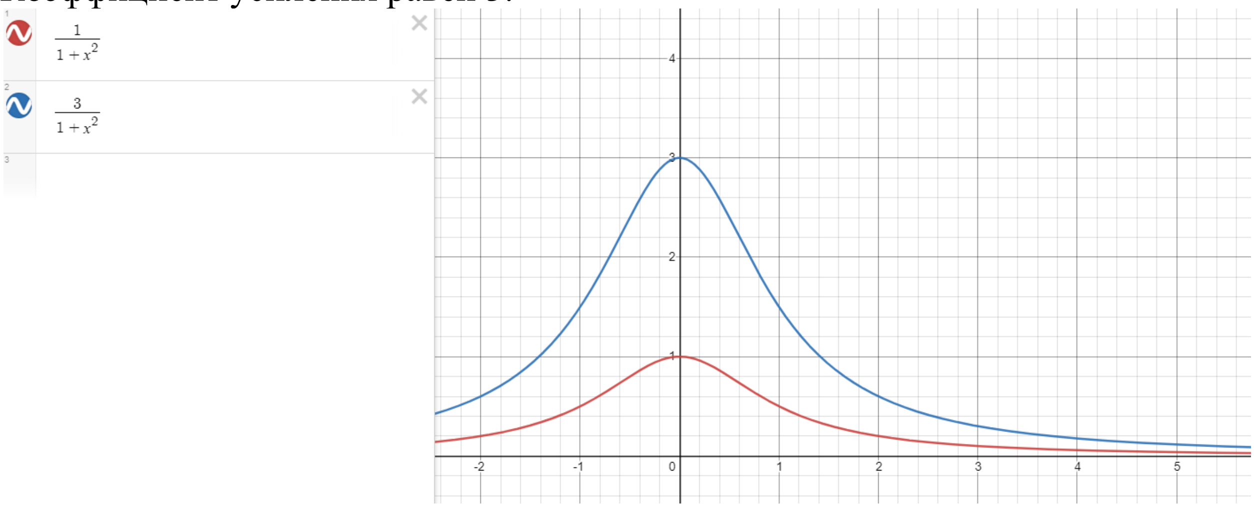
6. **Генерирование электрических колебаний.** *LC*- и *RC*-генераторы гармонических колебаний. Баланс амплитуд и фаз. Мягкий и жесткий режимы самовозбуждения. Проблема стабильности частоты. Генераторы электрических колебаний специальной формы. Мультивибраторы.

Эта методичка была накануне экзамена и предполагается, что вы её читаете тогда же, чтобы заботать вопросы на скрине выше.

Генератор – это устройство, способное создавать сигнал произвольной формы из ничего (например, из маленьких случайных шумов).
Разберёмся, как он это делает.

Усилителя с коэффициентом усиления $К_{усил}$. Усилитель – это бандура, которая усиливает амплитуду сигнала.

Напомним, что усилители бывают простые и с цепью Вина.
Простой усилитель тупо берёт и усиливает сигнал. И пофиг, какой он формы.
Например, красный на рисунке – исходный сигнал, синий – конечный.
Коэффициент усиления равен 3.



Усилитель с цепью Вина усиливает не все сигналы, а только на определённых частотах. Они состоят из простого усилителя и цепи обратной связи (как правило, цепи Вина). В них коэф усиления уже зависит от ω: это К * β(ω).
То есть на входе изначально U=Acos ωt, после прогона по простому усилителю на выходе будет KAcos ωt, которое затем пойдёт назад на вход по цепи обратной связи. А она глушит все частоты, кроме центральной. Математически это означает домножение на β(ω) – коэффициент ослабления цепи Вина.
Подробнее см. методичку по усилителям.

Если мы схалтурим и ограничимся усилителем, то из маленьких случайных шумов мы получим… большой шум. На экране осциллографа будет елозить какая-то хрень. Практического смысла в этом особого нет.

