

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени М.В. ЛОМОНОСОВА

Физический факультет

Практикум кафедры физики колебаний

Руководство по выполнению задачи. АМПЛИТУДНЫЕ ДЕТЕКТОРЫ И
ВЫПРЯМИТЕЛИ. Моделирование.

А.В. Степанов

Москва 2022 г.

Для выполнения задачи необходимо загрузить симулятор IdealCircuit и
схемы «Ампл_дет_1,2,3,4.ic».

Теоретические сведения по задаче содержатся в описании «Амплитудное
детектирование» (файл «Amplitude_detector-joined.pdf»).

Краткие сведения по работе с симулятором содержатся в файле «Пояснения
по моделированию.pdf», полное руководство – в файле «manual.pdf».

Материалы размещены на сайте кафедры физики колебаний.

КРАТКИЕ ПОЯСНЕНИЯ.

В широком смысле, при аналоговой обработке сигнала, **амплитудные детекторы**, это устройства, которое вырабатывают выходной сигнал (напряжение), характеризующий амплитуду (размах) переменного входного сигнала. Мерой размаха сигнала может служить амплитуда (пиковое значение), средний модуль сигнала, или средний квадрат сигнала.

Для детектирования необходимо нелинейное преобразование сигнала. Как правило используются линейные и квадратичные детекторы (Рис.1.1, Рис.1.2).

По отношению к полярности входного сигнала характеристика преобразования может быть симметричной или асимметричной (нулевое значение для одной из полярностей). Соответствующие детекторы называются двухполупериодными и однополупериодными.

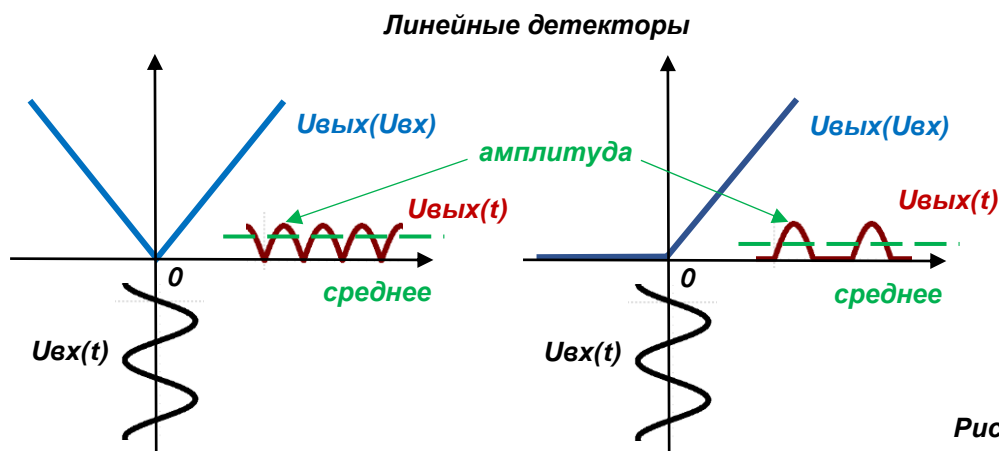


Рис. 1.1

Усреднение по времени делается так, чтобы на выходе детектора устранить быстрое изменение сигнала, но сохранить относительно медленное изменение амплитуды (среднего квадрата). Соответствующая постоянная времени определяет

быстродействие детектора, насколько быстрые изменения амплитуды он может регистрировать. Усреднению соответствует выделение низкочастотных составляющих сигнала с помощью фильтра низких частот.

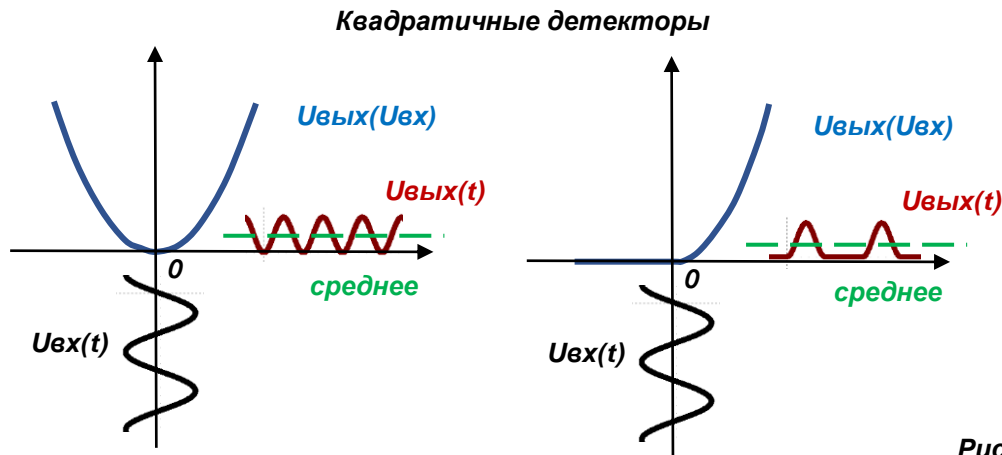


Рис. 1.2

Пиковые детекторы определяют (запоминают) максимальное значение сигнала на определенном временном интервале и вырабатывают соответствующее выходное напряжение.

