

6
А-24

Государственный комитет
по приборостроению,
средствам автоматизации
и системам управления
при Госплане СССР

Академия наук
Союза Советских
Социалистических
Республик

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕ
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

На правах рукописи

А.Г. ЧЕРКАШИНА

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ,
ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛНЕНИИ ЕМКОСТИ
p-n ПЕРЕХОДА.

Автор изложил диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель - член-корреспондент АН СССР,
доктор технических наук, профессор Б.С. СОТСКОВ

Москва, 1965 г.

Государственный комитет
по приборостроению,
средствам автоматизации
и системам управления
при Госплане СССР

Академия наук
Союза Советских
Социалистических
Республик

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ
(ТЕХНИЧЕСКОЙ КИБЕРНЕТИКИ)

На правах рукописи

А.Г. ЧЕРКАШИНА

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИКИ,
ОСНОВАННЫЕ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЕМКОСТИ
p-n ПЕРЕХОДА.

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель — член-корреспондент АН СССР,
доктор технических наук, профессор Б.С. СОТСКОВ

Москва, 1965 г.

ВВЕДЕНИЕ

В устройствах автоматики, телемеханики, вычислительной и измерительной техники большую роль играют усилительные элементы. Наиболее распространенными усилительными элементами являются электровакуумные лампы, транзисторы и магнитные усилители.

Разработанные в последние годы нелинейные емкостные элементы позволяют создавать устройства, по принципу действия подобные магнитным элементам, не уступающие им по надежности и выгодно отличающиеся от них тем, что они могут работать в очень широком диапазоне частот и обладают высоким входным сопротивлением. К настоящему времени разработан ряд нелинейных емкостных элементов. Основные из них — варикапы и вариконды.

Варикапы — нелинейные полупроводниковые конденсаторы — основаны на свойстве емкости $p-n$ — перехода (диода) изменять свою величину под воздействием приложенного к нему напряжения.

Существенным преимуществом емкости $p-n$ перехода по сравнению с варикондами является относительно малая зависимость емкости от температуры и времени, а также отсутствие потерь на гистерезис. В среднем температурный коэффициент емкости варикапов колеблется от 0,1 до 0,005%.

Использование емкости $p-n$ перехода для построения элементов автоматики весьма перспективно ввиду малой мощности управления, высокой экономичности в большой добротности вследствие малых активных потерь и отсутствия потерь на гистерезис, широкого частотного диапазона работы, сравнительно малых температурных изменений параметров низкого уровня собственных шумов, независимости параметров варикапа от величины магнитного поля. Особо надо подчеркнуть высокую надежность и долговечность емкости $p-n$ перехода. В то время, как основные параметры транзисторов, такие, как пробивное напряжение перехода, обратный ток и коэффициент усиления по току, сильно меняют свои характеристики при наличии водяных паров и кислорода, заметных изменений емкости $p-n$ перехода при этом не происходит. Разумеется, варикап сохраняет такие качества, присущие полупроводниковым приборам как миниатюрные размеры, малый вес и способность работать в условиях ударных нагрузок и вибраций. Выделение тепла в схемах с варикапами мало и происходит в неопасных местах, что облегчает переход к электронике пленочных и твердых схем. Все это поставило варикап в ряд наиболее перспективных высоконадежных бесконтактных элементов.

Основными недостатками нелинейных емкостных элементов для работы на низких частотах являются низкие величины рабочих напряжений и малые величины емкостей выпускаемых нелинейных конденсаторов.

Возможные применения емкости $p-n$ перехода можно разделить на два основных вида: работа при малом уровне переменного напряжения и работа при большом уровне

переменного напряжения.

В первом случае варикап работает как линейная регулируемая емкость (нелинейные свойства не существенны). В таком режиме работают емкостные усилители (не параметрические); схемы регулировки фазы; управляемые RC -генераторы; RC - и LC -фильтры; амплитудные, частотные и фазовые модуляторы; схемы подстройки и автоподстройки частоты, усиления, полосы пропускания усилителя; искусственные регулируемые линии задержки; схемы отрицательным сопротивлением.

