



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Elektronikus Eszközök Tanszéke

Elektronika alapjai

10. előadás

Tápellátás

- Tápellátás
- Az energiaátalakítás módjai AC és DC között.
- Egyenirányítás
- DC/DC konverzió
- Feszültségreferencia
- Tápegységek

Az energia-elosztás

- Az erőművekben megtermelt villamos energiát a villamos energia elosztó rendszer juttatja el a fogyasztóhoz.
- Az elosztás váltakozó áramon történik
 - Történelmi okokból: a váltakozó áram a feszültség átalakítása egyszerűen, **transzformátorral** megoldható. A szállítás nagyfeszültségen (pl. 750kV) történik, így a vezetéken folyó áram kisebb, ezáltal a szállítás vesztesége, amelyik a vezeték ellenállásából származik $P_V = I^2 R$ kisebb.
- A villamosenergia-elosztó hálózat átlagos felhasználó által hozzáférhető végpontján (a továbbiakban konnektor 😊) az EU-ban 230V **effektív értékű**, 50Hz-es szinuszos váltakozó feszültség mérhető.
 - Megjegyzés: egy váltakozó feszültség effektív értéke az az egyenfeszültség, amely a rákapcsolt ellenálláson ugyanakkora munkát végez. Azaz: $\int_0^T U^2(t)dt = U_{eff}^2 T$, mivel a teljesítmény a feszültség négyzetével arányos. A konnektor feszültségének időfüggvénye tehát $\sqrt{2} \cdot 230\sin(2\pi 50t)$, azaz kb. 325V amplitúdójú, 50Hz frekvenciájú szinuszos jel
- Ez az ún. kisfeszültségű hálózat.

Átalakítás

- Váltakozó feszültségről váltakozó feszültségre (AC/AC)
 - **Transzformátor**
 - Pl. csökkentjük vagy növeljük a váltakozó feszültség amplitúdóját
- Váltakozó feszültségről egyenfeszültségre (AC/DC)
 - **Egyenirányító**
- Egyenfeszültségről egyenfeszültségre (DC/DC)
 - **DC/DC konverter v. töltéspumpa (charge pump)**
 - Csökkentjük vagy növeljük a feszültséget.
- Egyenfeszültségről váltakozó feszültségre (DC/AC)
 - **Inverter**
 - Pl. UPS, napelem – hálózati visszatáplálás (szinkronban a hálózattal), vagy akku – háromfázisú elektromos motor
- Az átalakítás hatásfoka: $\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}}$
 - Azaz a kimeneten mért teljesítmény/bemeneti teljesítmény
 - Cél, hogy minél jobban közelítse meg a 100%-ot!

A transzformátor

- Primer oldal: ahol az energia betáplálás történik
- Szekunder oldal: ahová a fogyasztót kapcsoljuk. (felcserélhető...)
- Az ideális transzformátorra:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

- Azaz a két oldal feszültségének aránya megegyezik a menetszámok arányával

- Azonban a két oldalon a teljesítmény ideális esetben megegyezik, valós esetben pedig a szekunder oldali teljesítmény kisebb mint a primer oldali, a veszteségek miatt.

- Ideális esetben: $U_1 I_1 = U_2 I_2$

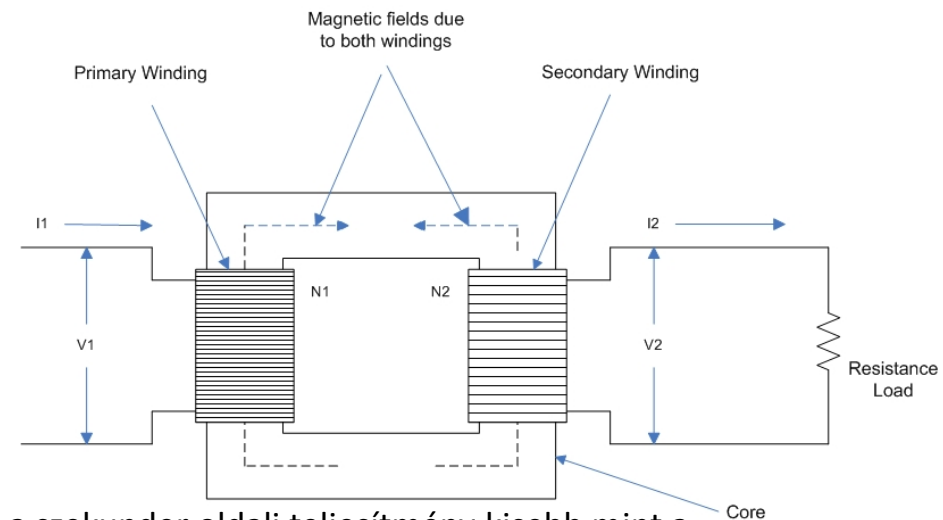
- A fel (feszültségnövelés) és le (feszültség csökkentés) transzformálás is gyakran előfordul a gyakorlatban.

- Csak váltakozó áramra működik!

