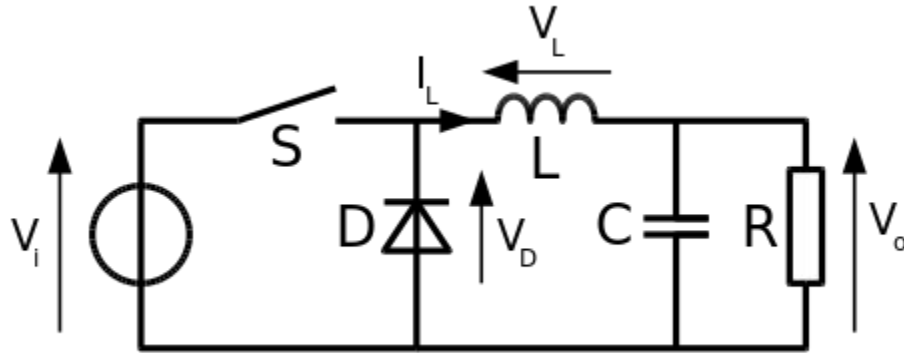


Buck converter

Gabriele Morè
Paolo Olivieri

Buck Converter

Un buck converter è un tipo di convertitore DC-DC che riduce la tensione di ingresso a un livello di tensione più basso all'uscita. È ampiamente utilizzato per alimentare dispositivi elettronici a bassa tensione da una sorgente di tensione più alta.



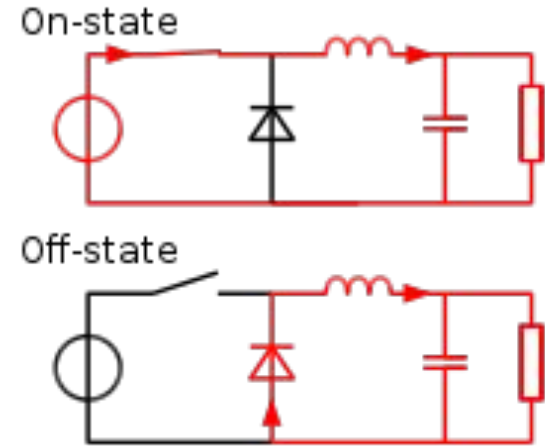
Principio di funzionamento

Fase di Conduzione (On-State):

- L'interruttore è chiuso.
- L'induttore è connesso alla fonte di energia e accumula energia magnetica.
- La corrente fluisce attraverso l'induttore, caricando il condensatore di uscita e alimentando il carico.

Fase di non conduzione (Off-State):

- L'interruttore è aperto.
- L'energia accumulata nell'induttore viene rilasciata al carico.
- Il diodo di ricircolo fornisce un percorso per la corrente dell'induttore, mantenendo la continuità della corrente.



Componenti principali

- **Interruttore** (tipicamente un MOSFET o altri transistor)
Controlla la connessione e la disconnessione dell'induttore dalla sorgente di energia.
- **Diodo**
Permette alla corrente di fluire quando l'interruttore è aperto.
- **Induttore**
Accumula energia durante la fase di conduzione e la rilascia durante la fase di non conduzione.
- **Condensatore**
Stabilizza la tensione di uscita e riduce il ripple.

Modalità di funzionamento

Un convertitore buck può operare in due modalità di funzionamento:

- Modalità di funzionamento continuo (**CCM**)
- Modalità di funzionamento discontinuo (**DCM**)

In modalità CCM la corrente che circola nell'induttore risulta sempre maggiore di zero durante il ciclo di commutazione.

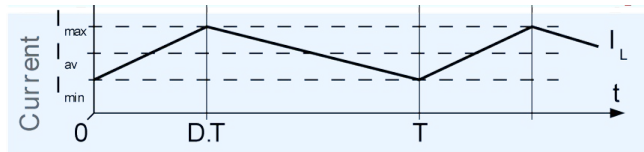
Al contrario, in DCM, la corrente nell'induttore si annulla prima della fine del periodo di commutazione

Nella progettazione che segue si utilizza la modalità **CCM**

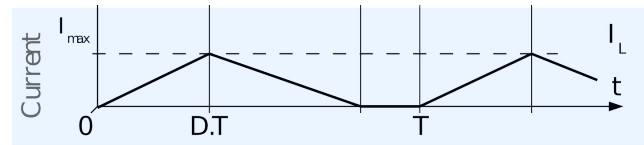
Modalità di funzionamento

Viene mostrata la differenza dell'andamento della corrente I_L nelle due differenti modalità

CCM



DCM



Progettazione dei componenti

Per la progettazione del circuito si è scelto di utilizzare i seguenti parametri:

- Tensione in ingresso: **12V**
- Massima corrente di carico: **3A**
- Tensione di uscita (desiderata): **5V**
- Frequenza di switching: **1 MHz ($T=1\mu\text{s}$)**
- Ripple tensione desiderata: **25mV (0.5% di V_{out})**
- Carico previsto: **50 ohm**
- Corrente di carico prevista: **0.1A**
- Ripple di corrente previsto: **0.04A (40% di I_{load} prevista)**

Tensione di uscita e duty cycle

- Tensione di uscita in modalità CCM e duty cycle

$$V_{out} = D \cdot V_{in}$$

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \simeq 0.4167$$

Duty Cycle

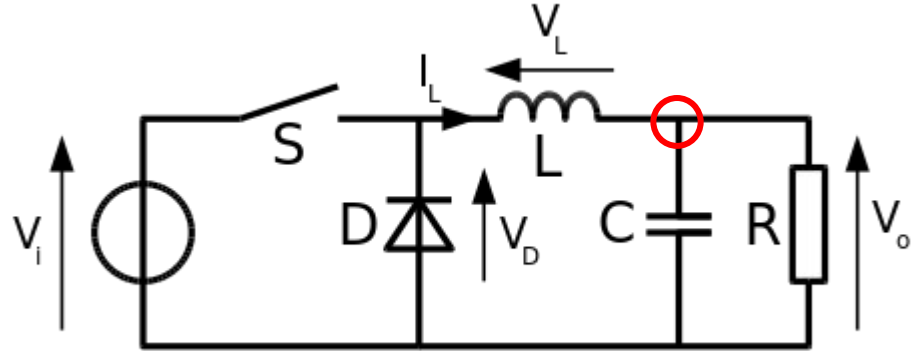
Il duty cycle è la percentuale di tempo in cui il circuito si trova nello stato di conduzione rispetto al periodo totale. Può essere calcolato come segue:

$$t_{on} = D \times T$$

Funzione di trasferimento filtro RLC

Facendo un bilancio di correnti nel nodo indicato si ottiene la seguente formula:

$$i_L = i_C + i_{R_{load}}$$



Funzione di trasferimento filtro RLC

Sviluppando il bilancio di correnti ed effettuando una trasformazione nel dominio di Laplace otteniamo la seguente funzione di trasferimento:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\frac{1}{CL}}{s^2 + \frac{1}{CR}s + \frac{1}{CL}}$$

