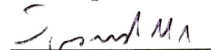


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Руководитель ООП

канд. физ.-мат. наук, доцент

 М.Л. Громов

« 09 » _____ 06 _____ 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

НЕУСТОЙЧИВОСТИ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕЛИНЕЙНОМ
РЕЗОНАНСНОМ КОНТУРЕ

по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика,
направленность (профиль) «Радиофизика, электроника и информационные системы»

Муромцев Ставр Андреевич

Руководитель ВКР

канд. физ.-мат. наук, доцент

 С.С. Новиков

подпись

« 9 » _____ июня _____ 2023 г.

Автор работы

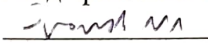
студент группы № 071902

 С.А. Муромцев

подпись

« 9 » _____ июня _____ 2023 г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)
Радиофизический факультет
Кафедра Радиоэлектроники

УТВЕРЖДАЮ
Руководитель ООП
канд. физ.-мат. наук, доцент
 М.Л. Громов
« 03 » 10 2022 г.

ЗАДАНИЕ

по выполнению выпускной квалификационной работы обучающемуся

Муромцеву Ставру Андреевичу

(Ф.И.О. обучающегося)

по направлению подготовки 03.03.03 Радиофизика, направленность (профиль)
«Радиофизика, электроника и информационные системы».

1 Тема выпускной квалификационной работы

Неустойчивости колебательных процессов в нелинейном резонансном контуре

2 Срок сдачи обучающимся выполненной выпускной квалификационной работы:

а) на кафедру – 07.06.2023

б) в ГЭК – 16.06.2023

3 Исходные данные к работе:

Объект исследования – Нелинейный колебательный контур

Предмет исследования – Колебательные процессы

Цель исследования – Исследование видов неустойчивости колебательных процессов в нелинейном резонансном контуре методом численного моделирования

Задачи:

- | | |
|--|---------------|
| <u>а) Изучение теоретических основ описания нелинейных и параметрических явлений в резонансном контуре</u> | до 02.09.2022 |
| <u>б) Составление моделей численного исследования в среде Multisim</u> | до 02.09.2022 |
| <u>в) Отработка методики исследования неустойчивостей при высокой добротности резонанса</u> | до 10.04.2023 |
| <u>д) Поиск видов неустойчивостей в пространстве параметров резонансного контура и схем возбуждения</u> | до 10.05.2023 |
| <u>е) Оформление ВКР и презентации доклада</u> | до 30.05.2023 |

Методы исследования

Численный эксперимент, анализ.

Организация или отрасль, по тематике которой выполняется работа
Машиностроение (электроника)

4. Краткое содержание работы

При экспериментальном исследовании нелинейных колебательных систем в вынужденном гармоническом режиме наблюдаются различные виды неустойчивостей: статическая и динамическая и их варианты. В работе путем моделирования в среде Multisim необходимо провести поиск и классификацию динамических режимов в нелинейном колебательном контуре.

Руководитель выпускной квалификационной работы
канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры
радиоэлектроники

 / С.С. Новиков

Задание принял к исполнению
Студент

 / С.А. Муромцев

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 31 – с., 15 – рис., 15 – источников.

Объектом исследования является нелинейный колебательный контур с полупроводниковым диодом и схемами включения: автоматическое смещение, внешнее (принудительное) смещение.

Цель работы: Исследование видов неустойчивости колебательных процессов в нелинейном резонансном контуре методом численного моделирования.

В ходе работы:

- были составлены модели нелинейного колебательного контура с различными схемами смещения.
- изучены статические и динамические неустойчивости в зависимости от параметров исследуемой схемы.

В результате работы:

- построены амплитудно-частотные характеристики контура при различных параметрах смещения;
- определены области возбуждения параметрического и силового резонанса для колебательного контура с цепью внешнего смещения;
- описан процесс возникновения автомодуляционных колебаний для цепи с автосмещением;
- было обнаружено что при различных вариантах параметров схемы автомодуляция может быть непериодической.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Математические модели нелинейного резонансного контура.	8
1.1 Уравнения нелинейного колебательного контура с цепью автосмещения.....	8
1.2 Нелинейный колебательный контур с принудительным смещением, параметрические резонансы.....	14
2 Составление модели нелинейного колебательного контура в NI Multisim 14.	18
2.1 Методика исследования.....	18
2.2 Снятие амплитудно частотных характеристик нелинейного колебательного контура	20
2.2 Переходные процессы.....	23
2.3 Автомодуляционные колебательные процессы	24
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	31

ВВЕДЕНИЕ

Нелинейный колебательный контур с электрическим управлением широко используется в электронной аппаратуре для автоматического управления резонансными характеристиками. В качестве управителя в таких схемах часто выступают нелинейные элементы с электрически управляемой емкостью – варикапы. Свойства таких цепей широко освещены в учебной и технической литературе.

Действительно все электронные приборы на основе $p - n$ - переходов в зависимости от смещения и амплитуды колебаний, демонстрируют свойства как нелинейного сопротивления, так и нелинейной емкости. Эти свойства используются в приеме-передающей аппаратуре: в качестве преобразователей частоты, умножителей частоты, стабилизаторов частоты, модуляторов, и т.д. Широкое применение варикапы находят в системах с перестройкой частоты - задающих генераторов и гетеродинов в СВЧ диапазоне. При изменении смещения изменяется емкость варикапа и происходит перестройка резонансной частоты колебательных контуров; при этом эффективное управление частотой достигается путем сильного включения варикапа. Естественно, что в таких режимах, амплитуда колебаний на варикапе достигает больших значений и через $p - n$ - переход протекает прямой ток. Возникающие при этом неустойчивости могут приводить к скачкам частоты и амплитуды возбуждаемых колебаний.

Известно [1-3], что в нелинейно-параметрическом контуре кроме вынужденных движений могут возникать различные виды колебательных процессов. Резонансная характеристика колебательного контура с варикапом, в зависимости от вида смещения, имеет характерный несимметричный вид с наклоном как выше резонансной частоты, так и ниже. При достаточно больших сигналах на скатах резонансной характеристики могут возникать гистерезисные явления, которые обычно (на практике) рассматриваются как неустойчивости. Характерным свойством указанных цепей является также

параметрическое возбуждение колебаний; число частот этих колебаний может быть значительным, а их частоты отличными от частоты внешнего сигнала. Известны также работы [4,5], в которых описывается возможность получения хаотических колебаний. Разработка источников колебаний, работающих в режиме динамического хаоса, по-прежнему является актуальной проблемой.

Таким образом, простая на первый взгляд резонансная схема является достаточно сложной многочастотной системой. В классической теории нелинейных колебаний рассмотрение нелинейных - силового и параметрического резонансов обычно искусственно разделено [2,3]. Это позволяет простыми аналитическими средствами осуществить математическое описание указанных резонансов. Вместе с тем в каждом конкретном случае приходится применять меры для стабилизации или подавления тех или иных колебаний.

Целью настоящей работы являются построение и исследование математической модели нелинейного контура.

1. Математические модели нелинейного резонансного контура.

К числу классических задач нелинейной радиотехники и теории колебаний принадлежат модели колебательного контура с полупроводниковым диодом, включенным в запорном направлении. В данном разделе кратко описаны свойства модели резонансного контура с нелинейной емкостью при различных видах смещения: с автоматическим смещением и с внешним смещением.

1.1 Уравнения нелинейного колебательного контура с цепью автосмещения

При описании модели нелинейного контура с автосмещением будем придерживаться учебного пособия [1], при этом ограничимся качественным описанием происходящих в контуре процессов. На рисунке 1 изображена схема последовательного колебательного контура с индуктивностью L и с нелинейной дифференциальной емкостью $C(u)$ $p - n$ - перехода полупроводникового диода. Сопротивление контура r учитывает диссипативные потери в цепи. Контур возбуждается источником гармонической ЭДС $e(t) = E \cos \omega t$. Элементы C_Φ , R_0 образуют сглаживающий фильтр нижних частот.

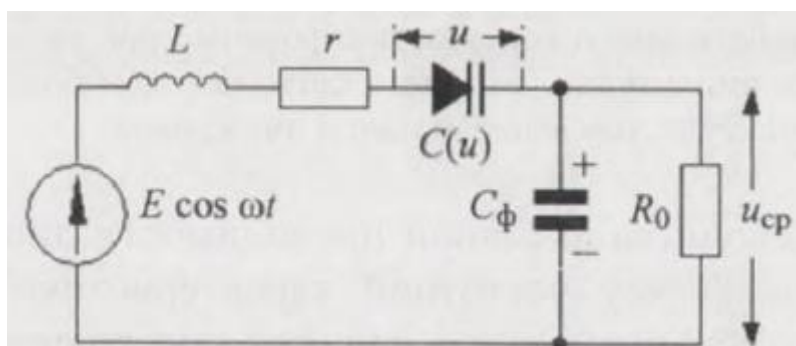


Рисунок 1 - Колебательный контур с полупроводниковым диодом и цепью автосмещения [1]

При близких к резонансной частоте контура, в режиме вынужденных колебаний, на диоде могут развиваться колебания большой амплитуды, захватывая при этом область обратных напряжений, где диод является

нелинейной емкостью, а также и область прямых напряжений с током проводимости через диод.

