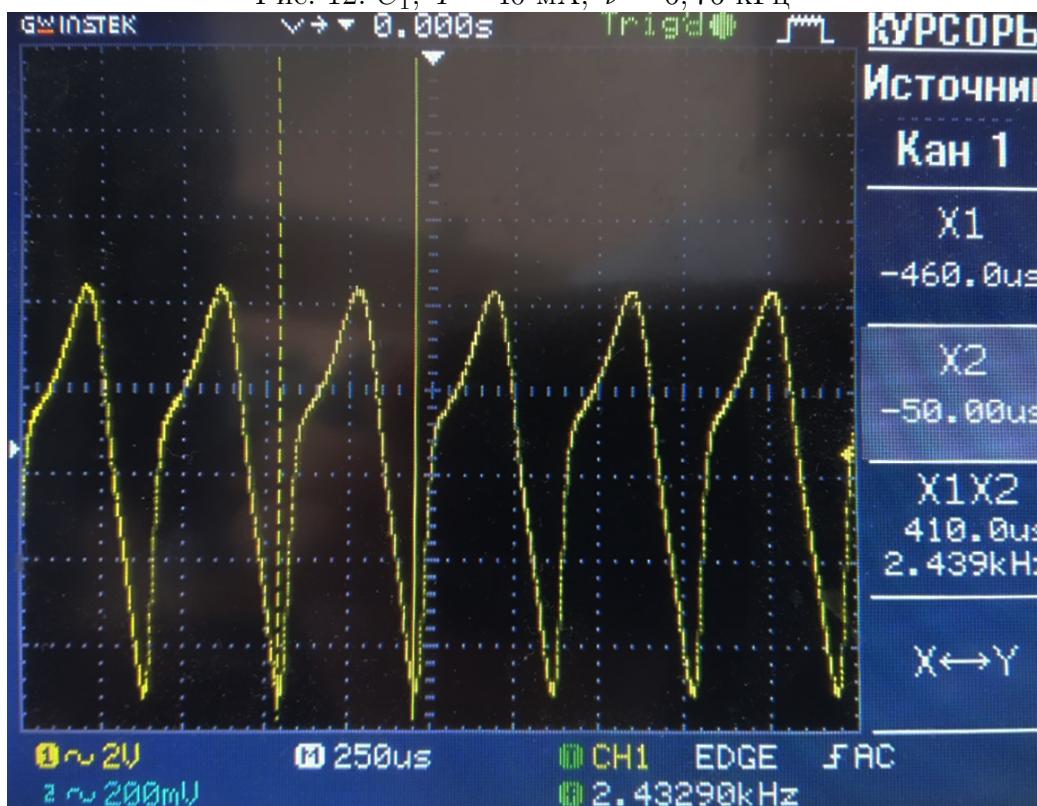
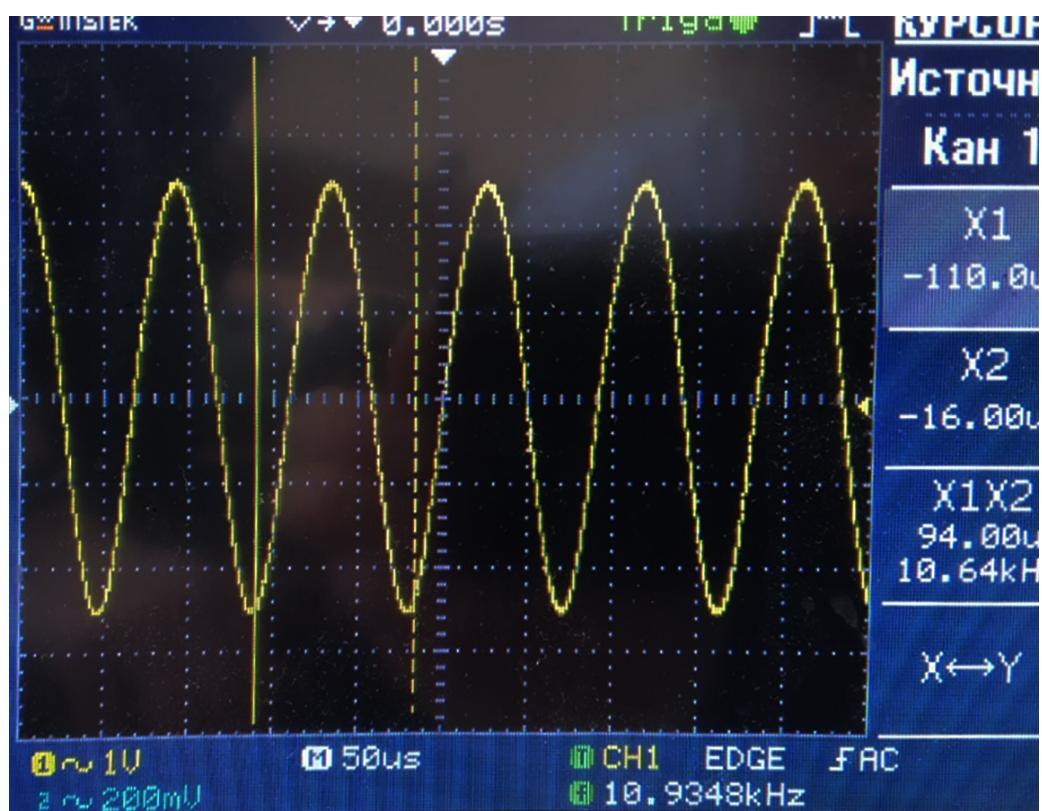
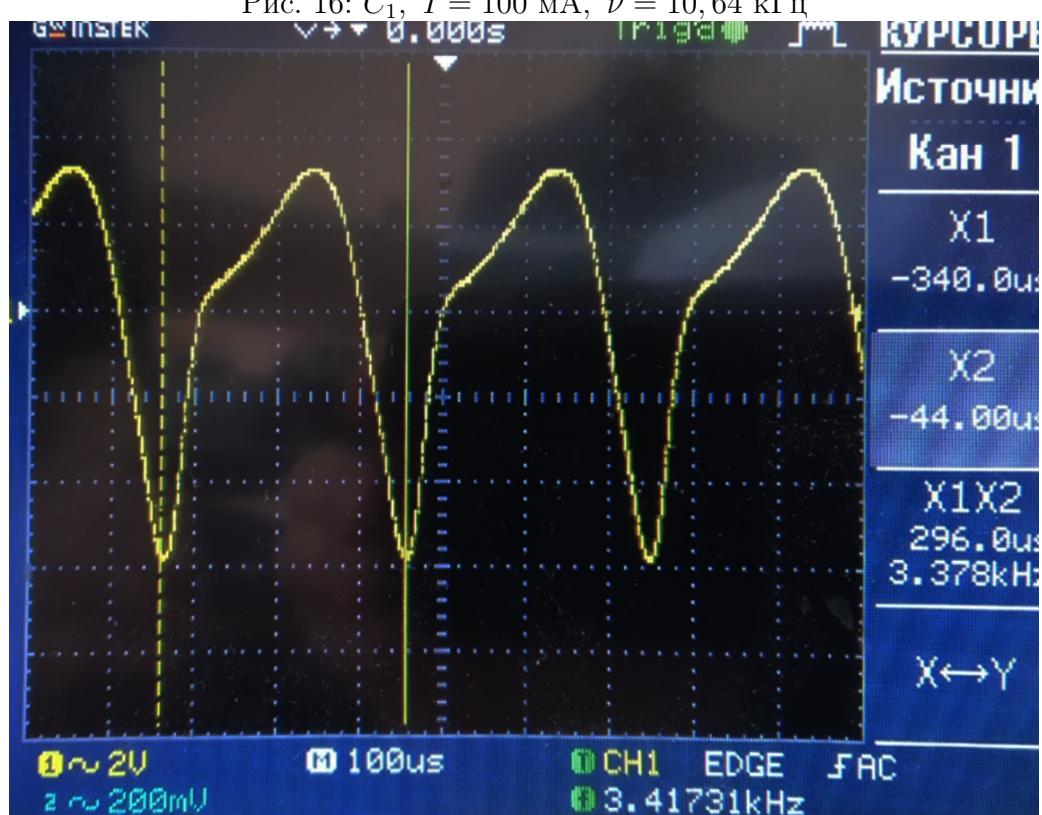
Рис. 12:  $C_1$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 6,76$  кГцРис. 13:  $C_1$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 2,44$  кГц

