

 **Технически университет – София**

Факултет по електронна техника и технологии

Катедра „Силова електроника”

**Ключови стабилизатори на постоянно напрежение.
Обратен повишаващ преобразувател
(step-up, или още boost converter).**

Съдържание:

- 1) Класификация.**
- 2) Принцип на действие на ключовите стабилизатори на постоянно напрежение.**
- 3) Схема на ключов стабилизатор на постоянно напрежение - обратен повишаващ преобразувател (основна схема).**
- 4) Основни електрически зависимости.**
- 5) Симулационни изследвания.**

1) Класификация:

А) Според начина на натрупване на енергията и предаването и към изхода:

- прав преобразувател;
- обратен преобразувател;
- комбиниран преобразувател.

Б) Според регулировъчната характеристика:

- понижващ преобразувател;
- повишаващ преобразувател;
- понижаваш и повишаващ.

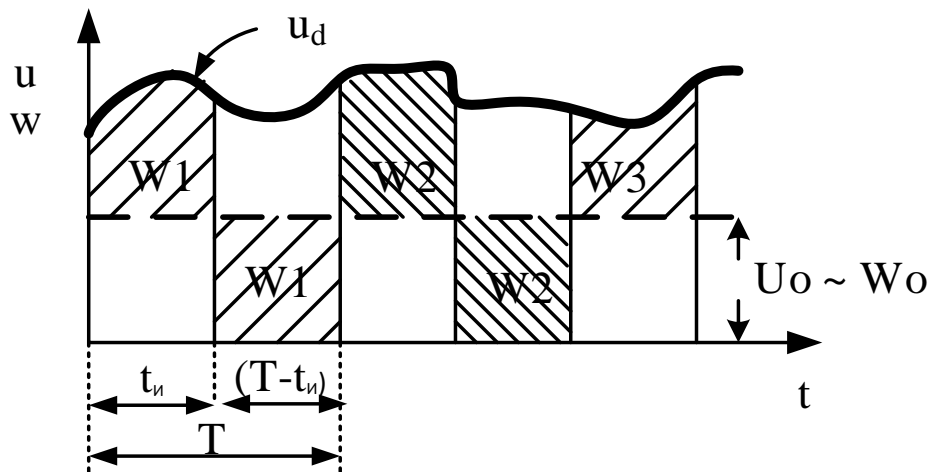
В) Според диапазона на регулиране:

- с пълно регулиране;
- с непълно регулиране.

Г) Според наличието на електрическа връзка между входа и изхода:

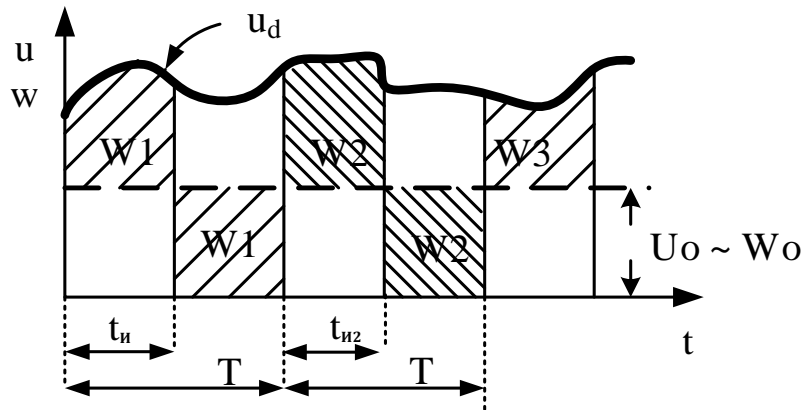
- с директна връзка;
- с изолиран вход и изход.

2) Принцип на действие на ключовите стабилизатор на постоянно напрежение



За времевия интервал t_n , стабилизаторът консумира енергия от захранващия източник, отдава част от нея в товара, а част съхранява в реактивни елементи (дросел и кондензатор). През времевия интервал $(T-t_n)$, не се консумира енергия от захранващия източник, а съхранената в реактивните елементи енергия се отдава в товара. По този начин, като се регулира коефициентът на запълване $\delta = t_n/T$ се стабилизира изходното напрежение.

При ключовите стабилизатори, регулиращият елемент (транзисторът) работи в ключов режим. Загубите в него са от пада на напрежение върху него при включено състояние и от превключване. Поради това, ключовите стабилизатори са с висок коефициент на полезно действие. При някои стабилизатори, коефициентът на полезно действие $\eta > 97\%$.



u_d – Входно напрежение на стабилизатора.

U_0 – Изходно напрежение на стабилизатора.

W_1, W_2, W_3 - Енергия натрупана в реактивни елементи при консумирането от захранващия източник и отдавана в товара през времеви интервал, когато не се консумира от захранващия източник.

Полезна енергия отдавана в товара – W_0

$$W_0 = \int_0^t U_0 \cdot i_0 dt$$

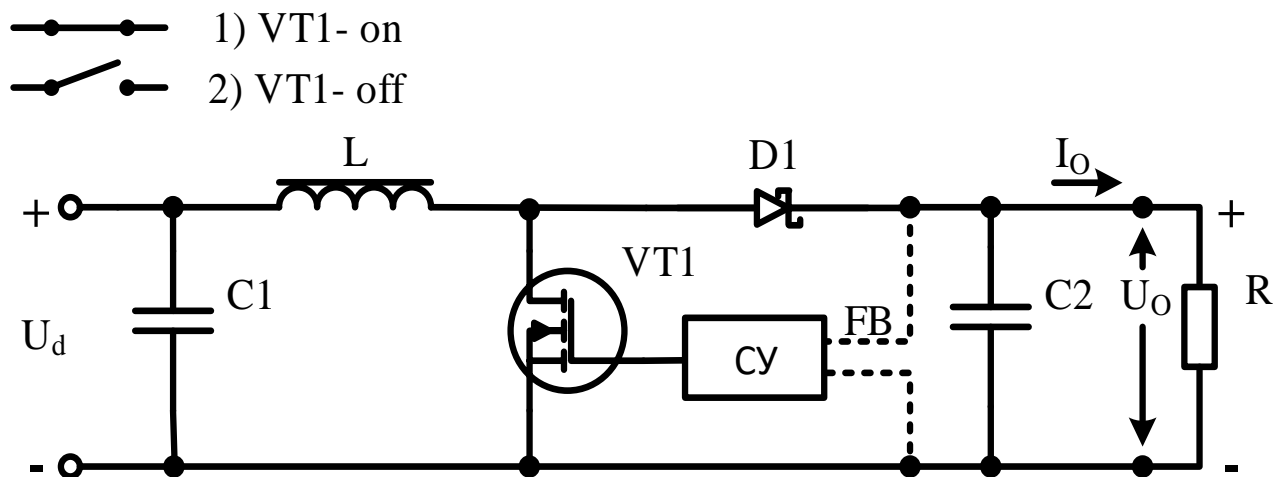
Енергия консумирана от захранващия източник - W_d

$$W_d = \int_0^t u_d \cdot i_d dt$$

Коефициент на полезно действие на стабилизатора - η

$$\eta = \frac{W_0}{W_d}$$

3) Схема на ключов стабилизатор на постоянно напрежение – обратен повишаващ преобразувател (основна схема)



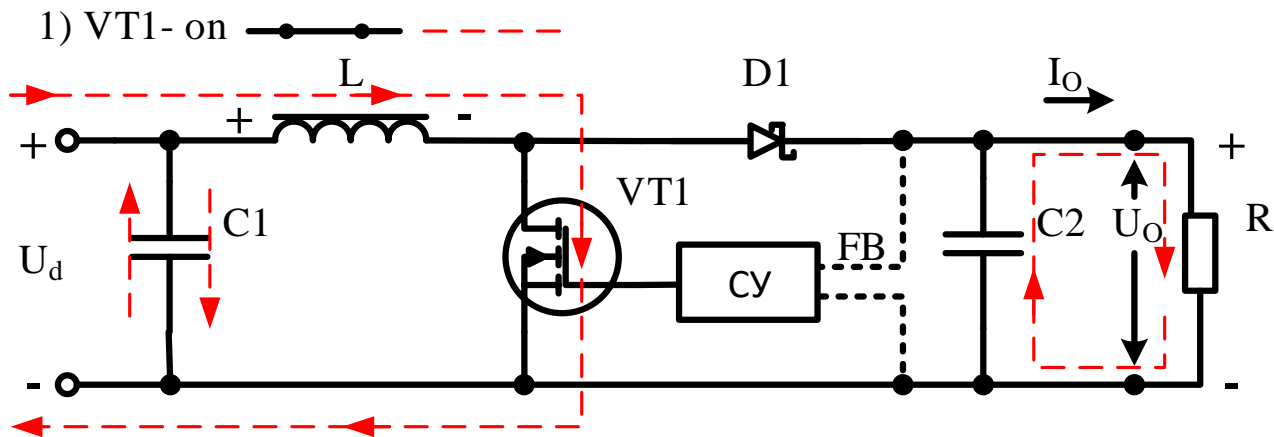
VT1 – Транзистор, работещ в ключов режим. Може да се представи като идеален ключ с две състояния:

- наситено състояние (затворен ключ; VT1-on);
- запушен транзистор (отворен ключ; VT1-off).

CU – Система за управление. Системата за управление определя времето през което ключът е затворен и периода на превключване на ключа.

FB – Обратна връзка по напрежение.