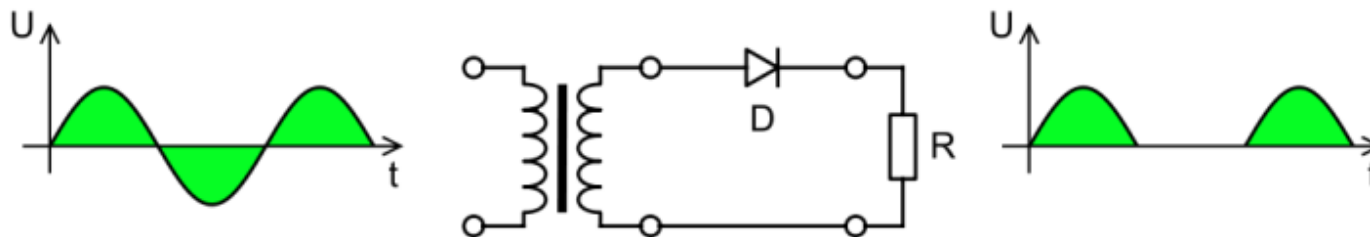
- Az első, energiaátvitelre alkalmas transzformátor:
Bláthy Ottó, Déri Miksa, Zipernowsky Károly, 1885, Ganz Művek



Modern, toroid transzformátor

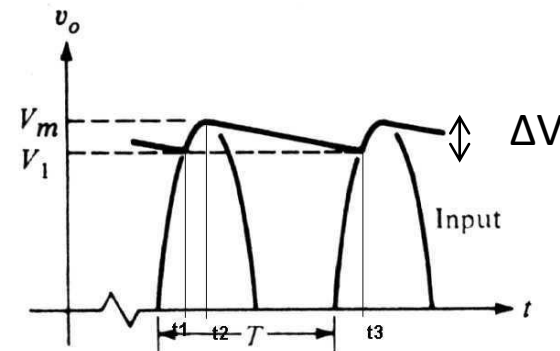
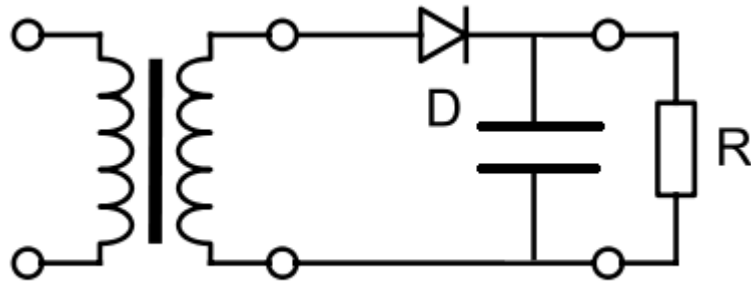


Egyutas egyenirányítás



- A dióda csak nyitóirányba vezet, így áram csak a pozitív félperiódusban folyik.
- Ha a transzformátoron mért váltakozó feszültség amplitúdója U , akkor
 - nyitóirányban, azaz pozitív félperiódusban az ellenállás maximális feszültsége kb.
 - $U_{max} = U - U_D$ (a szokásos közelítést alkalmazva)
 - $I_{max} = \frac{U - U_D}{R}$
 - Záróirányban áram nem folyik, a maximális zárófeszültség pedig U . (a letörési feszültségnek tehát ennél nagyobbak kell lennie!)
 - Pl. 16V-os amplitúdó, Si dióda és 500Ω ellenállás esetén:
 - $U_{max} = 15,3V$ $I_{max} = 30,6mA$
- Problémák:
 - Csak az egyik félperiódusban folyik áram, így a hatásfok nem túl jó.
 - Lüktet – közvetlenül nem alkalmas áramköri felhasználásra, akkutöltésen kívül (ez volt az első felhasználás...) másra nem használható.