Рис. 14:  $C_2$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 5, 10$  кГцРис. 15:  $C_2$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 2, 00$  кГц

Рис. 16:  $C_1$ ,  $I = 100$  мА,  $\nu = 10, 64$  кГцРис. 17:  $C_1$ ,  $I = 100$  мА,  $\nu = 3, 38$  кГц

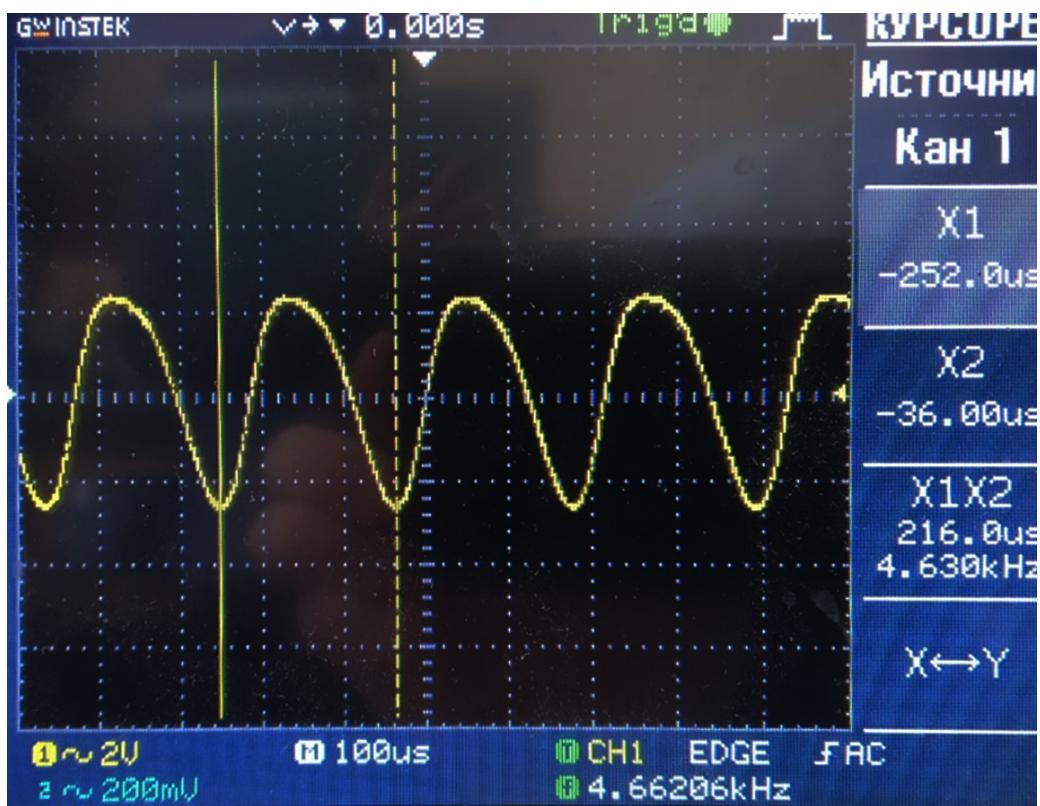
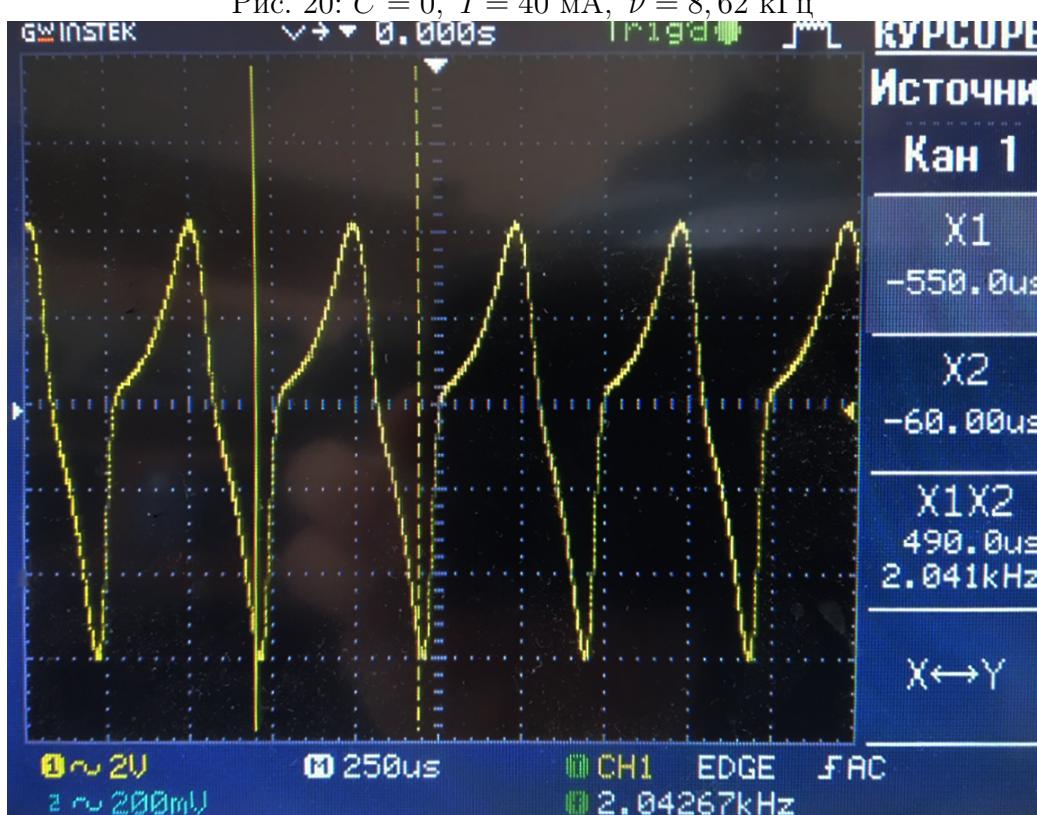
Рис. 18:  $C_2$ ,  $I = 100$  мА,  $\nu = 4,63$  кГцРис. 19:  $C_2$ ,  $I = 100$  мА,  $\nu = 3,43$  кГц