Контур на предаване на енергията при затворен ключ (VT1-on)



VT1 – on: При затворен ключ се консумира енергия от захранващия източник и се натрупва в дросела L . Кондензаторът $C1$ се зарежда и разрежда. Съхранената в кондензатора $C2$ енергия от предходния интервал се отдава в товара, при което контурът на товарния ток I_o е $C2 - R$. Тъй като диодът $D1$ е обратно поляризиран (анодът му е свързан към шината с отрицателен потенциал през ключа $VT1$), той е запушен, чрез което се предотвратява разреждане на кондензатора $C2$ през затворения ключ $VT1$.

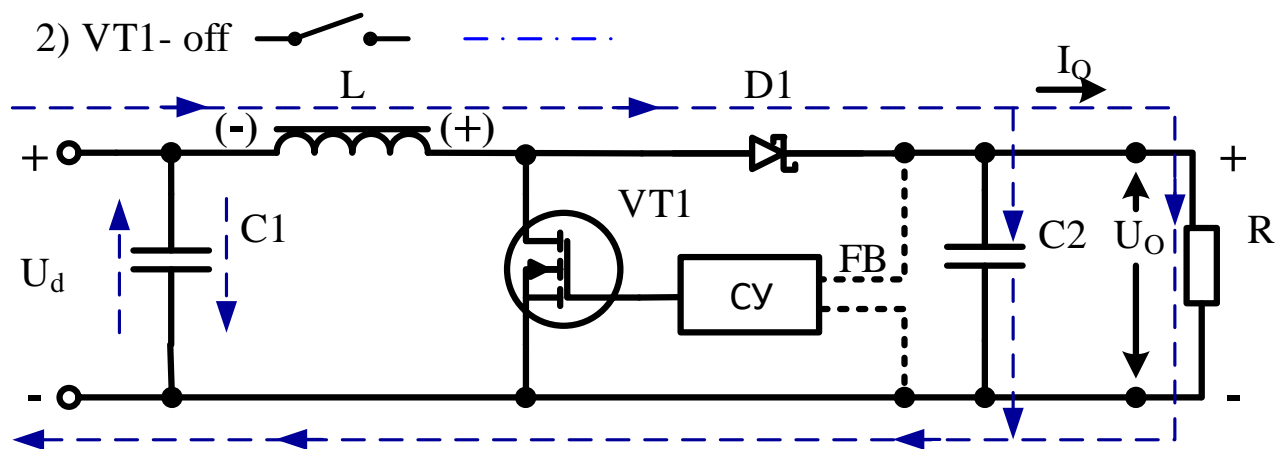
Поради това, че при затворен ключ се натрупва енергия, а при отворен ключ се отдава към товара, схемата реализира обратен преобразувател.

U_d – Входно постоянно напрежение.

U_o – Изходно постоянно напрежение.

I_o – Товарен ток.

Контур на предаване на енергията при отворен ключ (VT1-off)



VT1 – off: При запущване на транзистора VT1, тъй като тока през дросела L не може да се промени със скок, се създава противоелектродвижещо напрежение, отбелязано с поляритет в скоби. В резултат на това, върху товарното съпротивление R, респективно върху кондензатора C2, се подава напрежение равно на сумата от входното напрежение U_d и противоелектродвижещото напрежение на дросела L. Диодът D1 е поляризиран в права посока, при което е отпушен. Товарният ток I_o протича през контура $+U_d - L - D1 - R - -U_d$. Кондензаторът C1 се зарежда и разрежда.

Времедиаграми, поясняващи принципа на действие на стабилизатора

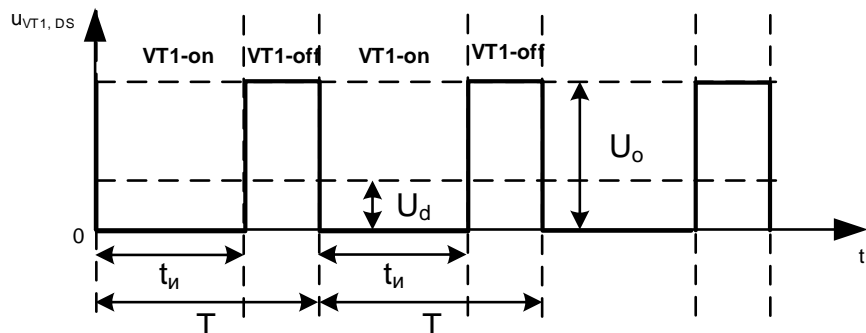
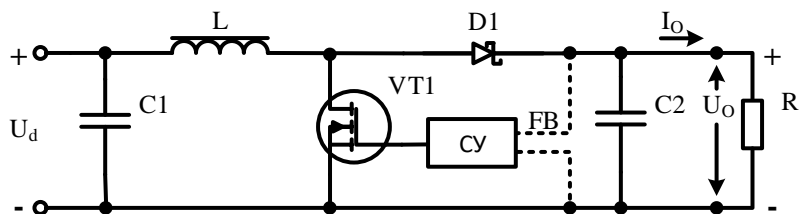
Времедиаграмите, поясняващи принципа на действие, ще бъдат построени в установен режим и при допускане, че елементите в схемата са идеални :

- Транзисторът се разглежда като идеален ключ с две състояния – включено и изключено;
- Падът на напрежение върху транзистора е нула;
- Падът на напрежение върху диода е нула;
- Товарът е активен;
- Импедансът на кондензаторите за променливата съставка е безкрайно малък;
- Дроселът няма активно съпротивление.

Времедиаграмите, поясняващи принципа на действие, ще бъдат построени на обща координатна система.

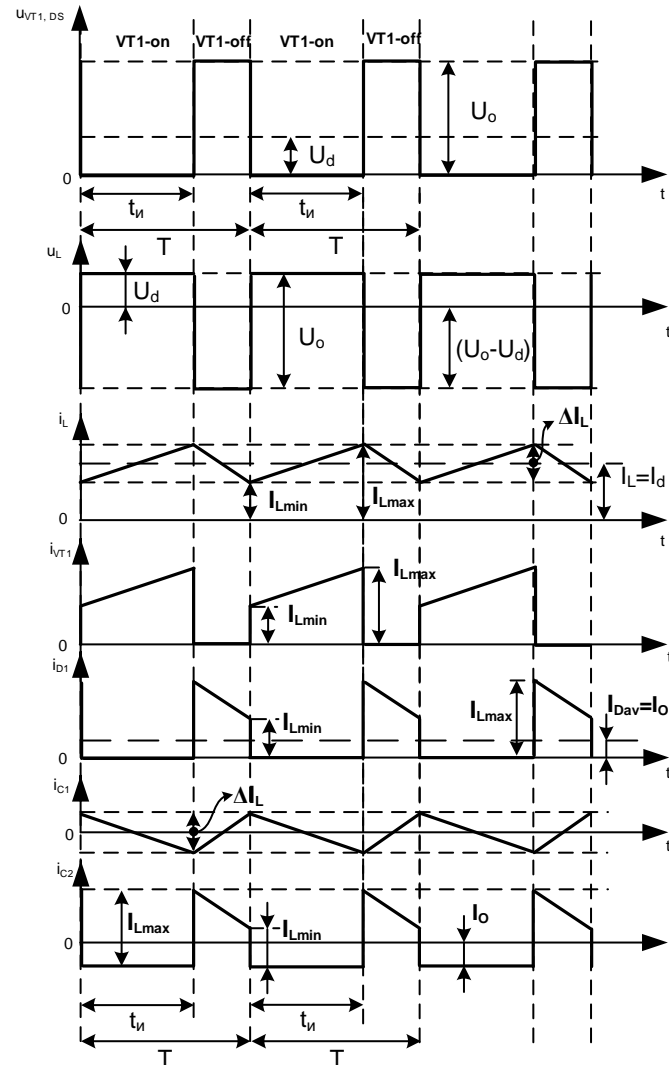
Времедиаграми поясняващи принципът на действие на стабилизатора

