

СОДЕРЖАНИЕ.

~~~~~

|                                                                                                     | лист |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| 1. ВВЕДЕНИЕ.                                                                                        | 2    |
| 2. ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ.                                                                | 3    |
| Контактные методы измерения вибрации.                                                               |      |
| Бесконтактные методы измерения вибрации.                                                            |      |
| 3. АВТОДИНЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ.                                                            | 9    |
| 4. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.                                                                             | 12   |
| Составление модели автодина на диоде Ганна.                                                         |      |
| Теоретическое описание нагрузки.                                                                    |      |
| Принципы построения программ.                                                                       |      |
| 5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ.                                                                           | 22   |
| 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.                                                                                      | 39   |
| 7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.                                                                               | 40   |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Данные о вычислительном комплексе.                                                    | 42   |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Текст программы для моделирования работы<br>автодина на диоде Ганна HANN.SAV.         | 43   |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Правила пользования программой HANN.SAV.                                              | 55   |
| ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Текст программы для моделирования работы<br>виброизмерителя на диоде Ганна VIBRO.SAV. | 56   |

## ВВЕДЕНИЕ.

~~~~~

Современные технологии требуют непрерывного контроля за многими параметрами технологического процесса и контроля состояния оборудования. Одними из важнейших являются параметры механического движения, в частности параметры периодических перемещений исследуемого объекта в пространстве (вибрации). Этими параметрами являются виброперемещение (амплитуда вибрации) и виброскорость (частота вибрации).

Подобный контроль необходим в самых разных областях: в полупроводниковой электронике (контроль вибрации установок для выращивания кристаллов), в микроэлектронике (вибрация установок фотолитографии), в машиностроении (вибрация станков и биение деталей), в автомобильной промышленности (контроль вибрации отдельных узлов автомобилей и всего автомобиля в целом), на железнодорожном транспорте (датчики приближения поезда), в энергетике (контроль вибрации лопаток газовых турбин), в авиастроении (контроль биений турбин) и т.д. Этот список можно продолжать достаточно долго, что говорит о необходимости создания высокоточных вибродатчиков.

В настоящее время разработано достаточно много вибродатчиков, основанных на различных эффектах (см. главу 2). Все они имеют свои преимущества и недостатки. Кроме того, существуют определенные трудности в теоретическом описании и моделировании работы вибродатчиков.

Целью дипломной работы являлось исследование возможности использования эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых СВЧ - генераторах на диоде Ганна для создания измерителей параметров вибрации и особенностей их работы.

2. ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИИ.

~~~~~

Существует две группы методов измерения параметров вибраций: контактные, подразумевающие механическую связь датчика с исследуемым объектом, и бесконтактные, т.е. не связанные с объектом механической связью.

Рассмотрим вначале контактные методы. Наиболее простыми являются методы регистрации вибраций с помощью пьезоэлектрических датчиков. Они позволяют проводить измерения с высокой точностью в диапазоне низких частот и относительно больших амплитуд вибрации, но вследствие своей высокой инерционности, приводящей к искажению формы сигнала делает невозможным измерение вибраций высокой частоты и малой амплитуды. Кроме того, если масса исследуемого объекта, а следовательно и его инерционность не велика, то такой датчик может существенно влиять на характер вибрации, что вносит дополнительную ошибку в измерения.

Эти недостатки позволяет устранить метод открытого резонатора, описанный в [1]. Суть метода заключается в измерении параметров СВЧ резонатора, изменяющихся вследствие вибрации исследуемого объекта. Резонатор имеет два зеркала, причем одно из них фиксировано, а другое механически связано с исследуемым объектом. Регистрация перемещений при малых амплитудах вибраций производится амплитудным методом по изменению выходной мощности в случае проходной схемы включения резонатора или отраженной мощности, в случае применения оконечного включения. Этот метод измерения требует постоянства мощности, подводимой к резонатору и высокой стабильности частоты возбуждения.

В случае больших амплитуд вибраций регистрируется

смещение резонансной частоты, что можно сделать с очень высокой точностью. Для повышения добротности и уменьшения дифракционных потерь используют сферические зеркала.

Разрешающая способность данного метода 3 мкм. Метод обладает малой инерционностью по сравнению с описанным выше, но его применение рекомендуется, если масса зеркала принципиально меньше массы исследуемого объекта.

Однако механическая связь датчика с исследуемым объектом далеко не всегда допустима, поэтому последние годы основное внимание уделяется разработке бесконтактных методов измерения параметров вибраций. Кроме того, их общим достоинством является отсутствие воздействия на исследуемый объект и пренебрежительно малая инерционность.

Все бесконтактные методы основаны на зондировании объекта звуковыми и электромагнитными волнами.

Одной из последних разработок является метод ультразвуковой фазометрии, описанный в [2]. Он заключается в измерении текущего значения разности фаз опорного сигнала ультразвуковой частоты и сигнала, отраженного от исследуемого объекта. В качестве чувствительных элементов используется пьезоэлектрическая керамика.

На частоте ультразвука 240 кГц. чувствительность измерения виброперемещения 10 мкм. в диапазоне от 10 до 5\*10 мкм., расстояние до объекта до 1.5 м. На частоте 32 кГц. чувствительность 30 мкм., расстояние до объекта до 2 м. С ростом частоты зондирующего сигнала чувствительность растет.

В качестве достоинств метода можно отметить дешевизну и компактность аппаратуры, малое время измерения, отсутствие

ограничения снизу на частотный диапазон, высокую точность измерения низкочастотных вибраций. Недостатками являются сильное затухание ультразвука в воздухе, зависимость от состояния атмосферы, уменьшение точности измерения с ростом частоты вибрации.

Большое распространение получили методы, основанные на зондировании объекта видимым светом. Описание и сравнение основных оптических методов приведено в [3].

Все оптические методы подразделяются на две группы. К первой относятся методы, основанные на регистрации эффекта Доплера. Простейшим из них является гомодинный метод, который позволяет измерять амплитуды и фазы гармонических вибраций, но с его помощью невозможно исследовать негармонические и большие по амплитуде вибрации. Эти недостатки можно устранить используя гетеродинные методы. Но они требуют калибровки и, кроме того, измерительная аппаратура сильно усложняется.

Существенным недостатком перечисленных выше методов являются высокие требования к качеству поверхности исследуемого объекта. Но они теряют свое значение при использовании голографических методов, которые и образуют вторую группу.

Голографические методы обладают высокой разрешающей способностью ( до 0.05 ), но они требуют сложного и дорогостоящего оборудования. Кроме того, время измерений очень велико.

Общими недостатками оптических методов являются сложность, громоздкость и высокая стоимость оборудования, большое энергопотребление, высокие требования к качеству поверхности исследуемого объекта, высокие требования к состоянию атмосферы ( определенная влажность, отсутствие

запыленности и т.п. ). Кроме того, лазерное излучение оказывает вредное влияние на зрение обслуживающего персонала и требует дополнительных мер предосторожности и защиты.

Часть этих недостатков можно устранить применяя методы, основанные на использовании СВЧ излучения [4]. Они подразделяются на интерференционные и резонаторные. В основе интерференционных методов лежит зондирование исследуемого объекта волнами ВЧ и СВЧ диапазонов, прием и анализ отраженных ( рассеянных ) объектом волн. Между излучателем и исследуемым объектом в результате интерференции образуется стоячая волна. Вибрация объекта приводит к амплитудной и фазовой модуляции отраженной волны и к образованию сигнала биений. У выделенного сигнала переменного тока амплитуда пропорциональна виброперемещению, а частота соответствует частоте вибрации объекта.

Один из вариантов интерференционного метода описан в [5]. Установка состоит из СВЧ генератора 1 на отражательном клистроне ( рис.1 ), который модулируется прямоугольными

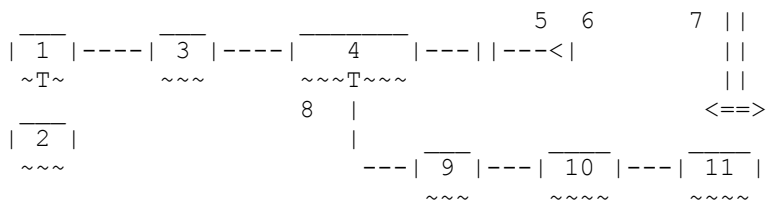


Рис. 1. Установка для измерения параметров вибраций интерференционным методом.

импульсами, вырабатываемыми генератором 2, вентилем для отсечки отраженной волны 3, измерительной линией 4, приемно-передающей антенной 5 с диэлектрической линзой 6, исследуемого объекта 7, кристаллического детектора 8, усилителя переменного тока 9,

детектора низкой частоты 10 и индикаторного устройства 11.

Данная установка обеспечивает высокую точность измерений при значительном удалении от исследуемого объекта, обладает малой инерционностью, не зависит от температуры. Но она требует точной градуировки.

Резонаторные методы основаны на размещении вибрирующего объекта в поле СВЧ резонатора (вне или, хотя бы частично внутри его), вследствие чего изменяются характеристики резонатора. На рис.2 приведена схема измерителя вибраций на двойном Т-образном мосте.

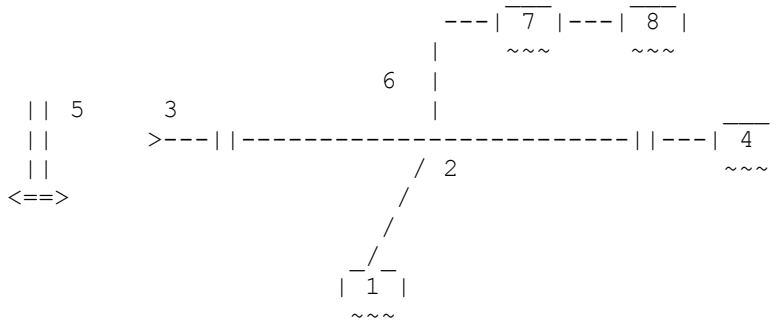


Рис. 2. Измеритель вибраций на двойном Т-образном мосте.  
~~~~~