Как известно, наличие в колебательном контуре нелинейной реактивности приводит к трансформации формы резонансной характеристики. Нелинейная зависимость емкости от напряжения $C(u)$ приводит к тому, что средняя за период емкость $C_1 = \overline{C(u)}$ оказывается функцией амплитуды переменного напряжения на диоде U_1 . Поэтому при приближении частоты внешнего воздействия ω к области резонанса происходит сдвиг резонансной частоты $\omega_p = 1/\sqrt{LC_1(U_1)}$.

В результате этого амплитудно- частотная характеристика (АЧХ) контура трансформируется, приобретая характерный несимметричный вид (рисунок 2).

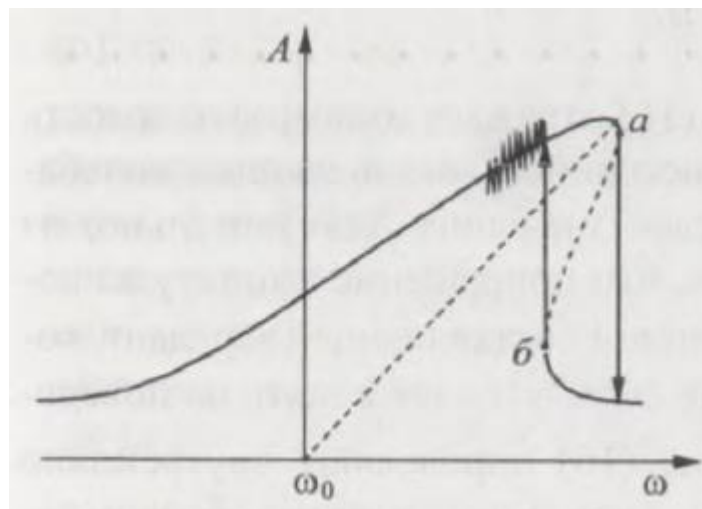


Рисунок 2 – Вид АЧХ нелинейного контура с автоматическим смещением [1]

Нелинейные свойства активной проводимости диода также оказывают влияние на форму частотной характеристики колебательного контура, однако механизм этого влияния совершенно иной.

За счет нелинейности вольтамперной характеристики диода в цепи возникает постоянная составляющая тока, которая выделяется фильтром и создает на сопротивлении R_0 зависящее от амплитуды U_1 постоянное

напряжение $U_{cp}(U_1)$. Это напряжение называется напряжением автоматического смещения.

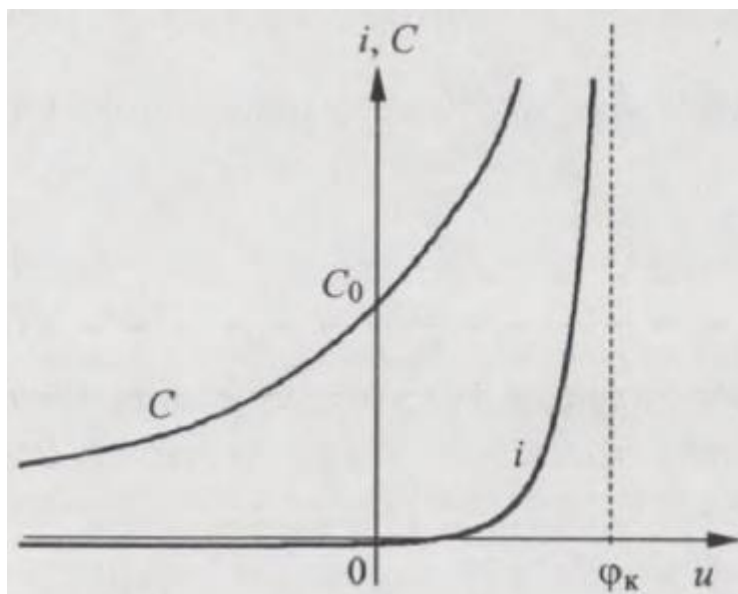


Рисунок 3 - Вольтамперная и вольт-фарадная характеристики диода [1]

На рисунке 3 приведены вольтамперная и вольт-фарадная характеристики р-п перехода. Из этих характеристик следует, что напряжение автосмещения сдвигает рабочую точку влево. Это приводит к уменьшению емкости контура, к увеличению резонансной частоты и, как следствие, к наклону резонансной кривой вправо. При увеличении амплитуды колебаний на диоде постоянная составляющая автосмещения также возрастает и максимум характеристики сдвигается вправо. Правый склон становится более крутым и трансформируется в неоднозначные ветви кривой. Сдвиг резонансной частоты тем значительней, чем выше амплитуда сигнала E и добротность контура Q . В области гистерезиса (а-б на рисунке 2.) амплитуда колебаний может принимать два стационарных значения. Таким образом, возникает связь емкости C_1 и амплитуды напряжения U_1 – $C_1(u_{cp}(U_1))$. (Нижний индекс «1» отображает усреднение по первой гармонике.) Вид этой связи существенным образом определяется сопротивлением резистора фильтра R_0 .

Из приведенных рассуждений следует, что быстрые процессы в контуре (колебания) и медленные процессы в цепи автосмещения связаны

друг с другом. С одной стороны, напряжение смещения пропорционально амплитуде колебаний на диоде U_1 , которая при приближении частоты ω к резонансной растет. С другой стороны, изменение смещения на диоде изменяет его емкость, что вызывает отклонение резонансной частоты контура и последующее изменение амплитуды колебаний.

Связь указанных переменных описывается вольтамперной $i(u)$ и вольт-фарадной $C(u)$ характеристиками полупроводникового диода. Эти характеристики должны быть введены в математическую модель системы. Они описываются известными выражениями:

$$C(u) = \frac{C_0}{\sqrt{1-u/\varphi_k}} \quad (1)$$

$$i(u) = i_s [\exp(\alpha u) - 1] \quad (2)$$

Для составления дифференциального уравнения колебательного контура необходима вольт-кулоновая характеристика диода; она получается из выражения (1):

$$C = \frac{dq_{p-n}}{du} = \frac{C_0}{\sqrt{1-u/\varphi_k}},$$

где q_{p-n} – заряд, накапливающийся на емкости $p-n$ – перехода.

После интегрирования получается нелинейная связь напряжения и заряда:

$$U(q) = q - \frac{q^2}{4}. \quad (3)$$

Дифференциальное уравнение колебательного контура с нелинейной емкостью приводится к виду:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 U(q) = \omega_0^2 \left(\frac{E}{\varphi_k} \right) \cos \omega t \quad (4)$$

Здесь $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_0}$, $Q = 1/\omega_0 r C_0$ - резонансная частота и добротность контура для случая малого сигнала.

Уравнение (4) не учитывает потери, вносимые в колебательный контур за счет токов прямой проводимости полупроводникового диода. Данное приближение является допустимым и указанными переменными токами можно пренебречь. Эта ситуация реализуется в режиме автоматического смещения при достаточно большом сопротивлении резистора R_0 .

При воздействии на контур гармонического сигнала возникают вынужденные колебания той же частоты. Кроме того, квадратичный характер вольт-кулоновой характеристики (3) указывает на то, что накапливаемый на нелинейной емкости заряд $q(t)$ кроме переменной составляющей должен содержать постоянную составляющую q_0 . Таким образом, решение должно содержать, кроме вынужденной составляющей. Также постоянную составляющую:

$$q(t) = q_0 + A \sin(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

где A – амплитуда колебаний заряда, а φ – сдвиг фазы колебаний относительно внешнего сигнала.

Предположим, что избирательность резонансной системы (добротность Q) достаточно велика и поэтому колебательные процессы близки к гармоническим. В силу указанной избирательности при использовании метода медленно меняющихся амплитуд можно удержать в слагаемом $U(q)$ уравнения (4) только первую гармонику. Ее величина находится непосредственной подстановкой (5) в (3):

$$U_1 = A \left(1 - \frac{q_0}{2}\right) \sin(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

В установившемся режиме стационарные значения амплитуды и фазы определяются уравнениями

$$A_{\text{ст}} = V \cos \varphi_{\text{ст}}, \quad \operatorname{tg} \varphi_{\text{ст}} = Q \left(1 - \frac{q_{0\text{ст}}}{2} - \frac{\omega^2}{\omega_0^2} \right) \quad (7)$$

Следует сказать, что дифференциальные уравнения (4) и их решения в виде (7) недостаточны для полного описания динамических процессов. В этих соотношениях присутствует еще одна переменная, а именно постоянная составляющая заряда $q_{0\text{ст}}$. Для этой переменной должны быть записаны отдельные уравнения. Однако для качественного анализа можно ограничиться рассмотрением уравнений (7). Из этих уравнений следуют основные особенности амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик нелинейного контура, обусловленные постоянной составляющей заряда $q_{0\text{ст}}$. Действительно, амплитуда колебаний заряда достигает максимального значения $A=A_{\text{max}}$ на резонансной частоте ω_r , для которой $\varphi_{\text{ст}}=0$. Эта частота равна ω_0 только для малых амплитуд колебаний, когда нелинейные свойства проявляются слабо: $q_{0\text{ст}} \approx 0$. Если амплитуда колебаний на нелинейном элементе велика и $q_{0\text{ст}} \neq 0$, то контур расстраивается: $\omega_r \neq \omega_0$. При приближении к резонансу амплитуда колебаний возрастает что, приводит к увеличению $|q_{0\text{ст}}|$ и, следовательно, к увеличению расстройки контура $|\omega_r - \omega_0|$. Это означает, что резонансная характеристика нелинейного контура, в отличие от линейного контура имеет характерный наклон. Данный эффект проявляется тем сильнее, чем выше добротность контура. Направление расстройки, т.е. знак $(\omega_r - \omega_0)$, зависит от знака $q_{0\text{ст}}$ в (7), который может быть как положительным так и отрицательным.

