

4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ И СТАБИЛИТРОНОВ

Цель занятия

1. Изучить основные характеристики и параметры выпрямительных диодов и стабилитронов.
2. Выполнить инженерный расчет элементов простейших схем выпрямителя и параметрического стабилизатора напряжения.
3. Провести математическое моделирование разработанных схем с помощью пакета проектирования аналоговых и цифровых устройств OrCAD. Сравнить результаты моделирования на ЭВМ с исходными данными и результатами инженерного расчета.
4. С помощью пакета OrCAD исследовать влияние элементов схемы на основные характеристики устройств.

Краткие теоретические сведения

Выпрямительные диоды предназначены для преобразования переменного напряжения или тока низкой частоты (50...20000 Гц) в постоянное напряжение или ток. Принцип действия выпрямительных диодов основан на использовании резкой асимметрии вольт-амперной характеристики (ВАХ) p-n-перехода.

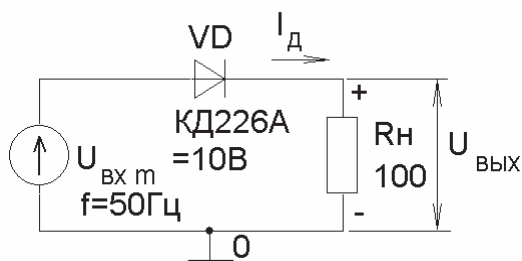


Рис. 4.1

Устройство простейшего **однополупериодного** выпрямителя показано на рис. 4.1, а форма входного и выходного напряжения и тока диода — на рис. 4.2. При действии положительной полуволны входного напряжения диод VD открыт, его сопротивление мало $R_{дпр} \ll R_H$, а амплитудные значения прямого тока диода и тока нагрузки определяются

только сопротивлением нагрузки и амплитудой входного напряжения:

$$I_{Hm} = I_{dm} \approx \frac{U_{BXm}}{R_H}. \quad (4.1)$$

Амплитудное значение выходного напряжения определяется амплитудой входного напряжения

$$U_{ВЫХm} = U_{BXm} - U_{дпр} \approx U_{BXm}, \quad (4.2)$$

поскольку падение напряжения на прямосмещенном диоде мало и его значение определяется прямым током диода. Для кремниевых диодов $U_{дпр} = 0,5...1,4 В$, а для германиевых $U_{дпр} = 0,2...0,5 В$.

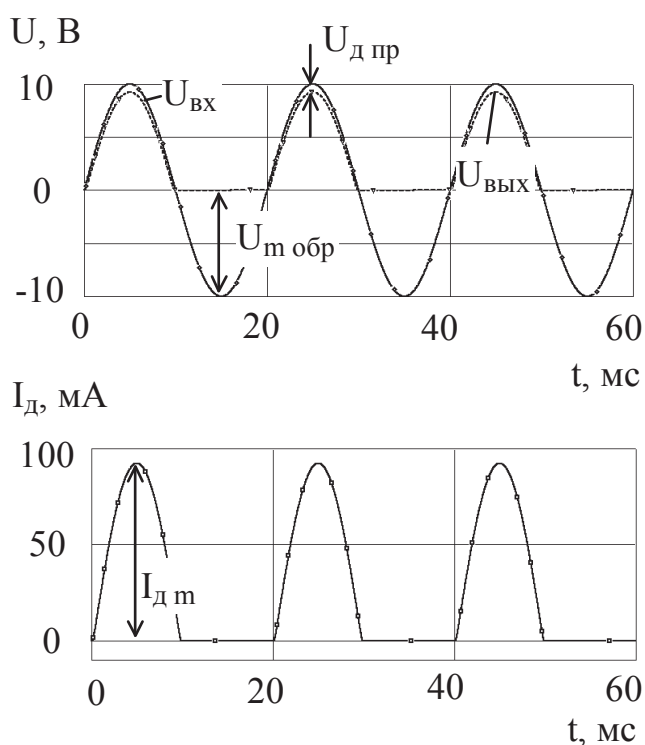


Рис. 4.2

тока диода. Амплитуда обратного напряжения, которое прикладывается к диоду при действии отрицательной полуволны, равна амплитуде входного напряжения:

$$U_{\text{м обр}} = U_{\text{ВХ м}} - I_{\text{обр}} R_{\text{Н}} \approx U_{\text{ВХ м}}. \quad (4.3)$$

Постоянное напряжение такой формы для многих применений оказывается непригодным. Рассмотренную схему дополняют конденсатором, включенным параллельно нагрузке (рис. 4.3), что позволяет при правильном выборе емкости конденсатора существенно уменьшить амплитуды пульсаций выходного

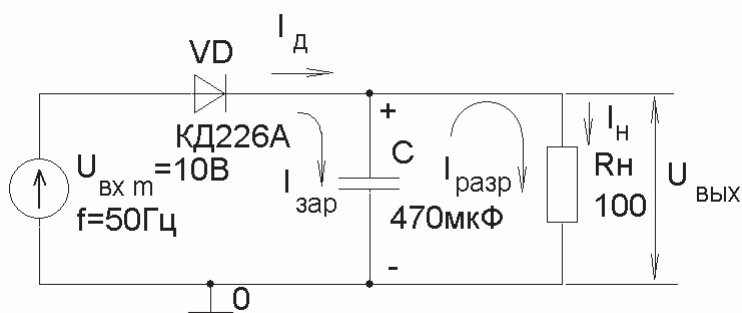


Рис. 4.3

напряжения и тока нагрузки (см. рис. 4.4), что обусловлено малой длительностью импульсов, поскольку заряд конденсатора происходит только в те промежутки

При действии отрицательной полуволны входного напряжения диод VD закрыт, его сопротивление велико $R_{\text{д обр}} \gg R_{\text{Н}}$, через нагрузку протекает обратный ток диода, величина которого практически не зависит от обратного напряжения $I_{\text{Н}} = I_{\text{обр}}$ и определяется материалом, из которого изготовлен диод, и площадью поперечного сечения р-п-перехода. Для кремниевых диодов $I_{\text{обр}}$ лежит в диапазоне от единиц наноампер до единиц микроампер, а для германиевых — от десятых долей до сотен микроампер.