Поэтому нам потребуется усилитель не простой, а нелинейный.
Линейный усилитель просто берёт и делает вот так:

Из одной синусоиды делает другую синусоиду побольше.
$U_{вых}(t)=K_{вых}(t)*U(t)$
Если у нас усилитель не простой, а в него ещё впаяна цепь Вина, то он будет усиливать лишь конкретные частоты.

Линейный усилитель – штука классная, если нам нужен усилитель ☺ Но если нам нужен генератор, нам необходима нелинейность.
Поэтому линейный усилитель $U_{вых}(t)=K_{вых}(t)*U(t)$ мы отправляем на свалку, а достаём нелинейный усилитель

$$u_{вых} = K_1 u + K_2 u^2 + K_3 u^3 + K_4 u^4 + K_5 u^5 + \ldots$$

Мы не будем задаваться вопросом, как его сконструировать. Вот до нас умные радиофизики что спаяли, закрепили это всё в чёрный ящик и на нём написали К1, К2, К3 и т.д.

Пусть начальный сигнал $U(t)=A_0\cos \omega t$.
Тогда, подставив это в формулу выше и используя многократно формулы понижения степени, получим, что выходной сигнал будет имеет $A_1\cos \omega t + A_2\cos 2\omega t + A_3\cos 3\omega t\ldots$ Нас будет интересовать только первая гармоника.
Коэффициент $A_1=A_{вых}$ будет иметь вид

$$A_{вых}(\omega) = A_0\left(K_1 + \frac{3}{4}K_3 A_0^2 + \frac{5}{8}K_5 A_0^4\right)$$

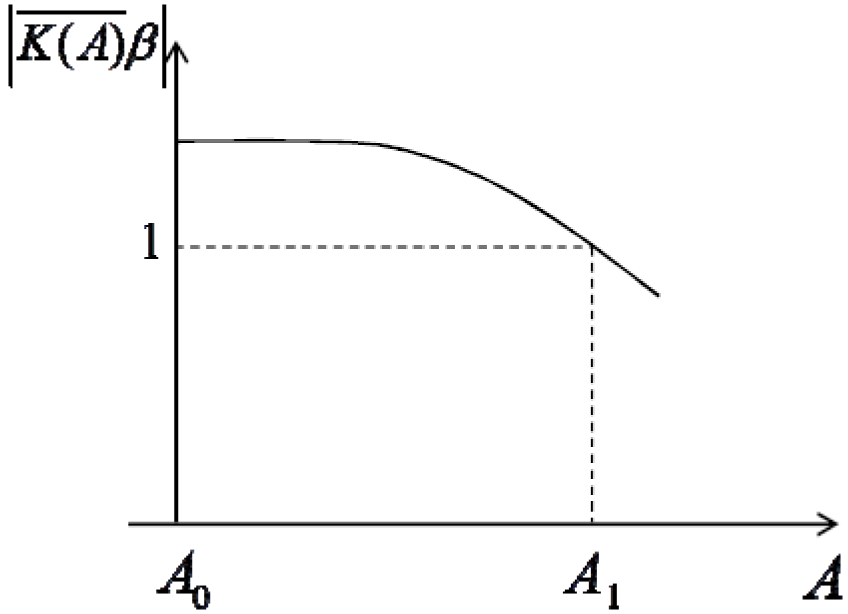
Члены более высокого порядка нам не нужны.
Тогда коэффициент усиления будет

$$\overline{K(A)} \equiv K_1 + \frac{3}{4}K_3 A^2 + \frac{5}{8}K_5 A^4$$

Ещё раз напомним, что это такое. На входе у нас синусоида с амплитудой А. На выходе будет синусоидой амплитуды $A_{вых}$. Будет ли она больше или меньше начальной – зависит от того, будет ли К(А) больше или меньше единицы.
А затем это выходное напряжение, домножившись на $\beta(\omega)$, вернётся на вход. И затем пойдёт снова по маршруту усилитель-обратная связь. От того, будет ли $K(A)\beta$ больше или меньше 1, зависит, будет ли генератор усиливать малейшие шумы или, наоборот, их заглушать.
β особого влияния на дальнейшие события оказывать не будет по той причине, что она-то как раз от А не зависит. Это коэффициент ослабления цепи Вина, в которой резисторы да конденсаторы. Абсолютно линейная цепь.
А т.к. мы сейчас будем строить графики от А, то можно $K(A)*\beta$ определить в одну величину, который мы назовём действительным коэффициентом усиления.