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

Dimensionamento componenti - Induttanza

Una buona stima per la scelta dell'induttore risulta essere la seguente formula

$$L_{min} = \frac{(V_{in} - V_{out}) \times D}{\Delta I_L \times f_s}$$

$$L_{min} = 72.91\mu H \approx 73\mu H$$

Dimensionamento componenti - Capacità

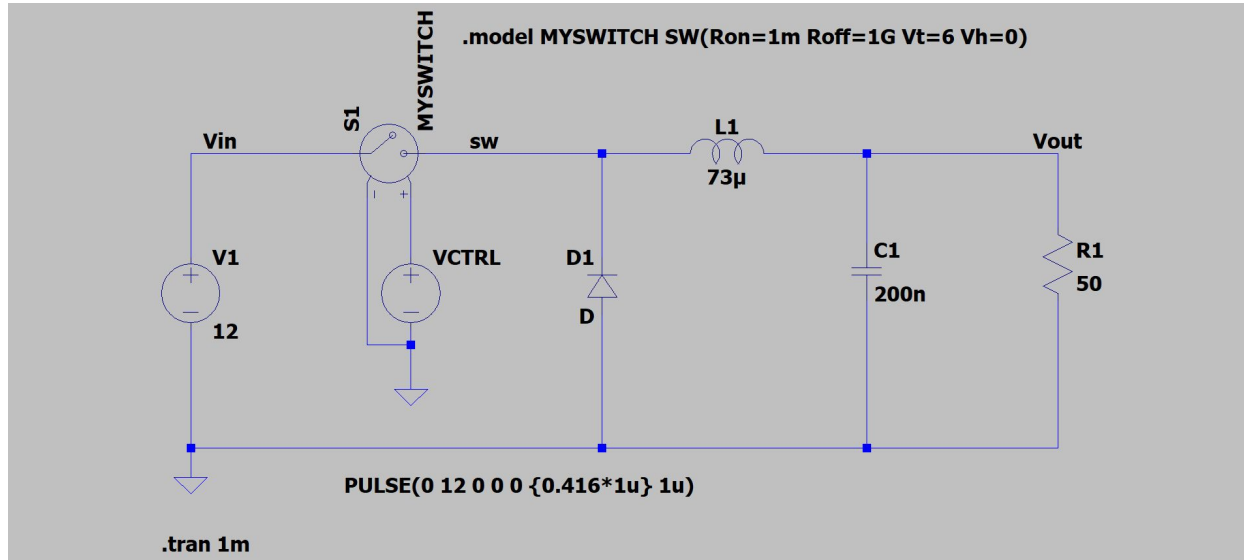
Una buona stima per la scelta della capacità che si basa sul ripple di tensione in uscita desiderato risulta essere la seguente formula

$$C_{min} = \frac{\Delta I_L}{8 \times f_s \times \Delta V_{out}}$$

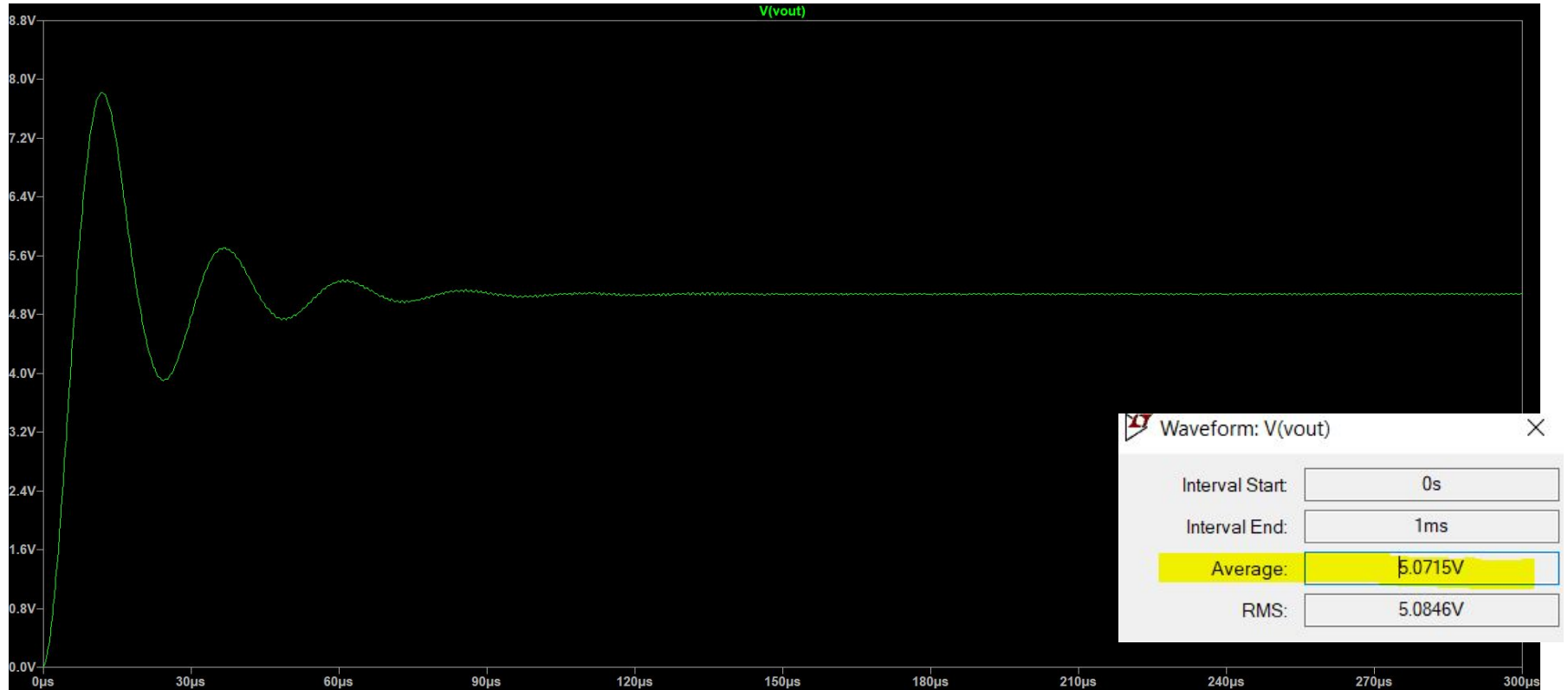
$$C_{min} = 0.2\mu F \approx 200\eta F$$

Analisi circuito base con valori minimi trovati di L e C

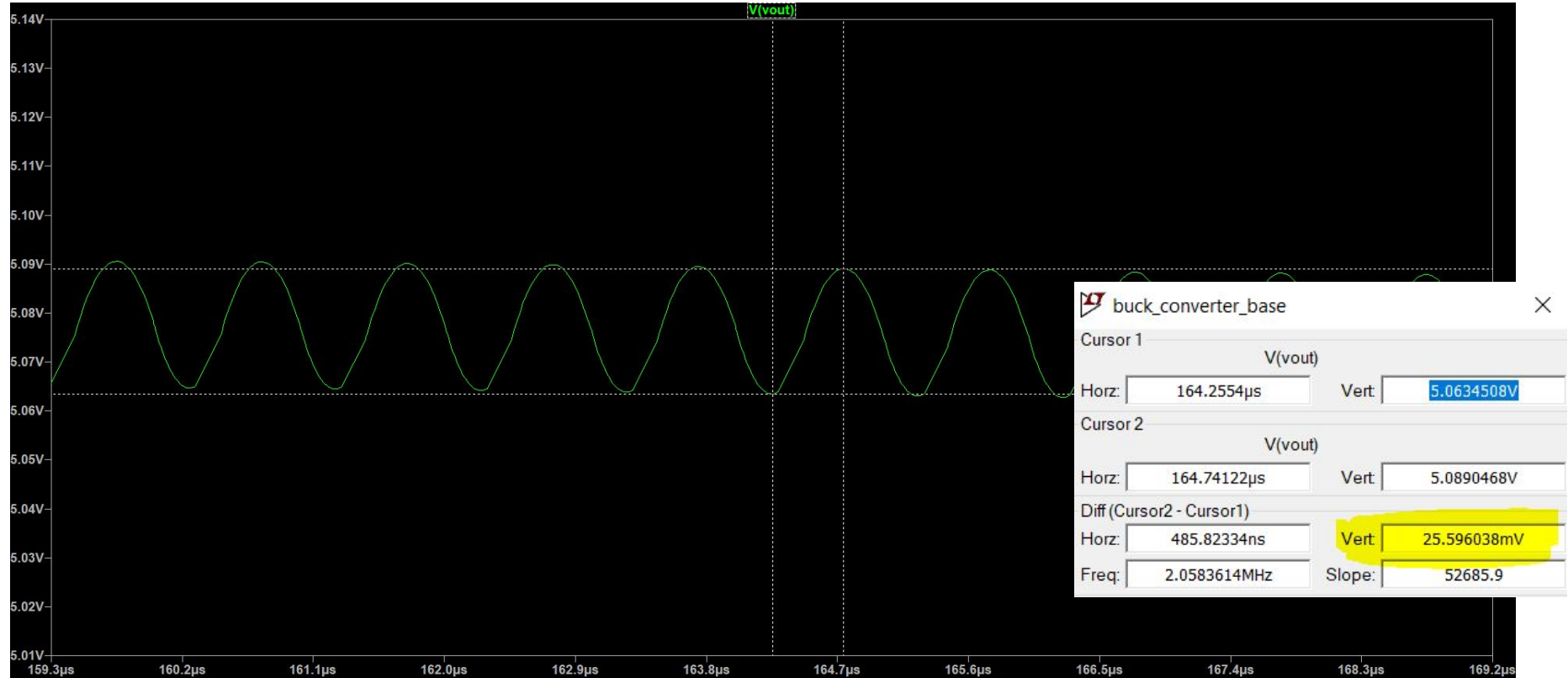
Abbiamo effettuato una prima simulazione del circuito con i valori minimi di induttanza e capacità trovati.



