

А. Н. Зикий
А. В. Помазанов

Стабильность частоты генераторов СВЧ

ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЮФУ
РОСТОВ-НА-ДОНУ–ТАГАНРОГ

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Инженерно-технологическая академия

А.Н. ЗИКИЙ
А.В. ПОМАЗАНОВ

СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ ГЕНЕРАТОРОВ СВЧ

Учебное пособие

Ростов-на-Дону – Таганрог
Издательство Южного федерального университета
2017

УДК 621.396
ББК 32.84 Я73
З-601

Печатается по решению кафедры информационной безопасности телекоммуникационных систем Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета (протокол №14 от 25.01.2017)

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор *Червяков Г.Г.;*

кандидат технических наук, старший научный сотрудник *Крикотин С.В.*

Зикий, А. Н.

З-601 Стабильность частоты генераторов СВЧ : учебное пособие / А. Н. Зикий, А. В. Помазанов ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону – Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2017. – 138 с.
ISBN 978-5-9275-2438-9

Изложены принципы построения и основы проектирования генераторов СВЧ. Рассматриваются вопросы стабильности генераторов СВЧ. Приводятся многочисленные результаты разработки и экспериментального исследования автогенераторов различных диапазонов длин волн, синтезаторов частоты.

Предназначено для студентов старших курсов, обучающихся по специальностям «Защищенные системы связи» и «Информационная безопасность телекоммуникационных систем» на кафедре ИБТКС. Учебное пособие может быть полезным для магистрантов, а также при курсовом и дипломном проектировании.

УДК 621.396(075.8)
ББК 32.84 Я73

ISBN 978-5-9275-2438-9

© Южный федеральный университет, 2017
© Зикий А. Н., Помазанов А. В., 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ…….....5

1. СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРОВ……...7
1.1. Уравнение стационарного состояния автогенератора…….....7
1.2. Устойчивость состояния равновесия в автогенераторе……....9
1.3. Влияние параметров колебательной системы и генераторного прибора на частоту колебаний автогенератора…….16
1.4. Основные дестабилизирующие факторы...…….....……..18
1.5. Кратковременная и долговременная нестабильность частоты автогенератора……...……....20

2. АНАЛИЗ ДИОДНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НИЗКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ…….26
2.1. Экспериментальное исследование генератора на диоде Ганна с варакторной перестройкой частоты ……...26
2.2. Экспериментальное исследование генератора на диоде Ганна ……..31
2.3. Экспериментальное исследование генератора контрольных сигналов миллиметрового диапазона…….……35
2.4. Экспериментальное исследование генератора контрольных сигналов с магнитной перестройкой …….……38

3. АНАЛИЗ ТРАНЗИСТОРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ НИЗКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ……41
3.1. Экспериментальное исследование транзисторного генератора с микрополосковым резонатором ……..….....41
3.2. Исследование транзисторного автогенератора дециметрового диапазона…….…….....45
3.3. Исследование модуляционных характеристик генераторов СВЧ с варикапной перестройкой ……..……...…….....49
3.4. Автогенератор дециметрового диапазона ……..……..53

4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНЗИСТОРНЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ СРЕДНЕЙ СТАБИЛЬНОСТИ……60
4.1. Генератор с диэлектрическим резонатором……..……60

4.2. Сверхвысокочастотный транзисторный автогенератор,
стабилизированный диэлектрическим резонатором ……64
4.3. Экспериментальное исследование макета гетеродинного
модуля на основе автогенератора…….....67
4.4. Техническое описание автогенератора «Очерет-3» ….……...…70
4.5. Техническое описание автогенератора «Октет-ф» ……75
4.6. Экспериментальное исследование двух автогенераторов
с диэлектрическими резонаторами ……..…….……...80
4.7. Экспериментальное исследование генератора
на поверхностных акустических волнах ……..85

5. ИССЛЕДОВАНИЕ СИНТЕЗАТОРОВ ЧАСТОТЫ…….. 91
5.1. Синтезатор частот дециметрового диапазона ……...……...91
5.2. Пятиоктавный синтезатор частот ……..……..…96
5.3. Исследование умножителей и делителей частоты ….……..101
5.4. Гетеродин сантиметрового диапазона ……..……..106
5.5. Делители частоты …….……...…108

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ, ЗАДАЧИ, ОТВЕТЫ……122
Контрольные вопросы…….…….……122
Ответы на контрольные вопросы…….……123
Задачи……...……...…123
Решения задач, ответы, указания к решению задач……...128

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ……...130

ПРИЛОЖЕНИЕ А
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ……...137

ВВЕДЕНИЕ

Генерирование стабильных электромагнитных колебаний в СВЧ-диапазоне связано с некоторыми трудностями, обусловленными следующими причинами.