Форма выходного напряжения и тока нагрузки (см. рис. 4.2) пульсирующая, с амплитудами пульсаций, равными амплитудным значениям выходного напряжения и

тока нагрузки (рис. 4.4).

При действии положительной полуволны входного напряжения конденсатор C заряжается прямым током диода, а при действии отрицательной разряжается через нагрузку. Амплитуда импульсов тока диода оказывается много больше максимальных значе-

времени, когда напряжение на нем оказывается меньше входного. При этом среднее значение тока диода равно току нагрузки:

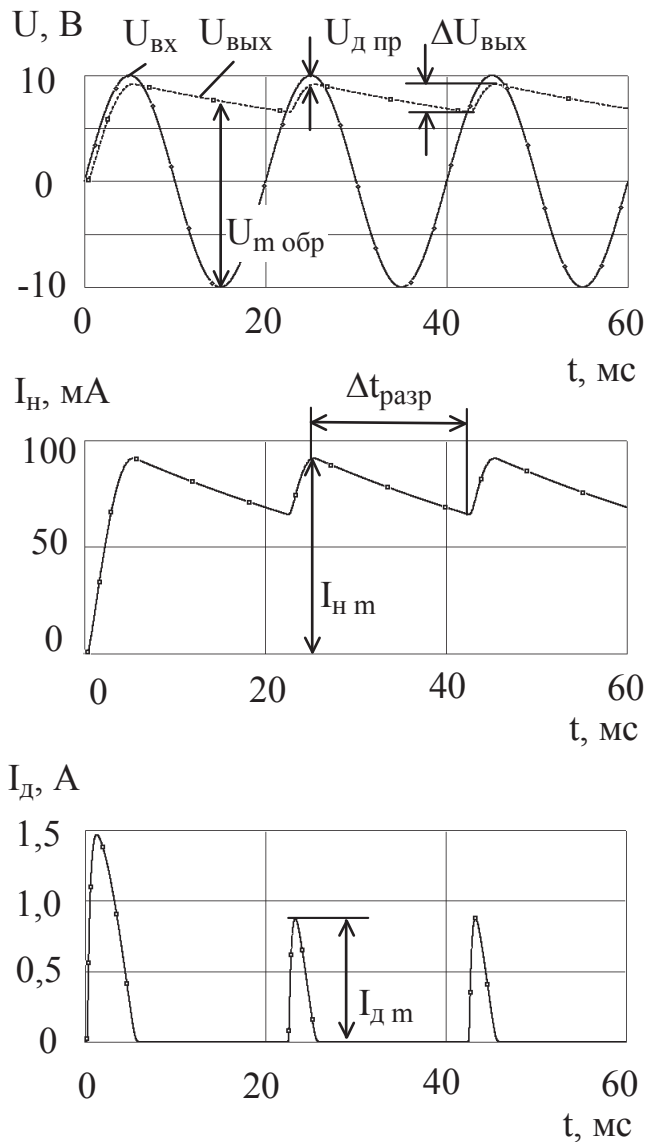


Рис. 4.4

В схеме однополупериодного выпрямителя с конденсатором амплитуда обратного напряжения, которое прикладывается к диоду при действии отрицательной полуволны, определяется удвоенной амплитудой входного напряжения, поскольку напряжение на катоде диода U_K с помощью конденсатора поддерживается постоянным и равным $\approx U_{ВХ м}$, а напряжение на аноде U_a периодически уменьшается до $-U_{ВХ м}$:

$$U_{м обр} = U_K - U_a = U_{ВХ м} + U_{ВХ м} \approx 2U_{ВХ м}. \quad (4.7)$$

$$I_{д ср} = \frac{1}{T} \int_0^T i_d(t) dt \approx I_{Н м}. \quad (4.4)$$

Пользуясь известным выражением

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}, \quad (4.5)$$

связывающим мгновенные значения тока конденсатора $i_c(t)$ с напряжением на нем $u_c(t)$, определим величину емкости C , которая позволяет обеспечить амплитуду пульсаций на нагрузке $\Delta U_{ВЫХ}$ при токе нагрузки $I_{Н м}$. После замены дифференциалов $du_c(t)$ и dt конечными приращениями $\Delta U_{ВЫХ}$ и $\Delta t_{разр}$, с учетом того, что разряд конденсатора происходит в течение промежутка времени, равного практически целому периоду входного напряжения $\Delta t_{разр} \approx T = 1/f$, получим выражение для емкости конденсатора:

$$C = \frac{I_{Н м}}{\Delta U_{ВЫХ} f}, \quad (4.6)$$

где f — частота входного напряжения.