В режиме с высоким уровнем переменного напряжения варикап работает как нелинейный элемент. К таким применениям варикапа относятся параметрические усилители и основанные на том же принципе параметроны; умножители частоты; смесители; схемы с двумя устойчивыми состояниями амплитуды; схемы формирования импульсов; схемы с двумя нелинейными элементами $L(u)$ и $C(u)$ и т.д.

В последние годы емкость $p-n$ перехода находит все более широкое применение в технике. Однако, большинство применений варикапов относится к области высоких частот.

Очевидно, что для использования емкости $p-n$ перехода в низком диапазоне частот требуются варикапы с возможно большими величинами емкости и обратного сопротивления. В качестве варикапов могут быть использованы выпускаемые отечественной промышленностью микроплоскостные диоды типа Д223, кремниевые стабилитроны типа Д808 - Д-814 с емкостью до 600 пкф, и кремниевые стабилитроны типа Д815 - Д817 с емкостью до

16.000 пкф. В качестве варикапов могут применяться кремниевые стабилитроны, не удовлетворяющие техническим условиям по некоторым основным техническим параметрам. Обратное сопротивление всех указанных типов диодов находится в пределах нескольких сотен ком - десятков Мом, что дает нижнюю рабочую частоту при добротности $Q = 10 + 20$ порядка нескольких сотен герц.

Процессы, происходящие в цепях с нелинейными емкостными элементами, во многом подобны процессам, происходящим в цепях с нелинейными индуктивными элементами.

Низкочастотные применения варикапов вызвали поиски функциональных зависимостей, аналогичных зависимостям в цепях с магнитными элементами, и математических закономерностей процессов, происходящих в цепях с нелинейными емкостными элементами.

Варикап так же, как и нелинейный дроссель, может быть использован в качестве усилительного элемента. При этом возникла необходимость анализа работы нелинейной емкости при синусоидальном напряжении и синусоидальном токе и исследования усилительных и регулирующих свойств емкости $p-n$ перехода в схемах усилителей и модуляторов.

Из общей теории усилительных схем известно, что при использовании положительных обратной связи, в определенных условиях усилители имеют вольтамперные характеристики с участком отрицательного наклона (отрицательное сопротивление). Применительно к емкостным усилителям эти вопросы до настоящего времени не были достаточно исследованы.

В литературе не рассматривался также вопрос использования нелинейной емкости в управляемых RC -генераторах, хотя, как показано в настоящей работе, применение варикапов в низкочастотных управляемых RC -генераторах весьма перспективно.

Диссертация посвящена изучению поставленных выше вопросов. Рассмотрение производится с точки зрения проявления усилительных свойств емкости $p-n$ перехода при одновременном воздействии на нее переменного и постоянного полей. Диссертация состоит из следующих частей.

В в е д е н и е

Глава I. Методика анализа и синтеза цепей с нелинейной емкостью.

Глава II. Емкость $p-n$ перехода в качестве усилительного и регулирующего элемента.

Глава III. Использование усилительных свойств емкости $p-n$ перехода в дискретных элементах.

Глава IV. Использование нелинейной емкости $p-n$ перехода в управляемых низкочастотных RC -генераторах.

В ы в о д ы .

З а к л ю ч е н и е .

I. Методика анализа и синтеза цепей с нелинейной емкостью.

Для одинаковых или разных по своей физической природе электрических цепей дифференциальные уравнения, составленные для токов в одной цепи иногда оказываются подобными дифференциальным уравнениям, составленным для напряжений в других цепях. Это подобие можно распространить на ряд нелинейных цепей.

В первой главе показано, что нелинейной индуктивности $L(i)$ соответствует в подобной цепи нелинейная емкость $C(u)$. Для этого необходимо, чтобы кривые $L(i)$ и $C(u)$ имели одинаковый характер нелинейности. При этом принцип действия схем с нелинейной емкостью оказывается аналогичен принципу действия схем с нелинейной индуктивностью. Использование этой аналогии позволяет применить разработанные методы построения и расчета схем с нелинейными индуктивными элементами для схем с нелинейными емкостными элементами, также дает возможность строить новые схемы.

Рассмотрены примеры аналогичных устройств. Аналогом дроссельному магнитному устройству, режим работы которого характеризуется малой величиной переменного поля по сравнению с величиной постоянного поля, является емкостной усилитель. Рассмотрены дуальные схемы импульсного типа, в которых нелинейные свойства элемента за несколько периодов не усредняются, а играют существенную роль в течение каждого цикла - импульсный магнитный модулятор и модулятор

на нелинейных емкостях, а также ограничитель импульсных напряжений.