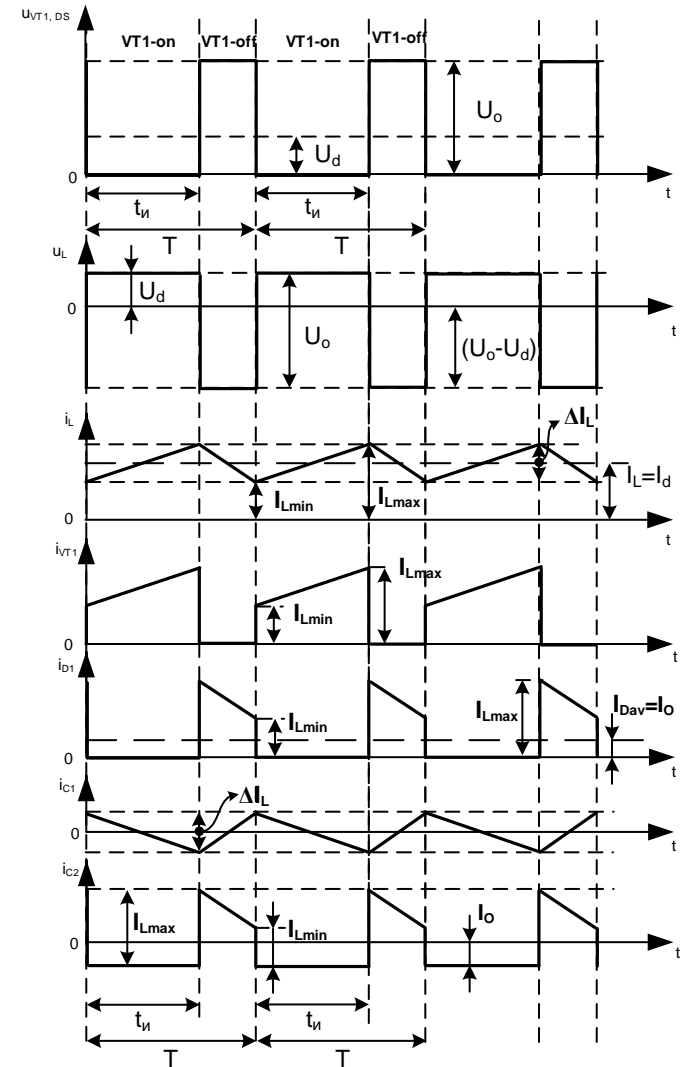
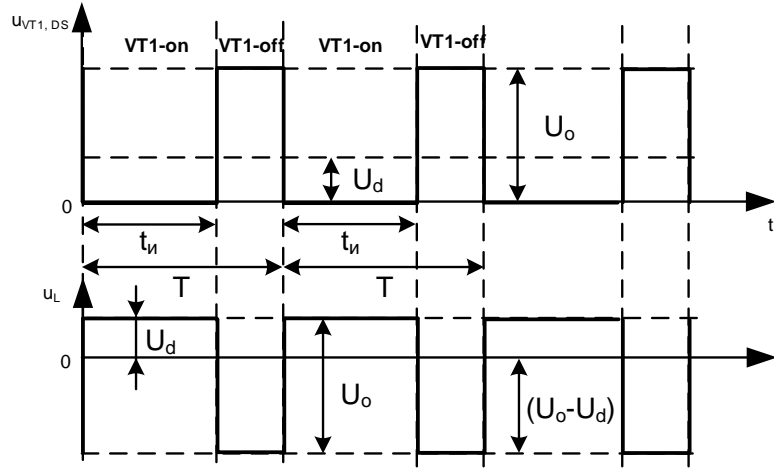
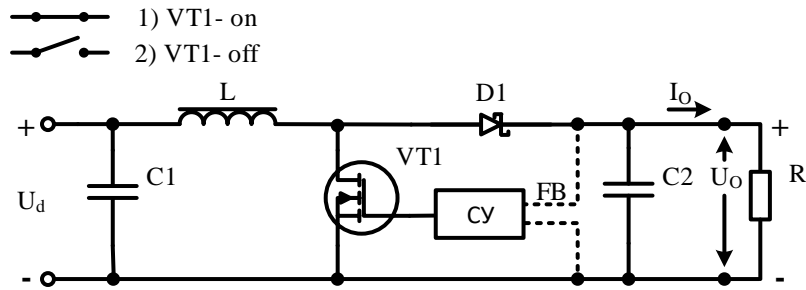
- 1) VT1- on
- 2) VT1- off



$u_{VT1,DS}$ – Напрежение между изводите дрейн-сорс на транзистора VT1.

През времевия интервал $t_{и}$, когато транзисторът провежда, падът на напрежение между дрейна и сорса му е (почти) нула. Когато транзисторът е запушен, между изводите му дрейн и сорс се прилага изходното напрежение U_o .

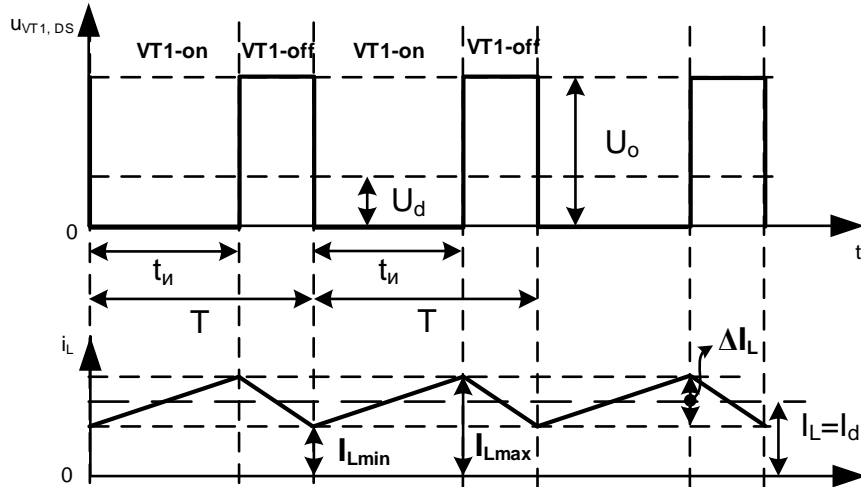
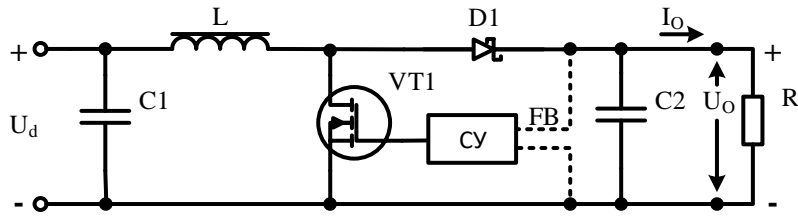




u_L – Напрежение върху дросела L.

През времевия интервал $t_{и1}$, когато транзисторът провежда, върху дросела се прилага входното напрежение U_d . Когато транзисторът се запуши, между изводите на дросела се индуцира обратно е.д.н., при което той се превръща в източник на напрежение. Поляритетът на индуцираното напрежение е обрнат в сравнение с предния интервал и това напрежение се добавя към напрежението на източника U_d . В резултат, върху товара се прилага сумата от входното напрежение U_d и индуцираното напрежение между изводите на дросела.

- 1) VT1- on
- 2) VT1- off



i_L – Ток през дросела L.

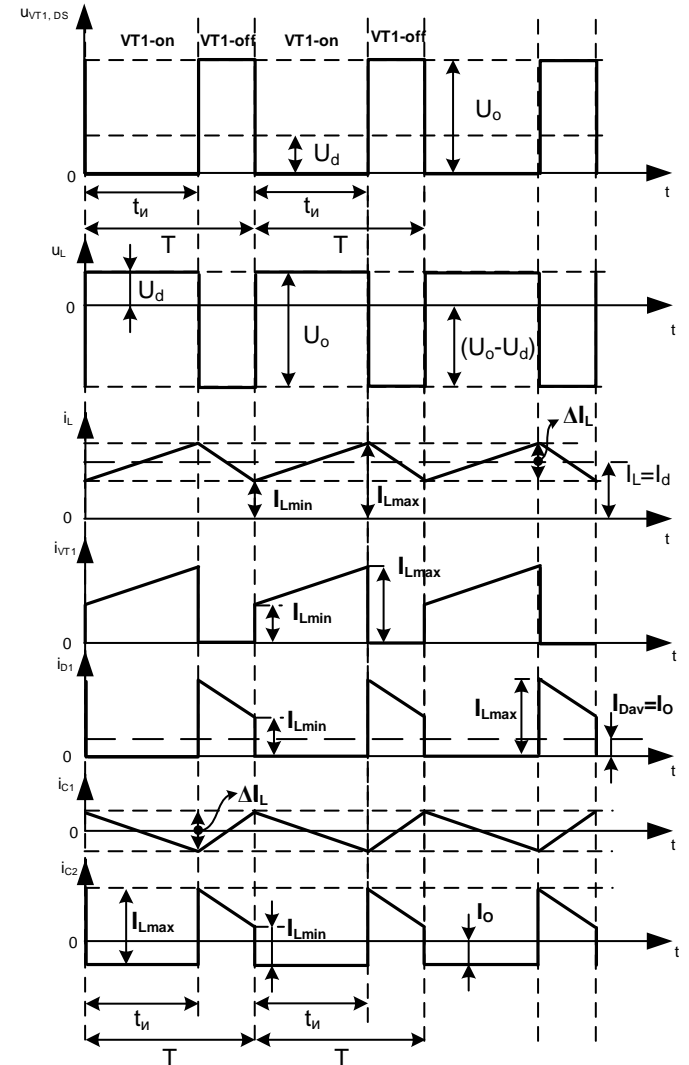
I_d – Средна стойност на консумирания от захранващия източник ток.

I_{Lmin} – Минимална стойност на токът през дросела L.

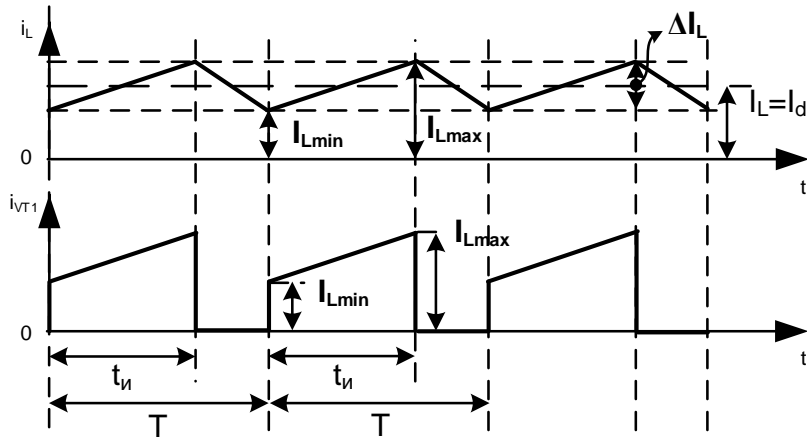
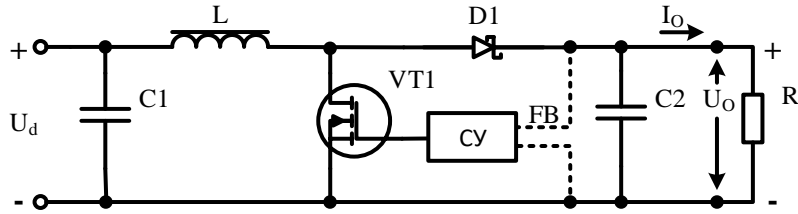
I_{Lmax} – Максимална стойност на токът през дросела L.

