

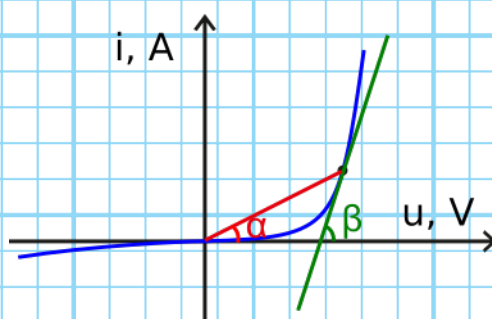
Нелинейни елементи в променливотокови (АС) вериги

Нелинейни елементи

Динамично съпротивление

В рамките на тази дисциплина вече разгледахме поведението на двуполусните нелинейни елементи в постояннотокови (DC) вериги. Там основната задача е да се определи работната точка на нелинейния елемент, т.е. статичното съпротивление на нелинейния елемент, за конкретните ток и напрежение:

$$R_{CT} = \frac{1}{\tan \alpha}$$



В променливотоковите вериги намира приложение т.н. диференциално (или динамично) съпротивление, което представлява допирателната към работната точка:

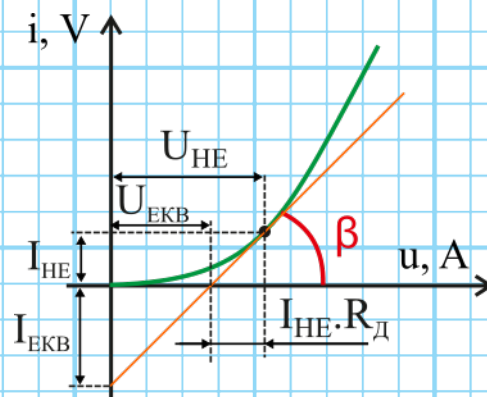
$$R_{\mathcal{D}} = \frac{du}{di} = \frac{1}{\tan \beta}$$

Смисълът на диференциалното съпротивление е да покаже как се променя съпротивлението, когато токовете и напреженията се изменят в малки диапазони около работната точка.

Заместващи схеми

Динамичното съпротивление около дадена работна точка може да се използва за създаване на еквивалентни заместващи схеми на променливотоковите вериги, без наличие на нелинеен елемент.

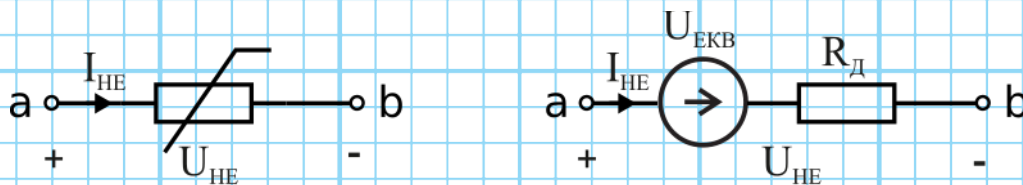
Нека разгледаме следната графика:



За нея можем да запишем следното уравнение:

$$U_{HE} = U_{EKB} + I_{HE} \frac{1}{\tan \beta} = U_{EKB} + I_{HE} \cdot R_D$$

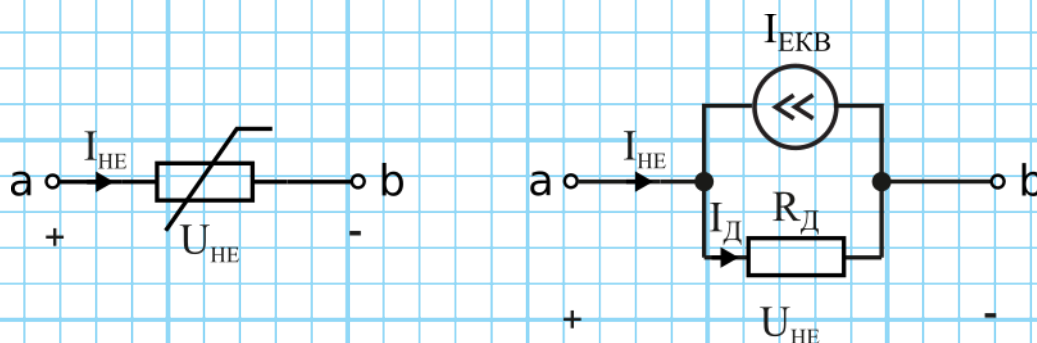
С други думи можем да създадем следната еквивалентна схема на нелинейния елемент за диференциално съпротивление R_D :



По аналогичен начин можем да запишем:

$$I_{HE} = U_{HE} \cdot \tan \beta - I_{EKB} = \frac{U_{HE}}{R_D} - I_{EKB}$$

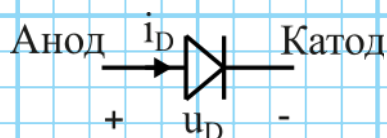
Последното уравнение ни позволява да създадем още една еквивалентна заместваща схема без нелинеен елемент:



Създаването на еквивалентни линейни схеми позволява да се прилагат всички методи за анализ на електрическата верига.