Когда сопротивление R_0 значительно больше сопротивления диода в прямом направлении, то даже при малой амплитуде переменного напряжения и малом среднем (выпрямленном) токе, напряжение автосмещения $u_{\text{ср}}$ может быть достаточно большим. В этом случае p - n переход с RC -фильтром

фактически является пиковым детектором. Поэтому величина постоянного напряжения на диоде почти равна амплитуде переменного напряжения. В соответствии с этим, амплитуда заряда A почти равна его постоянной составляющей:

$$q_0 \approx -A. \quad (8)$$

1.2 Нелинейный колебательный контур с принудительным смещением, параметрические резонансы

На рисунке 4 изображения нелинейная цепь колебательного контура с внешним (принудительным) смещением.

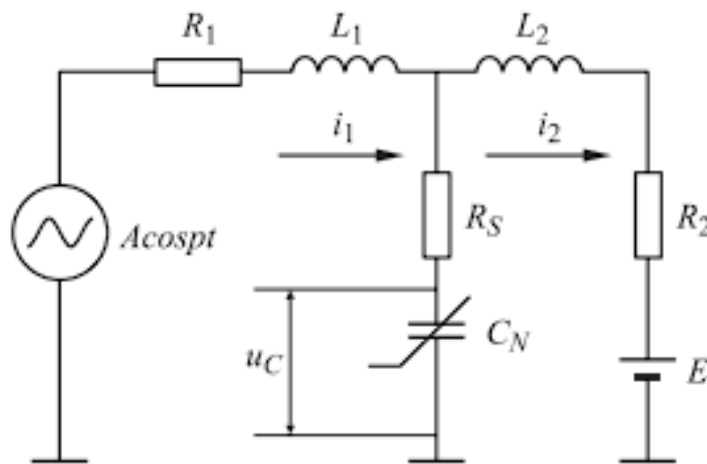


Рисунок 4 – Принципиальная схема неавтономной электрической цепи с нелинейной емкостью. [4]

Схема, изображенная на рисунке 4 содержит внешний источник гармонического сигнала вида $A \cos pt$, линейные диссипативные элементы R_1 , R_2 , R_s , нелинейную емкость C_N , два нелинейных индуктивных элемента L_1 , L_2 и источник напряжения смещения E . Диссипативные элементы R_1 , R_2 , R_s отражают потери энергии в реактивных элементах L_1 , L_2 и C_N соответственно. Индуктивность L_1 служит совместно с нелинейной емкостью для настройки цепи в резонанс с частотой внешнего воздействия p , индуктивность L_2 образует цепь смещения нелинейной емкости.

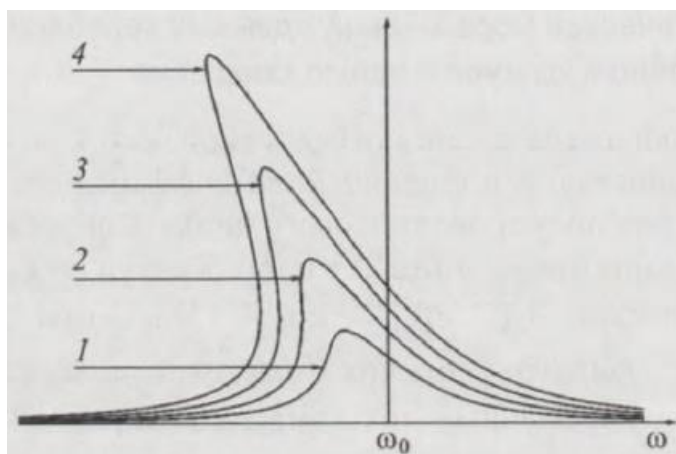


Рисунок 5 – Вид АЧХ нелинейного контура с принудительным смещением. [1]

На рисунке 5 изображен вид АЧХ нелинейного контура с принудительным смещением [1]. В отличие от контура с автоматическим смещением сдвиг резонансной частоты при увеличении амплитуды возбуждения происходит в сторону низких частот. Это свойство отмечалось при обсуждении формулы (7).

В работе [4] для численного исследования подобной системы были записаны уравнения для токов и напряжений. При наличии внешней возмущающей силы $A \cos(pt)$ колебательный контур приобретает дополнительные степени свободы и переходит в систему с полутора степенями свободы, которые описываются тремя уравнениями первого порядка, что оказывается достаточным для изучения разнообразной динамики модели:

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_1}{dt} = A \cos pt - R_1 i_1 - R_s(i_1 - i_2) - u_c, \\ L_2 \frac{di_2}{dt} = u_c + R_s(i_1 - i_2) - R_2 i_2, \\ \frac{d}{dt}(C_N u_c) = i_1 - i_2. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь нелинейная емкость C_N описывается выражением:

$$C_N = C_0 \sqrt{\frac{g}{g - u_c}}, \quad g = E + \varphi_0. \quad (10)$$

В последнем соотношении приняты следующие обозначения: E – напряжение смещения, φ_0 – контактная разница потенциалов, C_0 – емкость перехода в рабочей точке при смещении E .

Третье уравнение системы (9) с учетом выбранного вида нелинейности (10) после выполнения необходимых преобразований запишем в форме

$$C_0 m(u_C) \frac{du_C}{dt} = i_1 - i_2 \quad (11)$$

в которой множитель

$$m(u_C) = \sqrt{\frac{g}{g-u_C}} \frac{g-0.5u_C}{g-u_C} \quad (12)$$

является коэффициентом модуляции нелинейно емкости в рабочей точке.

Построенная модель (9), (11), (12) пригодна для проведения расчетов при произвольных значениях параметров диссипативных и реактивных элементов при выполнении единственного ограничения $u_C < g$. Наблюдаемые при вариациях этих параметров бифуркационные явления и процессы настолько множественны и разнообразны что в настоящей работе ограничимся рассмотрением только резонансных случаев.

Также известно из [2,3], что в нелинейных системах может возникнуть явление, состоящее в возникновении в контуре нарастающего колебательного процесса с частотой, жестко связанной с частотой внешнего параметрического воздействия, называемое «параметрическим резонансом». Параметрический резонанс имеет место при выполнении определенных соотношений между частотой изменения параметра p и частотой возбуждаемых колебаний ω , близкой или совпадающей с собственной частотой возбуждаемой системы ω_0 ($p = 2\omega/n$) (где $n = 1, 2, \dots$), а также при выполнении условий, определяющих изменения параметра m (глубина модуляции параметра) для данного соотношения частот.

Математическое описание параметрического резонанса в нелинейных задачах хорошо развито и сводится к нахождению областей значений соотношения частот $2\omega_0/p$ и глубин модуляции m , при которых реализуется параметрическое возбуждение колебаний.

В классической учебной монографии [2] эти области значений обсуждаются для систем без затухания и с затуханием, описываемых уравнениями

$$\begin{aligned}\ddot{x} + \omega_0^2(1 + m \cos pt)x &= 0 \\ \ddot{y} + 2\delta\dot{y} + \omega_0^2(1 + m \cos pt)y &= 0\end{aligned}\quad (14)$$

Результаты этих обсуждений в виде графиков показаны на рисунке 6. Из них видно, что при отсутствии в системе потерь (рисунок 6а) вершины областей параметрической неустойчивости лежат на оси $m=0$. Действительно, при отсутствии модуляции область параметрического резонанса (заштрихованная область) стягивается в точку. Заштрихованные области соответствуют нарастающему процессу с частотой $\omega = np/2 \approx \omega_0$ ($n = 1, 2, 3, \dots$). При наличии потерь (рисунок 6б) вершины лежат на нарастающей прямой. Вне этих областей в случае диссипативной системы существует затухающий колебательный процесс.