ΔI_L – Размах на пулсациите на тока през дросела.

През времевия интервал $t_{и}$, когато транзисторът провежда, токът през дросела нараства. Когато транзисторът е запушен, токът през дросела намалява. Средната стойност на тока през дросела е средната стойност на консумирания от захранващия източник ток.

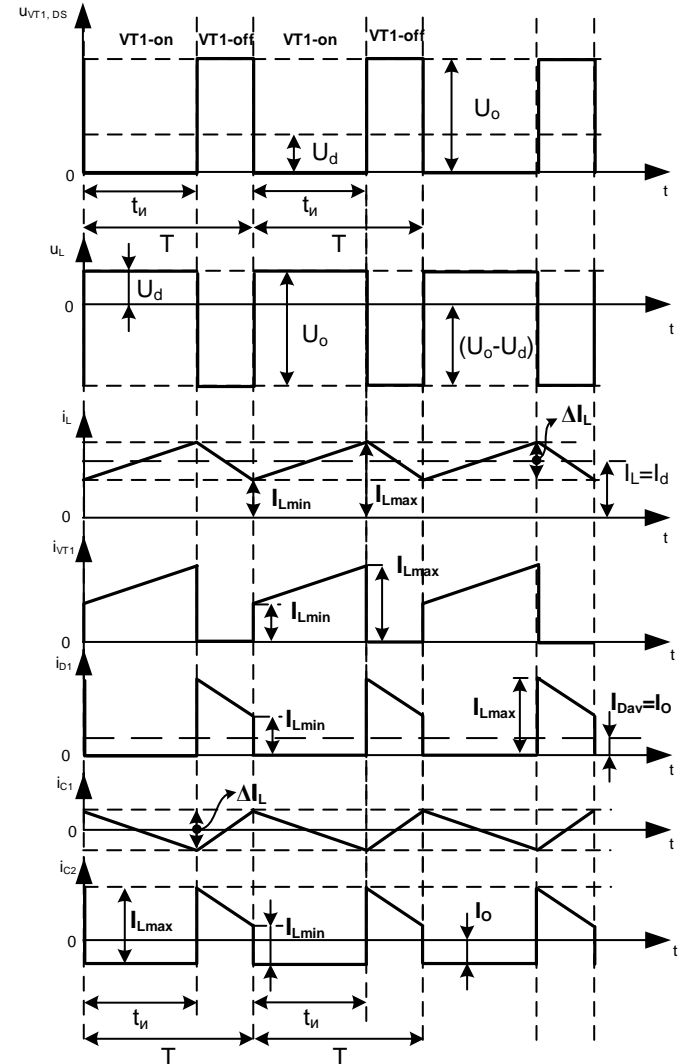


- 1) VT1- on
- 2) VT1- off

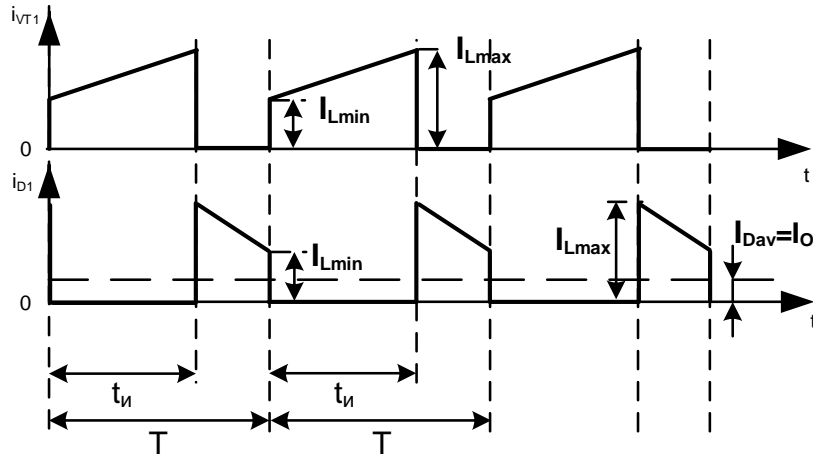
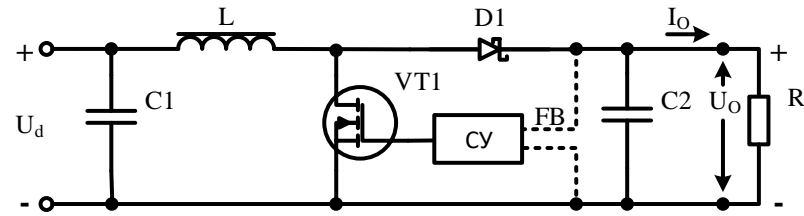


i_{VT1} – Ток през транзистора VT1.

През времевия интервал t_{on} , когато транзисторът провежда, тока през дросела е тока през транзистора. Когато транзисторът е запушен, тока през него е практически нула.

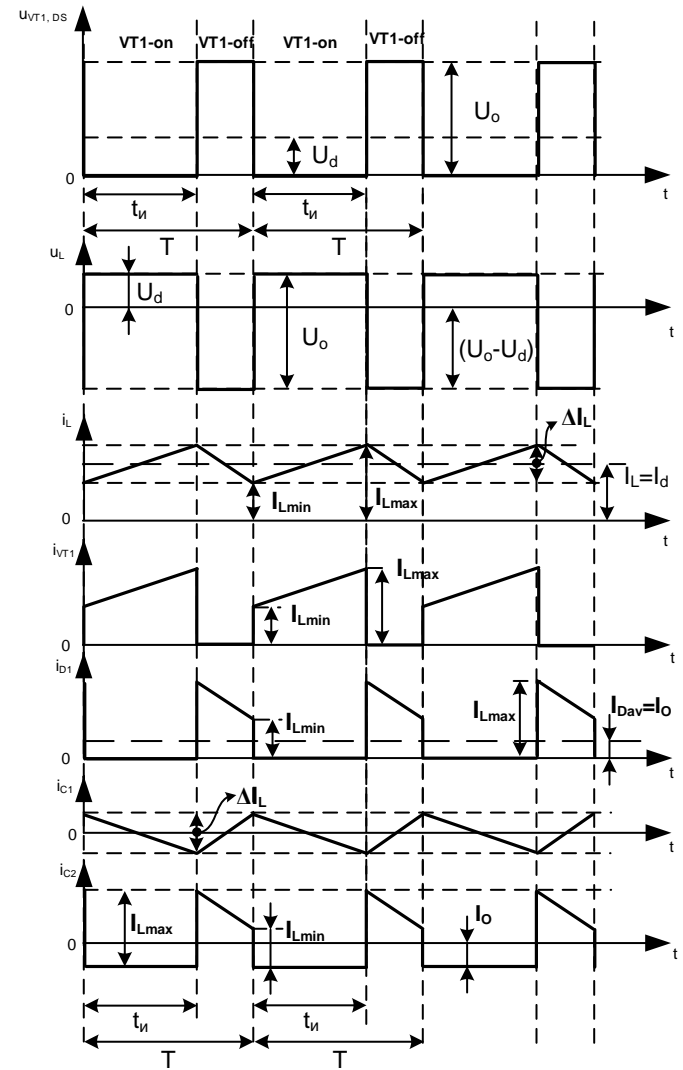


- 1) VT1- on
- 2) VT1- off

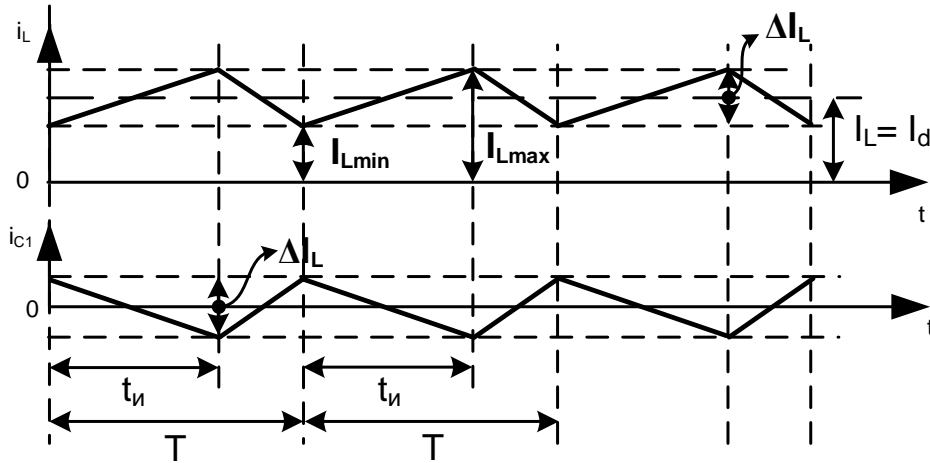
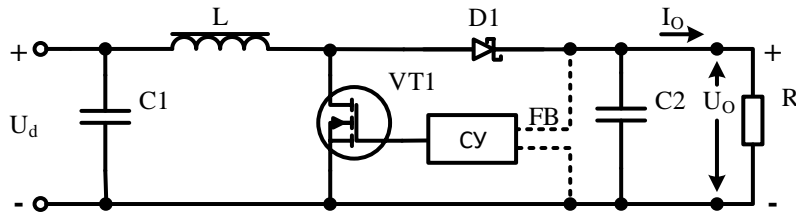


i_{D1} – Ток през диода D1.

През времевия интервал $t_{и}$, когато транзисторът провежда, диодът е запушен и токът през него е нула. Когато транзисторът е запушен, токът през дросела е токът през диода.

