

Программа изучения электроники и схемотехники
Весенний семестр 2015/2016 учебного года

1. *Лекционные и практические занятия* (четверг, с 9-00 в АЗ)

На сайте:

Новое учебное пособие «Электроника и схемотехника. Часть 1» и комплект 60 схем.

«Электроника». Практические занятия. Слайды и схемы.

2. *Лабораторные работы* (4 работы) в Г-111Б по расписанию

3. *Домашние расчеты* (3 расчета)

Расчет нелинейной цепи с диодами и стабилитронами;

Расчет транзисторной схемы;

Расчет схемы с операционными усилителями.

Указание:

1. Номер варианта по списку группы;

2. В каждом задании указан тип компонента из библиотеки TINA;
3. На сайте есть 3 видеоурока по выполнению расчетов в TINA.

В конце семестра зачет и экзамен по всему курсу.

Введение

Этапы возникновения и развития электроники и схемотехники

Электроника – это наука о взаимодействии заряженных частиц (электронов, ионов) с электромагнитными полями и о методах создания электронных приборов и устройств (вакуумных, газоразрядных, полупроводниковых), используемых в основном для передачи, обработки и хранения информации.

Четыре этапа развития электроники.

Первый этап относится к концу 19 века и связан с открытием электрона и развитием электровакуумной техники и электронных вакуумных ламп.

В 1873 году Александр Николаевич Лодыгин изобрел электрическую лампу накаливания с угольным стержнем.

1883 г. американский инженер Томас Эдисон открыл и описал явление термоэлектронной эмиссии и прохождения электрического тока через вакуум.

В 1888 г. русский физик Александр Григорьевич Столетов открыл основные законы фотоэффекта.

Важнейшую роль в развитии электроники сыграло открытие русским ученым в 1895 г. Александр Степанович Поповым передачи радиоволн.

Второй этап истории развития электроники охватывает первую половину 20-го века:

Разработка и совершенствование электровакуумных приборов (ЭВП).

В 1904 г. была сделана простейшая *двухэлектродная электронная лампа — диод* для детектирования электрических колебаний в радиотехнике.

В 1907 г. изготовлена *трехэлектродная лампа — триод* для усиления электрических сигналов. В России первые образцы ламп были изготовлены в 1914—1915 гг. под руководством Николай Дмитриевич Папалекси и Михаил Александрович Бонч-Бруевича. Первые электронные лампы сразу нашли применение в области радиосвязи. В

1918 г. начинает работать Нижегородская радиолaborатория под руководством М. А. Бонч-Бруевича

Третий этап относится к концу 40-х и началу 50-х годов:

бурное развитие дискретных полупроводниковых приборов.

В 1947 году инженерами фирмы Bell Laboratories Джоном Бардиным, Вальтером Бреттейном и Виллиамом Шокли изобрели полупроводниковый трехэлектродный усилителя — биполярный транзистор. За это открытие все они получили в 1956 году Нобелевскую премию по физике.

Четвертый этап с начала в 60-х годов прошлого века.

Разработка и практическое освоением *интегральных микросхем*, освоение выпуска больших (БИС) и сверхбольших (СБИС) интегральных схем позволило перейти к созданию функционально законченных цифровых устройств — микропроцессоров, устройств памяти, обеспечивающих обработку информации и управление по заданной программе.

В настоящее время электроника включает в себя 3 области исследований:

1. Вакуумная электроника:

электронные лампы (диоды, триоды, тетроды, пентоды и т. д.);
ЭВП СВЧ (магнетроны, клистроны и т. п.);
фотоэлектронные приборы (фотоэлементы, фотоэлектронные умножители), рентгеновские трубки;
газоразрядные приборы (мощные преобразователи тока, источники света, индикаторы).

2. Твёрдотельная электроника;

полупроводниковые приборы;
магнитоэлектроника;
акустоэлектроника и пьезоэлектроника.

3. Квантовая электроника.

приборы квантовой электроники (лазерные генераторы, дальнометры, квантовые стандарты частоты, квантовые гироскопы, системы оптической многоканальной связи, усилители микроволн мазеры для дальней космической связи и радиоастрономии);

оптоэлектроника использует оптические и электрические методы обработки, хранения и передачи информации, голографию, светоизлучающие диоды, фотоприемники, волоконную оптику, интегральную оптику.

Схемотехника — научно-техническое направление, охватывающее проблемы анализа и синтеза электронных устройств радиотехники, связи, автоматики, вычислительной техники в целях обеспечения оптимального выполнения ими заданных функций и расчета параметров входящих в них элементов.

Разработку современных радиоэлектронных устройств и систем управления инженеры выполняют, используя компьютерные про-

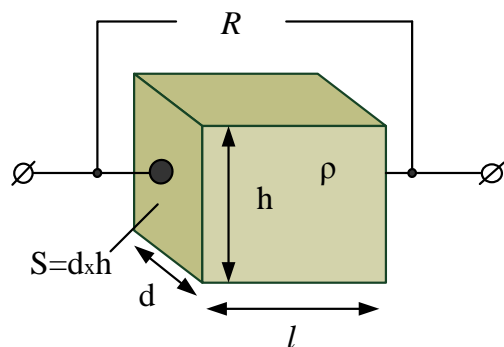
граммы сквозного проектирования электронных устройств (OrCAD, Proteus, TINA и др.).

Полупроводниковые материалы

Проводниками называют материалы, которые пропускают электрический ток, когда к зажимам цепи приложено небольшое напряжение.

Удельное электрическое сопротивление проводников можно определить экспериментально (рис.1.1) и вычисляют по формуле:

$$\rho = \frac{RS}{l} = \frac{\text{Ом} [\text{см}^2]}{\text{см}} = \text{Ом} \cdot \text{см}$$



Удельное электрическое сопротивление проводников лежит в пределах $10^{-6} \div 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

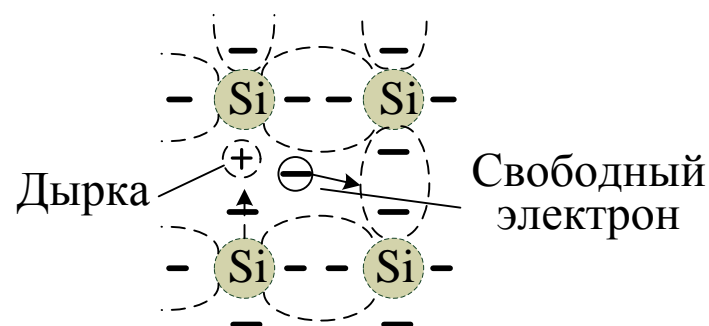
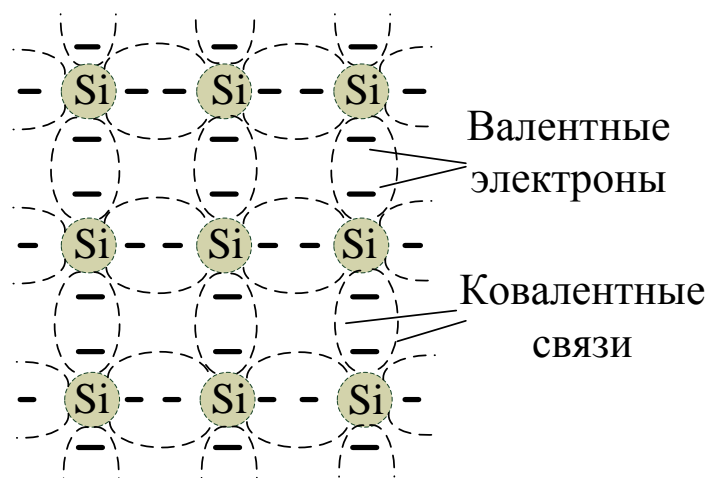
Удельное сопротивление меди:

$$\rho = 0,017 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Хорошими изоляторами являются диэлектрики с удельным сопротивлением больше $10^{12} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

К полупроводникам относят материалы, которые имеют при комнатной температуре удельное сопротивление ρ в пределах от $10^{-3} \div 10^{-2} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до $10^8 \div 10^{10} \text{ Ом} \cdot \text{см}$.

Удельное сопротивление сильно зависит от температуры и с ростом температуры не увеличивается, а уменьшается. При добавлении примеси в собственный полупроводник его сопротивление сильно изменяется.

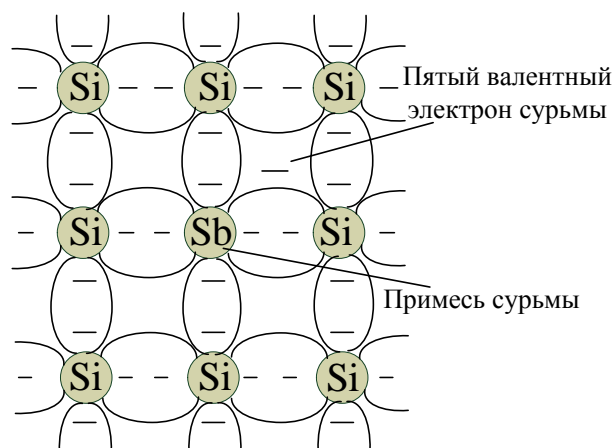


У кремния 14 орбитальных электронов. На внешней оболочке находятся 4 валентных электрона. У германия 32 орбитальных электрона, 4 валентных.

Нарушение валентных связей приводит к одновременному образованию пар свободных электронов и пустых мест — дырок вблизи тех атомов, от которых оторвались электроны.

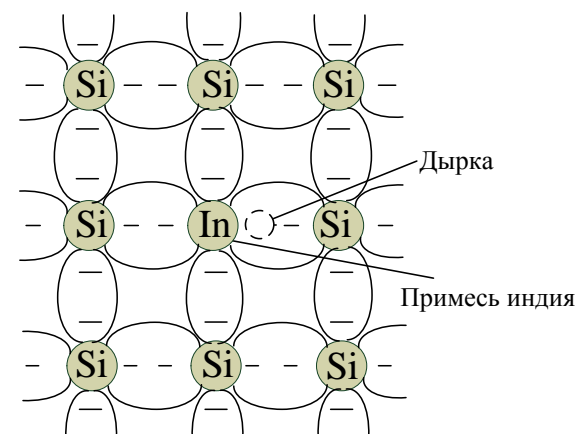
Примесные материалы n- и p- типов

n-тип . Основные носители электроны.



Пятивалентные примеси:
сурьма Sb, мышьяк As,
фосфор P

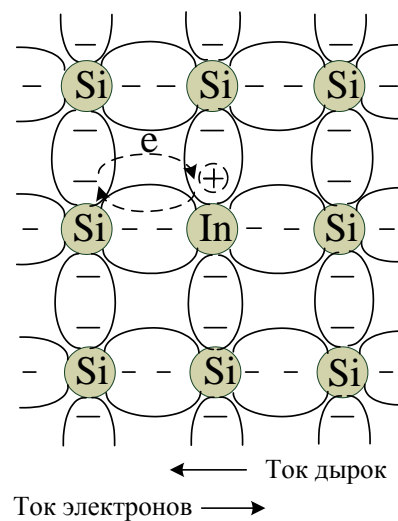
p-тип . Основные носители дырки.



Трехвалентные примеси:
индий In, галлий Ga,
бор B

Электронный и дырочный ток

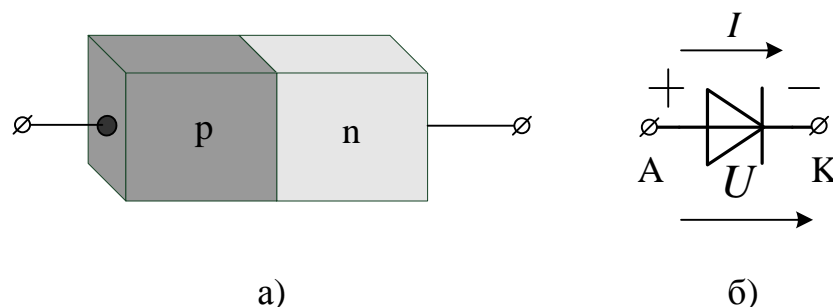
Электроны и дырки движутся в противоположных направлениях



ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ДИОДЫ, СТАБИЛИТРОНЫ И ТИРИСТОРЫ

Полупроводниковым диодом называют прибор, который имеет два вывода и содержит один (или несколько) электронно-дырочных переходов.

Электронно-дырочный переход это тонкий слой между двумя частями полупроводникового кристалла, в котором одна часть имеет электронную проводимость (N-область), а другая часть имеет дырочную проводимость (P-область).

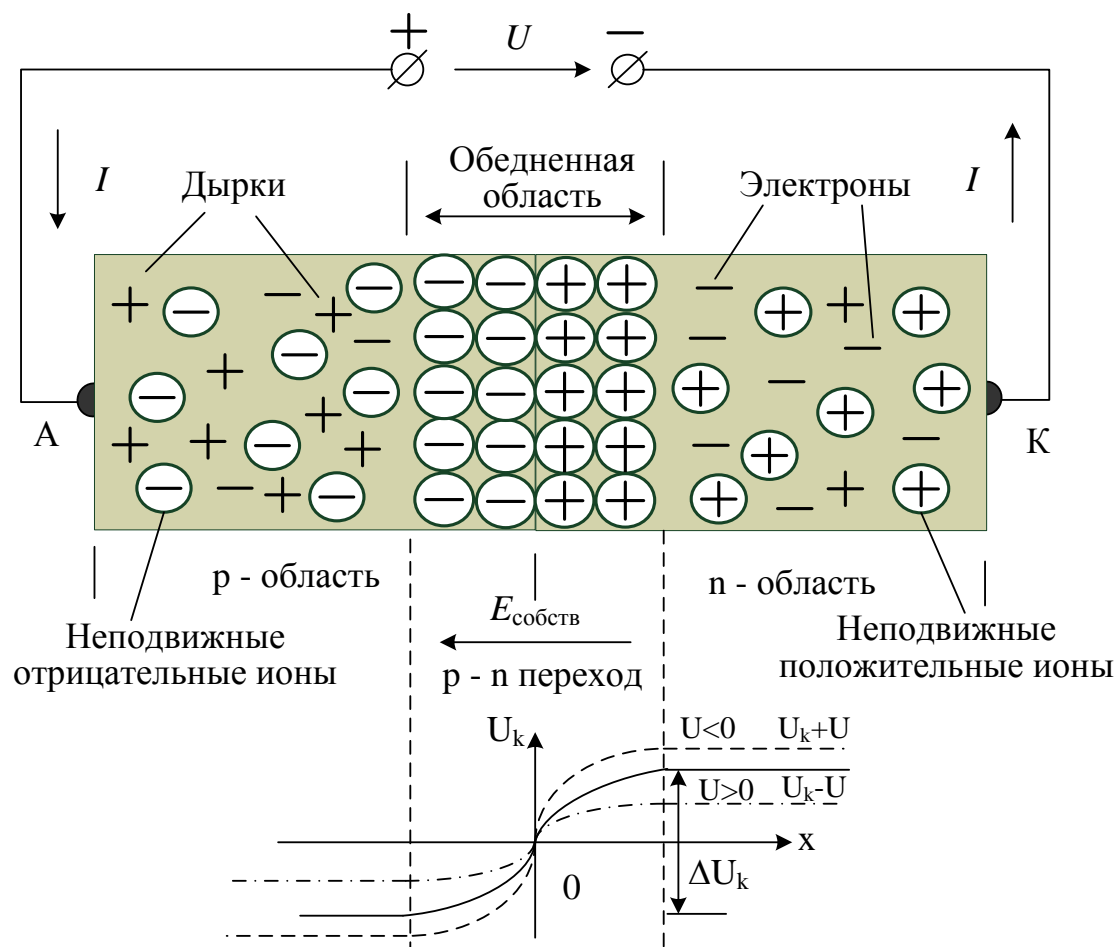


Электронно-дырочный переход называют p-n –переходом.

Электронную проводимость имеет, например, четырехвалентный кристалл кремния с донорной примесью пятивалентного фосфора или мышьяка.

Дырочную проводимость имеет кристалл кремния с акцепторной примесью трехвалентного индия.

Дырка является фиктивным носителем заряда, образуется в кристалле на месте отсутствующего электрона, имеет положительный заряд, равный по величине заряду электрона.



Принцип работы *p-n* –перехода

В кристалле кремния, имеющем *n* – область и *p*- область, в результате встречного движения противоположных зарядов в области с меньшей их концентрацией на границе областей возникает диффузный ток и собственное электрическое поле $E_{\text{собств.}}$.

На границе раздела двух областей происходит скачкообразное изменение знака объемного заряда, возникает контактная разность потенциалов ψ_k напряженность собственного электрического поля максимальна и создает потенциальный барьер ΔU , препятствующий дальнейшему прохождению диффузного тока.

Если внешнее напряжение $U_{AK} < 0$, то $I_{\text{обр.}} = I_s \approx 10 - 20 \text{ мкА}$ - диод закрыт.

Если $U_{AK} > 0$, *p-n* переход откроется и во внешней цепи появится диффузионный ток $I_{\text{диф.}}$, вызванный диффузией основных носителей, преодолевающих потенциальный барьер.

Величина потенциального барьера составляет для разных материалов от 0,6 В до 1,2 В.