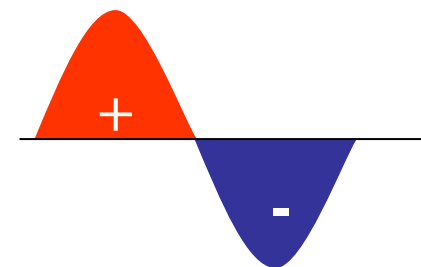
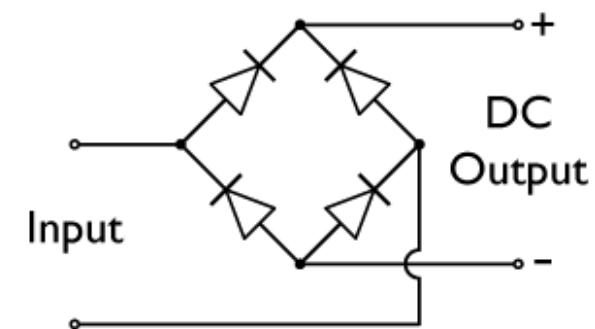
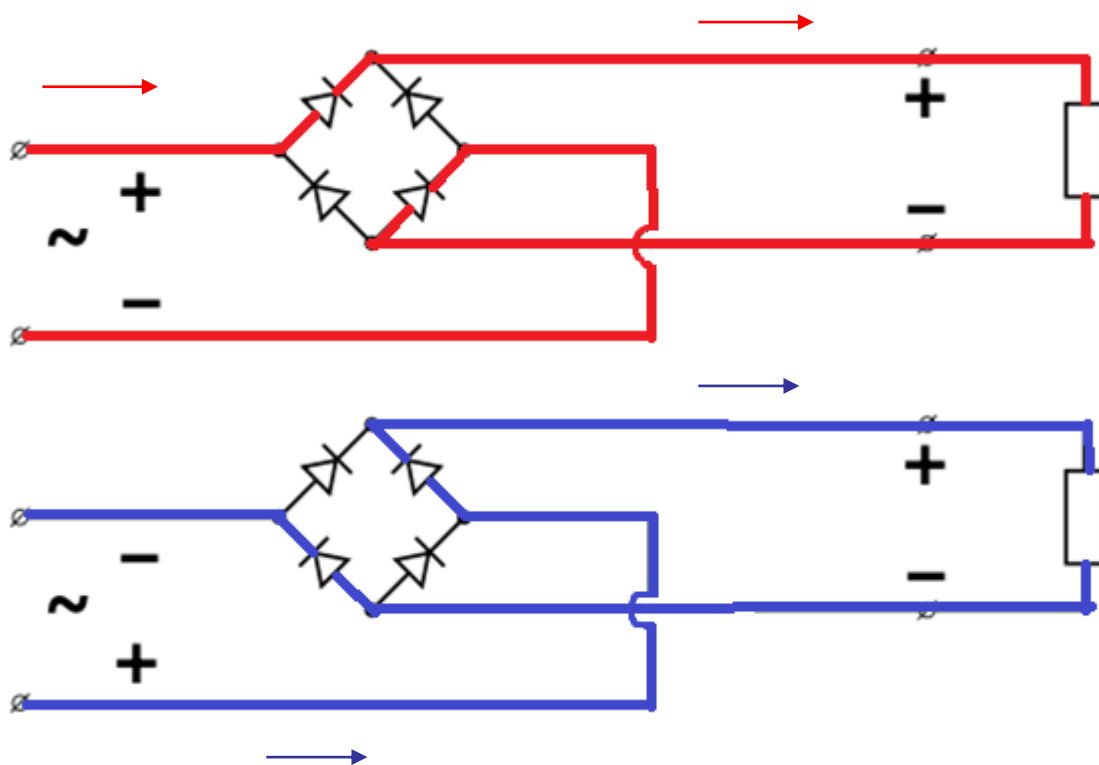
A pufferkondenzátor



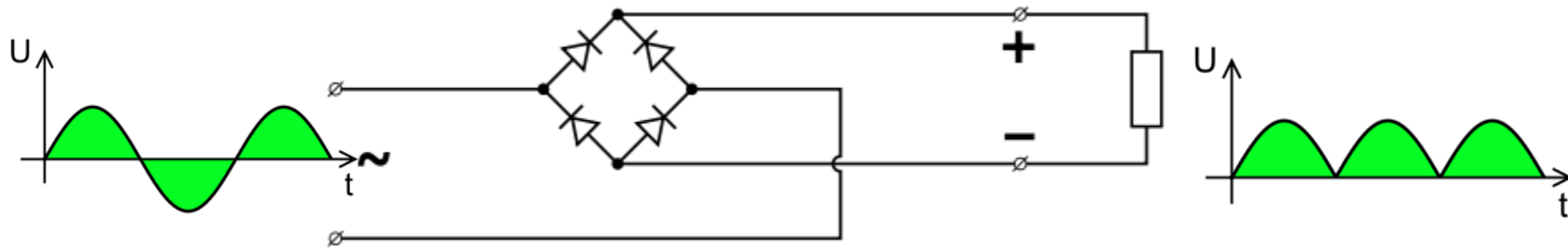
- A kapcsolást egy kondenzátorral egészítjük ki.
 - A kapacitásban tárolt töltés biztosítja az áramot a dióda kikapcsolt állapotában.
 - t_1 időpillanatban a transzformátor feszültsége nagyobb, mint a kapacitásé, emiatt a dióda kinyit és a kapacitás csúcsfeszültségre töltődik.
 - t_2 időpillanatban a bemenet feszültsége a kapacitás feszültsége alá csökken. Ekkor a dióda lezár, a terhelés (itt: az R ellenállás) áramát a kondenzátor biztosítja.
- A hullámosság becslése (az ábrán: $\Delta V = V_m - V_1$)
 - Számítsuk ki mennyit csökken egy V_m feszültségre feltöltött kondenzátor feszültsége a periódusidő (T) alatt:
 - $V(T) = V_m e^{-\frac{T}{RC}}$, azaz $\Delta V = V_m \left(1 - \exp\left(-\frac{T}{RC}\right)\right)$
 - Azaz a kapacitás növelésével a hullámosság csökken!

