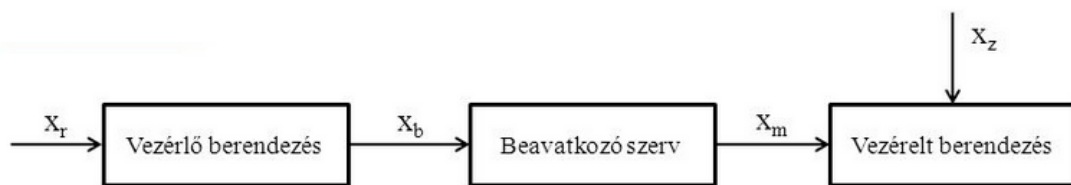
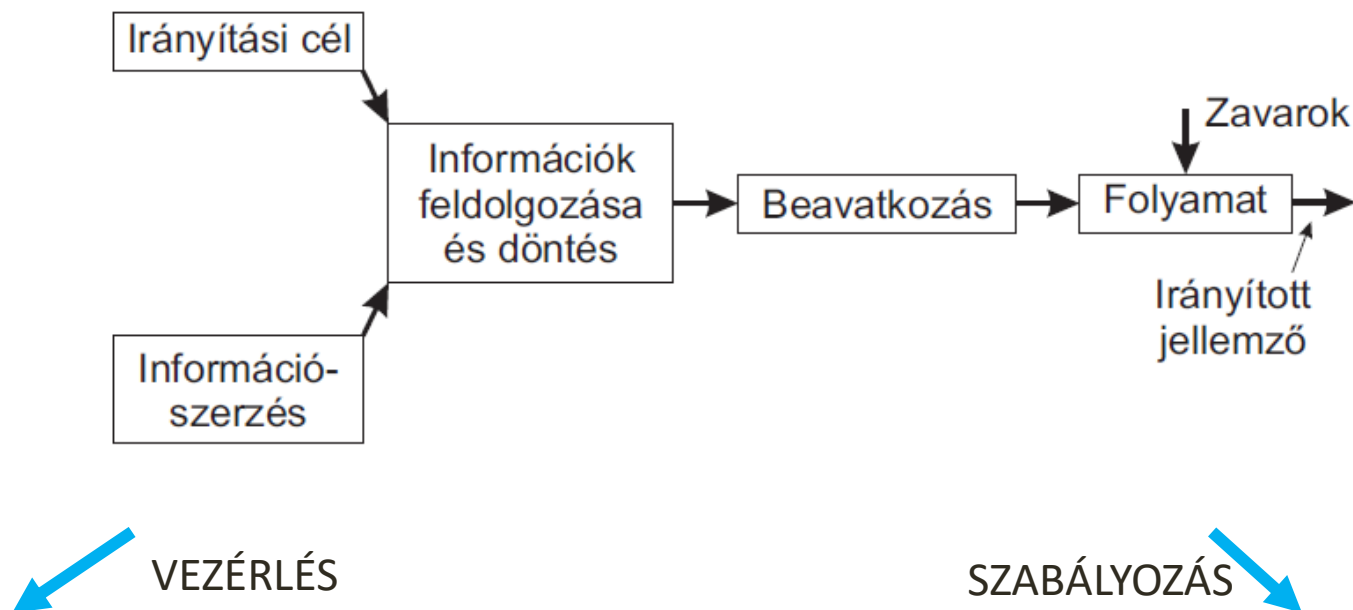


Teljesítményelektronikai áramkörök tervezése és szimulációja Kompenzációs áramkörök

Ismétlés: Irányításelmélet



Szabályozási lehetőségek -VMC

- Voltage mode control (VMC)
 - A kimeneti feszültség kerül mérésre (leggyakrabban feszültségosztó segítségével)
 - A mért feszültséget összehasonlítjuk egy referenciafeszültséggel (hibajel)
 - A kompenzátor az átviteli karakterisztika formálásához szükséges
 - A komparátor és a kompenzátor a leggyakrabban egy műveleti erősítővel valósítják meg (egy egység), illetve korszerűbb esetben programozható Zener diódával (TL431)
 - A hibajel egy PWM generátorba kerül, majd a gate meghajtóba, vagy közvetlenül a kapcsolóelemre
 - Viszonylag lassúbb szabályozást tesz lehetővé, nagyobb válaszidővel

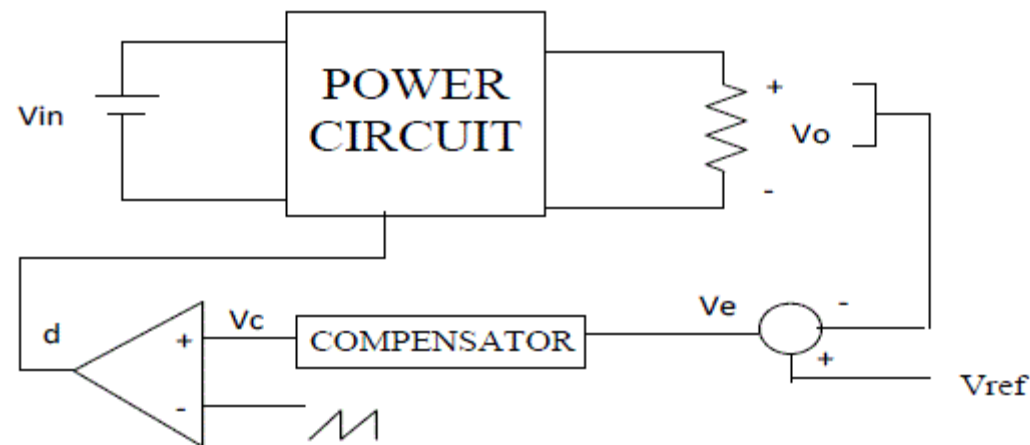
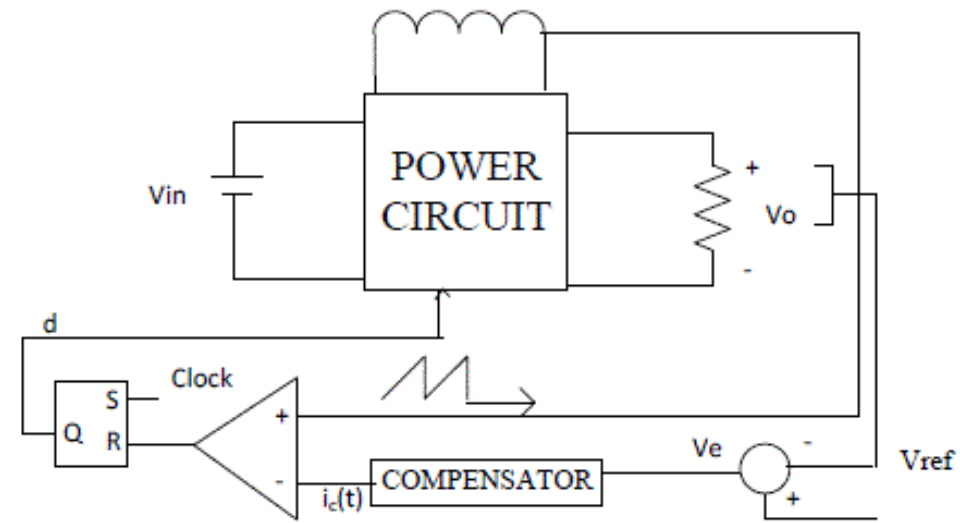


Fig. 1: Voltage mode control

A hibajel V_e (kimeneti feszültségből) segítségével befolyásoljuk a tekercsen keresztül a kimeneti feszültséget.