Полный ток при прямом смещении p - n перехода определяется уравнением Эберса - Молла:

$$I_{np} = I_{diff} - I_s = I_s (e^{U/\varphi_T} - 1)$$

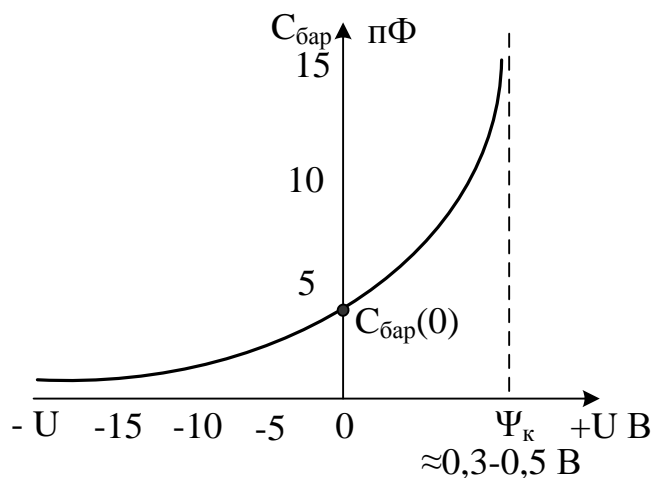
При температуре $T = 300K$ тепловой потенциал $\varphi_T = 25mV$, поэтому уже при $U = 0,1V$ формулу можно упростить:

$$I = I_s e^{U/\varphi_T}.$$

Дифференциальное сопротивление p - n перехода можно определить по формуле: $r_{diff} = \frac{\varphi_T}{(I + I_s)}$.

Барьерная емкость закрытого p - n перехода:

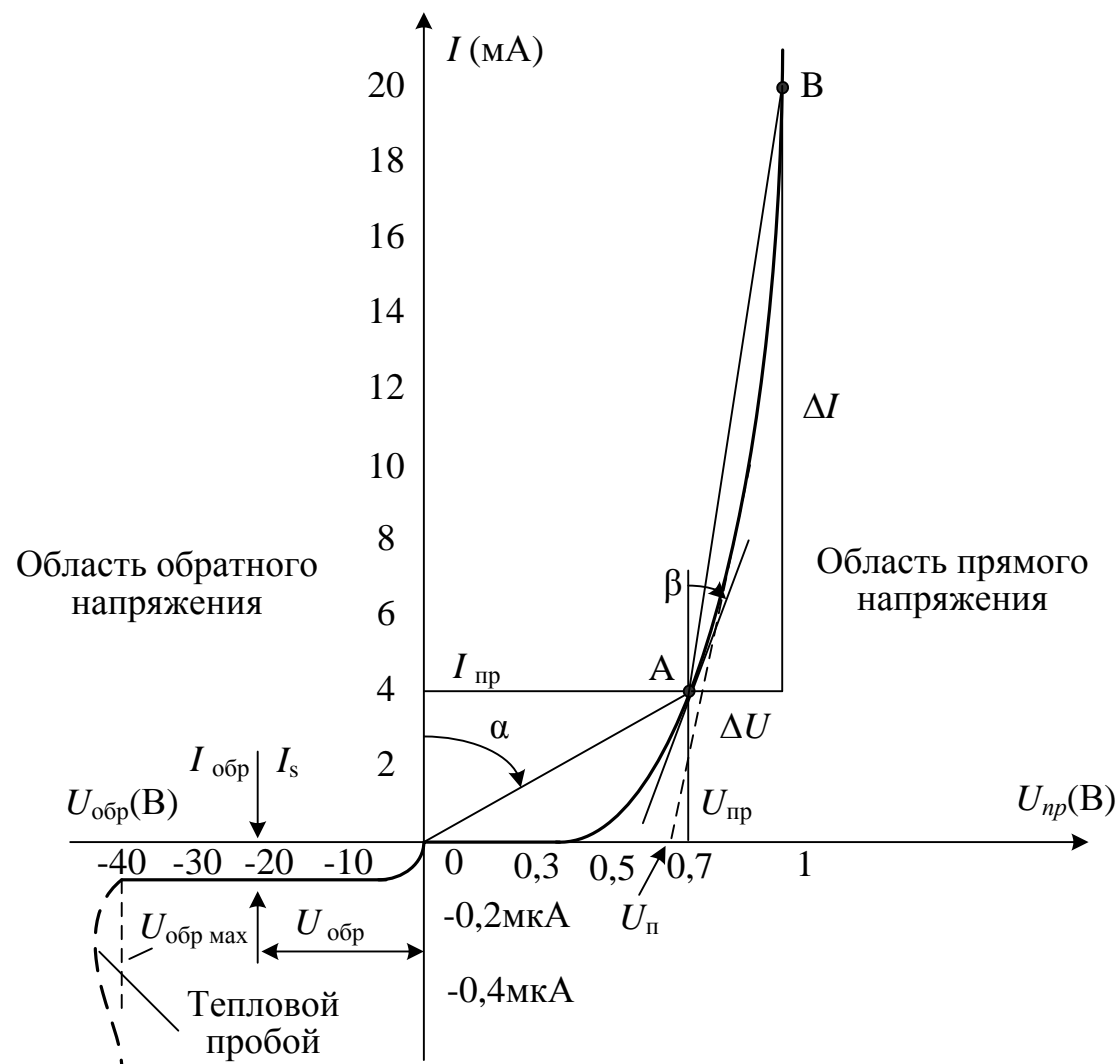
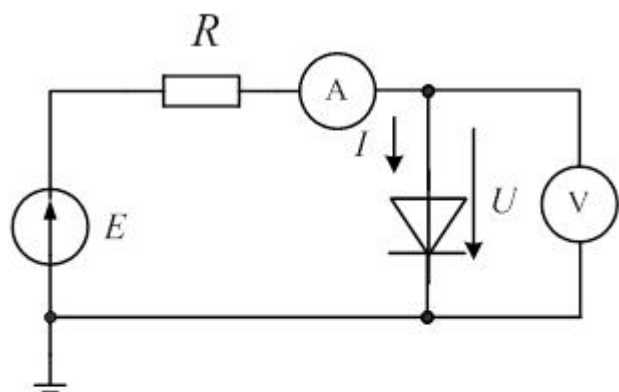
$$C_{бар} = \frac{C_{бар}(0)}{\sqrt{1 - \frac{U_{обр}}{\psi_k}}}.$$



Зависимость барьерной емкости от напряжения по p - n переходу

Вольтамперная характеристика p - n перехода

Полупроводниковым диодом называется полупроводниковый прибор, имеющий два вывода и один выпрямляющий p - n переход.



Вольтамперная характеристика p - n перехода

Статическое сопротивление: $R_{cm} = \frac{U_{np}}{I_{np}} = \operatorname{tg} \alpha \frac{m_U}{m_I}$

Дифференциальное сопротивление: $R_{диф} = \frac{dU}{dI} = \operatorname{tg} \beta \frac{m_U}{m_I}$.

$$r_{диф} = \frac{\varphi_T}{(I + I_s)} \approx \frac{25 \text{ мВ}}{10 \text{ мА}} = 2,5 \text{ Ом}.$$

При протекании большого тока через p - n переход в объеме полупроводника падает значительное напряжение. С учетом этого вольт-амперная характеристика приобретает вид:

$$I = I_s \cdot e^{\frac{(U - IR)}{\varphi_T}}, \quad R \text{ — называют последовательным сопротивлением.}$$

Высокочастотные диоды детектируют сигналы на частотах до десятков мегагерц.

Выпрямительные диоды при высоких обратных напряжениях имеют необратимый тепловой пробой.

Диоды бывают малой (0,3 Вт), средней (до 10 Вт) и большой мощности (>10 Вт).

Параметры диодов:

Основные параметры выпрямительных диодов:

I – номинальный прямой ток;

$U_{пр}$ — прямое напряжение;

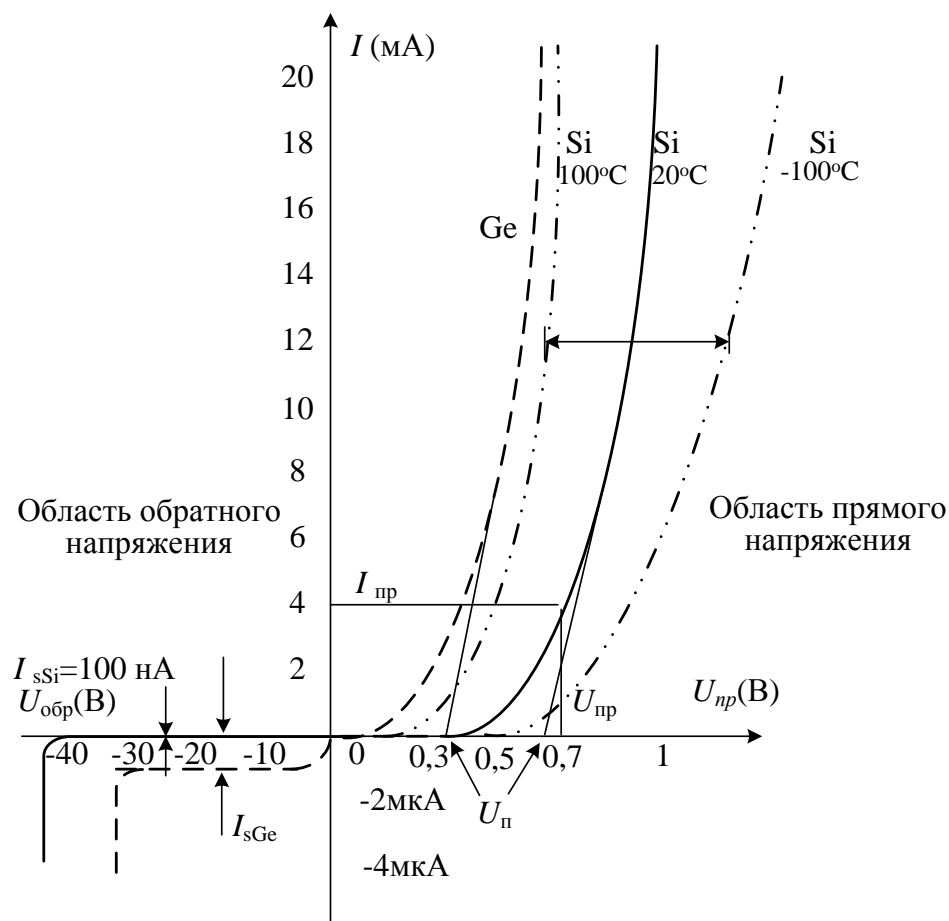
I_{max} – максимальный допустимый прямой ток;

$U_{обр.max}$ — максимальное допустимое обратное напряжение;

I обратный ток, который нормируется при определенном обратном напряжении;

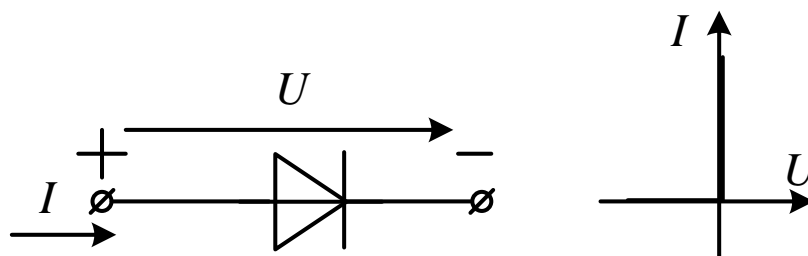
R_S - последовательное сопротивление

Сравнение вольтамперных характеристик кремниевых и германиевых диодов

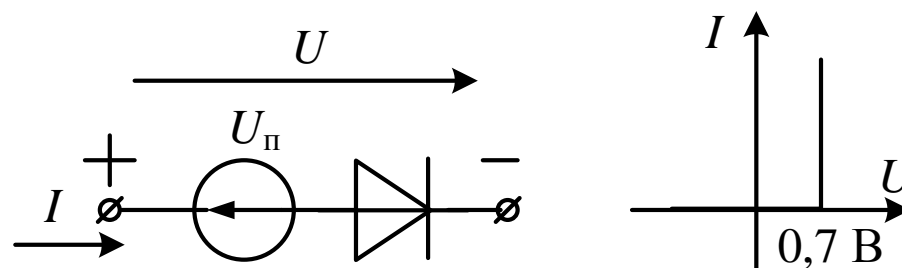


Пороговое напряжение германиевого диода $U_{п} \approx 0,3V$. Обратный ток — десятки миллиампер.

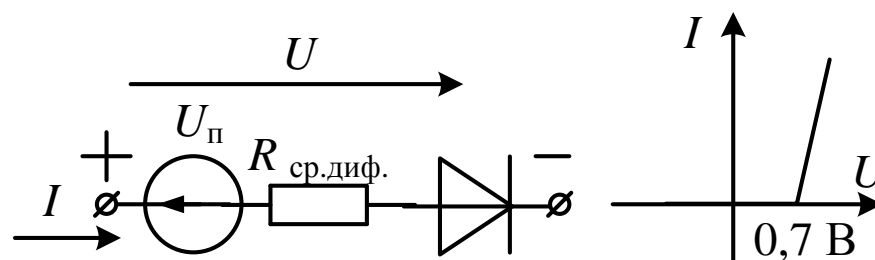
Эквивалентные схемы диодов



а) Идеальный диод и его ВАХ



б) Упрощенная эквивалентная
схема кремниевого диода



в) Эквивалентная схема с
кусочно-линейной
аппроксимацией ВАХ

Spice - модель диода

Первая версия программы SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) в переводе означает «Программа моделирования предназначенная для интегральных схем») была разработана в середине 70-х годов прошлого века в Калифорнийском университете США.

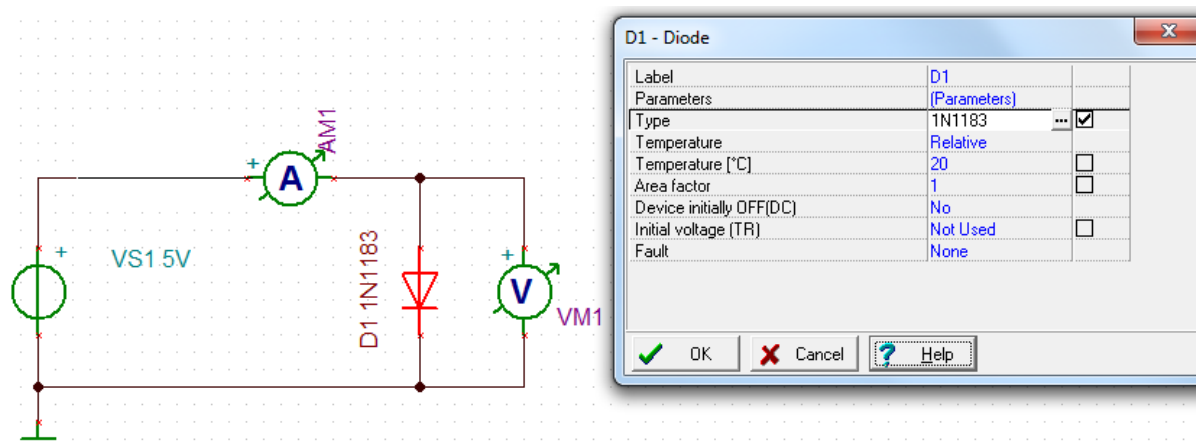
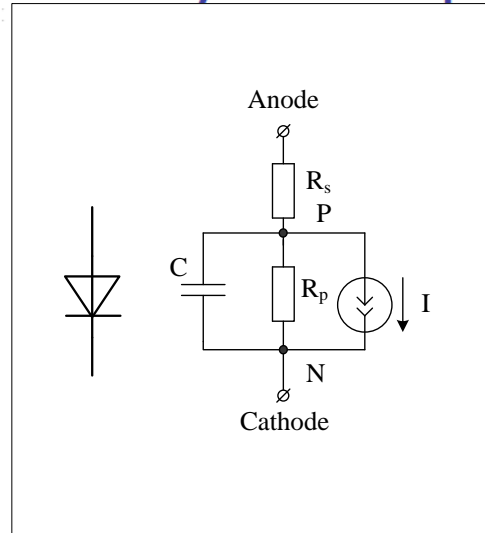
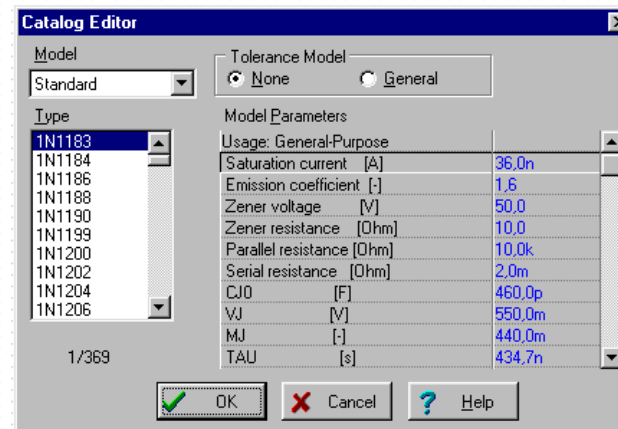


Рис.1.18

Symbol and Equivalent circuit



Parameters



I_{S0} saturation current at 27 ° C

V_Z breakdown (Zener) voltage (absolute value)

R_Z breakdown (Zener) resistance

R_p resistance parallel to the p-n junction

R_s series resistance

E_g energy gap (in eV)

C_{J0} zero bias junction capacitance

V_j built-in potential

M_j junction grading coefficient

τ diffusion time constant

Constants

q electron charge

k Boltzmann's constant

T_0 27 ° C

V_{max} 1.04 V

Equations

$$V_T = \frac{kT}{q}$$

$$I_s = I_{s0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \cdot \exp \left[\frac{E_G}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]$$