A Graetz / híd kapcsolás/ kétutas egyenirányítás

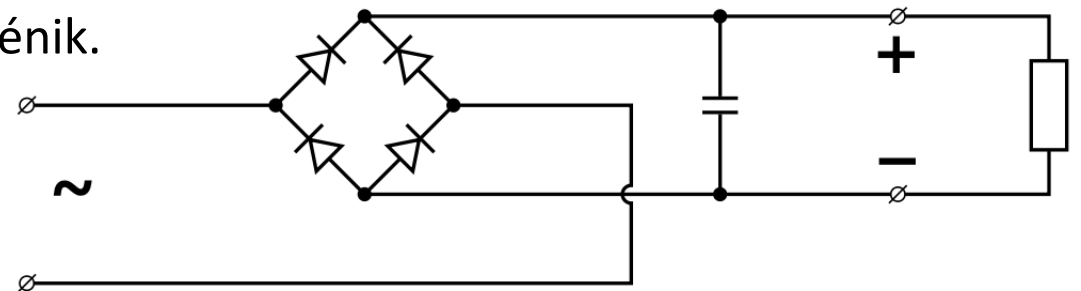
- Négy diódát tartalmaz.
- Egy tokba szerelve kapható.
- Működése: pozitív félperiódusban (piros) illetve negatív félperiódusban (kék)



A Graetz / híd kapcsolás/ kétutas egyenirányítás



- A Graetz tehát mintegy „abszolút értéket” képez.
- Ha a bemeneti váltakozó feszültség amplitúdója U , akkor
 - Az ellenállás maximális feszültsége kb. $U_{max} = U - 2U_D$ (a szokásos közelítést alkalmazva és figyelembe véve, hogy két dióda nyitott ki.)
 - $I_{max} = \frac{U - 2U_D}{R}$
 - A záróirányban lévő diódákon áram nem folyik, a maximális zárófeszültség pedig U (a letörési feszültségnek U -nál kell nagyobbak lennie!)
 - Pl. 16V-os amplitúdó, Si dióda és 500Ω ellenállás esetén $U_{max} = 14,6V$ $I_{max} = 29,2mA$.
- A lüktetés csökkentése ugyanúgy pufferkondenzátorral történik.



Veszteségek csökkentése

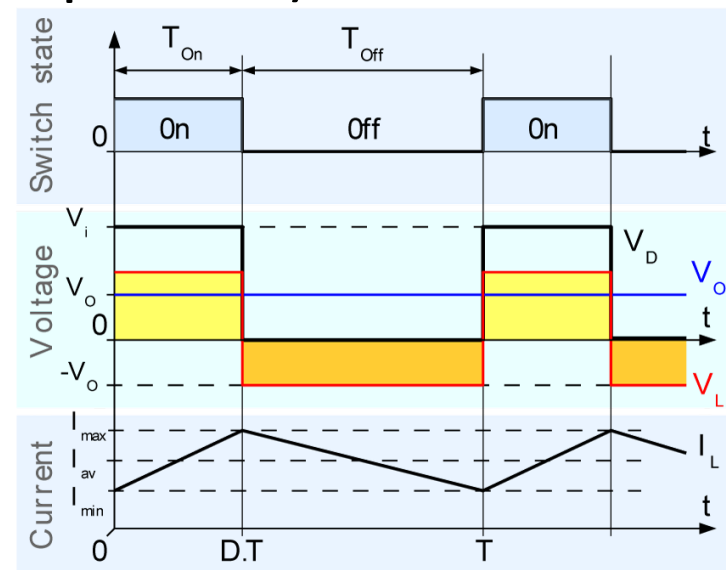
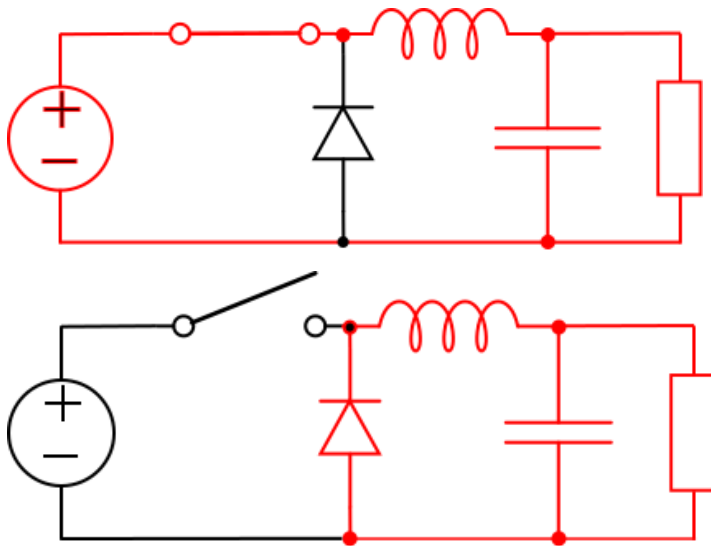


- Nagyobb áramok esetén a diódákon folyó áram okozta teljesítményveszteség nagy, a diódák pedig melegszenek. $P = UI$ minden eszközre igaz.
- Schottky dióda
 - Fém-félvezető átmenet, de hasonló tulajdonságokkal bír, mint a pn átmenet.
 - Egyenirányító tulajdonságú, 0,3-0,4V nyitófeszültségnél már igen nagy árammal vezet. (Ez kedvezőbb a szilícium pn átmenet esetén lévő 0,7V – 1V-nál)
 - Pl. 10A áram esetén 4W a 7W helyett.
- Aktív dióda
 - Egy nagyáramú MOS tranzisztor, amit a feszültség előjelétől függően ki/be kapcsolunk. Így a veszteség a MOS tranzisztor csatornaellenállásán eső teljesítmény (a csatornaellenállás kb. $m\Omega$ nagyságrendű)