Модели на диод

Изправителният диод е най-често срещания нелинеен елемент, чиито изводи се наричат Анод (А) и Катод (К).



Основното свойство на изправителния диод е, че той пропуска ток в права посока (от А към К) и не пропуска ток в обратна посока (от К към А).

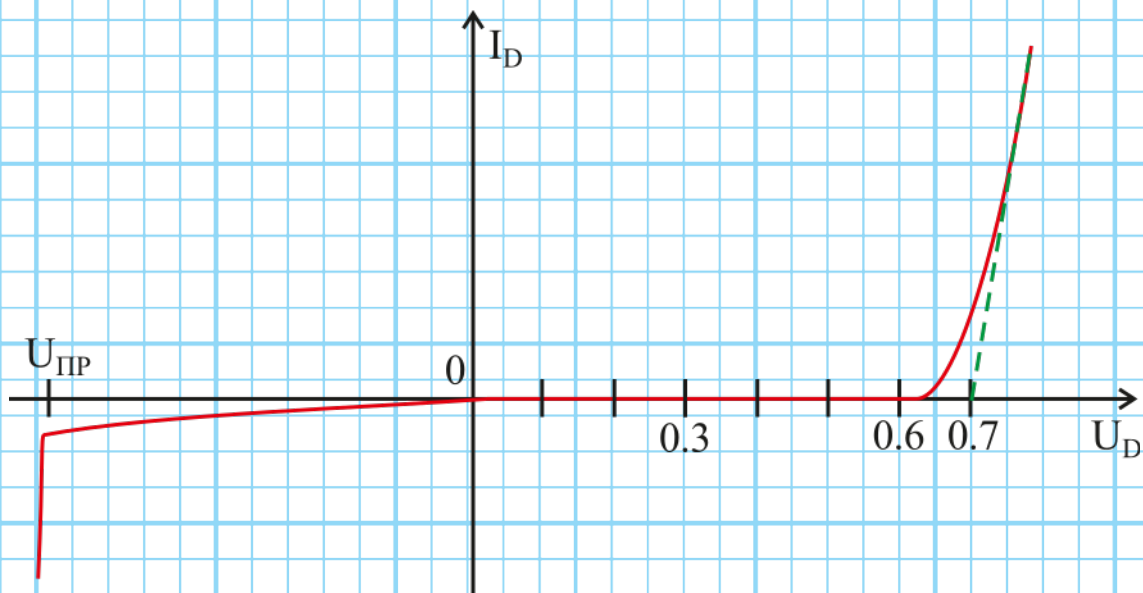
В зависимост от полярността на приложеното напрежение, казваме че диодът е:

- Отпушен (свързан в права посока) при $u_D > 0$;
- Запушен (свързан в обратна посока) при $u_D < 0$;

Това свойство на диодите също така се нарича вентилен ефект.

Модел на реален диод

Диодът е полупроводников елемент, който се изпълнява на базата на материалите Силиций (Si) и Германий (Ge). Волт-амперната характеристика (ВАХ) на типичен силициев диод има следния вид:



При подаване на напрежение в права посока ($U_D > 0$), токът е пренебрежимо малък до около 0,6 V, след което започва да се увеличава експоненциално. При достигане на напрежение $U > 0,7$ V, динамичното съпротивление R_D на диода става константа.

При подаване на напрежение в обратна посока ($U_D < 0$), токът е много малък и може да се пренебрегне. При достигане на определено напрежение $U_{ПР}$, наричано пробивно, токът в обратна посока започва рязко да нараства, което може да доведе до разрушаване на диода. За силициеви диоди пробивното напрежение е обикновено в диапазона от 50 V до 200 V.