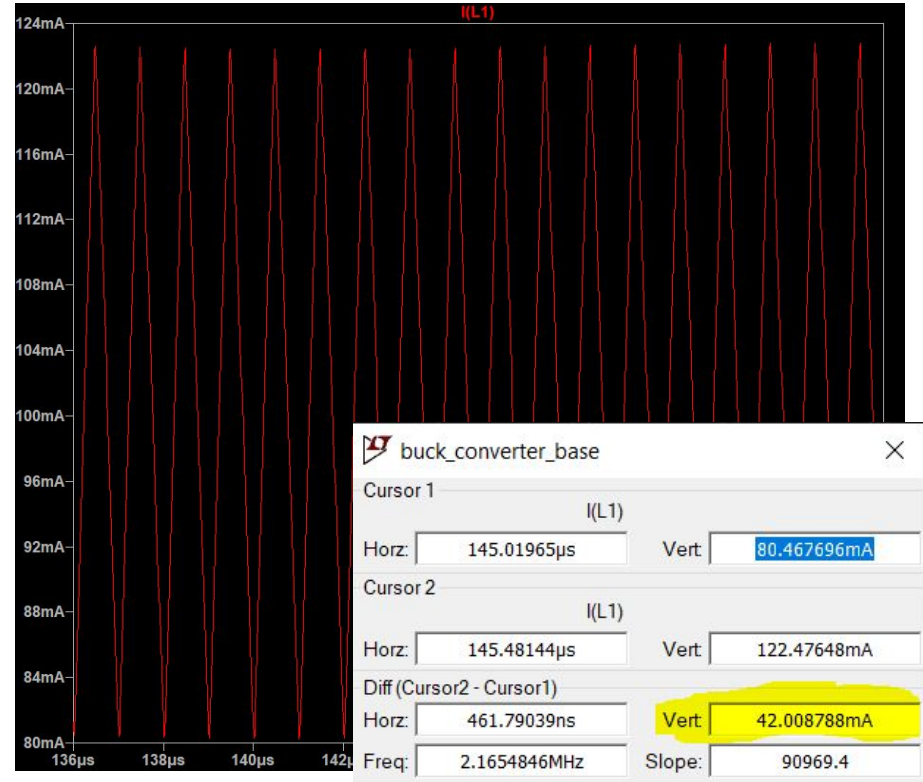
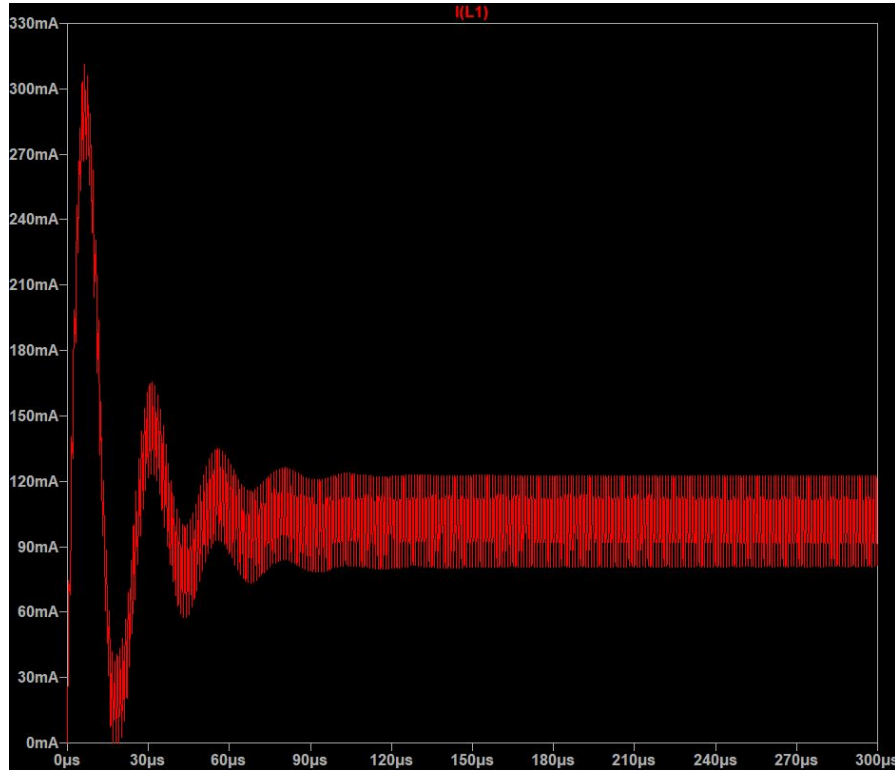
Tensione di uscita - Vout



Tensione di uscita - Vout



Corrente induttore - IL



Analisi circuito base con valori minimi trovati di L e C

Possiamo notare come, in simulazione, otteniamo i risultati previsti in merito a

- tensione media di uscita (V_{out})
- ripple di tensione di uscita
- il ripple di corrente nell'induttore.

Si può inoltre notare come la modalità di funzionamento sia effettivamente CCM non avendo mai I_L nulla.

La tensione di uscita presenta una sovraelongazione nella fase transitoria con un picco di tensione di circa 7.8V.

Per la progettazione del circuito abbiamo deciso di evitare sovraelongazioni ricalcolando in modo diverso i valori di L e C.

Calcolo di L e C senza sovraelongazioni

Riprendendo la funzione di trasferimento trovata precedentemente si ottiene la seguente relazione che permette di non avere sovraelongazioni nella risposta del sistema:

$$L = 4CR^2$$

Questa deriva dall'obiettivo di ottenere solo poli reali. In alternativa la stessa relazione si ottiene impostando