DC/DC konverzió

- Egyenfeszültség szint változtatása
 - Transzformátor nem alkalmazható.
 - Kis méret, jó hatásfok (> 90%)
 - Kevés alkatrészrel megvalósítható
 - Jól szabályozható
- **Alapötlet**
 - Tároljunk energiát valamilyen energiatároló elemben.
 - Kapcsolással biztosítjuk azt, hogy a terhelésen folyamatosan áram folyjon, vagy a bemeneti feszültségforrásból, vagy pedig az energiatároló alkatrészből.
 - Egyenirányító diódákkal akadályozzuk meg azt, hogy az áram esetlegesen „rossz irányba” azaz ne a terhelés irányába folyjon.
 - A kapcsoló egy MOS tranzisztor, amit egy δ kitöltési tényezőjű négyszögjellel kapcsolgatunk. A kapcsolás frekvenciája pár 10kHz – pár 100kHz
 - A T periódusidő esetén a kapcsoló δT ideig zárt, $(1 - \delta)T$ ideig pedig nyitott.

Feszültség csökkentő (Buck, step down) konverter



- Egy MOS tranzisztor, mint kapcsoló, egy tekercs, egy dióda és egy kapacitás... Az ellenállás a terhelést jelképezi. (forrás: Wikipedia)
 - A kapcsoló (MOS tranzisztor) zárásakor egyre növekedő áram indul meg a tekercsben, amely a terhelés és a kapacitás irányába folyik, a dióda zárt.
 - Kiépül az energiatároló mágneses tér a tekercsben.
 - A kapcsoló nyitásakor a tekercs táplálása megszűnik. A mágneses tér kényszeríti az áramot, a tekercs baloldali pontjának feszültsége negatívvá válik, így a dióda nyit, és így zárul az áramkör.
 - A terhelésen a tekercs egyre csökkenő árama folyik tovább.

Számítás

- Néhány közelítéssel élve a számítás **nagyon egyszerű**.
 - (ezzel szemben a pontos számítás nem az, de a megértéshez nem szükséges...)
- A tranzisztort és a diódát ideális kapcsolónak tekintjük.
- Minden feszültség és áram periódusban érvényes átlagával számolunk
- A Kirchhoff-törvények igazak az átlagos mennyiségekre is!
 - Bizonyítás pl. a huroktörvényre:
 - $$\sum \bar{u}_i = \sum \frac{1}{T} \int u_i(t) dt = \frac{1}{T} \int [\sum u_i(t)] dt = 0$$
- Periódikus egyensúlyban vizsgáljuk az átalakítót.
 - Azaz egy periódusban pontosan **ugyanannyi energiát veszünk ki** az energiatárolókból, mint **amennyit beletettünk**. (hogyan időben ez milyen függvény szerint történik, nem érdekes.)

Periodikus egyensúly, tekercs esetén

- Állítás: periódikus egyensúlyban a tekercs feszültségének átlagértéke 0.
- Bizonyítás:

Induljunk ki tekercs feszültség-áram összefüggéséből

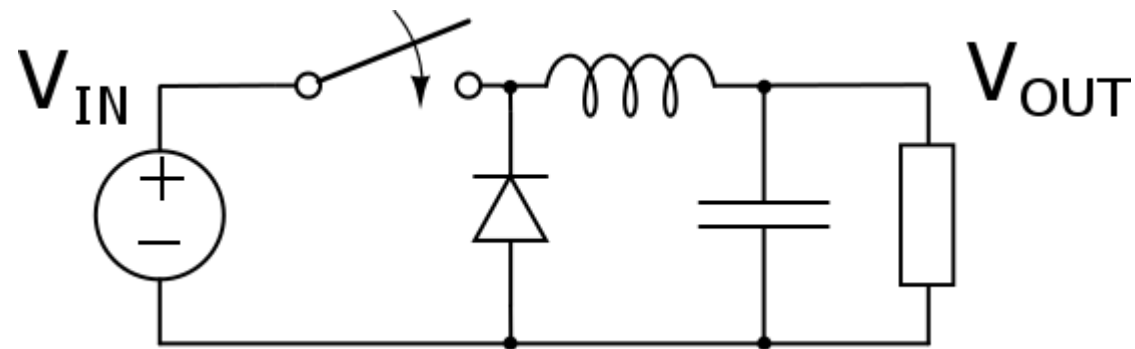
$$V_L(t) = L \frac{dI(t)}{dt}$$

Integráljuk a differenciálegyenletet a teljes periódusra

$$\int_0^T V_L(t) dt = L \int_{I(0)}^{I(T)} dI = L(I(T) - I(0)) = 0$$

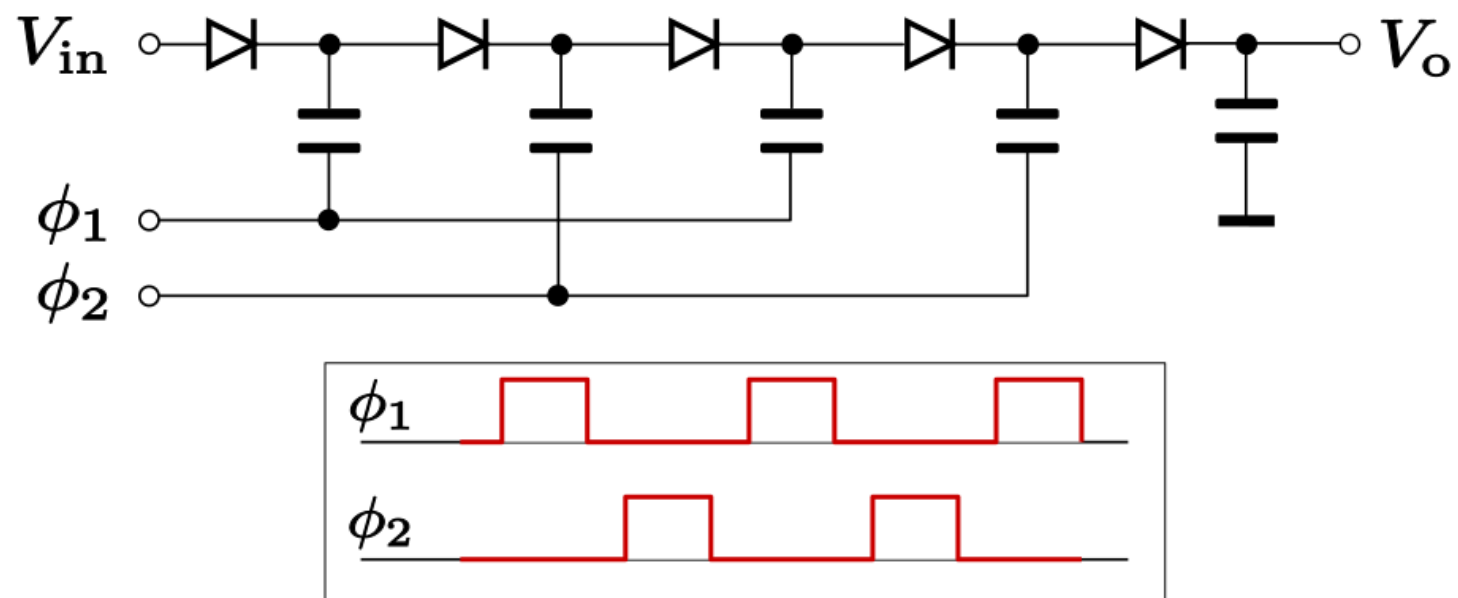
Mivel $I(T) = I(0)$, mert egyensúlyban van, a tekercs energiája ugyanakkora a periódus elején, mint a végén. (a mágneses térben tárolt energia az áram négyzetével arányos). Azaz:

$$\bar{V}_L = \frac{1}{T} \int_0^T V_L(t) dt = 0$$



- A továbbiakban **átlagokkal** dolgozva.
- A tekercs feszültsége, ha a kapcsoló zárt, $V_L = V_{IN} - V_{OUT}$, ha a kapcsoló nyitott, akkor pedig $V_L = -V_{OUT}$
- A teljes periódusidőre a tekercs feszültségének átlaga 0, azaz:
- $V_L = \delta(V_{IN} - V_{OUT}) + (1 - \delta)(-V_{OUT}) = 0$
- Azaz: $V_{OUT} = \delta V_{IN}$
- Tehát a **kitöltési tényezővel** szabályozható a kimeneti feszültség.
 - Folyamatos szabályozást igényel, de ez gond nélkül megoldható.
 - Kész katalógus IC-ket árulnak erre a célra.

Töltéspumpa (charge pump)



- Kizárólag kapacitást használ energiatároló elemként
- Tipikusan nagy frekvenciával kapcsolgat.
- CMOS áramkörökben könnyen megvalósítható.

Töltéspumpa használata

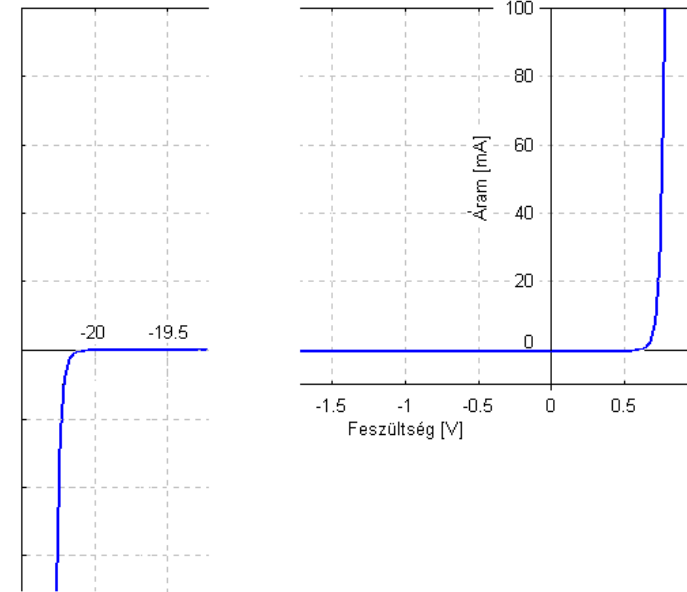
- A diódák helyére megfelelően vezérelt transzfer kapukat rakva teljes mértékben CMOS kompatibilis
 - EEPROM és FLASH memóriákban a törlő, programozó nagy (10-20V) feszültségek előállítására
 - Szinteltoló áramkörökben, pl. MAX232 $\pm 7,5V$ az 5V tápfeszültségből.
 - Gate driverek, a nagyobb gate-source feszültség előállításához
 - (a tranzisztor ellenállása csökken)
 - LCD meghajtók
 - Stb.
- Kevesebb drága alkatrész, egyszerűbb felépítés, mint az induktivitást tartalmazó áramkörök.