ВАХ на силициев диод може да се апроксимира математически със следната зависимост:

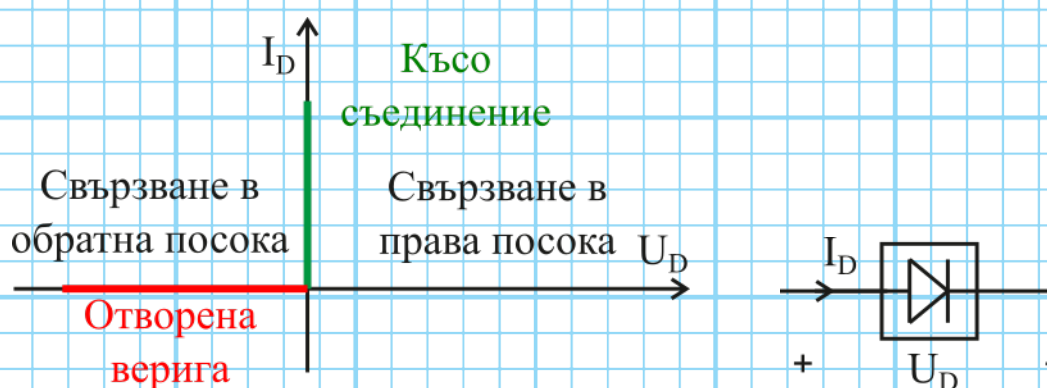
$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right)$$

където I_S и U_T са константи, характеризиращи диода. Типични стойности на тези константи са:

$$I_S = 10^{-12} \text{ A} \quad \text{и} \quad U_T = 26 \text{ mV}$$

Модел на идеален диод

ВАХ и условното означение на идеален диод са:

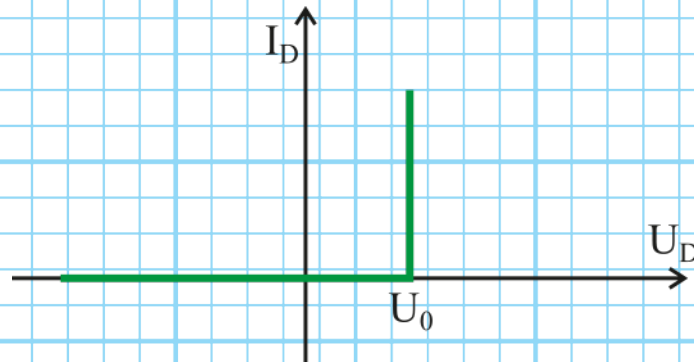


От ВАХ се вижда, че когато към идеалния диод е приложено напрежение в обратна посока, той представлява прекъснатата верига (има безкрайно голямо съпротивление) и през него не тече ток. При прилагане на напрежение в права посока, диодът представлява късо съединение (има нулево съпротивление) и върху него няма пад на напрежение.

Този опростен модел на диод представя принципното поведение на диодите, но не показва всички техни важни характеристики.

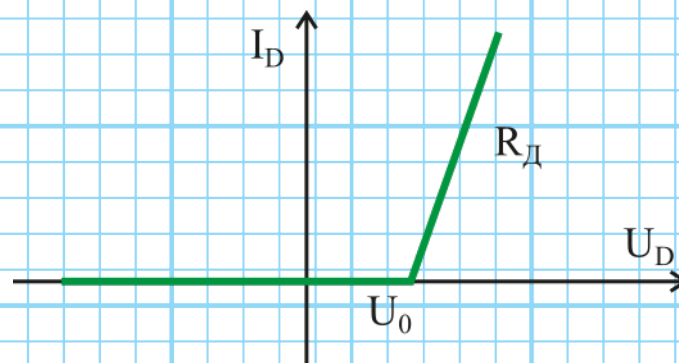
Прагов модел на диод

Както вече беше демонстрирано, през диодите не протича ток, до достигане на определено напрежение U_0 . Ето защо по-реалистичен опростен модел на диод е:



ВАХ е подобна на тази на идеалния диод, но отпушването на диода (късото съединение) започва едва при достигане на определено напрежение U_0 . За силициеви диоди, $U_0=0,7\text{ V}$, а за германиеви – $U_0=0,2\text{ V}$.

ВАХ на още по-реалистичен опростен модел на диод е:



В момента в който диодът започне да провежда ток, той има ненулево съпротивление R_D , съответстващо на динамичното съпротивление на реалния диод в линейния участък. Това е подобрен модел, повлиян от реалния модел на диод.

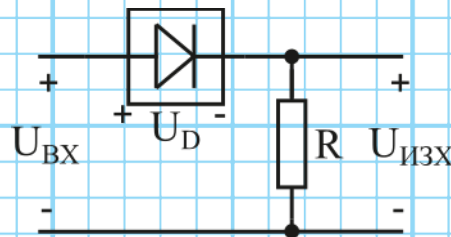
При проектиране на схеми, през началната фаза е удобно да се използва някой от опростените модели на диод, за предварителни изчисления, но при финализиране на схемата следва да се използва модел на реален диод.

