

Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского
Радиофизический факультет

Кафедра теории колебаний

**Отчёт по лабораторной работе
Фазовая плоскость лампового генератора**

Выполнили (430гр):
Горюнов О.А., Плешков Д.С., Сиднев А.А.

2022 г.

Содержание

Протокол	3
1 Цель работы	5
2 Теоретическая часть	5
2.1 Исходные и укороченные уравнения	5
2.2 Стационарные режимы работы генератора	7
2.3 Схема установки	12
3 Практическая часть	13
3.1 Мягкий режим работы генератора	13
3.1.1 Снятие бифуркационной диаграммы	13
3.1.2 Фазовые траектории при различных начальных условиях	14
3.1.3 Получение квапериодического процесса и определение декремента затухания	15
3.1.4 Получение апериодического процесса	16
3.2 Жёсткий режим работы генератора	17
3.2.1 Снятие бифуркационной диаграммы	17
3.2.2 Фазовые траектории при различных начальных условиях	18
3.3 Сложно-жёсткий режим работы генератора	20
3.3.1 Снятие бифуркационной диаграммы	20
3.3.2 Фазовые траектории при различных начальных условиях	21
4 Вывод	23

Протокол

1. Снятие бифуркационной диаграммы в мягком режиме работы генератора

M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$
30	0	40	30,5
31	4,5	41	33,5
32	6,5	42	35
33	10	43	37,5
34	11,5	44	38,5
35	16	45	41
36	20	46	42,5
37	23,5	47	43,5
38	25	48	44,5
39	27,5		

Снятие шага спирали для определения декремента затухания:

$M = 25^\circ$	$M = 20^\circ$
$A_1 = 15$	$A_1 = 15,5$
$A_2 = 13$	$A_2 = 12,5$
$A_3 = 11,5$	$A_3 = 10,25$
$A_4 = 10$	$A_4 = 8,5$
$A_5 = 8,75$	$A_5 = 7$
$A_6 = 7,75$	$A_6 = 6$

2. Снятие бифуркационной диаграммы в жёстком режиме работы генератора

M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$
53	27,5	60	43,5	53	22,5
54	31	62	45	54	16,12
55	36	63	45	55	16
56	38	64	45,5	56	15,2
57	39,5	65	46	57	14
58	40,5	67	47	58	12,7
59	41,5	70	48	59	10

3. Снятие бифуркационной диаграммы в сложно-жёстком режиме работы генератора

M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$
57	0	64	12	71	41,5	65	13,5
58	7	65	12,5	72	42	64	12
59	7,5	66	13,5	73	42,5	Снятие неустойчивого цикла	-
60	8,5	67	14	69	39,5	70	21,25
61	10	68	15	68	37,5	69	21,6
62	10,5	69	15,5	67	36,5	68	22,5
63	11,5	70	40	66	35	67	28,1

1 Цель работы

Целью работы является изучение различных режимов возбуждения лампового генератора и установление зависимости амплитуды и частоты автоколебаний от параметров системы. А также теоретическое рассмотрение метода Ван-дер-Поля.

2 Теоретическая часть

2.1 Исходные и укороченные уравнения

В работе исследуется LC -генератор с контуром в цепи сетки (рис.1), относящийся к разряду квазисинусоидальных автоколебательных систем.

Отправной точкой теоретического исследования этой системы являются уравнения Кирхгофа, которые, с учётом обозначений, принятых на рис.1, запишутся в следующем виде:

$$L \frac{di}{dt} + Ri + U = M \frac{di_a}{dt} - E_0 \quad (2.1)$$

$$i = C \frac{dU}{dt} + i_c,$$

где i_a и i_c - анодные и сеточные токи лампы, зависящие в общем случае от анодного и сеточного напряжений. В дальнейшем будем учитывать их зависимость только от сеточных напряжений, т.е. пренебрежем реакцией анода. Качественный вид анодно-сеточной и сеточной характеристик приведен на рис.2. В проводимом рассмотрении эти нелинейные функции будут аппроксимироваться полиномами.

Исключив из системы (2.1) ток и введя новые переменные

$$x = U + E_0, \quad \tau = \frac{t}{\sqrt{LC}}, \quad (2.2)$$

запишем исходную систему (2.1) в виде одного уравнения второго порядка

$$\ddot{x} + x = \frac{d}{d\tau} [-\delta x + \sigma f_1(x)] - f_2(x) \quad (2.3)$$

Здесь $\sigma = \frac{M}{\sqrt{LC}} > 0$, $\alpha = \frac{L}{M}$, $\delta = \frac{R\sqrt{C}}{\sqrt{L}}$, $f_1 = (i_a - ai_c)$, $f_2 = Ri_c$. Заметим, что функция $f_1(x)$ включает в себя разность анодного и сеточного токов, но т.к. сеточный ток много меньше

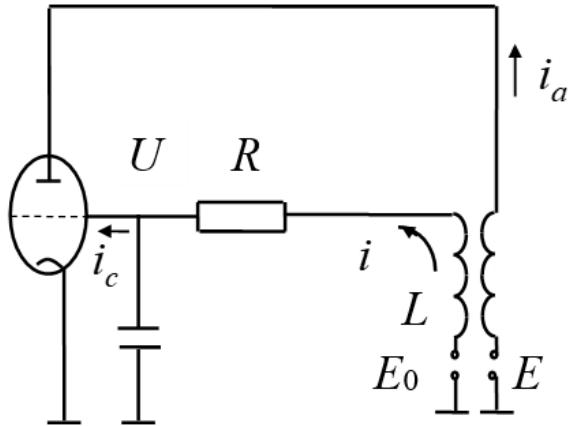


Рис. 1:

анодного, то не будет большой ошибкой считать $f_1 = i_a$. Согласно (2.3), в случае малых линейных потерь и нелинейностей рассматриваемая система будет близка к линейной и консервативной. К такой системе может быть применён метод медленно меняющихся амплитуд.

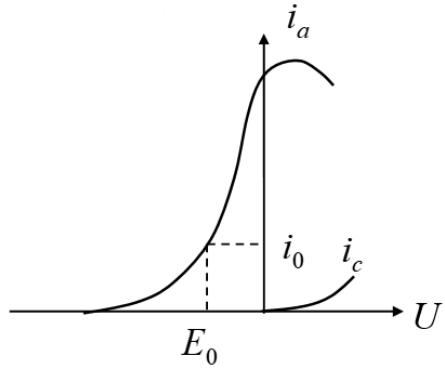


Рис. 2:

Следуя этому методу, решение (2.3) будем искать в виде

$$x = ze^{j\tau} + z^*e^{-j\tau}, \quad (2.4)$$

$$\dot{x} = j(ze^{j\tau} - z^*e^{-j\tau}).$$

Заметим, что второе равенство в (2.4) предполагаем выполнение условия $\dot{z}e^{j\tau} + \dot{z}^*e^{-j\tau} = 0$. Подставляя (2.4) в уравнение (2.3) и усредняя результат подстановки по периоду, получим, с учётом медленности изменения комплексной амплитуды z , укороченные уравнения

$$2j\dot{z} = -j\delta z + j\delta\kappa_1(z, z^*) - \kappa_2(z, z^*), \quad (2.5)$$

где

$$\kappa_1(z, z^*) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f_1 e^{-j\tau} dt, \quad (2.6)$$

$$\kappa_2(z, z^*) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f_2 e^{-j\tau} dt$$

Аппроксимируя f_1 и f_2 степенными рядами

$$f_1(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a_n x^n}{n!}, \quad f_2(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{b_n x^n}{n!}, \quad (2.7)$$

найдём для κ_1 и κ_2 выражения вида

$$\kappa_1(z, z^*) = z\bar{f}_1(|z|^2), \quad \kappa_2(z, z^*) = z\bar{f}_2(|z|^2), \quad (2.8)$$

где

$$\bar{f}_1(|z|^2) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{a_{2m+1}(|z|^2)^m}{m!(m+1)!}, \quad \bar{f}_2(|z|^2) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{b_{2m+1}(|z|^2)^m}{m!(m+1)!}. \quad (2.9)$$