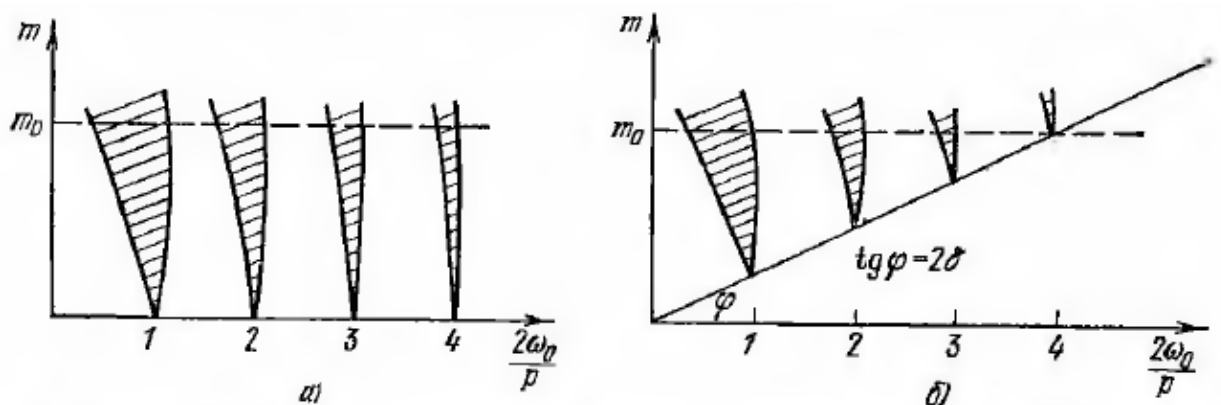


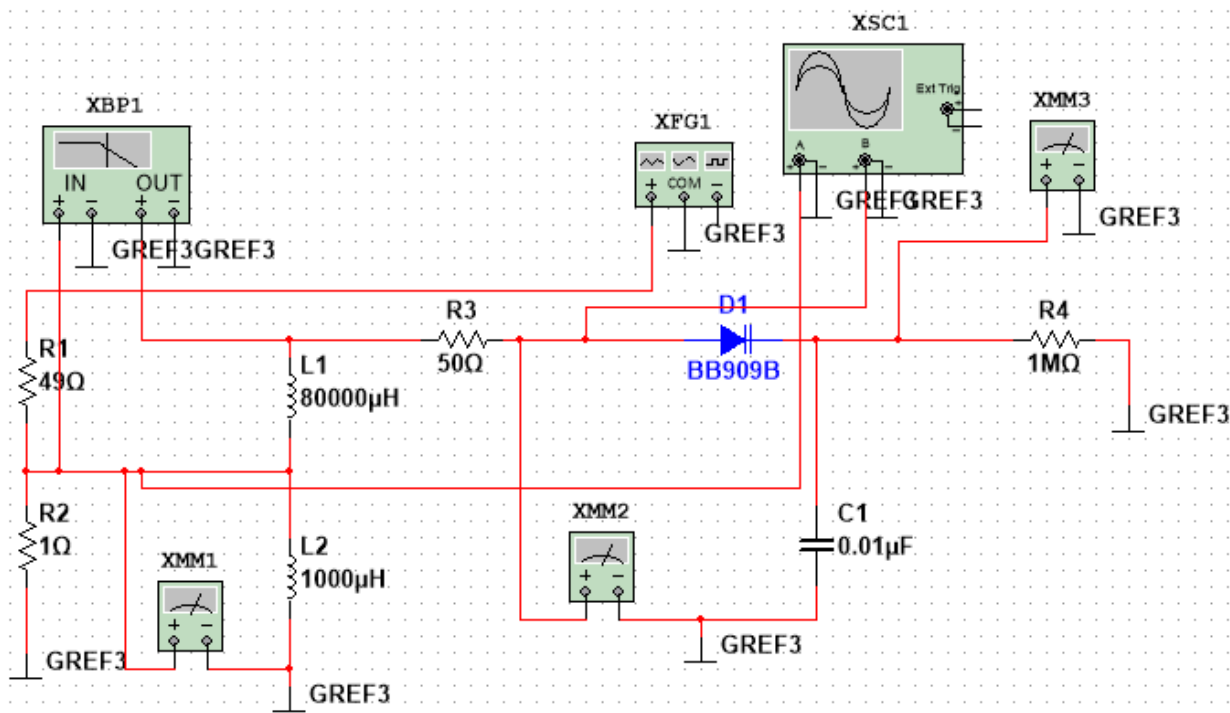
Рисунок 6 – Области параметрического возбуждения для системы без затухания (а) и с затуханием (б).

2 Составление модели нелинейного колебательного контура в NI Multisim 14.

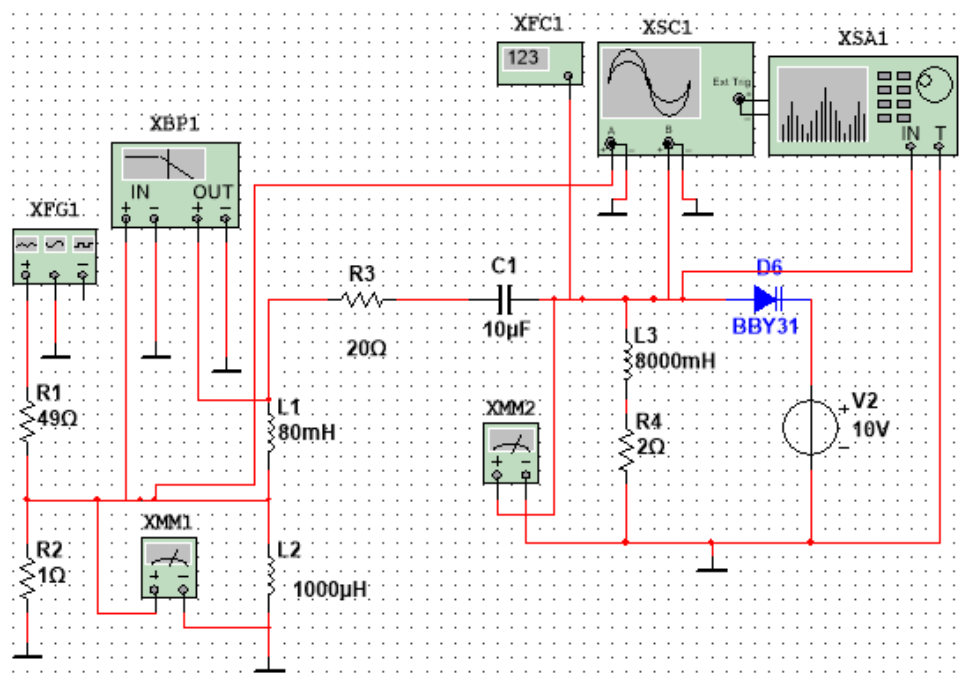
В этой главе рассмотрены две модели нелинейного колебательного контура, составленные на платформе Multisim 14 – с цепью автоматического и с цепью внешнего смещения. Построены амплитудно-частотные характеристики при различных условиях возбуждения сигнала. Определена область параметров для рассмотрения автомодуляционной неустойчивости.

2.1 Методика исследования

На рисунке 7(а,б) изображена схема нелинейного контура с цепью автосмещения и внешнего смещения на платформе Multisim. Контур состоит индуктивных элементов $L1$, $L2$ и нелинейной дифференциальной емкостью p - n -перехода (варикапа $D1$, $D6$). Автоматическое смещение задается на сопротивлении $R4$ постоянной составляющей тока через диод.



а) Схема с цепью автосмещения



б) Схема с внешней цепью смещения

Рисунок 7 – Схема нелинейного контура на платформе Multisim

Элементы $C1$, $R4$ (рисунок 7,а) образуют фильтр нижних частот. Индуктивность $L3$ (рисунок 7,б) образует цепь смещения нелинейной емкости, $V2$ – источник напряжения смещения. Возбуждающий сигнал от генератора $XFG1$ кондуктивно вводится в контур через низкоомный делитель $R1$ - $R2$; Это обеспечивает малые потери, вносимые в контур со стороны генератора. Регулировка добротности происходит за счет изменений значений $R3$. При $R3=50$ Ом добротность контура равна примерно 150. Этого достаточно, чтобы амплитуда напряжения на варикапе достигала величин, необходимых для эффективного автосмещения.

На платформе Multisim имеется виртуальный измеритель частотных характеристик (анализатор Боде). Однако этот измеритель работает при малых уровнях возбуждающих напряжений. Измеряемая им характеристика является малосигнальной и не отражает процессы, связанные с нелинейностью (рисунок 8).

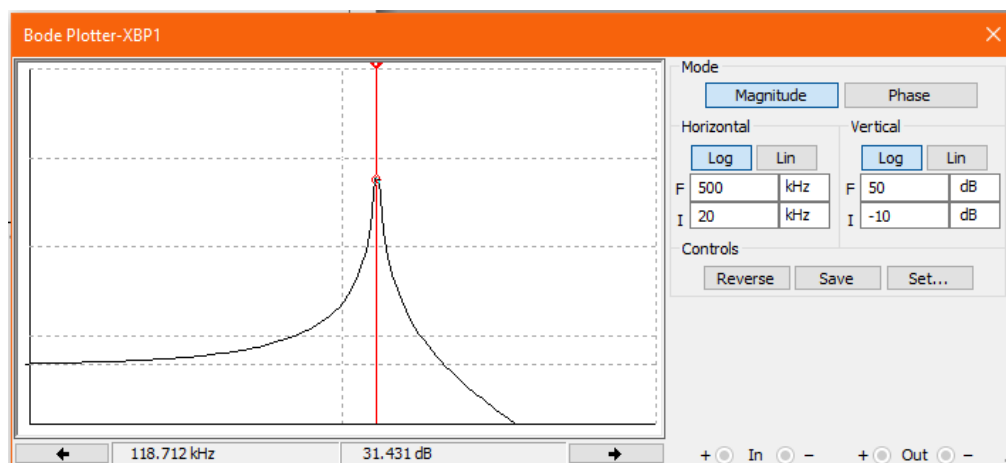


Рисунок 8 - Малосигнальная резонансная частота контура

Осциллограф (XSC1) используется для визуализации переходных процессов, при гистерезисных переходах и в режиме автомодуляционной неустойчивости. Мультиметр (XMM1) показывает уровень напряжения возбуждения, приложенного к контуру. Мультиметр (XMM2) измеряет переменное напряжение на варикапе. Мультиметр (XMM3) регистрирует напряжение автосмещения.