Как правило, запоминающим элементом является конденсатор, который заряжается до амплитудного значения входного напряжения и сохраняет это значение на остальной части периода входного сигнала. Выходное напряжение такого детектора равно амплитуде входного напряжения, поэтому обычно он тоже является амплитудным детектором (однополупериодным или двухполупериодным).

Выпрямители, это устройства для получения постоянного напряжения питания из входного переменного напряжения, например, из напряжения силовой сети. Используются практически во всех устройствах питания электронной аппаратуры, промышленных установок. Принципы работы диодных выпрямителей и детекторов во многом одинаковы.

Диоды. Задачи детектирования и выпрямления могут решаться различными способами. Наиболее распространено детектирование/выпрямление с помощью разнообразных полупроводниковых диодов (диодов с p-n переходом, диодов Шоттки и др.). Особенности применения в основном определяются рабочими токами и напряжениями (мощностью), требуемым быстродействием.

Простейшей моделью диода является нелинейный элемент с нулевым сопротивлением r при одном направлении протекания тока и с бесконечно большим сопротивлением для другого направления тока (**идеальный диод**, Рис.2). Также может рассматриваться, как идеальный выключатель, который управляется знаком напряжения, действующего в электрической цепи (это основная идея синхронных выпрямителей без диодов).

Вместе с сопротивлением нагрузки R идеальный диод образует однополупериодный детектор с линейной характеристикой (Рис.2).

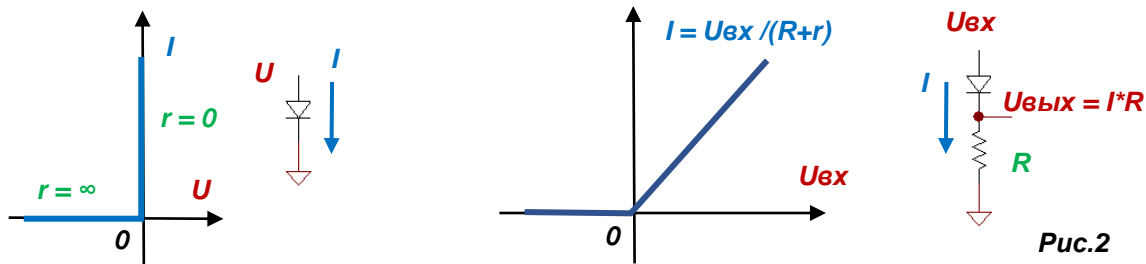


Рис.2

Характеристики реальных диодов отличаются от идеальной. У диодов с р-п переходом ВАХ близка к экспоненциальной и обычно описывается выражением (формула Шокли):

$$I = I_S \left(e^{\frac{U}{m \cdot \varphi_T}} - 1 \right), \quad \varphi_T = k_B T / q$$

Здесь k_B – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура, q – заряд электрона, φ_T – тепловой потенциал (примерно 26 мВ при комнатной температуре), I_S – обратный ток насыщения (зависит от технологии изготовления, сильно зависит от температуры).

Безразмерный коэффициент m (т.н. коэффициент неидеальности) зависит от материала полупроводников, технологии. Для германия значение m близко к 1, для кремния – к 2.

При прямом напряжении ($U > 0$) ток быстро увеличивается с ростом напряжения, а дифференциальное сопротивление dU/dI падает:

$$dI = \frac{IdU}{m \cdot \varphi_T}, \quad r = \frac{m \cdot \varphi_T}{I}$$

При $m=1$ току 1 мА соответствует дифференциальное сопротивление примерно 26 Ом ($T=300K$).

При обратном напряжении ($U < 0$) ток диода примерно равен обратному току насыщения и очень мал по сравнению с прямым током (обычно им можно пренебречь).

Помимо внутреннего сопротивления р-п перехода у диода также есть относительно небольшое сопротивление объемных областей. Это приводит к тому, что в области достаточно больших токов экспоненциальная зависимость ВАХ р-п перехода переходит в линейную зависимость.