Рис. 20:  $C = 0$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 8,62$  кГцРис. 21:  $C = 0$ ,  $I = 40$  мА,  $\nu = 2,04$  кГц

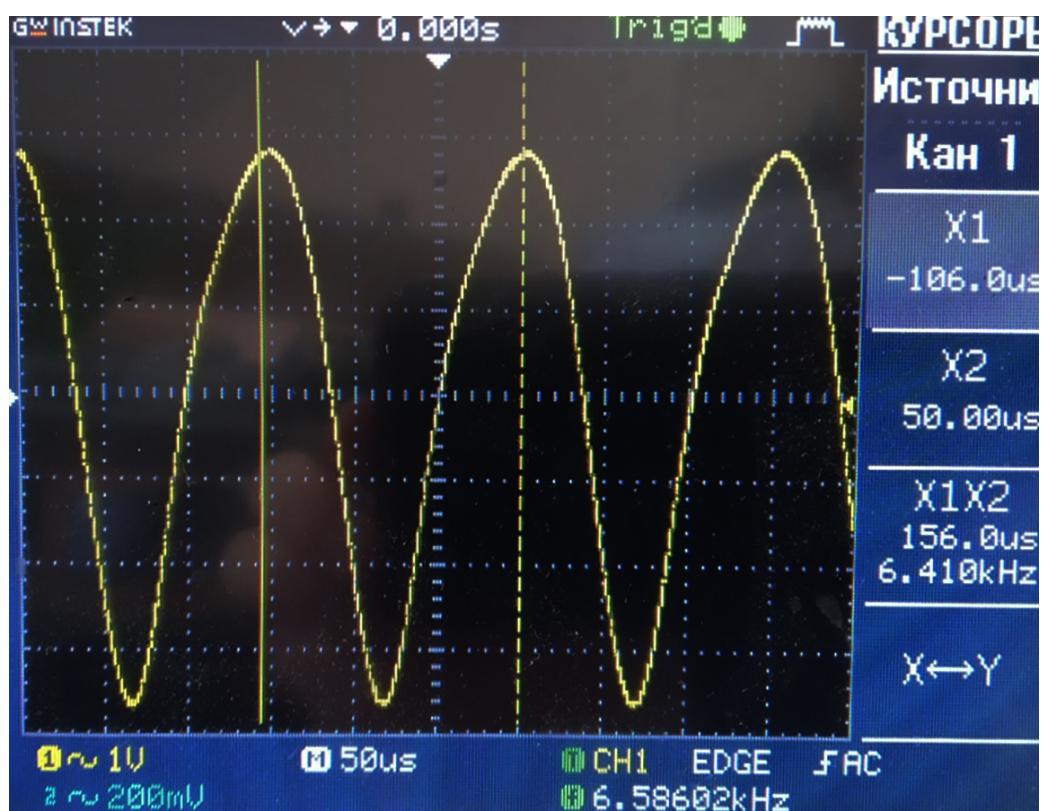


Рис. 22:  $C = 0$ ,  $I = 100$  мА,  $\nu = 6,58$  кГц

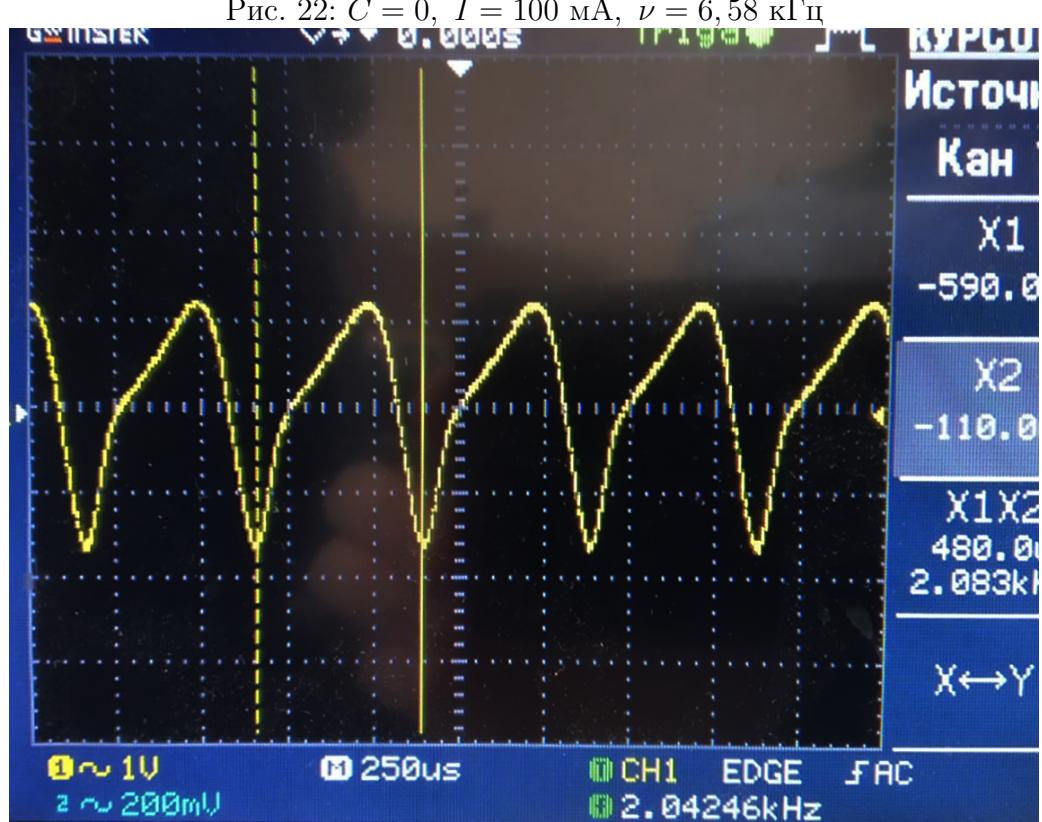


Рис. 23:  $C = 0$ ,  $I = 100$  мА,  $\nu = 2,04$  кГц

### 3.3 Зависимость амплитуды колебаний от частоты

Таблицы с данными:

Зависимость $U_{\text{вых}}$ от $\nu$ при $U_{\text{н}} = 2,1 \text{ В}$					
$\nu \cdot 10^2$ , Гц	$\omega$ , рад/с	$U_{\text{вых}}$ , В	$\nu \cdot 10^2$ , Гц	$\omega$ , рад/с	$U_{\text{вых}}$ , В
111,5	70057,5	0,20	91,1	57239,8	2,88
110,7	69554,9	0,40	90,0	56548,7	2,96
109,7	68926,5	0,60	88,0	55292,0	3,06
108,5	68172,5	0,84	86,0	54035,4	3,31
107,0	67230,1	1,07	85,0	53407,1	3,51
106,2	66727,4	1,19	83,7	52590,3	3,73
104,5	65659,3	1,42	83,3	52338,9	3,82
103,3	64905,3	1,60	82,2	51647,8	4,03
102,0	64088,5	1,80	81,3	51082,3	4,19
100,6	63208,8	2,03	79,3	49825,7	4,28
99,7	62643,4	2,19	79,0	49637,2	4,20
98,1	61638,0	2,40	78,4	49260,2	3,98
96,1	60381,4	2,61	78,2	49134,5	0
92,4	58056,6	2,79	-	-	-

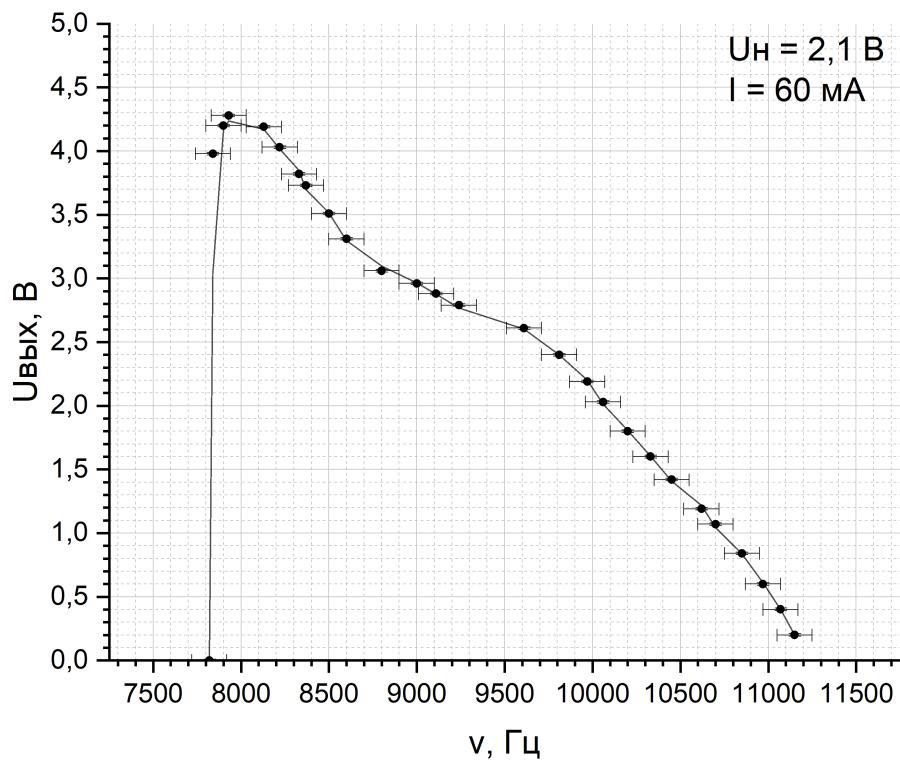
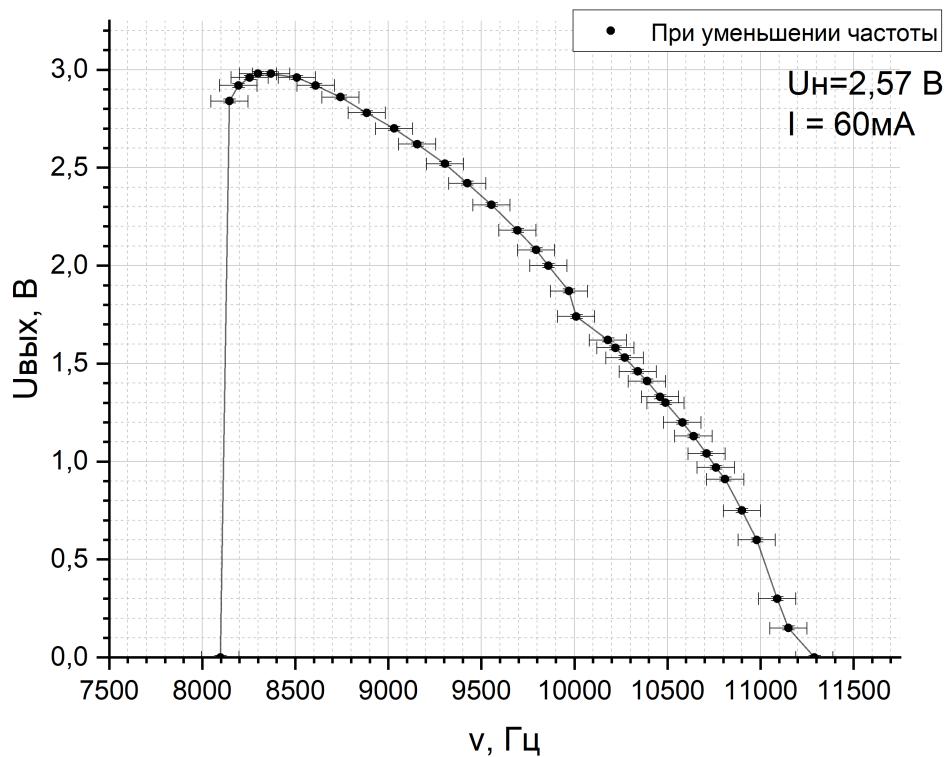
Зависимость $U_{\text{вых}}$ от $\nu$ при $U_{\text{н}} = 3 \text{ В}$					
$\nu \cdot 10^2$ , Гц	$\omega$ , рад/с	$U_{\text{вых}}$ , В	$\nu \cdot 10^2$ , Гц	$\omega$ , рад/с	$U_{\text{вых}}$ , В
11470	72068,13547	0,1	10010	62894,68492	2,14
11410	71691,14435	0,24	9900	62203,53454	2,16
11370	71439,81694	0,4	9800	61575,21601	2,21
11300	70999,99397	0,65	9600	60318,57895	2,27
11250	70685,83471	0,8	9418	59175,03922	2,28
11120	69869,02062	1,1	9300	58433,62336	2,32
11060	69492,0295	1,22	9213	57886,98624	2,34
10950	68800,87911	1,41	9100	57176,9863	2,43
10810	67921,23317	1,64	9020	56674,33147	2,6
10700	67230,08279	1,8	8960	56297,34035	2,69
10630	66790,25982	1,9	8870	55731,85367	2,77
10490	65910,61387	2,07	8810	55354,86256	2,85
10400	65345,12719	2,14	8770	55103,53514	0,02
10160	63837,16272	2,18	8540	53658,40252	0,02
10090	63397,33975	2,15			