Feszültség stabilizálás

- A felsorolt DC-DC átalakítási módszerek nem szolgáltatnak teljesen egyenfeszültséget.
 - A kimeneti ingadozásokat szűrővel (pufferkondenzátorral) csökkenteni lehet, de teljesen nem lehet eltüntetni.
 - Érzékeny (analóg) alkalmazásokban **stabilizálni** kell.
- A feszültség stabilizátorok olyan áramkörök, amelyek egy referencia-feszültség segítségével stabilizálják a kimeneti feszültséget.
- A kimeneti feszültség mindig kisebb, mint a bemeneti.
- Attól függően, hogy a minimális feszültségkülönbség mekkora, beszélünk
 - Normál vagy kis feszültségesésű (LDO – low dropout) stabilizátorról.

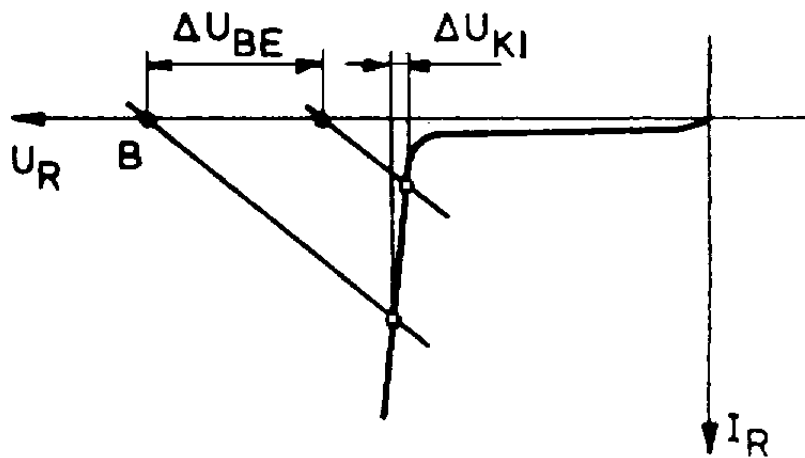
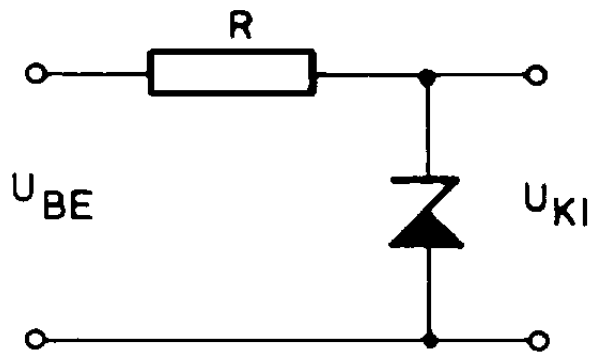
A dióda záróirányú működése

- Egy adott kritikus zárófeszültségnél, az ún. V_{BR} letörési feszültségnél a dióda záróárama hirtelen megnő és viszonylag nagy áramok folynak a diódán nagyon kis további feszültség-emelkedéssel. Ez a karakterisztika feszültség stabilizálásra alkalmazható, mert nagy áramváltozáshoz igen kis feszültségváltozás tartozik.



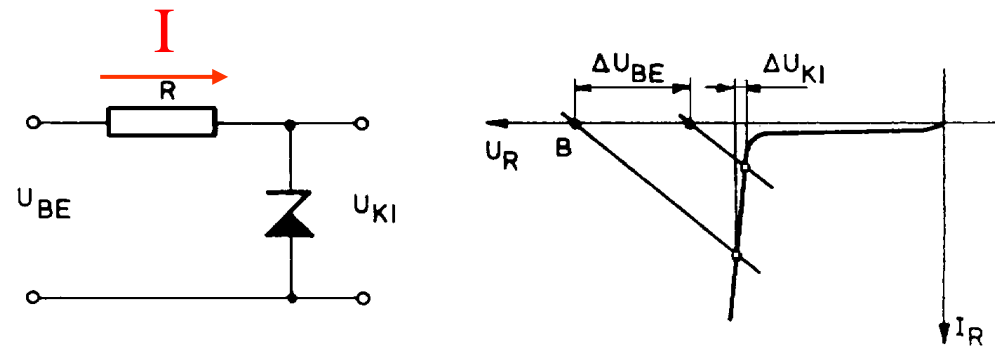
- Ezt a differenciális ellenállással szoktuk modellezni.
- $r_d = \frac{\partial U}{\partial I} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I}$.
- Az erre a célra gyártott diódákat Zener diódának nevezik.