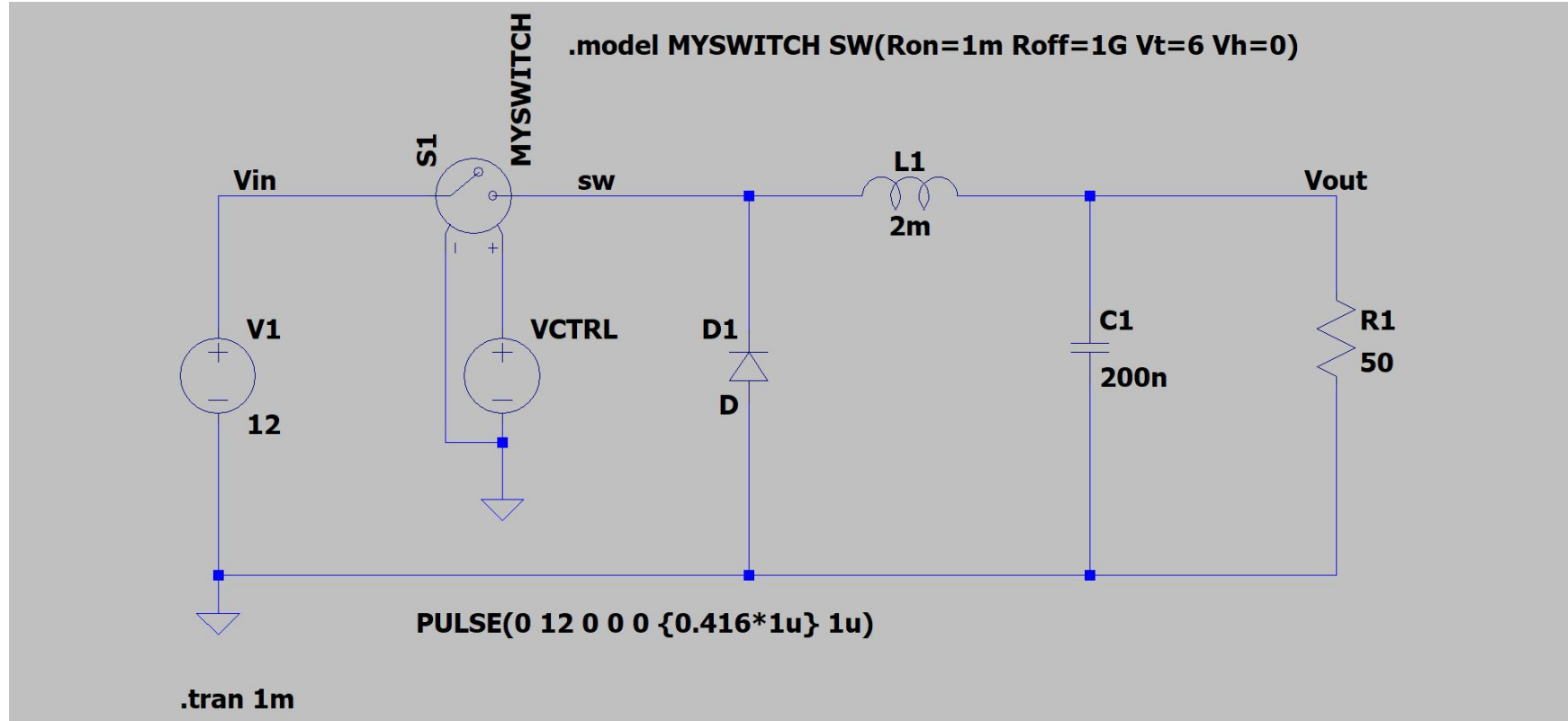
$$\xi = \frac{1}{2\omega_n CR} = 1 \quad \text{con } \omega_n^2 = \frac{1}{CL}$$

Calcolo di L e C senza sovraelongazioni

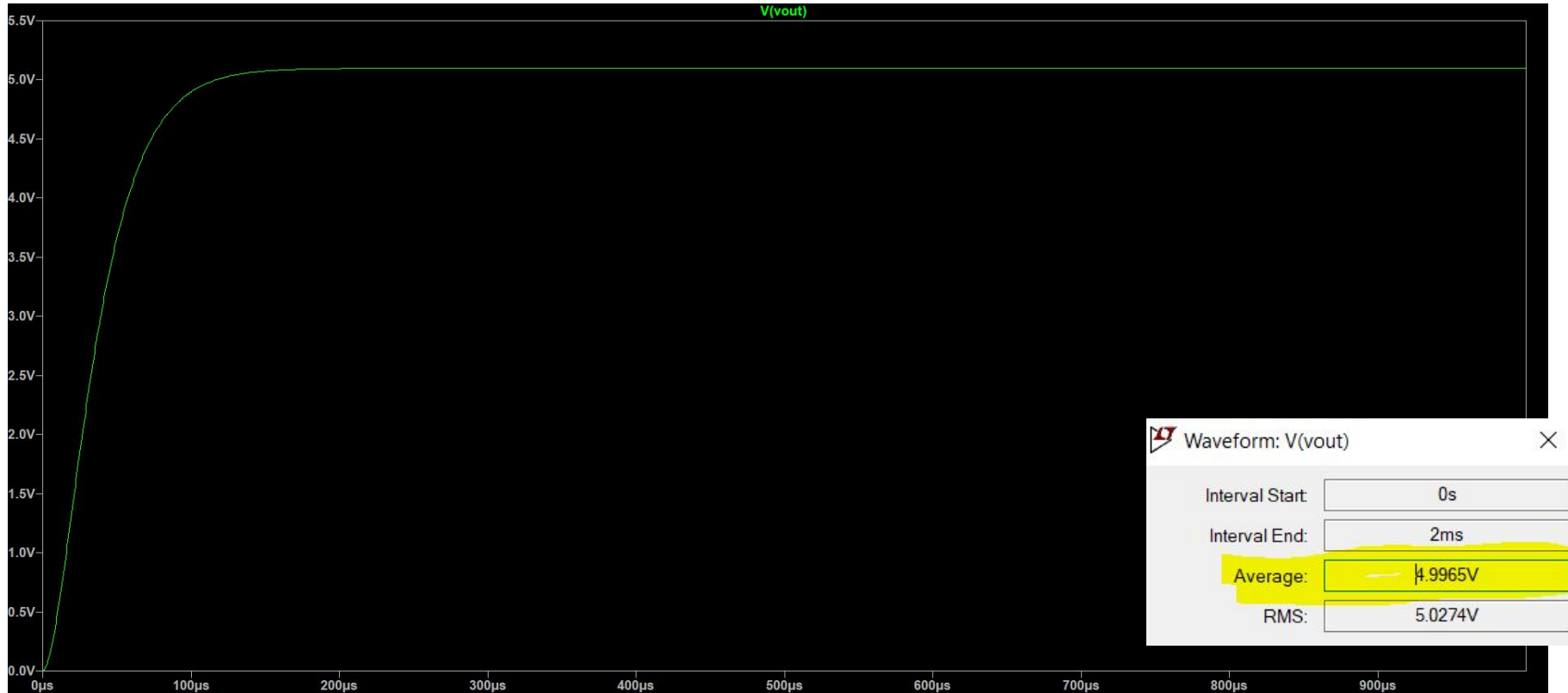
Considerando $R=50$ ohm e scegliendo $C=C_{\min}=200\text{nF}$ (calcolata precedentemente) otteniamo il nuovo valore di L