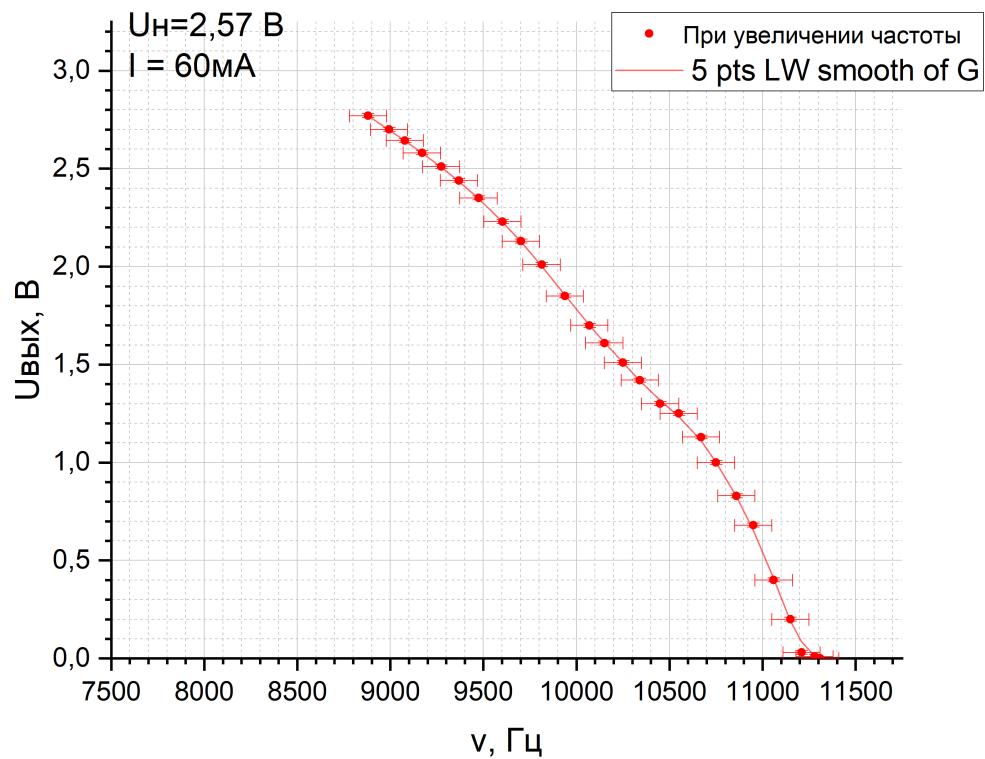
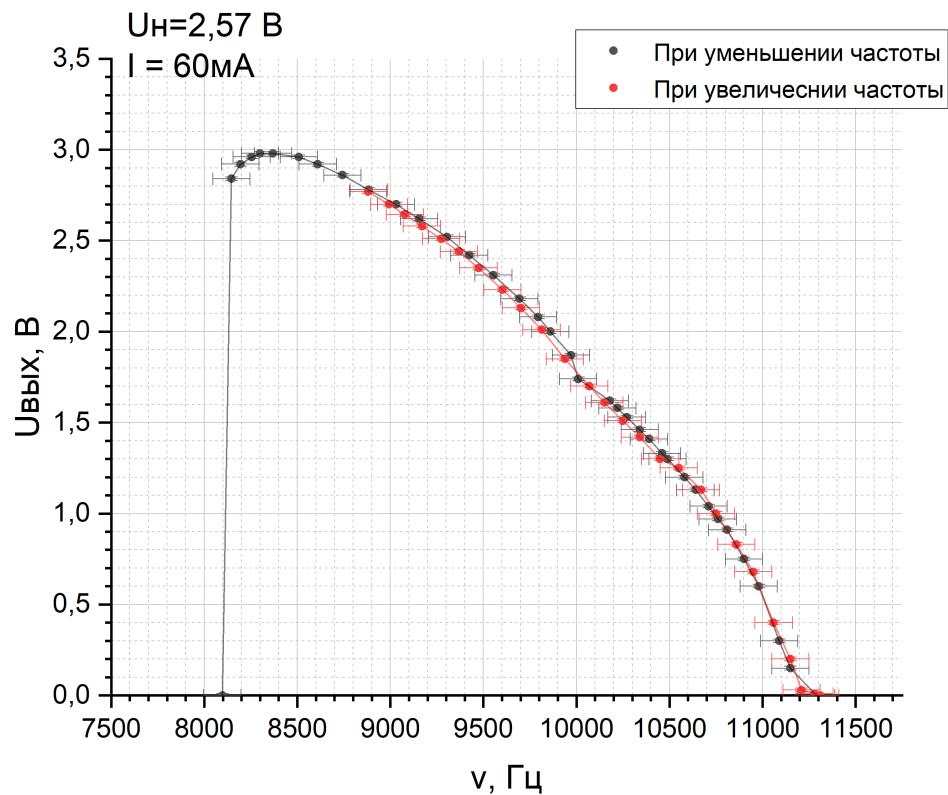
Зависимость $U_{\text{вых}}$ от $\nu$ при $U_{\text{н}} = 2,57 \text{ В}$					
$\nu \cdot 10^2$ , Гц	$\omega$ , рад/с	$U_{\text{вых}}$ , В	$\nu \cdot 10^2$ , Гц	$\omega$ , рад/с	$U_{\text{вых}}$ , В
11290	70937,16212	0	8300	52150,43805	2,98
11150	70057,51618	0,15	8255	51867,69471	2,96
11090	69680,52506	0,3	8194	51484,42041	2,92
10980	68989,37467	0,6	8146	51182,82751	2,84
10900	68486,71985	0,75	8097	50874,95143	0
10810	67921,23317	0,91	8880	55794,68553	2,77
10760	67607,07391	0,97	8993	56504,68547	2,7
10710	67292,91464	1,04	9078	57038,75622	2,644
10640	66853,09167	1,13	9170	57616,80927	2,58
10580	66476,10055	1,2	9273	58263,97735	2,51
10490	65910,61387	1,3	9368	58860,87996	2,44
10460	65722,11831	1,33	9474	59526,8976	2,35
10390	65282,29534	1,41	9603	60337,4285	2,23
10340	64968,13608	1,46	9702	60959,46385	2,13
10270	64528,3131	1,53	9813	61656,89742	2,01
10220	64214,15384	1,58	9938	62442,29558	1,85
10180	63962,82643	1,62	10070	63271,67604	1,7
10010	62894,68492	1,74	10150	63774,33087	1,61
9970	62643,35751	1,87	10250	64402,6494	1,51
9860	61952,20713	2	10340	64968,13608	1,42
9795	61543,80008	2,08	10450	65659,28646	1,3
9694	60909,19837	2,18	10550	66287,60499	1,25
9555	60035,83561	2,31	10670	67041,58723	1,13
9424	59212,73833	2,42	10750	67544,24205	1
9305	58465,03928	2,52	10860	68235,39244	0,83
9156	57528,84467	2,62	10950	68800,87911	0,68
9031	56743,44651	2,7	11060	69492,0295	0,4
8884	55819,81827	2,78	11150	70057,51618	0,2
8743	54933,88914	2,86	11210	70434,50729	0,03
8610	54098,22549	2,92	11280	70874,33026	0,01
8508	53457,34059	2,96	11310	71062,82582	0
8370	52590,26102	2,98			

Погрешности	
$\Delta U_{\text{вых}}$ , В	$\Delta \nu$ , Гц
0,01	100

Абсолютная погрешность частоты накачки ( $\nu$ ) определяется по цене деления:  $\Delta \nu = 100$  Гц.