Для некоторых нелинейных элементов графические зависимости $C(u)$ и $L(i)$ при определенном выборе масштабов, в рабочем диапазоне изменения напряжения и тока, могут совпадать. В этом случае нелинейные элементы оказываются дуальными. Имея дуальные графические зависимости магнитной проницаемости материала сердечника от напряженности магнитного поля $\mu(H)$, диэлектрической проницаемости сегнетоэлектрика от напряженности электрического поля $\epsilon(E)$ и емкости $p-n$ перехода от напряжения $C(U)$ и совместив их, получим, что отношения H и U , а также C и μ (или ϵ и μ) оказываются определенными.

Показано, что отношение объемов магнитного и диэлектрического материалов дуальных нелинейных элементов есть величина постоянная.

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \cdot \frac{\mu(H)}{\epsilon(E)} \cdot \left(\frac{H}{E}\right)^2 \quad \text{для варикондов,}$$

$$\frac{C(U_2)}{\mu(H)} = \mu_0 \left(\frac{H}{U_2}\right)^2 \cdot V_1 \quad \text{для варикапов}$$

где V_1 - объем магнитного материала сердечника,
 V_2 - объем материала диэлектрика

Отношение объемов определяется характером нелинейных дуальных элементов и не зависит от коэффициента дуальности $K = \frac{L(i)}{C(u)}$

Дуальные соотношения распространены на ряд векторных их характеристик электрических и магнитных полей при определенной конфигурации этих полей. С учетом этого, сравнение нелинейных зависимостей дуальных элементов может быть произведено не только по дифференциальным зависимостям $\mu(H)$, $\epsilon(E)$ и $C_2(U)$, но и по интегральным характеристикам $B(H)$, $\mathcal{D}(E)$ или $q(E)$, которые удобно наблюдать на осциллографе (q - заряд, \mathcal{D} - вектор электрического смещения, B - магнитная индукция). Вычислив значения B, H, q, U в аналогичных характерных точках осциллограмм (например, максимальные значения), можно определить объемы дуальных нелинейных элементов

$$V_1 = \frac{qU}{BH}; \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{\mathcal{D}E}{BH}$$

В последнем параграфе первой главы исследовано совместное включение двух дуальных нелинейных элементов. Показано, что при последовательном включении двух дуальных нелинейных элементов возникает резонанс в нелинейной цепи, по внешним признакам сходный с феррорезонансом. Он наблюдается при определенной частоте и амплитуде приложенного напряжения и отличается от феррорезонанса тем, что ток, потребляемый от источника питания, не содержит высших гармонических составляющих (напряжение питания теоретически равно нулю). Наличие второй дуальной нелинейности усугубляет нелинейные процессы, кривые напряжения обостряются, что полезно в ряде практических случаев. Приведены осциллограммы экспериментальной проверки резонанса.

П. Емкость p-n перехода в качестве усилительного и регулирующего элемента.

Для варикапов нелинейная зависимость вектора \vec{D} от \vec{E} может быть выражена аналитически.

По известной зависимости емкости p-n перехода от приложенного напряжения $x/$ определяем:

$$\mathcal{D}(E) = \frac{2C_0\sqrt{\varphi}}{S_2} (\sqrt{E l_2 + \varphi} - \sqrt{\varphi})$$

где S_2 - активная площадь сечения диэлектрика эквивалентного конденсатора,
 l_2 - длина силовой линии электрического поля.

 х / Приближенное уравнение, связывающее величину дифференциальной емкости p-n перехода C_2 и напряжение, приложенное к p-n переходу U , для диодов со сплавным переходом имеет вид:

$$C_2 = \frac{C_0}{\sqrt{\varphi} + 1}$$

где C_0 - емкость p-n перехода в отсутствие внешнего напряжения на нем,
 φ - контактная разность потенциалов p-n перехода.

Введение вектора \vec{E} при постоянном расстоянии между электродами l_2 для варикапа чисто условно; изменение толщины $p-n$ перехода заменяется условным изменением диэлектрической проницаемости. Принятое допущение позволяет ввести единую форму записи ряда уравнений и не отражается на характеристиках варикапа со стороны внешних зажимов.