$$L = 2mH$$

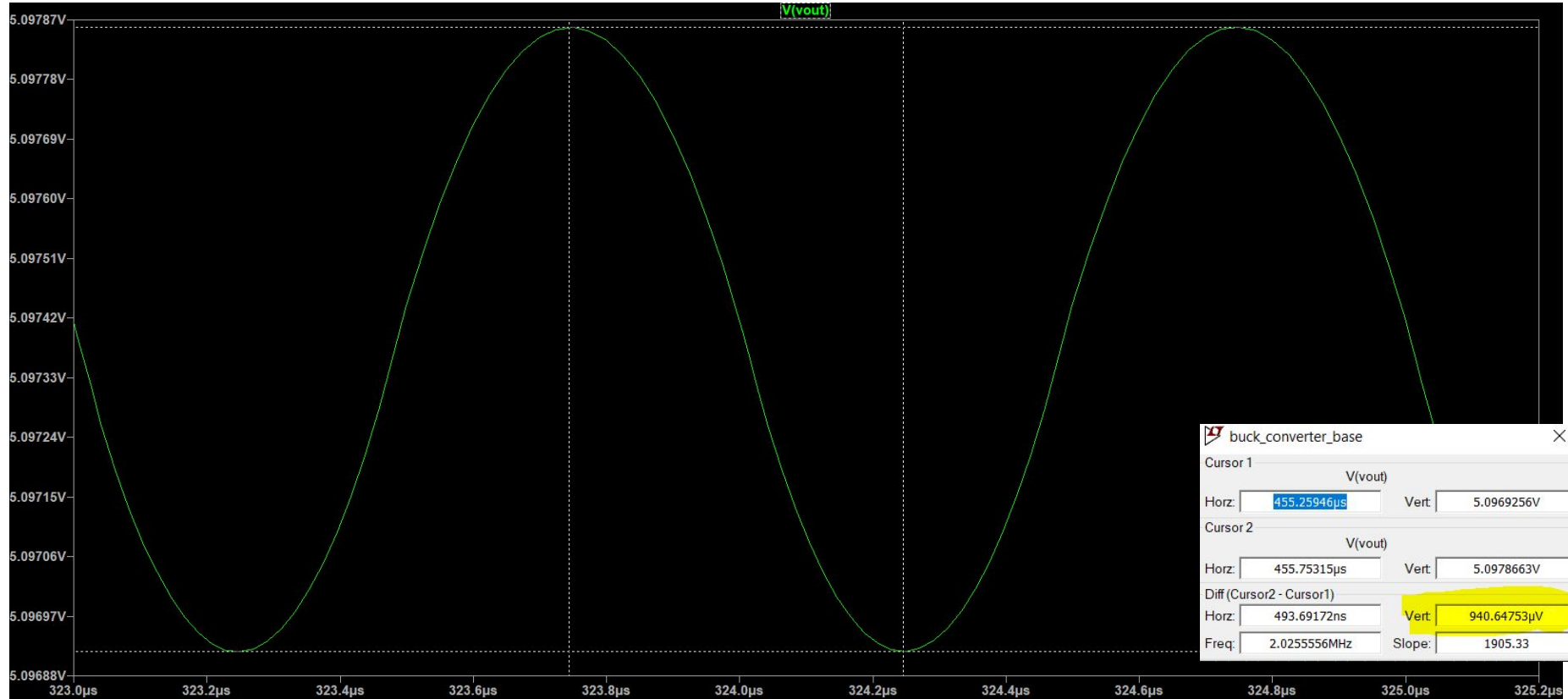
Analisi circuito base senza sovraelongazioni



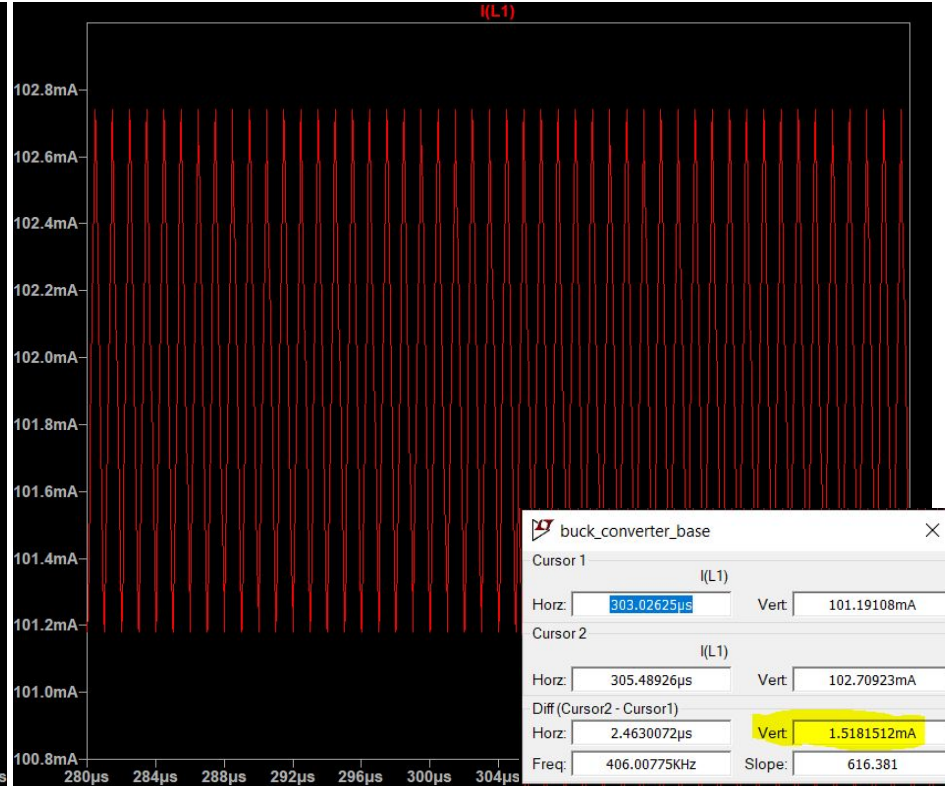
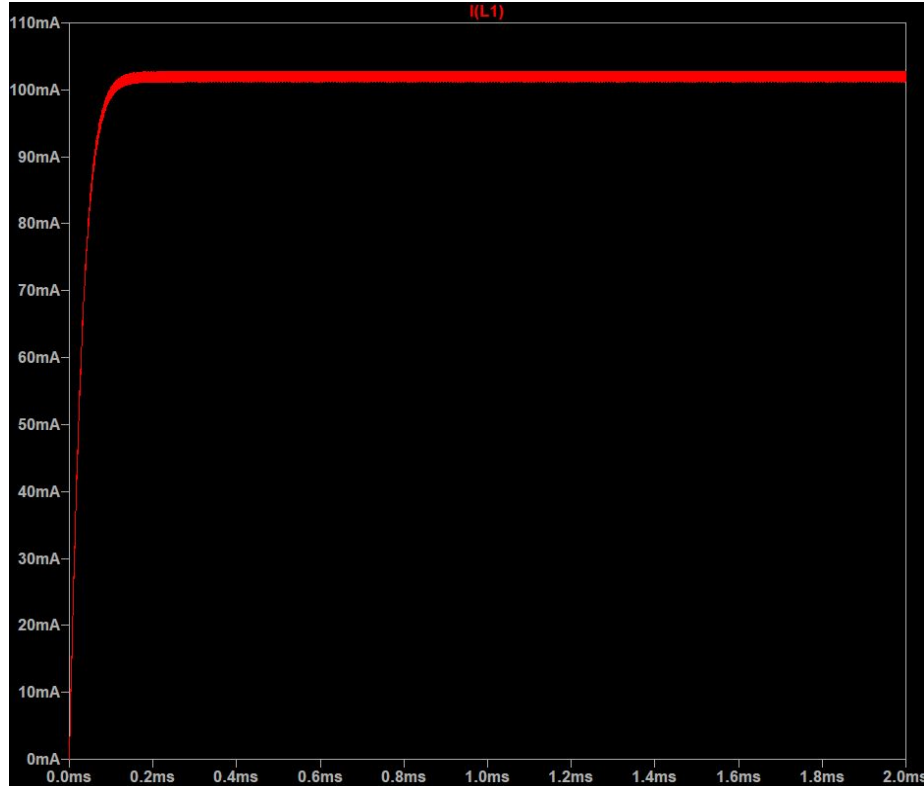
Tensione di uscita - Vout