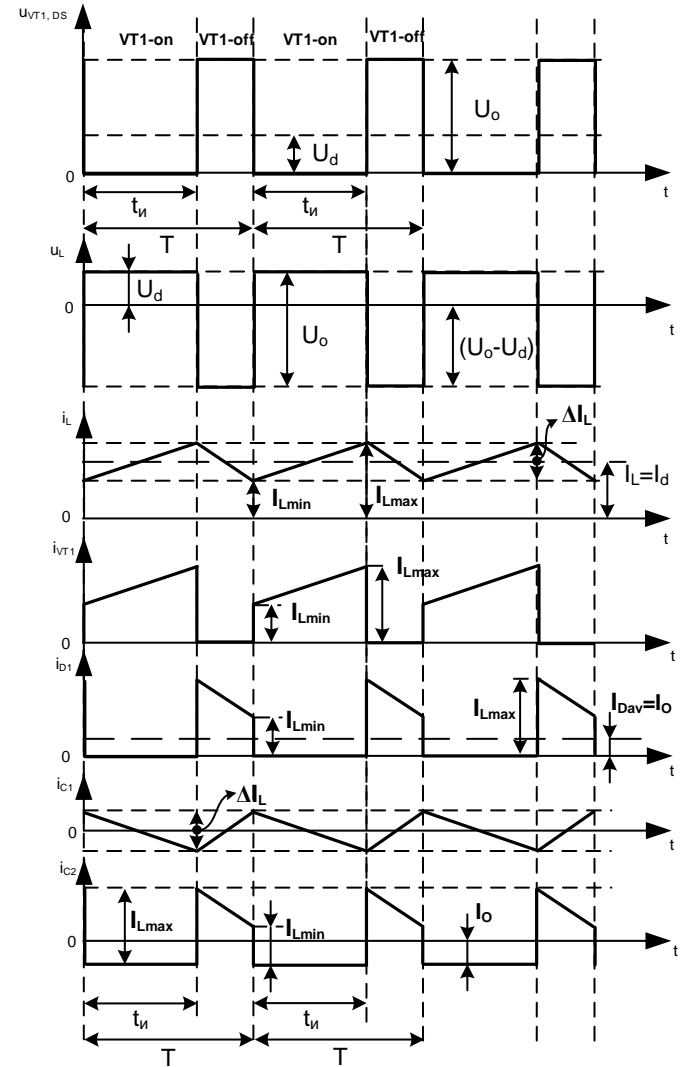


- 1) VT1- on
- 2) VT1- off

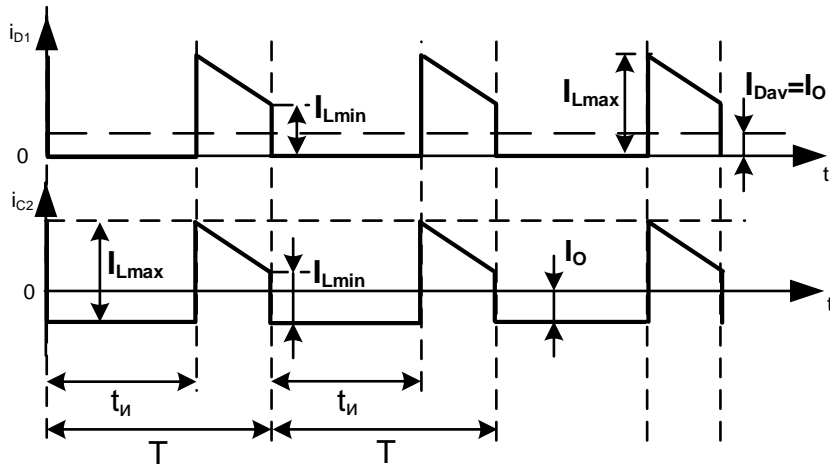
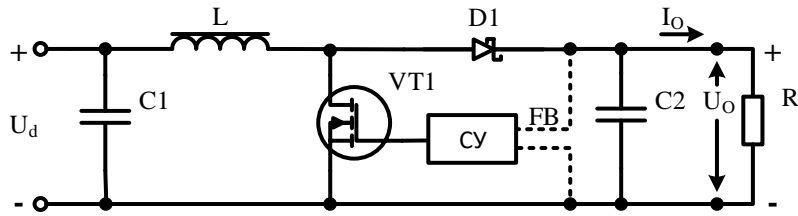


i_{C1} – Ток през кондензатора C1.

Токът през кондензатора C1 е променливата съставка на тока през дросела, и по-точно инвертирана версия на променливата съставка на тока през дросела. От ниво I_{Lmin} до ниво I_d (графиката на тока i_L) кондензаторът C1 се зарежда с променливата съставка на тока през дросела. От ниво I_d до ниво I_{Lmax} кондензаторът се разрежда, осигурявайки променливата съставка на тока през дросела.



- 1) VT1- on
- 2) VT1- off

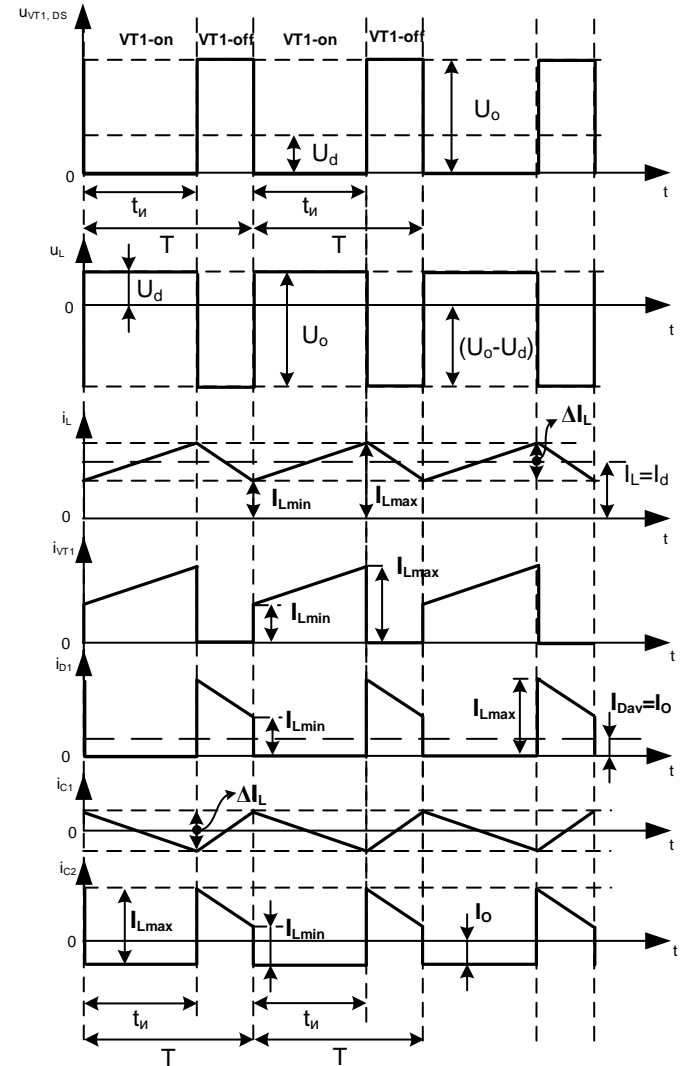


I_o – Средна стойност на тока през товара.

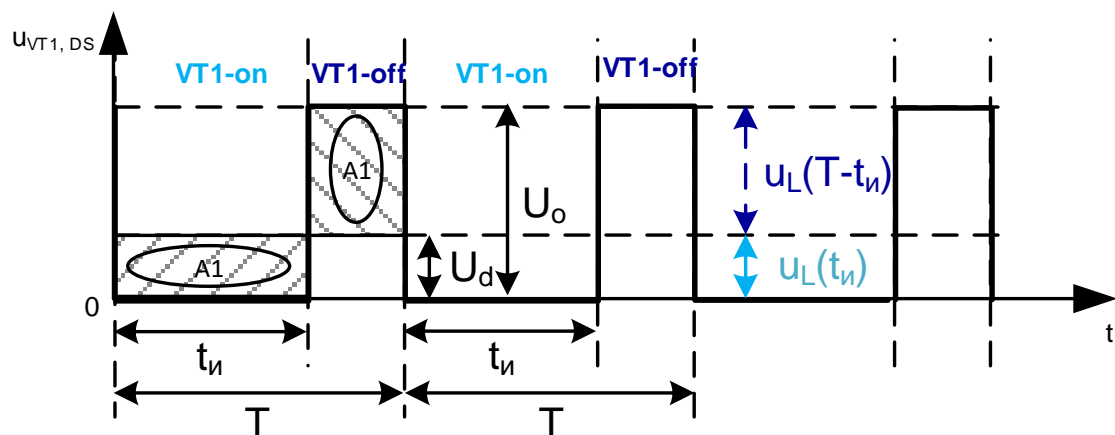
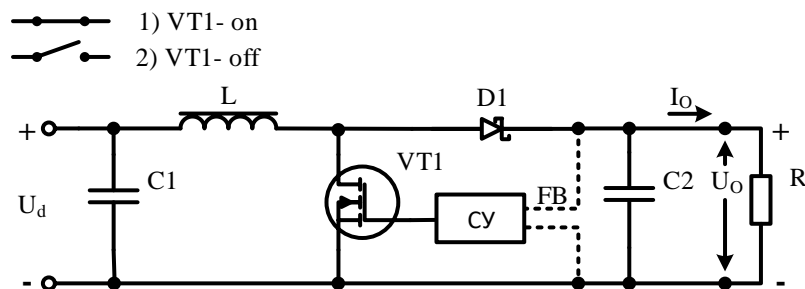
i_{c2} – Ток през кондензатора C2.