А абсолютная погрешность вольтметра не превышает 0,01 В.

Рис. 24: при  $U_h = 2,1 \text{ В}$ Рис. 25: при  $U_h = 2 \text{ В}$

Рис. 26: при  $U_{\text{h}} = 2 \text{ В}$ Рис. 27: при  $U_{\text{h}} = 2 \text{ В}$

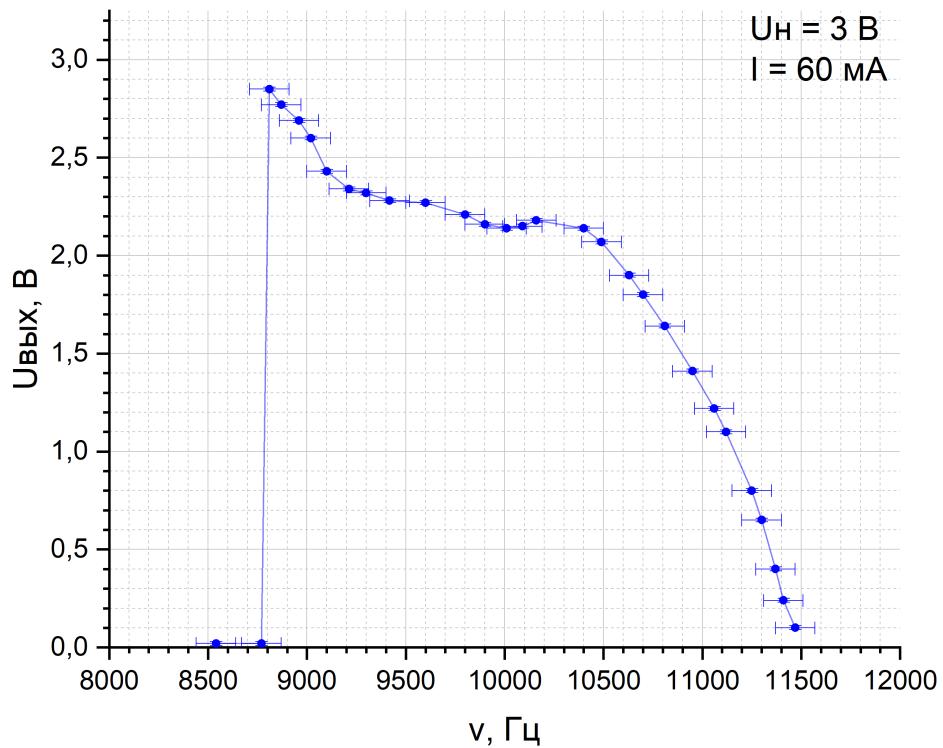
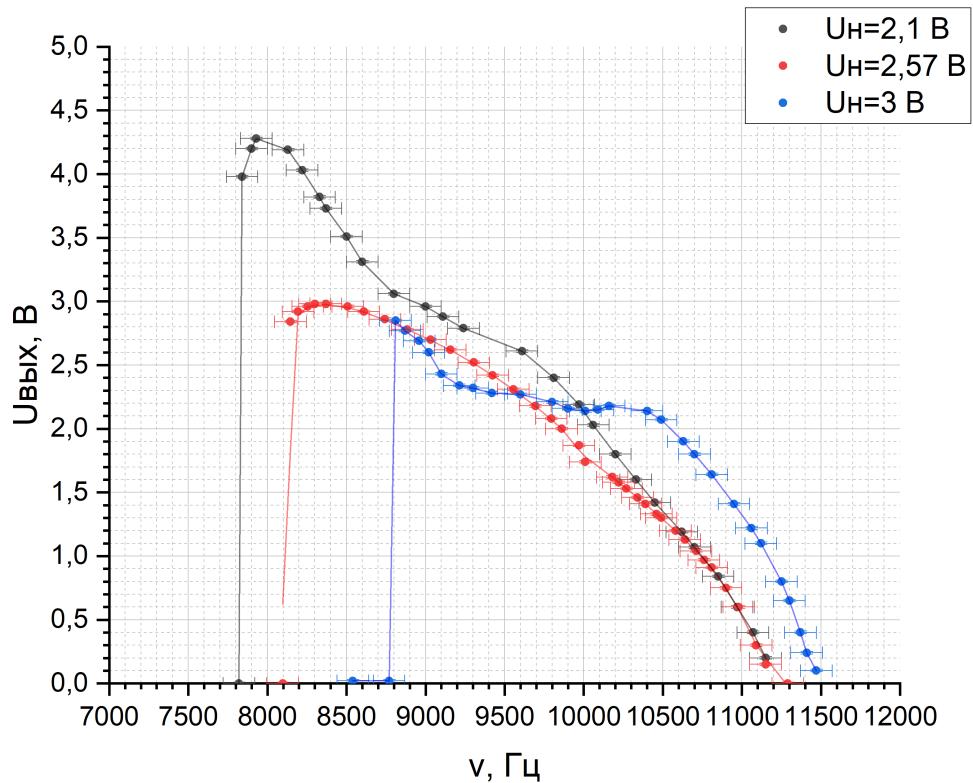
Рис. 28: при  $U_{\text{H}} = 3 \text{ В}$ 

Рис. 29: все на одном графике.