Сигнал с СВЧ генератора 1 через двойной Т-образный мост 2 поступает на приемно-передающую антенну 3 и регулируемую нагрузку 4. Отразившись от исследуемого объекта 5, сигнал через двойной Т-образный мост поступает на кристаллический детектор 6, на который одновременно приходит сигнал, отраженный от согласованной нагрузки. Продетектированный сигнал усиливается усилителем 7 после чего поступает на индикаторное устройство 8. Любое смещение исследуемого объекта вызывает разбаланс двойного Т-образного моста, что приводит к появлению сигнала на индикаторном устройстве. Минимальное регистрируемое виброперемещение зависит от собственных шумов

генератора, его мощности и стабильности, а также от механической стабильности устройства.

Бесконтактное измерение параметров вибраций резонаторным методом возможно и при включении приемно-передающей антенны в частотнозадающую цепь СВЧ генератора, т.е. при работе в автогенераторном режиме. Такие системы называются автодинными генераторами или просто автодинами.

В [5] приведен пример автодинного измерителя вибраций на отражательном клистроне (рис.3). Он состоит из

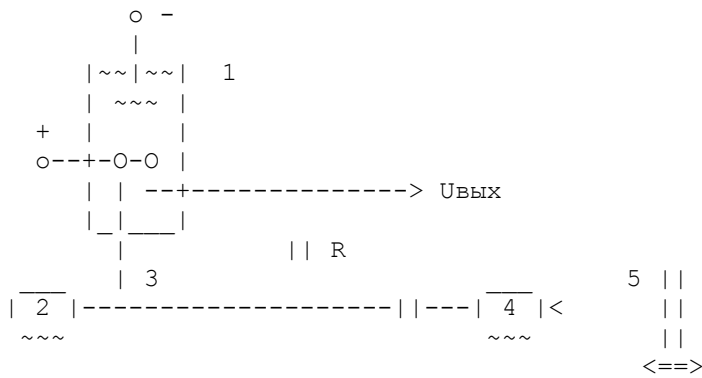


Рис. 3. Автодинный измеритель вибраций на отражательном клистроне.

отражательного клистрона 1, волноводной системы 3, короткозамыкающего поршня 2, диэлектрической антенны 4 и исследуемого объекта 5. Вследствие вибрации объекта изменяется режим генерации, появляется приращение постоянной составляющей тока в цепи резонатора клистрона, а на резисторе R появляется приращение напряжения.

Разрешающая способность данной установки до 1 мкм. Недостаток заключается в том, что клистрон требует больших питающих напряжений, что приводит к увеличению размеров аппаратуры и большому энергопотреблению. Но этого можно избежать, если в качестве СВЧ генератора использовать

твердотельные СВЧ диоды (ДГ, ЛПД, ИПД, ТД и т.д.).