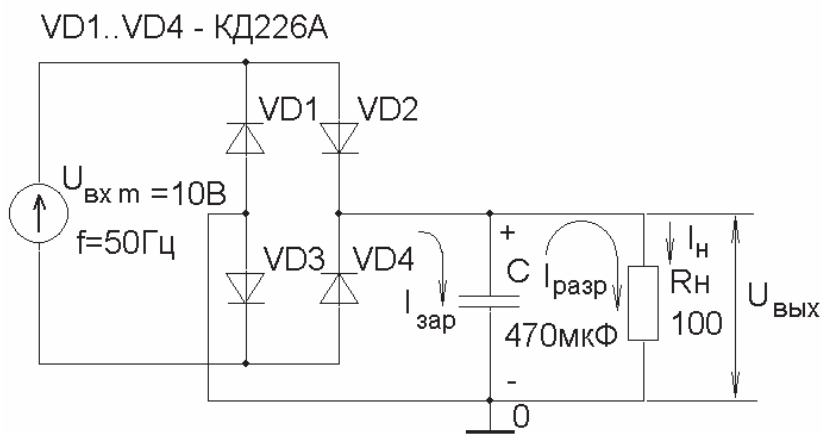


Рис. 4.5

напряжение подается в одну диагональ моста, а нагрузка подключена к другой. Поэтому при действии положительной полуволны входного напряжения откры-

ты диоды VD2, VD3, а при действии отрицательной полуволны — VD1, VD4.

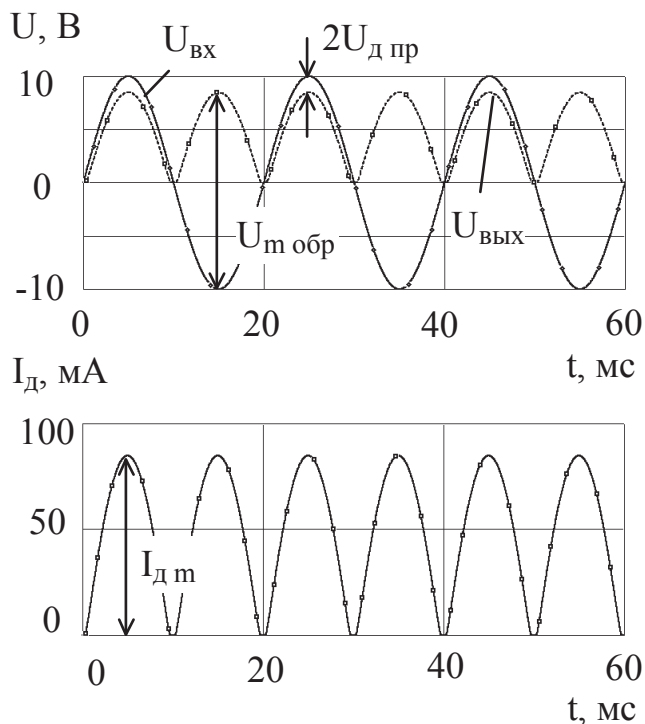


Рис. 4.6

мого уровня пульсаций выходного напряжения при заданном токе нагрузки необходим конденсатор с емкостью в два раза меньшей, чем в схеме однополупериодного выпрямителя.

В мостовой схеме выпрямителя с конденсатором амплитуда обратного напряжения, которое прикладывается к одному диоду при действии отрицательной полуволны, практически равна амплитуде входного напряжения:

Широко используется мостовая схема выпрямителя, показанная на рис. 4.5. Это двухполупериодный выпрямитель, поскольку в отличие от предыдущей схемы ток через нагрузку протекает в течение обоих полупериодов входного напряжения. Схема включает диодный мост, состоящий из четырех диодов. Переменное

Форма выходного напряжения и тока нагрузки при емкости конденсатора $C = 0$ показана на рис. 4.6. При емкости $C \neq 0$ амплитуда выходного напряжения и тока нагрузки уменьшается (рис. 4.7). Причем разряд конденсатора происходит в течение промежутка времени равного практически половине периода входного напряжения $\Delta t_{\text{разр}} \approx T / 2 = 1 / (2 \cdot f)$. Поэтому требуемая емкость конденсатора определяется согласно выражению

$$C = \frac{I_{H \text{ м}}}{2 \Delta U_{\text{вых}} f} \quad (4.8)$$

То есть в мостовой схеме выпрямителя для обеспечения требуе-

$$U_{m \text{ обр}} \approx U_{вх m} \cdot \quad (4.9)$$

Это объясняется тем, что обратное напряжение прикладывается не к одному диоду, как в однополупериодном выпрямителе, а к двум последовательно включенным.