2.2 Снятие амплитудно частотных характеристик нелинейного колебательного контура

При моделировании были рассмотрены АЧХ контура с автосмещением при 1-9 МОм и входной амплитуде сигнала 40В для цепи автосмещения (рисунок 9), и АЧХ контура с внешним смещением при различных амплитудах сигнала (рисунок 10).

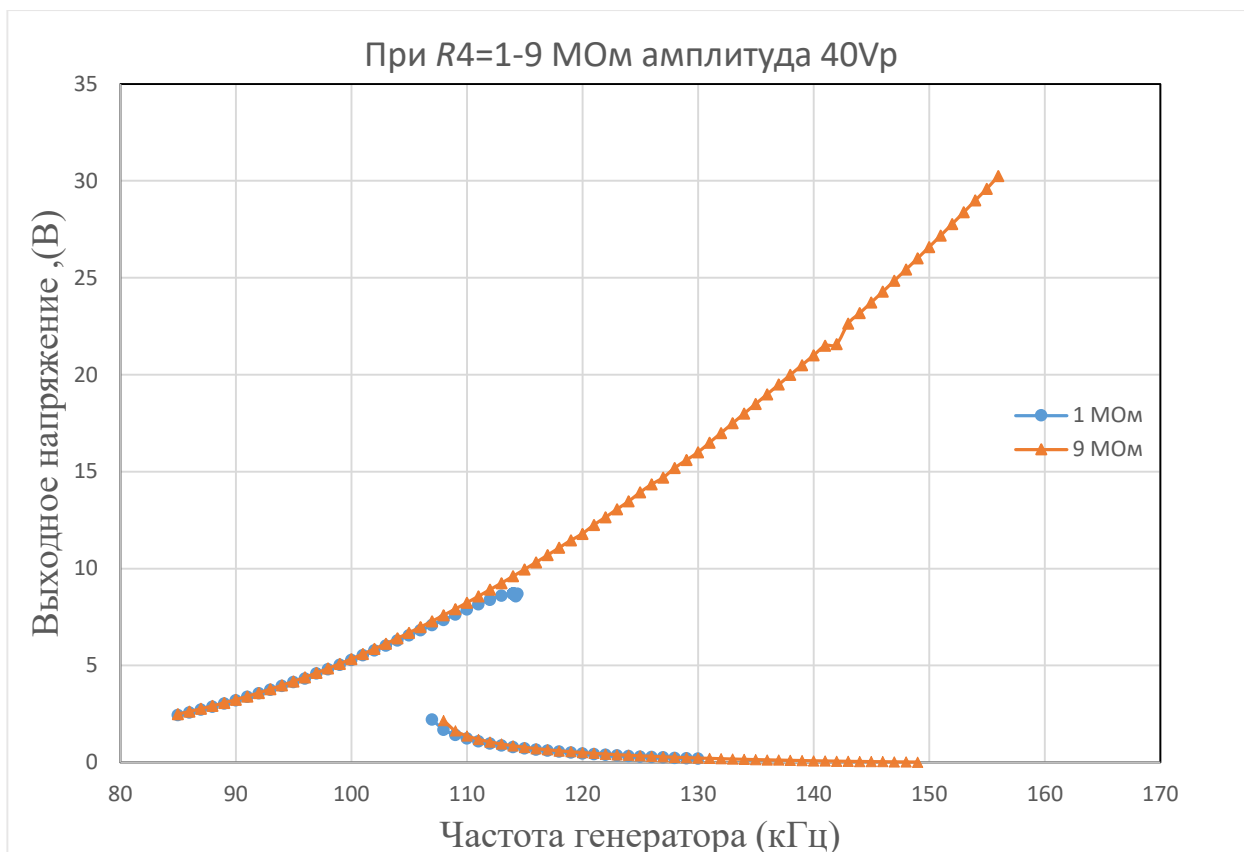


Рисунок 9 - АЧХ нелинейного колебательного контура с цепью автосмещения для сопротивлений $R_4 = 1$ и 9 МОм.

Численные эксперименты, что ширина петли гистерезиса и смещение резонансной частоты зависят от: уровня возбуждающего сигнала, добротности контура и сопротивления автосмещения. Так, наблюдаемая ширина петли достигает большой величины, порядка 50%.

Построение графиков АЧХ с гистерезисом проводилось в ручном режиме. Как уже было сказано, анализатор Боде измеряет малосигнальную резонансную частоту контура (рисунок 8), которая приблизительно определяла местоположение нелинейной АЧХ. В случае высокого уровня возбуждения гистерезисные участки АЧХ снимались при последовательном изменении частоты (в ручном режиме) сверху вниз или снизу-вверх.

Амплитудно-частотные характеристики контура с принудительным смещением отличается существенно большим разнообразием. Это связано с возможностью параметрического возбуждения в такой системе при

различных частотах внешнего воздействия p , подчиняющихся соотношению $p \approx \frac{2f_0}{n}$.

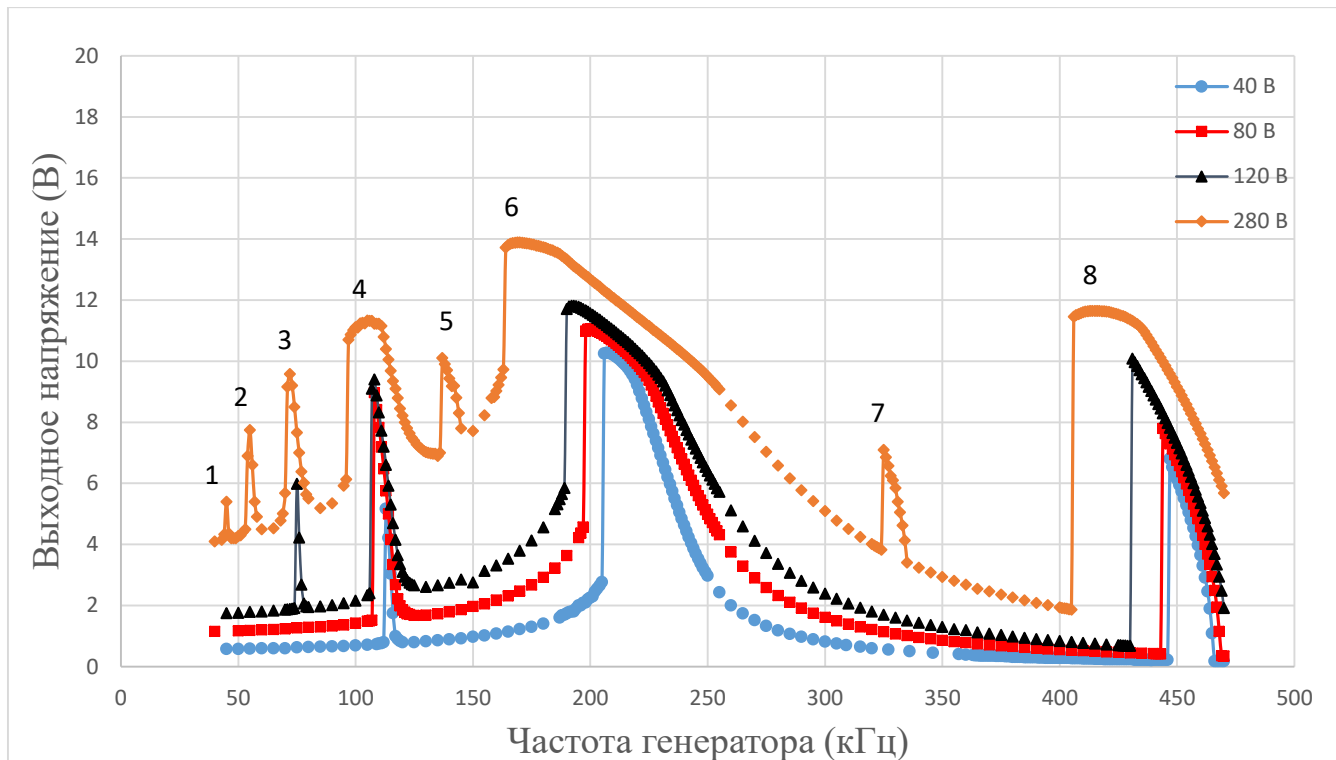


Рисунок 10 – АЧХ нелинейного колебательного контура с цепью внешнего смещения при различных амплитудах входного напряжения

Построенное семейство АЧХ, приведенных на рисунке 10, представляет собой зависимости амплитуды напряжения возбуждаемых колебаний от частоты внешнего воздействия p для различных амплитуд этого воздействия. АЧХ построены при смещении 7,5 В. Собственная (мало сигнальная) частота f_0 равна $f_0 = 230$ кГц.

Как видно из графиков число наблюдаемых резонансов достигает значительной величины. В литературе эти резонансы называют параметрическими или силовыми. В выбранном диапазоне частоты наблюдаются восемь нелинейных резонансов, пронумерованных от 1 до 8. При изменении частоты p сверху вниз, в окрестностях резонансных частот наблюдались гистерезисные явления, с наклоном кривых влево. При этом ширина гистерезиса довольно мала. Из теории нелинейных колебаний, частоты силовых нелинейных резонансов определяются соотношением вида

$\frac{p}{f_0} = 1/n$ ($n = 1, 2, 3, \dots$), а частоты нелинейных параметрических резонансов $\frac{p}{f_0} = 2/m$ ($m = 1, 2, 3, \dots$). Кроме того в системе возможны силовые резонансы высоких порядков на частотах $\Omega_{nm} = n/m$.