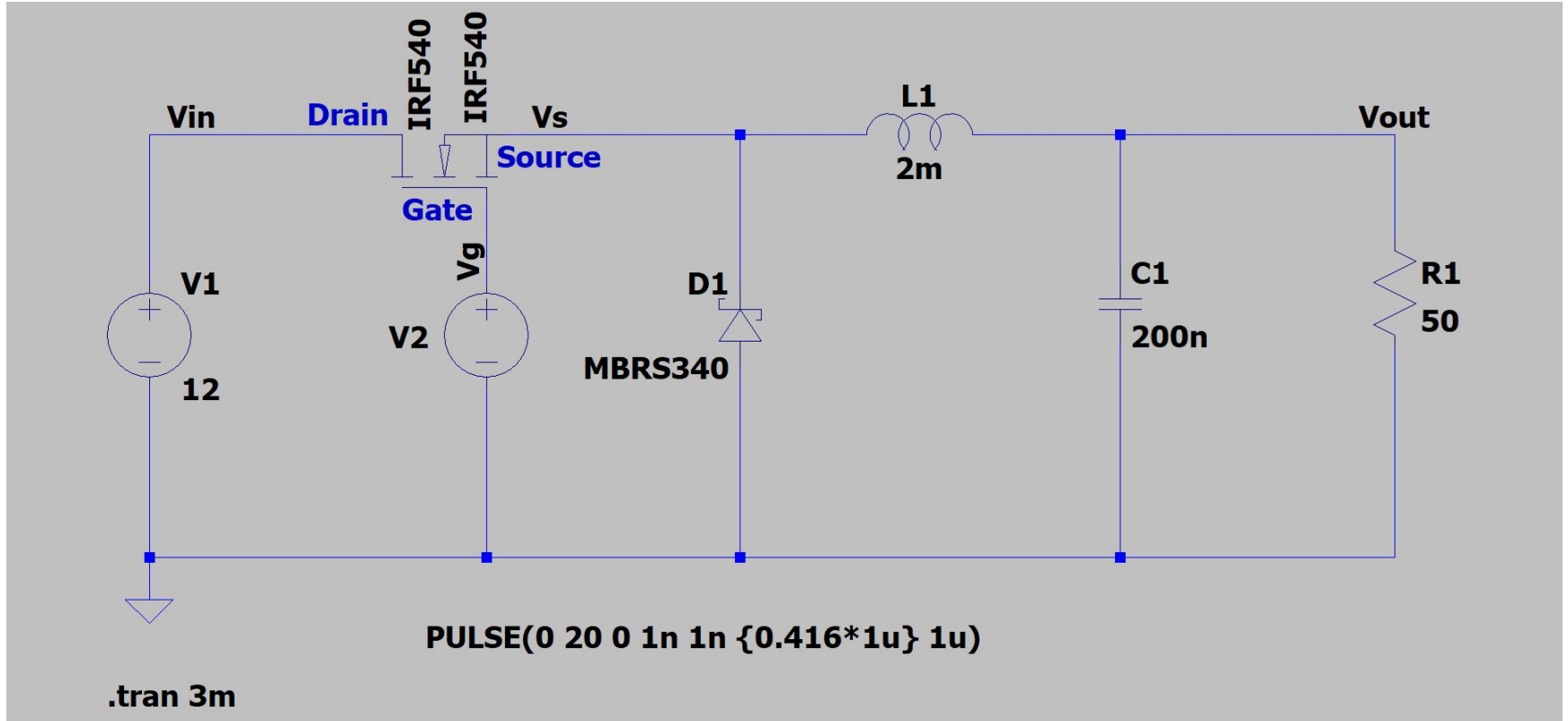
Tensione di uscita - Vout



Corrente induttore - IL



Mosfet e diodo reali



Scelta del mosfet e del diodo

MOSFET IRF540

$$V_{DSS} = 100 \text{ V}$$

$$I_D = 23 \text{ A}$$

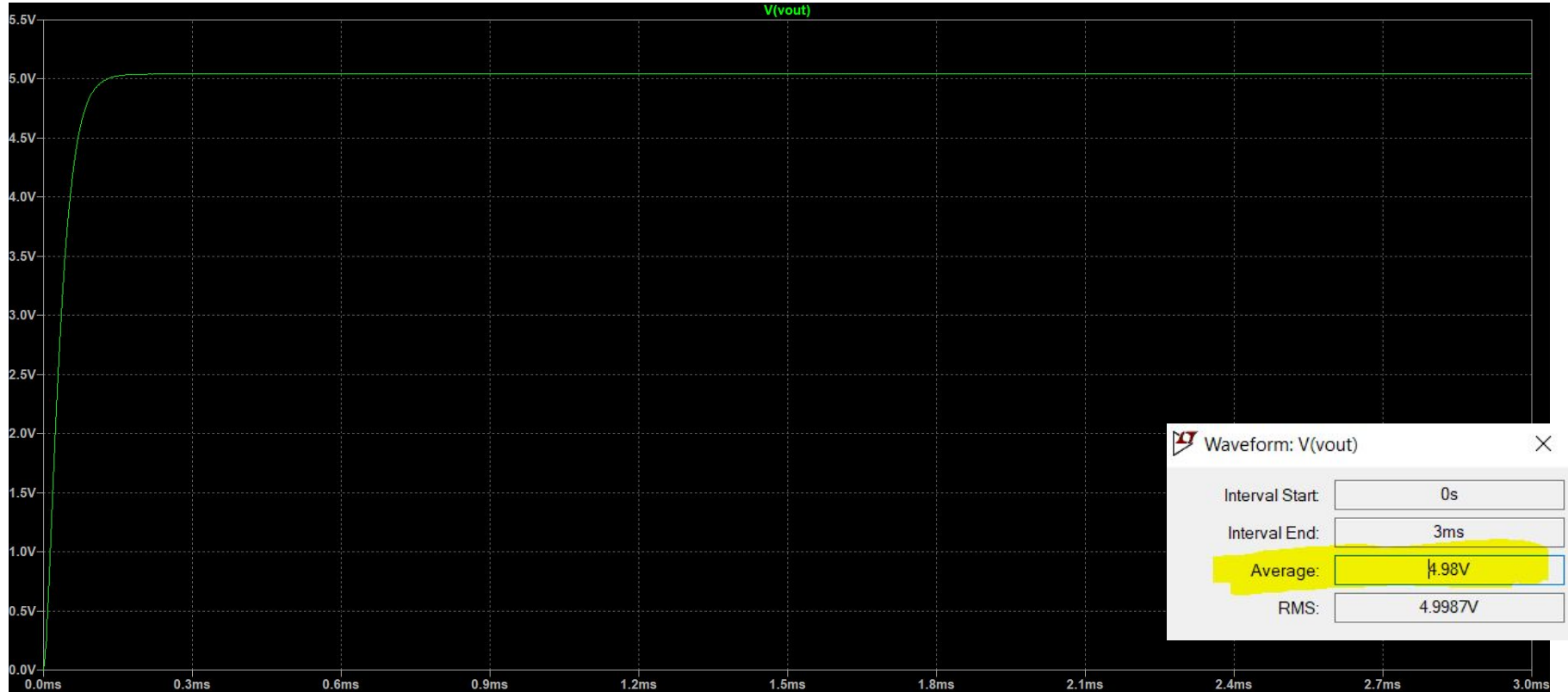