3. АВТОДИНЫ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ.

~~~~~

Как упоминалось выше, полупроводниковые СВЧ генераторы обладают рядом достоинств [6,7]. Основными достоинствами являются малые размеры и малое энергопотребление. Сравнительные характеристики полупроводниковых СВЧ генераторов приведены в таблице 1.

| диод       | мощность                                                 | КПД                                              | смещение                 | шумы                                                                      |
|------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| ЛПД<br>~~~ | до 12 Вт.                                                | до 15 %<br> <br>max 31 %                         | десятки<br> <br>Вольт    | сильные шумы<br> <br>лавинобраз-я                                         |
| ИПД<br>~~~ | десятки<br> <br>миллиВатт.                               | единицы<br> <br>%                                | сотни<br> <br>миллиВольт | слабые шумы                                                               |
| ДГ<br>~~   | десятки<br> <br>миллиВатт-<br> <br>единицы<br> <br>Ватт. | зависит<br> <br>от<br> <br>режима<br> <br>работы | 4.5-7 В.                 | тепловые шумы<br> <br>на уровне<br> <br>30000K (GaAs)<br> <br>1400K (InP) |
| ТД<br>~~   | единицы<br> <br>и десятки<br> <br>микроВатт              | единицы<br> <br>%                                | сотни<br> <br>миллиВольт | слабые шумы                                                               |

Таблица 1. Сравнительные характеристики полупроводниковых СВЧ генераторов.

Эквивалентная схема автодина на полупроводниковом диоде приведена на рис. 4.

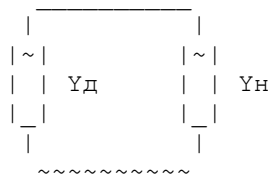


Рис. 4. Эквивалентная схема автодина на полупроводниковом диоде.

Эта эквивалентная схема может быть описана соотношением (3.1), согласно первому закону Кирхгофа.

$$\dot{I}_{уд} + \dot{I}_{ун} = 0 \quad (3.1)$$

Величина  $Y_n$  является проводимостью нагрузки и элементов настройки схемы,  $Y_d$  - средняя проводимость полупроводникового прибора,

$$Y_d = \dot{I}_1 / \dot{U}_1 \quad (3.2)$$

$\dot{I}_1, \dot{U}_1$  - комплексные амплитуды тока и напряжения первой гармоники на полупроводниковом элементе. Т.к. к обеим проводимостям приложено одно и то же напряжение  $\dot{U}_1$ , можно записать баланс мощностей:

$$|U_2|^2 * Y_d + |U_1|^2 * Y_n = 0 \quad (3.3)$$

Активная мощность на нагрузке (3.4) положительна

$$P_n = |U_1|^2 * \text{Re}(Y_n) \quad (3.4)$$

отсюда вытекает, что

$$|U_1|^2 * \text{Re}(Y_d) = - P_n \quad (3.5)$$

т.е.  $Y_d$  должна иметь отрицательную действительную часть при существовании в системе колебаний с ненулевой амплитудой. Наличие отрицательной проводимости характеризует трансформацию энергии: полупроводниковый элемент потребляет энергию постоянного тока и является источником колебаний ненулевой частоты.

В качестве трансформаторов энергии может быть использован ряд двухполюсников диодов: туннельный диод (ТД), лавинно - пролетный диод (ЛПД), инжекционно - пролетный диод (ИПД) и диод Ганна (ДГ).

Процессы в полупроводниковых приборах описываются тремя

основными уравнениями в частных производных [8]: уравнением плотности тока, характеризующим образование направленных потоков заряда; уравнением непрерывности, отражающим накопление и рассасывание подвижных носителей заряда, и уравнением Пуассона, описывающим электрические поля в полупроводнике.

Точное решение этих уравнений с учетом граничных условий в общем виде затруднительно даже на ЭВМ. Чтобы упростить анализ вводят эквивалентные схемы полупроводниковых приборов.

ТД представляют собой приборы, наиболее удобные для анализа, т.к. их эквивалентная схема более проста и точна, чем схемы других полупроводниковых приборов. С практической точки зрения ТД представляет собой интерес при создании маломощных автодинов в коротковолновой части сантиметрового диапазона.

ИПД (ВАРИТТ) обладает малой генерируемой мощностью [9], но из-за низкого уровня шумов и малого напряжения питания являются перспективными для доплеровских автодинов.

ЛПД обеспечивает наибольшие КПД и мощность колебаний [10]. Но его главным недостатком является относительно высокий уровень шумов, обусловленный, в первую очередь, шумами лавинообразования.

Таким образом, на сегодняшний день наиболее подходящим полупроводниковым СВЧ генератором для автодинов является диод Ганна, который, хотя и имеет достаточно высокий уровень шумов и низкий КПД, генерирует колебания достаточно высокой мощности (от десятков миллиВатт до единиц Ватт) и требует низкого [11] напряжения питания (4.5 - 7 Вольт).

#### 4. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.

~~~~~

Целью данной работы являлось математическое моделирование процессов, происходящих в автодине на диоде Ганна с вибрирующей нагрузкой. Для этого была составлена эквивалентная схема автодина (рис.5).