Первый и седьмой резонансы наблюдаемые на АЧХ (рисунок 10) можно отнести к нелинейным силовым резонансам при $n/m = 1/4$ и $n/m = 3/2$. Резонансы 3, 5, 8 являются нелинейными параметрическими резонансами с $m = 5, 3, 2$ соответственно. Резонансы 2 ($n=3, m=6$), 4 ($n=2, m=4$), 6 ($n=1, m=2$) являются результатом проявления одновременно силовых и параметрических явлений.

Графики строились в Microsoft Excel, где выбирался режим построения графика по точкам.

2.2 Переходные процессы

При проведении эксперимента, по мере скачкообразного изменении частоты генератора (XFG1), в системе возникали переходные процессы. Пример таких процессов показан на осциллограмме колебаний на контуре (нижняя осциллограмма) рисунка 11. На верхней осциллограмме (здесь и далее) показан уровень возбуждающих колебаний (U_B).

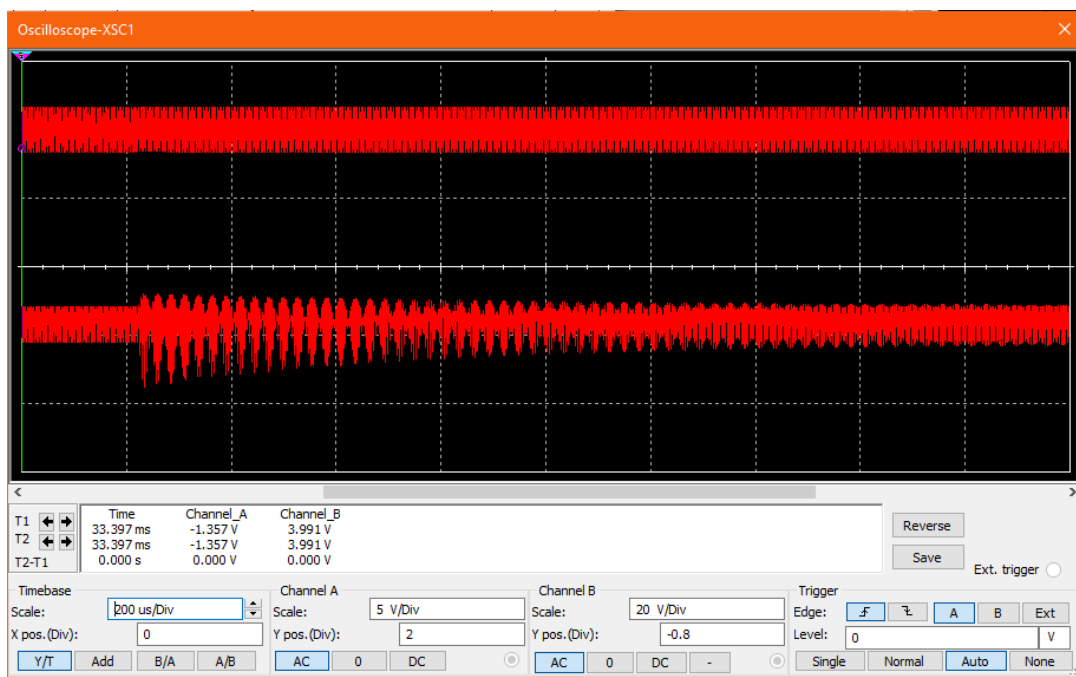


Рисунок 11 - Осциллограмма огибающей напряжения на контуре (нижняя осциллограмма) и напряжения возбуждения (верхняя осциллограмма). Пример возникновения переходного процесса

В силу высокой добротности контура переходные процессы нередко имеют характер амплитудно-модулированных колебаний. Эти процессы вызваны суперпозицией установившихся вынужденных колебаний (генератора) и собственных, возникающих при переключении частоты. Так как частоты вынужденных и собственных колебаний различаются, это сопровождается биениями. Как правило собственные колебания затухают, поэтому модуляция так же затухает. Биения в свою очередь так же сопровождаются гистерезисными переходами. Это стоит учитывать при снятии АЧХ контура по точкам.

2.3 Автомуляционные колебательные процессы

Теоретическое и экспериментальное исследования показывают, что на левом (пологом) склоне частотной характеристики возникает динамическая неустойчивость, которая имеет автомуляционный характер. В отличие от затухающих переходных процессов автомуляционные колебания не затухают. Пример автомуляционных колебаний показан на осциллограмме

рисунка 12. Авто модуляционные колебания легко реализуются при сопротивлении автосмещения R_4 свыше 7 МОм.

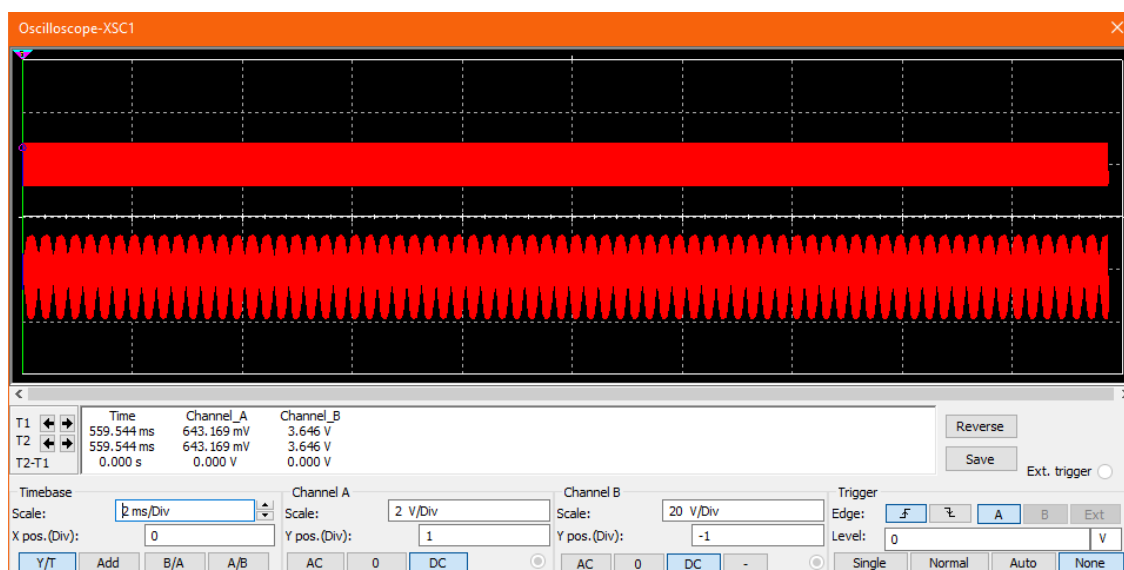
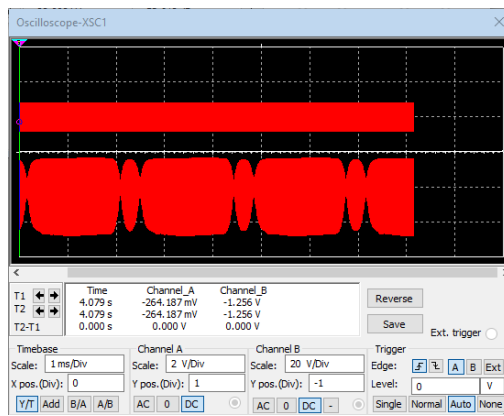


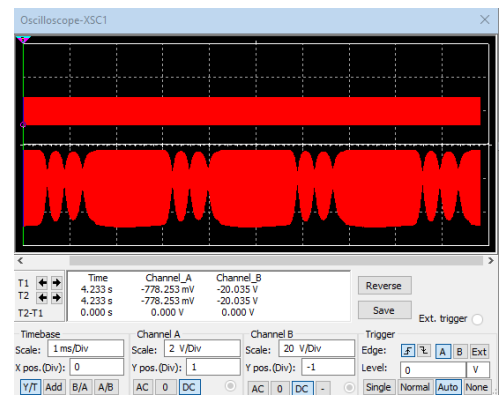
Рисунок 12 - Осциллограмма авто модуляции при: $R_3=10$ Ом, $C_1=0.0002$ мкФ, $R_4=9$ МОм, $f=122-158$ кГц, $U_b = 40$ В

В зависимости от параметров цепи автосмещения, добротности контура и частоты генератора в системе могут наблюдаться незатухающие авто модуляционные колебания с различной огибающей.

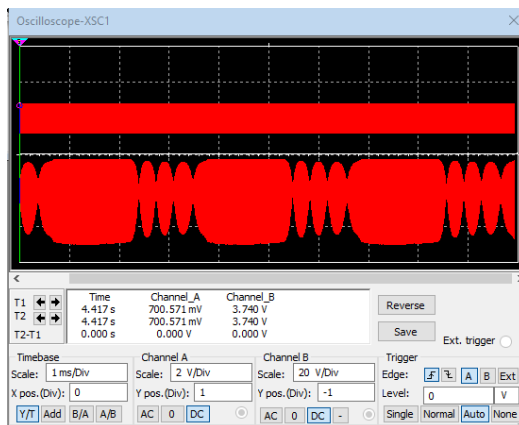
На рисунках 13а-13и приведены варианты периодической авто модуляции сложной формы. По мере увеличения частоты возбуждения f происходит увеличение числа «коротких волн» огибающей. При высоких значениях частоты возбуждения эти волны образуют цуги с почти периодической модуляцией. При этом длительность паузы, огибающей почти не изменяется. Можно сказать, что высокочастотная авто модуляция (рисунок 12) прерывается паузами со стабильной огибающей. Можно предполагать, что интервал стабильной огибающей определяется медленными инерционными процессами в RC -фильтре.