Включение нелинейной емкости $p-n$ перехода в цепь переменного тока приводит в общем случае к появлению тока и напряжения несинусоидальной формы. Однако, до настоящего времени не был найден точный закон изменения тока при действии синусоидального напряжения. В настоящей работе такое решение найдено и представлено в виде эллиптических функций.

Показано, что постоянная составляющая вектора электрического смещения D_0 изменяется при изменении переменной составляющей напряженности электрического поля, т.е. при наличии суммы постоянного и переменного напряжений в нелинейном конденсаторе происходит "выпрямление" потока вектора электрического смещения и, как следствие этого, появление дополнительного заряда на $p-n$ переходе.

$$D_0 = \frac{2C_0 V \varphi}{S_2} \left[\frac{2}{\pi} \sqrt{U_0 + \varphi + U_m} \cdot F_1 \left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{2U_m}{U_0 + \varphi + U_m}} \right) - \sqrt{\varphi} \right]$$

где U_m - максимальное значение синусоидального напряжения

$F_1 \left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{2U_m}{U_0 + \varphi + U_m}} \right)$ - полный эллиптический интеграл второго рода.

Появление постоянной составляющей вектора смещения аналогично выпрямлению магнитного потока в нелинейных магнитных цепях при намагничивании сердечника двумя магнитными полями различных частот.

Определены также первые гармонические составляющие вектора электрического смещения и тока

$$I_{m1} = U_m \omega C_0 \frac{8}{3\pi} \sqrt{\left(\frac{U_0 + \varphi}{U_m} + 1 \right) \frac{U_0 + \varphi}{U_m}} \cdot \left\{ \frac{U_0 + \varphi}{U_m} \left[F_1 \left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{2U_m}{U_0 + \varphi + U_m}} \right) - F_2 \left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{2U_m}{U_0 + \varphi + U_m}} \right) \right] + F_2 \left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{2U_m}{U_0 + \varphi + U_m}} \right) \right\},$$

где $F_2 \left(\frac{\pi}{2}, \sqrt{\frac{2U_m}{U_0 + \varphi + U_m}} \right)$ - полный эллиптический интеграл первого рода.

Даны графические представления этих решений. На основании формул и графиков сделан вывод, что при относительных значениях переменного напряжения $\frac{U_m}{U_0 + \varphi}$ меньших, чем 0,8, ошибка в определении первой гармонической составляющей тока от использования значений дифференциальной емкости в выбранной рабочей точке C_0 вместо эффективной емкости, определяющей связь между первыми гармониками тока и напряжения, не превышает 8%.

Аналогично проанализирована работа нелинейной емкости $p-n$ перехода при синусоидальном токе. Показано, что погрешность, получаемая от того, что вместо значения эффективной емкости принимается значение дифференциальной для этого случая также не превышает 6 + 8% для значений амплитуды переменной составляющей $(0,7 + 0,8) U_0$.

Поскольку емкость $p-n$ перехода в цепи переменного тока для значительных амплитуд с достаточной для практики точностью может быть представлена дифференциальной, а последняя сильно меняет свою величину под воздействием приложенного к ней постоянного напряжения, то она может быть использована в качестве усилительного и регулирующего элемента. Рассмотрим схемы емкостных усилителей, и их работы на различные виды нагрузки. Определены виды нагрузочных кривых и выведены формулы для определения коэффициента усиления по напряжению. Рассмотрены вопросы, связанные с униполярной проводимостью $p-n$ перехода. Выпрямительное действие диода проявляется в любой схеме, если амплитуда переменного напряжения превышает постоянное смещение. В схеме усилителя с двумя встречно-включенными варикапами это явление вызывает заряд средней точки, и схема в некоторой области становится неуправляемой.

Достоинством емкостного усилителя является малая мощность управления. Его входное сопротивление достигает сотен $M\Omega$. Коэффициент усиления по мощности имеет порядок $10^3 + 10^4$. Важным преимуществом емкостного усилителя является малая зависимость его параметров от температуры.