Диоди в променливотокови вериги

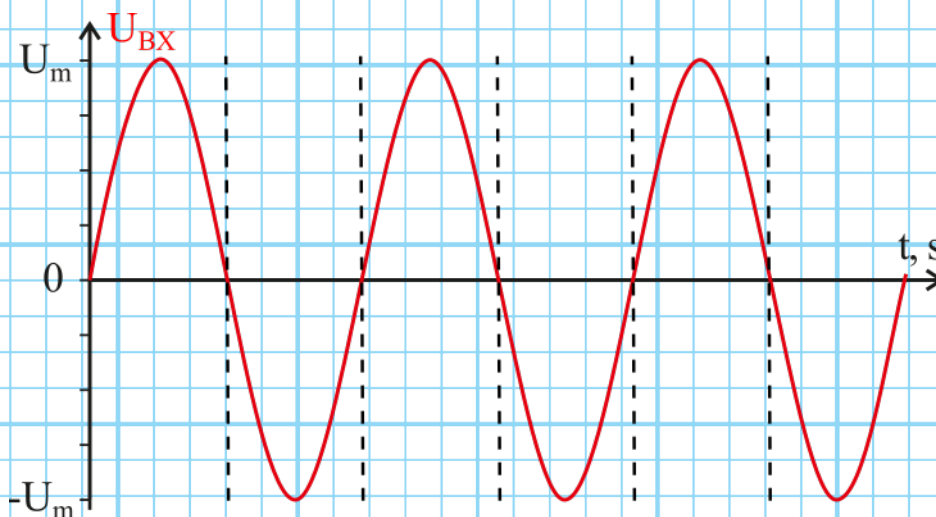
Еднополупериоден токоизправител

Анализ с модела на идеален диод

Нека да разгледаме следната схема с идеален диод.



Тя се захранва от входно напрежение U_{BX} , със синусоидална форма, както е показано отдолу:



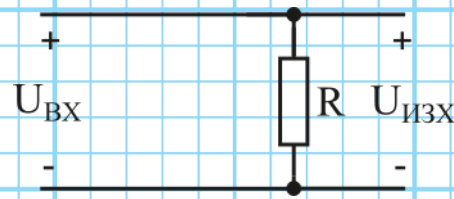
За схемата можем да запишем следното уравнение по ВЗК:

$$U_{BX} = U_D + U_R = U_D + U_{ИЗХ}$$

Ще анализираме веригата за две ситуации:

Ситуация 1. През първия полупериод на синусоидата, когато $U_{BX} > 0$, идеалният диод работи в режим на право свързване, а падът на напрежение върху него е

нула. Тази ситуация може да се представи със следната еквивалентна заместваща схема:



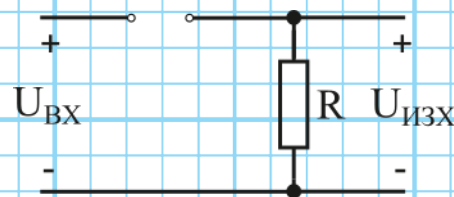
Следователно горното уравнение става:

$$U_{ВХ} = U_D + U_{ИЗХ} = 0 + U_{ИЗХ} = U_{ИЗХ}$$

т.е. изходното напрежение е равно на входното.

Ситуация 2. През втория полупериод на синусоидата идеалният диод работи в режим на обратно свързване, т.е. неговото съпротивление е безкрайно голямо.

Еквивалентната схема за тази ситуация е:

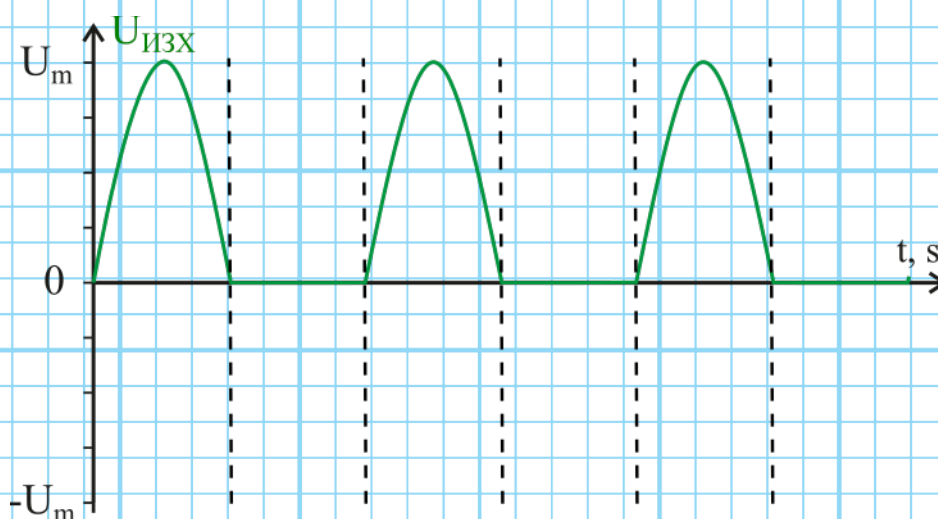


Следователно уравнението по ВЗК става:

$$U_{ВХ} = U_D + U_{ИЗХ} = U_D + 0$$

т.е. изходното напрежение става $U_{ИЗХ} = 0$.