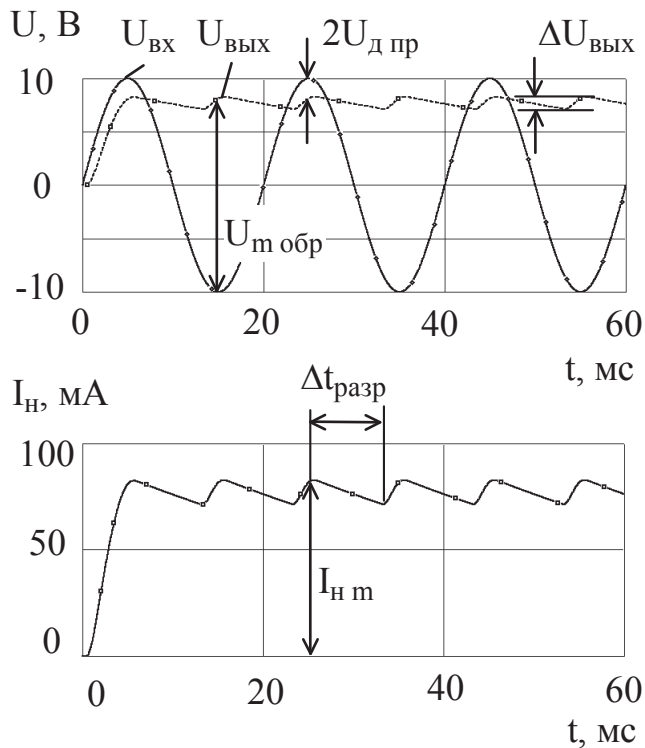


Рис. 4.7

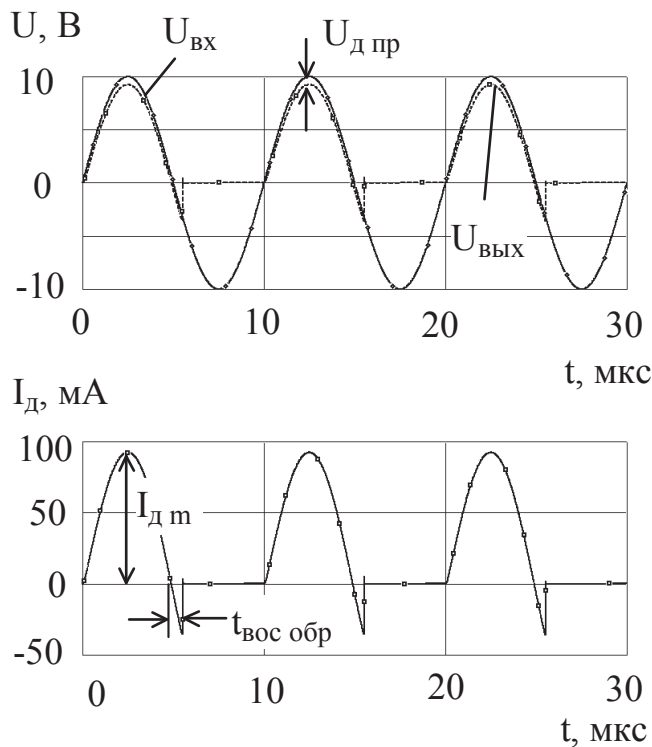


Рис. 4.8

Использовать выпрямительные диоды на высоких частотах не представляется возможным. Это обусловлено соизмеримостью длительности переходных процессов при переключении диода с прямого включения на обратное с периодом входного напряжения. Переходные процессы обусловлены наличием диффузионной и барьерной емкостей р-п-перехода. В момент переключения диода наблюдается бросок обратного тока, т.е. диод обладает низким обратным сопротивлением, которое устанавливается до своего нормального (достаточно высокого) значения в течение конечного промежутка времени.

На рис. 4.8 показана форма выходного напряжения и тока нагрузки однополупериодного выпрямителя (см. рис. 4.1) на диоде КД226А при частоте входного напряжения $f = 100 \text{ кГц}$. Напряжение и ток такой формы (см. рис. 4.8) нельзя назвать постоянными, поскольку в течение значительной части периода через нагрузку протекает ток в другом направлении.

Таким образом, основными параметрами выпрямительных диодов, по которым их подбирают для работы в схемах выпрямителей, являются:

максимально допустимый прямой ток $I_{пр макс}$;

максимально допустимый импульсный прямой ток $I_{пр и макс}$;

максимально допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр макс}}$;

время обратного восстановления диода $t_{\text{вос обр}}$ — время переключения диода с заданного прямого тока на заданное обратное напряжение от момента прохождения тока через нулевое значение до момента достижения обратным током заданного значения.

Полупроводниковый стабилитрон — полупроводниковый диод, напряжение на котором сохраняется с определенной точностью при протекании через него тока в заданном диапазоне, предназначенный для стабилизации постоянного напряжения. Принцип действия стабилитрона основан на использовании участка электрического пробоя на обратной ветви ВАХ р-п-перехода. График ВАХ стабилитрона представлен на рис. 4.9. Если обратный ток стабилитрона лежит в диапазоне $I_{\text{ст мин}} \dots I_{\text{ст макс}}$, то обратное напряжение практически не изменяется (см. рис. 4.9). При токе стабилитрона $I_{\text{ст}} < I_{\text{ст мин}}$ напряжение на нем сильно зависит от величины тока, а при $I_{\text{ст}} > I_{\text{ст макс}}$ электрический пробой переходит в

тепловой.

Пробой р-п-перехода — явление резкого увеличения дифференциальной проводимости р-п-перехода при достижении обратным напряжением (током) критического для данного прибора значения. Необратимые изменения в переходе не являются необходимым следствием пробоя.

Электрический пробой р-п-перехода — пробой р-п-перехода, обусловленный лавинным размножением носителей заряда или туннельным эффектом.

Лавинный пробой р-п-перехода — электрический пробой р-п-перехода, вызванный лавинным размножением носителей заряда под действием сильного электрического поля.

трического поля.

Туннельный пробой р-п-перехода — электрический пробой р-п-перехода, вызванный туннельным эффектом.

Тепловой пробой р-п-перехода — пробой р-п-перехода, вызванный ростом числа носителей заряда в результате нарушения равновесия между выделяемым в р-п-переходе и отводимым от него теплом.