Szabályozási lehetőségek -CMC

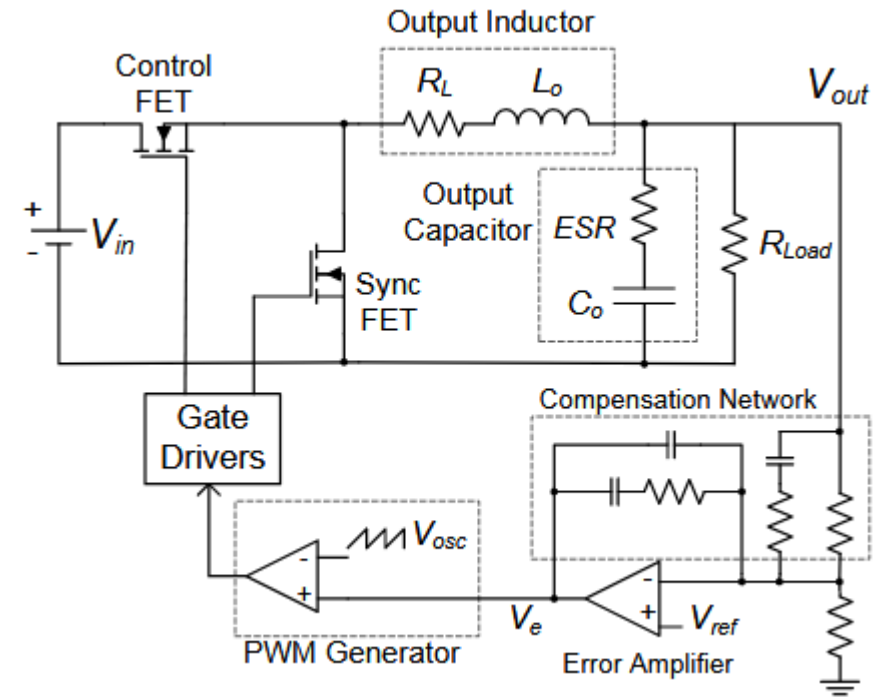
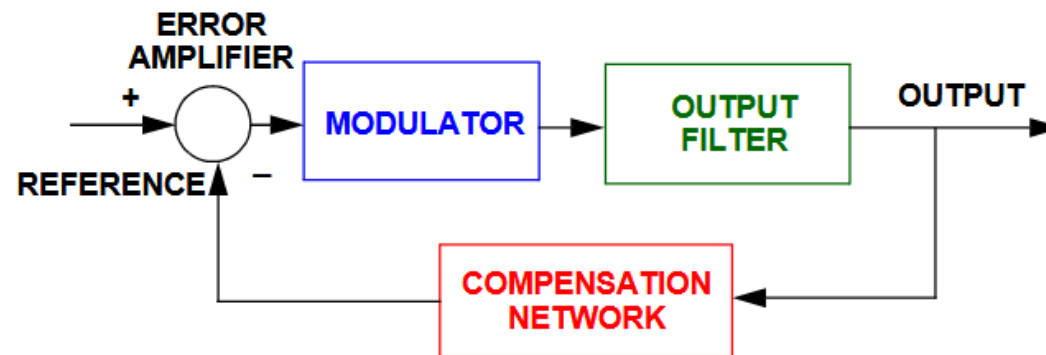
- Current Mode Control (CMC)
 - Ennél a módszernél a kimeneti feszültség és áram is szabályozásra kerül (két szabályozási hurok)
 - A CMC kiegészíti a VMC lassabb válaszidejét, mivel a tekercs árama egy meghatározott meredekséggel emelkedik
 - A kimeneti feszültség-hibajelét használjuk a tekercs csúcsáramának befolyásolására
 - Ciklikus túláramvédelem
 - Általában forward típusú konvertereknél használatos
 - Összetettebb szabályozást valósít meg, mint a VMC



A hibajel V_e (kimeneti feszültségből) segítségével befolyásoljuk a tekercs csúcsáramát.

Szabályozási kör

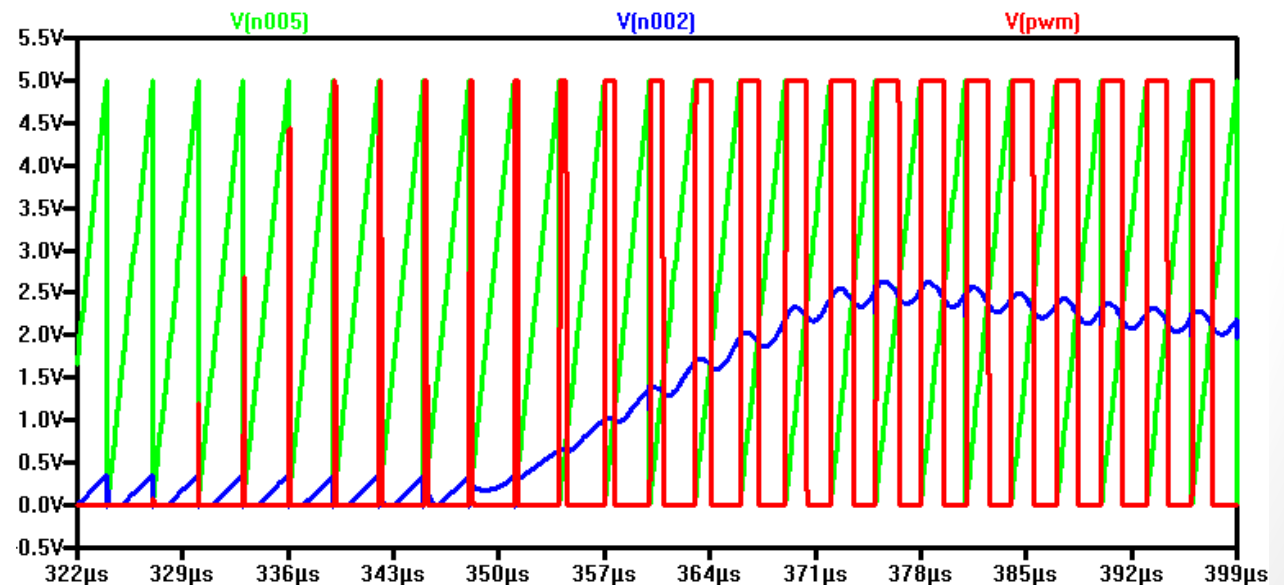
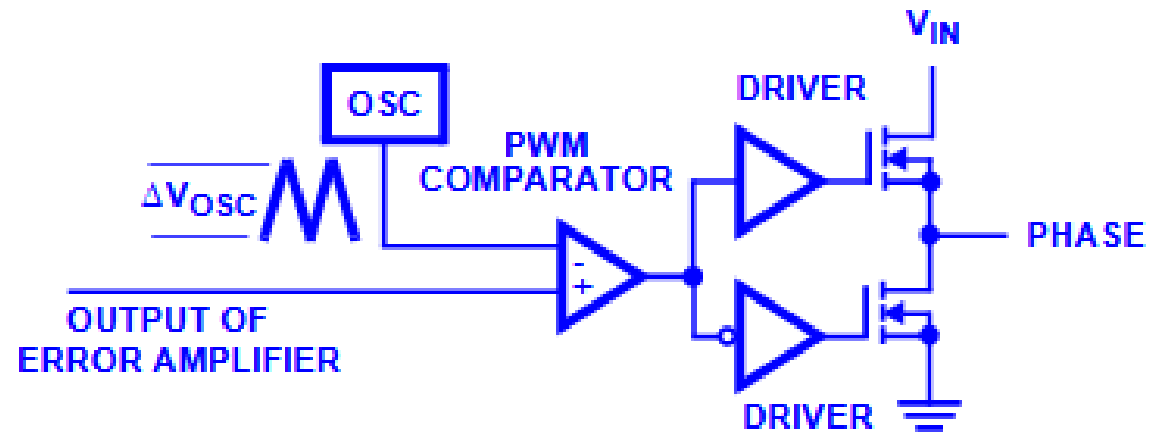
- A konverter megtervezése után következik a kompenzációs hálózat tervezése
- A szabályozási kör Buck konverter esetén a következőképp épül fel
- Az egyes tagokat részletesebben is áttekintjük