Включение варикапов в схему мостового или дифференциального типа позволяет получить схемы преобразователей постоянного напряжения в переменное (модуляторов) с одновременным усилением сигнала по мощности. Рассмотрены некоторые схемы модуляторов и проведено их качественное сравне-

ние. Исследованы вопросы дрейфа и ухода коэффициента преобразования модулятора на варикапах. Приведены схемы модуляторов с усилителями. Предложена дифференциальная схема модулятора на четырех диодах, позволяющая исключить в выходном напряжении четные гармоники при большой величине напряжения питания и при одновременном увеличении коэффициента преобразования схемы. Модулятор прошел испытания в блоках операционных усилителей с автоматической компенсацией дрейфа в комплексе аппаратуры для автоматического синтеза систем управления, разработанном в ИАТ (ТК) АН и ГК ПСУСА.

Приведена также схема регулятора фазы.

III. Использование усилительных свойств емкости $p-n$ перехода в дискретных элементах.

При работе с большими сигналами (амплитуда переменного напряжения близка к напряжению смещения) на нелинейной емкости $p-n$ перехода могут быть построены схемы с двумя устойчивыми состояниями. Одна группа этих схем аналогична феррорезонансным устройствам; другая группа аналогична бесконтактным магнитным реле - магнитным усилителям с глубокой положительной обратной связью. Ввиду относительно небольшого коэффициента нелинейности емкости диода явления типа феррорезонансных в таких цепях выражены слабо (кратность скачкообразных изменений токов и напряжений мала).

Схема простейшей триггерной ячейки из второй группы, представляет собой последовательное соединение нелинейной емкости, индуктивности и параллельной RC -цепочки и может рассматриваться как емкостной усилитель напряжения с индуктивной нагрузкой, работающий на частоте, близкой к резонансной. Поскольку используемый в триггерной ячейке варикап наряду со свойствами нелинейной емкости, зависящий от напряжения, обладает вентильными свойствами, то он является выпрямителем, заряжая конденсатор RC -цепи до амплитуды переменного напряжения на варикапе. Это напряжение является управляющим для регулирования емкости варикапа. Таким образом, в триггерной ячейке обнаруживаются все элементы, присущие схеме с положительной обратной связью, имеющей отрицательное сопротивление. В работе приведены экспериментальные вольтамперные характеристики по постоянному и переменному току с участием отрицательного сопротивления и рассмотрены изменения их от различных параметров. Предложена схема низкочастотного релаксационного генератора на варикапах с отрицательным сопротивлением. Особенностью генератора является отсутствие в нем электровакуумных приборов и транзисторов.

Объединение двух простейших ячеек через общее гасящее сопротивление дает триггерную ячейку с двумя входами. Предложена триггерная схема с увеличенным быстродействием. На основе триггерной ячейки с двумя входами путем добавления вторичных обмоток к индуктивным элементам ячеек и некоторых дополнительных элементов построен триггер со счетным входом. Принципиально схема может состоять из n ячеек, т.е. представлять собой

пересчетную схему.

В главе представлены экспериментальные данные. Рассмотрены фазовые соотношения, определяющие сложность настройки триггерной схемы.

IV. Использование нелинейной емкости $p-n$ перехода в управляемых низкочастотных RC -генераторах

В автоматике и измерительной технике часто возникает задача регулирования частоты генерируемых колебаний в диапазоне от долей герц до нескольких тысяч герц.

В диссертации разработаны схемы транзисторных низкочастотных RC -генераторов, управляемых с помощью варикапов (стабилитронов типа Д815А, Д815Б с емкостью $p-n$ перехода нескольких тысяч пкф).

Диапазон рабочих напряжений емкостей варикапов составляет доли и единицы вольт, поэтому наиболее рационально использовать их с транзисторными усилителями. Стремление создать управляемые RC -генераторы на наиболее низкие диапазоны частот при ограниченной шкале емкостей привело к необходимости детального исследования RC -цепи и условий согласования ее с относительно низкими входными сопротивлениями транзисторных усилителей. Фазосдвигающая цепь, используемая совместно с транзисторным усилителем, в известном смысле является дуальной RC -цепи, используемой в ламповых RC -генераторах. В последних задача RC -цепи сводится к повороту

фазы тока, т.к. RC - цепь нагружена на малое входное сопротивление транзистора, т.е. работает практически на короткое замыкание. Показано, что в этом случае целесообразно использование RC - цепи с равномерным уменьшением величин активного и реактивного сопротивлений ячеек RC - цепи. При этом ток передается от начала RC - цепи к концу с меньшими потерями. Выбор первого сопротивления RC - цепи определяется, в основном, режимом усилителя по постоянному току.