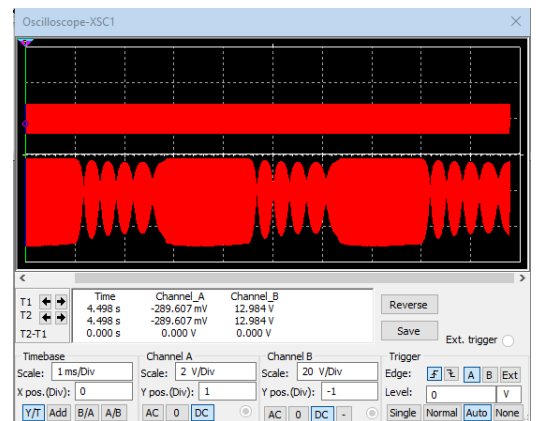
а) $f = 129 \text{ кГц}$



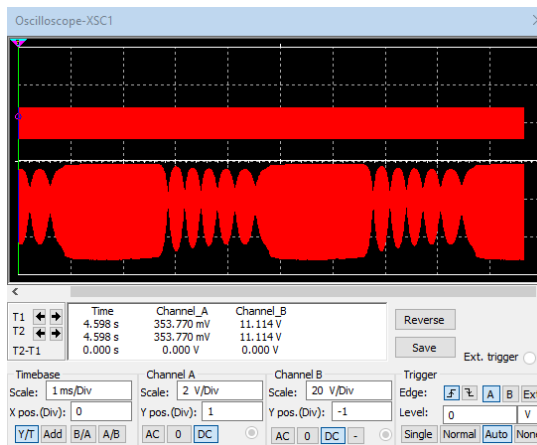
б) $f = 130 \text{ кГц}$



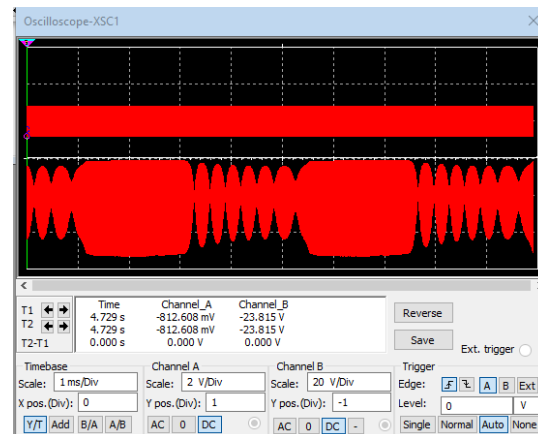
в) $f = 131 \text{ кГц}$



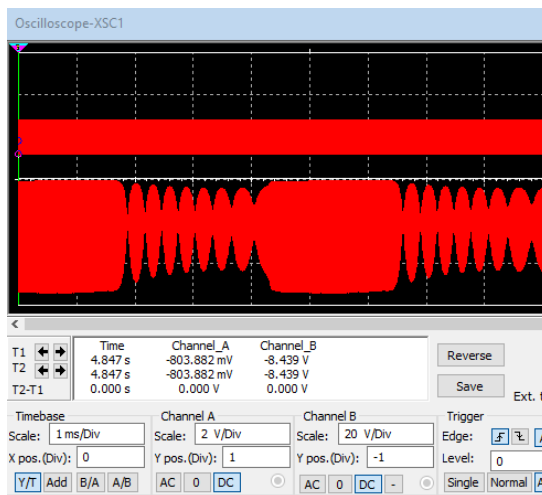
г) $f = 132 \text{ кГц}$



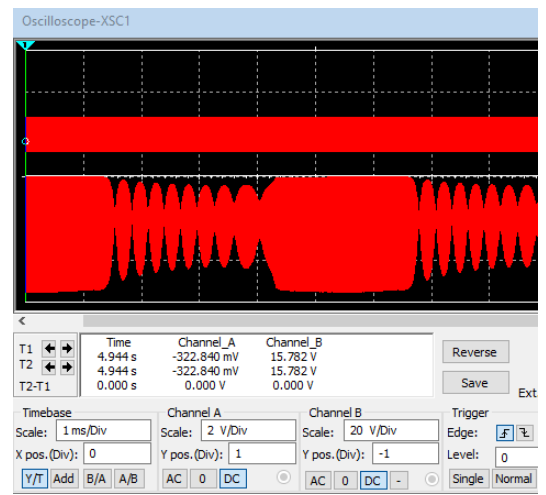
д) $f = 133 \text{ кГц}$



е) $f = 134 \text{ кГц}$



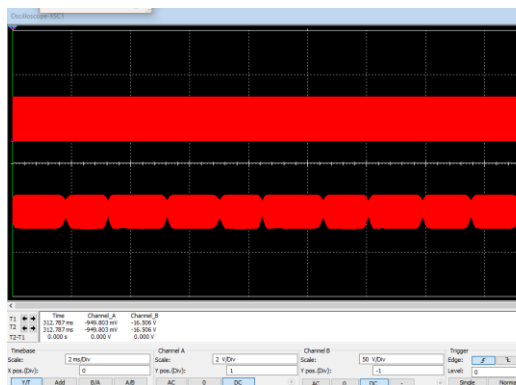
$$\text{ж) } f = 135 \text{ кГц}$$



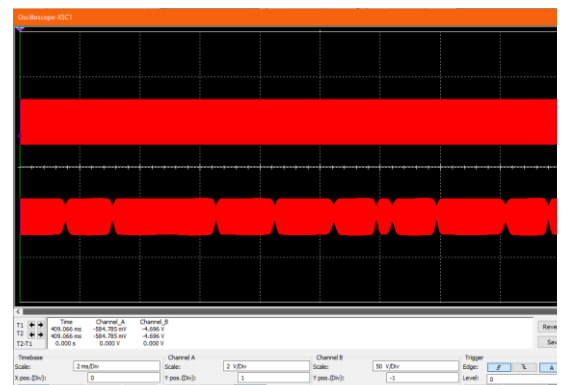
$$\text{и) } f = 136 \text{ кГц}$$

Рисунок 13 - Непереодическая автомодуляция при различных частотах возбуждения f , $R_3 = 50 \text{ Ом}$, $R_4 = 9 \text{ МОм}$, $C_1 = 0.01 \text{ мкФ}$, $U_B = 40 \text{ В}$

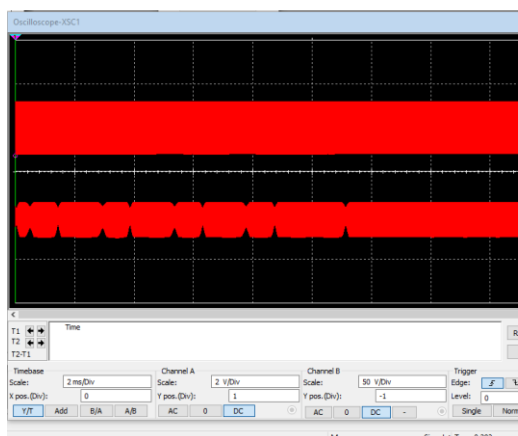
При определенном сочетании указанных параметров автомодуляция может быть неперериодической (рисунок 14). По-видимому, спектр колебаний в этих случаях должен быть непрерывным, шумоподобным.



$$\text{а) } f = 124 \text{ кГц}, U_B = 50 \text{ В}, C_1 = 0.01 \text{ мкФ}, R_3 = 50 \text{ Ом}$$

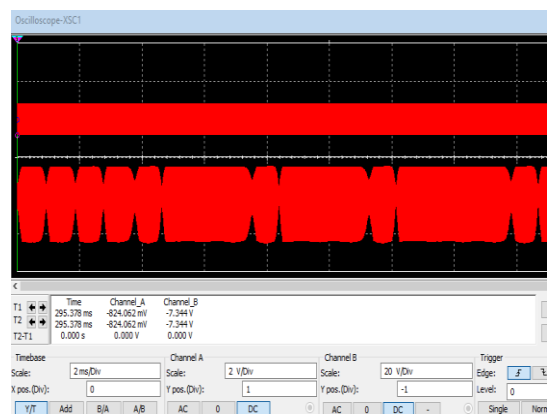


$$\text{б) } f = 126 \text{ кГц}, U_B = 50 \text{ В}, C_1 = 0.01 \text{ мкФ}, R_3 = 50 \text{ Ом}$$



в) $f = 125 \text{ кГц}$, $U_B = 60 \text{ В}$,

$C1 = 0.005 \text{ мкФ}$, $R3 = 50 \text{ Ом}$



г) $f = 126 \text{ кГц}$, $U_B = 40 \text{ В}$,

$C1 = 0.0025 \text{ мкФ}$, $R3 = 10 \text{ Ом}$

Рисунок 14 – Варианты непериодической автомодуляции при $R4 = 9 \text{ МОм}$.