Для анализа и простого расчета электронных схем с реальными диодами во многих случаях можно использовать **модель диода со ступенчатой характеристикой**, аналогичной ВАХ идеального диода (Рис.3.1). Диод открывается при напряжении V_d – прямое падение напряжения, напряжение открывания диода. Если диод открыт, напряжение на диоде не изменяется при любом токе, дифференциальное сопротивление r равно нулю. При напряжении меньше V_d диод закрыт, ток равен нулю при любом напряжении $V < V_d$, дифференциальное сопротивление r бесконечно большое.

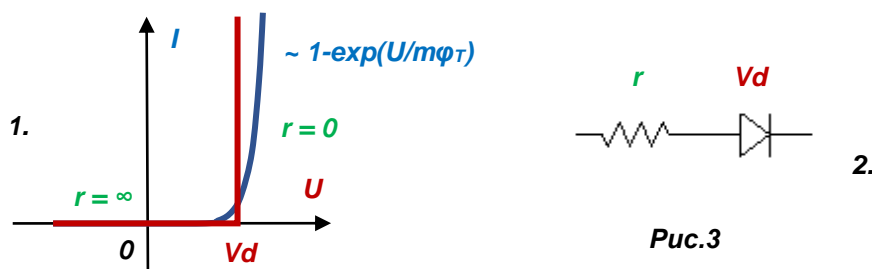


Рис.3

Практическое значение прямого напряжения диода зависит от типа диода и величины тока и в большинстве случаев составляет 0.3...1 В (для германия типично

0.3В, для кремния – 0.7В). Внутреннее сопротивление диода в открытом состоянии можно моделировать небольшим сопротивлением r , включенным последовательно с диодом, имеющим ступенчатую характеристику (Рис.3.2). Величину сопротивления для данного тока можно оценить по справочным данным диода. Во многих случаях внутреннее сопротивление диода несущественно.

МОДЕЛИРУЕМЫЕ СХЕМЫ

Моделируется работа нескольких типичных диодных детекторов и выпрямителей: однополупериодного детектора, мостового выпрямителя, умножителя напряжения и детектора с диодом в цепи обратной связи операционного усилителя.

Используется модель диода на Рис.3. Прямое напряжение диода V_d устанавливается в окне параметров диода, сопротивление диода r – в окне параметров сопротивления.

Пояснения по отдельным схемам даются по ходу упражнений.

ПОРЯДОК РАБОТЫ

1. Ознакомьтесь с принципом действия амплитудного детектора и работой симулятора по соответствующим описаниям.
2. Запустите симулятор. Загружая нужную схему, выполните рекомендуемые упражнения.
3. Можете самостоятельно изменять параметры схем, изучить их влияние на характеристики.

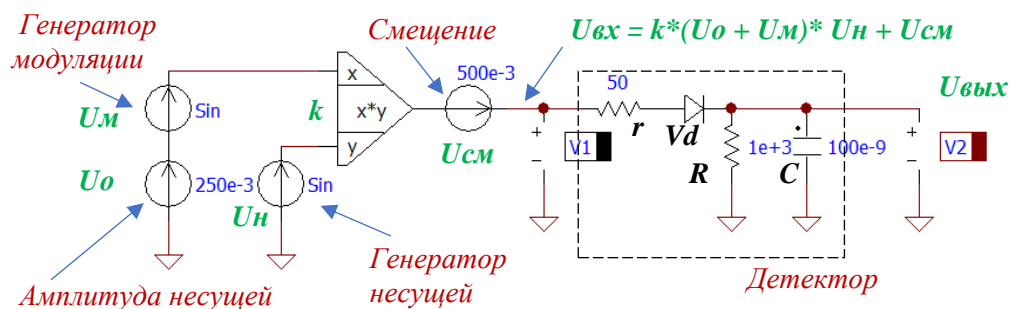
Устанавливайте подходящие для измерений шаг и время симуляции.

При проведении измерений используйте курсор и функции управления изображением: масштабирование, сдвиг, выделение фрагментов и др. Используйте масштабирование измерителей для одновременного наблюдения сильных и слабых сигналов.

УПРАЖНЕНИЯ

1. Однополупериодный амплитудный детектор.

Схема для моделирования показана на Рис.4. Она включает однополупериодный детектор и элементы для получения амплитудно-модулированного входного сигнала детектора. Измеряются напряжения на входе (V1) и выходе (V2) детектора.



Детектор образуют диод, сопротивление нагрузки R и сглаживающий конденсатор C . Сопротивление нагрузки R намного больше внутреннего сопротивления

диода r . Состояние диода (открыт/закрыт) определяется разностью входного напряжения $U_{вх}$ и напряжения на конденсаторе $U_{вых}$.