K_1 обязательно >0 (если оно <0, то при достаточно малых малых A K(A) окажется отрицательным, что недопустимо). А вот знаки K_3 и K_5 определяют несколько возможных ситуаций.

Мягкое возбуждение: K_3 и K_5 <0.
В этом случае график K(A)β выглядит так:



$A_0 = 0$, A_1 – некое число.
Если $A_0 = 0$, то на выходе будет 0, и на входе на следующей итерации будет 0. И так ноль пожизненно и будет.
Но если изначально амплитуда >0, но <A_1, то действующий коэффициент усиления >1. Это значит, что амплитуда будет постепенно нарастать и нарастать… но не до бесконечности, а до A_1. A_1 – это такое стабильное значение.
Пример.

№ итерации	Напряжение
0	$0{,}3A_1$
1	$0{,}6A_1$
2	$0{,}8A_1$
3	$0{,}9A_1$
4	$0{,}96A_1$
5	$0{,}98A_1$
6	$0{,}99A_1$

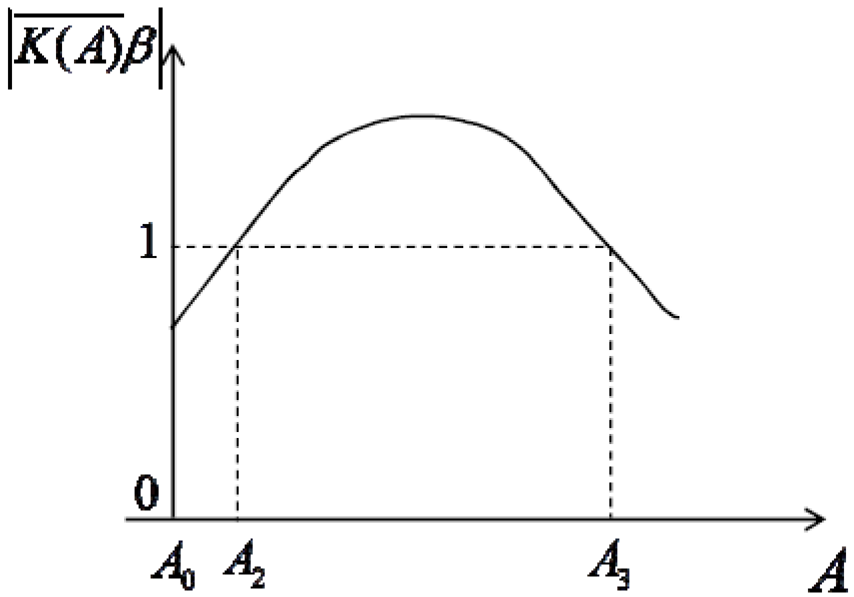
Если начальная амплитуда >A_1, то действующий коэффициент усиления <1, что приведёт к уменьшению амплитуды всё меньше, до тех пор, пока мы не придём к A_1 – стабильному значению.
Пример.

№ итерации	Напряжение
0	$2A_1$
1	$1{,}5A_1$

2	1,25A_1
3	1,1A_1
4	1,06A_1
5	1,04A_1
6	1,025A_1

Режим, согласитесь, довольно приятный: если у нас вначале не полный ноль, то на выходе мы довольно скоро получим синусоиду с A_1. А так как полного нуля нет никогда (всегда есть случайные флуктуации), то на выходе мы получим синусоиду с A_1. Ну просто пусечка ☺ И даже если в результате какого-то процесса у нас временно амплитуда от A_1 отклонится (неважно, в большую или меньшую сторону), с течением времени она к A_1 вернётся. Всё устойчиво!