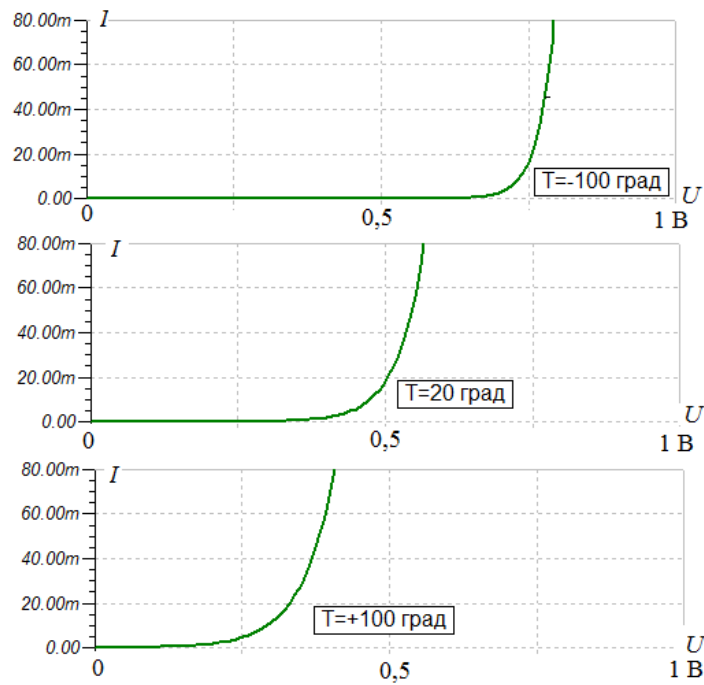
$$I = \begin{cases} \frac{V_{pn} + V_Z}{R_Z} & \text{if } V_{pn} < -V_Z \\ I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{pn}}{V_T} \right) - 1 \right] & \text{if } -V_Z < V_{pn} < V_{max} \\ I_s \cdot \left[\exp \left(\frac{V_{max}}{V_T} \right) - 1 \right] + \frac{I_s}{V_T} \cdot \exp \left(\frac{V_{max}}{V_T} \right) \cdot (V_{pn} - V_{max}) & \text{if } V_{pn} > V_{max} \end{cases}$$

$$\frac{1}{r_d} = \frac{\partial I}{\partial V_{pn}}$$

$$C_D = \frac{\tau}{r_D} \quad \text{if } V_{pn} > 0 \quad \text{otherwise} \quad C_D = 0$$

$$C_{SC} = \begin{cases} \frac{C_{J0}}{\left(1 - \frac{V_{pn}}{V_J} \right)^{M_J}} & \text{if } V_{pn} < \frac{V_J}{2} \\ 2^{M_J} \cdot C_{J0} \cdot \left(\frac{2 \cdot M_J \cdot V_{pn}}{V_J} + 1 - M_J \right) & \text{if } V_{pn} > \frac{V_J}{2} \end{cases}$$

$$C = C_{SC} + C_D$$



Температурные зависимости ВАХ диода 1N1183

Стабилитроны

Стабилитроном называют полупроводниковый диод, работающий в режиме восстанавливаемого лавинного пробоя и предназначенные для стабилизации постоянного напряжения. Стабилитроны называют еще диоды Зенера (Zener diod).

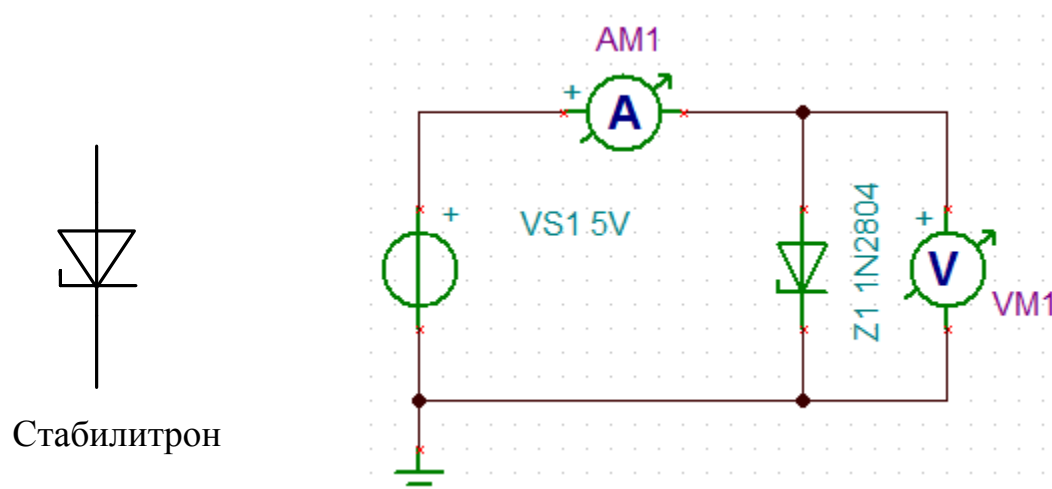
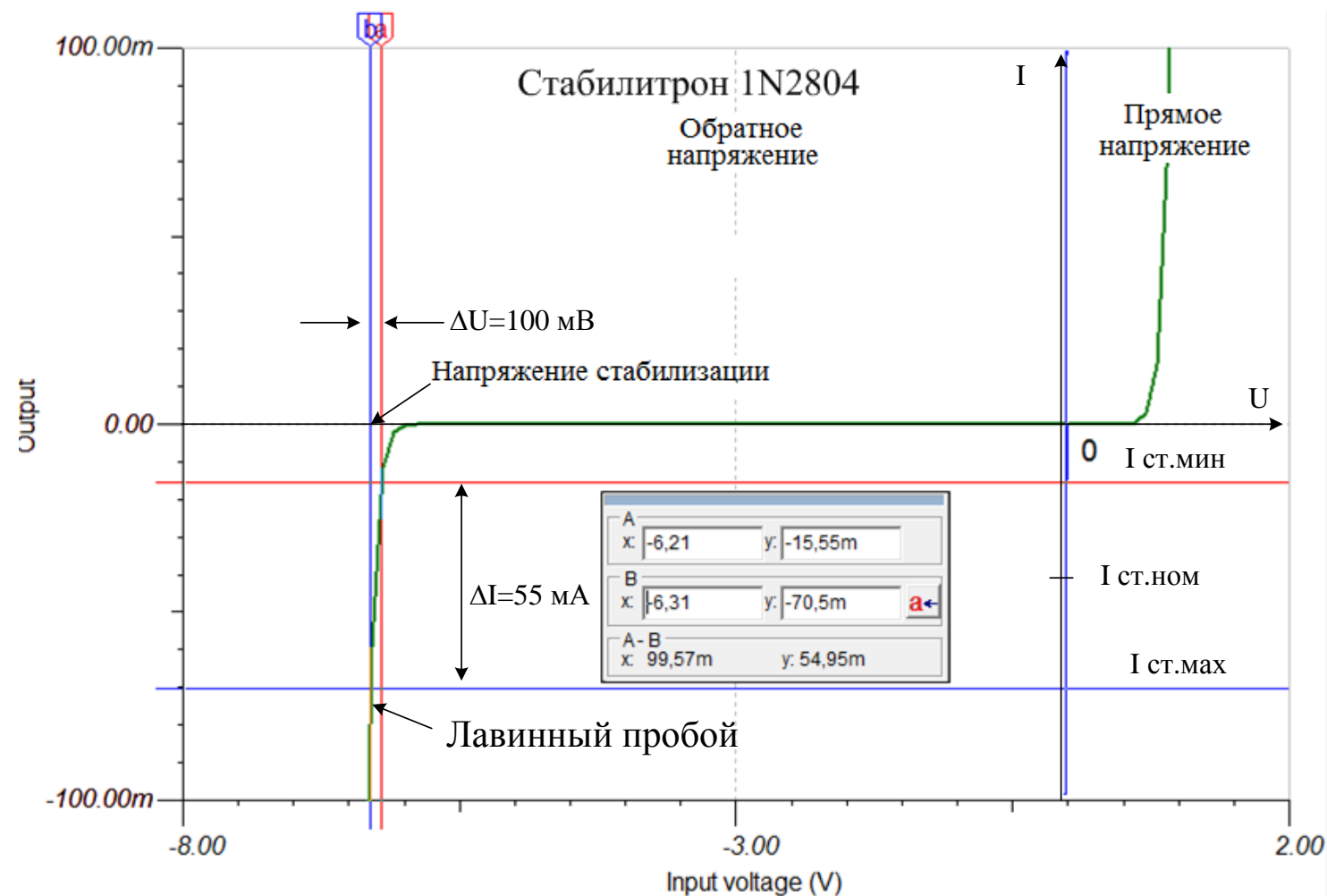


Рис.1.21. Обозначение и схема измерения ВАХ



ВАХ стабилитрона

Параметры стабилитрона:

Напряжение стабилизации $U_{ст} = 1,8 - 200 \text{ В}$;

Минимальный ток стабилизации $I_{ст\ мин}$;
 Максимальный ток стабилизации $I_{ст\ max}$;
 Мощность стабилитронов от 0,25 Вт до 50 Вт.

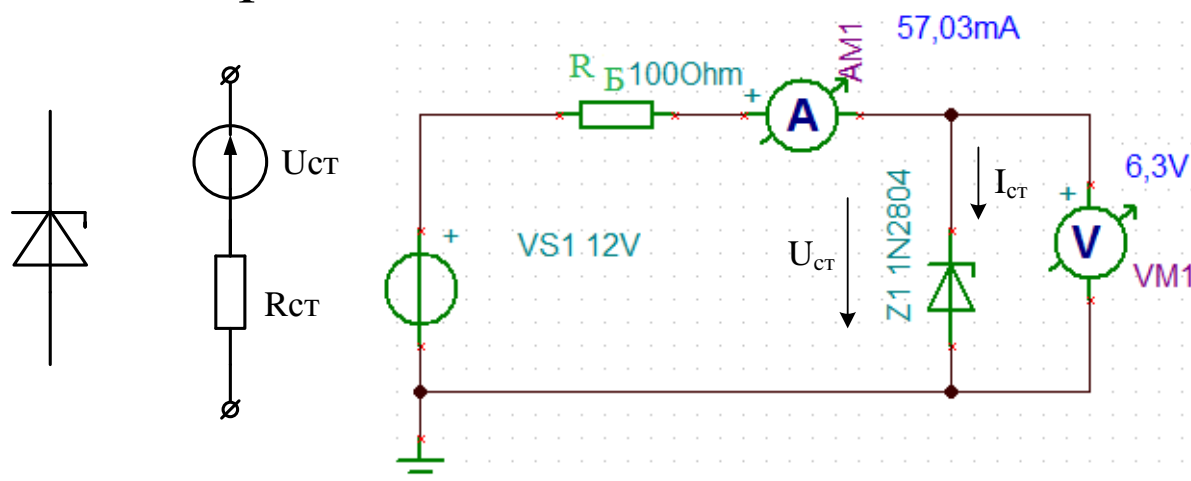


Рис. 1.23. Эквивалентная схема стабилитрона и его включение

Специальные типы полупроводниковых диодов

Диоды Шоттки

Диоды Шоттки вместо обычного плоскостного р-п перехода используется переход между контактом металла (Au, Al, Ag, Pt и др.) и полупроводника (Si, GaAs).

В диодах Шоттки мало влияние неосновных носителей, ток через контакт металл – полупроводник обусловлен главным образом основными носителями.

Диоды Шоттки могут работать на более высоких частотах (вплоть до 20 ГГц). Достоинства: малая инерционность, низкий уровень шумов, технологическая совместимость с интегральными схемами, простота изготовления. Низкое последовательное сопротивление позволяет пропускать в открытом состоянии большие токи (**50-100 А**).

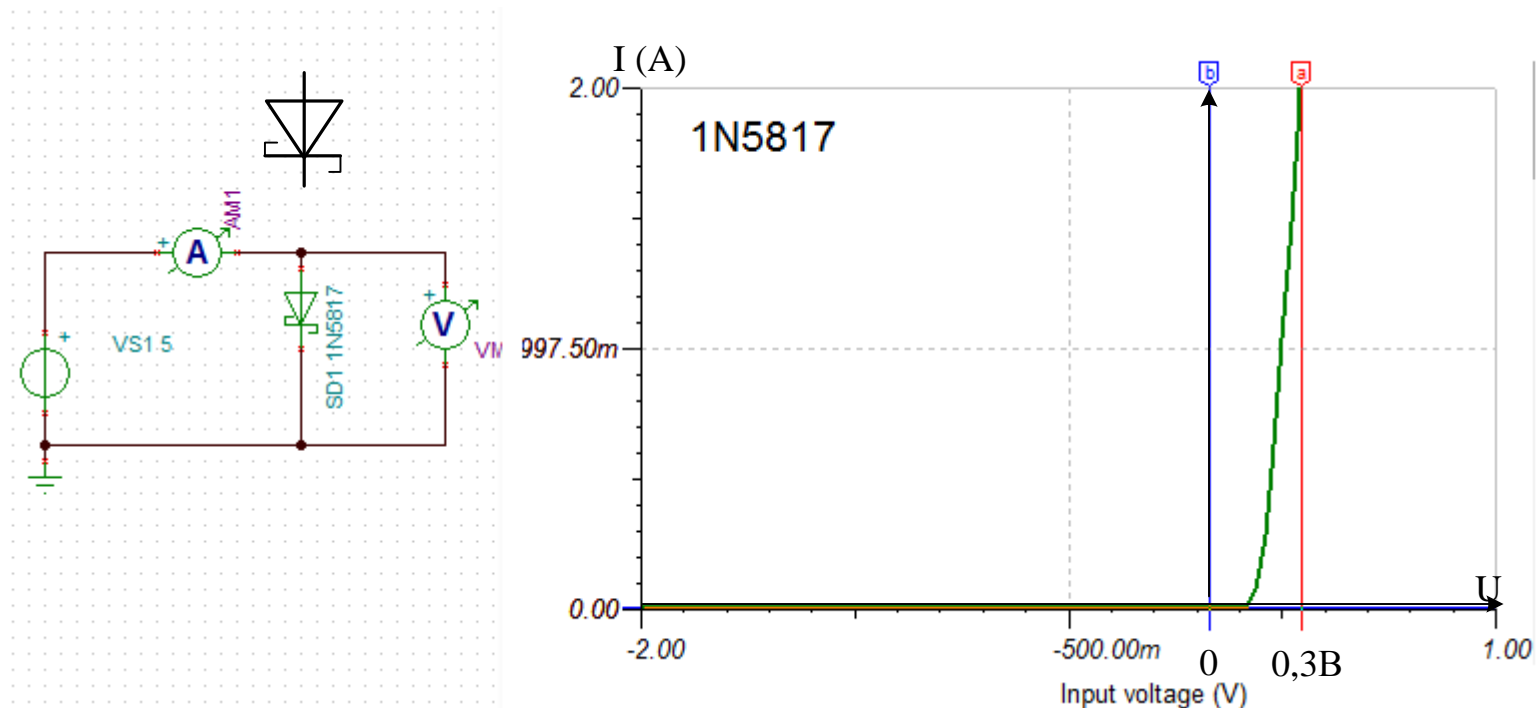
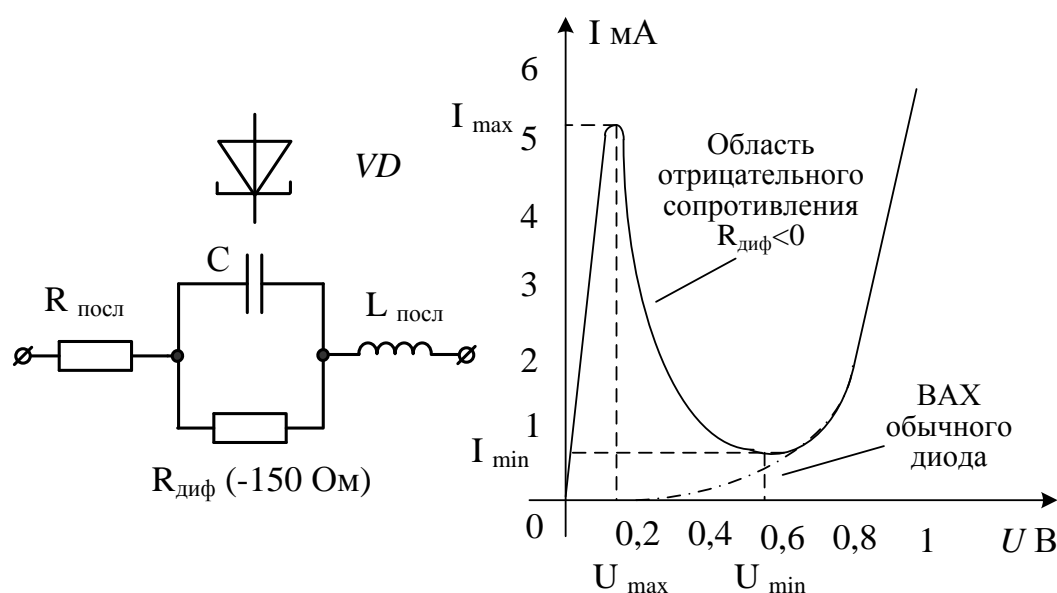


Рис.1.24

Туннельные диоды

Туннельный диод – это полупроводниковый диод, содержащий р-п переход с очень малой толщиной запирающего слоя. Действие туннельного диода основано на прохождении электронов сквозь узкий потенциальный барьер благодаря туннельному эффекту. Туннельный эффект означает проникновение микрочастицы сквозь потенциальный барьер в случае, если ее полная энергия меньше высоты барьера. Туннельные диоды изготавливают на основе Ge и GaAs. Толщина запирающего слоя составляет 5-15 нм.



$$\frac{I_{max}}{I_{min}} \approx 10; U_{max} \approx 0,1V;$$

$$U_{min} \approx 0,6V; R_{посл} = 1,50M;$$

$$C = 5nF; L \approx 1nH.$$

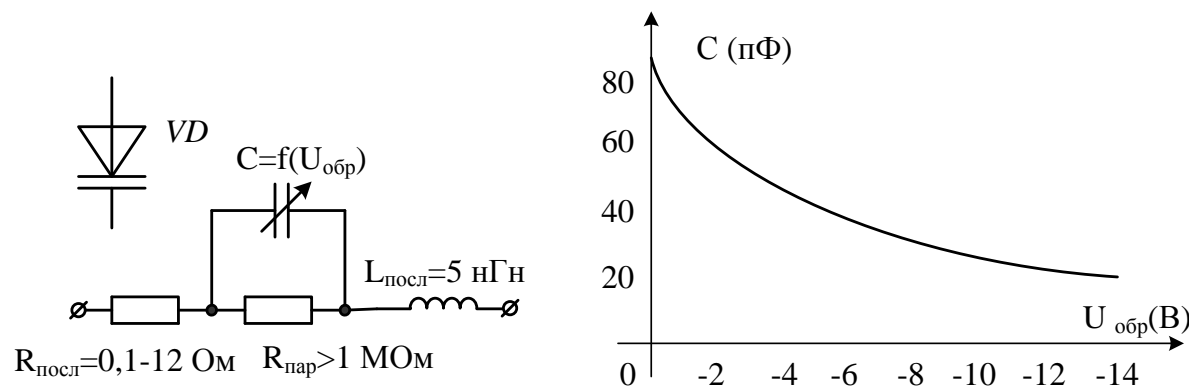
Отрицательное дифференциальное сопротивление составляет примерно - 150 Ом.