Въз основа на горните съждения можем да начертаем как ще изглежда изходното напрежение $U_{ИЗХ}$:



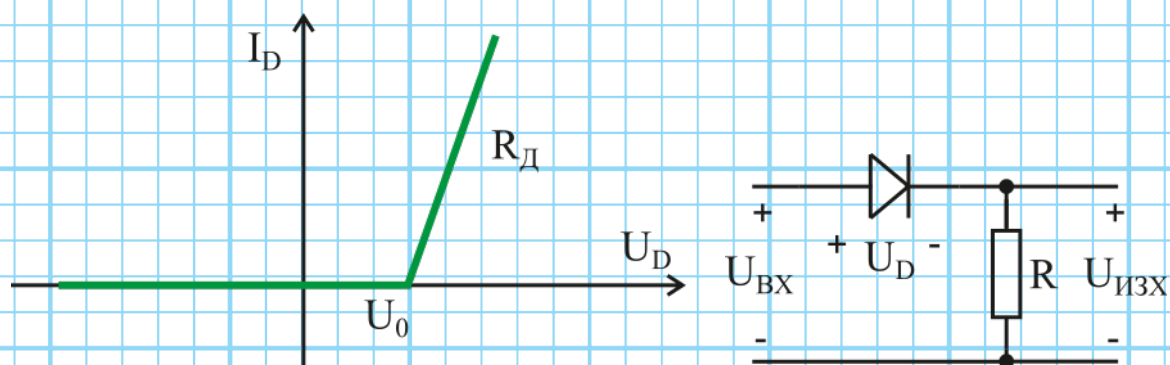
Такава схема се нарича еднополупериоден токоизправител защото тя пропуска единствено положителната половина на входното напрежение. На практика токоизправителят преобразува синусоидален напрежение, чиято средна стойност е 0, към право (DC) напрежение, чията полярност не се променя и има ненулева средна стойност.

Забележете, че постоянно напрежение и право напрежение са различни понятия:

- **Постоянното напрежение** има големина, която е постоянна, и не се изменя във времето;
- **Правото напрежение** има винаги една и съща посока (т.е. посоката на движение на токоносителите не се изменя), но големината му се изменя.

Анализ с праговия модел на диод

Нека разгледаме същата схема, но този път ще използваме праговия модел на диод:



Уравнението по ВЗК е:

$$U_{BX} = U_D + U_{ИЗХ}$$

Отново ще анализираме схемата за две ситуации:

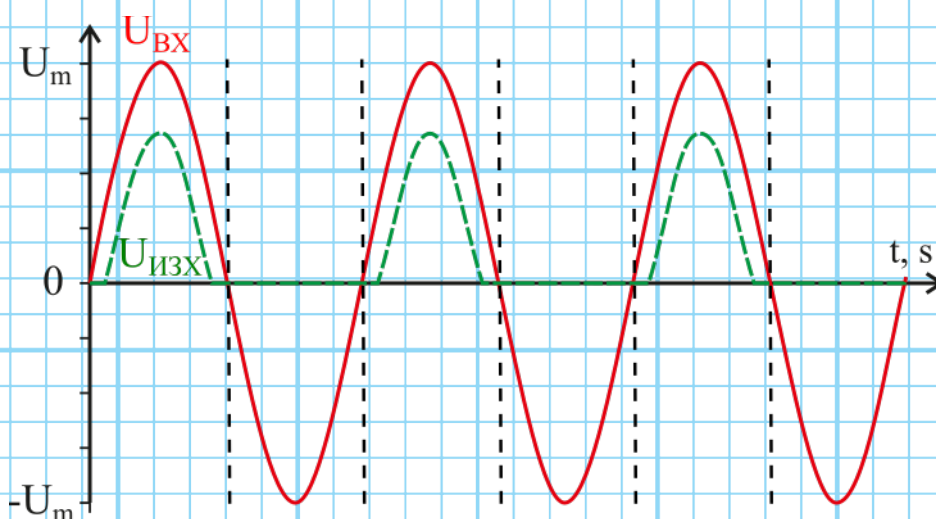
Ситуация 1. Когато входното напрежение е по-голямо от праговото на диода ($U_{BX} > U_0$), диодът има ненулево съпротивление, т.е. $U_D \neq 0$. Следователно съгласно ВЗК, входното напрежение се разделя между диода и резистора:

$$U_{ИЗХ} = U_{BX} - U_D$$

Ситуация 2. Когато входното напрежение е по-малко от праговото на диода ($U_{BX} < U_0$), диодът представлява отворена верига, т.е. през резистора не тече ток, а изходното напрежение е нула:

$$U_{BX} = U_D + U_{ИЗХ} = U_D + 0 \quad \rightarrow \quad U_{ИЗХ} = 0$$

Времедиagramата на входното и изходното напрежение има следния вид:

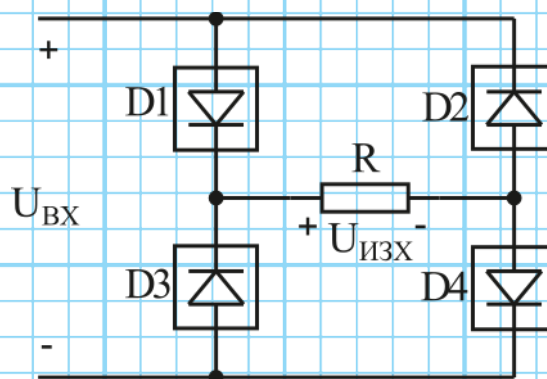


Забележете, че през положителната част на полувърлната изходното напрежение е не само по-малко от входното, но също така започва по-късно и свършва по-рано от него, което се дължи на праговото напрежение на диода U_0 .

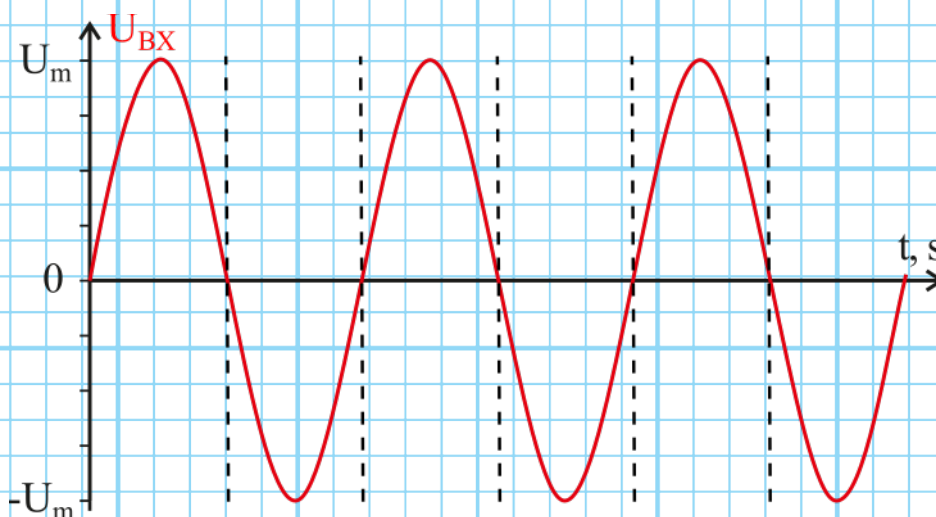
Двуполупериоден токоизправител

Анализ с модела на идеален диод

Нека да разгледаме следната схема с идеални диоди:

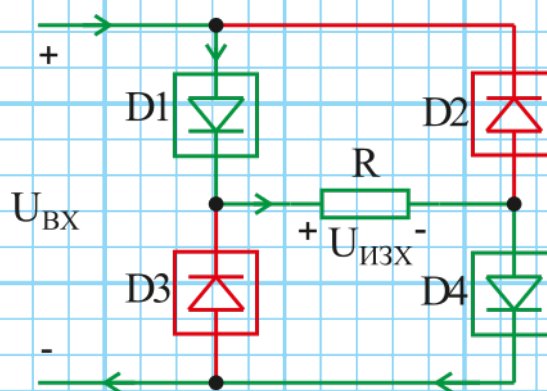


Входното напрежение отново е синусоидално, а изходното напрежение е падът на напрежението върху резистора R :



Ще анализираме схемата за две ситуации:

Ситуация 1. През положителния полупериод на синусоидата ($U_{BX} > 0$) източникът създава ток, с посока от плюс (+) към минус (-). Това означава, че диодите D1 и D4 са свързани в права посока, а диодите D2 и D3 – в обратна посока:



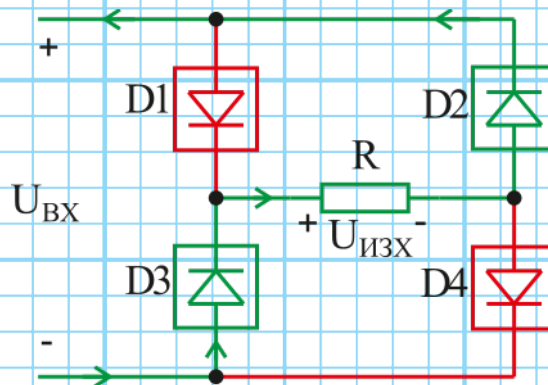
Следователно можем да запишем следното уравнение по ВЗК:

$$U_{BX} = U_{D1} + U_{D4} + U_{ИЗХ}$$

Като се има предвид, че двата диода D1 и D4 са идеални и отпушени, тяхното съпротивление е 0, т.е.:

$$U_{ИЗХ} = U_{BX} - U_{D1} - U_{D4} = U_{BX}$$

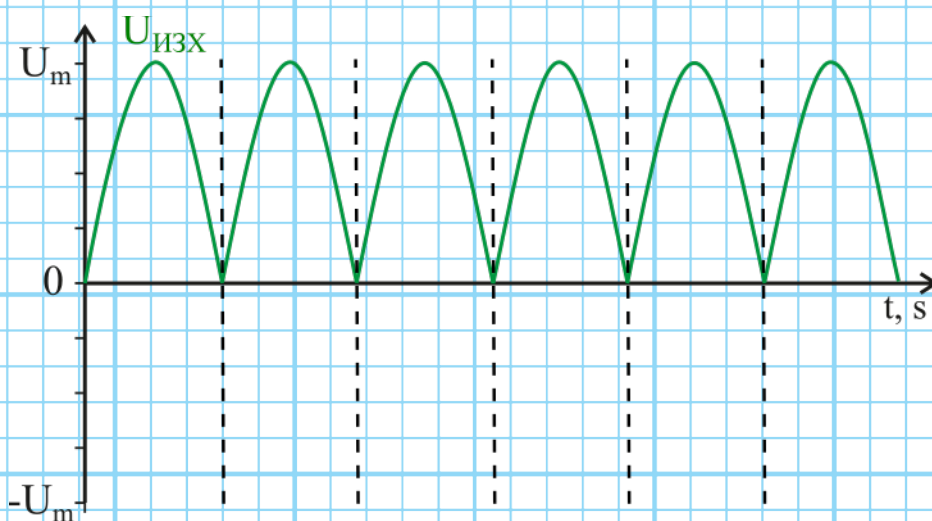
Ситуация 2. През отрицателния полупериод на синусоидата ($U_{BX} < 0$) източникът създава ток, с посока от минус (-) към плюс (+). Това означава, че диодите D1 и D4 са запушени, а диодите D2 и D3 са отпушени:



Аналогично на предходната ситуация, можем да запишем уравнение по ВЗК и да определим изходното напрежение:

$$-U_{BX} = U_{D3} + U_{D4} + U_{ИЗХ} \quad \rightarrow \quad U_{ИЗХ} = -U_{BX} - U_{D3} - U_{D4} = -U_{BX}$$

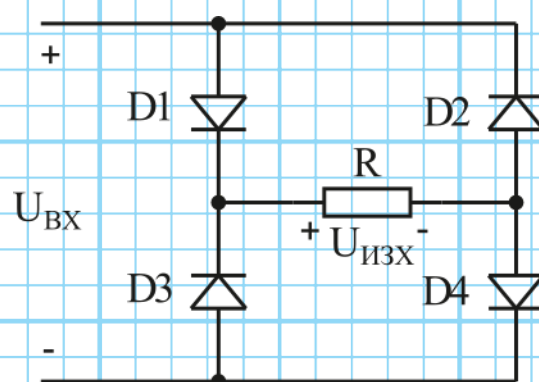
Забележете, че и при двете ситуации токът тече през резистора с една и съща посока. С други думи тази схема пропуска и двата полупериода на синусоидата на източника и винаги с положителна посока. Изходното напрежение (напрежението върху резистора) е:



Тази схема се нарича двуполупериоден токоизправител, тъй като тя „изправя“ (прави положителни) и двата полупериода на синусоидата. На практика тази схема има двойно по-голяма ефективност от еднополупериодния токоизправител.