Modulátor

- A modulátor blokk magába foglalja a PWM jelet előállító komparátort és a kapcsolásért felelős elemeket (gate meghajtó, kapcsolóelem, komparátor)
- A komparátor bemenetére kerül a hibajel, melyet a komparátor hasonlít össze egy referenciával (háromszög jel)
- A modulátor erősítését a következő összefüggés határozza meg:

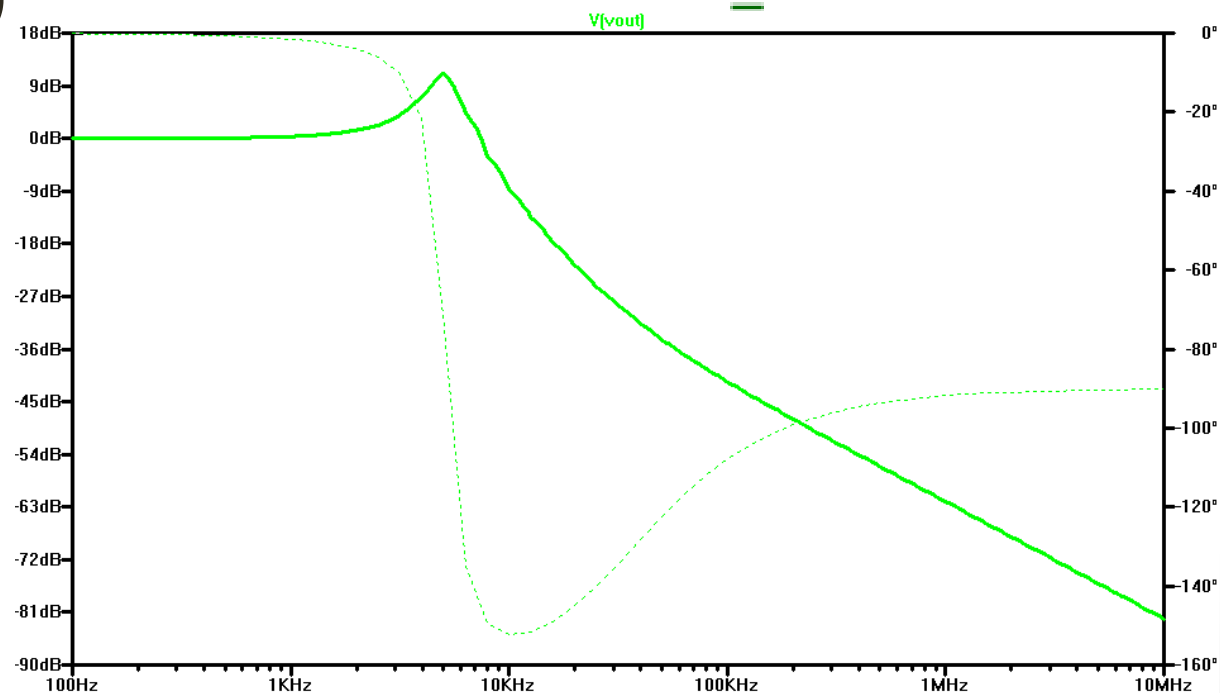
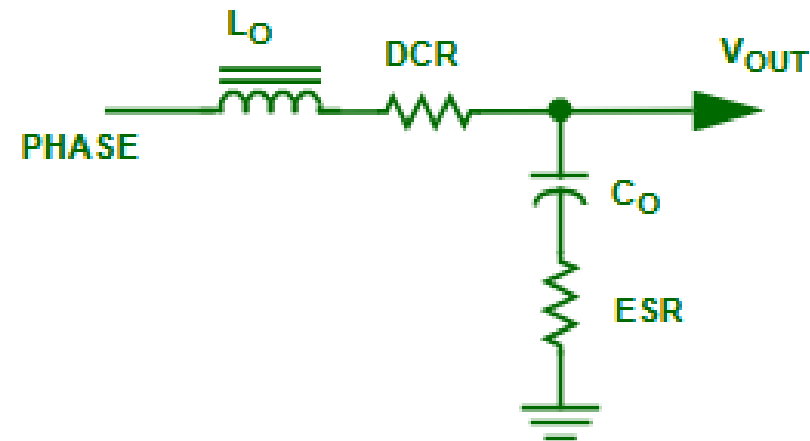
$$\text{GAIN}_{\text{MODULATOR}} = \frac{V_{\text{IN}}}{\Delta V_{\text{OSC}}}$$



Kimeneti szűrő (output filter)

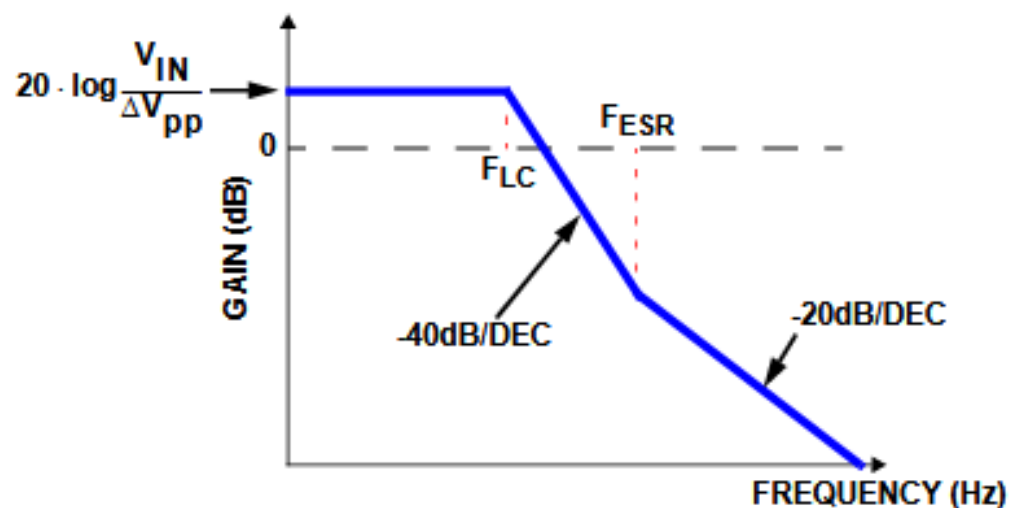
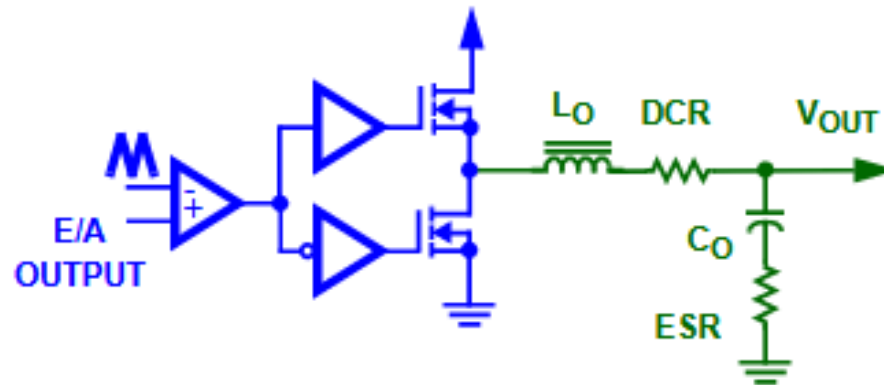
- A kimeneti szűrő magába foglalja L tekercset valamint az összes kimeneti kapacitást (amennyiben több van)
- Fontos, hogy a tervezés során ezek soros veszteségi ellenállását (DCR, ESR) is figyelembe kell venni
- Az LC szűrő esetén két fontos töréspontot különböztetünk meg:

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad f_{ESR} = \frac{1}{2\pi \cdot ESR \cdot C_O}$$



Nyilthurkú erősítés

- A modulátort és a kimeneti szűrőt együttesen megvizsgálva a rendszer nyilthurkú erősítését kapjuk (gain openloop)
- A kapott átviteli függvényből megkaphatók a rendszer zérusai és pólusai
- A későbbiekben a zérusok fontos sarokkövei lesznek az alkalmazott kompenzációs technikának (így tehát nagyban függ a választott kondenzátor típusától és ESR értékétől)



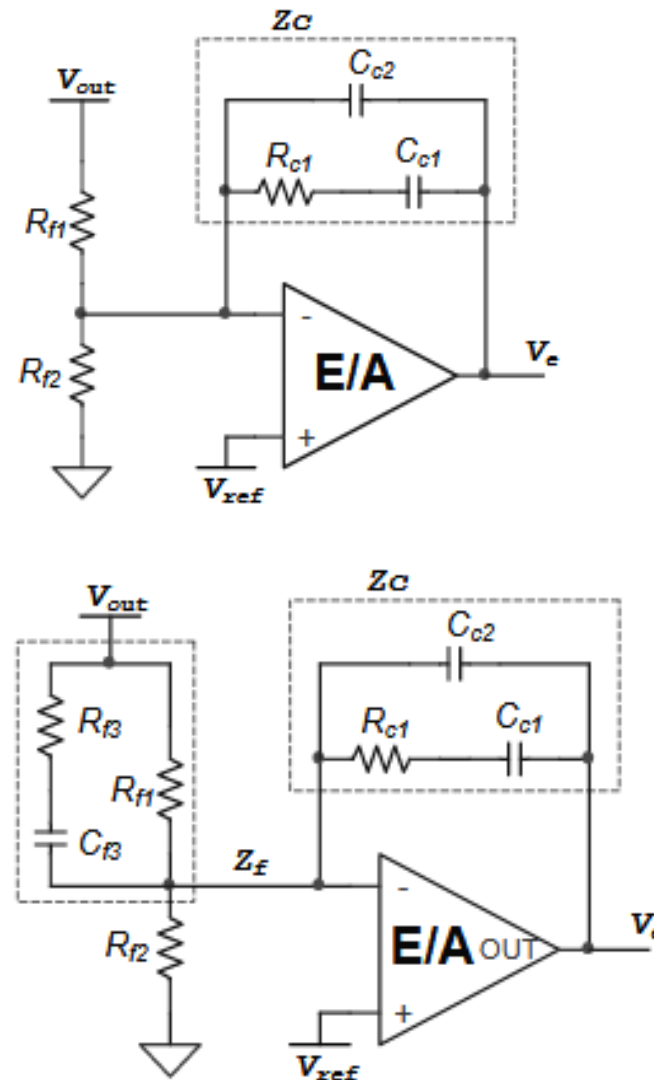
Rendszer zérusai (Numerator)

$$\text{GAIN}_{\text{OPENLOOP}} = \frac{V_{\text{IN}}}{\Delta V_{\text{OSC}}} \cdot \frac{1 + s \cdot \text{ESR} \cdot C_{\text{OUT}}}{1 + s \cdot (\text{ESR} + \text{DCR}) \cdot C_{\text{OUT}} + s^2 \cdot L_{\text{OUT}} \cdot C_{\text{OUT}}}$$

Rendszer pólusai
(Denominator)

Kompensációs hálózatok

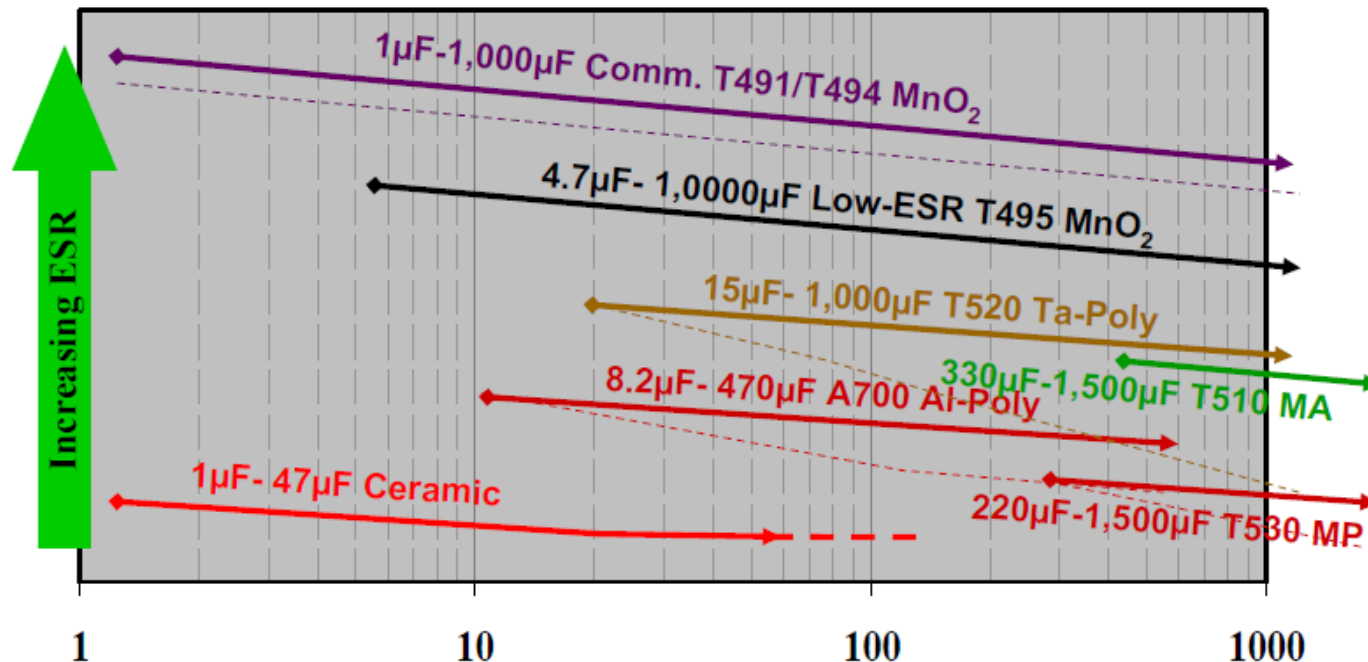
- A kompenzációs hálózat segítségével formálható az átviteli karakterisztika
- Mi is a célunk?
 - A konverterünk minden esetben alkalmazkodjon a terheléshez (kvázi ha külsőleg kibillentjük az egyensúlyi állapotából)
 - Kiküszöbölje a zavarokat
- A kompenzált rendszer Bode diagramja a következő jellemzőkkel rendelkezik:
 - A görbe meredeksége -20db/dekád az f_0 pontban
 - A kívánt sávszélességgel rendelkezik (mely általában a kapcsolási frekvencia 20-30%-a)
 - A fázistartaléka legalább 45° , f_0 pontban
- A gyakorlatban a kompenzációs áramkörök tekintetében leggyakrabban Type II. és Type III. típusú kompenzációt alkalmaznak



Mikor melyik kompenzátort alkalmazzuk?