ВЧ-генераторы (до 10ГГц)

Варикапы

Варикапом называют полупроводниковый диод, у которого барьерная емкость электронно-дырочного перехода нелинейно зависит от приложенного управляющего напряжения (смещения). В качестве варикапов используют полупроводниковые диоды при обратном включении, когда проявляется только барьерная емкость перехода, а ток отсутствует.

$$C(U_{обр}) \approx \frac{C(0)}{\left(1 + \left|\frac{U_{обр}}{U_{пр}}\right|\right)^n}, n = 1/2 - 1/3.$$



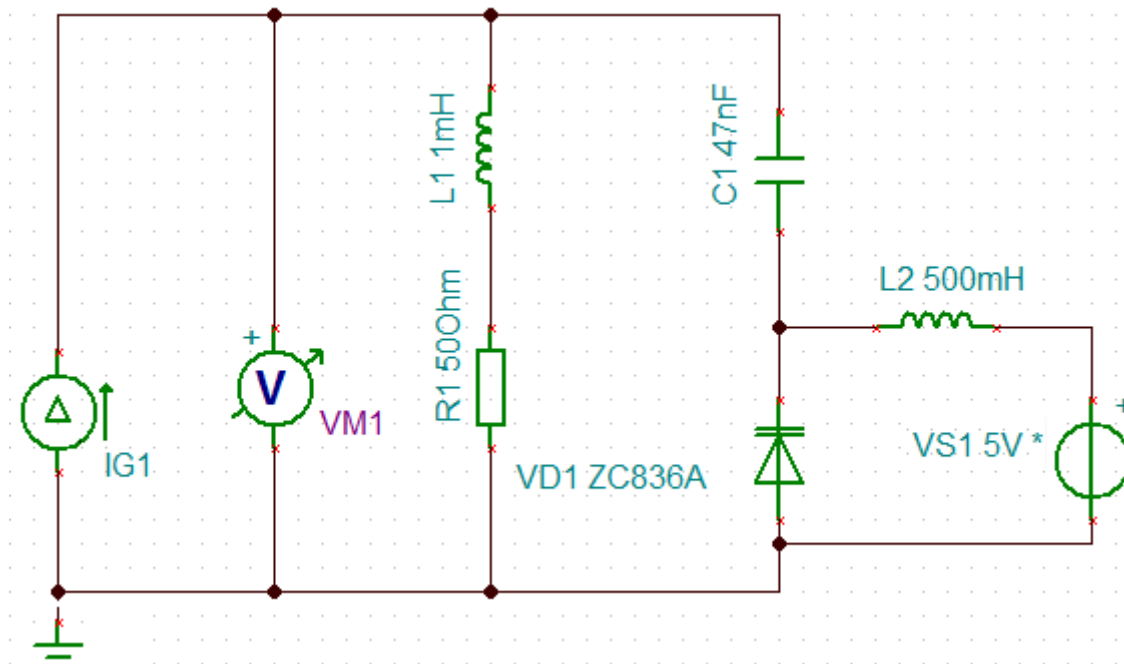
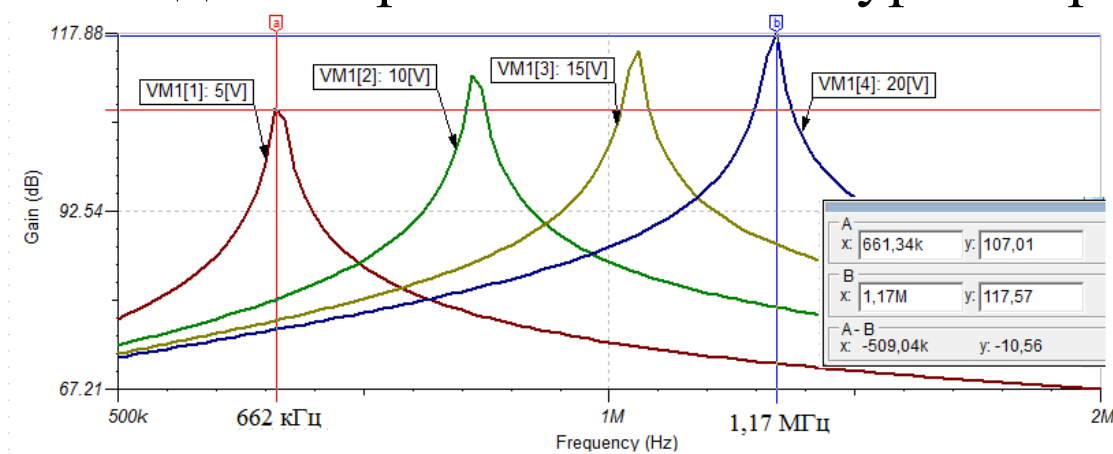


Рис.1.27. Модель параллельного контура с варикапом



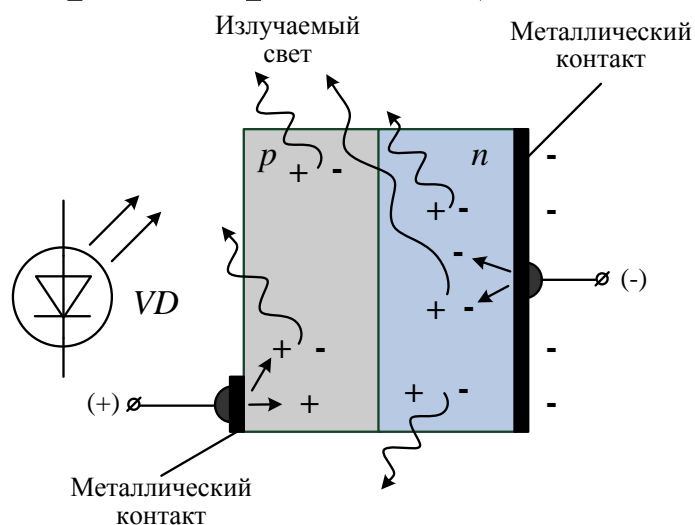
Резонансные характеристики

Светодиоды

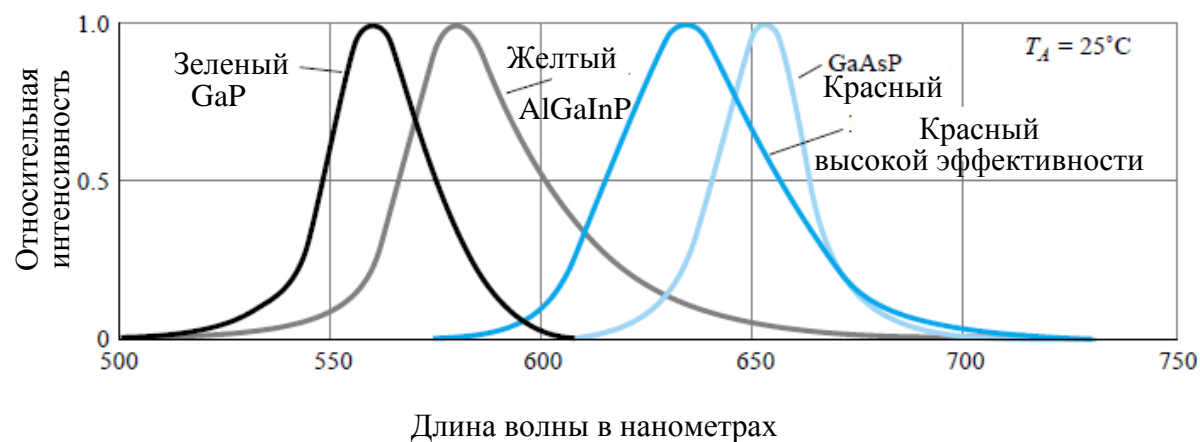
Светодиодами называют полупроводниковые диоды, в которых р-п переход при прохождении электрического тока генерирует оптическое излучение в инфракрасной, видимой или ультрафиолетовой области спектра.

При рекомбинация электронов и дырок энергия свободного несвязанного электрона может выделяться в виде фотонов излучения.

Материалы: арсенид фосфид галия (GaAsP), фосфид галия (GaP), карбид кремния (SiC).



Среднее значение прямого тока светящегося светодиода составляет 10-20 мА. Прямое напряжение на открытом светодиоде от 2,2 В до 3 В.



Графики относительной интенсивности светодиодов



Фотодиоды

Фотодиод это устройство с полупроводниковым переходом, работа которого происходит в области обратного напряжения. Обратный ток зависит от падающего светового потока.

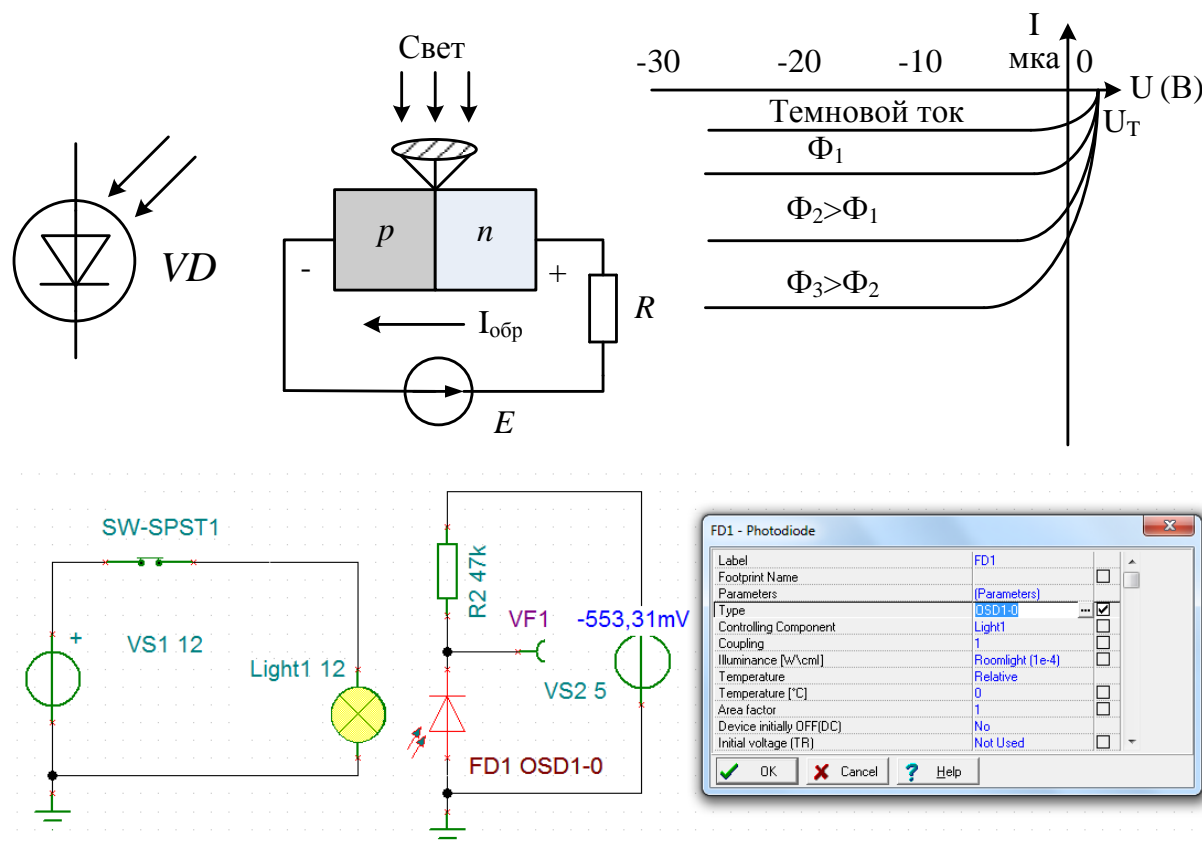


Рис.1.33.



Фотодиоды

Цепи постоянного тока с диодами

Пример 1

В цепи с диодом и резистором $E=10\text{В}$, $R=10\text{ Ом}$. Найти ток и напряжение на диоде.

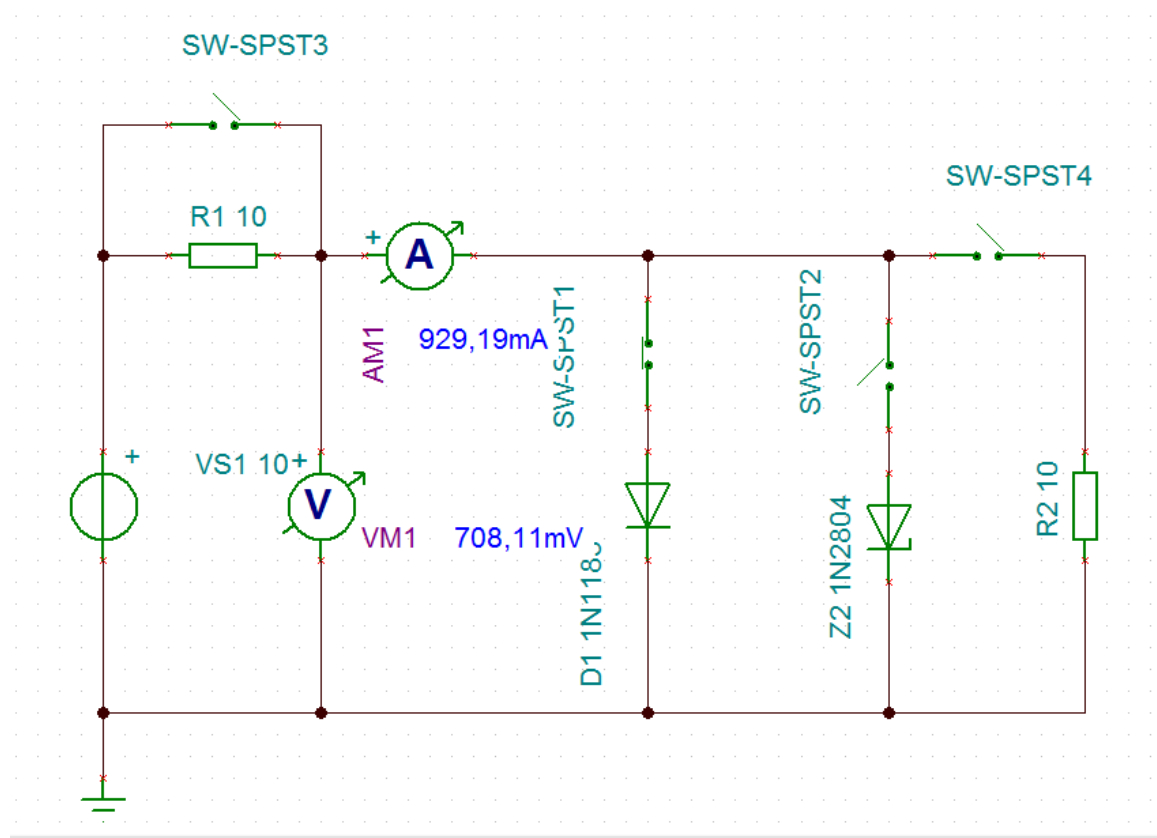


Рис.2.3

1. Найдем ВАХ диода:

2. Строим нагрузочную прямую: $I = \frac{E}{R} - \frac{U_{нэ}}{R}$

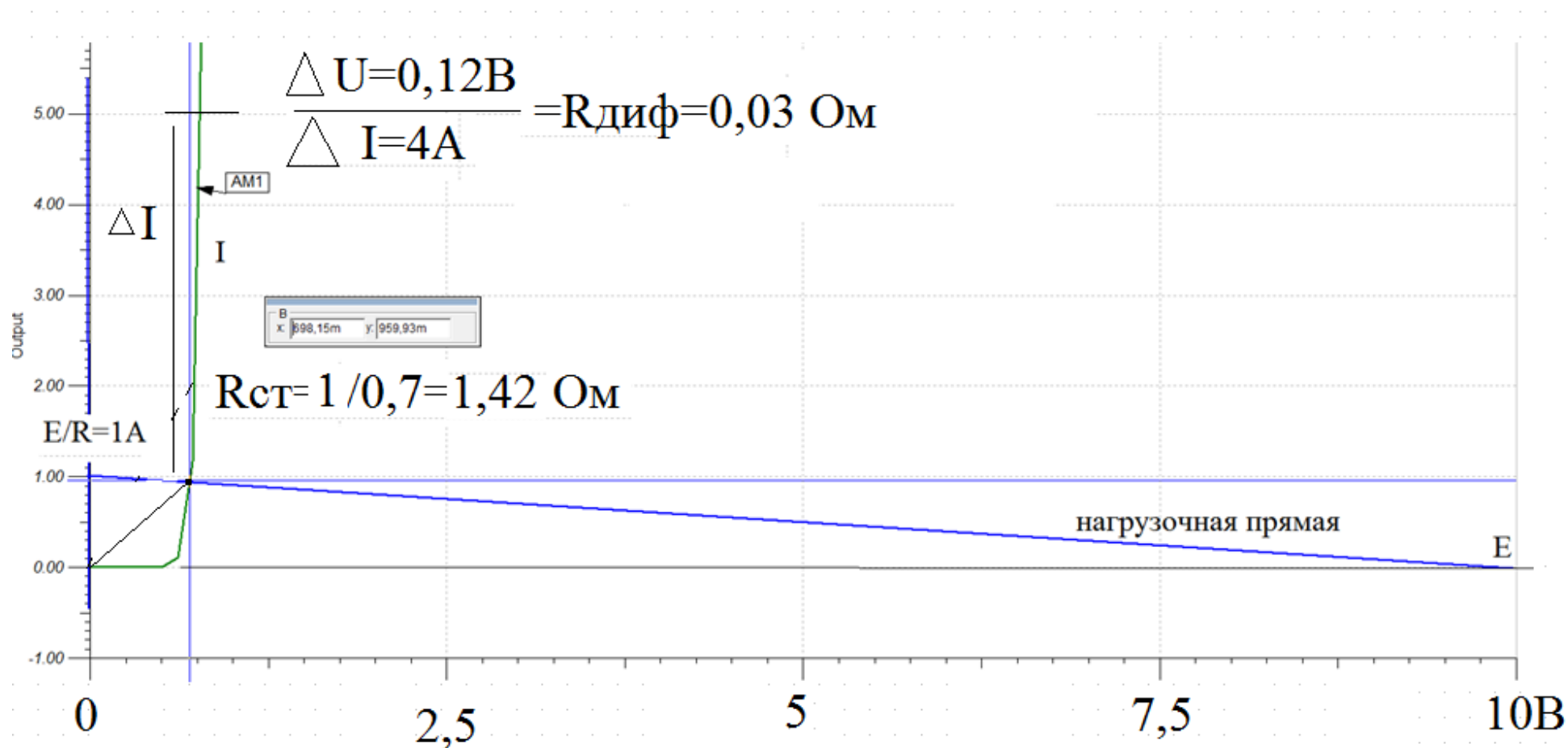
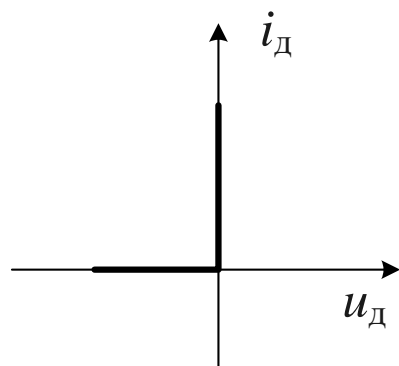


Рис.2.4

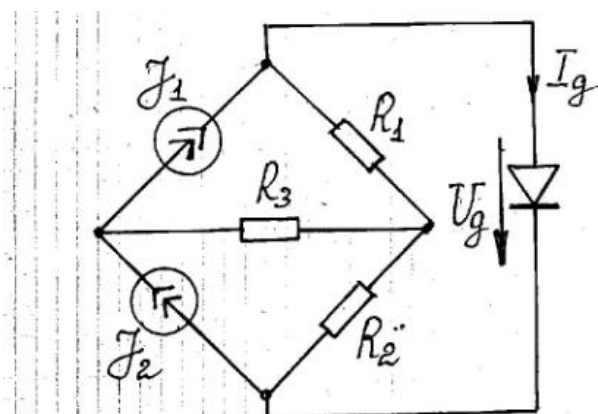


3. Находим рабочую точку: $U_d = 698 \text{ мВ}$, $I = 959 \text{ мА}$

4. Находим статическое и дифференциальное сопротивление диода.

При расчете схем с выпрямительными диодами пользуются идеализированной ВАХ:

Пример 2



$$J_1 = 10 \text{ мА}; J_2 = 5 \text{ мА}; R_1 = R_2 = R_3 = 100 \text{ Ом.} \left| \begin{matrix} I_g, U_g \\ -I_g, U_g \end{matrix} \right. ?$$

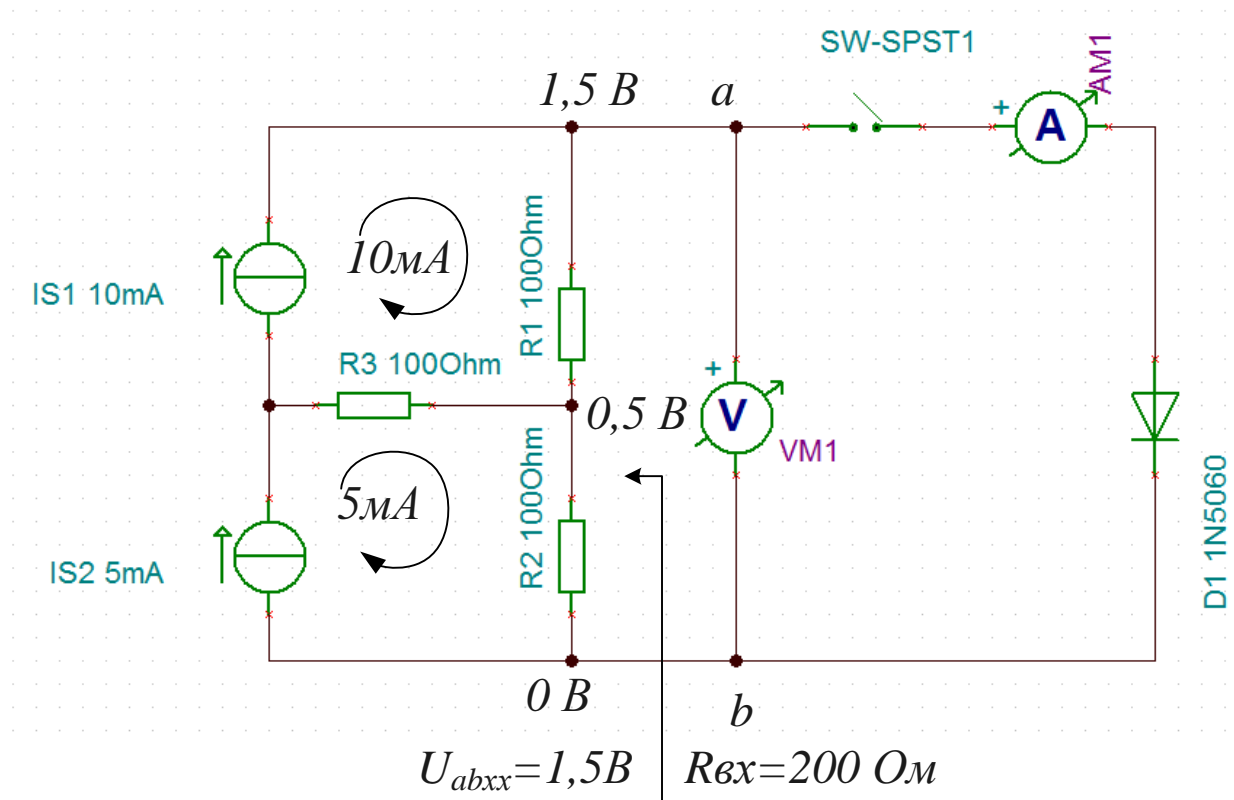


Рис.2.5.

1. Находим :

$$U_{abxx} = I_{22}R_2 + I_{11}R_1 = 1,5B, R_{\text{вх}} = R_1 + R_2 = 200 \text{ Ом}$$

$$U_{abxx} = 1,5B \text{ и } R_{\text{вх}} = 200 \text{ Ом}$$

2. Находим ВАХ диода в схеме

Получили 608 мВ, 4,58 мА

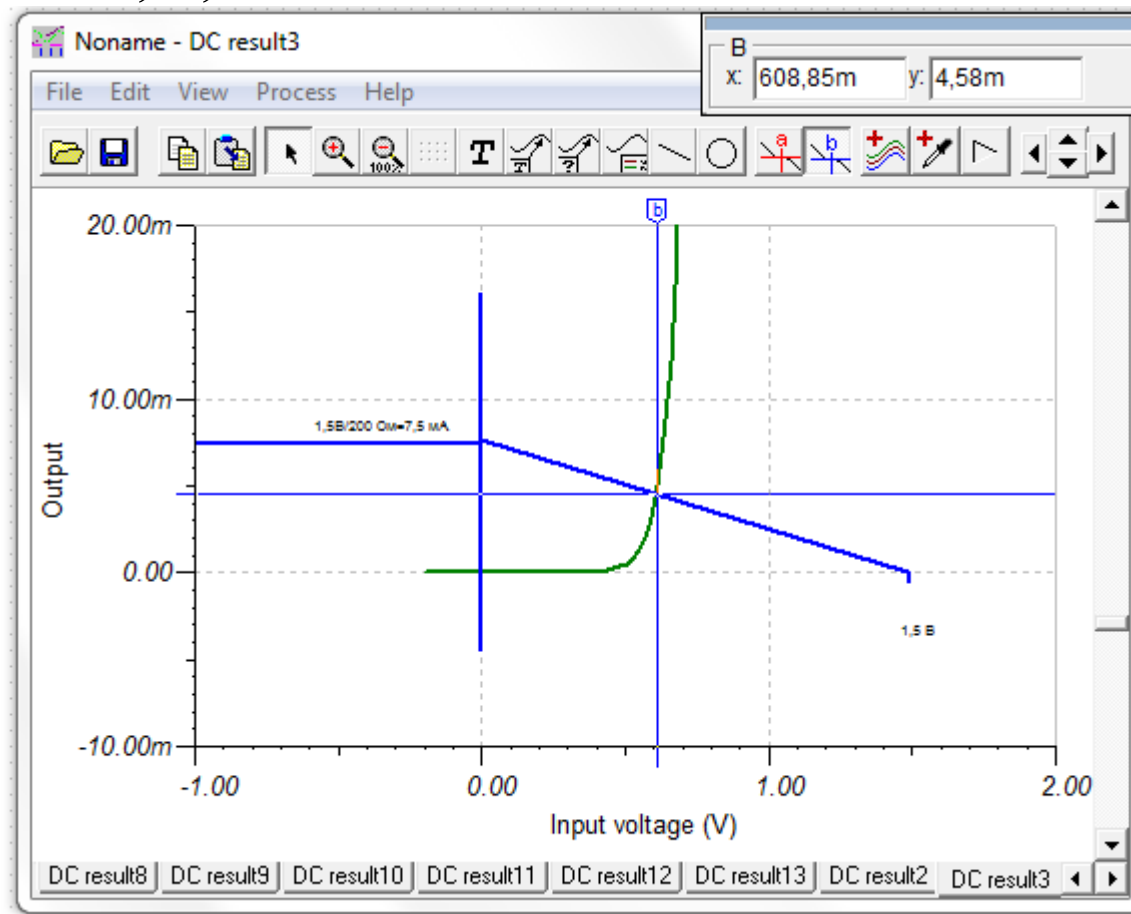


Рис.2.6

3. Проверим на модели

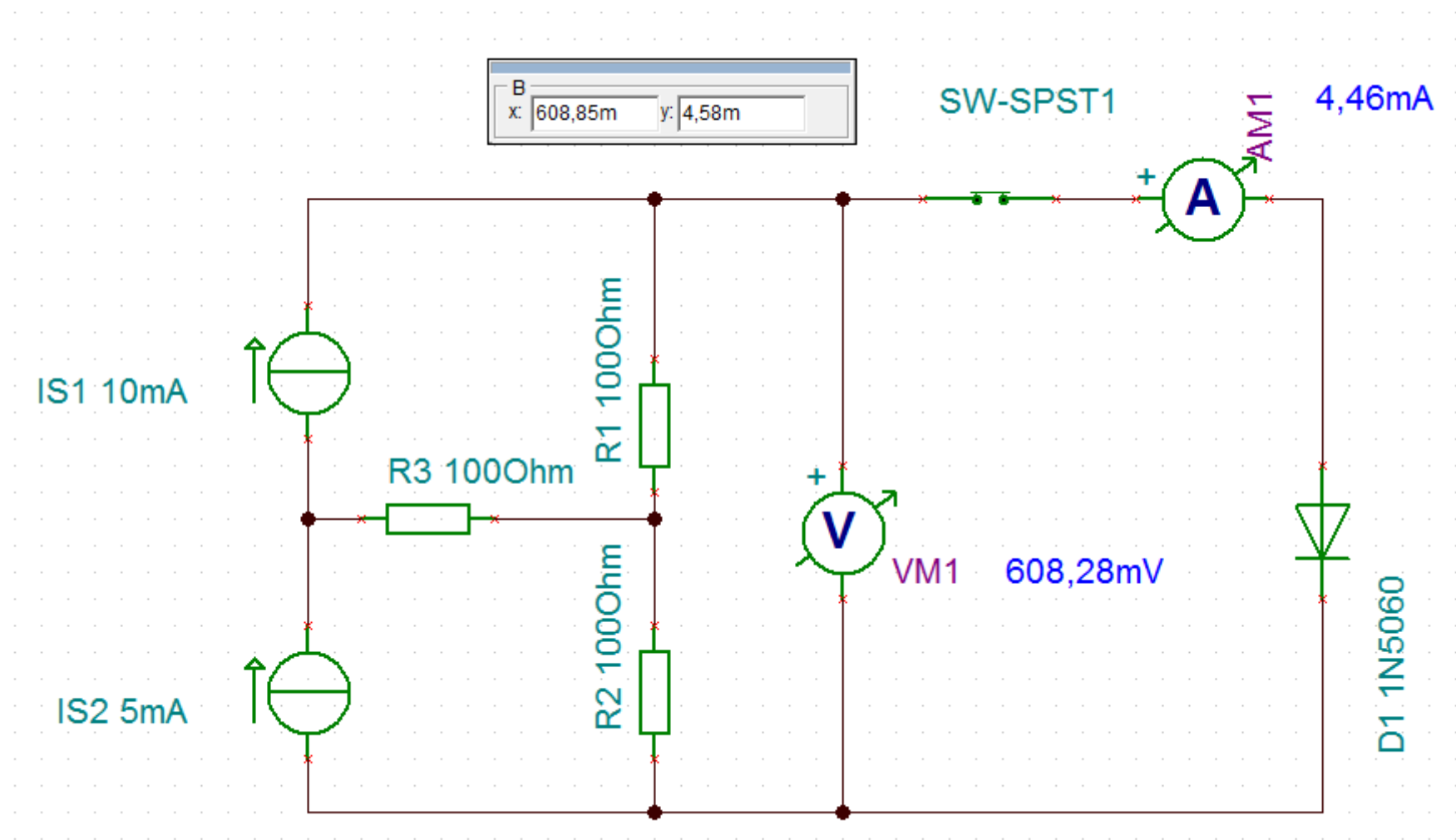


Рис.2.7.

Стабилитроны

Стабилитроном называют полупроводниковый диод, работающий в режиме лавинного пробоя и предназначенный для стабилизации постоянного напряжения.