Выше было сказано, что медленные процессы могут быть обусловлены инерционностью фильтра нижних частот (цепи автосмещения). На рисунке 15 изображены осциллограммы колебаний в автомодуляционном режиме. На верхней осциллограмме изображен процесс колебаний на RC -фильтре. Следует отметить что высокочастотные возбуждающие колебания присутствуют на RC -фильтре. Это означает что этот фильтр не развязывает цепь постоянной (медленной) составляющей колебаний и резонансную цепь (колебательный контур). Поэтому высокочастотные колебания в контуре и «низкочастотные» — в цепи автоматического смещения оказываются связанными, и формируют автомодуляционные процессы.

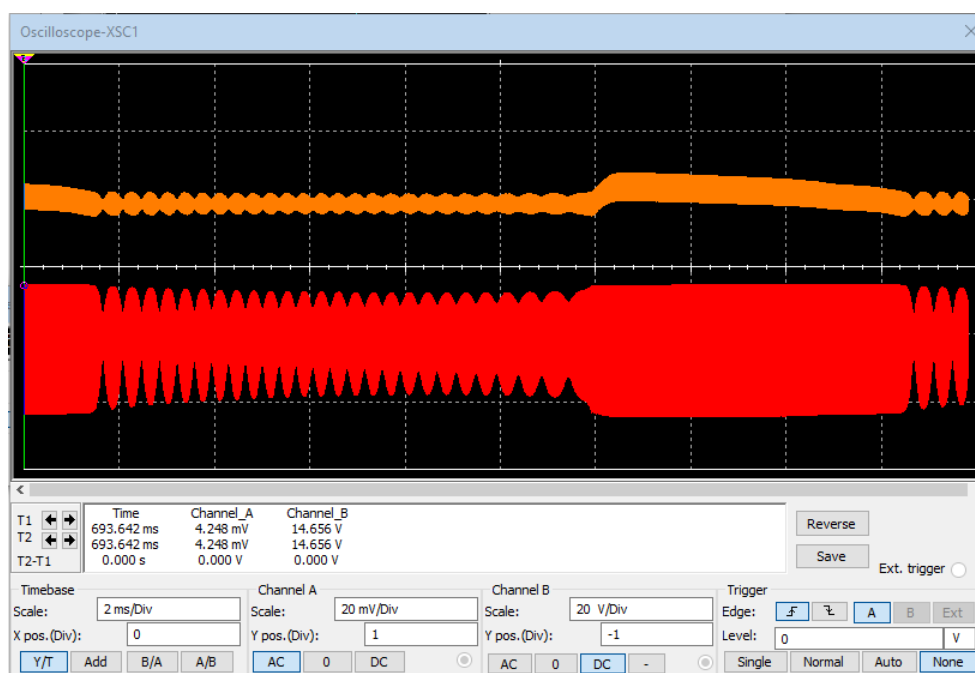


Рисунок 15 - Осциллограммы колебаний в автомодуляционном режиме.

Процесс колебаний на RC -фильтре (верхняя осциллограмма)

Из рисунка 15 видно, что в течении паузы напряжение автосмещения, образуемое на емкости фильтра, медленно изменяется. В начальный момент паузы это напряжение достаточно велико и запирает p - n переход. Далее это напряжение уменьшается (конденсатор разряжается) до уровня, когда p - n переход открывается и начинается новый автомодуляционный интервал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных численных исследований процессов в колебательных контурах с нелинейной емкостью, были рассмотрены и проанализированы различные нелинейные резонансные явления, имеющие как силовую, так и параметрическую природу. На базе программного обеспечения Multisim были построены модели нелинейного колебательного контура при различных видах смещения. Было проведено исследование частотных характеристик резонансной системы и ее динамических свойств. Обнаружены и рассмотрены различные варианты возникновения автомодуляционной неустойчивости. На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. В нелинейном контуре с автоматическим смещением в зависимости от параметров цепи автосмещения, могут существовать гистерезисная и динамическая неустойчивости. Полоса гистерезисной неустойчивости может достигать половины резонансной частоты.

2. Динамическая неустойчивость в системе с автоматическим смещением возникает на левом склоне АЧХ и существует в виде автомодуляционных колебаний (пакетов).

3. В системе с внешним (принудительным) смещением существуют силовые и параметрические резонансы. Силовые резонансы возникают на гармониках внешнего возбуждения ($f = f_0/n$). Параметрические резонансы возникают на частотах ($f = 2f_0/m$). При близости этих частот возбуждение колебаний происходит одновременно по параметрическому и силовому сценарию.

5. Возбуждение нелинейных резонансов происходит при высокой добротности колебательной системе, что обуславливает переходные процессы большой длительности.

6. Разработанные проекты могут использоваться при изучении колебательных явлений в учебном процессе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нелинейные параметрические явления в радиотехнике: лабораторный практикум. – Владимиров С.Н., Дейкова Г.М., Журавлев В.А., Майдановский А.С., Мещеряков В.А., Новиков С.С. – Под ред. А.С. Майдановского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 276 с.
2. Мигулин В.В. Основы теории колебаний – Мигунлин В.В., Медведев В.И., Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. – Под ред. В.В. Мигулина. –М.: Наука, 1978. – 392 с.
3. Андреев В.С. Теория нелинейных электрических цепей: Учебное пособие для вузов – М.: Радио и связь, 1982. – 280 с.
4. Владимиров С.Н., Перфильев В.И. – Нелинейно-параметрические эффекты и динамический хаос в неавтономной колебательной системе с нелинейной емкостью. 2003. – 12 с.
5. Мир физики и техники: «Генерация хаоса» – Дмитриев А.С., Ефремов Е.В., Максимов Н.А., Панас А.Н., – Под общ.ред. Дмитриева А.С. – М.: Техносфера, 2012. – 424с.
6. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. – Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука, 1984. – 432 с.
7. Лекции по теории колебаний и волн. Нелинейные колебания. Учебное пособие для студентов физических специальностей вузов. – А.П. Кузнецов, С.П. Кузнецов, Н.М. Рыскин – Саратовский гос. ун-т. 2011. – 312 с.
8. Основы радиоэлектроники: компьютерный лабораторный практикум. – Г.М. Дейкова, В.А. Журавлев, А.С. Майдановский, В.А. Мещеряков, С.С. Новиков, В.И. Суслев – Под ред. А.С. Майдановского. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 216 с.

9. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы: Учебник для вузов. – 4-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
10. Конторович М. И. Нелинейные колебания в радиотехнике. – М., Совет-ское радио, 1973. – 322 с.
11. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. – М.: Высшая школа, 1988. – 448 с.
12. Манаев Е. И. Основы радиоэлектроники. – М.: Радио и связь, 1990. – 512 с.
13. Нефедов В. И., Сигов А. С. Основы радиоэлектроники и связи – М.: Высшая школа , 2009. — 735 с.
14. Атабеков Г.И. Основы теории цепей: Учебник. 3-е изд., стер. – СПб.: Из-дательство «Лань», 2009. – 432 с.
15. Безручко Б.П., Кулешов А.В., Пономаренко В.И., Селезнев Е.П. – Нелинейные колебания в резонаторе с варакторным диодом, Журнал «Радиотехника и электроника» вып. 8. 1991 – 185 с.

СПРАВКА

Томский Государственный Университет

о результатах проверки текстового документа
на наличие заимствований

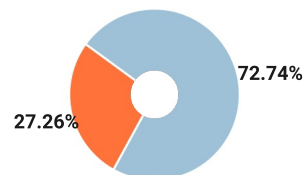
ПРОВЕРКА ВЫПОЛНЕНА В СИСТЕМЕ АНТИПЛАГИАТ.ВУЗ

Автор работы: Муромцев Ставр Андреевич
Самоцитирование
рассчитано для: Муромцев Ставр Андреевич
Название работы: Муромцев Ставр 4 курс ВКР (полное)
Тип работы: Выпускная квалификационная работа
Подразделение:

РЕЗУЛЬТАТЫ

СОВПАДЕНИЯ		27.26%
ОРИГИНАЛЬНОСТЬ		72.74%
ЦИТИРОВАНИЯ		0%
САМОЦИТИРОВАНИЯ		0%

ДАТА ПОСЛЕДНЕЙ ПРОВЕРКИ: 06.06.2023



Структура документа: Проверенные разделы: основная часть с.2-4, 6-30

Модули поиска: ИПС Адилет; Библиография; Сводная коллекция ЭБС; Интернет Плюс*; Сводная коллекция РГБ; Цитирование; Переводные заимствования (RuEn); Переводные заимствования по eLIBRARY.RU (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Гарант: аналитика; Переводные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Переводные заимствования по Интернету (EnRu); Переводные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Переводные заимствования издательства Wiley ; eLIBRARY.RU; СПС ГАРАНТ: аналитика; СПС ГАРАНТ: нормативно-правовая документация; Медицина; Диссертации НББ; Коллекция НБУ; Перефразирования по eLIBRARY.RU; Перефразирования по СПС ГАРАНТ: аналитика; Перефразирования по Интернету; Перефразирования по Интернету (EN); Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в английском сегменте; Перефразированные заимствования по коллекции Интернет в русском сегменте; Перефразирования по коллекции

Работу проверил: Лапутенко Андрей Владимирович

ФИО проверяющего

Дата подписи: 06.06.2023



Подпись проверяющего



Чтобы убедиться
в подлинности справки, используйте QR-код,
который содержит ссылку на отчет.

Ответ на вопрос, является ли обнаруженное заимствование
корректным, система оставляет на усмотрение проверяющего.
Предоставленная информация не подлежит использованию
в коммерческих целях.