Если разность напряжений больше, чем прямое напряжение диода V_d , диод открыт. Конденсатор быстро заряжается через малое сопротивление диода r (постоянная времени цепи заряда равна rC). Заряд прекратится, когда разность напряжений сравняется с V_d .

Если разность напряжений меньше V_d , диод закрыт. Конденсатор медленно разряжается через большое сопротивление R (постоянная времени цепи разряда RC). Разряд продолжается до тех пор, пока разность напряжений снова не превысит V_d . Для входного сигнала, период которого намного меньше RC , изменение напряжения $U_{вых}$ из-за разряда мало.

Таким образом, с разницей примерно V_d выходное напряжение повторяет амплитуду входного сигнала (Рис.5). Дополнительная разница появляется из-за падения напряжения на внутреннем сопротивлении r .

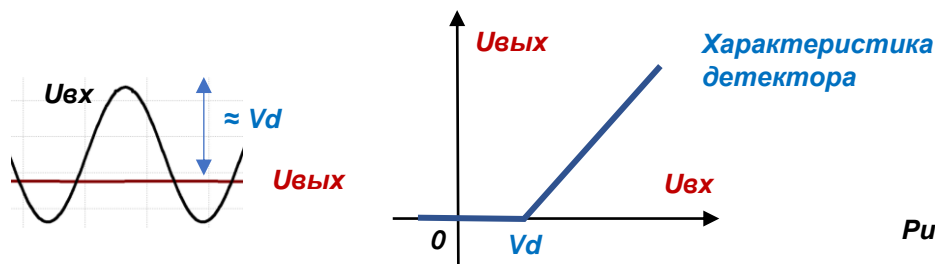


Рис.5

Детектор правильно отслеживает изменения амплитуды входного сигнала, если эти изменения происходят медленно по сравнению с постоянной времени RC . Поэтому есть противоречивые требования: постоянная времени должна быть большой для небольшого изменения выходного напряжения на периоде сигнала (малые пульсации), но должна быть достаточно мала, чтобы следить за изменением амплитуды сигнала (быстродействие).

Параметры детектора: $V_d = 0.5\text{В}$, $r = 50\text{Ом}$, $R = 1\text{кОм}$, $C = 100\text{нФ}$.

Формирование АМ сигнала. Генератор несущей вырабатывает гармонический сигнал U_n (частота 1МГц , амплитуда 1В). Источник постоянного напряжения U_o (0.25В) задает среднюю амплитуду АМ сигнала. Генератор модуляции U_m (1кГц , 0.125В) задает переменную составляющую амплитуды АМ сигнала. Генераторы U_o , U_m включены последовательно, - напряжения суммируются. Эта сумма умножается на сигнал несущей U_n с коэффициентом k ($1/\text{В}$), в результате получается переменный, АМ сигнал. К АМ сигналу добавляется постоянное напряжение смещения $U_{см}$ (0.5В).

Значения всех параметров устанавливаются в окнах параметров соответствующих элементов, значения при загрузке схемы были ранее указаны в скобках. Вид сигнала показан на Рис.6.

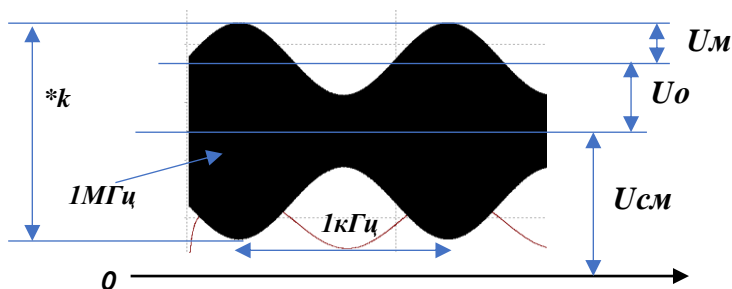
Входной сигнал
детектора

Рис.6

1.1. Сравните постоянную времени детектора с временными параметрами АМ сигнала. Для первоначально установленных параметров схемы получите сигнал огибающей на выходе детектора при воздействии АМ сигнала.

1.2. Изучите зависимость амплитуды выходного сигнала детектора от сопротивления диода r . Рекомендуемый диапазон – $0 \dots 200 \text{ Ом}$. Постройте график зависимости амплитуды от сопротивления.

1.3. Изучите зависимость амплитуды выходного сигнала детектора от напряжения смещения $U_{см}$. Рекомендуемый диапазон – $0 \dots 4 \text{ В}$, $r = 50 \text{ Ом}$. Постройте график зависимости амплитуды от смещения. Приведите характерные формы сигнала при разной величине смещения.