Токът през кондензатора C2 е променливата съставка на тока през диода.

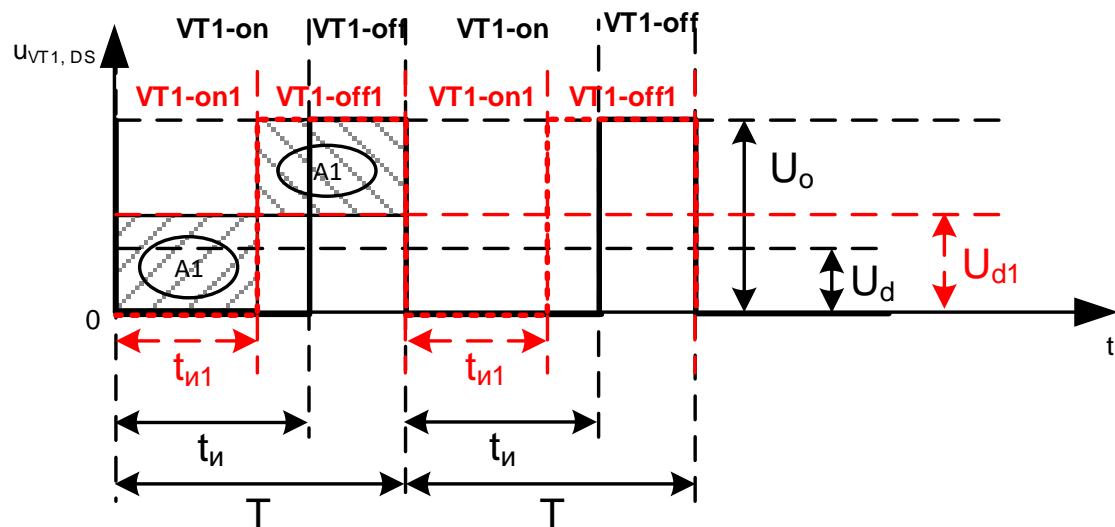
Постоянната съставка на тока през диода е средната стойност на тока през товара. Следователно формата на тока през кондензатора C2 повтаря тази на тока през диода, като е отместена надолу със стойност – средната стойност на тока през товара I_o (изрязана постояннотокова съставка).



Принцип на регулиране на изходното напрежение на стабилизатора

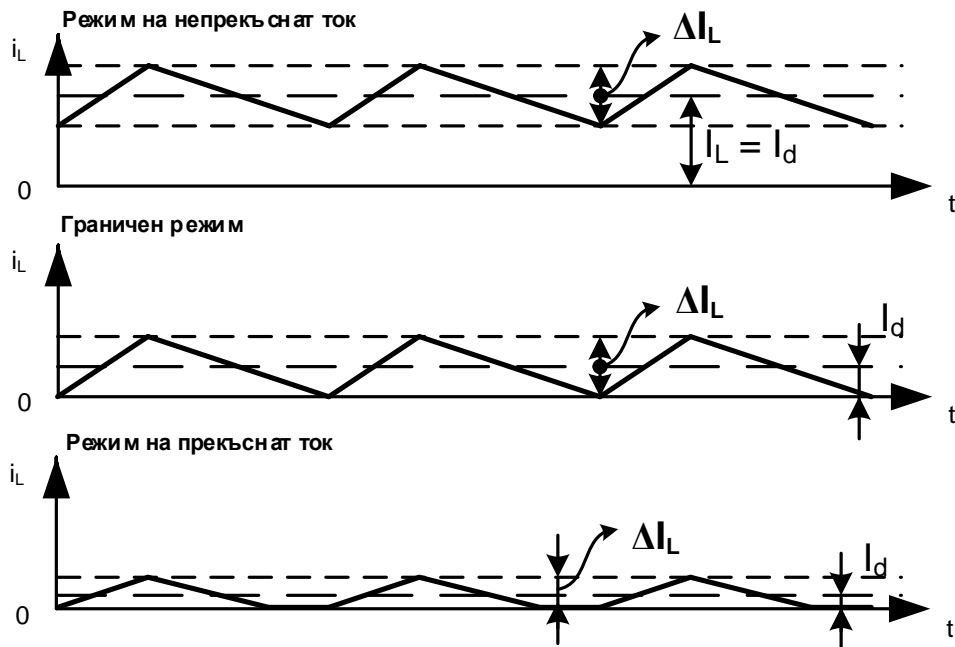


Входното напрежение U_d се прилага върху дросела L на импулси (оттам-импулсни стабилизатори). Площта на импулса, подаван към дросела е $A1 = t_{и} U_d$. Свойство на дросела е за останалото време $(T - t_{и})$ да отдаде импулс със същата площ $A1$ (волт-секунден баланс). Тъй като за времето $(T - t_{и})$ към товара са свързани източника на напрежение, последователно с дросела, то стойността на напрежението върху товара U_o за това време се явява сумата от напрежението на дросела U_L и входното напрежение U_d . Така средната стойност на напрежението върху товара U_o се формира по време на интервала $(T - t_{и})$, и се поддържа с (приблизително) неизменна стойност от кондензатора $C2$ в интервала $t_{и}$.



За неизменна стойност на изходното напрежение U_o при друга стойност на входното напрежение, например по-висока, за да се запази равенството между площите на импулса подаван към и на този отдаван от дросела, ще е необходимо продължителността на импулса $t_{и1}$ да се сведе до нова по-малка стойност $t_{и1}$. Следователно, при по-високо входно напрежение, от захранващия източник ще се консумира за по-кратко време, за да се запази същата средна стойност на напрежението върху товара U_o .

Режими на работа на ключовия стабилизатор



Форма на тока през дросела L в три режима:

- Режим на непрекъснат ток
- Граничен режим
- Режим на прекъснат ток

Основните електрически зависимости ще бъдат дадени за режим на непрекъснат ток.

4) Основни електрически зависимости

Средните стойности на напрежението върху дросела при включен и изключен транзистор $U_{L,on}$ и $U_{L,off}$ са равни (волт-секунден баланс):

$$U_{L,on} = \frac{1}{T} \int_0^{t_{и}} U_d dt = \frac{t_{и}}{T} U_d = \delta U_d \quad , \text{ където } \delta = \frac{t_{и}}{T} \text{ е коефициент на запълване}$$

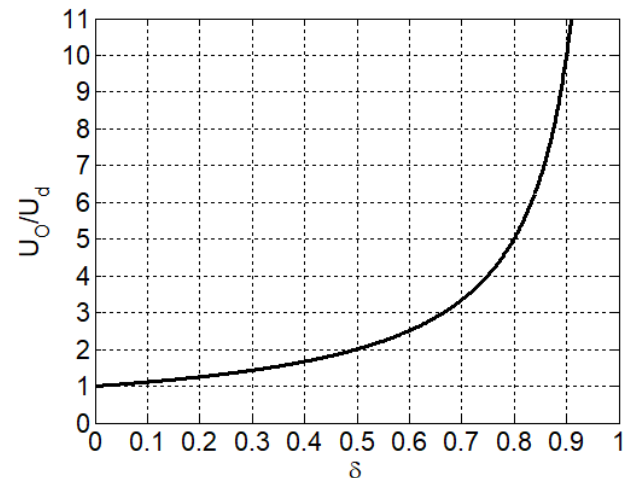
$$U_{L,off} = \frac{1}{T} \int_{t_{и}}^T (U_o - U_d) dt = \frac{T - t_{и}}{T} (U_o - U_d) = (1 - \delta)(U_o - U_d) = U_o - U_d - \delta U_o + \delta U_d$$

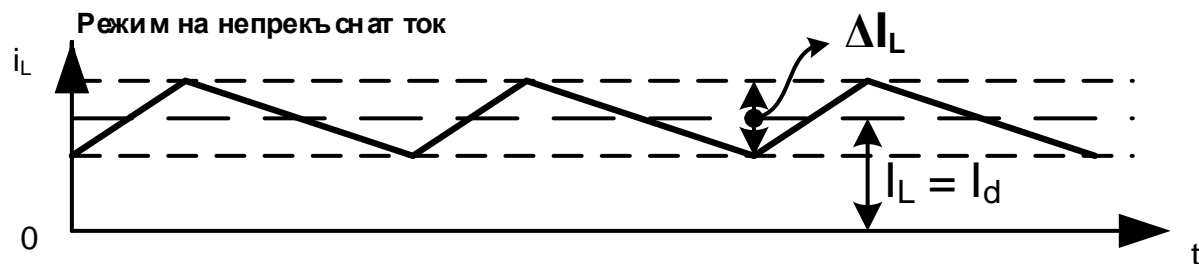
$$U_{L,on} = U_{L,off} \Rightarrow \delta U_d = U_o - U_d - \delta U_o + \delta U_d \Rightarrow \frac{U_o}{U_d} = \frac{1}{1 - \delta}$$

Регулировъчна характеристика:

$$\frac{U_o}{U_d} = \frac{1}{1 - \delta}$$

От регулировъчната характеристика се вижда, че преобразувателят е винаги повишаващ, като при коефициент на запълване равен на нула, изходното напрежение е равно на входното.





Условия за избор на ΔI_L :

$$I_L = I_d$$

- 1) $\Delta I_L \leq 2 \cdot I_{d,\min}$ - условие за осигуряване на режим на непрекъснат ток;
- 2) $\Delta I_L \geq 0,1 \cdot I_{d,\max}$ - условие за технологичност на изделието;
- 3) $\Delta I_L \leq 0,5 \cdot I_{d,\max}$ - условие за технологичност на изделието.