Расчет последующих сопротивлений RC - цепи и условий оптимального согласования ее с входным сопротивлением транзисторного усилителя детально исследован с помощью матричного анализа в предположении отсутствия фазовых сдвигов в усилителе. Полученные значения частоты колебаний

$$\omega_0 = \frac{1}{RC \sqrt{3 + \frac{2}{\xi} + \frac{1}{\xi^2} + 2 \frac{R_H}{R} (\xi + \xi^2)}}$$

и коэффициента передачи

$$K_0 = 8 + \frac{12}{\xi} + \frac{7}{\xi^2} + \frac{2}{\xi^3} + 4 \frac{R_H}{R} + 11 \xi \frac{R_H}{R} + 8 \xi^2 \frac{R_H}{R} + 2 \xi^3 \left(\frac{R_H}{R}\right)^2 + 2 \xi^4 \left(\frac{R_H}{R}\right)^2$$

представлены в виде графиков $\omega_0(\xi)$ и $K_0(\xi)$

где $\xi = \frac{R_{k+1}}{R_k} = \frac{\omega C_k}{\omega C_{k+1}}$ - отношение одноименных сопротивлений каждого последующего звена RC - цепи к предыдущему,

C - емкость конденсатора первой ячейки

RC - цепи.

Отношение входного сопротивления усилителя R_H к сопротивлению R первого звена RC - цепи $\frac{R_H}{R}$ является параметром.

Из представленных графиков видно, что ξ целесообразно выбирать в пределах от 1,7 до 3,2. Необходимое усиление усилителя при этом не превышает 23, что может быть обеспечено большинством современных транзисторов.

Рассмотрены вопросы управления частотой генератора. В частности, показано, что схемы, в которых отношение $\frac{R_H}{R} > 0,1$ не могут быть рекомендованы, т.к. в этой области при регулировании может возникнуть паразитная амплитудная модуляция. Определены места включения регулирующих элементов для получения наибольшей кратности регулирования частоты и оптимального режима работы p - n перехода.

Специальный раздел посвящен вопросам стабилизации частоты колебаний путем введения отрицательных обратных связей. В RC - генераторе с RC - цепью с указанной неравномерностью желательно введение параллельной отрицательной обратной связи по току. Однако, в однокаскадном усилителе ввести обратную связь по току нельзя. С помощью векторных диаграмм показано, что введение отрицательной связи по напряжению приводит к повышению частоты генерации. Для снижения частоты генератора предложена комплексная обратная связь.

В отдельном параграфе проведено сравнение различных типов управляемых RC - генераторов: генераторов с равно-

Центральная научная
Библиотека
Академии наук Киргизской ССР

мерной и неравномерной RC -цепью, генератора с мостом Вина и генератора с двойным T -образным мостом.

Приводится ряд экспериментальных схем управляемых RC -генераторов с однокаскадными и двухкаскадными транзисторными усилителями, их регулировочные характеристики и параметры. Параметры управляемых RC -генераторов весьма стабильны. Например, в схеме цепочечного RC -генератора с однокаскадным транзисторным усилителем изменение напряжения питания на $\pm 20\%$ вызывает изменение частоты на $\pm 0,5\%$, увеличение температуры от 20°C до 50°C - изменение частоты на 1% . Диапазон частот от 600 до 1200 гц перекрывается при изменении напряжения управления от 0 до 3-х вольт. Приводится также схема RC -генератора на диапазон частот 18-22 кгц.

Основные достоинства управляемых RC -генераторов на варикапах: высокая надежность и значительный срок службы; высокое входное сопротивление цепи управления, достигающее сотни ком при использовании кремниевых стабилитронов типа Д815 и десятки мом при использовании стабилитронов типа Д808-Д813; небольшие величины напряжения управления - единицы вольт; высокая стабильность частоты при действии различных дестабилизирующих факторов; высокое быстродействие - единицы или десятки мксек; малое содержание гармоник в спектре выходного напряжения; малые габариты и вес; простота, высокая технологичность.