С увеличением частоты все большее влияние на работу генераторов оказывают паразитные ёмкости и индуктивности, образуемые конструктивными элементами самих устройств. Шунтирующие ёмкости «закорачивают» соответствующие участки схемы генератора, а на последовательных индуктивностях создаются дополнительные падения напряжения, и тем самым они «разделяют» участки схемы. Поэтому в СВЧ-диапазоне паразитные ёмкости и индуктивности должны быть сведены к минимуму.

С увеличением частоты возрастают потери в элементах генераторных схем: в металлических проводниках и в диэлектриках. На некоторых частотах СВЧ-диапазона эти потери имеют ярко выраженные максимумы. В СВЧ-диапазоне возникают также дополнительные потери на излучение, так как отдельные конструктивные элементы генераторов, электрическая длина которых становится соизмеримой с длиной волны СВЧ-колебаний, работают как антенны, излучая часть полезной энергии в открытое пространство.

Для преодоления трудностей генерирования стабильных СВЧ-колебаний используют три пути: совершенствуют схемы генераторов, совершенствуют сами генераторные приборы, разрабатывают новые методы генерирования.

Устройства формирования гармонических колебаний с прецизионно стабильными частотами получили широкое распространение в разнообразных видах радиотехнической профессиональной и бытовой аппаратуры благодаря тому, что измерения частоты или периода колебаний могут производиться с наиболее высокой точностью среди других физических измерений, а широко доступные источники опорных колебаний имеют чрезвычайно малые собственные нестабильности частоты.

Цель данного учебного пособия – рассмотрение методов повышения стабильности частоты генераторов СВЧ.

Задачи:

- анализ существующих методов и устройств стабилизации частоты генераторов СВЧ;
- экспериментальное исследование нестабильности частоты генераторов на диодах Ганна, стабилизированных объёмными резонаторами, с целью выявления режимной и температурной нестабильности частоты;
- экспериментальное исследование нестабильности частоты транзисторных генераторов, стабилизированных микрополосковыми резонаторами, с целью выявления режимной и температурной нестабильности частоты;
- экспериментальное исследование нестабильности частоты транзисторных генераторов, стабилизированных ДР, с целью выявления режимной и температурной нестабильности.

Бурное развитие индивидуальных средств связи, мобильной связи и средств удаленного радиодоступа компьютерных сетей, а также повышение требований к качеству этих систем и измерений приводит к необходимости построения источников высокостабильных опорных колебаний и с чрезвычайно низким уровнем фазовых шумов. Таким образом, тема данного учебного пособия является актуальной.

Учебное пособие может быть полезно студентам радиотехнических специальностей при изучении дисциплин: «Радиопередающие устройства»; «Устройства генерирования и формирования радиосигналов»; «Радиоприемные устройства»; «Телекоммуникационные системы» и других, а также как практическое пособие при курсовом и дипломном проектировании.

1. СТАБИЛЬНОСТЬ ЧАСТОТЫ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

1.1. Уравнение стационарного состояния автогенератора

Анализ установившегося режима работы автогенератора (АГ) проведём применительно к автогенераторам с положительной обратной связью. Поскольку амплитудные и фазовые соотношения в АГ лишь в незначительной степени будут определяться выбранной схемой питания по постоянному току, в дальнейшем, там, где в этом нет необходимости, в схемах АГ источники питания указывать не будем.

В связи с этим АГ можно представить в виде каскадного соединения двух четырехполюсников, первым из которых является генераторный прибор (ГП), а вторым – колебательная система (КС). При этом выходные клеммы КС следует соединить с входными клеммами ГП (рис.1.1).