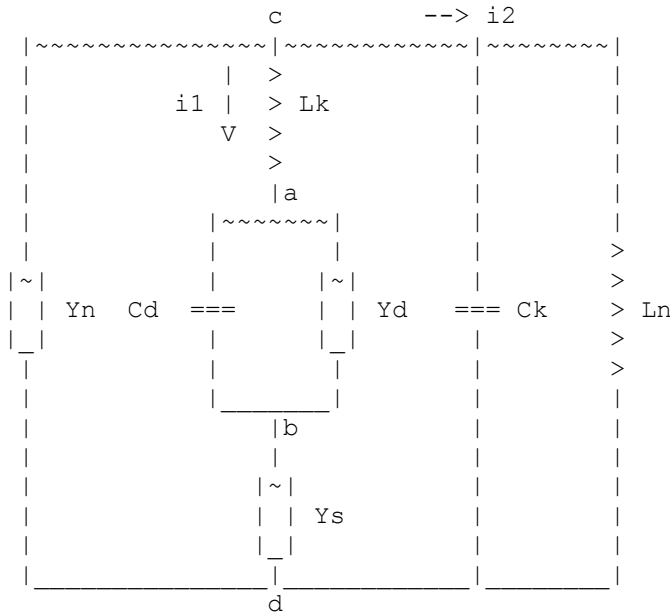


Рис. 5. Эквивалентная схема автодина на диоде Ганна.
~~~~~

Схема самого диода Ганна [6] включает проводимость диода  $Y_d$ , емкость диода  $C_d$ , проводимость активных потерь  $Y_s$ , индуктивность корпуса  $L_k$  и емкость корпуса  $C_k$ . К диоду подключены волноводная система и нагрузка, которые были представлены в виде активной проводимости нагрузки  $Y_n$  и индуктивности нагрузки  $L_n$ .

Эта эквивалентная схема описывается системой дифференциальных уравнений (4.1-4.4), полученных с использованием I и II законов Кирхгофа [12].

$$dU_{ab}/dt = ( i_1 - Y_d(U_0 + U_{ab}) U_{ab} ) / C_d \quad (4.1)$$

$$dU_{cd}/dt = ( -i_1 - U_{cd} Y_n - i_2 ) / C_k \quad (4.2)$$

$$di1 / dt = ( Ucd - Uab - i1 / Ys ) / Lk \quad (4.3)$$

$$di2 / dt = Ucd / Ln \quad (4.4)$$

Нагрузка с волноводной системой была представлена в виде линии, нагруженной на комплексную проводимость отражающей поверхности ( рис.6 ).

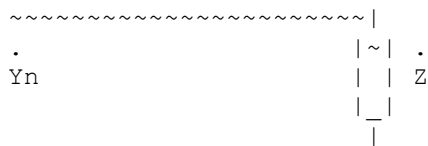


Рис. 6. Представление нагрузки в виде нагруженной линии.

Комплексная проводимость нагрузки  $\dot{Y}_n$  была выражена через коэффициент отражения волны от объекта ( нагрузки ). Для этого была решена система уравнений (4.5-4.6) [12].

$$\dot{U} = \dot{U}_{пад} + \dot{U}_{отр} \quad (4.5)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_{пад} + \dot{I}_{отр} , \quad (4.6)$$

где  $\dot{U}_{пад}$ ,  $\dot{I}_{пад}$  - комплексные напряжение и ток падающей волны,  $\dot{U}_{отр}$ ,  $\dot{I}_{отр}$  - комплексные напряжение и ток отраженной волны. Коэффициент отражения представляет собой отношение амплитуд отраженной и падающей волн.

$$G = \dot{I}_{отр} / \dot{U}_{пад} \quad (4.7)$$

В результате решения этой системы было получено выражение для комплексной проводимости нагрузки.

$$\dot{Y}_n = \frac{1}{Z_v} * \frac{1 - G \exp(-2j \quad l)}{1 + G \exp(-2j \quad l)} , \quad (4.8)$$

где  $Z_v$  - импеданс пустого волновода

$$Z_v = m \quad m_0 \quad W / \quad (4.9)$$

$W$  - частота генератора,  $m$  - магнитная проницаемость,  $m_0$  -

магнитная постоянная,  $l$  - расстояние до объекта,  $\theta$  - фазовая постоянная.

Для подстановки в систему уравнений (4.1-4.4) комплексная проводимость нагрузки была разделена на действительную и мнимую части.

$$\operatorname{Re}(\dot{Y}_n) = \frac{1}{Z_B} * \frac{1 - G^2}{1 + 2 G \cos(2 \theta l) + G^2} \quad (4.10)$$

$$\operatorname{Im}(\dot{Y}_n) = \frac{1}{Z_B} * \frac{2 G \sin(2 \theta l)}{1 + 2 G \cos(2 \theta l) + G^2} \quad (4.11)$$

Действительная часть добавляется к некоторому неизменному значению активной проводимости нагрузки

$$Y_n = Y_{n0} + \operatorname{Re}(\dot{Y}_n) \quad (4.12)$$

Мнимая же часть в зависимости от своего знака может характеризовать или емкость, или индуктивность. В случае, если  $\operatorname{Im}(\dot{Y}_n) > 0$ , она характеризует емкость, которая добавляется в  $C_k$ .

$$C_k = C_{k0} + \operatorname{Im}(\dot{Y}_n) / \omega \quad (4.13)$$

В противном случае она характеризует индуктивность, которая добавляется в  $L_n$ .

$$L_n = L_{n0} + 1 / (\omega |\operatorname{Im}(\dot{Y}_n)|) \quad (4.14)$$

Чтобы найти проводимость диода, необходимо проинтегрировать выражение ВАХ диода по напряжению:

$$i(U) = q n S * \frac{M_0 U}{L} + V_s \left[ \frac{U^4}{E_p L} \right] \quad (4.15)$$

$$1 + \left[ \frac{U^3}{E_p L} \right]$$

где  $q$  - элементарный заряд,  $n$  - концентрация носителей заряда,  
 $M_0$  - подвижность носителей заряда,  $U$  - приложенный потенциал,  
 $S$  - сечение диода,  $L$  - длина диода,  $V_s$  - скорость насыщения  
носителей заряда,  $E_p$  - пороговое поле.

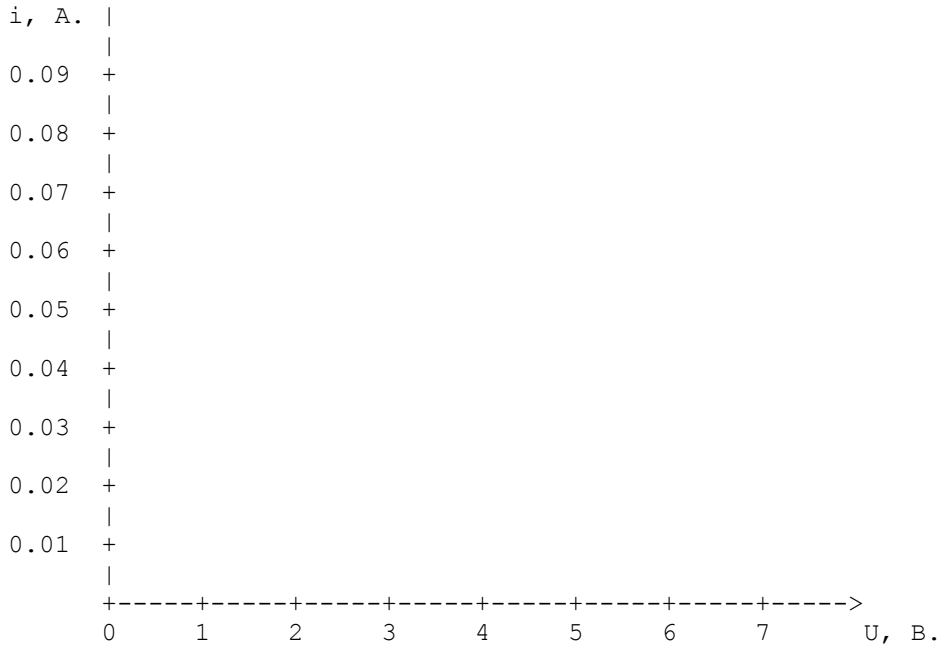