$$R_{DS(ON)} \leq 77 \text{ m}\Omega$$

Diodo Schottky MBR340

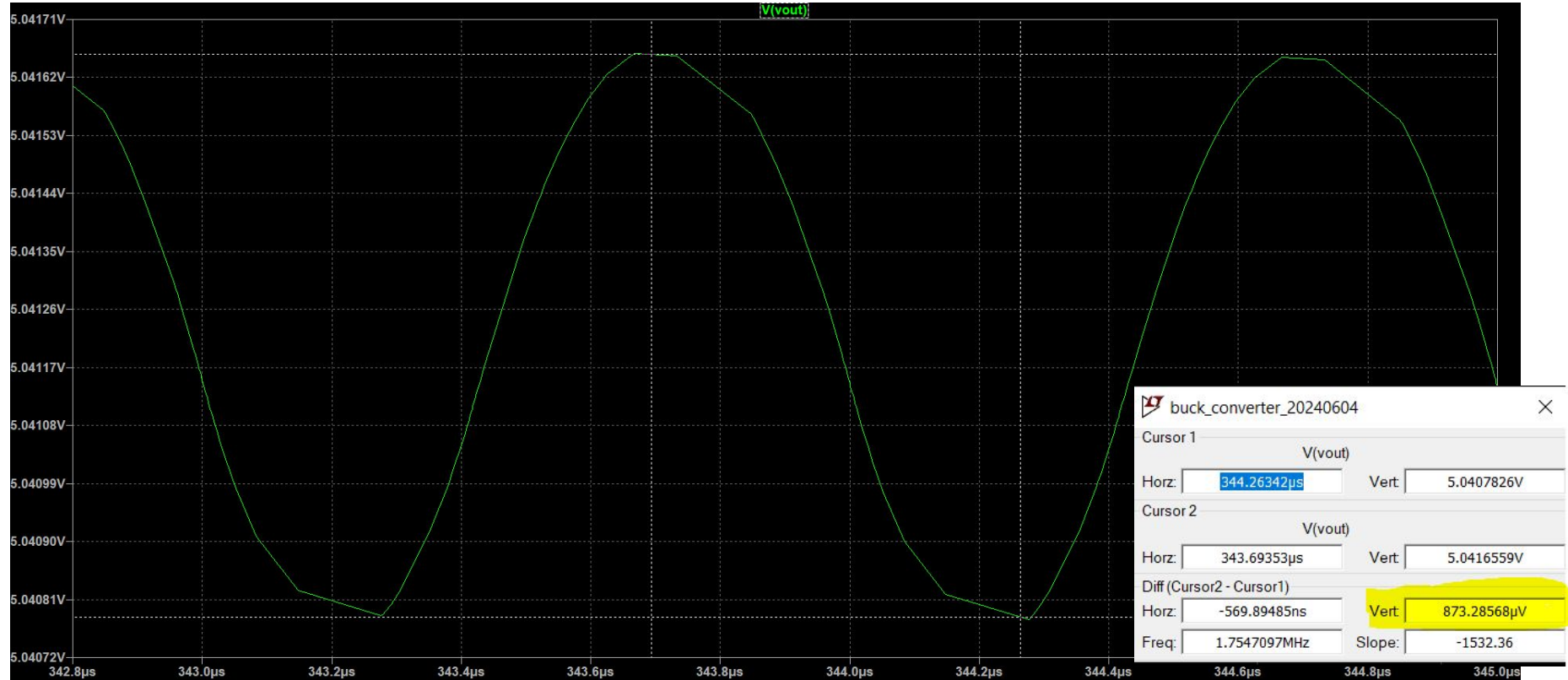
$$V_{\text{break-down}} = 40 \text{ V}$$

$$I_{\text{avg-forward}} = 3 \text{ A}$$

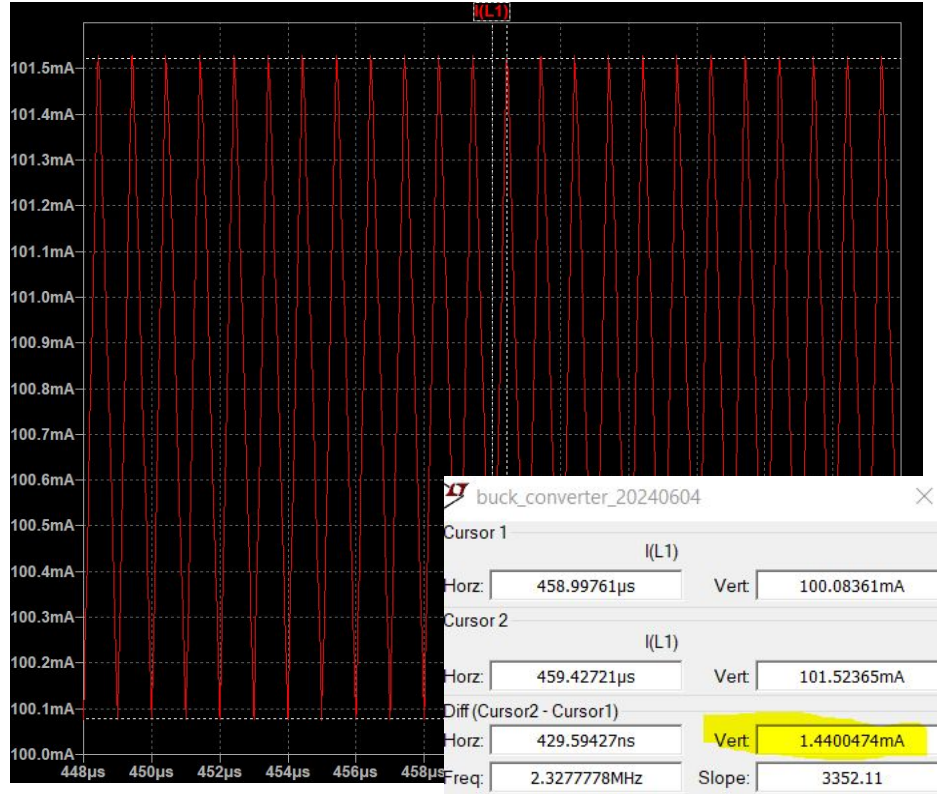
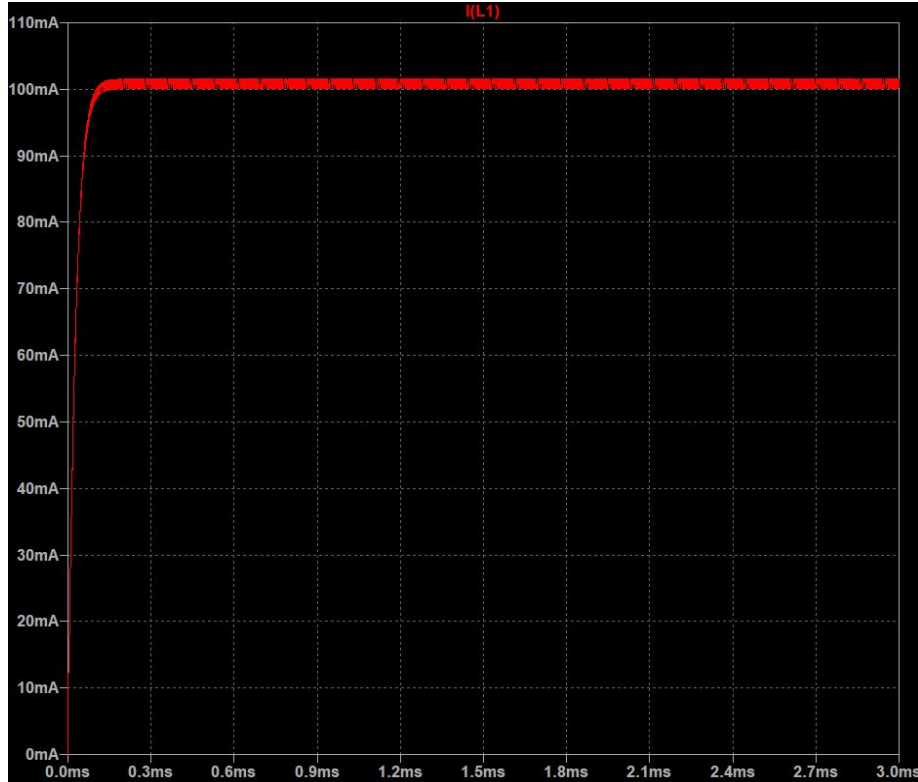
Tensione di uscita - Vout