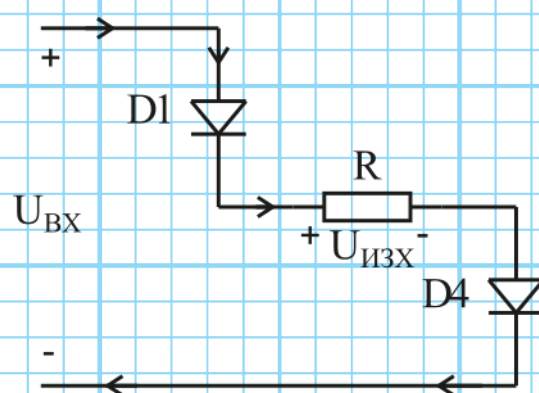
Анализ с праговия модел на диод

Нека да разгледаме същата схема, но този път диодите да са представени с по-реалистичния прагов модел:



Отново ще я разгледаме при две ситуации:

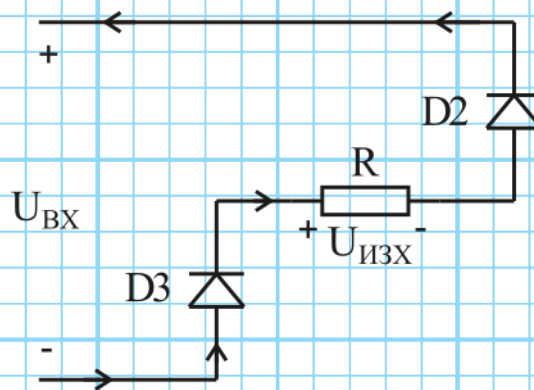
Ситуация 1. Когато входното напрежение е по-голямо от праговото на диода ($U_{ВХ} > U_0$), диодите D1 и D4 са отпушени, а D2 и D3 – запушени. Можем да създадем следната еквивалентна заместваща схема:



Следователно, ако приемем че двата диода са идентични ($U_{D1} = U_{D4} = U_D$), от уравнението по ВЗК можем да получим изходното напрежение:

$$U_{BX} = U_{D1} + U_{D4} + U_{ИЗХ} = 2 \cdot U_D + U_{ИЗХ} \rightarrow U_{ИЗХ} = U_{BX} - 2 \cdot U_D$$

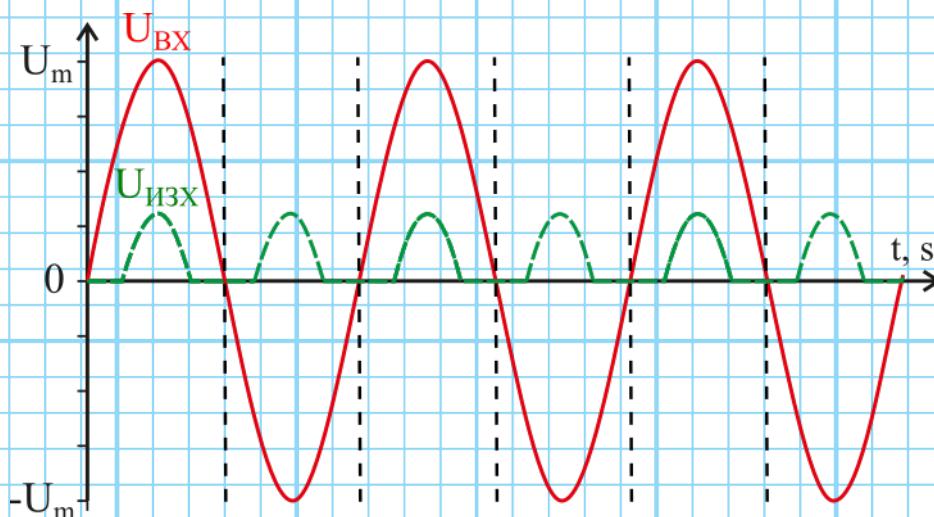
Ситуация 2. Когато входното напрежение е по-малко от праговото на диода ($U_{BX} < U_0$), диодите D2 и D3 са отпушени, а D1 и D4 – запушени. Еквивалентната заместваща схема е:



Следователно изходното напрежение върху резистора е:

$$-U_{BX} = U_{D1} + U_{D2} + U_{ИЗХ} \rightarrow U_{ИЗХ} = -U_{BX} - 2 \cdot U_D$$

Времедиagramата на входното и изходно напрежения е:



Освен че изходното напрежение е намалено с $2 \cdot U_D$, сравнено с входното напрежение, то също така започва да нараства едва при $\pm U_{BX} > 2 \cdot U_0$, и престава да намалява $\pm U_{BX} < 2 \cdot U_0$.