Устройство, предназначенное для стабилизации постоянного напряжения, в котором используется стабилитрон, называется **параметрическим стабилизатором напряжения**, поскольку его характеристики полностью определяются параметрами стабилитрона. Схема такого стабилизатора напряжения представлена на рис. 4.10. Нагрузка подключена параллельно стабилитрону, при этом

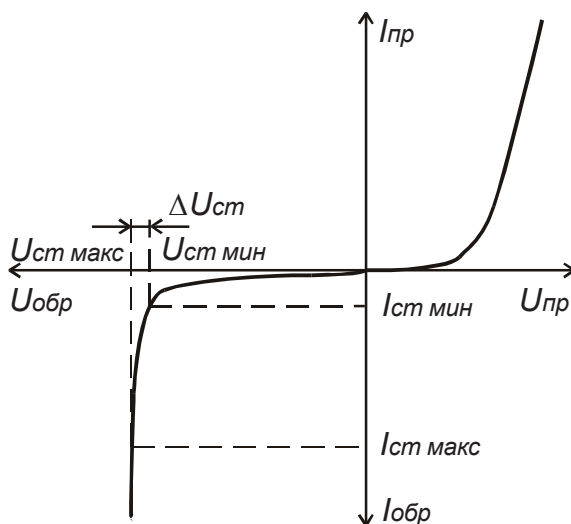


Рис. 4.9

напряжение на ней остается постоянным с определенной степенью точности. При этом ток стабилитрона, который задается гасящим или балластным резистором R_{Γ} , должен лежать в диапазоне

$$I_{\text{СТ МИН}} \dots I_{\text{СТ МАКС}}.$$

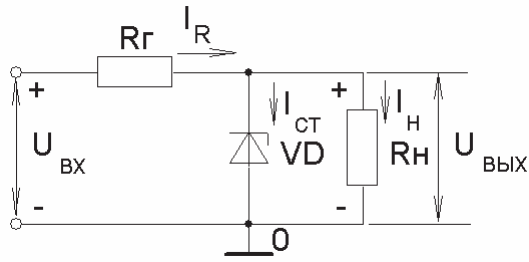


Рис. 4.10

Требуемую величину сопротивления резистора R_{Γ} легко найти, составив для данной схемы уравнения по законам Кирхгофа:

$$I_R = I_{\text{СТ}} + I_H, \quad (4.10)$$

$$U_{\text{ВХ}} = I_R R_{\Gamma} + U_{\text{ВЫХ}}. \quad (4.11)$$

После подстановки (4.10) в (4.11) получим

$$R_{\Gamma} = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{СТ}} + I_H}. \quad (4.12)$$

Обычно разработчики задаются током стабилитрона из следующего условия:

$$I_{\text{СТ МИН}} \leq I_{\text{СТ}} \leq I_{\text{СТ МАКС}} - I_H, \quad (4.13)$$

которое должно выполняться, чтобы стабилитрон не выходил из строя при отключении нагрузки. В этом случае ток стабилитрона возрастает на величину тока нагрузки I_H .

Важным параметром стабилизатора напряжения является **коэффициент стабилизации**, равный отношению изменения входного напряжения к изменению выходного напряжения:

$$K_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}, \quad (4.14)$$

который позволяет оценить стабилизирующие свойства устройства. В реальных схемах его величина достигает нескольких десятков $K_{\text{СТ}} = 30 \dots 60$.

Выражение для коэффициента стабилизации легко получить, воспользовавшись эквивалентной схемой параметрического стабилизатора напряжения по переменному току, показанной на рис. 4.11. Данная схема отличается от реальной тем, что стабилитрон в ней представлен его эквивалентом по переменному току — дифференциальным сопротивлением $r_{\text{СТ}}$, а к входу схемы подключен источник переменного напряжения с амплитудой $\Delta U_{\text{ВХ}}$. Для схемы (см. рис. 4.11) можно записать:

$$K_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}} = \frac{\frac{R_H r_{\text{СТ}}}{R_H + r_{\text{СТ}}} + R_{\Gamma}}{\frac{R_H r_{\text{СТ}}}{R_H + r_{\text{СТ}}}}. \quad (4.15)$$

Поскольку обычно $r_{\text{СТ}} \ll R_H$ и $r_{\text{СТ}} \ll R_{\Gamma}$, то

$$K_{\text{СТ}} \approx \frac{R_{\Gamma}}{r_{\text{СТ}}}. \quad (4.16)$$

Таким образом, для улучшения стабилизирующих свойств стабилизатора напряжения необходимо: увеличивать сопротивление гасящего резистора и использовать стабилитрон с меньшим значением дифференциального сопротивления. Однако увеличение R_{Γ} должно сопровождаться увеличением уровня постоянного входного напряжения, что приведет к уменьшению коэффициента полезного действия схемы.

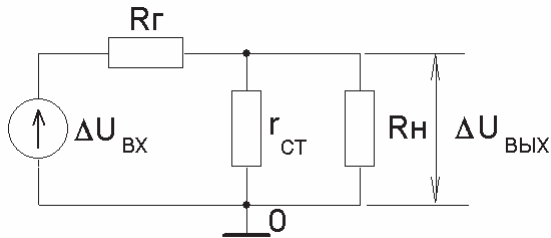


Рис. 4.11

Основными параметрами стабилитрона являются:

напряжение стабилизации $U_{\text{СТ}}$ — падение напряжения на стабилитроне при протекании заданного тока стабилизации;

минимальный $I_{\text{СТ мин}}$ и максимальный $I_{\text{СТ макс}}$ токи стабилитрона;