A Zener dióda



- A letörési, igen meredek karakterisztikát használjuk ki.
- A karakterisztikán látható, hogy **nagy bemeneti feszültségváltozások esetén is a Zener dióda feszültsége keveset változik.**

Zener dióda, példa

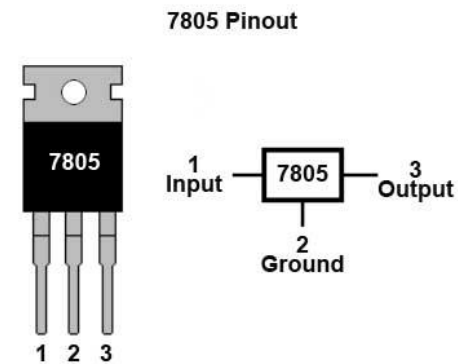
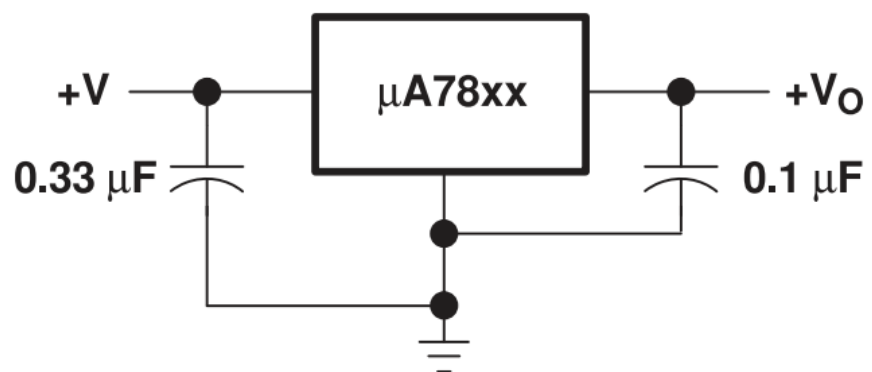


- Határozzuk meg a Zener dióda áramát és feszültségét, ha $U_{BE}=12V$, $R=100\Omega$, a Zener dióda letörési feszültsége pedig $5,6V$!
 - Mivel a bementi feszültség meghaladja a Zener letörési feszültségét, a Zener dióda letörésben működik, feszültsége kb. $5,6V$, árama pedig

$$I \cong \frac{U_{IN} - U_Z}{R} = \frac{12 - 5,6}{0,1} = 64mA$$

- Mennyit változik a kimenet feszültsége, ha a bemeneti feszültség $1V$ amplitúdóval megváltozik? A differenciális ellenállás 2Ω .
 - A feszültségosztás alapján a kimeneti feszültség változása:
 - $\Delta U_{OUT} = \Delta U_{IN} \cdot \frac{r_d}{R_t + r_d} = \frac{2}{102} = 20mV$
 - Azaz a bemenet feszültség ingadozása ötvened részére csökkent.

Gyakorlatban



- Kész, minimális kiegészítő alkatrészt igénylő integrált áramkörök.
- Pl. a 78XX sorozat (negatív párja a 79XX)

Tápegységek

- Általában az eszközeink kapcsolóüzemű tápegységgel rendelkeznek.
- Bizonyos határok között a bemeneti feszültség mindegy
 - Általában 80-250V stb.
- Ezekben a kimeneti egyenfeszültséget a következő lépésekben állítjuk elő:
 - Egyenirányítás – szűrés – DC/DC átalakítás – stabilizálás (ha szükséges)
- A szűréssel viszont van egy probléma:
 - A tápegység csak akkor vesz fel áramot a hálózatról, amikor a bemeneti feszültség a pufferkondenzátor feszültségét meghaladta.
 - Azaz az áram alakja közel sem szinuszos.
 - Ez problémát okoz
 - Terheli a hálózatot. (Kb. 25-30%-al túl kell méretezni a hálózatot pl. egy irodaházban)
 - Nagy a felharmonikus tartalma, amivel zajt, zavart juttat visszafelé a hálózatba.

A teljesítménytényező korrekció (PFC)

- Nem használnak pufferkondenzátort a Graetz-híd után, hanem az egyenirányított, közel félszinuszos feszültséget egy Boost konverter megfelelő vezérlésével valódi egyenfeszültséggé alakítják át.
- Ez a feszültség nagyobb, mint a bejövő szinusz csúcsfeszültsége, pl. 380-400V között.
- A konvertert úgy vezérlik, hogy az áram pontosan kövesse a bejövő feszültséget
 - A kitöltési tényező változtatásával.
- Pl. <http://www.ti.com/product/ucc29950/datasheet>
- Ára: 75cent...

Források, ajánlott irodalom, érdekességek

■ Szimulációk

- [Egyutas egyenirányítás](#)
- [Kétutas egyenirányítás](#)
- [Buck konverter](#)