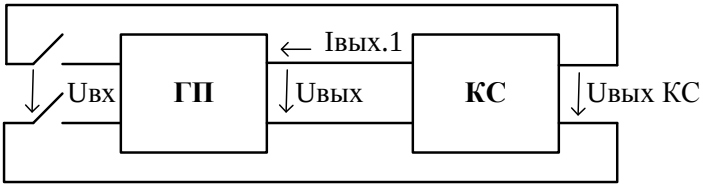


Рис. 1.1. Структура АГ

Будем считать, что в АГ используется «идеальный» ГП, входная и выходная проводимости которого близки к нулю. Для получения ГП с такими свойствами достаточно включить указанные проводимости реального ГП в состав КС. Предположим также, что переменные составляющие напряжения $U_{вх}$, и $U_{вых}$ являются близкими к гармоническим, а комплексная амплитуда первой гармоники выходного тока $I_{вых1}$ связана с комплексной амплитудой входного воздействия зависимостью $I_{вых1} = S_1 U_{вх}$, где S_1 − средняя крутизна генераторного прибора.

Если ключ разомкнут, то схема на рис. 1.1 полностью совпадает со схемой генератора с внешним возбуждением. Подадим на вход такого генератора гармоническое напряжение с комплексной амплитудой $U_{вх}$.

Кроме того, выберем такие параметры колебательной системы, чтобы в установившемся режиме напряжение на выходе КС имело комплексную амплитуду

$$U_{выхКС} = U_{вх}. \tag{1.1}$$

Тогда одновременное отключение источника возбуждения от ГП и замыкание ключа не должно, по крайней мере, в первый момент, привести к изменению токов и напряжений в схеме. Иными словами, генератор останется в состоянии равновесия.

Рассмотрим, какими свойствами, кроме уже отмеченных, должны обладать ГП и КС для выполнения условия равновесия (1.1). Для этого, обозначив

$\frac{U_{выхКС}}{U_{вх}} = -K_{ос}$ и учитывая, что $U_{вых} = -Z_н I_{вых1}$ нетрудно найти

$$U_{выхКС} = S_1 U_{вх} Z_н K_{ос}, \tag{1.2}$$

где $Z_н$ − комплексное входное сопротивление КС; $K_{ос}$ − коэффициент обратной связи.

Подставив (1.2) в (1.1), получим следующую форму записи уравнения равновесия:

$$S_1 Z_н K_{ос} = 1. \tag{1.3}$$

Часто более удобной оказывается другая запись уравнения (1.3):

$$S_1 Z_y = 1. \tag{1.4}$$

Здесь $Z_y = Z_н K_{ос}$ − управляющее сопротивление, представляющее собой параметр, характеризующий свойства линейной части АГ и имеющий размерность сопротивления.

В общем случае все сомножители, входящие в (1.3), являются комплексными, т. е.

$$S_1 = S_1 \exp(j\varphi_s); Z_н = (Z_н(\exp(j\varphi_н); K_{ос} = K_{ос} \exp(j\varphi_{ос}),$$

где φ_s, $\varphi_н$, $\varphi_{ос}$ − соответственно фазовые углы средней крутизны, эквивалентного сопротивления КС и коэффициента обратной связи.

Поэтому уравнение (1.3) является комплексным уравнением вида

$$S_1 (Z_н (K_{ос} \exp\{j(\varphi_s + \varphi_н + \varphi_{ос})\} = 1.$$

Запишем его в виде двух вещественных уравнений:

$$S_1 |Z_н| K_{ос} = 1, \qquad (1.5а)$$

$$\varphi_s + \varphi_н + \varphi_{ос} = 2\pi n, \quad n = 0,1,2.... \qquad (1.6а)$$

Аналогичным образом можно поступить и используя запись уравнения равновесия в форме (1.4), т. е.

$$S_1 |Z_y| = 1, \qquad (1.5б)$$

$$\varphi_s + \varphi_y = 2\pi n, \quad n = 0,1,2.... \qquad (1.6б)$$

где $\varphi_y = \varphi_н + \varphi_{ос}$.