температурный коэффициент напряжения стабилизации, численно равный отношению относительного изменения напряжения стабилизации стабилитрона, выраженного в процентах, к абсолютному изменению температуры окружающей среды при постоянном значении тока стабилизации

$$\alpha_{U_{\text{СТ}}} = \frac{\Delta U_{\text{СТ}}}{U_{\text{СТ}} \Delta T} 100 \%, (\% / ^\circ \text{C}); \quad (4.17)$$

дифференциальное сопротивление стабилитрона, определяемое на участке пробоя,

$$r_{\text{СТ}} = \frac{\Delta U_{\text{СТ}}}{\Delta I_{\text{СТ}}} = \frac{U_{\text{СТ макс}} - U_{\text{СТ мин}}}{I_{\text{СТ макс}} - I_{\text{СТ мин}}}. \quad (4.18)$$

Порядок выполнения задания

1. Выполнить инженерный расчет стабилизированного источника напряжения, схема которого представлена на рис. 4.12. Исходные данные для расчета приведены в табл. 4.1. Расчеты проводить в рабочей тетради. После получения численных значений параметров элементов (сопротивлений и емкостей) необходимо выбрать их номинальные значения согласно рядам ГОСТа (прил. 1). Значения резисторов выбирать из ряда, соответствующего допустимому отклонению $\pm 5 \%$, конденсаторов — $\pm 20 \%$. При проведении всех последующих расчетов оперировать только номинальными значениями.

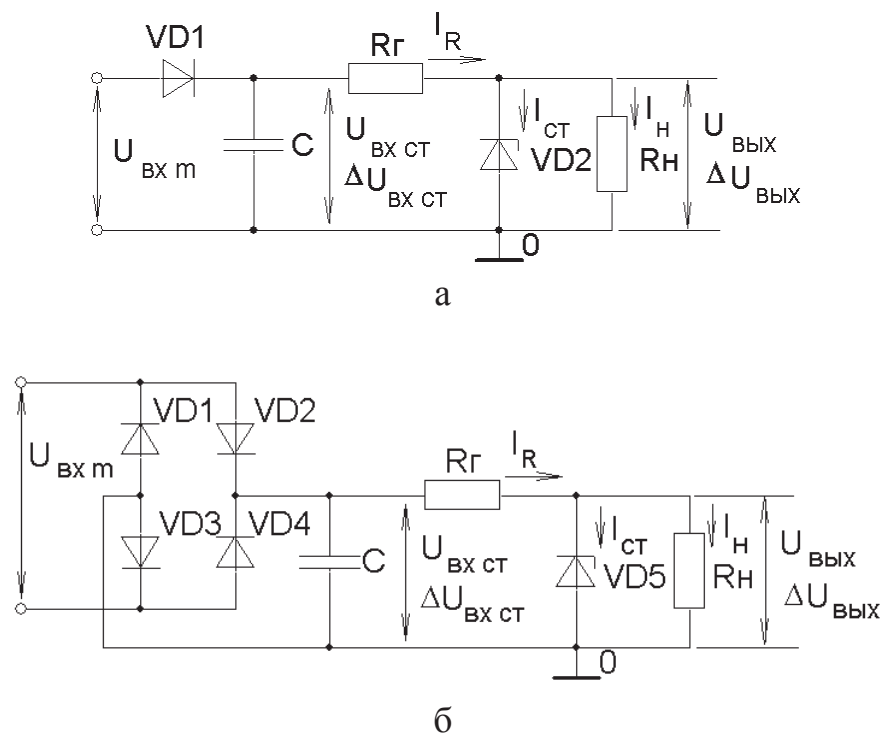


Рис. 4.12

Таблица 4.1

Исходные данные для расчета

| № варианта | Выходное напряжение $U_{\text{вых}}$, В | Ток нагрузки $I_{\text{н}}$, мА | Амплитуда пульсаций выходного напряжения $\Delta U_{\text{вых}}$, мВ |
|---------------|--|--|---|
| 1 | 3,3 | 40 | 10 |
| 2 | 3,3 | 160 | 50 |
| 3 | 3,9 | 150 | 50 |
| 4 | 4,7 | 30 | 10 |
| 5 | 5,6 | 100 | 30 |
| 6 | 6,8 | 20 | 10 |
| 7 | 6,8 | 100 | 30 |
| 8 | 10 | 40 | 10 |
| 9 | 22 | 20 | 10 |
| 10 | 30 | 15 | 5 |

Примечание. Для нечетных номеров вариантов необходимо рассчитать стабилизированный источник напряжения с однополупериодной схемой выпрямителя (рис. 4.12,а), для четных — с мостовой схемой (рис. 4.12,б).

1.1. Выбрать необходимый стабилитрон из следующих условий $U_{\text{ст}} = U_{\text{вых}}$ и $I_{\text{ст макс}} > I_{\text{н}}$. Типы и параметры стабилитронов приведены в табл. 4.2. Переписать параметры стабилитрона в рабочую тетрадь.

1.2. Задаться коэффициентом стабилизации из диапазона значений $K_{\text{ст}} = 30 \dots 60$. Если $I_{\text{H}} \geq 80 \text{ мА}$, выбрать $K_{\text{ст}} = 30$; если $I_{\text{H}} < 80 \text{ мА}$, то $K_{\text{ст}} = 60$.

1.3. Воспользовавшись выражением (4.14), по заданному $\Delta U_{\text{вых}}$ и выбранному $K_{\text{ст}}$ рассчитать амплитуду пульсаций на входе стабилизатора $\Delta U_{\text{вх ст}}$.

1.4. Согласно (4.16) рассчитать сопротивление гасящего резистора $R_{\text{Г}}$, обеспечивающего требуемый коэффициент стабилизации $K_{\text{ст}}$.