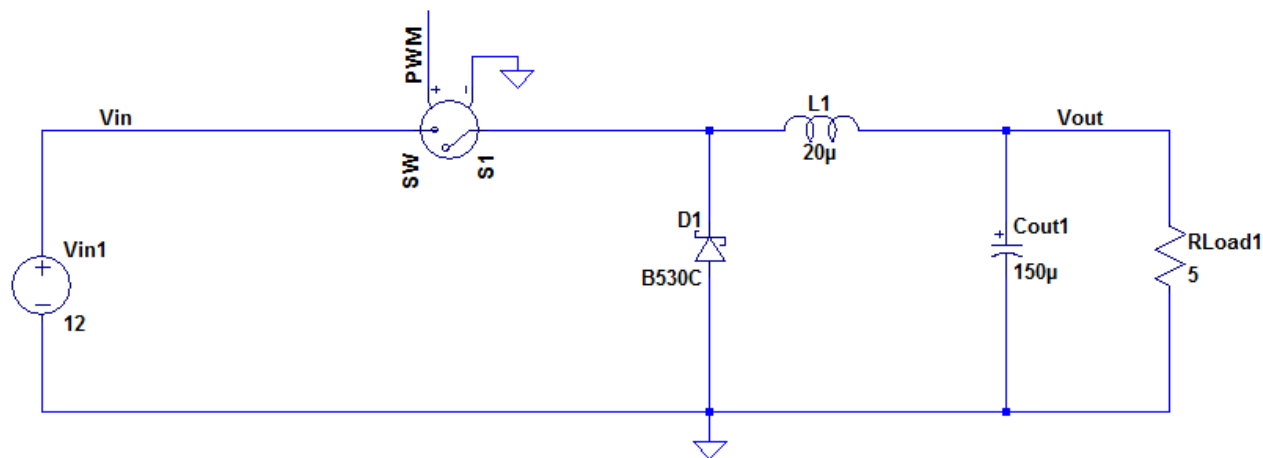
Compensator Type	Relative location of the crossover and power-stage frequencies	Typical Output Capacitor
Type II (PI)	$F_{LC} < F_{ESR} < F_0 < F_S / 2$	Electrolytic, POS-Cap, SP-Cap
Type III-A (PID)	$F_{LC} < F_0 < F_{ESR} < F_S / 2$	POS-Cap, SP-Cap
Type III-B (PID)	$F_{LC} < F_0 < F_S / 2 < F_{ESR}$	Ceramic

- POS-Cap -> Polymer Tantal Capacitor
- SP-Cap -> Polymer Aluminium Capacitor



Kompenzáció tervezése Buck konverterhez

A példánkban a Buck konverter a következő:



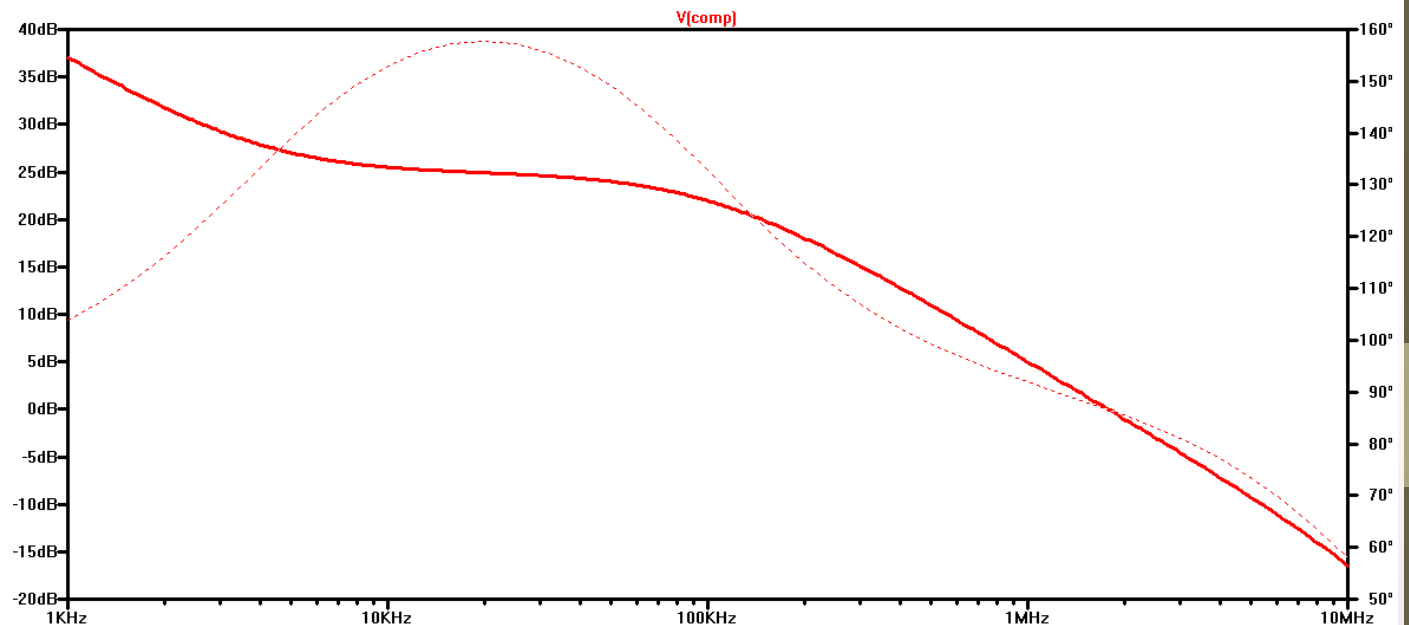
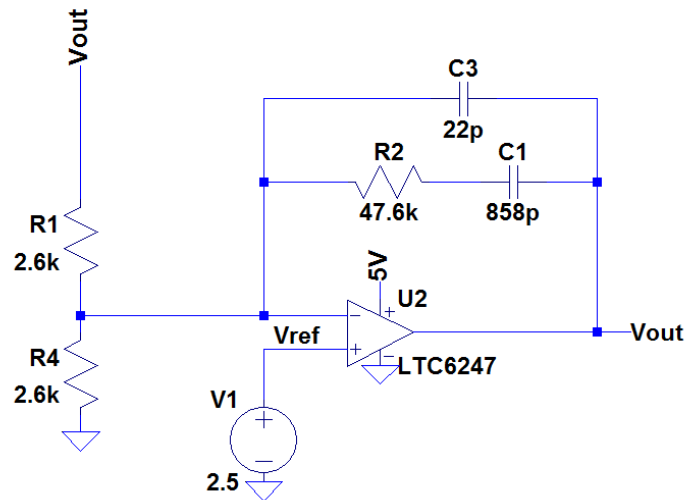
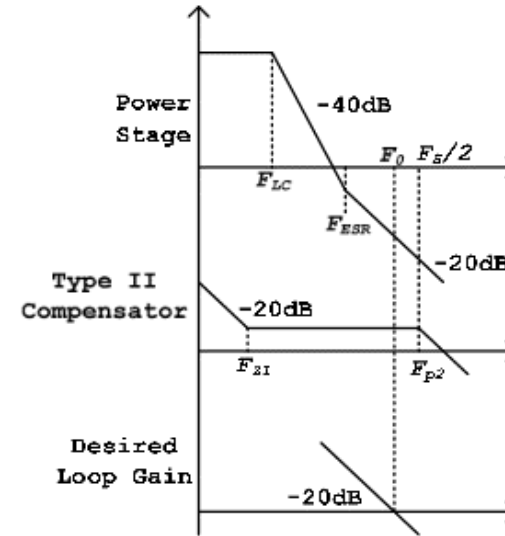
BUCK CONVERTER				
User Parameters			Calculated Values	
V _{IN} [V]	12		D [%]	41,67%
V _{OUT} [V]	5		1-D [%]	58,33%
I _{OUT} [A]	1		T _{SW} [s]	3,33E-06
F _{SW} [Hz]	300000		T _{ON} [s]	1,389E-06
L [H]	0,000020		T _{OFF} [s]	1,944E-06
ΔV _{OUT} [V]	0,1		ΔI _L [A]	0,4861
C _{OUTdesigned} [F]	0,000150		I _{Lmax} [A]	1,2431
ESR _{C_designed} [Ω]	0,100		I _{Lmin} [A]	0,7569
V _{RAMP} [V]	5		I _{OL} [A]	0,2431
V _{ref} [V]	2,5		V _{Lmax} [V]	7
			V _{Lmin} [V]	-5
			C _{OUTmin} [F]	2,025E-06
			ESR _C [Ω]	0,203
			I _{CIN RMS} [A]	0,493
			R _{load min} [Ω]	20,57
			F _{LC} [Hz]	2906
			F _{ESR} [Hz]	10610

$$f_{LC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{20\mu H \cdot 150\mu F}} = 2,905kHz$$