Указанные достоинства позволяют использовать управляемые RC -генераторы на варикапах в качестве преобразователей напряжения в частоту в системах автоконтроля. В соединении с

прецизионными выпрямителями они смогут служить преобразователями переменного напряжения или тока в частоту. В системах автоконтроля с обратной связью управляемый RC -генератор используется в качестве звена цепи обратной связи, обеспечивающей автоматическую балансировку моста. В перечисленных случаях управляемые RC -генераторы на варикапах могут являться преобразователями измеряемых величин в унифицированный частотный сигнал.

Разработанные управляемые RC -генераторы в настоящее время переданы в ряд организаций (НАМИ и др.).

ВЫВОДЫ

В работе получены следующие основные результаты.

1. Проведен анализ и синтез схем с нелинейной емкостью p - n перехода. Показано, что принцип действия схем с нелинейной емкостью во многом подобен принципу действия схем с нелинейной индуктивностью, и, следовательно, для схем с нелинейными емкостными элементами можно применить разработанные методы построения и расчета схем с нелинейными магнитными элементами.

2. Показано, что для выполнения дуальных соотношений для нелинейных индуктивных и емкостных элементов необходимо, чтобы характеристики их $L(i)$ и $C(u)$ были конгруэнтны. Показано, что отношения объемов магнитного и диэлектрического материалов дуальных нелинейных элементов есть величина определенная, не зависящая от коэффициента дуальности. Рассмотрено

последовательное включение двух дуальных нелинейных элементов. Исследован полученный в этом случае резонанс, отличающийся от феррорезонанса тем, что ток, потребляемый от источника питания, не содержит высших гармонических составляющих.

3. Проведен анализ работы нелинейной емкости $p-n$ перехода при синусоидальном напряжении и синусоидальном токе. Показано, что при расчете схем с нелинейной емкостью $p-n$ перехода для значительных величин амплитуд переменного напряжения можно пользоваться величиной дифференциальной емкости в выбранной рабочей точке.

4. Построен и проанализирован ряд аналоговых схем: усилители, модуляторы, регулятор фазы. Предложена дифференциальная схема модулятора на четырех варикапах, имеющая повышенный коэффициент преобразования и малый коэффициент гармоник в выходном напряжении.

5. Триггерные явления в последовательном LC -контуре с нелинейной емкостью $p-n$ перехода объяснены с помощью схемы емкостного усилителя с коэффициентом усиления по напряжению больше единицы и глубокой положительной обратной связью. Предложена схема релаксационного генератора на варикапах с отрицательным сопротивлением.

6. Проанализирован ряд схем дискретной техники. Предложена схема триггера со счетным входом. Рассмотрены фазовые соотношения, определяющие сложность настройки триггерных схем.

7. Предложен и проанализирован ряд схем низкочастотных RC -генераторов, управляемых с помощью варикапов. /с RC -

цепью, с мостом Винна и др./.. Основными достоинствами RC -генератора на варикапах являются: высокая стабильность частоты при действии различных дестабилизирующих факторов, высокое быстродействие, простота и технологичность, малые габариты и вес.

8. Рассмотрены основные соотношения и параметры управляемого цепочного RC -генератора с транзисторным усилителем. Рассмотрены вопросы управления частотой генератора и повышения стабильности частоты.

Основное содержание работы опубликовано в следующих статьях:

1. Черкашина А.Г. Емкостной усилитель. Приборостроение, 1964, № 6.
2. Черкашина А.Г. О некоторых вопросах дуальности нелинейных реактивных элементов. Электричество, 1964, № 12.
3. Черкашина А.Г. Управляемые RC -генераторы с использованием нелинейной емкости $p-n$ перехода. Автоматика и телемеханика, 1965, № 7.
4. Черкашина А.Г. Низкочастотные схемы на варикапах. Приборы и средства автоматизации, 1965, № 8.
5. Черкашина А.Г. Дискретные элементы с использованием емкости $p-n$ перехода. Радиотехника /в печати/.
6. Норкин А.Б., Спиридонов В.д., Черкашина А.Г. Широкополосный усилитель с полупроводниковым $M-DM$ каналом. Приборостроение, 1966, № 5 /в печати/.