Полагая в уравнении (2.5) $z = \rho e^{j\varphi}$, $z^* = \rho e^{-j\varphi}$, перейдём от комплексных переменных z , z^* к действительным модулю ρ и фазе φ :

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -\frac{1}{2} \left(\delta - \sigma \bar{f}_1(\rho^2) \right) \rho, \\ \varphi &= \frac{1}{2} \bar{f}_2(\rho^2). \end{aligned} \quad (2.10)$$

Из укороченных уравнений (2.10) видно, что условия возбуждения генератора и амплитуда установившихся автоколебаний определяются видом функции \bar{f}_1 , т.е. в основном анодно-сеточной характеристикой лампы; поправка к частоте определяется функцией \bar{f}_2 , т.е. сеточной характеристикой. Для отыскания установившихся (стационарных) значений амплитуды автоколебаний достаточно найти устойчивые состояния равновесия первого из уравнений системы (2.10). При этом из второго уравнения этой системы найдём поправку к частоте автоколебаний

$$\Delta\omega = \bar{f}_2(\bar{\rho}^2)/2 \quad (2.11)$$

задающую величину, на которую частота колебаний генератора будет отличаться от частоты колебательного контура. Тем самым, в режиме установившихся автоколебаний будем иметь

$$\varphi = \frac{\bar{f}_2(\bar{\rho}^2)}{2} \tau + \varphi_0 \quad (2.12)$$

и

$$x = 2\bar{\rho} \cdot \cos(\tau + \varphi) = 2\bar{\rho} \cdot \cos \left[\left(1 + \frac{\bar{f}_2(\bar{\rho})}{2} \right) \tau + \varphi_0 \right] \quad (2.13)$$

2.2 Стационарные режимы работы генератора

Прежде чем переходить к изучению различных режимов работы лампового генератора, выясним, при каких условиях справедлива та или иная аппроксимация нелинейной характеристики лампы. Как видно из (2.9), на динамику генератора и стационарные режимы его работы влияют только нечетные члены степенного ряда нелинейной характеристики $f_1(x)$. Выделим из нелинейной функции нечетную ее часть с помощью соотношения

$$f_H(x) = \frac{f(x) - f(-x)}{2} \quad (2.14)$$

Вид нечетной части характеристики, а, следовательно, и возможная её аппроксимация зависят от выбора рабочей точки, положение которой определяется постоянным смещением на сетке лампы. Рассмотрим возможные аппроксимации нелинейной функции и, как следствие, различные режимы работы генератора.

1. Напряжение смещения E_0 на управляющей сетке лампы (рабочая точка) выбрано так, что нечетная часть анодно-сеточной характеристики имеет вид, приведенный на рис.3. Это возможно в том случае, когда напряжение смещения задано в точке максимальной крутизны характеристики. При этом функцию достаточно точно можно представить в виде полинома третьей степени, причем аппроксимация будет справедлива для части кривой, обозначенной сплошной линией на рис.3:

$$f_1(x) = a_1 + \frac{a_2}{2}x^2 - \frac{a_3}{6}x^3 \quad (2.15)$$

Здесь и в дальнейшем все коэффициенты аппроксимирующего полинома будем считать положительными. Для аппроксимации (2.15) средняя крутизна анодно-сеточной характеристики, т.е. функция \bar{f}_1 примет вид:

$$\bar{f}_1(\rho^2) = a_1 - \frac{a_3}{2}\rho^2 \quad (2.16)$$

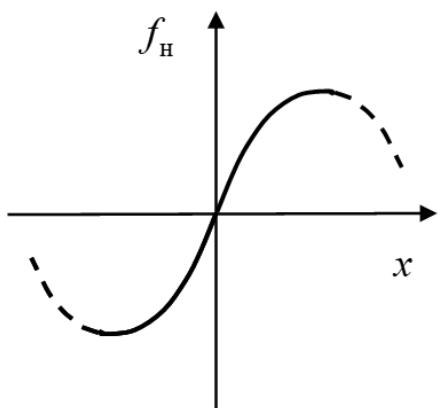


Рис. 3:

Их устойчивость определяется корнями следующего характеристического уравнения:

$$p = \frac{d}{d\rho} \left[-\rho \bar{F}(\rho) \right] \Big|_{\rho=\bar{\rho}} = -\bar{F}(\bar{\rho}) - \bar{\rho} \bar{F}'(\bar{\rho}) \quad (2.19)$$

Нетрудно видеть, что состояние системы с нулевым значением $\bar{\rho}$ (невозбужденный генератор) будет устойчивым при $\bar{F}(0) > 0$, т.е. при $\sigma < \delta/a_1$ и неустойчивым в противном случае. Второе стационарное состояние устойчиво, если $\bar{F}'(\bar{\rho}_2) = \sigma a_3 \bar{\rho}_2 > 0$, что выполняется при выбранных знаках коэффициентов. Выражение (2.19) определяет зависимость амплитуды колебаний от линейного декремента $\delta = R\sqrt{C/L}$, коэффициента связи $\sigma = M/\sqrt{LC}$, и коэффициентов аппроксимации анодно-сеточной характеристики a_1 и a_3 . Можно построить бифуркационные диаграммы, выражающие зависимость $\bar{\rho}^2$ от любого из перечисленных параметров. Зависимость $\bar{\rho}^2$ от параметра σ (величина обратной связи) приведена на рис.4, где точками обозначены устойчивые состояния, а крестиками -

В этом случае закон изменения амплитуды колебаний, согласно системе (2.10), будет определяться следующим уравнением:

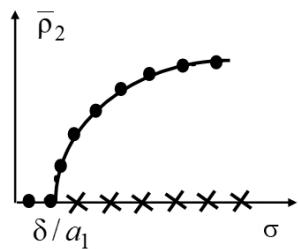
$$\dot{\rho} = -\rho \bar{F}(\rho) \quad (2.17)$$

где $\bar{F}(\rho) = [\delta - \sigma(a_1 - \frac{a_3}{2}\rho^2)]/2$. Приравнивая правую часть этого уравнения нулю, получим стационарные значения амплитуд колебаний:

$$\bar{\rho}_1 = 0, \quad \bar{\rho}_2 = \sqrt{\frac{2(-\delta + \sigma a_1)}{\sigma a_3}} \quad (2.18)$$

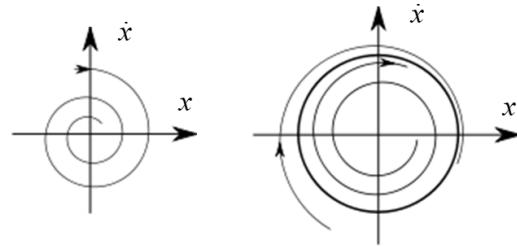
неустойчивые. Из приведенной диаграммы видно, что схема возбуждается при условии $\sigma > \delta/a_1$ или, если перейти к параметрам схемы, при $M > RC/a_1$. В этом неравенстве величина a_1 - крутизна анодно-сеточной характеристики в рабочей точке, иногда обозначаемая в литературе буквой S . Точка $\sigma = \delta/a_1$ на бифуркационной диаграмме называется точкой бифуркации - здесь качественно меняется поведение системы.

Фазовые портреты системы при $\sigma < \delta/a_1$ и $\sigma > \delta/a_1$ приведены на рис.5 а) и б). Как видно из рис.4 и рис.5 б), предельный цикл устанавливается при сколь угодно малых на-



а)

Рис. 4:



б)

Рис. 5:

чальных условиях, т.е. генератор обладает мягким режимом возбуждения по отношению к начальным условиям.

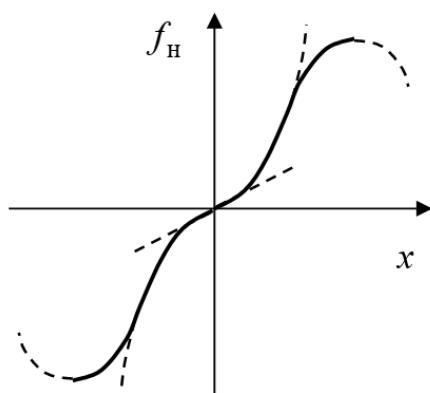


Рис. 6:

Термин “мягкий” может употребляться и в другом смысле - в качестве характеристики типа генератора, отличающегося плавным нарастанием установившегося значения амплитуды колебаний при медленном и непрерывном изменении параметра обратной связи. Приведенная на рис.4 бифуркационная диаграмма соответствует именно такому типу генератора.