1.4. Изучите зависимость амплитуды выходного сигнала детектора от частоты модуляции. Рекомендуемый диапазон – $1 \dots 10 \text{ кГц}$, $r = 50 \text{ Ом}$, $U_{см} = 0.5 \text{ В}$. Постройте график зависимости амплитуды от частоты.

2. Двухполупериодный мостовой выпрямитель.

Схема для моделирования показана на Рис.7. Она включает диодный мост, сопротивление нагрузки R и сглаживающий (фильтрующий) конденсатор C . Входное напряжение: амплитуда 10 В , частота 50 Гц . Измеряются напряжения на входе ($V1$) и выходе ($V2$) выпрямителя, а также ток на выходе моста ($A1$).

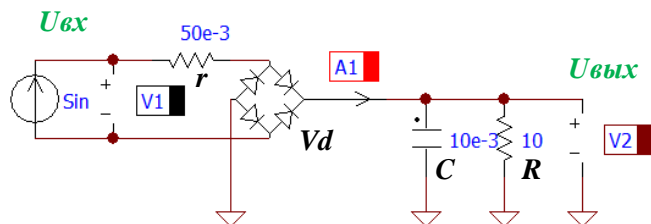


Рис.7

Выпрямитель работает аналогично однополупериодному детектору (выпрямителю). Отличие в том, что вместо одного диода используется мост из четырех диодов. Мост подает на нагрузку обе полуволны входного переменного напряжения с одинаковой полярностью Рис.8.



Рис.8

Для правильной работы необходимо, чтобы источник входного напряжения и нагрузка не имели других соединений помимо моста (изолированный источник). Обычно источником входного напряжения является вторичная обмотка силового трансформатора.

Выходное постоянное напряжение $U_{вых}$ равно амплитуде входного напряжения $U_{вх}$ за вычетом прямого напряжения на двух диодах и падения напряжения на их внутренних сопротивлениях. Эта разность (потеря напряжения) больше, чем в однополупериодном выпрямителе, но период подзарядки выходного сглаживающего конденсатора в два раза меньше. За счет этого при одинаковой емкости конденсатора

мостовой выпрямитель имеет вдвое меньшую амплитуду пульсаций выходного напряжения.

Амплитуду пульсаций ΔU (Рис.9) можно оценить с помощью следующих упрощающих предположений: конденсатор заряжается в течение малой части периода (малый угол отсечки) и пульсации напряжения малы по сравнению со средним напряжением на выходе (постоянная времени RC намного больше периода входного напряжения). Тогда можно считать, что конденсатор заряжается мгновенно, а разряжается постоянным током нагрузки $I = U_{\text{вых}}/R$ по линейному закону. В результате получается $\Delta U = I \cdot T/C$, T – период подзарядки конденсатора.

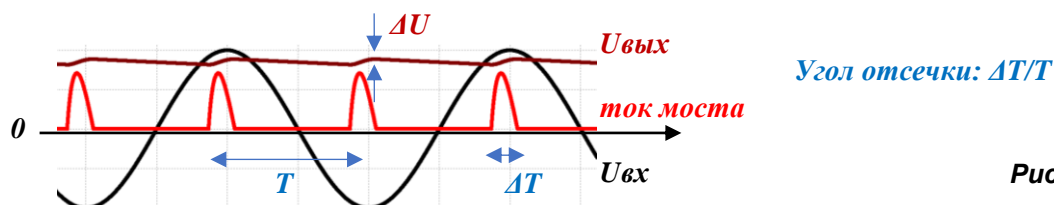


Рис.9

Ток и мощность в цепи моста выпрямителя очень неравномерно распределены по времени: при практически постоянном токе в нагрузке (постоянной мощности) мощность от источника переменного напряжения передается к нагрузке в виде коротких и больших импульсов тока (подзарядка конденсатора). Пиковый ток источника и диодов выпрямителя существенно превышает средний ток в нагрузке. Для уменьшения этого эффекта, вредного во многих отношениях, в мощных выпрямителях применяют специальные устройства, - корректоры коэффициента мощности, которые дают более равномерное распределение передаваемой мощности по времени.

Параметры выпрямителя: $V_d = 1.0\text{В}$, $r = 50\text{мОм}$, $R = 10\text{Ом}$ ($I \approx 1\text{А}$).

2.1 Изучите зависимость характеристик выпрямителя от емкости сглаживающего конденсатора C . Рекомендуемый диапазон – $100 \dots 10000\text{мкФ}$. Постройте зависимости: величины выходного напряжения, пульсаций напряжения, длительности (угла отсечки) и амплитуды импульсов тока. Приведите характерные формы сигналов при разной емкости. Сравните величину пульсаций с ожидаемым значением.