1.5. Выбрать рабочий ток стабилитрона $I_{\text{ст}}$ из условия (4.13).

1.6. Пользуясь (4.10), вычислить ток гасящего резистора I_{R} .

1.7. Рассчитать сопротивление нагрузки R_{H} :

$$R_{\text{H}} = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{H}}}.$$

1.8. Определить необходимое постоянное напряжение на входе стабилизатора $U_{\text{вх ст}}$ (4.10).

1.9. Пользуясь (4.17), рассчитать температурный уход выходного напряжения стабилизатора $\Delta U_{\text{вых Т}} = \Delta U_{\text{ст}}$ при изменении температуры на $\Delta T = +50^\circ \text{C}$.

1.10. Результаты расчета стабилизатора напряжения свести в табл. 4.3.

Таблица 4.2

Параметры стабилитронов

| Тип стабилитрона | $U_{\text{ст}}$, В | $I_{\text{ст мин}}$, мА | $I_{\text{ст макс}}$, мА | $r_{\text{ст}}$, Ом | $\alpha U_{\text{ст}}$, %/ $^\circ\text{C}$ |
|------------------|---------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------|--|
| КС133А | 3,3 | 3 | 81 | 20 | -0,11 |
| КС433А | 3,3 | 3 | 229 | 10 | -0,1 |
| КС439А | 3,9 | 3 | 212 | 10 | -0,1 |
| КС147А | 4,7 | 3 | 58 | 25 | -0,09 |
| КС456А | 5,6 | 3 | 167 | 10 | +0,05 |
| КС168А | 6,8 | 3 | 45 | 20 | +0,06 |
| КС468А | 6,8 | 3 | 142 | 5 | +0,065 |
| КС510А | 10 | 1 | 79 | 20 | +0,08 |
| КС522А | 22 | 1 | 37 | 20 | +0,1 |
| КС530А | 30 | 1 | 27 | 25 | +0,1 |

Таблица 4.3

Параметры стабилизатора напряжения

| Тип стабилизатора | $U_{\text{вх ст}}$, В | $\Delta U_{\text{вх ст}}$, мВ | $U_{\text{вых}}$, В | $\Delta U_{\text{вых Т}}$, мВ | $\Delta U_{\text{вых}}$, мВ | $I_{\text{ст}}$, мА | I_{R} , мА | $K_{\text{ст}}$ | R_{H} , Ом | $R_{\text{Г}}$, Ом |
|-------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------|----------------------|---------------------|-----------------|---------------------|---------------------|
| | | | | | | | | | | |

1.11. Следующие параметры стабилизатора напряжения являются исходными для расчета выпрямителя:

$$U_{\text{вых выпр}} = U_{\text{вх ст}};$$

$$\Delta U_{\text{вых выпр}} = \Delta U_{\text{вх ст}};$$

$$I_{\text{н выпр м}} = I_{\text{R}}.$$

1.12. Определить необходимую амплитуду входного напряжения выпрямителя:

$$U_{\text{вх м}} = U_{\text{вх ст}} + \Delta U_{\text{вх ст}} + U_{\text{пр}},$$

где $U_{\text{пр}}$ — падение напряжения на прямосмещенном диоде выпрямителя. При расчетах можно принять $U_{\text{пр}} \approx 1\text{В}$. В случае мостовой схемы выпрямителя необходимо учесть, что последовательно с нагрузкой и источником сигнала включено два выпрямительных диода. Округлить полученное значение $U_{\text{вх м}}$ в большую сторону до ближайшего целого значения, выраженного в вольтах.

1.13. Рассчитать емкость конденсатора на выходе выпрямителя C , используя (4.6) для однополупериодной схемы и (4.8) для мостовой схемы. Частоту входного напряжения принять $f = 50\text{Гц}$.

1.14. Определить амплитуду обратного напряжения на диоде выпрямителя по (4.7) для однополупериодной схемы выпрямителя и по (4.9) для мостовой схемы.

1.15. Пользуясь данными табл. 4.4, выбрать необходимый выпрямительный диод с учетом соотношений $I_{\text{н выпр м}} < I_{\text{пр макс}}$, $U_{\text{м обр}} < U_{\text{обр макс}}$. Переписать параметры диода в рабочую тетрадь.

Таблица 4.4

Параметры выпрямительных диодов

| Тип диода | $I_{\text{пр макс}},$ А | $I_{\text{пр и макс}},$ А | $U_{\text{обр макс}},$ В | $t_{\text{обр вос}},$ мкс |
|-----------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| КД226А | 1,7 | 10 | 100 | 0,25 |
| КД226Б | 1,7 | 10 | 200 | 0,25 |
| КД226В | 1,7 | 10 | 400 | 0,25 |
| КД226Г | 1,7 | 10 | 600 | 0,25 |
| КД226Д | 1,7 | 10 | 800 | 0,25 |

1.16. Результаты расчета выпрямителя свести в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Параметры выпрямителя

| Тип диода | $C,$ мкФ | $U_{\text{м обр}},$ В | $U_{\text{вх м}},$ В |
|-----------|----------|-----------------------|----------------------|
| | | | |

2. Пользуясь программой OrCAD, выполнить моделирование разработанного устройства и сравнить результаты моделирования с результатами инженерных расчетов. В рабочей тетради записать результаты моделирования и дать ответы на вопросы.