Определяне на стойността на индуктивността на дросела L:

$$L \frac{di_L}{dt} = e_L \qquad L = \frac{e_L dt}{di_L} \qquad L = \frac{U_L \Delta t}{\Delta I_L}$$

Ако времето Δt се замени с времето, през което транзисторът VT1 е отпушен, т.е.

$$\Delta t = t_{on} = \delta T = \frac{\delta}{f}, \qquad \text{в който интервал от време } U_L = U_d ,$$

то за индуктивността на дросела се получава:
$$L = \frac{U_d \cdot \delta}{\Delta I_L \cdot f}$$

Минималната и максималната стойност на тока през дросела са:

$$I_{L,\min} = I_d - 0,5\Delta I_L \quad I_{L,\max} = I_d + 0,5\Delta I_L$$

Определяне на токовете и напреженията на транзистора:

$$I_{VT1,\max} = I_{L,\max} = I_d + 0,5\Delta I_L \quad - \text{ максимален ток през транзистора}$$

$$I_{VT1,\min} = I_{L,\min} = I_d - 0,5\Delta I_L \quad - \text{ минимален ток през транзистора}$$

$$I_{VT1,av} = \frac{1}{T} \int_0^{t_H} i_L dt = \frac{t_H}{T} I_d = \delta \cdot I_d \quad - \text{ среден ток през транзистора}$$

$$U_{VT1,DS,\max} = U_o \quad - \text{ максимално напрежение върху транзистора}$$

Определяне на токовете и напреженията на диода :

$$I_{D1,max} = I_{L,max} = I_d + 0,5\Delta I_L$$

-максимален ток през диода

$$I_{D1,min} = I_{L,min} = I_d - 0,5\Delta I_L$$

-минимален ток през диода

При идеални елементи, входната и изходната мощност са свързани със следната зависимост:

$$P_d = P_o \equiv U_d I_d = U_o I_o \Rightarrow I_d = \frac{U_o}{U_d} I_o = \frac{1}{1-\delta} I_o$$

От посочената зависимост се изхожда за определяне на средната стойност на тока през диода, както следва:

$$I_{D1,av} = I_L - I_{VT1,av} = I_d - \delta I_d = (1 - \delta) I_d, \text{ но } I_d = \frac{1}{1-\delta} I_o \Rightarrow I_{D1,av} = I_o \quad \text{-среден ток през диода}$$

$$U_{D1,KA,max} = U_o \quad \text{-максимално напрежение върху диода}$$

Определяне на токовете през кондензаторите C1 и C2 :

$$I_{C1, \text{заряд, max}} = I_{C1, \text{разряд, max}} = \frac{\Delta I_L}{2}$$

Токът през кондензатора C1 е променливата съставка на тока през дросела L. Кондензаторът C1 се зарежда и разрежда в рамките на интервала $t_{\text{и}}$, както и в рамките на интервала $(T-t_{\text{и}})$, като в двата различни интервала скоростта на изменение на тока през кондензатора е различна (обусловена е от тази на променливата съставка на тока през дросела).

$$I_{C2, \text{заряд, min}} = I_{D1, \text{min}} - I_o = I_d - 0,5\Delta I_L - I_o$$

$$I_{C2, \text{заряд, max}} = I_{D1, \text{max}} - I_o = I_d + 0,5\Delta I_L - I_o$$

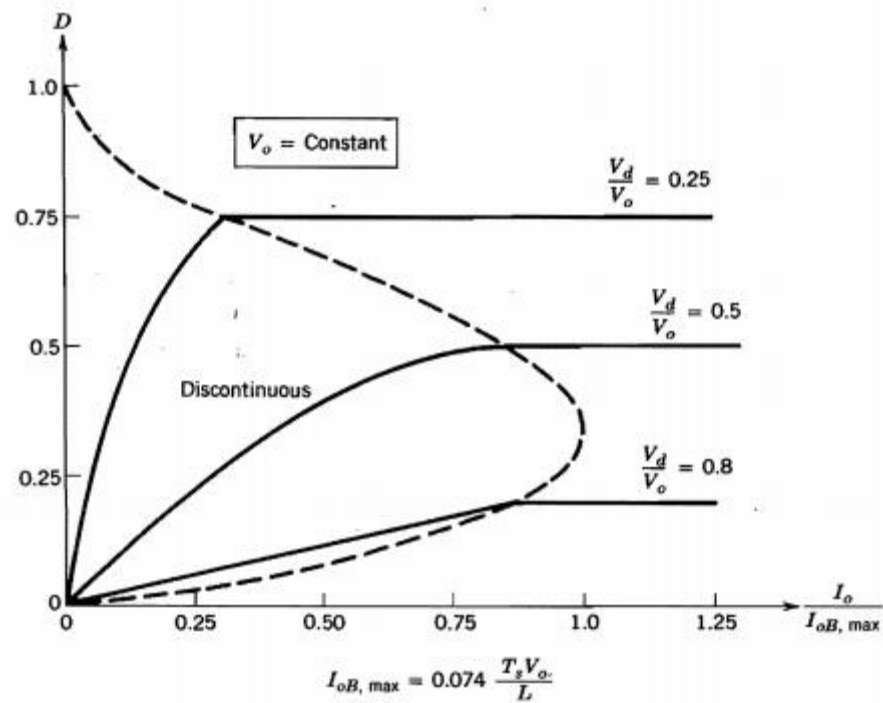
$$I_{C2, \text{разряд}} = I_o$$

Токът през кондензатора C2 е променливата съставка на тока през диода D1. По време на интервала $t_{\text{и}}$ кондензаторът C2 се разрежда (осигурява тока на товара). През останалото време до края на периода T, кондензаторът C2 се зарежда.

Определяне на капацитетите на кондензаторите C1 и C2 :

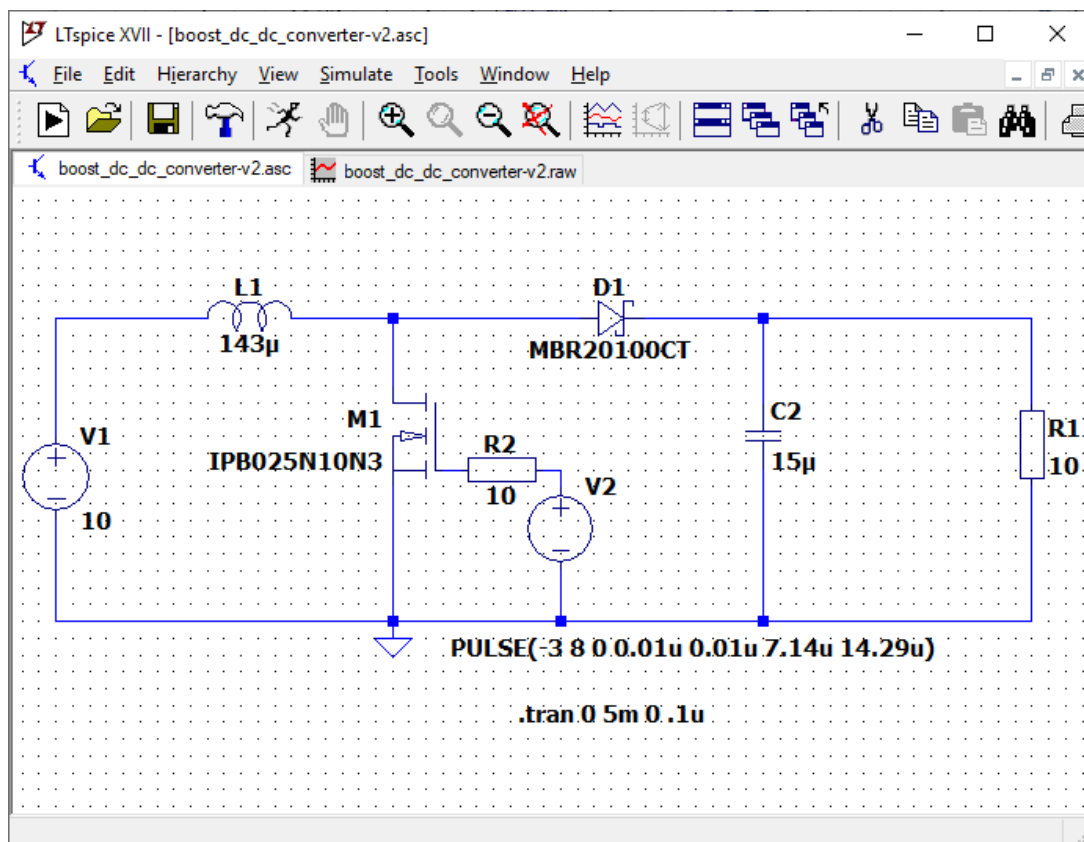
$$C_1 = \frac{\Delta I_L}{8f\Delta U_d} \quad , \text{ където } \Delta U_d \text{ допустим размах на пулсацията на входното напрежение.}$$

$$C_2 = \frac{\delta I_o}{f\Delta U_o} \quad , \text{ където } \Delta U_o \text{ допустим размах на пулсацията на изходното напрежение.}$$