2.2. Проверьте зависимость амплитуды пульсаций от тока нагрузки. Установите значение емкости 10000мкФ , вдвое уменьшите сопротивление нагрузки (50Ом). Сравните величину пульсаций с измеренной ранее.

3. Умножитель напряжения.

Диодные умножители напряжения, это устройства, которые вырабатывают выходное постоянное напряжение, превышающее амплитуду входного переменного напряжения. Есть разные схемы однополупериодных и двухполупериодных умножителей. Основные принципы умножения, - последовательный заряд конденсаторов через уже заряженные конденсаторы, суммирование напряжений на отдельных конденсаторах. Выходное напряжение может достигать порядка 100кВ , мощность в нагрузке может быть порядка 100Вт .

Схема для моделирования показана на Рис.10. Она включает источник входного напряжения (100В , 10кГц), диодный умножитель напряжения на 4 и сопротивление нагрузки R . Измеряются входное напряжение на входе ($V1$) и на выходах каскадов ($V2$ - $V5$).

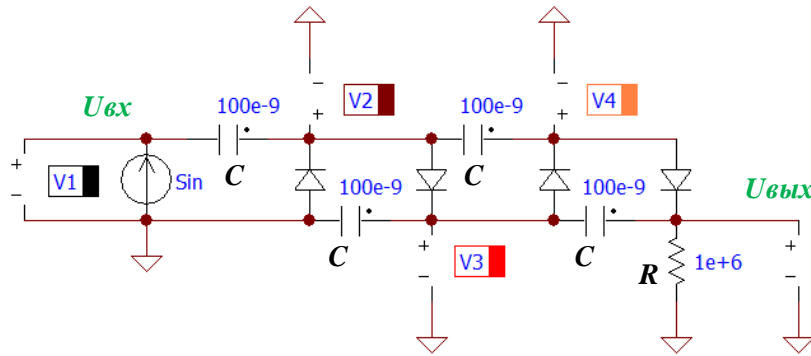


Рис.10

Работу этого умножителя проще понять, если считать, что диоды идеальные и нагрузки нет. Постепенное формирование выходного напряжения поясняет Рис.11,12.

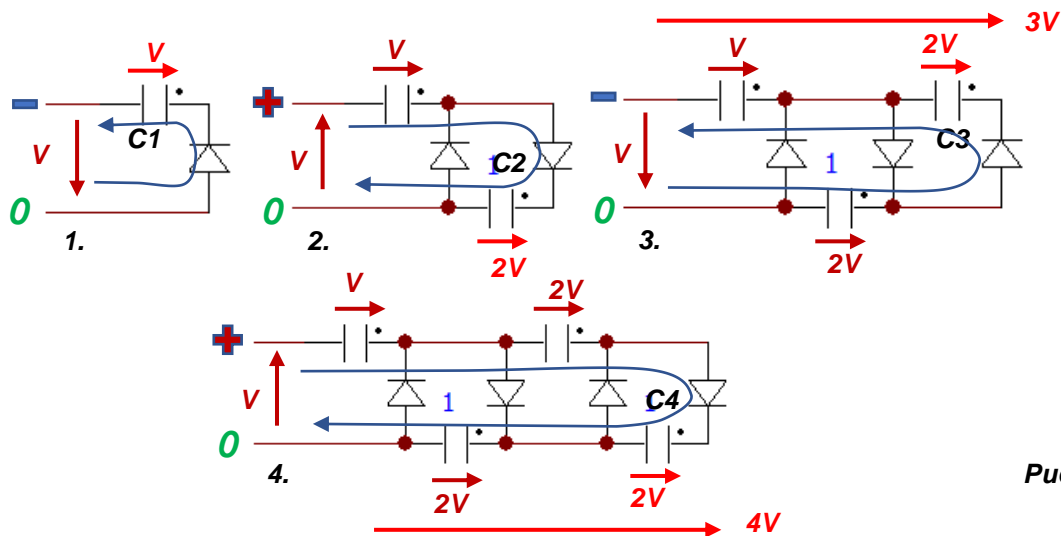


Рис.11

Во всех отрицательных полупериодах входного напряжения конденсатор $C1$ заряжается через диод до амплитудного значения входного напряжения V (Рис.11.1). Для гармонического напряжения это происходит в середине полупериода.