2. Рабочая точка выбрана так, что нечетная часть характеристики имеет вид, приведенный на рис.6. Этому случаю чаще всего отвечают напряжения смещения,

близкие к напряжению отсечки лампы. При этом характеристику лампы необходимо аппроксимировать полиномом не ниже пятой степени. Такой аппроксимации соответствует средняя крутизна

$$\bar{f}_1(\rho^2) = a_1 + \frac{a_3}{2} \rho^2 - \frac{a_5}{12} \rho^4 \quad (2.20)$$

и, следовательно, (см. (2.10)) уравнение, определяющее стационарные значения амплиту-

ды автоколебаний принимает вид

$$\rho \left[\delta - \sigma \left(a_1 + \frac{a_3}{2} \bar{\rho}^2 - \frac{a_5}{12} \bar{\rho}^4 \right) \right] = 0 \quad (2.21)$$

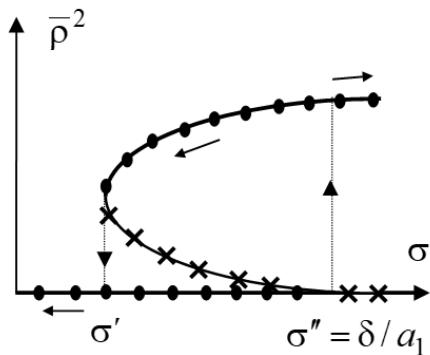


Рис. 7:

Бифуркационная диаграмма для этого случая приведена на рис.7. Из него следует, что при значениях параметра σ , лежащих в интервале $\sigma' < \sigma < \sigma''$, возникновение автоколебаний возможно лишь, если начальное значение ρ превышает соответствующее пороговое значение. В этом случае говорят о жёстком режиме возбуждения генератора. Бифуркационная диаграмма, изображённая на рис. 7, характеризуется гистерезисным эффектом установления и срыва автоколебаний при непрерывном

изменении параметра σ . Системы с таким видом бифуркационной диаграммы относят к жёсткому типу генераторов. Для них, согласно рис. 7, мягкое возбуждение возможно лишь при $\sigma > \sigma''$, т.е. за пределами области гистерезиса. На рис.8 а), б), и в) приведены фазовые портреты такого генератора для различных значений параметра σ .

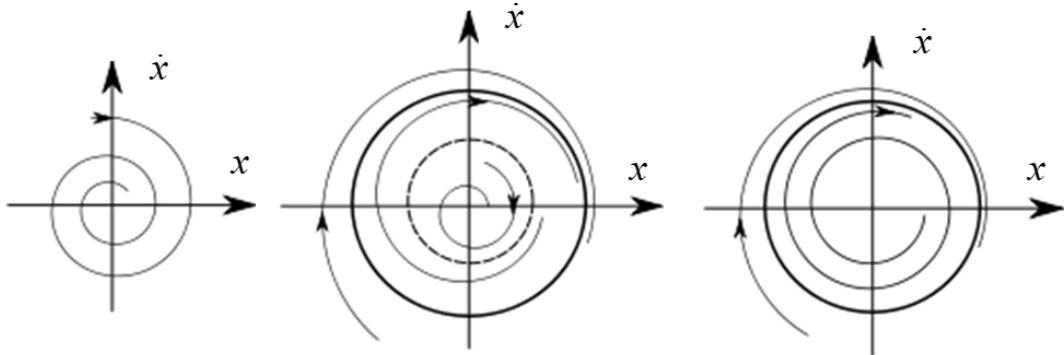
а) $\sigma < \sigma'$ б) $\sigma' < \sigma < \sigma''$ в) $\sigma > \sigma''$

Рис. 8:

3. Если рабочая точка выбрана при положительных напряжениях на сетке лампы, то график характеристики имеет вид, приведенный на рис. 9. Здесь для аппроксимации анодно-сеточной характеристики лампы необходимо использовать полином седьмой степени. В этом случае функция $\bar{f}_1(\bar{\rho}^2)$ и уравнение для определения ненулевых состояний равновесия запишутся в виде

$$\bar{f}_1(\bar{\rho}^2) = a_1 + \frac{a_3}{2} \bar{\rho}^2 - \frac{a_5}{12} \bar{\rho}^4 - \frac{a_7}{144} \bar{\rho}^6,$$

$$\delta - \sigma \left(a_1 + \frac{a_3}{2} \bar{\rho}^2 - \frac{a_5}{12} \bar{\rho}^4 - \frac{a_7}{144} \bar{\rho}^6 \right) = 0.$$

При этом возможны два варианта бифуркационной диаграммы $\bar{\rho}^2(\sigma)$, изображенный на рис. 10.

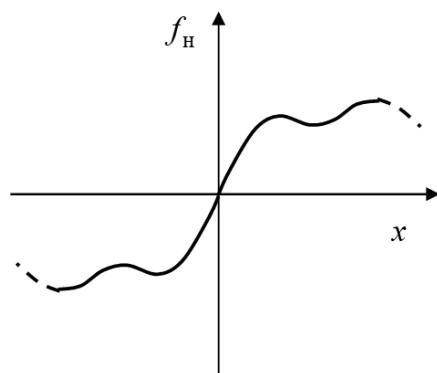


Рис. 9:

В варианте а) при уменьшении параметра σ происходит скачкообразный переход с большего предельного цикла на меньший и при дальнейшем уменьшении σ предельный цикл плавно исчезает. В варианте б) при уменьшении параметра σ до σ_0 колебания срываются до нуля.

Описанная разновидность автоколебательных систем относится к генераторам сложножесткого типа.

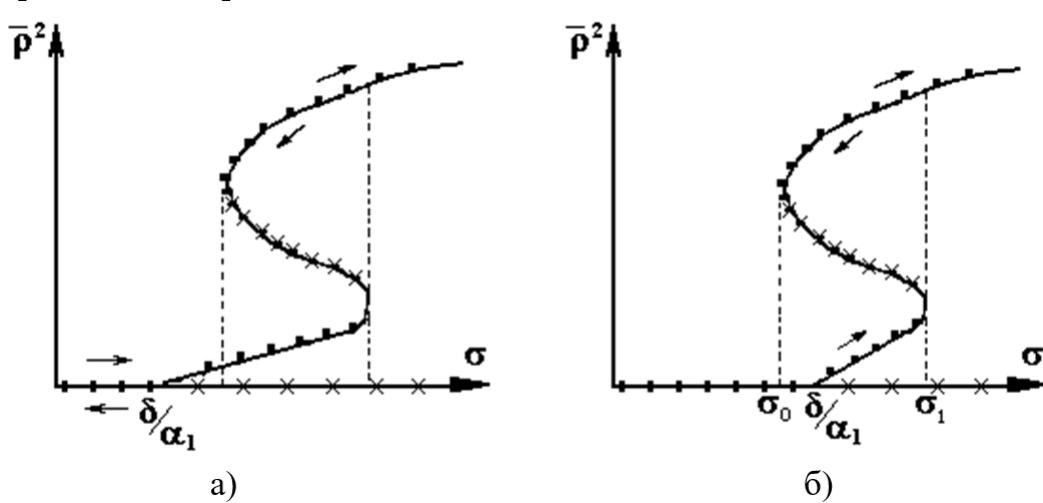


Рис. 10:

2.3 Схема установки

На рис. 11 приведена схема лабораторной установки. Описание её работы дано в пункте 2.1.