Рис.4.3. Вольт - амперная характеристика диода Ганна.

В результате дифференцирования было получено

$$\begin{aligned}
 \frac{di}{dU} &= \frac{q n S}{L} * \frac{M_0 + 4 \frac{V_s U^3}{E_p L}}{1 + \left( \frac{U^4}{L E_p} \right)} \\
 &= \frac{q n S}{L} * \frac{M_0 \frac{U^3}{L} + V_s \left( \frac{U^4}{L E_p} \right)}{\left( 1 + \left( \frac{U^4}{L E_p} \right) \right)^2} \quad (4.16)
 \end{aligned}$$

Итак, решая систему (4.1-4.4) с подстановками (4.13), (4.14), (4.16), можно получить значения токов  $i_1$ ,  $i_2$  и напряжений  $U_{ab}$ ,  $U_{cd}$  в некоторый момент времени. Но выражение (4.8), а следовательно и выражения (4.10) и (4.11) были

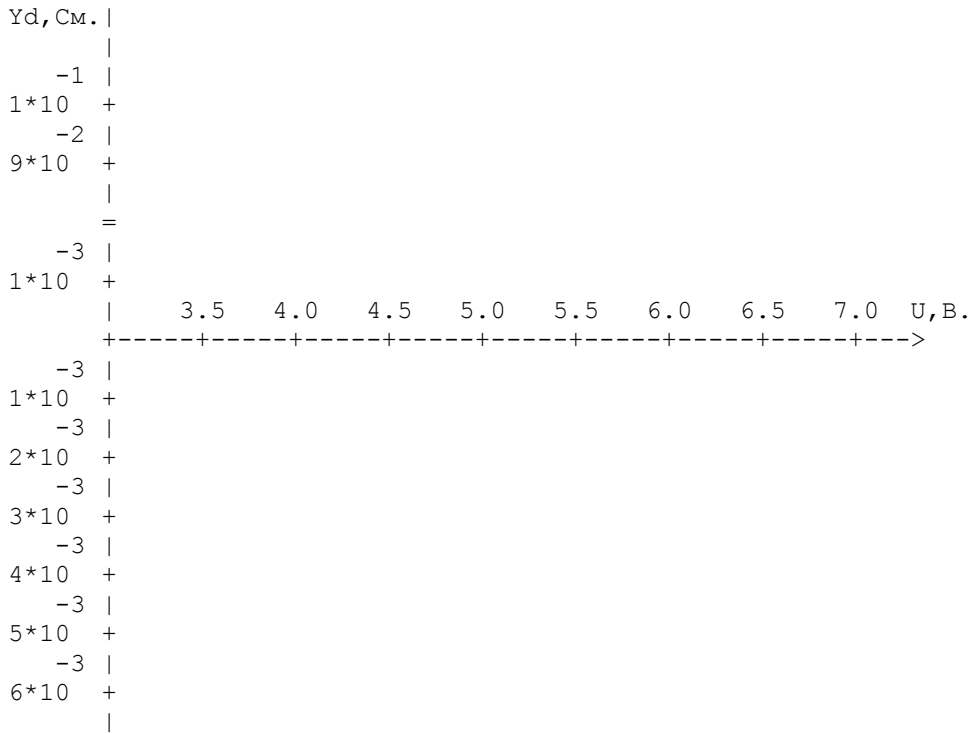


Рис.4.4. Зависимость проводимости диода Ганна от напряжения питания.

выведены без учета вибрации. Учесть гармоническую вибрацию нагрузки можно подставив  $l$  ( расстояние до объекта ) в виде

$$l = l_0 + A \sin(\omega_b t) \quad (4.17)$$

где  $l_0$  - начальное расстояние до объекта,  $\omega_b$  - частота вибрации,  $A$  - амплитуда вибрации. Можно также учесть линейное перемещение объекта, введя в рассмотрение линейную скорость  $V$ , тогда

$$l = l_0 + A \sin(\omega_b t) + V t \quad (4.18)$$

Система (4.1-4.4) решалась с учетом изменения расстояния до объекта (4.18). Аналитическое решение этой системы не представляется возможным, поэтому система была решена на ЭВМ с помощью метода Рунге-Кутты для систем дифференциальных уравнений [13]. Вычисления проводились для десяти точек на период в режиме самосогласования частоты. Проводился расчет трех предполагаемых периодов, после чего вычислялась частота по последнему реальному периоду. Если предполагаемая и вычисленная частоты различались более чем на 10 %, вычисления продолжались для следующих трех периодов, после чего проводилось сравнение новой частоты с ранее найденной. Это продолжалось до согласования старой и новой частот с заданной точностью. Результаты представлялись в виде матрицы токов и напряжений  $U_{ab}$ ,  $U_{cd}$ ,  $i_1$ ,  $i_2$  для трех периодов, которая в дальнейшем использовалась для нахождения величины протектированного сигнала (4.19), мощности СВЧ сигнала на нагрузке (4.20) и спектров токов на диоде и нагрузке.

$$V_{дет} = \frac{n}{T} \begin{matrix} R \\ i_1 dt \\ 0 \end{matrix} \quad (4.19)$$

$$P_{свч} = \frac{n}{T} \begin{matrix} 1 \\ U_{cd} i_2 dt \\ 0 \end{matrix} \quad (4.20)$$

Спектр токов  $i_1$  и  $i_2$  находился методом разложения функций  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$  в ряд Фурье [14,15].

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1} [ a_k \cos( k W t ) + b_k \sin( k W t ) ], \quad (4.21)$$

где

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(k \omega t) dt \quad (4.22)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(k \omega t) dt, \quad (4.23)$$

где  $f(t)$  - функции  $i_1(t)$  или  $i_2(t)$ ,  $\omega$  - частота сигнала,  $k$  - номер гармоники,  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Амплитуда и фаза  $k$ -й гармоники находятся по формулам (4.24) и (4.25) соответственно.

$$A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (4.24)$$

$$\Phi_k = - \arctg(b_k/a_k) \quad (4.25)$$

Интегралы в выражениях (4.19), (4.20), (4.22), (4.23) вычислялись методом трапеций [16]. Метод трапеций, хотя и является менее точным по сравнению с методом Гаусса и правилом Симпсона, но его точности вполне хватает для решения поставленной задачи. Кроме того, он позволяет сократить затраты машинного времени, что имеет немаловажное значение.

В целях уменьшения затрат машинного времени программа моделирования работы автодина на диоде Ганна была написана на языке высокого уровня Си [17]. Программа реализована на персональной ЭВМ "Электроника МС 0507" (см. приложение 1). Программы приведены в приложении 3, а ее описание в приложении 2.