Уравнения (1.5 а) и (1.5 б) носят название уравнений баланса амплитуд, а (1.6 а) и (1.6 б) − баланса фаз. Для большинства схем автогенераторов n = 0. Исключение составляют АГ, в которых сигнал в цепях ГП и КС запаздывает на один или несколько периодов.

Полученные уравнения равновесия при любой форме их записи показывают только возможность существования в АГ стационарного состояния, и в этом смысле их выполнение является необходимым, но не достаточным условием для длительного существования колебаний. Решение последнего вопроса может быть получено только на основе исследования устойчивости состояния равновесия.

1.2. Устойчивость состояния равновесия в автогенераторе

Поскольку переменные, входящие в состав уравнений баланса амплитуд и баланса фаз, зависят как от амплитуды колебаний, так и от частоты, определение значений токов и напряжений в схеме АГ и значения частоты генерируемых им колебаний требует совместного решения уравнений (1.5) и (1.6). Однако обычно частота генерируемого сигнала близка к собственной резонансной частоте КС, что позволяет сначала при известной частоте определить S_1 $K_{ос}$ и $|Z_н|$ и найти амплитуду колебаний, а затем, зная ее, решить уравнения (1.6) и уточнить значение частоты.

В связи с этим при анализе устойчивости состояния равновесия также раздельно рассмотрим вопросы устойчивости баланса амплитуд и баланса фаз.

Условие устойчивости баланса амплитуд

При анализе амплитудных соотношений будем считать, что в АГ используется безынерционный ГП (т.е. $\varphi_s = 0$), входная и выходная проводимости и проводимость обратной передачи которого практически не зависят от $U_{вх}$ и $U_{вых}$. Следовательно, уравнение равновесия, записанное в форме (1.4), можно представить как $S_1 Z_y = 1$, где в общем случае $Z_y = R_y + jX_y$. Однако, поскольку S_1 − вещественная величина, баланс фаз выполнится на частоте ω_0, при которой $X_y = 0$, а уравнение баланса амплитуд примет вид

$$S_1 R_y(\omega_0) = 1. \qquad (1.7)$$

Амплитуда колебаний в АГ может быть найдена из уравнения (1.7). Сделанные допущения позволяют считать, что нелинейный характер уравнения баланса амплитуд определяется только нелинейной зависимостью $S_1 = S_1(U_{вых})$. Воспользуемся графическим решением уравнения (1.7). В этом случае амплитуда напряжения возбуждения в установившемся режиме будет определяться абсциссой точки пересечения кривой с $S_1 = S_1(U_{вых})$ прямой $1/R_y$. Зависимости нормированной средней крутизны S_1 от амплитуды напряжения возбуждения, вычисленные при кусочно-линейной аппроксимации статических характеристик ГП и различных значениях напряжения смещения $E_{вх}$ представлены на рис. 1.2. Поясним ход приведенных кривых.

При $E_{вх} - E_{вх} > 0$ и $U_{вх} < E_{вх} - E_{вх0}$ (здесь $E_{вх0}$ – напряжение запирания) ГП работает в классе А. Его средняя крутизна по первой гармонике равна статической крутизне в выбранной рабочей точке S и при кусочно-линейной аппроксимации характеристик ГП не зависит от $U_{вх}$. Как только $U_{вх}$ превысит значение $(E_{вх} - E_{вх0})$, появится отсечка в импульсе выходного тока ГП, а средняя крутизна по первой гармонике начнет уменьшаться.

При $E_{вх} = E_{вх0}$ угол отсечки $\theta = \pi/2$ и в области недонапряженного режима не зависит от $U_{вх}$. Поэтому график $S_1(U_{вх}) = 0{,}5S$ представляет собой горизонтальную линию.

Если $E_{вх} < E_{вх0}$, то до тех пор, пока $U_{вх}$ не превысит $\left|E_{вх} - E_{вх0}\right|$, выходной ток ГП будет равен нулю. Будет равна нулю и средняя

крутизна. С дальнейшим ростом $U_{вх}$ появится выходной ток, угол отсечки начнет увеличиваться, стремясь в $\pi/2$, что будет сопровождаться ростом S_1.