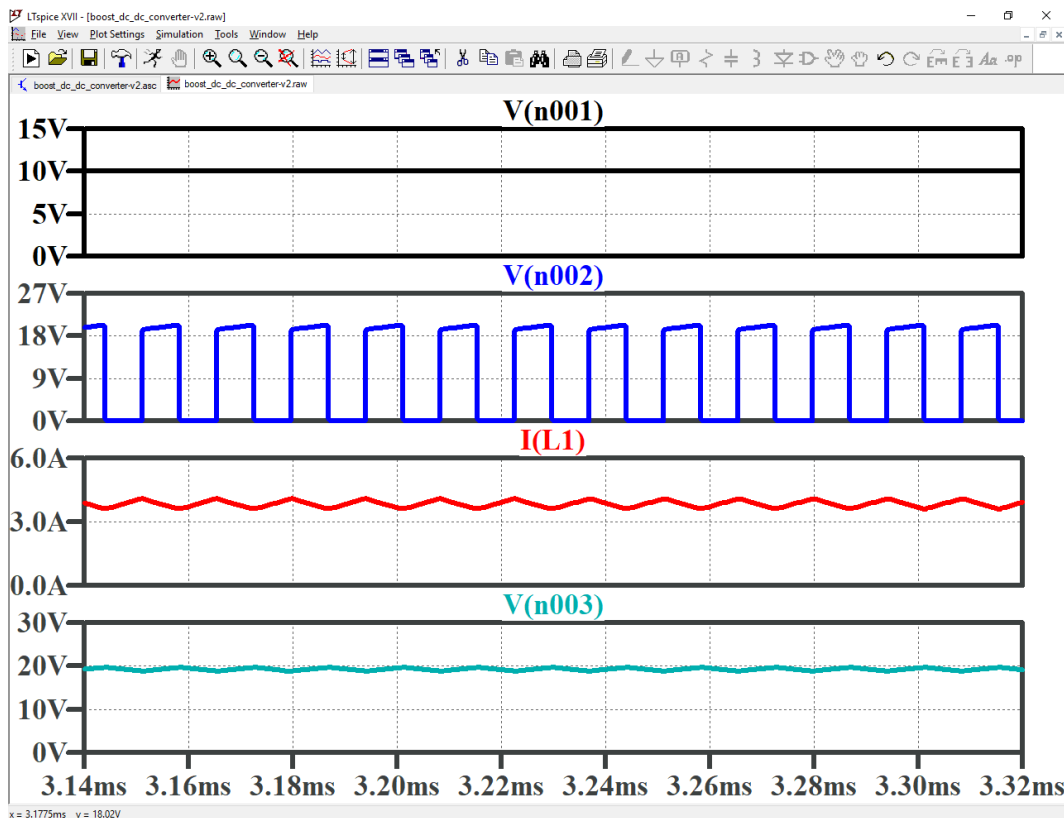
Характеристики на повишаващия преобразувател при константна стойност на изходното напрежение U_O [2].

4) Симулационни изследвания на ключов стабилизатор



Изследването на стабилизатора на напрежение да се извърши симулационно със специализиран софтуер LTspice.

4) Симуляционни изследвания на ключов стабилизатор



V(n001) – Входно напрежение на ключовия стабилизатор.

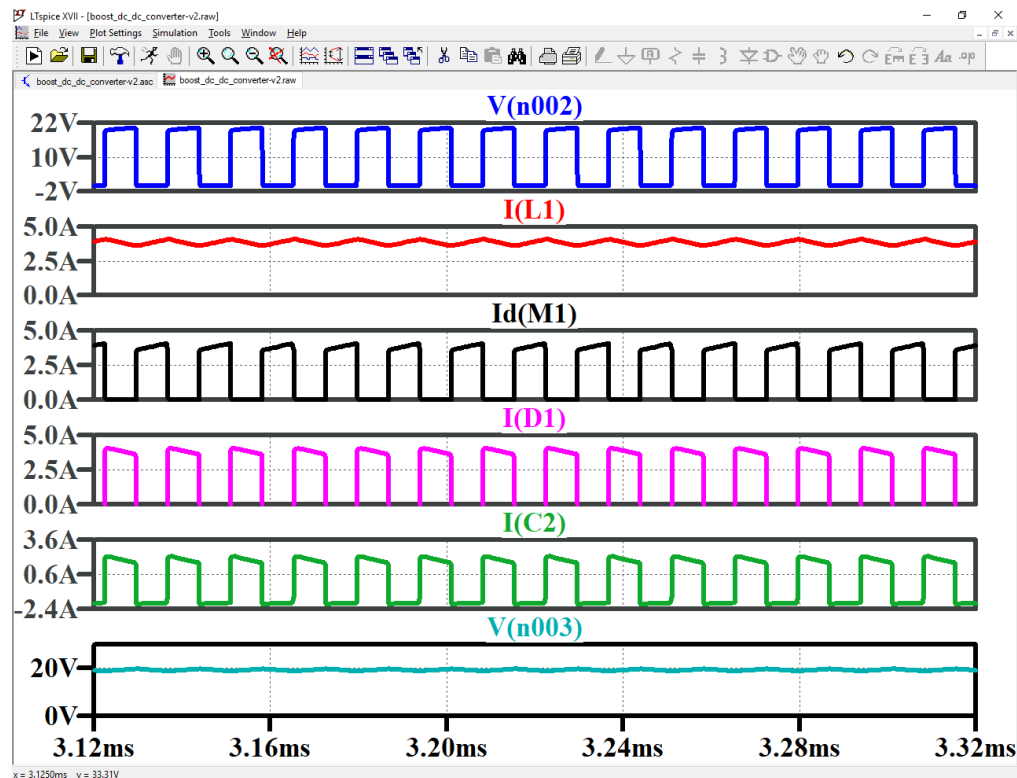
V(n002) – Напрежение върху транзистора M1 (дрейн-сорс).

I(L1) – Ток през дросела L1.

V(n003) – Изходно напрежение на ключовия стабилизатор (напрежение върху товара).

Резултати от симуляционно изследване на стабилизатора със специализиран софтуер LTspice.

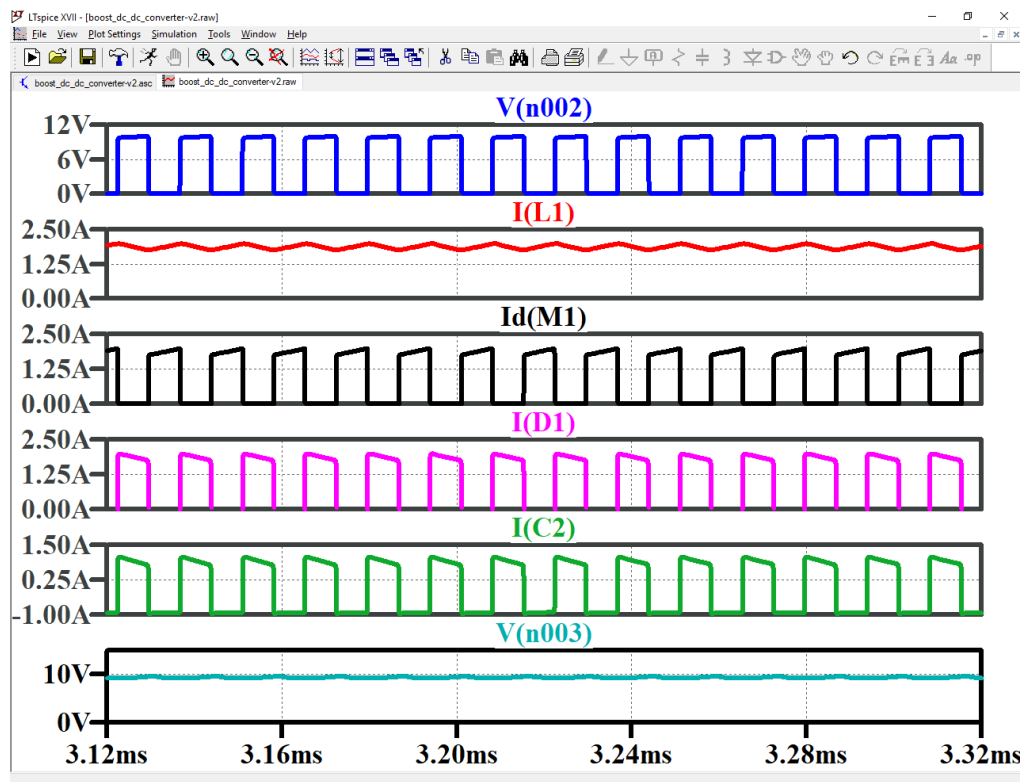
4) Симуляционни изследвания на ключов стабилизатор при входно напрежение $U_d=10V$



V(n002) – Напрежение върху транзистора M1 (дрейн-сорс).
I(L1) – Ток през дросела L1.
Id(M1) – Ток през транзистора M1.
I(D1) – Ток през диода D1.
I(C2) – Ток през кондензатора C2.
V(n003) – Изходно напрежение на ключовия стабилизатор (напрежение върху товара).

Резултати от симуляционно изследване на стабилизатора със специализиран софтуер LTspice.

4) Симуляционни изследвания на ключов стабилизатор при входно напрежение $U_d=5V$



V(n002) – Напрежение върху транзистора M1 (дрейн-сорс).
I(L1) – Ток през дросела L1.
Id(M1) – Ток през транзистора M1.
I(D1) – Ток през диода D1.
I(C2) – Ток през кондензатора C2.
V(n003) – Изходно напрежение на ключовия стабилизатор (напрежение върху товара).

Резултати от симуляционно изследване на стабилизатора със специализиран софтуер Ltspice.

ОСНОВНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] Стефанов Н., “Токозахранващи устройства”, Техника, С., 2005.
- [2] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications and design*, 3rd ed., USA: John Wiley & Sons, Inc., 2003.
- [3] N. Mohan, *First course on power electronics and drives*, Minneapolis, MN: MNPERE, 2003.
- [4] *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*, 3rd ed., edited by M. H. Rashid, Burlington, MA: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [5] www.onsemi.com “Switch Mode Power Supply” – Reference manual 2014.
- [6] www.analog.com