Жёсткий режим:



На этот раз три стабильные амплитуды: A_0, A_2, A_3.
A_0 – понятно, если на старте у тебя нихрена нет, то нихрена и будет в дальнейшем.
A_2. А это, кстати, нестабильная точка. Если в начале у тебя было чуть-чуть меньше A_2, то (взгляните на график) в следующий раз будет ещё меньше. А потом ещё меньше. Будет нечто такое:

№ итерации	Напряжение
0	0,999A_1
1	0,995A_1
2	0,98A_1
3	0,9A_1
4	0,5A_1
5	0,2A_1
6	0,1A_1

Так амплитуда будет всё падать и падать, пока не скатится к нулю, который у нас, напомню, устойчив.
А если же в начале было чуть-чуть больше A_2, то, напротив, на следующем шаге будет ещё больше. Будет нечто такое:

№ итерации	Напряжение
0	$1{,}001A_1$
1	$1{,}005A_1$
2	$1{,}02A_1$
3	$1{,}1A_1$
4	$1{,}3A_1$

Пока мы не придём к A_3 – устойчивому положению равновесия. Его устойчивость доказывается легко по тому же графику: отойдём слева – действующий коэффициент усиления >1, т.е. будет прибавка, отойдём вправо – действующий коэф усиления будет <1, т.е. будет убывка.

Почему же данный режим называется жёстким? Потому что чтобы колебания возникли, в начале нужен импульс амплитудой A_2 или больше. Если будет меньше – мы назад скатимся к нулю. А если будет больше A_2 – мы сможем «достать» до следующего устойчивого положения A_3.

Уравнение баланса амплитуды.

А можем ли мы как-нибудь подсчитать эти A_1, A_2 и А3? Да, конечно. Для них $K(A_1)\beta=1$.

Чтобы было совсем канонично, надо поставить модуль. Всё-таки все коэффициенты у нас комплексные и учитывают ещё сдвиг по фазе: $|K(A_1)\beta|=1$.

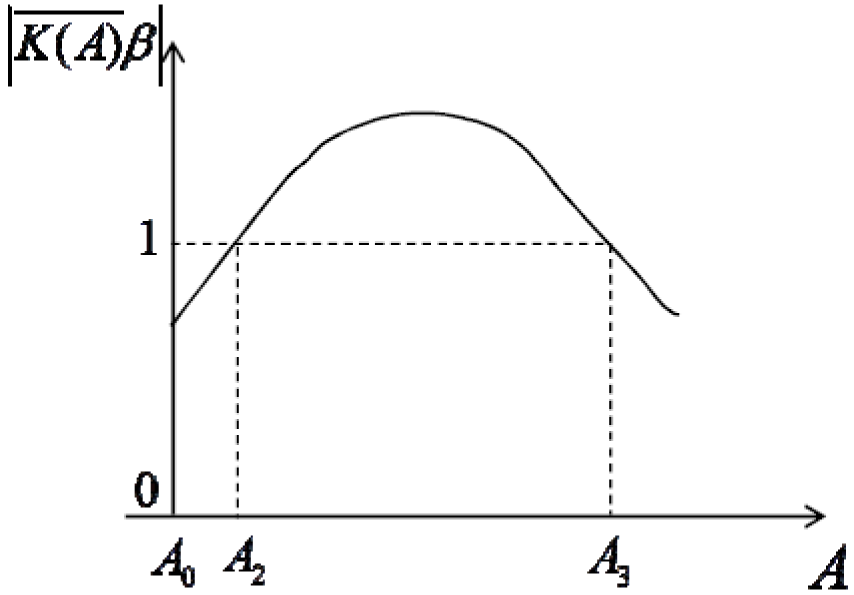
Вид функции для К(А) был выше:

$$\overline{K(A)} \equiv K_1 + \frac{3}{4}K_3A^2 + \frac{5}{8}K_5A^4$$

Это и есть уравнение баланса амплитуды, когда насколько простой усилитель усиливает, настолько цепь баланса связи ослабляет, и в итоге у нас стабильность.