Для расчета были выбраны следующие начальные данные:

$f_g = 10$  ГГц,  $M_0 = 6000$  В/(см \* с),  $n = 10$  см.,  $U_0 = 4.5$  В,  
 $L = 10$  мкм,  $S = 100 * 100$  мкм,  $V_s = 8.5 * 10^6$  см/с,  $E_p = 4000$   
В/см,  $G = 1$ ,  $\epsilon = 1$ ,  $Y_{n0} = 0.01$  См,  $Y_s = 0.05$  См,  $C_{k0} = 0.45$  пФ,  
 $C_d = 0.25$  пФ,  $L_k = 0.45$  нГн,  $L_{n0} = 0.45$  нГн. Расчеты  
проводились в предположении отсутствия затухания сигнала  
( постоянная затухания  $= 0$  ). Кроме того, считалось, что  
проводимость нагрузки состоит только из проводимости волновода  
и проводимости отражающей поверхности. На практике же она  
включает проводимость волновода, проводимость антенны,  
проводимость открытого пространства и проводимость отражающей  
поверхности. Все вышеидущие формулы выведены с учетом этого  
предположения.

В качестве граничных условий для решения системы  
дифференциальных уравнений выбраны значения  $U_{ab} = 0.8$  В,  
 $U_{cd} = 0.5$  В,  $i_1 = 0.01$  А,  $i_2 = 0.007$  А.

Однако в процессе вычислений было установлено, что метод,  
реализованный в программе Nann.sav пригоден только для расчета  
процессов, происходящих в автодинном генераторе с неподвижной  
нагрузкой. Это главным образом обусловлено большими затратами  
машинного времени. Приведу следующий пример: пусть объект  
совершает колебания с частотой 10 кГц., частота зондирующего  
сигнала 10 ГГц.; таким образом, чтобы рассчитать воздействие  
вибрации объекта на автодин, необходимо провести расчет хотя  
бы за один период вибрации, т.е. за  $10^6$  периодов зондирующего  
сигнала. Расчет одного периода зондирующего сигнала занимает  
около пяти минут машинного времени, т.е. данный расчет  
потребуется 9.5 лет.

Это препятствие было устранено следующим образом: с  
помощью программы Nann.sav были проведены расчеты величины  
продетектированного сигнала и СВЧ - мощности на нагрузке для

случая неподвижного объекта и получены их зависимости от расстояния до исследуемого объекта. Была проведена аппроксимация с использованием метода наименьших квадратов ( расчет проведен на микрокалькуляторе "Электроника МК - 52" с использованием стандартного пакета программного обеспечения ВРП - 3 ) в результате чего получены следующие выражения:

$$P_{свч}^{н}(L) = 3.57 \cdot 10^{-3} - 2.24 \cdot 10^{-4} L + (0.61 \cdot 10^{-3} - 2.20 \cdot 10^{-4} L) \sin(4 L / ) \quad (4.26)$$

$$V_{дет}^{н}(L) = 3.45 \cdot 10^{-1} - 2.35 \cdot 10^{-2} L + (2.36 \cdot 10^{-1} - 2.01 \cdot 10^{-2} L) \sin(4 L / ) \quad (4.27)$$

Изменяя расстояние до исследуемого объекта  $L$  по закону (4.28) и вычислив средние значения  $P_{свч}^{н}(L)$  и  $V_{дет}^{н}(L)$  за период вибрации (4.29), (4.30), были вычислены значения СВЧ - мощности на нагрузке и величина протектированного сигнала в случае вибрирующего объекта.

$$L(t) = L_0 + dL \sin(W_v t) \quad (4.28)$$

$$P_{свч}^{н} = \frac{1}{T_v} \int_0^{T_v} P_{свч}^{н}(L(t)) dt \quad (4.29)$$

$$V_{дет}^{н} = \frac{1}{T_v} \int_0^{T_v} V_{дет}^{н}(L(t)) dt, \quad (4.30)$$

где  $T_v$  - период вибрации.

Для проведения этих расчетов была написана программа Vibro.sav ( см. Приложение 4. ). Вычисления проводились в

диапазоне частот вибрации от 1 кГц. до 10 кГц. для десяти фиксированных значений амплитуды вирации:  $dL = 0.01 \text{ см.}, 0.1 \text{ см.}, 0.25 \text{ см.}, 0.5 \text{ см.}, 0.75 \text{ см.}, 1 \text{ см.}, 1.5 \text{ см.}, 2 \text{ см.}, 3 \text{ см.}$  ( что соответствует длине волны зондирующего сигнала ) и 5 см.

5. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ.  
 ~~~~~