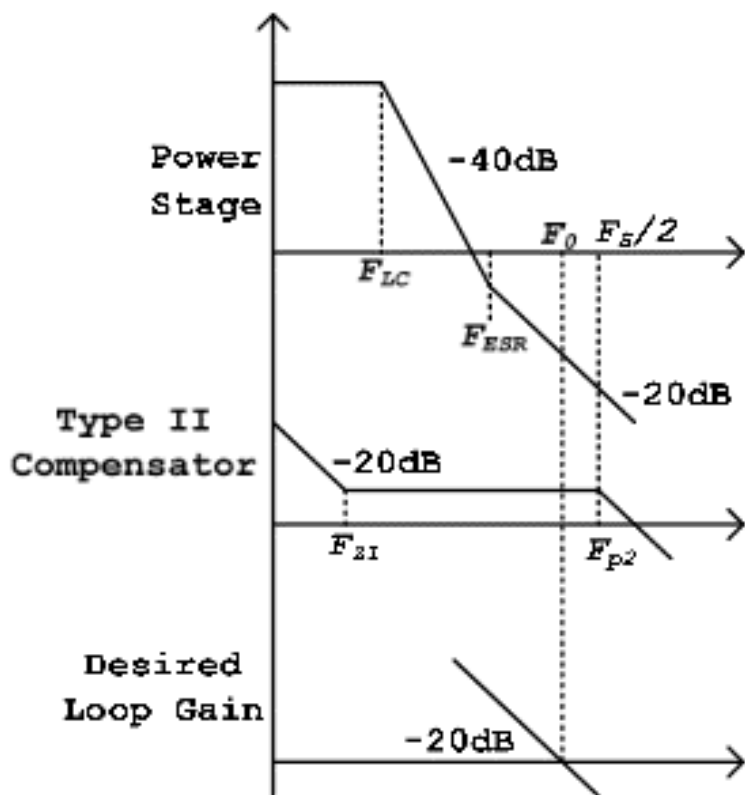
$$f_{ESR} = \frac{1}{2\pi \cdot ESR \cdot C_o} = \frac{1}{2\pi \cdot 100m\Omega \cdot 150\mu F} = 10,61kHz$$

Kompenzációs lehetőségek – Type II.

- A Type II-es kompenzáció segít az átviteli karakterisztika kialakításában és egy 90° -os fázisnövelést ad (phase boost)
- A fázisnövelésre a konverter kimeneti szűrője (LC) által okozott rezonancia ellensúlyozás miatt van szükség
- A zérusokat és pólusokat a megfelelő helyekre helyezzük



Tervezés (domináns frekvenciák)

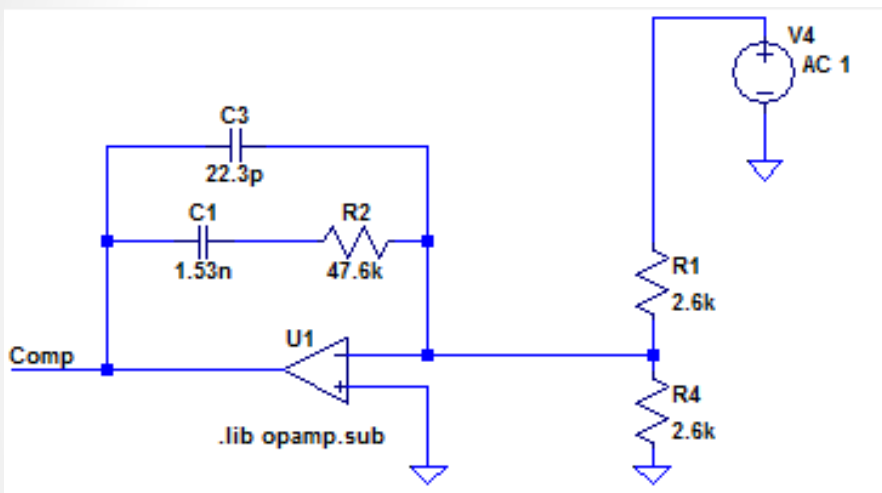


- Az alkatrészek méretezése előtt a domináns töréspontokat kell meghatároznunk:
- f_0 – A tranziensre adott válaszidőt befolyásolja. A nagyobb keresztelési frekvencia esetén gyorsabb tranziens választ eredményez. Viszont elég alacsonynak kell lennie ahhoz, hogy a kapcsolási zajt csökkentse. A szükséges fázistartalék f_0 -nál legalább 45° kell, hogy legyen. f_0 tipikus értéke:

$$\frac{1}{10} f_{sw} < f_0 < \frac{1}{5} f_{sw}$$

- A kompenzátor zérusa a konverter LC kör rezonanciafrekvenciájának 0,75-szörösére kerül
- A kompenzátor pólusa pedig a kapcsolási frekvencia felére
- Tehát a példánkban:
- f_0 – 35kHz ($f_{sw} = 300$ kHz)
- f_z – 2,179kHz ($f_{LC} = 2,905$ kHz)
- f_p – 150kHz ($f_{sw} = 300$ kHz)

Tervezés (alkatrészek méretezése)



- Első lépésben R1-et kell méreteznünk (ennek értéke tipikusan $2k\Omega$ - $5k\Omega$ közötti)
- Ennek függvényében R4 (a hibajelel előállító osztó) számítható:

$$R4 = \frac{R1 \cdot V_{ref}}{V_o - V_{ref}} = \frac{2,6k\Omega \cdot 2,5V}{5V - 2,5V} = 2,6k\Omega$$

- R2 értéke:

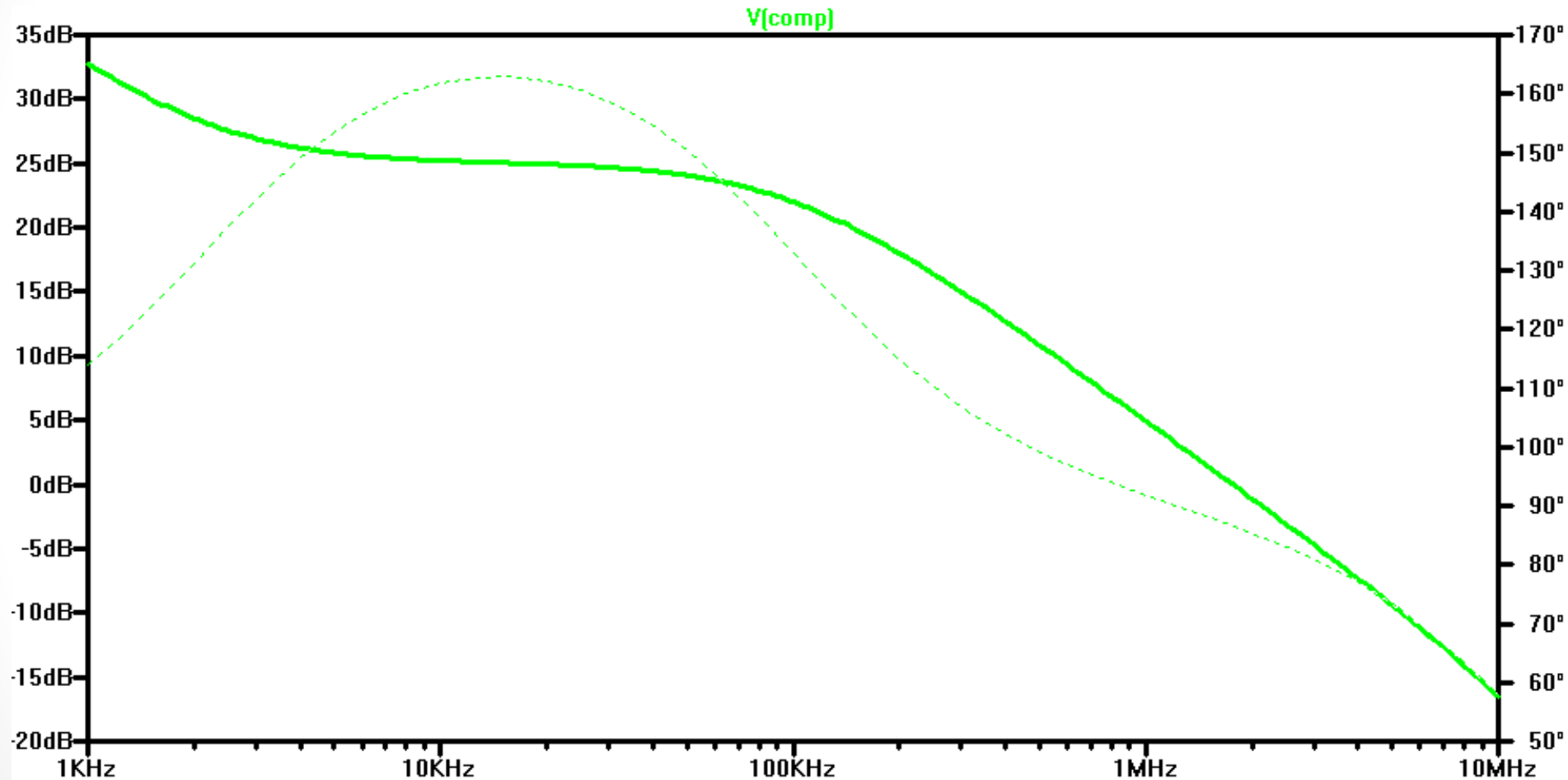
$$R_2 = \frac{R_1 \cdot F_{ESR} \cdot V_{RAMP} \cdot f_0}{V_{IN} \cdot f_{LC}^2} = \frac{2,6k\Omega \cdot 10,61kHz \cdot 5V \cdot 35kHz}{12V \cdot 2,905^2 kHz} = 47,67k\Omega$$

- C1 kerül a zérus frekvenciára C2 pedig a pólusfrekvenciára:

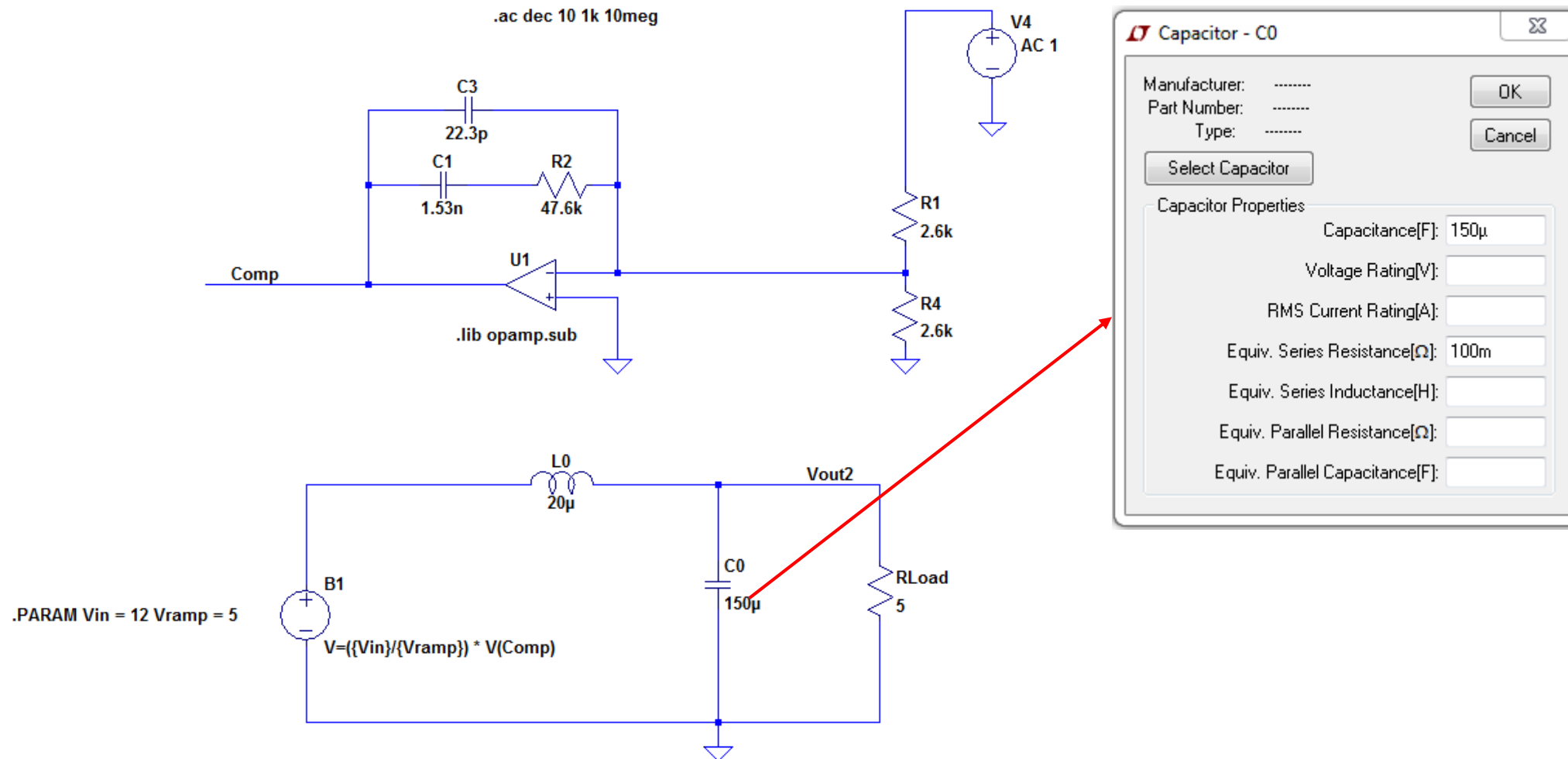
$$C_1 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot F_{Z1}} = \frac{1}{2\pi \cdot 47,6k\Omega \cdot 2,179kHz} = 1,53nF$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi \cdot R_2 \cdot F_{P2}} = \frac{1}{2\pi \cdot 47,6k\Omega \cdot 150kHz} = 22pF$$