### 3.4 Зависимость амплитуды колебаний от напряжения накачки

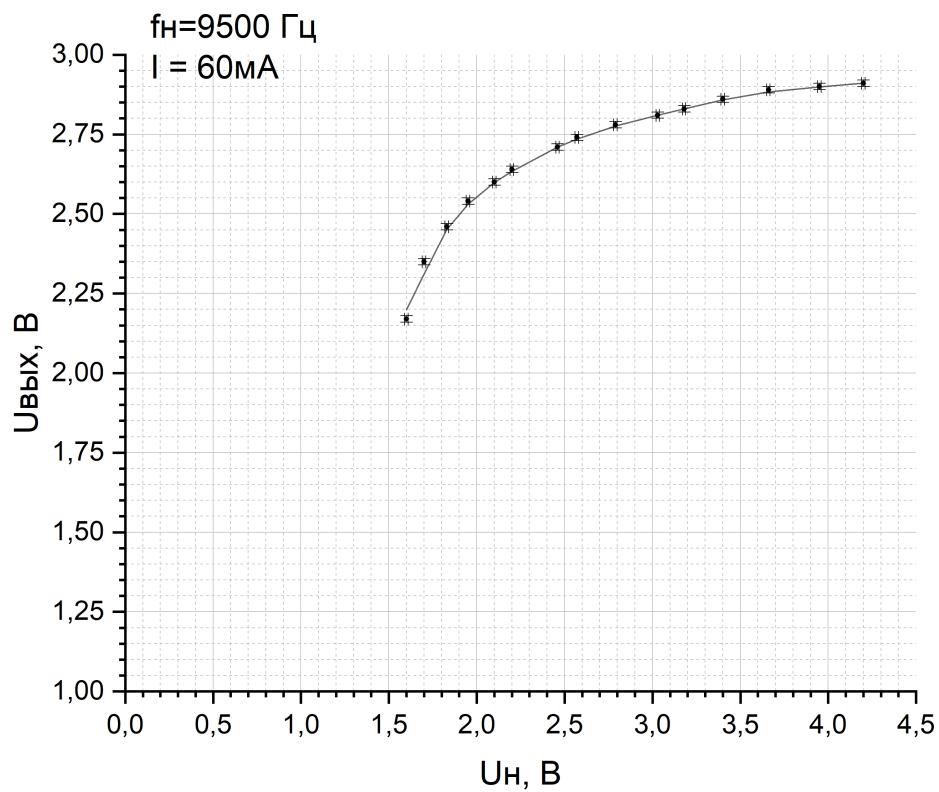
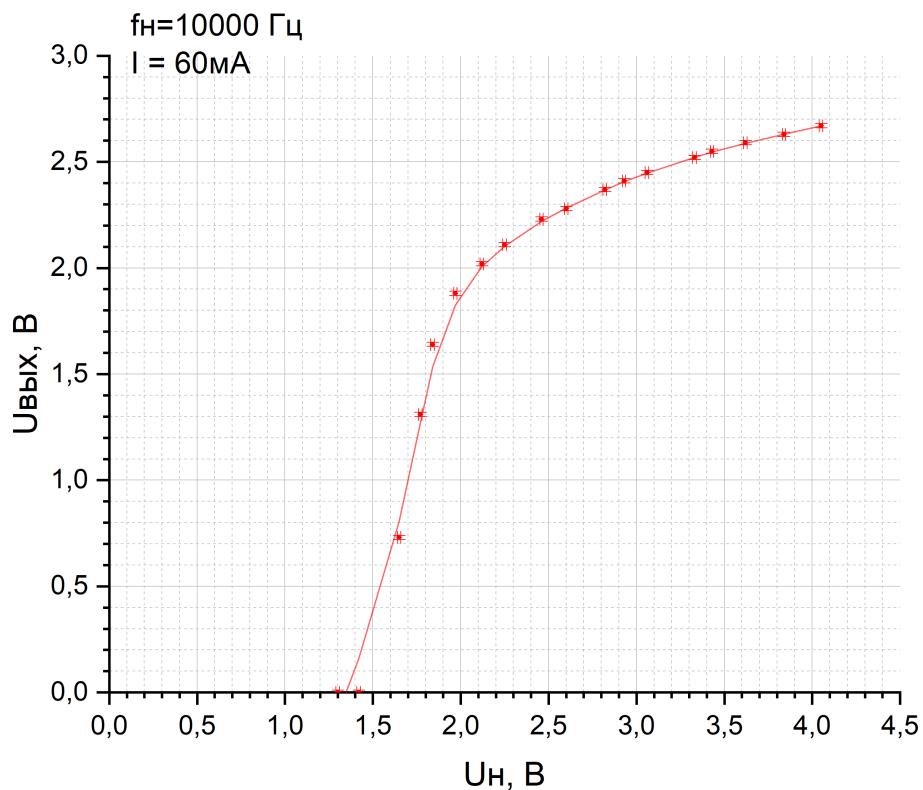
Таблицы с данными:

Зависимость $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{н}}$ при $\nu = 9500$ Гц			
$U_{\text{н}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В	$U_{\text{н}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В
1,41	0	2,20	2,64
1,5	0	2,46	2,71
1,6	0	2,57	2,74
1,76	0	2,79	2,78
1,88	0	3,03	2,81
1,6	2,17	3,18	2,83
1,7	2,35	3,40	2,86
1,83	2,46	3,66	2,89
1,95	2,54	3,95	2,9
2,1	2,6	4,20	2,91

Зависимость $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{н}}$ при $\nu = 10000$ Гц			
$U_{\text{н}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В	$U_{\text{н}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В
1,3	0	2,6	2,28
1,42	0	2,82	2,37
1,65	0,73	2,93	2,41
1,77	1,31	3,06	2,45
1,84	1,64	3,33	2,52
1,97	1,88	3,43	2,55
2,12	2,02	3,62	2,59
2,25	2,11	3,84	2,63
2,46	2,23	4,05	2,67

Зависимость $U_{\text{вых}}$ от $U_{\text{н}}$ при $\nu = 10500$ Гц			
$U_{\text{н}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В	$U_{\text{н}}$ , В	$U_{\text{вых}}$ , В
1,34	0,09	2,65	1,7
1,48	0,34	2,9	1,85
1,55	0,46	3,03	1,92
1,75	0,78	3,16	1,98
1,86	0,94	3,37	2,07
2,01	1,13	3,56	2,15
2,1	1,23	3,65	2,18
2,18	1,32	3,91	2,26
2,33	1,46	4,1	2,31
2,49	1,59	4,32	2,37