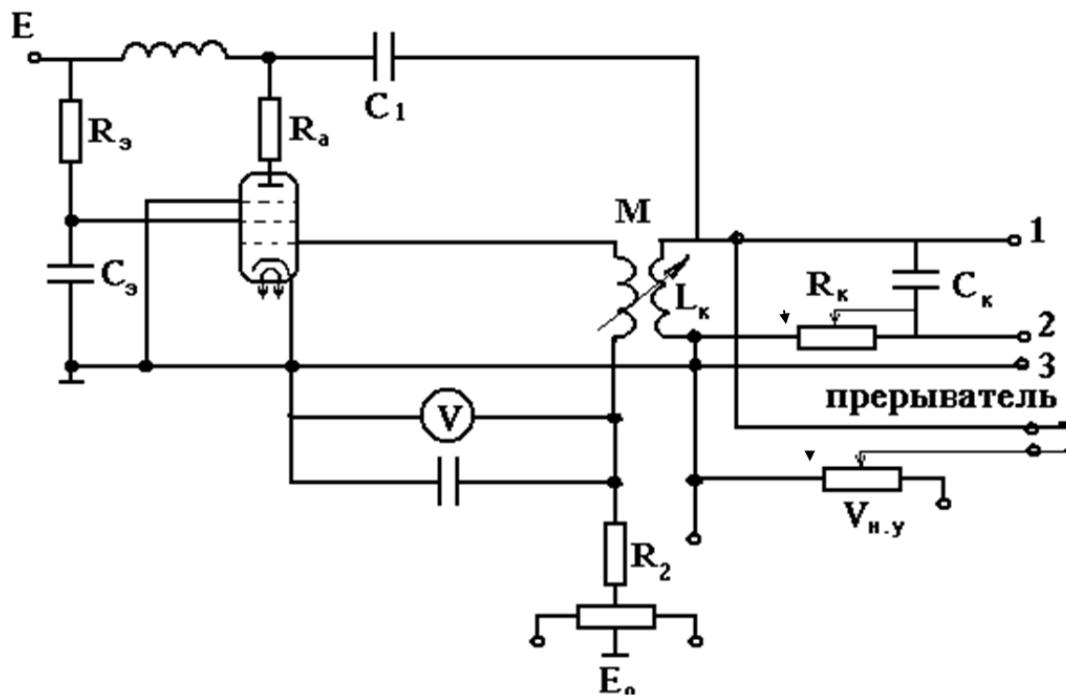


Рис. 11:

3 Практическая часть

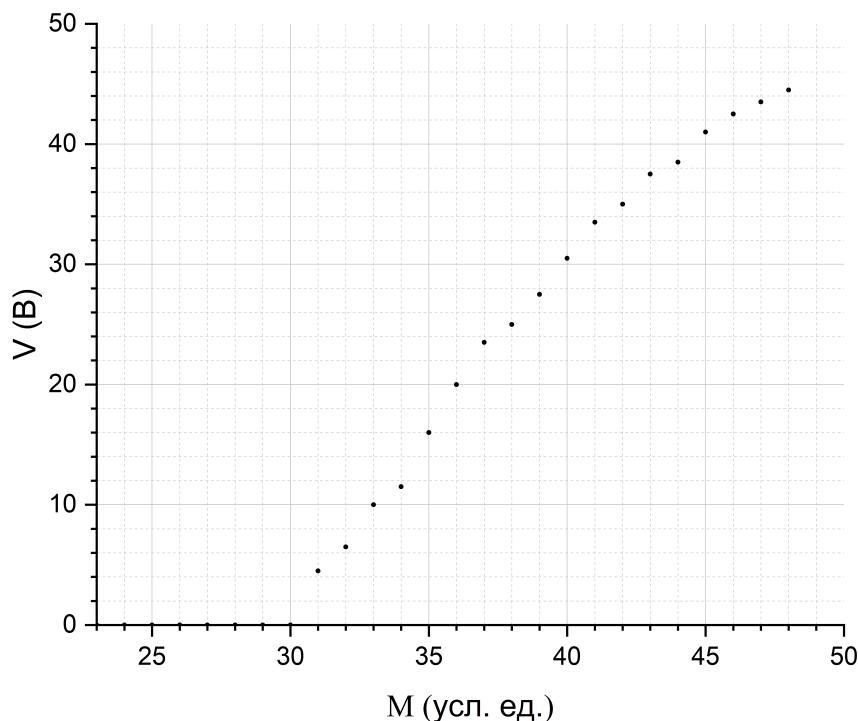
3.1 Мягкий режим работы генератора

3.1.1 Снятие бифуркационной диаграммы

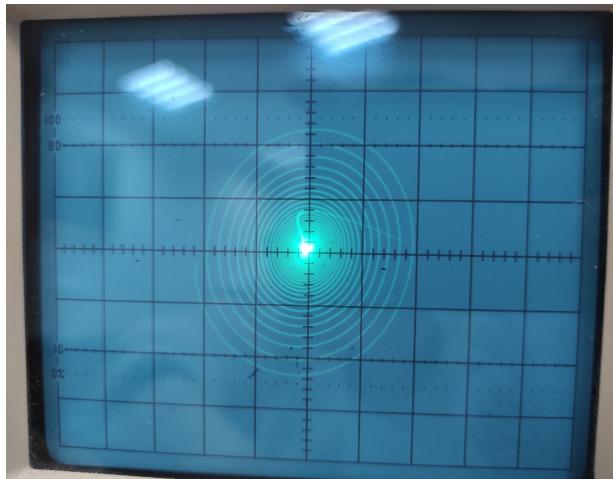
M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$
30	0	40	30,5
31	4,5	41	33,5
32	6,5	42	35
33	10	43	37,5
34	11,5	44	38,5
35	16	45	41
36	20	46	42,5
37	23,5	47	43,5
38	25	48	44,5
39	27,5		

Точка бифуркации $M = 31^\circ$.

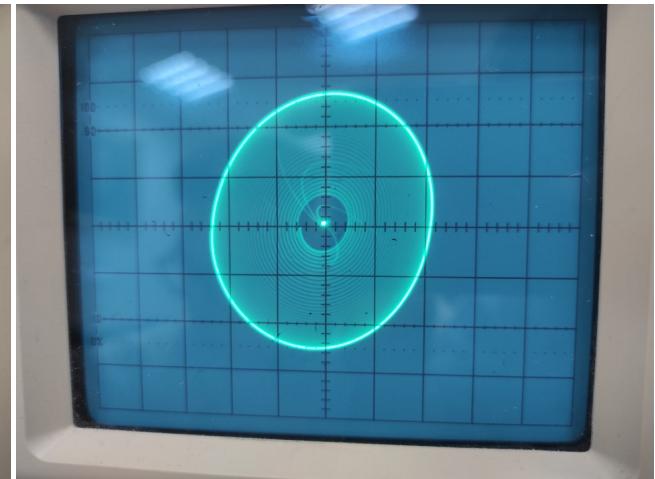
При снятии бифуркационной диаграммы, сначала проверили, что генератор находится в мягком режиме. Для этого изменяли параметр обратной связи сначала вправо (появляется устойчивый предельный цикл), затем обратно влево, и смотрим чтобы переход в точке бифуркации был плавным и переходил в точку.