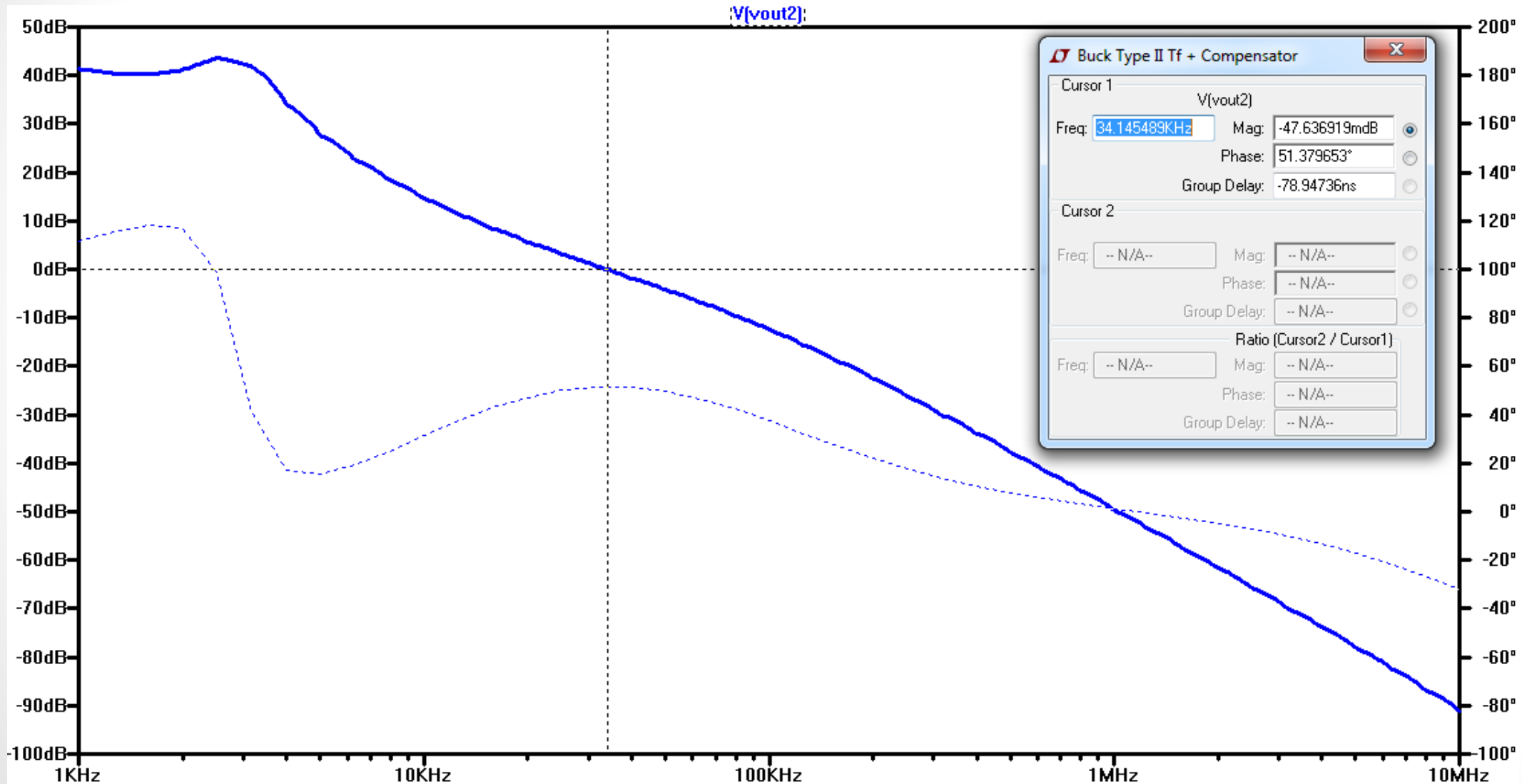
Kompenzációs áramkör Bode diagramm



Buck konverter + kompenzátor (átviteli függvény)

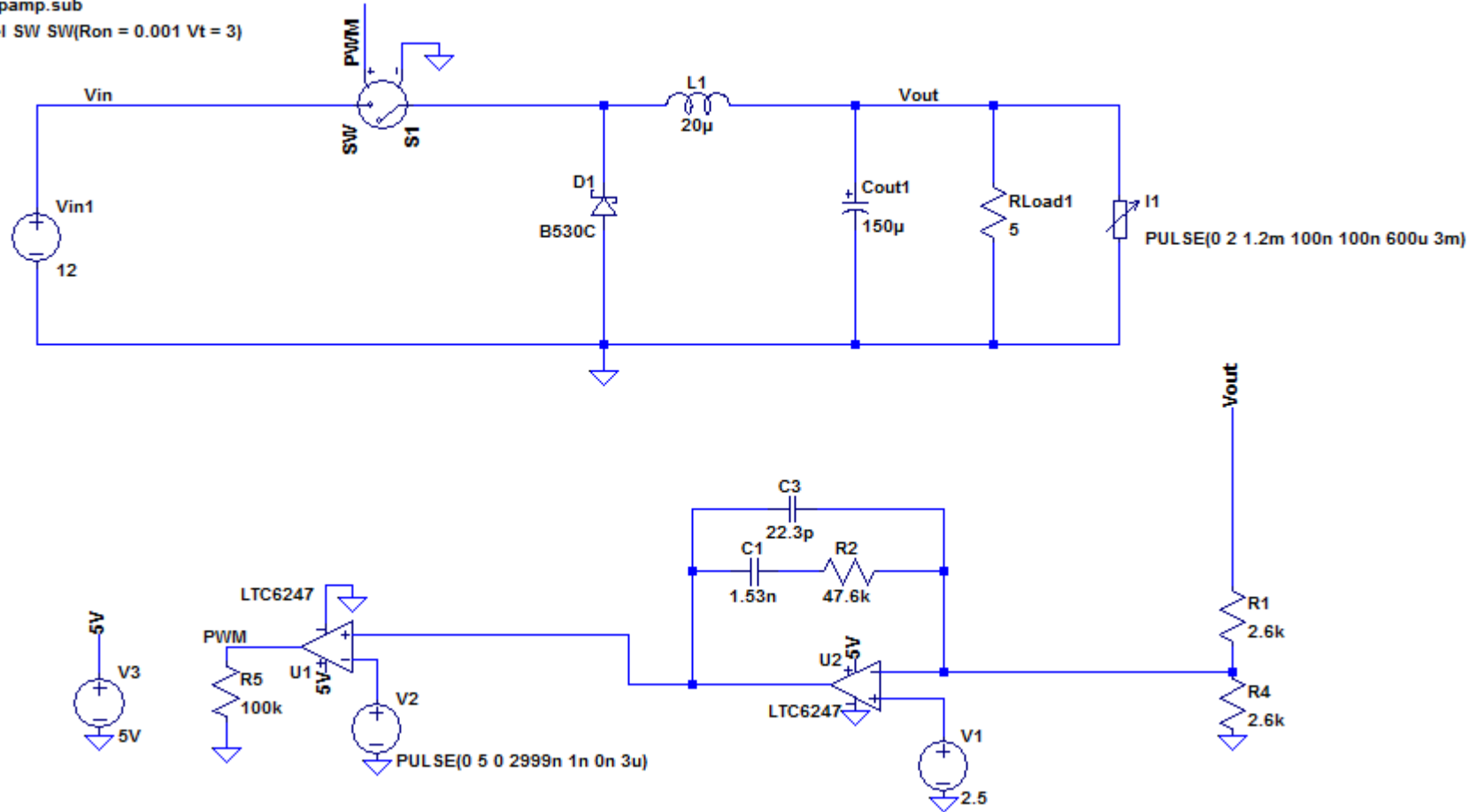


Kompenzációs áramkör + Buck bode diagram



Buck + Type II. kompenzátor (tranzients)

.lib opamp.sub
.model SW SW(Ron = 0.001 Vt = 3)



Szimulációs eredmények