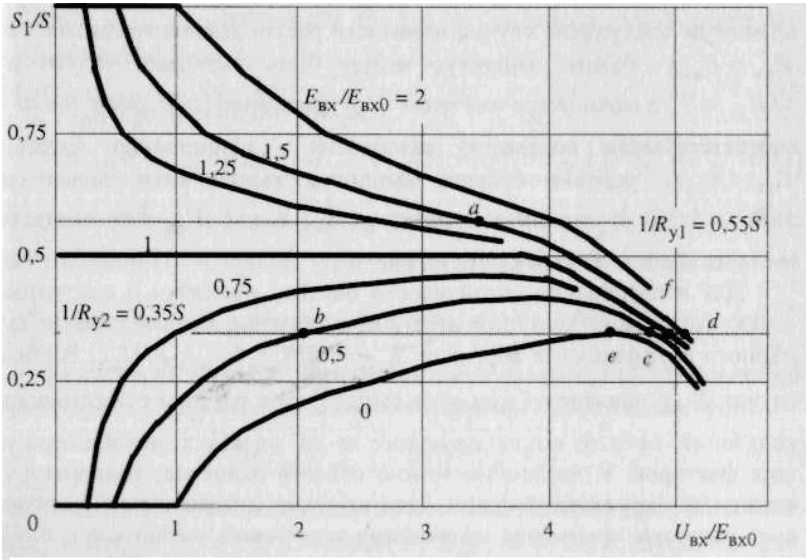


Рис. 1.2. Зависимости нормированной средней крутизны S1

Резкое уменьшение S_1 при $U_{вх} > U_{вх.гр}$ объясняется переходом ГП в перенапряженный режим.

Проведем на графике (рис. 1.2) горизонтальные линии через точки с ординатами $1/(SR_{yi})$. В зависимости от выбранных значений R_{yi} возможны следующие случаи взаимного расположения графиков. Если $E_{вх} > E_{вх0}$, баланс амплитуд может быть выполнен только при $1/R_{yi} < S$, а возможное значение $U_{вх}$ (например, абсцисса точки а), соответствующее состоянию равновесия единственно. Если же $E_{вх} < E_{вх0}$ условие баланса амплитуд выполняется только для $1/R_{yi} < 0,5S$ и при двух возможных значениях $U_{вх} > 0$, соответствующих абсциссам точек *b* и *c* на рис. 1.2.

Для исследования устойчивости баланса амплитуд в полученных точках равновесия поступим следующим образом. Введем понятие суммарного коэффициента передачи $K_{сум} = S_1R_y = U_{выхКС}/U_{вх}$. В общем случае $K_{сум}$ зависит не только от амплитуды и частоты существующих

колебаний, но и от воздействующих на АГ внешних дестабилизирующие факторов. К последним можно отнести давление, температуру и влажность окружающей среды, механические, динамические и статические нагрузки, изменение напряжения источников питания и т. п. Под их воздействием могут меняться как параметры ГП, так и КС.

Обозначим параметр, характеризующий влияние внешних воздействий, через χ. Тогда при выполнении условия равновесия

$$K_{сум}(U_{вх},\chi)=1. \tag{1.8}$$

Пусть χ получит малое приращение $\Delta\chi$. Условие равновесия при этом нарушится и

$$K_{сум}(U_{вх},\chi+\Delta\chi)=K_{сум}(U_{вх},\chi)+\Delta K_{сум} \tag{1.9}$$

причем, если $K_{сум} > 0$, то $U_{выхКС}$ окажется больше, чем $U_{вх}$, т.е. напряжение на входе генераторного прибора получит положительное приращение $\Delta U_{вх}$. Аналогичным образом, при $\Delta K_{сум} < 0$ $\Delta U_{вх} < 0$.

Следовательно, отношение $\Delta K_{сум}/ \Delta U_{вх}$ всегда положительно.