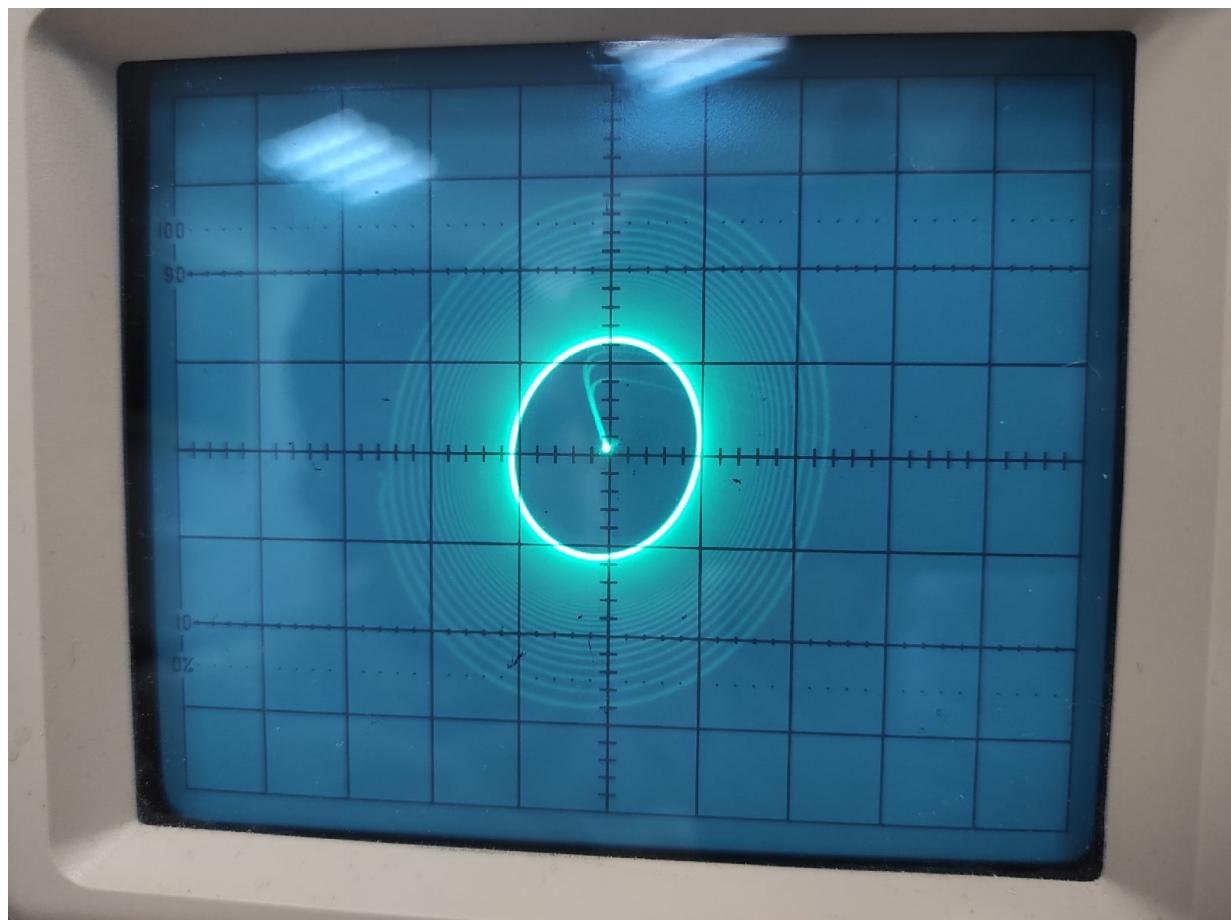
3.1.2 Фазовые траектории при различных начальных условиях



$M = 25^\circ$ (левее точки бифуркации, начальные условия больше 0, предельного цикла нет)

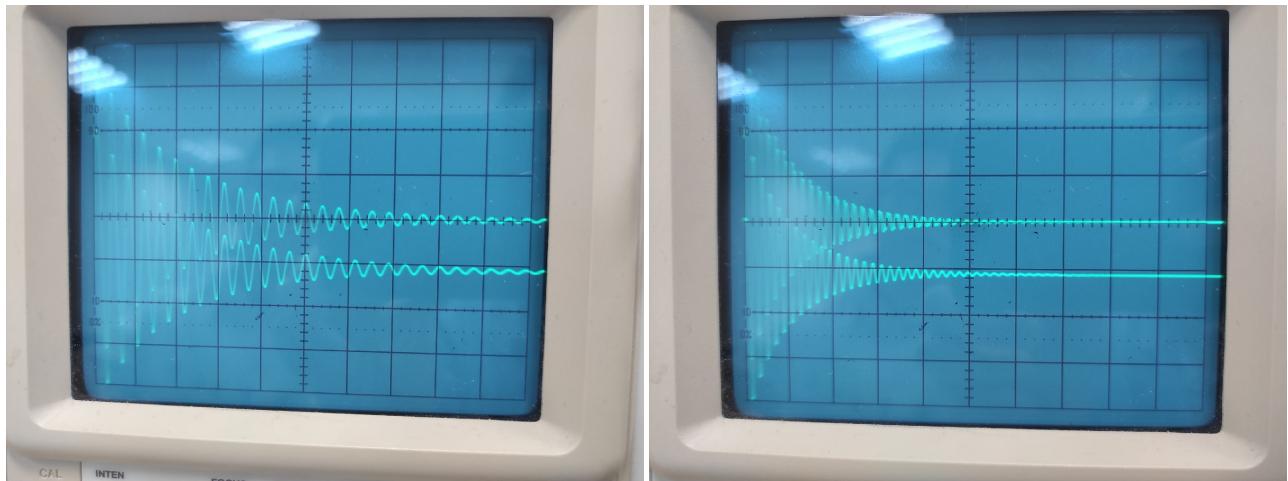


$M = 40^\circ$ (правее точки бифуркации, начальные условия ниже предельного цикла)



$M = 33^\circ$ (правее точки бифуркации, начальные условия выше предельного цикла)

3.1.3 Получение квапериодического процесса и определение декремента затухания



Определим декремент затухания при разных значениях обратной связи.

$M = 25^\circ$	$M = 20^\circ$
$A_1 = 15$	$A_1 = 15,5$
$A_2 = 13$	$A_2 = 12,5$
$A_3 = 11,5$	$A_3 = 10,25$
$A_4 = 10$	$A_4 = 8,5$
$A_5 = 8,75$	$A_5 = 7$
$A_6 = 7,75$	$A_6 = 6$

Его можно определить по формуле: $\delta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}}$

Для $M = 25^\circ$:

$$\delta_{cp} = \frac{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{A_2}{A_3} + \dots + \ln \frac{A_5}{A_6}}{5} \approx 0,132$$

Средняя абсолютная погрешность:

$$\Delta \delta_{cp} = \frac{|\delta_{cp} - \delta_1| + \dots + |\delta_{cp} - \delta_5|}{5} \approx 0,008 \Rightarrow \delta_{cp} = (0,132 \pm 0,008)$$

Для $M = 20^\circ$:

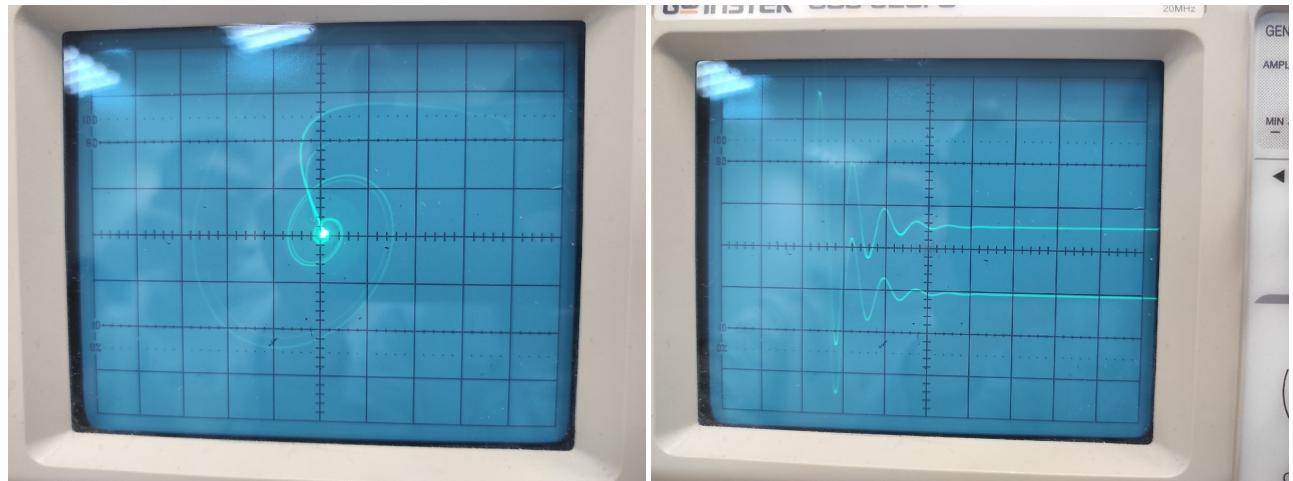
$$\delta_{cp} = \frac{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{A_2}{A_3} + \dots + \ln \frac{A_5}{A_6}}{5} \approx 0,19$$

Средняя абсолютная погрешность:

$$\Delta \delta_{cp} = \frac{|\delta_{cp} - \delta_1| + \dots + |\delta_{cp} - \delta_5|}{5} \approx 0,015 \Rightarrow \delta_{cp} = (0,190 \pm 0,015)$$

3.1.4 Получение апериодического процесса

Из рисунков видно, что при максимально допустимом сопротивлении R , мы не можем получить апериодический процесс (нужно ещё увеличивать сопротивление).