Моделирование процессов в автодине проводилось в два этапа. На первом этапе необходимо было найти параметры автодина при работе с неподвижным исследуемым объектом. В качестве этих параметров были выбраны величины, легко поддающиеся практическому измерению: частота генерации, мощность СВЧ - сигнала на нагрузке и величина продетектированного на диоде сигнала. Были проведены вычисления этих параметров в зависимости от расстояния до исследуемого объекта и от напряжения питания на диоде Ганна.

Кроме того, была получена зависимость частоты СВЧ - сигнала от питающего напряжения при работе автодина на согласованную нагрузку (коэффициент отражения $G = 0$), которая приведена на рисунке:

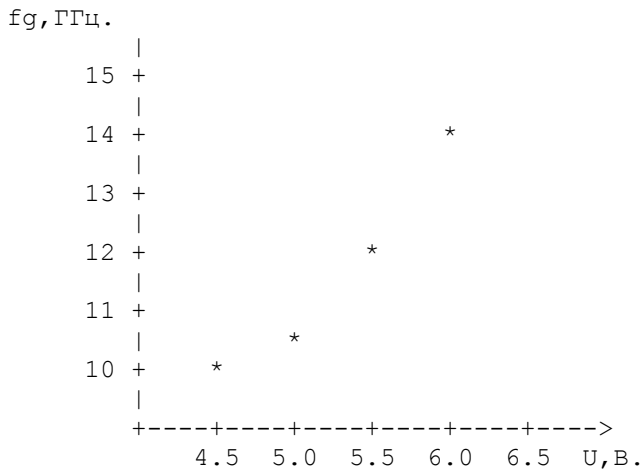


Рис. 5.1. Зависимость частоты СВЧ - сигнала от напряжения

~~~~~

питания при работе на согласованную нагрузку.

На рисунке виден резкий рост частоты СВЧ - сигнала при напряжении питания более 5 В, что недопустимо для используемой волноводной системы ( 10 \* 23 мм. или 12.5 \* 28.5 мм. ) по причине существования критической длины волны:

$$\lambda_{кр} = 2 / [ (m/a)^2 + (n/b)^2 ]^{-1/2}, \quad (5.1)$$

где a, b - размеры стенок волновода, m, n = 0, 1, 2, ... .

В данной волноводной системе могут существовать СВЧ - сигналы с частотами 8 - 12 ГГц. ( 7 - 10 ГГц. ). Поэтому практически результаты моделирования могут использоваться при напряжениях питания 4.4 - 5.3 В. Однако, в дальнейшем будут рассматриваться и другие напряжения питания ( до 7 В. ) для моделирования работы системы в других диапазонах и для нахождения зависимостей параметров от напряжения питания.

На рис. 5.2 приведена зависимость СВЧ - мощности на нагрузке от расстояния до исследуемого объекта и напряжения питания. Она является периодической зависимостью с периодом  $\lambda/2$ , где  $\lambda$  - длина СВЧ - волны для данного напряжения питания ( (4.5В) = 3 см., (5В) = 2.7 см., (5.5В) = 2.4 см., (6В) = 2 см. ). По характеру зависимость близка к синусоидальной, поэтому она была аппроксимирована функцией вида (4.26) для дальнейшего использования. Коэффициенты этой зависимости меняются с изменением напряжения питания. На рис. 5.3 приведена зависимость СВЧ - мощности на нагрузке при расстоянии до объекта  $L = n \lambda/4$ , n = 0, 1, 2, ... от напряжения питания, а на рис. 5.4 зависимость амплитуды функции  $P_{свч}(L)$  от напряжения питания. Эти зависимости действительны в

интервале  $L = (0 - 5)$ . С увеличением напряжения питания происходит уменьшение СВЧ - мощности на нагрузке и уменьшение амплитуды функции  $P_{свч}^{(n)}(L)$ . При напряжении питания 6.5 - 7.0 В СВЧ - мощность приобретает значение 2.78 мВт. и перестает изменяться с дальнейшим увеличением питающего напряжения, а амплитуда функции  $P_{свч}^{(n)}(L) \rightarrow 0$ .

Аналогично была проанализирована зависимость величины продетектированного сигнала от расстояния до объекта и напряжения питания ( см. Рис. 5.5 ). Эта зависимость также близка к синусоидальной, поэтому она была аппроксимирована функцией вида (4.27). На рис. 5.6 и рис. 5.7 приведены зависимости величины продетектированного сигнала при  $L = n/4$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  и амплитуды функции  $V_{дет}^{(n)}(L)$  от напряжения питания.

Из анализа зависимостей  $P_{свч}^{(n)}(L, U)$  и  $V_{дет}^{(n)}(L, U)$  можно сделать вывод, что измерения выгоднее проводить при напряжении питания около 4.5 В. при расстоянии до исследуемого объекта  $(4n+1)/8$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , т.к. измеряемые величины имеют наибольшие значения, ( 0.6 В. по напряжению и 4.2 мВт. по СВЧ - мощности ), что позволяет лучше выделить их на фоне шумов.

На Рис.5.8 приведена зависимость частоты СВЧ - сигнала от расстояния до объекта и напряжения питания. Зависимость является периодической с периодом  $\pi/2$ . Амплитуда отрицательного полупериода значительно меньше амплитуды положительного полупериода. Значения частоты в точках  $n/4$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  соответствуют значениям частоты при работе на согласованную нагрузку. Из приведенных выше рассуждений о волнах, не затухающих в данном волноводе можно сделать вывод, что при  $L = (n/4 - n/2)$  будет происходить быстрое затухание сигнала, поэтому измерения в этих точках не

представляются возможными. Измерения возможны в точках  $L = [n - (n+1)] / 4$ , где частота сигнала соответствует диапазону частот волновода (10 \* 23 мм. или 12.5 \* 28.5 мм.).

На Рис.5.9 и Рис.5.10 приведены спектры токов на нагрузке и на диоде Ганна соответственно при  $L = (4n+1) / 8$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ , в точке, наиболее благоприятной для измерений. В обоих спектрах отмечается преобладание основной гармоники, вследствие чего она оказывает наибольшее влияние на работу автодина. Этим можно объяснить почти гармоническую форму функций  $R_{свч}(L)$ ,  $V_{дет}(L)$ .

Все расчеты на данном этапе проводились с помощью программы Hann.sav.

На втором этапе было проведено моделирование работы автодина при вибрирующем исследуемом объекте. Моделирование проводилось с помощью программы Vibro.sav с использованием соотношений (4.26) и (4.27). На Рис. 5.11 и 5.12 представлены зависимости СВЧ - мощности на нагрузке и величины продетектированного на диоде Ганна сигнала от начального расстояния до объекта и амплитуды вибрации при частоте вибрации 1 кГц. Эти зависимости имеют правильную синусоидальную форму вследствие использования аппроксимаций (4.26) и (4.27). Период этих зависимостей равен  $\frac{v}{2}$ .

Максимальные значения величин  $R_{свч}(L)$  и  $V_{дет}(L)$  отмечается в точках  $(4n+1) / 8$  и  $(4n+3) / 8$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Измерения следует проводить в области максимальной чувствительности. Однако, учитывая предыдущие ограничения по частоте, точки  $(4n+3) / 8$  являются непригодными для проведения измерений вследствие затруднений существования сигналов такой высокой частоты в данном типе волноводов. Поэтому измерения рекомендуется проводить в диапазоне

$$(4n+1) / 8 - (4n+2) / 8.$$

На Рис. 5.12 и 5.14 приведены зависимости СВЧ - мощности на нагрузке и величины продетектированного сигнала от амплитуды вибрации при частоте вибрации 1 кГц. и начальном расстоянии до

\*

Здесь и далее все расчеты для напряжения питания 4.5 В. объекта  $(4n+1) / 8$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Их анализ показывает, что данная установка способна измерять амплитуды вибраций в пределах от  $10^{-5}$  м. до  $10^{-2}$  м. На участке  $10^{-5}$  -  $10^{-3}$  м. средняя чувствительность по напряжению составляет 11 мкВ/мкм., по мощности - 30 мкВт/мм., что позволяет проводить точные измерения серийно выпускаемой измерительной аппаратурой. На участке  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  м. чувствительность резко возрастает, составляя в среднем по напряжению значения 56 мкВ/мкм., по мощности - 140 мкВт/мм, что позволяет проводить измерения с помощью неprecизионной аппаратуры. При превышении амплитудой вибрации длины волны ( в данном случае 3 см. ) значения СВЧ - мощности и величины продетектированного сигнала изменяются по негармоническому закону. На участке  $10^{-2}$  -  $3 \cdot 10^{-2}$  м. отмечается нелинейный разброс значений мощности и продетектированного сигнала, что затрудняет проведение измерений в данном диапазоне амплитуд вибрации.

На Рис. 5.15 и 5.16 представлены частотные зависимости СВЧ - мощности на нагрузке и величины продетектированного на диоде сигнала для различных амплитуд вибрации. Существование частотных зависимостей объясняется чисто математическими особенностями машинных методов вычисления интегралов ( в частности метода трапеций ), оказывающих свое влияние на вычисления выражений (4.29) и (4.30). Кроме того, на

вычисления повлиял тот факт, что в выражении (4.28)  $L(t)$  принимает значения  $L_0 + d_1(1-0.8)$  в течение большего промежутка времени, чем остальные значения, что приводит к суммированию в основном крайних значений  $P_{свч}(L)$  и  $V_{дет}(L)$ . С ростом частоты вибрации эти эффекты становятся менее заметными, что приводит к исчезновению частотных зависимостей.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