Заметим, что β зависит от ω, которая выступает в роли параметра. Отсюда и корень того уравнения будет также зависеть от $K(A_1)$. К примеру, для центральной частоты β=1, и чтобы найти A_1, придётся решить уравнение $K(A_1)=1$. Если же мы отойдём от центральной частоты, то β станет <1, и тогда надо будет уже решать уравнение $K(A_1)=1/\beta$(той частоты).

Не будет лишним сказать, что уравнение баланса амплитуд применимо только к стабильным амплитудам (как мы уже убедились выше, как раз с помощью него они определяются). Так что вопросы а-ля «почему на графике



$|K(A)\beta|$ вдруг то >1, то <1, хотя я вычитал(а) в Вятчанине уравнение баланса амплитуд», надеюсь, теперь не возникнут.

Уравнение баланса фазы.

Оно нам говорит про то, что усилитель может, увеличив амплитуду, сдвинуть фазу синусоиды, но цепь обратной связи обязательно должна этот сдвиг нивелировать. Т.е. $\arg K + \arg \beta$ кратно 2π.

Проблема стабильности частоты.

Генератор может создать синусоиду, только вот с течением времени её частота может чуть-чуть меняться вследствие разнообразных шумов. Вятчанин тут рассказывает очень много воды. Да, такая проблема есть и возникает она из-за всевозможных шумов:

Причины нестабильности частоты:

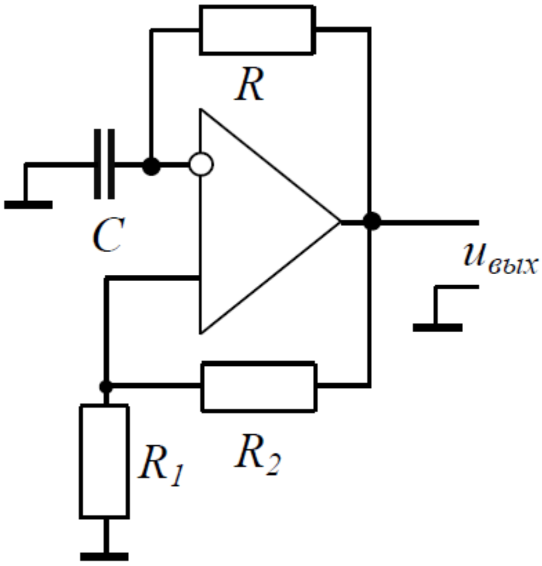
1) Технические (долговременная нестабильность):
   - Нестабильность температуры контура.
   - Старение.
   - Дрейфы различных параметров.
2) Флуктуационные (кратковременная нестабильность):
   - Тепловые.
   - Дробовые (если есть).
   - Квантовые.

Как её решать? Минимизировать все эти виды шумов ☺

Мультивибратор – что это такое?

Доселе мы работали с генераторами синусов. Однако на практике часто бывают полезно создавать сигналы других форм – например, прямоугольный.

Схема, реализующая прямоугольный сигнал, такова:



Описание из лекций:

Предположим, что после включения напряжение на неинвертирующем входе оказалось больше, чем на инвертирующем (принципиального значения это предположение не имеет). Тогда на выходе ОУ быстро установится максимальное положительное напряжение (можно легко проверить, что для высоких частот, соответствующей этому переходному процессу, коэффициент передачи цепи, образованной R и C стремится к нулю, соответственно, усиление максимально). После этого, конденсатор начнет заряжаться через резистор R и, в какой-то момент, напряжение на инвертирующем входе станет больше, чем на неинвертирующем (задается делителем R_2, R_1). В этот момент напряжение на выходе ОУ быстро изменит знак (станет максимальным отрицательным), конденсатор начнет перезаряжаться, процесс будет повторяться циклически. Период колебаний равен:

$$T = 2RC\ln\left(\frac{2R_2}{R_1} + 1\right).$$

Я так и не понял. Ну, работает, и работает.