После заряда конденсатора $C1$ до напряжения V входное напряжение увеличивается, и поэтому увеличивается напряжение на диоде, подключенном к конденсатору $C2$. В определенный момент диод открывается и начинается заряд конденсатора $C2$. При этом заряд и напряжение конденсатора $C1$ уменьшаются из-за перетекания заряда из $C1$ в $C2$. Напряжение, которое прикладывается к конденсатору $C2$, равно сумме входного напряжения и напряжения на конденсаторе $C1$. Максимально возможное значение суммы соответствует середине положительного полупериода и равно $2V$. До этого напряжения в итоге и зарядится конденсатор $C2$ (Рис.11.2).

Аналогично происходит постепенный заряд конденсаторов $C3$ и $C4$. (Рис.11.2, 11.3). При отрицательной полярности входного напряжения благоприятные условия для заряда конденсаторов верхней цепочки, для положительной полярности - конденсаторов нижней цепочки.

Установление выходного постоянного напряжения во времени происходит постепенно (Рис.12). Чем больше каскадов в умножителе, тем больше время установления напряжения.

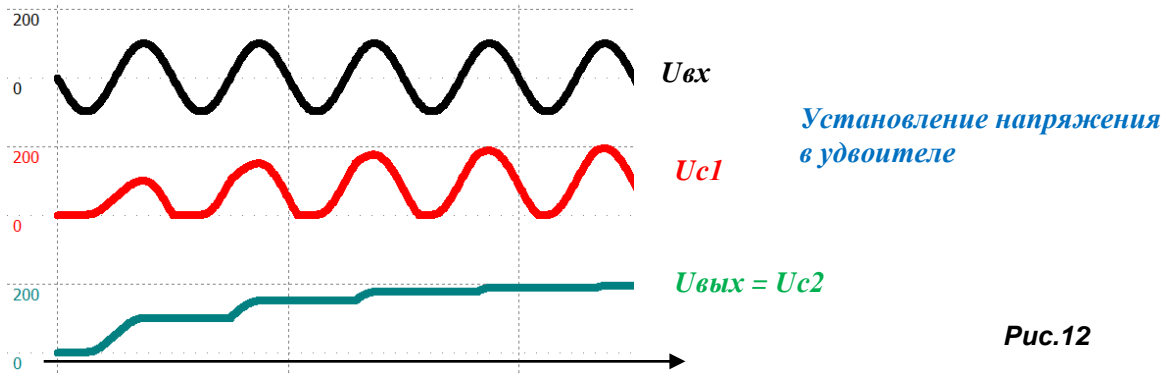


Рис.12

В общем случае n -каскадного умножителя выходное напряжение $U_{вых}$ и пульсации выходного напряжения ΔU определяются соотношениями:

$$U_{вых} = n \cdot U_{вх} - I \cdot (n^3 + 9n^2/4 + n/2) / (12 \cdot f \cdot C),$$

$$\Delta U = I \cdot (2n^3/3 + n^2/2 - n/6) / (f \cdot C).$$

Здесь I – ток нагрузки, C – емкость конденсаторов, $U_{вх}$ – амплитуда входного гармонического напряжения с частотой f (Гц), n – число каскадов.

Выходное напряжение нелинейно зависит от числа каскадов: сначала растет, а затем начинает падать. Поэтому есть оптимальное число каскадов, соответствующее максимальному выходному напряжению.

Коэффициент умножения и пульсации зависят от частоты входного сигнала. Характеристики улучшаются с увеличением частоты входного напряжения и емкости конденсаторов, ухудшаются при увеличении тока нагрузки.

3.1. Изучите зависимость характеристик умножителя от тока нагрузки I (сопротивления нагрузки R). Рекомендуемый диапазон сопротивлений – 10...100000кОм. Определите зависимости величины выходного напряжения и амплитуды пульсаций напряжения от сопротивления. Приведите характерные формы сигналов при разной величине тока.

3.2. Проверьте зависимость характеристик умножителя от частоты входного напряжения. Установите сопротивление нагрузки 100кОм. Вдвое увеличьте частоту (20кГц). Сравните получающиеся характеристики с измеренными ранее.

4. Детектор с диодом в обратной связи операционного усилителя.

Цель устройств этого типа, - сделать детектор с линейной характеристикой, как у детектора с идеальным диодом (Рис.2). Есть разные схемы для решения этой задачи, основная идея, - использование усилителя и обратной связи.

Схема для моделирования показана на Рис.13. Она представляет собой инвертирующий усилитель на операционном усилителе (ОУ), в цепи обратной связи которого включен диод. В отличие от обычного усилителя нужный выходной сигнал получается не на выходе ОУ, а на его инвертирующем входе. Измеряются входной (V1) и выходной (V2) сигналы, а также выходной сигнал ОУ (V3).