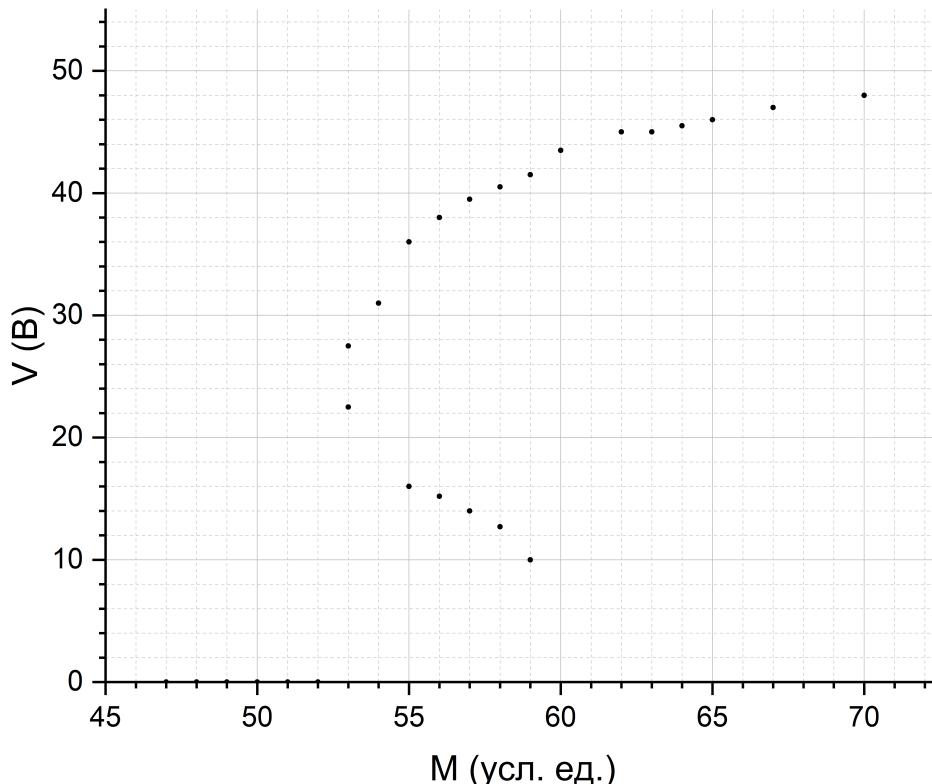
3.2 Жёсткий режим работы генератора

3.2.1 Снятие бифуркационной диаграммы

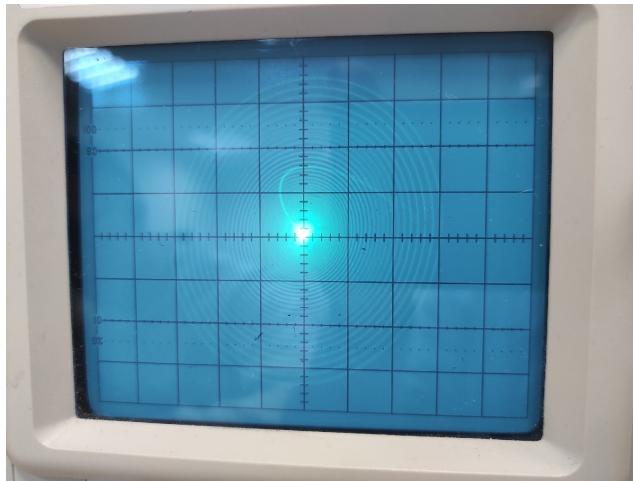
M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$
53	27,5	60	43,5	53	22,5
54	31	62	45	54	16,12
55	36	63	45	55	16
56	38	64	45,5	56	15,2
57	39,5	65	46	57	14
58	40,5	67	47	58	12,7
59	41,5	70	48	59	10

Точки бифуркации: $M' = 53^\circ$ и $M'' = 62^\circ$.

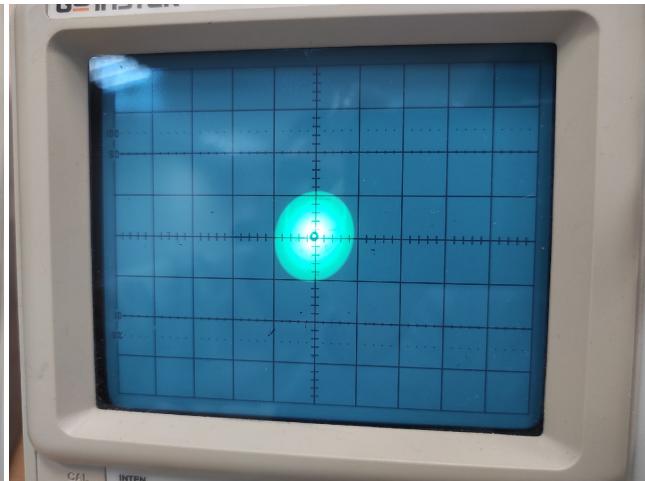
При снятии бифуркационной диаграммы, сначала проверили, что генератор находится в жёстком режиме. Для этого параметр обратной связи сначала увеличивали до тех пор, пока точка на осциллографе резко не перешла в устойчивый предельный цикл (всё делается с выключенным прерывателем), затем, уменьшая обратную связь, смотрим на каком моменте устойчивый предельный цикл резко перейдёт в точку (левая точка бифуркации M'). Причём должно получиться, что $M' < M''$. Для снятия неустойчивого цикла используем прерыватель.



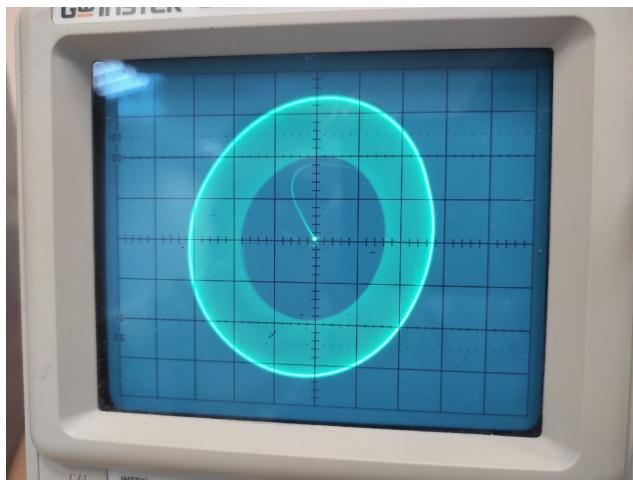
3.2.2 Фазовые траектории при различных начальных условиях



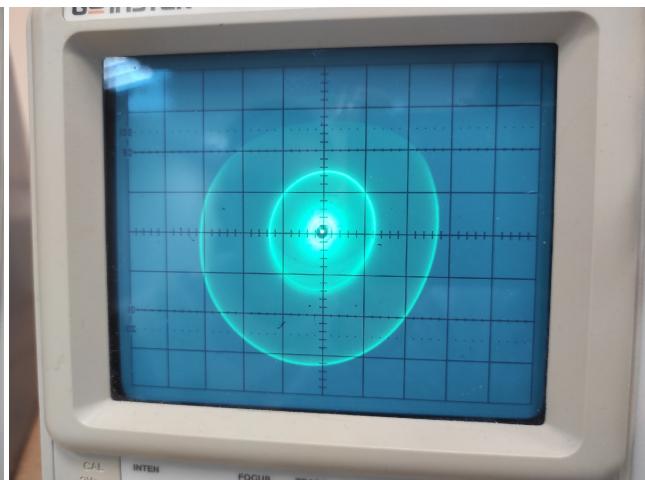
$M < M'$ (левее первой точки бифуркации, начальные условия больше 0, предельного цикла нет)