Погрешности	
$\Delta U_{\text{вых}}$ , В	$\Delta U_{\text{н}}$ , В
0,01	0,01

Рис. 30: при  $\nu = 9500 \text{ Гц}$ Рис. 31: при  $\nu = 10000 \text{ Гц}$

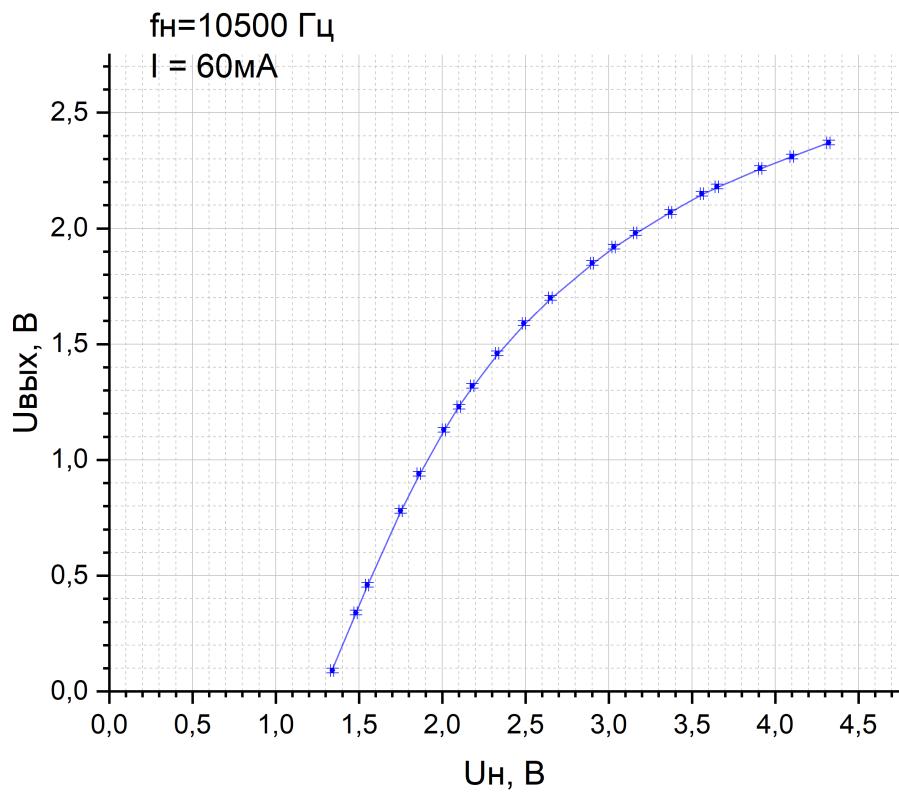
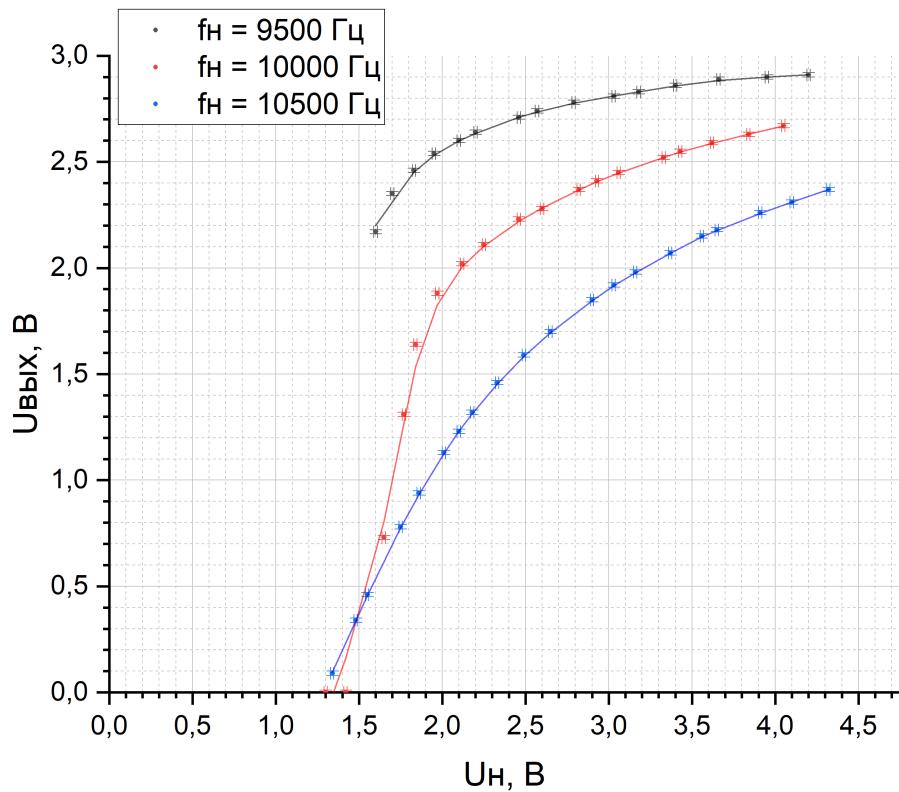
Рис. 32: при  $\nu = 10500 \text{ Гц}$ 

Рис. 33: все на одном графике.

### 3.5 Исследование модели параметрического усилителя

Ток смещения  $I = 60$  мА, при этом амплитуда накачки равна нулю. К клеммам "вход" подключён генератор сигнала ( $f_{\text{в}}$ ), настроенный на частоту контура. Затем частоту накачки устанавливаем  $\nu \approx 2f_k \equiv 2f_n$  и плавно вводим накачку, не доводя до самовозбуждения.

Оценить наибольший коэффициент усиления можно как отношение амплитуд колебаний в контуре с накачкой и без накачки.

#### Полученные результаты:

**1 опыт:**  $U_{\text{max}} = 0,126$  В,  $U_{\text{min}} = 0,027$  В,  $\nu \equiv f_n = 10420$  Гц,  $f_{\text{в}} = 5050$  Гц.

$$k = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} = \frac{0,126}{0,027} \approx 4,67$$

**2 опыт:**  $U_{\text{max}} = 0,243$  В,  $U_{\text{min}} = 0,029$  В,  $\nu \equiv f_n = 10420$  Гц,  $f_{\text{в}} = 5100$  Гц.

$$k = \frac{0,243}{0,029} \approx 8,38$$

**3 опыт:**  $U_{\text{max}} = 0,180$  В,  $U_{\text{min}} = 0,027$  В.

$$k = \frac{0,180}{0,027} \approx 6,67$$

**4 опыт:**  $U_{\text{max}} = 0,157$  В,  $U_{\text{min}} = 0,028$  В.

$$k = \frac{0,157}{0,028} \approx 5,61$$

Из всех опытов:  $k_{\text{max}} = 8,38$ .

## 4 Вывод

Выполнив лабораторную работу, мы:

- 1) Экспериментально получили зависимость индуктивности от силы тока  $L(I)$ ;
- 2) Наблюдали нелинейные искажения сигнала на осциллографе. В ходе эксперимента выяснилось, что:
  - при одном и том же токе смещения  $I$  у конденсатора с меньшей емкостью ( $C_1$ ) искажения заканчиваются позже, чем у конденсатора с большей емкостью ( $C_2$ );
  - при увеличении тока смещения, частоты, при которых искажения заканчиваются для обоих конденсаторов, также увеличиваются;
- 3) Экспериментально получили зависимости амплитуды выходного напряжения от частоты накачки  $U_{\text{вых}}(\nu)$  при разных напряжениях накачки, наблюдали параметрический резонанс в основной зоне;
- 4) Экспериментально получили зависимости амплитуды выходного напряжения от амплитуды накачки  $U_{\text{вых}}(U_{\text{н}})$  при разных значениях частоты накачки;
- 5) Смогли получить параметрический резонанс в основной и второй зонах при 3 разных напряжениях накачки:

$U_{\text{н}}, \text{ В}$	2,10	2,53	3,00
Начало 1 зоны, кГц	11,2	11,35	11,47
Конец 1 зоны, кГц	7,8	7,62	8,64
Начало 2 зоны, кГц	5,26	5,22	8,15
Конец 2 зоны, кГц	4,27	-	-

- 6) Исследовали модель параметрического усилителя, максимальный коэффициент усиления, полученный в ходе эксперимента:  $k_{\text{max}} = 8,38$ .