ВАХ стабилитрона

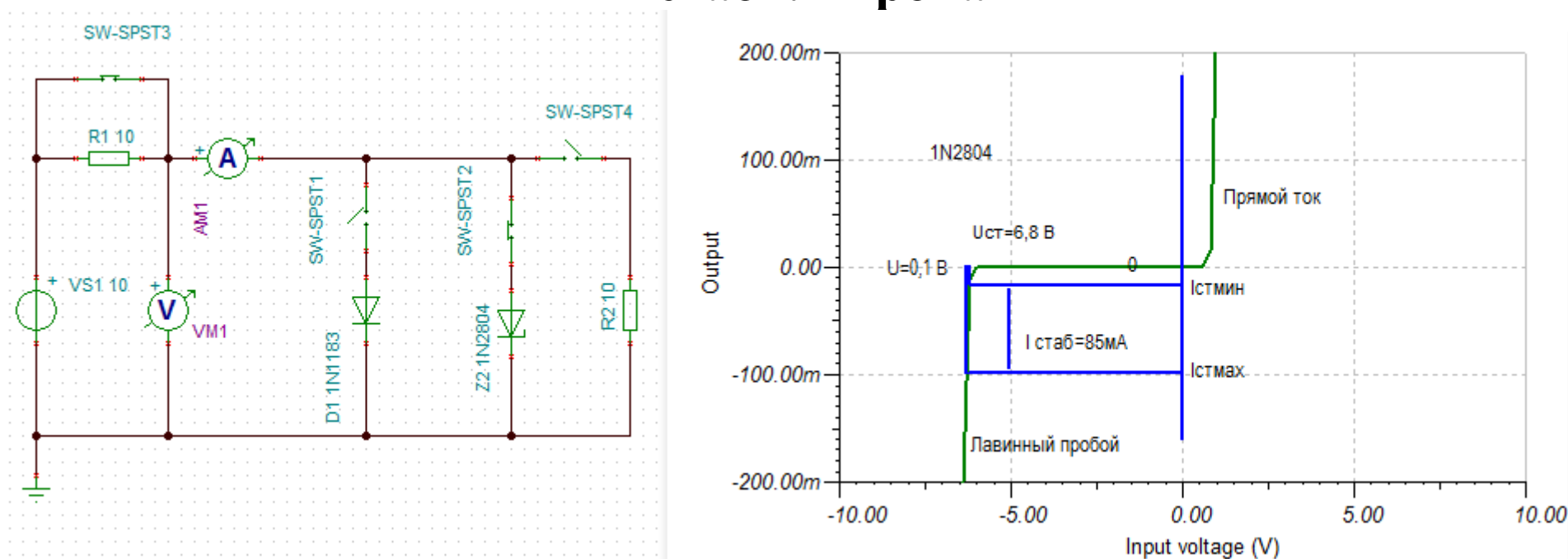


Рис.2.8

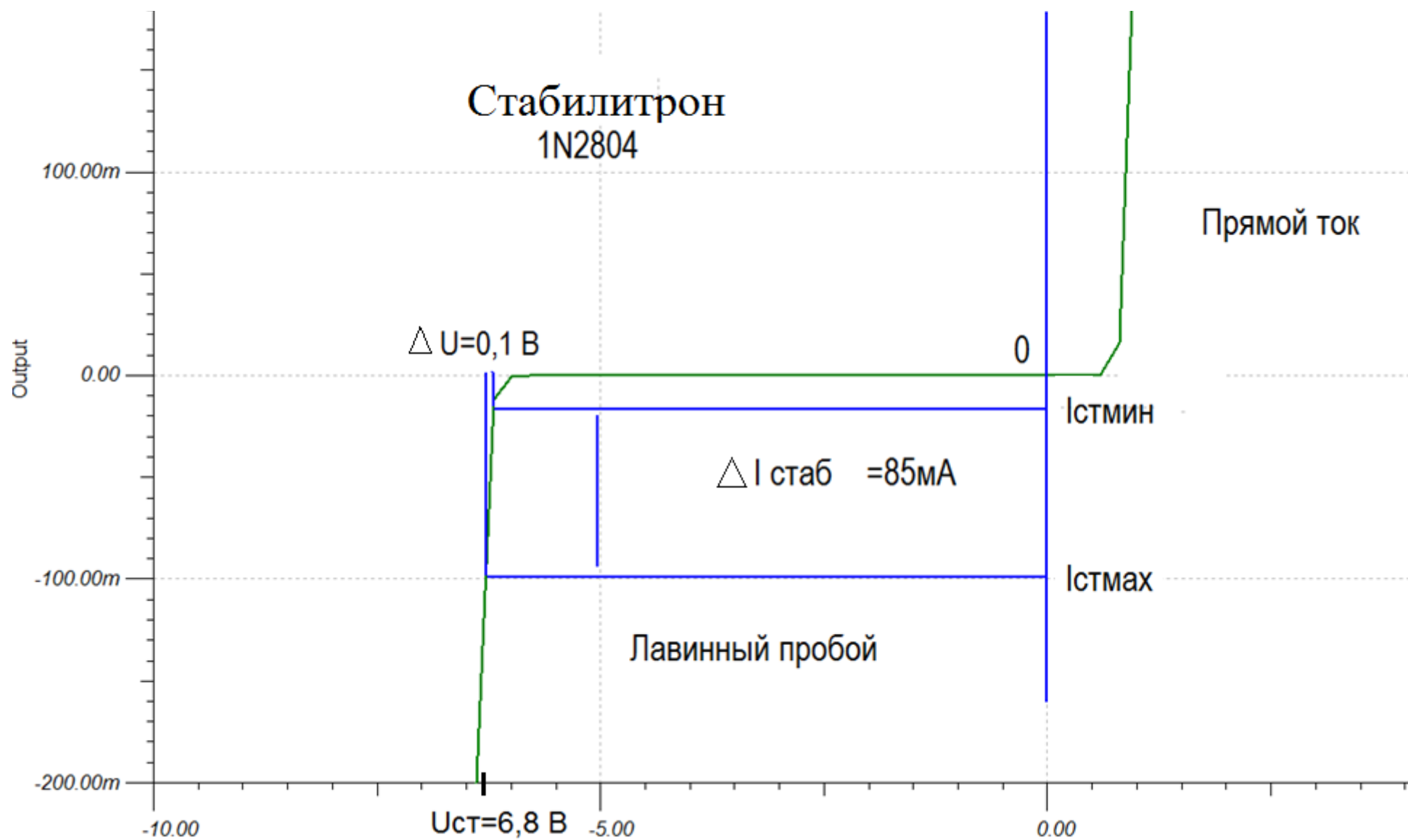


Рис.2.9

Дифференциальное сопротивление стабилитрона:

$$R_{\text{диф.ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}} = \frac{0,1\text{В}}{0,08\text{А}} = 1,25\text{Ом}.$$

Мощность рассеяния у стабилитронов составляет от сотен милливатт до десяти ватт.

Параметры стабилитронов:

Основными параметрами стабилитрона являются:

$U_{\text{ст}}$ - напряжение стабилизации (3 – 180 В);

$R_{\text{диф.ст}} = \frac{\Delta U_{\text{ст}}}{\Delta I_{\text{ст}}}$ - дифференциальное сопротивление на участке стабилизации;

$I_{\text{ст min}}, I_{\text{ст max}}$ - минимальный и максимальный ток стабилизации.

Схема стабилизатора

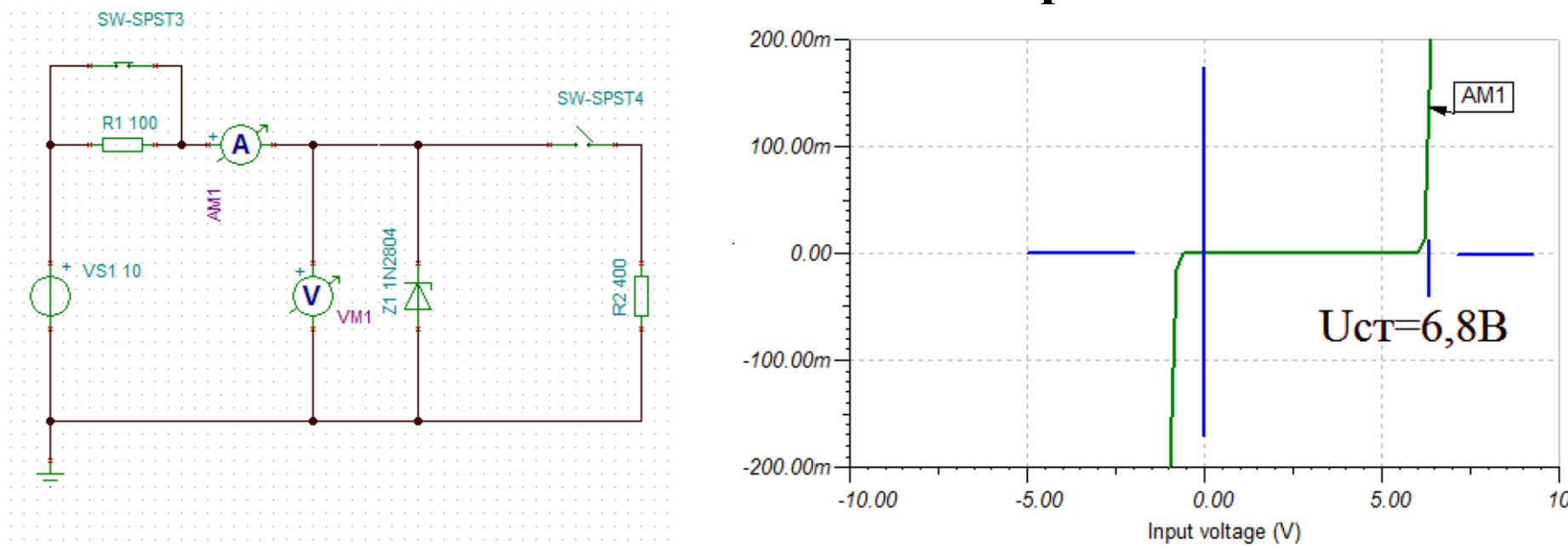


Рис.2.10

ВАХ стабилитрона

$R_1 = R_B = 100 \text{ Ом}$ - балластное сопротивление;

$R_2 = R_H = 400 \text{ Ом}$ - сопротивление нагрузки.

Качество стабилизации оценивают коэффициентом стабилизации:

$$K_{cm} = \frac{\Delta U_H / U_{HO}}{\Delta U_{BX} / U_{BXO}}.$$

Пример 3

1-й случай. Стабилизатор без нагрузки

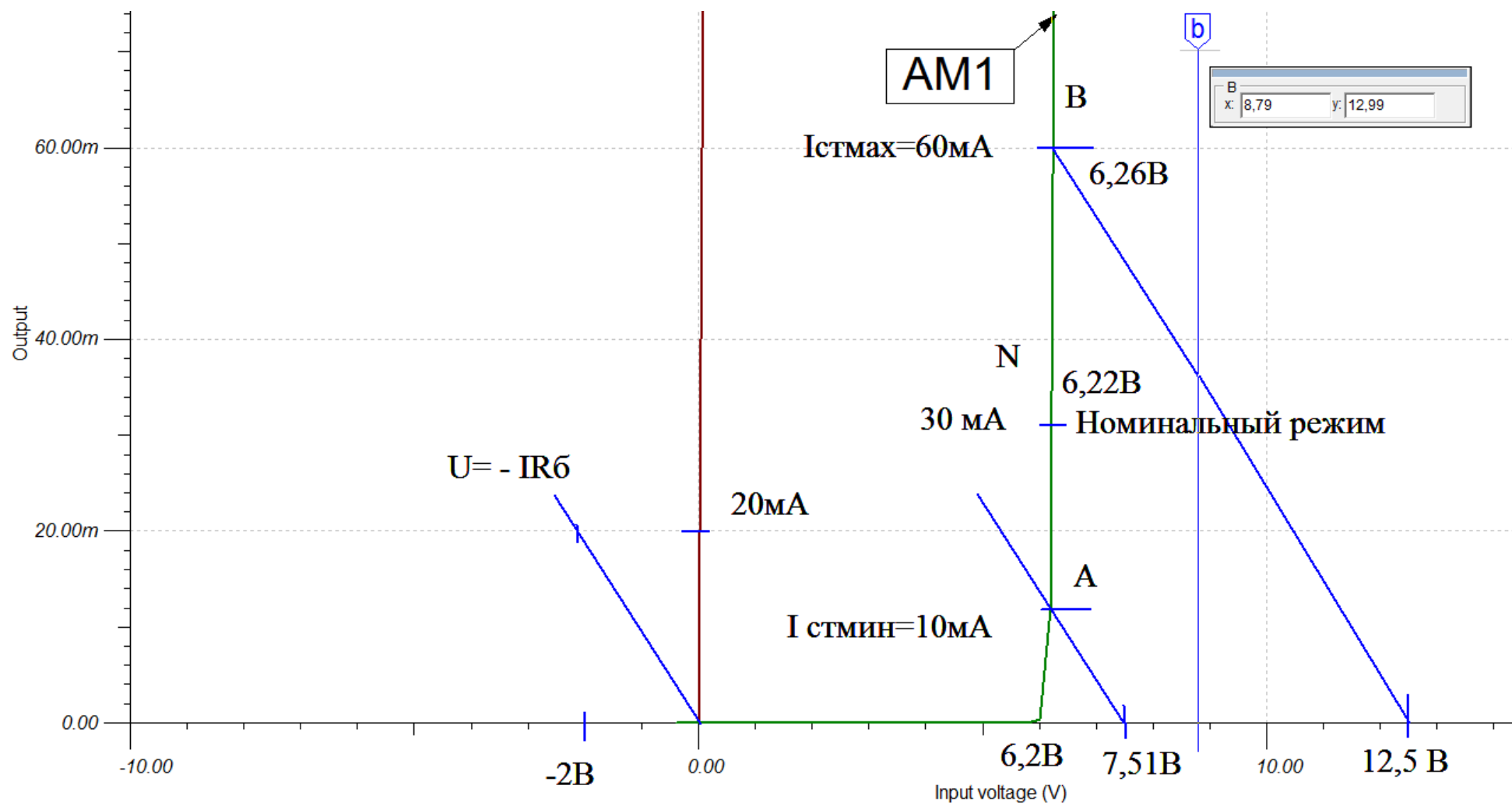


Рис.2.11

А. Графический расчет

Порядок расчета:

1. Строим ВАХ обратной ветви стабилитрона.

По ВАХ находим: в точке А: $I_{ct\ min} = 10\text{ мА}$, $U_{ct\ min} = 6,2\text{ В}$;

в точке В: $I_{ct\ max} = 60\text{ мА}$, $U_{ct\ max} = 6,26\text{ В}$.

2. Нагрузочная прямая: $U = E - IR_B$. Определяем наклон прямой

$$U = -IR_B. \text{ Если } U = -2\text{ В}, I = \frac{-2}{-R_B} = \frac{-2}{-100} = 20\text{ мА}.$$

3. Проводим нагрузочные прямые под этим углом в точках А и В.

Находим $E_{min} = 7,51\text{ В}$, $E_{max} = 12,5\text{ В}$.

При этом напряжение на выходе стабилизатора изменится не более, чем на 40 мВ от номинального значения 6,22В.

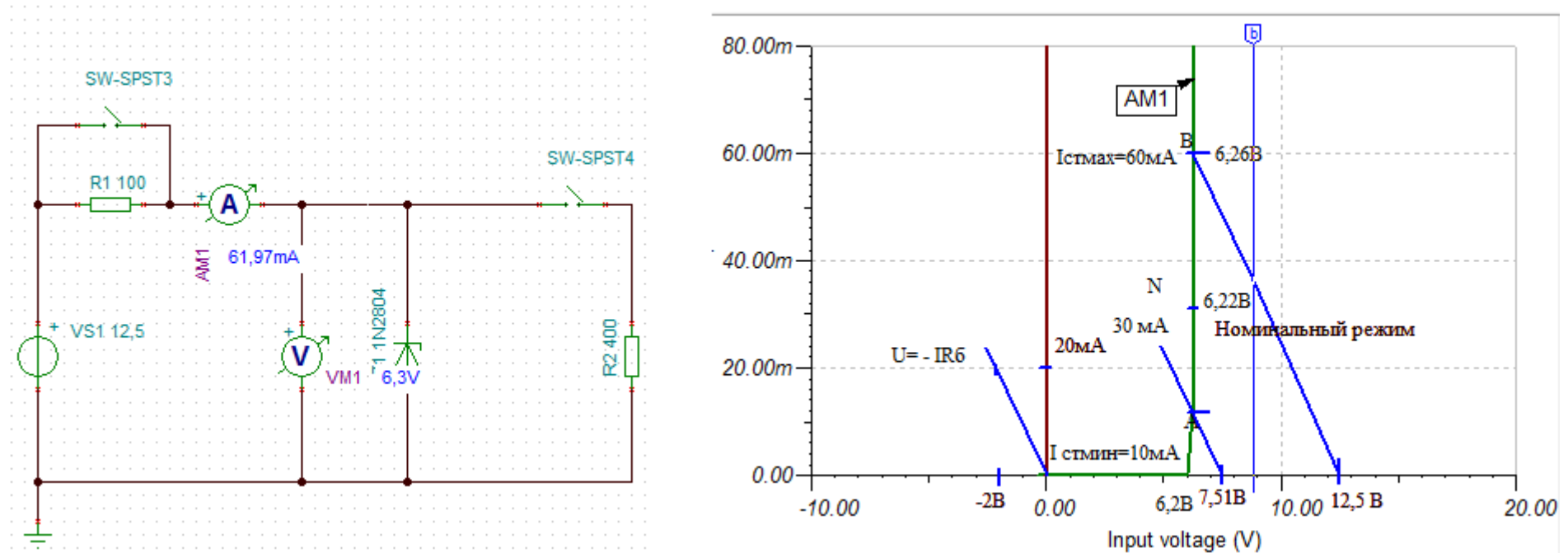


Рис.2.12

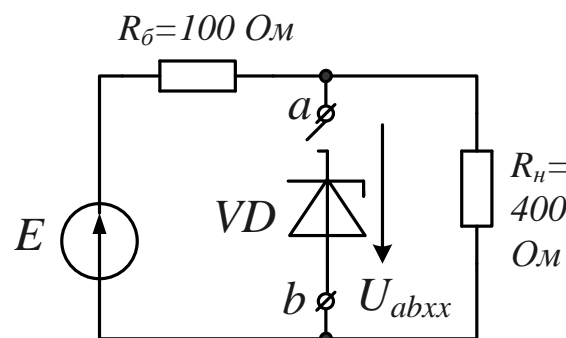
Б. Аналитический расчет

$$E_{ст\min} = U_{ст\min} + I_{ст\min} R_B = 6,2 + 10^{-2} \cdot 100 = 7,2\text{B}$$

$$E_{ст\max} = U_{ст\max} + I_{ст\max} R_B = 6,26 + 6 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 12,26\text{B}$$

Пример 4.

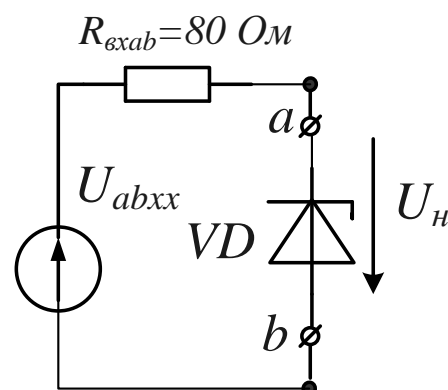
2-й случай. Стабилизатор с нагрузкой



1. Отключаем стабилитрон и находим:

$$U_{abxx} = \frac{ER_H}{R_B + R_H} = 0,8E,$$

$$R_{exab} = \frac{R_B R_H}{R_B + R_H} = 80 \text{ Ом}.$$



2. Строим схему с эквивалентным генератором.