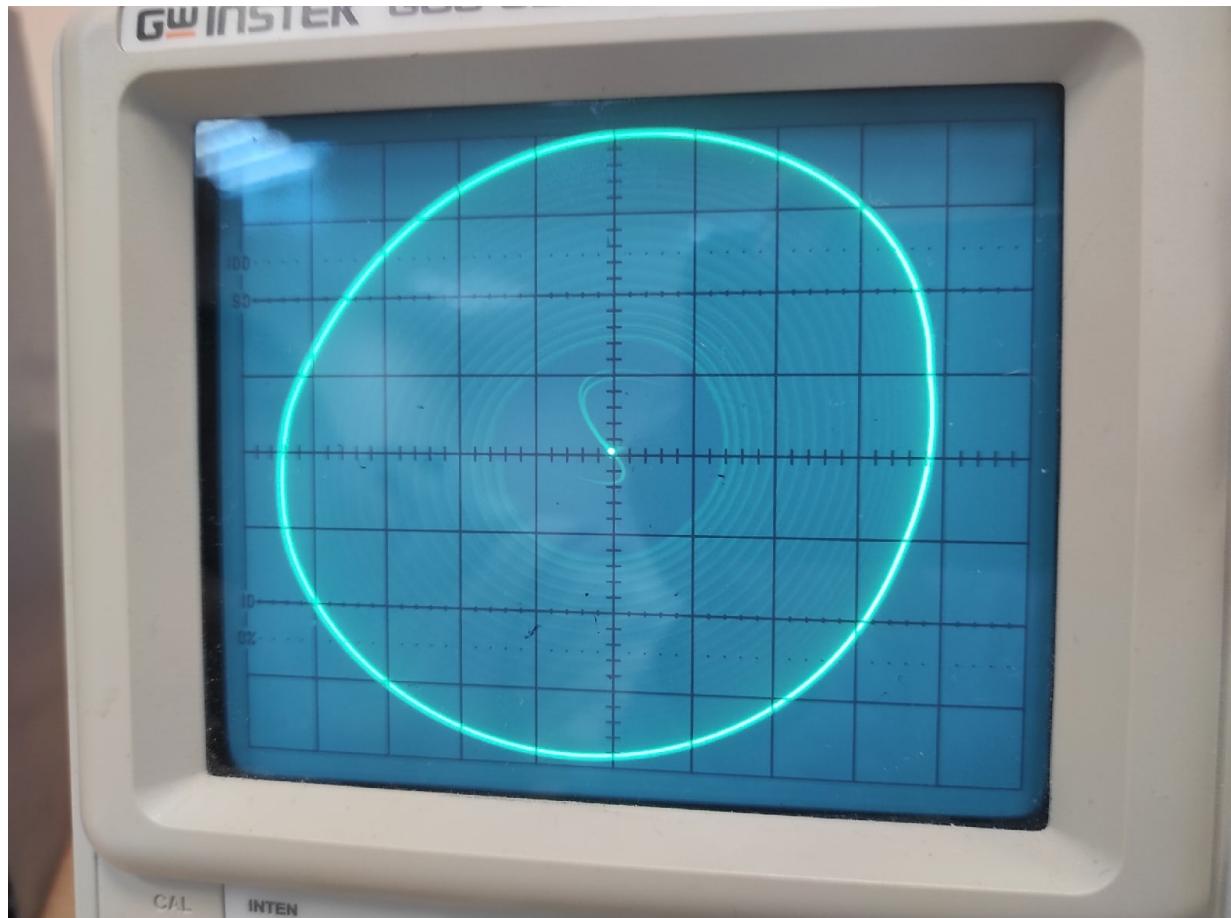
$M' < M < M''$ (между обеими точками бифуркации, начальные условия ниже неустойчивого цикла)



$M' < M < M''$ (между обеими точками бифуркации, начальные условия выше неустойчивого цикла)



$M' < M < M''$ (между обеими точками бифуркации, начальные условия на неустойчивом цикле)



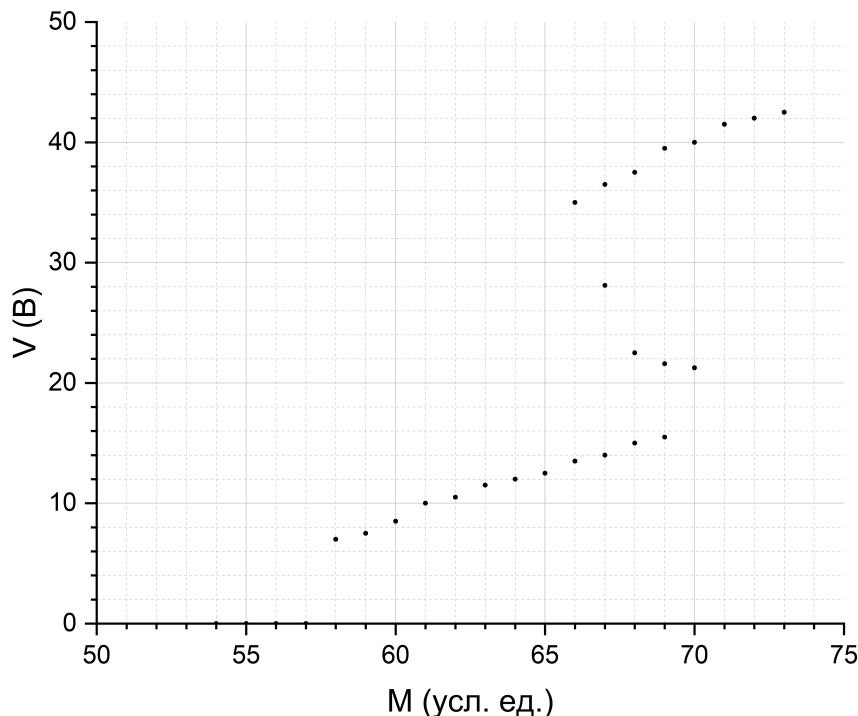
$M > M''$ (правее второй точки бифуркации, начальные условия ниже предельного цикла)

3.3 Сложно-жёсткий режим работы генератора

3.3.1 Снятие бифуркационной диаграммы

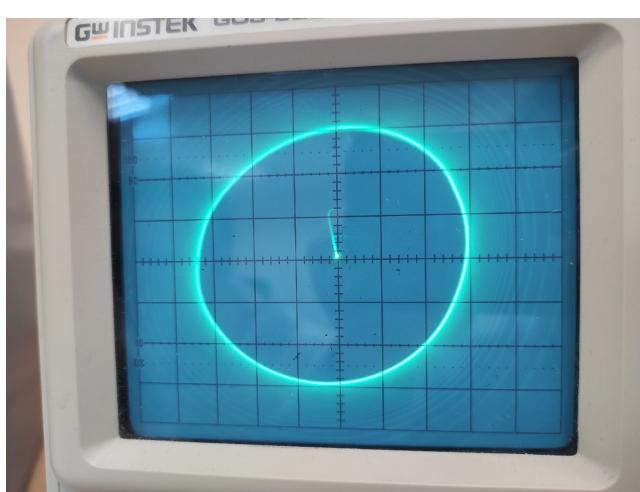
M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$	M°	$V, \text{ В}$
57	0	64	12	71	41,5	65	13,5
58	7	65	12,5	72	42	64	12
59	7,5	66	13,5	73	42,5	Снятие неустойчивого цикла	-
60	8,5	67	14	69	39,5	70	21,25
61	10	68	15	68	37,5	69	21,6
62	10,5	69	15,5	67	36,5	68	22,5
63	11,5	70	40	66	35	67	28,1

Для снятия бифуркационной диаграммы в сложно-жёстком режиме работы генератора проделывается всё аналогично пунктам 3.1 и 3.2. Но теперь должно получиться так, что у нас 3 точки бифуркации (самую крайнюю левую считать не будет, а последующие две обозначим как M' и M''). При проходе слева направо, точка на осциллографе плавно будет переходить в окружность (первый предельный цикл), увеличивая параметр обратной связи, на значении M'' точка резко раскрутиться на второй предельный цикл большего радиуса, затем, уменьшая параметр обратной связи, радиус предельного цикла должен постепенно уменьшаться, пока на значении M' он резко не уменьшится.