Будем считать состояние равновесия в АГ устойчивым по амплитуде, если при изменении внешних воздействий, нарушающих баланс амплитуд, произойдет такое изменение амплитуды колебаний, что состояние равновесия вновь восстановится, т. е.

$$K_{сум}(U_{вх}+\Delta U_{вх},\chi+\Delta\chi)=1. \tag{1.10}$$

Представим уравнение (1.10) в виде ряда по степеням малых приращений $\Delta U_{вх}$ и ограничимся при его рассмотрении только двумя первыми членами. Тогда

$$\begin{aligned} &K_{сум}(U_{вх}+\Delta U_{вх},\chi+\Delta\chi)= \\ &=K_{сум}(U_{вх},\chi+\Delta\chi)+\{\partial K_{сум}(U_{вх},\chi+\Delta\chi)/\partial U_{вх}\}\Delta U_{вх}=1 \end{aligned} \tag{1.11}$$

Подставив в (1.11) $K_{сум}(U_{вх},\chi+\Delta\chi)$ из (1.9) и учтя, что в исходном состоянии (т. е, при $\Delta\chi = 0$) выполнялось равенство (1.8). получим

$$-\partial K_{сум}(U_{вх},\chi+\Delta\chi)/\partial U_{вых}=\Delta K_{сум}/\Delta U_{вх}. \tag{1.12}$$

Ранее было показано, что правая часть равенства (1.12) всегда положительна. Следовательно, для его выполнения необходимо, чтобы

$$\partial K_{сум}(U_{вх},\chi+\Delta\chi)/\partial U_{вых}<0, \tag{1.13}$$

что и является условием устойчивости баланса амплитуд.

Поскольку $K_{сум} = S_1 R_y$ и $R_y > 0$ и не зависит от $U_{вх}$, из (1.13) следует, что условием устойчивости является выполнение неравенства

$$\partial S_1 / \partial U_{вх} < 0. \qquad (1.14)$$

При этом, чем больше $\partial S_1 / \partial U_{вх}$, тем меньшие изменения амплитуды колебаний потребуются для восстановления баланса амплитуд. Если ГП работает в недонапряженном режиме, увеличение $\left|\partial S_1 / \partial U_{вх}\right|$ достигается за счет уменьшения угла отсечки θ. Используя условие (1.14), нетрудно убедиться, что на графиках (рис. 1.2) точки равновесия a, c и d устойчивы, а точка b – неустойчива.

Если $E_{вх} > E_{вх0}$, то при $U_{вх} = 0$ баланс амплитуд не выполнен, так как $K_{сум} > 1$. Поэтому при включении АГ сколь угодно малые флуктуации напряжения на входном электроде ГП приведут к возрастанию амплитуды колебаний до установившегося значения, соответствующего стационарному режиму. Процесс возникновения колебаний в АГ в этом случае носит название «мягкого» самовозбуждения. При этом, если $1/R_y > 0{,}5S$ ($SR_y < 2$), ограничение роста амплитуды колебаний обусловлено падением средней крутизны за счет уменьшения угла отсечки θ. При $SR_y > 2$ ограничение амплитуды колебаний происходит за счет перехода ГП автогенератора в перенапряженный режим. При $E_{вх} < E_{вх0}$ и $SR_y > 2$ в точке $U_{вх} = 0$. Поэтому любые флуктуации входного напряжения с амплитудой, меньшей $\left|E_{вх} - E_{вх_0}\right|$, вообще не приведут к возникновению самовозбуждения. Флуктуации с амплитудой, большей $\left|E_{вх} - E_{вх_0}\right|$, но меньшей абсциссы точки неустойчивого равновесия (например, точки b на рис. 1.2), будут затухать. Для перехода в стационарное состояние с $U_{вх} = 0$ необходимо внешнее воздействие, амплитуда которого больше абсциссы точки неустойчивого равновесия. В данном случае имеет место режим «жесткого» самовозбуждения, а ограничение амплитуды колебаний осуществляется за счет падения крутизны S_1 с возрастанием напряженности режима.

Таким образом, в любом случае устойчивость стационарного состояния и ограничение амплитуды колебаний в АГ определяются нелинейными свойствами ГП, уменьшением S_1 с ростом $U_{вх}$ при уменьшении угла отсечки или при переходе в перенапряженный режим.