3. Находим наклон нагрузочной прямой:

$$U = U_{abxx} - IR_{exab}.$$

$$\text{Если } U = -2 \text{ В}, I = \frac{-2}{-R_{exab}} = \frac{-2}{-80} = 25 \text{ мА}.$$

4. Строим ВАХ стабилитрона и проводим графический расчет:

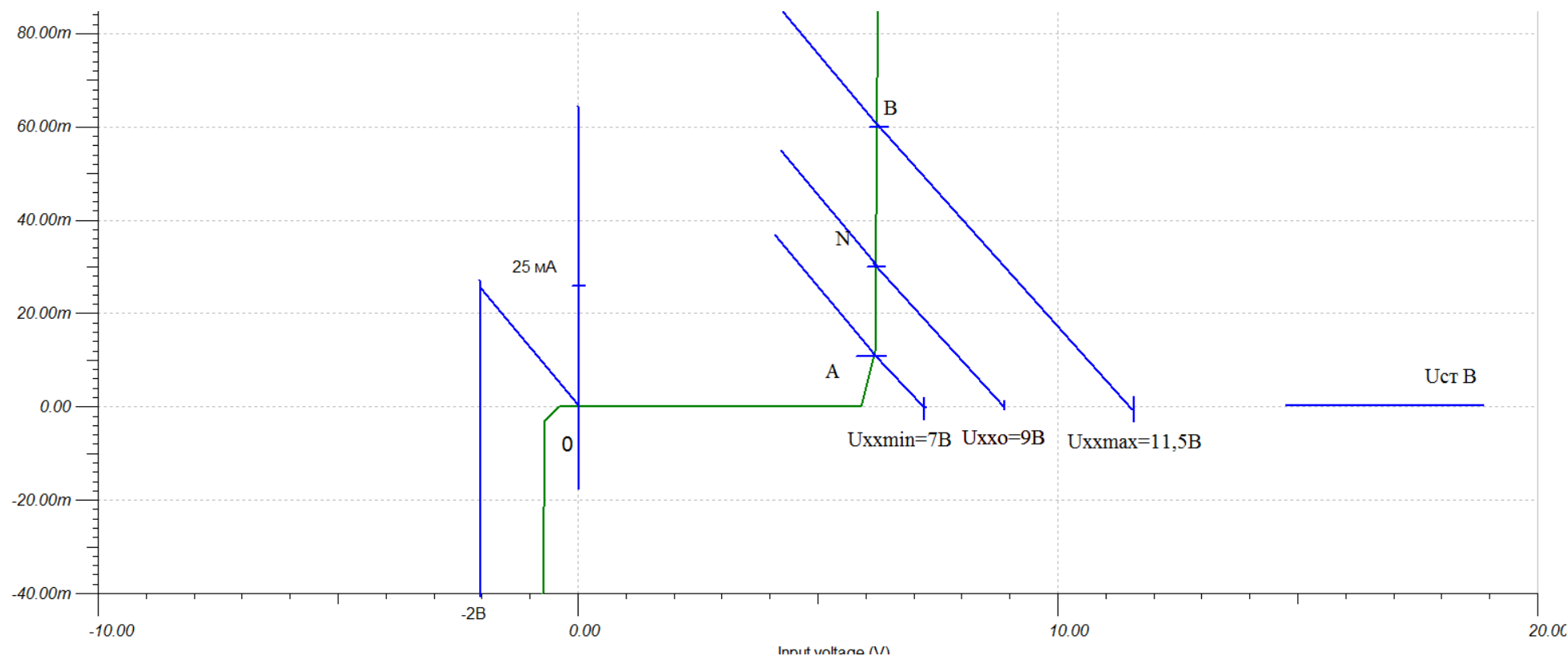


Рис.2.13

Находим: $U_{xx min} = 7B, U_{xx max} = 11,5B.$

Вычисляем:

$$E_{min} = \frac{U_{xx min}}{0,8} = \frac{7}{0,8} = 8,75B, E_{max} = \frac{U_{xx max}}{0,8} = \frac{11,5}{0,8} = 14,37B.$$

$$E_0 = \frac{U_{xx0}}{0,8} = \frac{9}{0,8} = 11,25 B.$$

Аналитический расчет стабилизатора с нагрузкой

В точке А:

$$U_{н min} = U_{ст min} = 6,2 B, I_{н min} = \frac{U_{н min}}{R_H} = \frac{6,2}{400} = 15,5 mA,$$

$$E_{min} = U_{н min} + (I_{н min} + I_{ст min})R_B = 6,2 + (15,5 + 10) \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 8,75 B$$

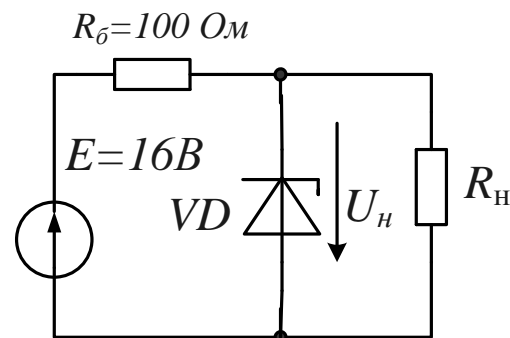
В точке В:

$$E_{max} = U_{н max} + (I_{н max} + I_{ст max})R_B = 6,26 + (15,6 + 60) \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 13,82 B.$$

Коэффициент стабилизации:

$$K_{ст} = \frac{\frac{\Delta U_H}{U_{HO}}}{\frac{\Delta U_{BX}}{U_{BXO}}} = \frac{\frac{0,06}{6,22}}{\frac{11,5 - 7}{9}} = \frac{0,0096}{0,388} = 0.025$$

Пример 5



Изменение сопротивления нагрузки
В каких пределах может меняться сопротивление нагрузки, чтобы напряжение находилось на участке стабилизации ?

Решение

1. В точке А:

Ток через балластное сопротивление:

$$I_{вхА} = \frac{E - U_{ст min}}{R_B} = \frac{16 - 6,2}{100} = 98 \text{ мА}.$$

Ток в нагрузке: $I_{нА} = I_{вхА} - I_{ст min} = 88 \text{ мА}.$

$$R_{нА} = \frac{U_{ст min}}{I_{нА}} = 70,45 \text{ Ом}.$$

$$2. \text{ В точке В: } I_{\text{вхВ}} = \frac{E - U_{\text{см max}}}{R_{\text{Б}}} = \frac{16 - 6,26}{100} = 97,4 \text{ мА},$$

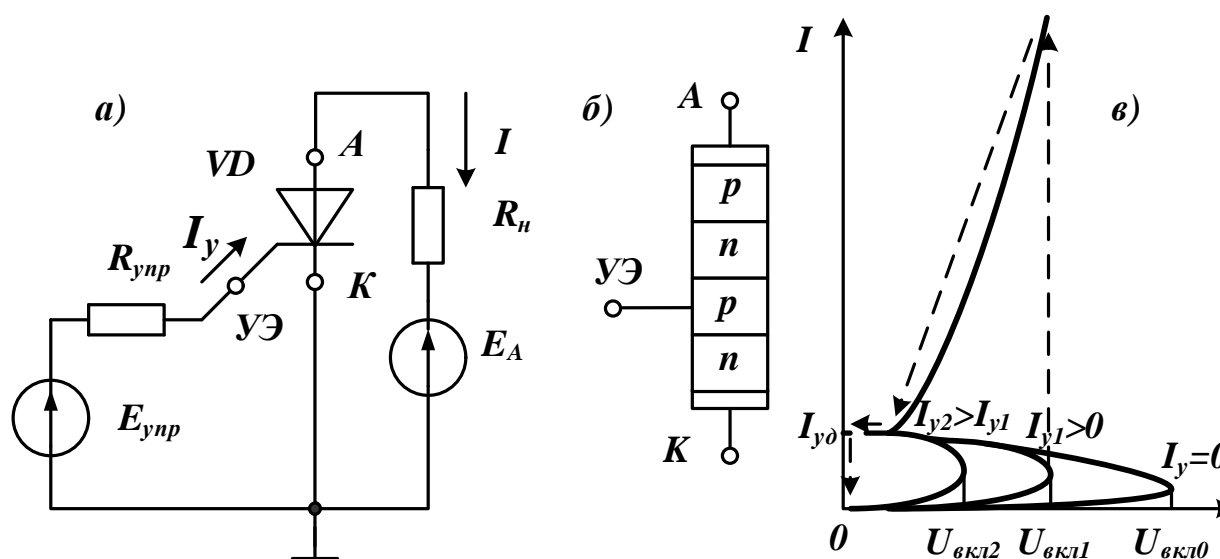
$$I_{\text{нВ}} = I_{\text{вхВ}} - I_{\text{см max}} = 37,4 \text{ мА},$$

$$R_{\text{нВ}} = \frac{U_{\text{см max}}}{I_{\text{нВ}}} = \frac{6,26}{0,0374} = 167,37 \text{ Ом}.$$

Ответ: сопротивление нагрузки может меняться от 70 до 167 Ом.

Тиристоры

Тиристором называют полупроводниковый прибор с двумя устойчивыми состояниями и тремя или более последовательно включенными p - n переходами. Кроме анодного и катодного выводов управляемый тиристор имеет еще вывод управляющего электрода УЭ. УЭ может подключаться к ближайшей к катоду p - области (тиристор с катодным управлением) или к ближайшей к аноду n - области (тиристор с анодным управлением).



Основные параметры тиристоров:

Напряжение на открытом тиристоре $U_{отк} = 1 - 1,5 В$;

Максимальный допустимый ток анода $I_{a\max}$;

Управляющее напряжение и ток U_y, I_y ;

Время включения и выключения $t_{\text{вкл}}, t_{\text{выкл}}$;

Допустимое обратное напряжение: $U_{\text{обр}\max}$.

ВАХ тиристора

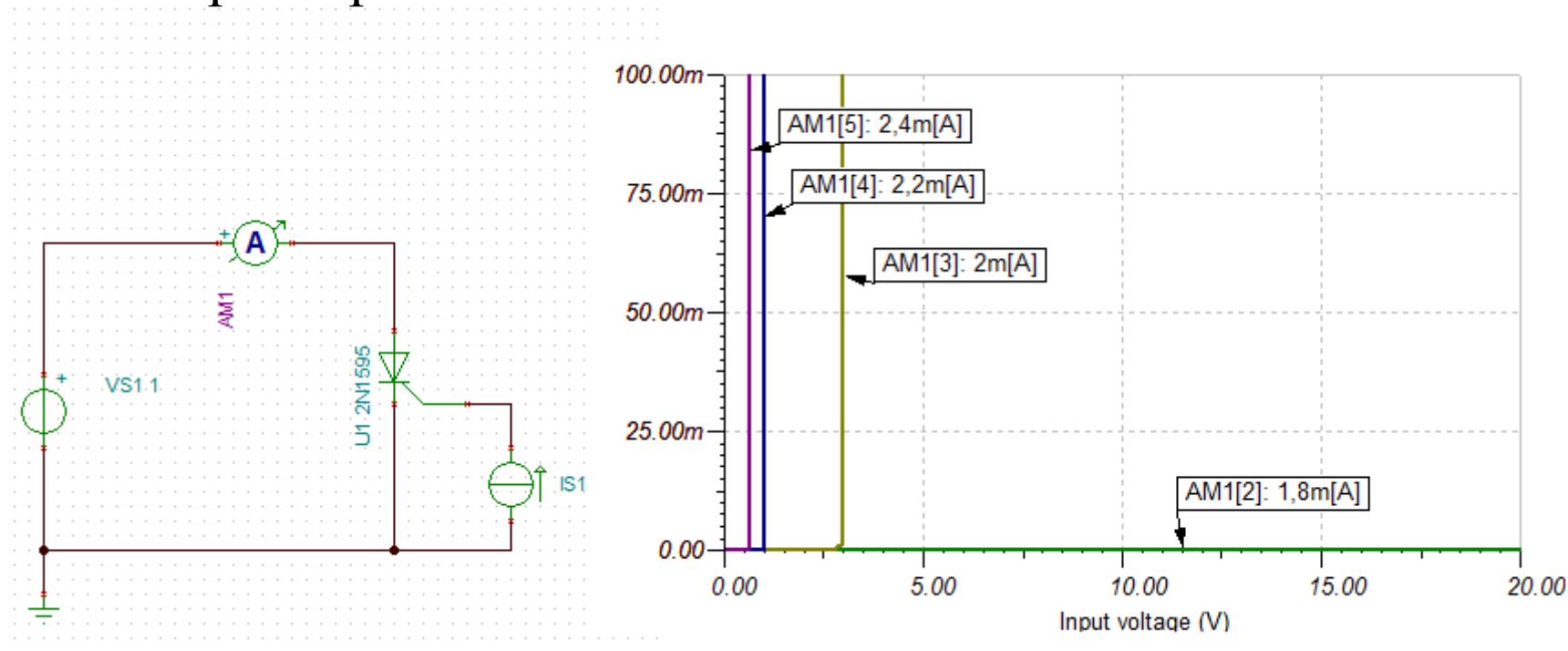


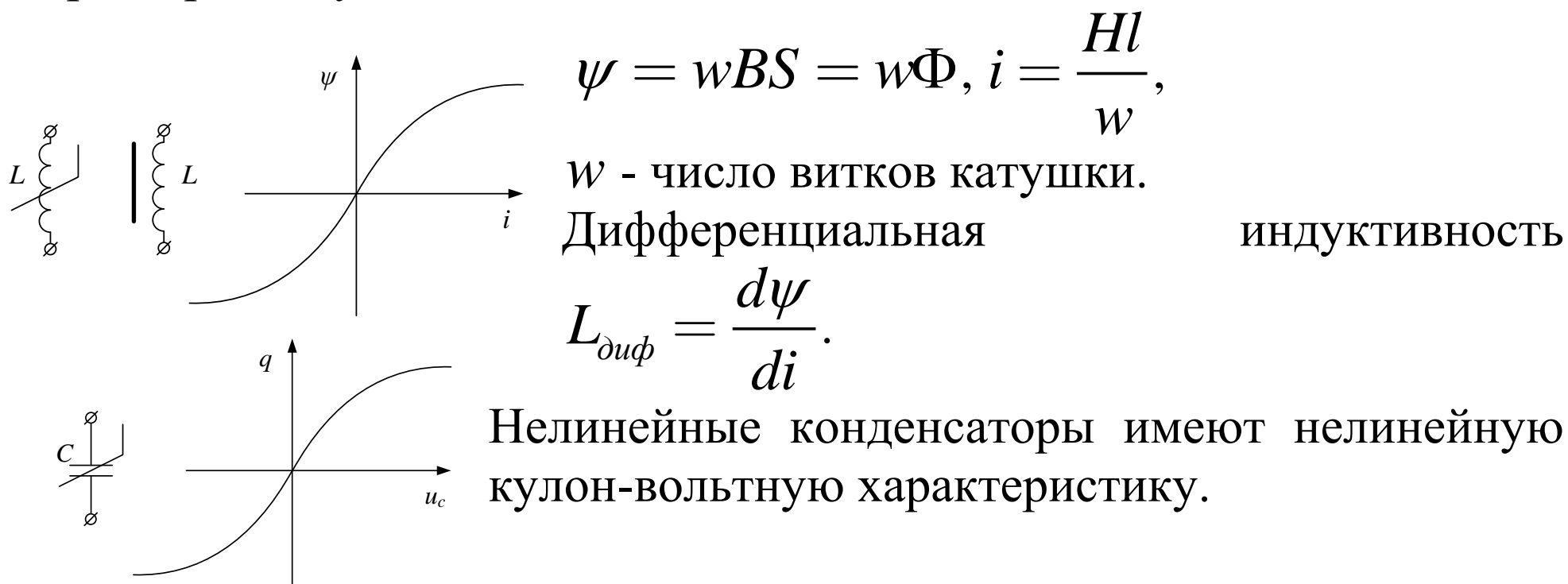
Рис.2.14

Нелинейные цепи переменного тока

В цепях переменного тока применяют резистивные, индуктивные и емкостные элементы.

Нелинейные резистивные элементы: нелинейные резисторы, диоды, стабилитроны, транзисторы.

Нелинейные индуктивности имеют нелинейную вебер-амперную характеристику.



Дифференциальная емкость $C_{\text{диф}} = \frac{dq}{du_C}$.

Свойства нелинейных цепей на переменном токе

1. Происходит преобразование (искажение) спектра сигнала.
 2. Режим зависит от предшествующего состояния.
 3. Возможно умножение частоты и появление кратных гармоник ($\omega, 3\omega, 5\omega \dots$).
 4. Возможно деление частоты ($\omega, \frac{\omega}{3}, \frac{\omega}{5} \dots$).
 5. Возможна генерация колебаний (автоколебания, автогенераторы).
 6. Модуляция колебаний (управление амплитудой, фазой и частотой).
- Пример искажения формы тока в нелинейной цепи.