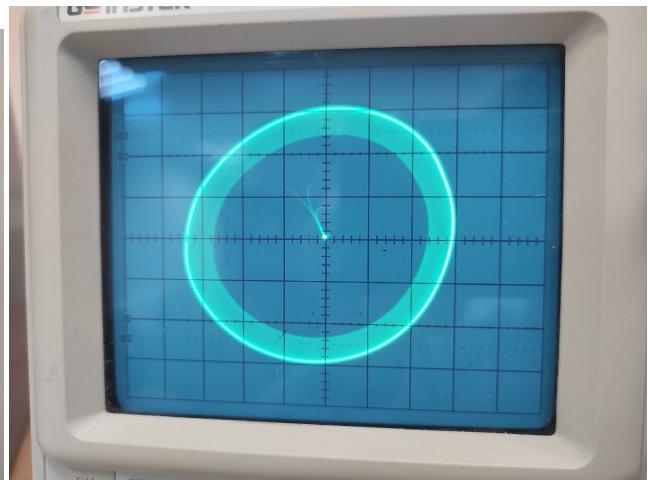


3.3.2 Фазовые траектории при различных начальных условиях

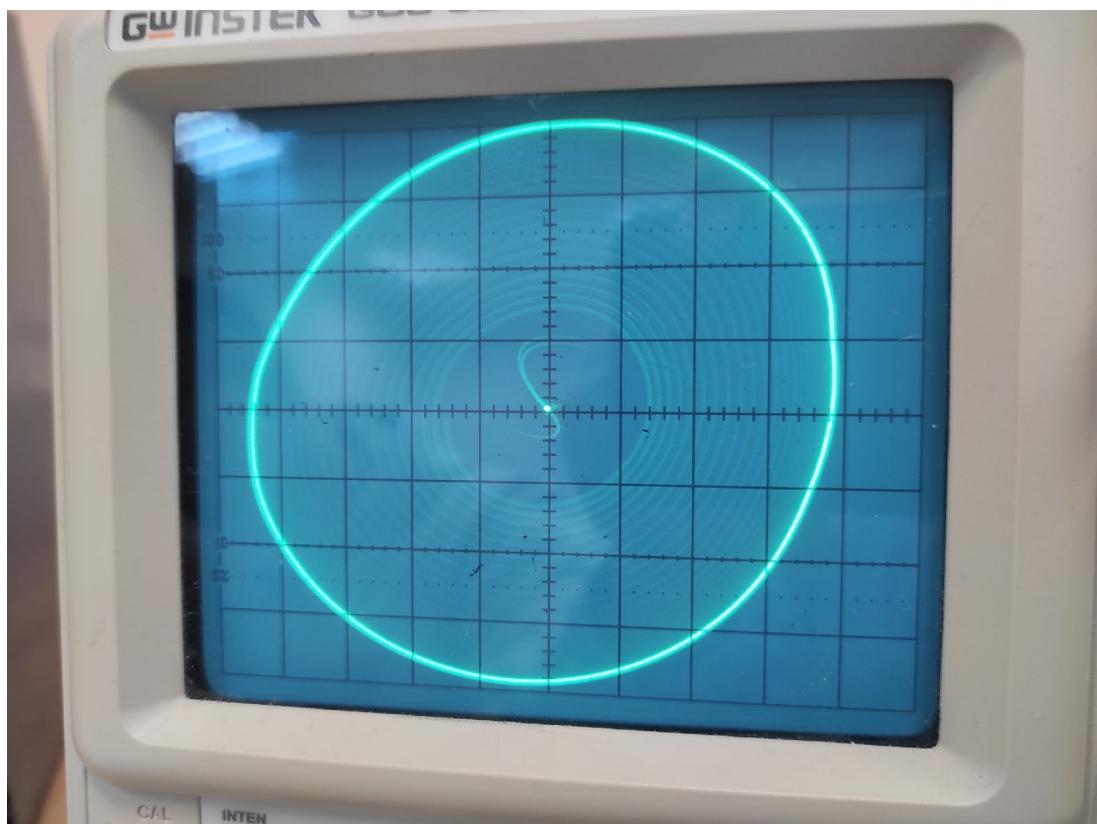
Точки бифуркации: $M' = 66^\circ$ и $M'' = 70^\circ$.



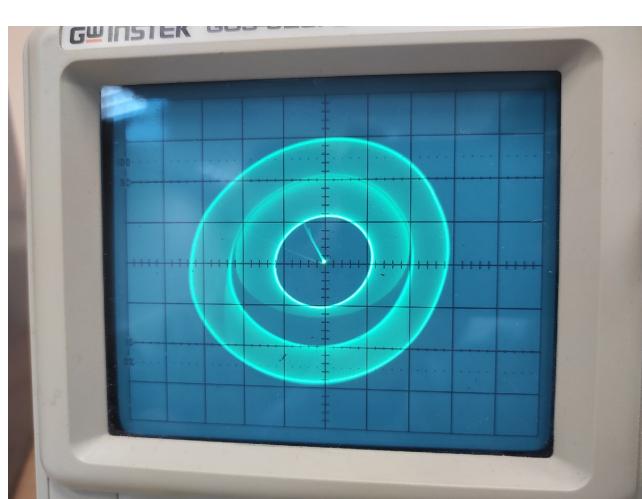
$M' < M < M''$ (между двумя точками бифуркации, начальные условия больше верхнего предельного цикла)



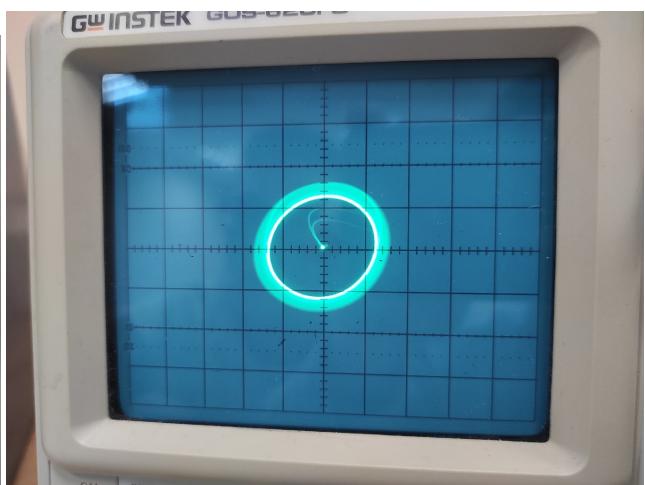
$M' < M < M''$ (между обеими точками бифуркации, начальные условия между верхним устойчивым и неустойчивым циклами)



$M > M''$ (правее второй точки бифуркации, начальные условия ниже предельного цикла)



$M' < M < M''$ (между обеими точками бифуркации, начальные условия на неустойчивом цикле)



$M' < M < M''$ (между обеими точками бифуркации, начальные условия между нижним устойчивым и неустойчивым циклами)

4 Вывод

Выполнив лабораторную работу, мы:

1) Исследовали мягкий режим работы лампового генератора. При снятии бифуркационной диаграммы получили одну бифуркационную точку $M = 31^\circ$, правее которой начинаются автоколебания (т.е. при любых начальных условиях всё будет стремиться к предельному циклу). Типы состояний равновесия указаны на самой диаграмме.

Также определили декремент затухания для квазипериодического затухающего процесса при разных параметрах обратной связи:

$$M = 25^\circ : \delta_{cp} \approx (0,132 \pm 0,008)$$

$$M = 20^\circ : \delta_{cp} \approx (0,190 \pm 0,015)$$

2) Исследовали жёсткий режим работы лампового генератора. При снятии бифуркационной диаграммы получили две бифуркационные точки $M' = 53^\circ$ и $M'' = 62^\circ$. Типы состояний равновесия указаны на самой диаграмме.

3) Исследовали сложно-жёсткий режим работы лампового генератора. При снятии бифуркационной диаграммы получили три бифуркационные точки $M^0 = 58^\circ$, $M' = 66^\circ$ и $M'' = 70^\circ$. Типы состояний равновесия указаны на самой диаграмме.