2.1. Собрать схему рассчитанного стабилизатора напряжения (см. рис. 4.10), провести анализ по постоянному току для различных значений напряжения входного источника (**DC Sweep**) и определить, в каком диапазоне входных напряжений $U_{\text{вх мин}} \dots U_{\text{вх макс}}$ схема будет работоспособна. В качестве входного источника использовать источник постоянного напряжения (**VDC**) и установить диапазон изменения его напряжения от 0 до $3U_{\text{вх ст}}$. Вывести график зависимости $I_{\text{ст}} = f(U_{\text{вх}})$, работоспособность схемы определить по выполнению условия $I_{\text{ст мин}} < I_{\text{ст}} < I_{\text{ст макс}}$.

Как изменится диапазон рабочих входных напряжений стабилизатора $U_{\text{вх мин}} \dots U_{\text{вх макс}}$ при увеличении, уменьшении $R_{\text{г}}$ в два раза?

2.2. Собрать схему рассчитанного источника стабилизированного напряжения, изображенную на рис. 4.12,а или рис. 4.12,б, в зависимости от схемы выпрямителя и провести анализ во временной области (**Transient**). В качестве входного источника использовать источник синусоидального напряжения (**Vsin**) и установить его параметры, как показано в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Установка параметров источника синусоидального напряжения

| Обозначение | Параметр | Размерность | Значение |
|-------------|---|-------------|-------------------|
| DC | Напряжение при выполнении анализа по постоянному току (DC) | В | 0 |
| AC | Напряжение при выполнении расчета частотных характеристик (AC Sweep) | В | 0 |
| VOFF | Постоянная составляющая | В | 0 |
| VAMPL | Амплитуда | В | $U_{\text{вх м}}$ |
| FREQ | Частота | Гц | 50 |
| TD | Задержка | с | 0 |
| DF | Коэффициент затухания | с | 0 |
| PHASE | Фаза | градусы | 0 |

Расчеты проводить для диапазона времени от 0 до 1000 мс (соответствует 50 периодам входного напряжения), а вывод результатов на экран осуществлять в диапазоне от 900 до 1000 мс (соответствует 46...50 периодам). Это обусловлено необходимостью окончания переходных процессов, связанных с наличием конденсатора на выходе выпрямителя. Расчеты и построение графиков проводить с шагом дискретизации по времени 0,01 мс. Для этого в окне задания параметров моделирования (**Analysis\Setup\Transient**) установить следующие параметры анализа:

Print step — 0.01ms,
Final Time — 1000ms,
No printed delay — 900ms,
Step ceiling — 0.01ms.

Пользуясь возможностями программы для просмотра графических зависимостей результатов моделирования (**Probe**), определить следующие параметры устройства:

уровень постоянного напряжения на выходе $U_{\text{вых мод}}$;
амплитуда пульсаций на выходе $\Delta U_{\text{вых мод}}$;
уровень постоянного напряжения на входе стабилизатора $U_{\text{вх ст мод}}$;
амплитуда пульсаций на входе стабилизатора $\Delta U_{\text{вх ст мод}}$;
амплитуда обратного напряжения на диоде выпрямителя $U_{\text{м обр мод}}$;
амплитуда импульсов прямого тока диода выпрямителя $I_{\text{пр и}}$.

Для определения постоянных уровней необходимо задать выполнение преобразования Фурье для требуемых напряжений. Результаты преобразования Фурье можно просмотреть в выходном файле.

Выполнить анализ во временной области для двух значений температур 27°C и 77°C. Для этого в окне (**Analysis\Setup\Temperature**) задать через пробел значения температуры 27 и 77. Определить изменение выходного напряжения, обусловленное изменением температуры $\Delta U_{\text{вых Т мод}}$.

Сравнить результаты моделирования с результатами инженерных расчетов, сделать выводы. Если не удалось достичь заданных требований, необходимо объяснить, по какой причине. Проанализировать, параметры каких элементов необходимо изменить для достижения поставленной задачи.

2.3. Установить частоту источника входного напряжения $f=100$ кГц. В окне задания параметров моделирования (**Analysis\Setup\Transient**) изменить параметры анализа:

Print step — 0.1us,
Final Time — 2500us,
No printed delay — 2000us,
Step ceiling — 0.1us.

Уменьшить емкость конденсатора в 2000 раз.

Определить уровни постоянного выходного напряжения и напряжения на входе стабилизатора.

Сравнить данные результаты с результатами, полученными при частоте входного напряжения $f=50$ Гц, объяснить причины различия.

Контрольные вопросы

1. Какое свойство р-n-перехода используется для выпрямления переменного тока?
2. Поясните принцип действия однополупериодного выпрямителя.
3. Почему отличается амплитудное значение обратного напряжения, которое прикладывается к диоду в однополупериодной схеме выпрямителя и мостовой схеме?
4. Как изменится амплитуда пульсаций выходного напряжения выпрямителя с конденсатором фильтра, если уменьшить сопротивление нагрузки?
5. Почему диод типа КД226 нельзя использовать для выпрямления напряжения с частотой 100 кГц?
6. Назовите основные параметры выпрямительных диодов.
7. Для чего используется конденсатор в схемах выпрямителей?
8. Какое свойство р-n-перехода используется для стабилизации напряжения с помощью стабилитрона?
9. Как можно увеличить коэффициент стабилизации параметрического стабилизатора напряжения? Как это отразится на других параметрах стабилизатора?
10. Как изменится ток стабилитрона, если увеличить (уменьшить) сопротивление резистора R_r (см. рис. 4.10)?
11. Что произойдет, если ток стабилитрона превысит его максимальное значение $I_{ст\ max}$?