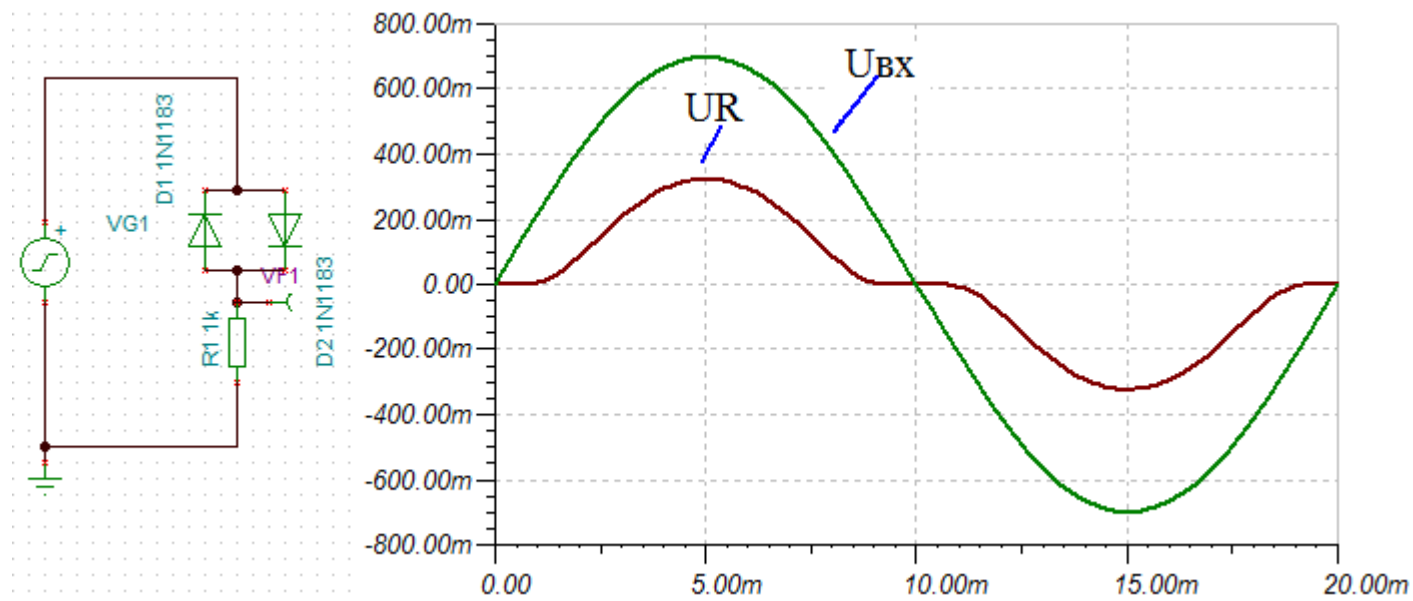
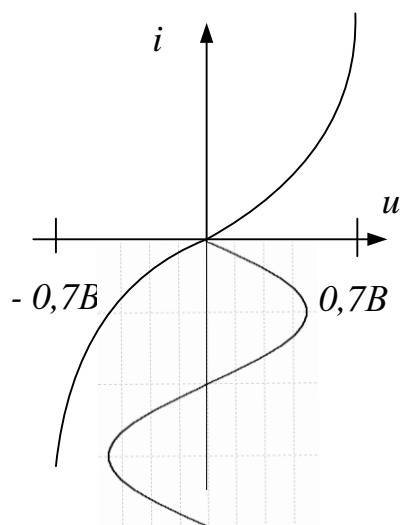
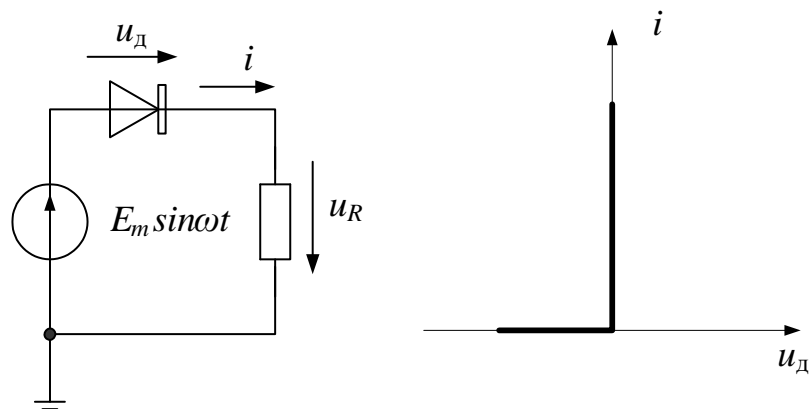


Рис.2.15

Выпрямление переменного напряжения с помощью диодов

Однополупериодный выпрямитель



ВАХ идеального диода
 $iR + u_d = E_m \sin \omega t$.

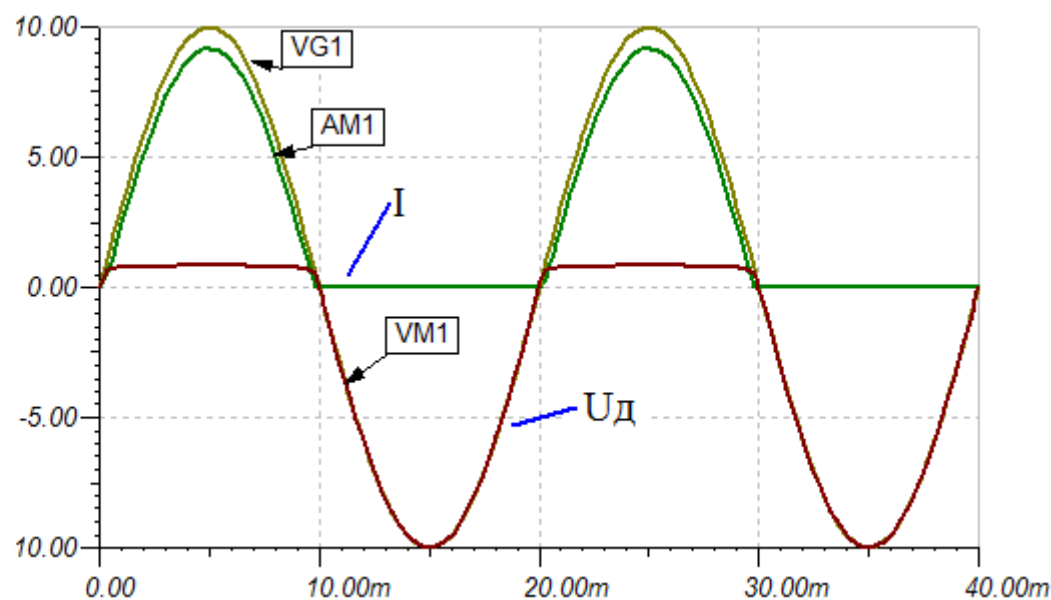
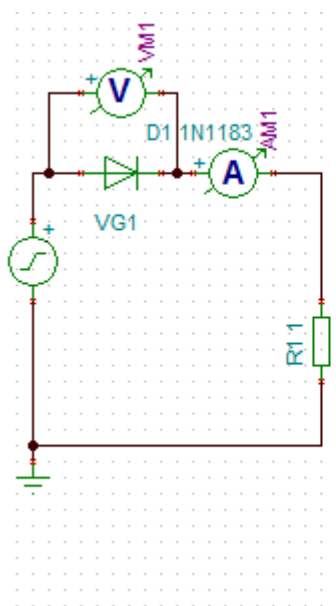


Рис.2.16

Ток имеет пульсирующий характер. Постоянные составляющие:

$$I_0 = \frac{I_m}{\pi}, \quad U_0 = \frac{U_m}{\pi}.$$

Двухполупериодное выпрямление

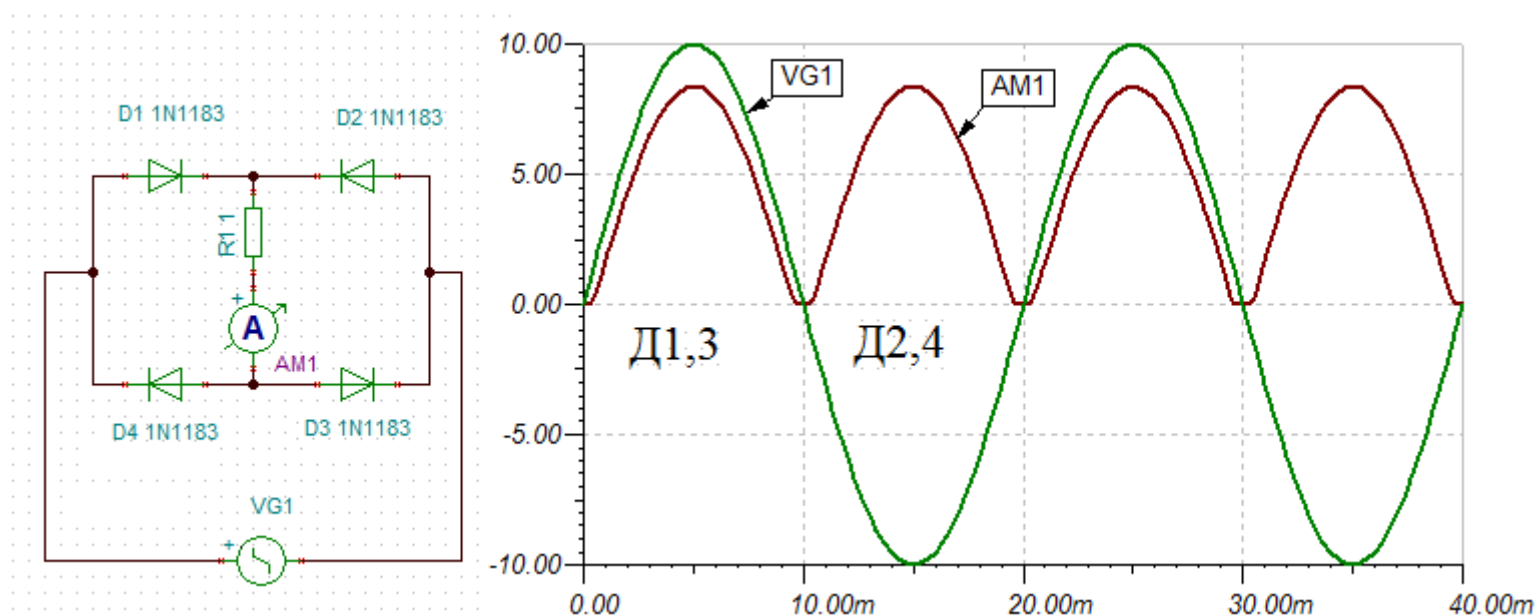


Рис.2.17

Постоянные составляющие $I_0 = \frac{2I_m}{\pi}$, $U_0 = \frac{2U_m}{\pi}$.

Сглаживание пульсаций выпрямленного тока

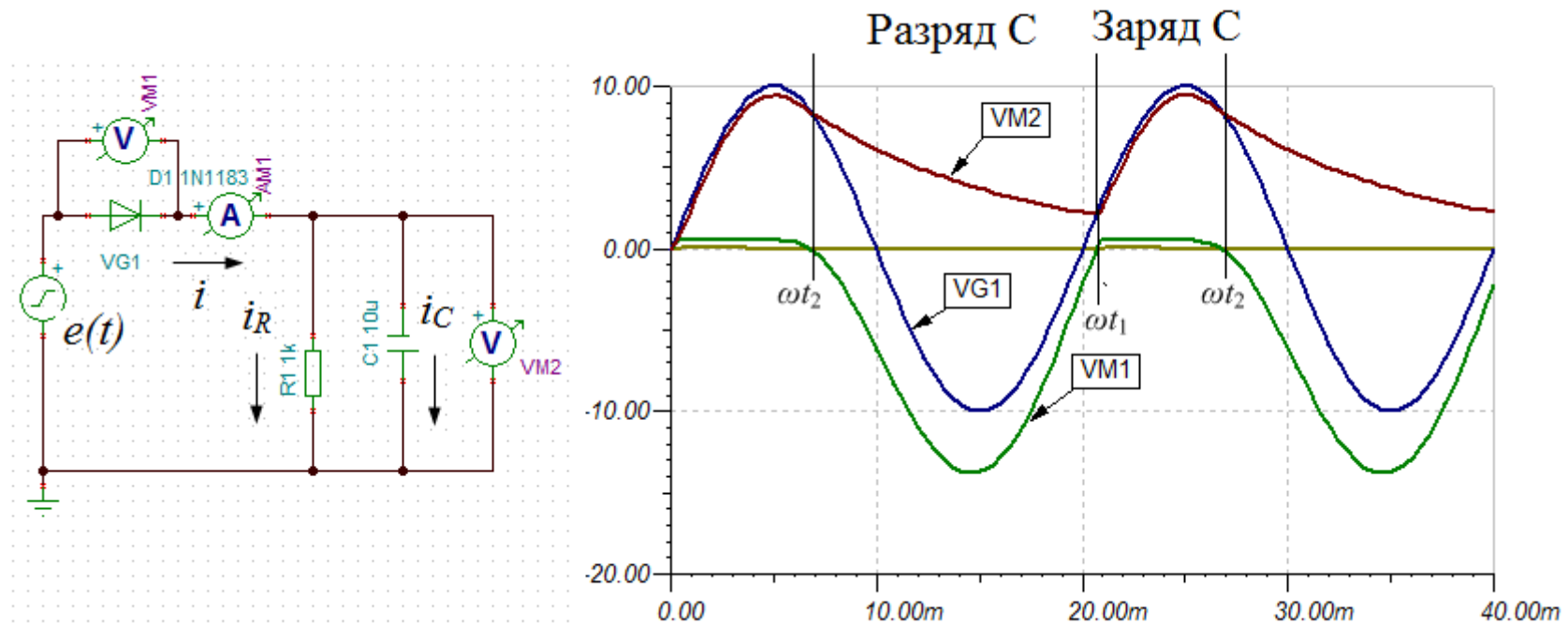


Рис.2.18

Уравнения выпрямителя:

$$i = i_C + i_R, \quad u_d + u_C = E_m \sin \omega t, \quad i_R = \frac{u_C}{R}, \quad i_C = C \frac{du_C}{dt},$$

$$u_d = E_m \sin \omega t - u_C.$$

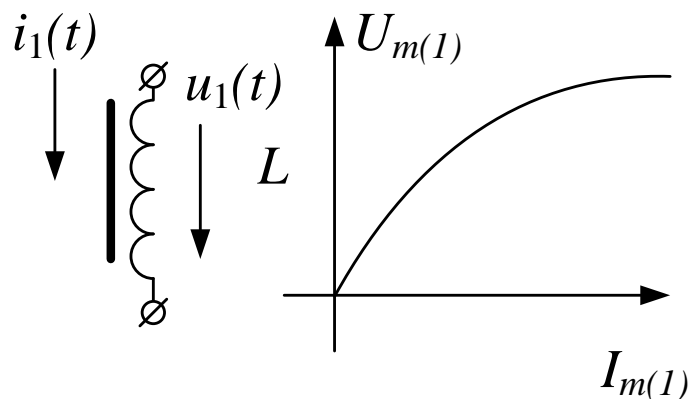
В момент ωt_2 становится $e(t) < u_C$, диод закрывается и происходит разряд емкости.

В момент ωt_1 становится $e(t) > u_C$. Диод открывается и происходит заряд емкости.

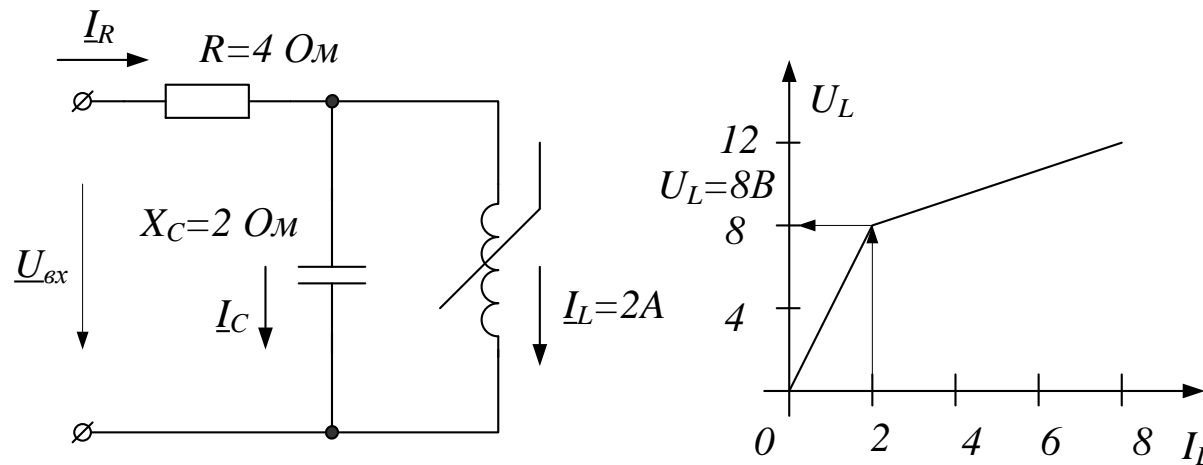
Если увеличивать C , постоянная составляющая $U_0 \rightarrow E_m$.

Расчет нелинейной цепи по первой гармонике напряжения и тока

Находят нелинейную зависимость напряжения первой гармоники от тока первой гармоники несинусоидального сигнала. Используют эту ВАХ при расчете.



Пример 6



Задан ток в индуктивности.

Найти напряжение на входе и построить векторную диаграмму.

Решение.

1. Считаем, что $\underline{I}_L = 2e^{j0^0} \text{ А}$.
2. По ВАХ для тока $I_L = 2 \text{ А}$ находим действующее значение напряжения $U_L = 8 \text{ В}$.

$$3. \text{ Находим: } \underline{U}_C = \underline{U}_L = +j8 \text{ В}, \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{-j2} = -4 \text{ А},$$

$$\underline{I}_R = \underline{I}_L + \underline{I}_C = 2 - 4 = -2 \text{ А}, \underline{U}_R = R \cdot \underline{I}_R = -8 \text{ В}.$$

$$\underline{U}_{\Sigma} = \underline{U}_R + \underline{U}_L = -8 + j8 = 8\sqrt{2}e^{j135^\circ} \text{ B.}$$

4. Векторная диаграмма