~~~~~

При выполнении дипломной работы были получены следующие результаты:

1. Проведен анализ современного состояния проблемы измерения параметров вибрации.
2. Построена теоретическая модель автодинного генератора на диоде Ганна, описано влияние пространственного положения нагрузки на параметры элементов эквивалентной схемы.
3. На основе построенной модели составлено две программы для расчета параметров автодина на диоде Ганна.
4. Проведено моделирование работы автодина на диоде Ганна при различных напряжениях питания диода Ганна. Установлено, что данное устройство может использоваться при напряжениях питания от 4.4 до 5.3 Вольт.
5. Проведено моделирование работы автодина на диоде Ганна при различных удалениях исследуемого объекта. Установлено, что практические измерения возможны при расстояниях до объекта $[n - (n+1)] / 4$, $n = 0, 1, 2, \dots$, оптимальные точки для проведения измерений $(4n+1) / 8$, которые устанавливаются по максимуму СВЧ - мощности на нагрузке и/или величины протектированного на диоде Ганна сигнала.
6. Проведено моделирование работы автодина на диоде Ганна при

различных амплитудах и частотах вибрации исследуемого объекта. Установлено, что данное устройство пригодно для измерения вибраций с амплитудами от 10 м. (чувствительность по напряжению составляет 11 мкВ/мкм., по СВЧ - мощности - 30 мкВт/мм.) до 10 м. (чувствительность по напряжению 56 мкВ/мкм., по СВЧ-мощности - 140 мкВт/мм.)

ЛИТЕРАТУРА.

~~~~~

1. Альтшулер Ю. Г., Сосунов В. А., Усов Н. В. Измерение малых амплитуд механических перемещений с применением открытого СВЧ резонатора // Известия ВУЗов. - Радиоэлектроника. - 1975. - Т.18. - N10. - С. 93 - 98.
2. Гордеев Б. А., Новожилов М. В., Образцов Д. И. Применение ультразвукового метода в вибродиагностике легковых автомобилей // Метрология. - 1990. - N6. - С. 33 - 36.
3. Зак Е. Когерентные световые методы измерения параметров механических колебаний // Зарубежная радиоэлектроника. - 1975. - N12. - С. 70 - 76.
4. Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С. Радиоволновые измерения параметров технологических процессов, - М.: Энергоиздат. - 1989. - С. 124 - 162.
5. Коломойцев Ф. Н., Быстряков Н. П., Снежко Е. М., Налча Г. И., Харагай А. С. СВЧ установка для измерения вибраций // Измерительная техника. - 1971. - N11. - С. 45 - 46.
6. Коган И. М., Тамарчак Д. Я., Хотунцев Ю. Л. Автодины // Итоги науки и техники. - Радиоэлектроника. - 1984. - Т.33. - С. 3 - 175.
7. Коротов В. И., Хотунцев Ю. Л. Энергетические

- характеристики доплеровских автодинов на полупроводниковых приборах // Радиотехника и электроника. - 1990. - Т.35. - N7. - С. 1514 - 1517.
8. Шокли В. Теория электронных полупроводников. Пер. с англ. / под ред. Жузе. - М.: Иностранная литература. - 1953. - С. 558.
9. Еленский В. Г. Инжекционно - пролетные диоды с проколом базы, VARITT - диоды // Зарубежная радиоэлектроника. - 1977. - N11. - С. 98 - 103.
10. Вальд - Перлов В. М., Сиберцев Л. С., Тагер А. С. О минимальном уровне амплитудного шума генераторов на лавинно - пролетных диодах // Радиотехника и электроника. - 1976. - Т.21. - N2. - С. 357 - 363.
11. Усанов Д. А., Горбатов С. С., Семенов А. А. Изменение вида вольт - амперной характеристики диода Ганна в зависимости от режима его работы на СВЧ // Известия ВУЗов. - Радиоэлектроника. - 1991. - Т.34. - N5. - С. 107 - 108.
12. Васильев Д. В., Витель М. Р., Горшенков Ю. Н. и др. Радиотехнические цепи и сигналы / под ред. Самойло К. А. - М.: Радио и связь. - 1982. - С. 48 - 49.
13. Эберт К., Эдерер Х. Компьютеры. Применение в химии. Пер. с нем. - М.: Мир, - 1988. - С. 235 - 241.
14. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Пер. с амер. / под ред. Арамаковича И. Г. - М.:Наука. - 1973. - С. 146 - 150.
15. Будак Б. М., Фомин С. В. Кратные интегралы и ряды. - М.:Наука. - 1965. - С. 449 - 458.
16. Маккракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе. Пер. с англ. / под ред. Наймарка Б. М. - М.:Мир. - 1977. - С. 205 - 207.

17. Берри Р., Микинз Б. Язык Си. Введение для прогораммистов.

Пер. с англ. - М.: Финансы и статистика. - 1988.