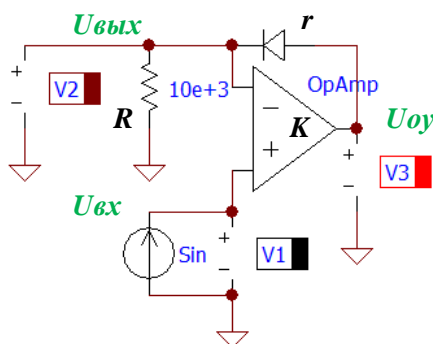


Рис.13

Как известно, отрицательная обратная связь действует так, чтобы сравнить входной сигнал ($U_{вх}$, напряжение на входе $+$) с выходным сигналом цепи обратной связи ($U_{вых}$, напряжение на входе $-$). Для идеального ОУ с бесконечным коэффициентом усиления разность входных напряжений ОУ равна нулю. ОУ вырабатывает такой выходной сигнал $U_{оу}$, чтобы $U_{вх} = U_{вых}$.

Для положительного входного напряжения так и происходит (Рис.14). На выходе ОУ устанавливается положительное напряжение, необходимое для открывания диода ($U_{оу} = U_{вх} + V_d$). Ток диода протекает через резистор R и создает на нем падение напряжения, равное входному напряжению ($U_{вх} = U_{вых}$).

При отрицательном входном напряжении напряжение на выходе ОУ также отрицательное. Диод закрыт, ток в цепи обратной связи равен нулю, на резисторе нулевое напряжение ($U_{вых} = 0$). Обратная связь разорвана, и ОУ вырабатывает максимально возможное отрицательное напряжение $U_{оу} = U_{нас}$ ($U_{нас}$ напряжение насыщения, близкое к напряжению питания ОУ).

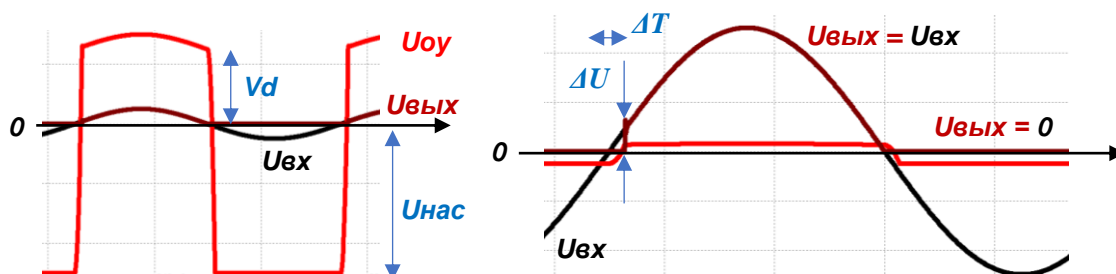


Рис.14

Разумеется, что паразитные параметры схемы и отличие характеристик реальных ОУ от идеальных (входные токи и напряжения, конечное усиление K и др.) вносят погрешности в характеристику детектора. Наиболее важна скорость, с которой ОУ переключает диод между закрытым и открытым состояниями при изменении полярности входного напряжения. Соответствующий перепад напряжения на выходе ОУ равен ($U_{нас} + V_d$). Поэтому для уменьшения времени переключения нужно уменьшать напряжение насыщения (соответствующее напряжению питания) и использовать быстродействующие ОУ.

Задержка включения обратной связи ОУ (включения диода) приводит к тому, что на выходном сигнале появляется искажение в виде «ступеньки» (Рис.14). Высота ступеньки ΔU пропорциональна скорости нарастания входного напряжения $dU_{вх}/dt$ (частоте и амплитуде) и величине задержки ΔT .

В используемой модели ОУ его быстродействие определяется частотой единичного усиления f_l . Максимальное и минимальное выходные напряжения равны соответствующим напряжениям питания V_{hi} и V_{lo} .

Параметры ОУ: $f_1 = 10\text{МГц}$, $V_{hi} = 5\text{В}$, $V_{lo} = -1\text{В}$, K - устанавливаются в окне параметров. Амплитуда входного сигнала (100мВ) намного меньше напряжения открывания диода (1В).

4.1. Изучите зависимость точности детектирования от коэффициента усиления в цепи обратной связи (усиления ОУ K). Рекомендуемый диапазон усиления – $10 \dots 10^6$, частота сигнала 10кГц . Определите, как разность входного и выходного напряжения на максимуме сигнала зависит от усиления. Приведите характерные формы сигналов детектора.

4.2. Изучите зависимость величины начального искажения (ступеньки) выходного сигнала детектора от частоты сигнала. Рекомендуемый диапазон частот – $1 \dots 100\text{кГц}$, усиление - 10^6 . Оцените задержку срабатывания обратной связи в усилителе.