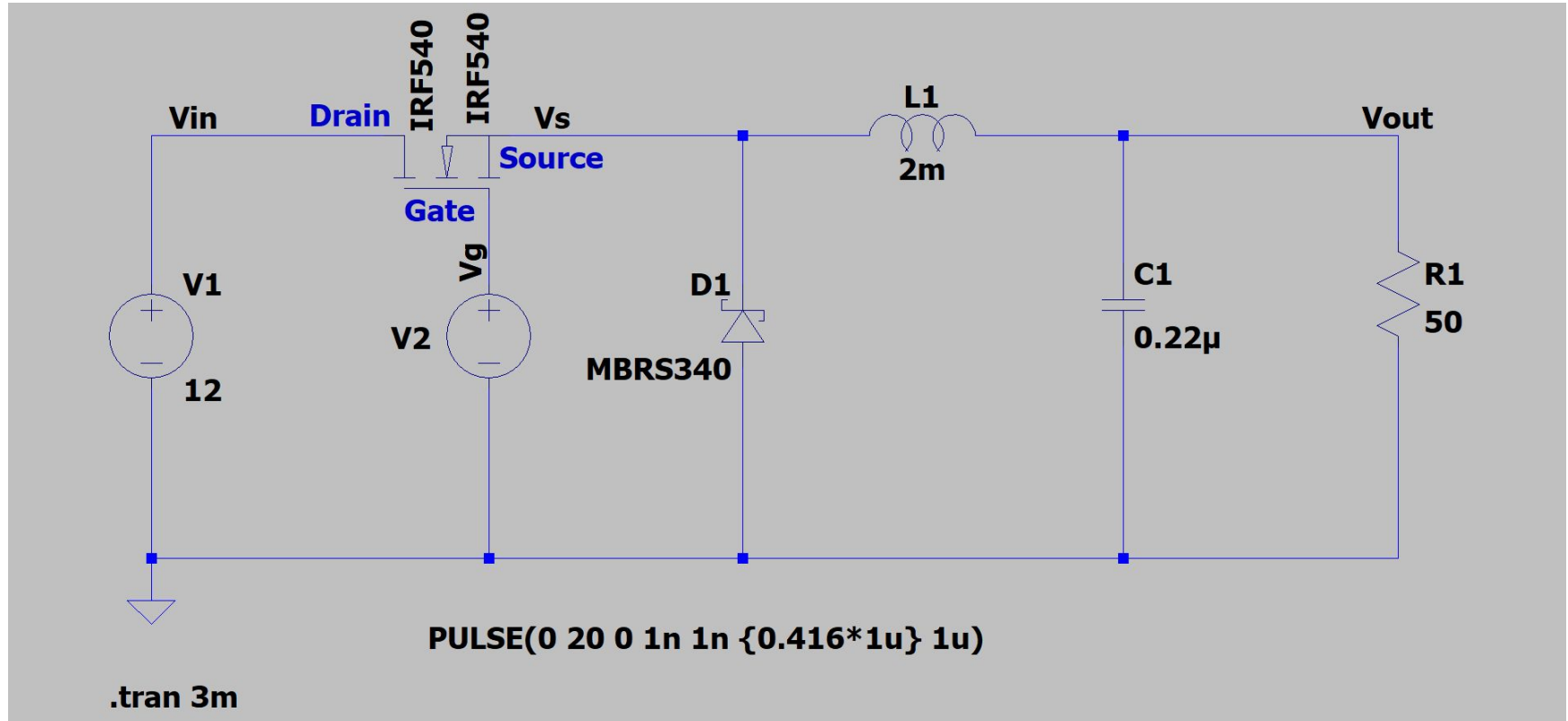
Tensione di uscita - Vout




Corrente induttore - IL



Componenti reali



Componenti reali

 Inductor - L1 ✕

Manufacturer: Coilcraft
Part Number: SPT50L-205

OK

Cancel

Select Inductor

Show Phase Dot ☐

Inductor Properties

Inductance[H]:


Peak Current[A]:

Series Resistance[Ω]:

Parallel Resistance[Ω]:

Parallel Capacitance[F]:

(Series resistance defaults to 1mΩ)

 Capacitor - C1 ✕

Manufacturer: Würth Elektronik
Part Number: 885012206048 WCAP-CSGP
Type: X7R

OK

Cancel

Select Capacitor

Capacitor Properties

Capacitance[F]:

Voltage Rating[V]:

RMS Current Rating[A]:

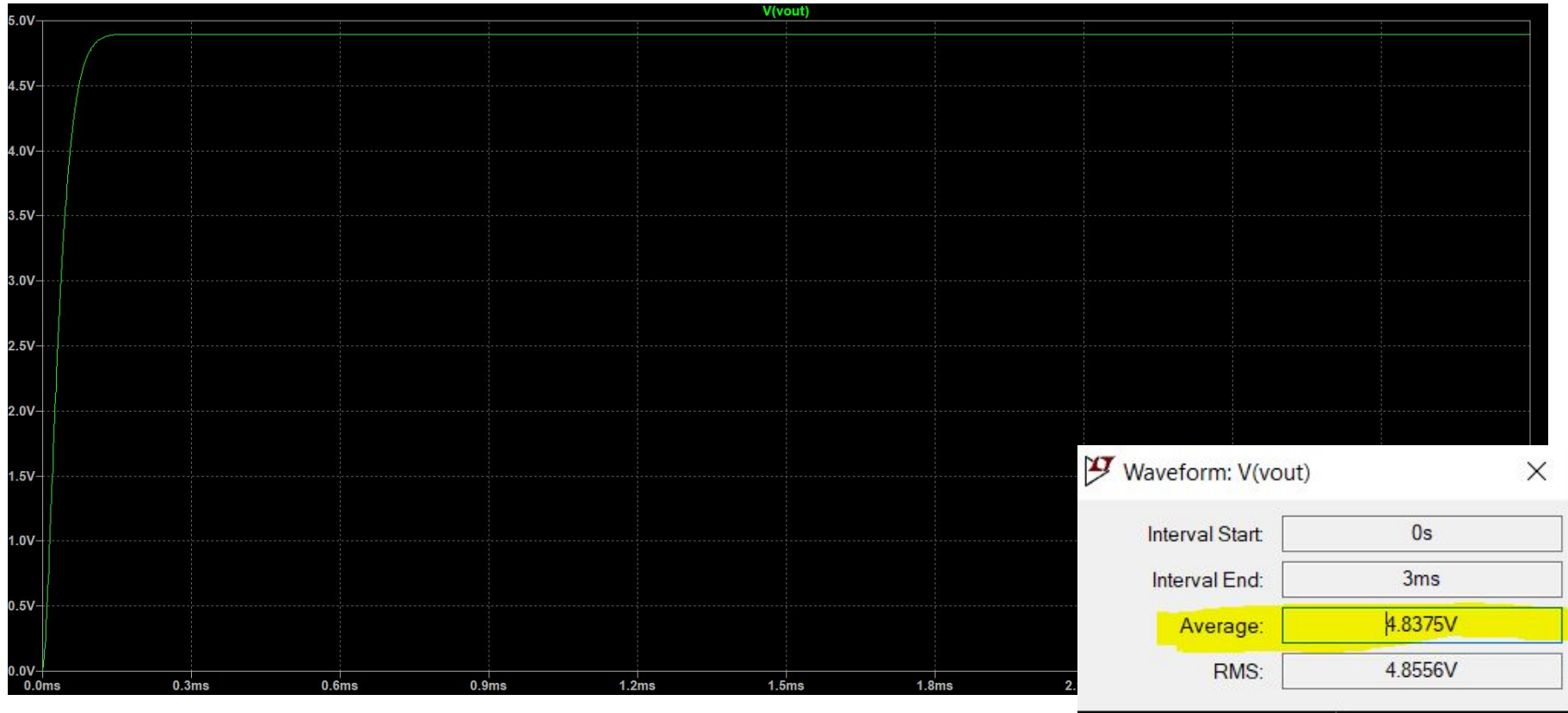
Equiv. Series Resistance[Ω]:

Equiv. Series Inductance[H]:

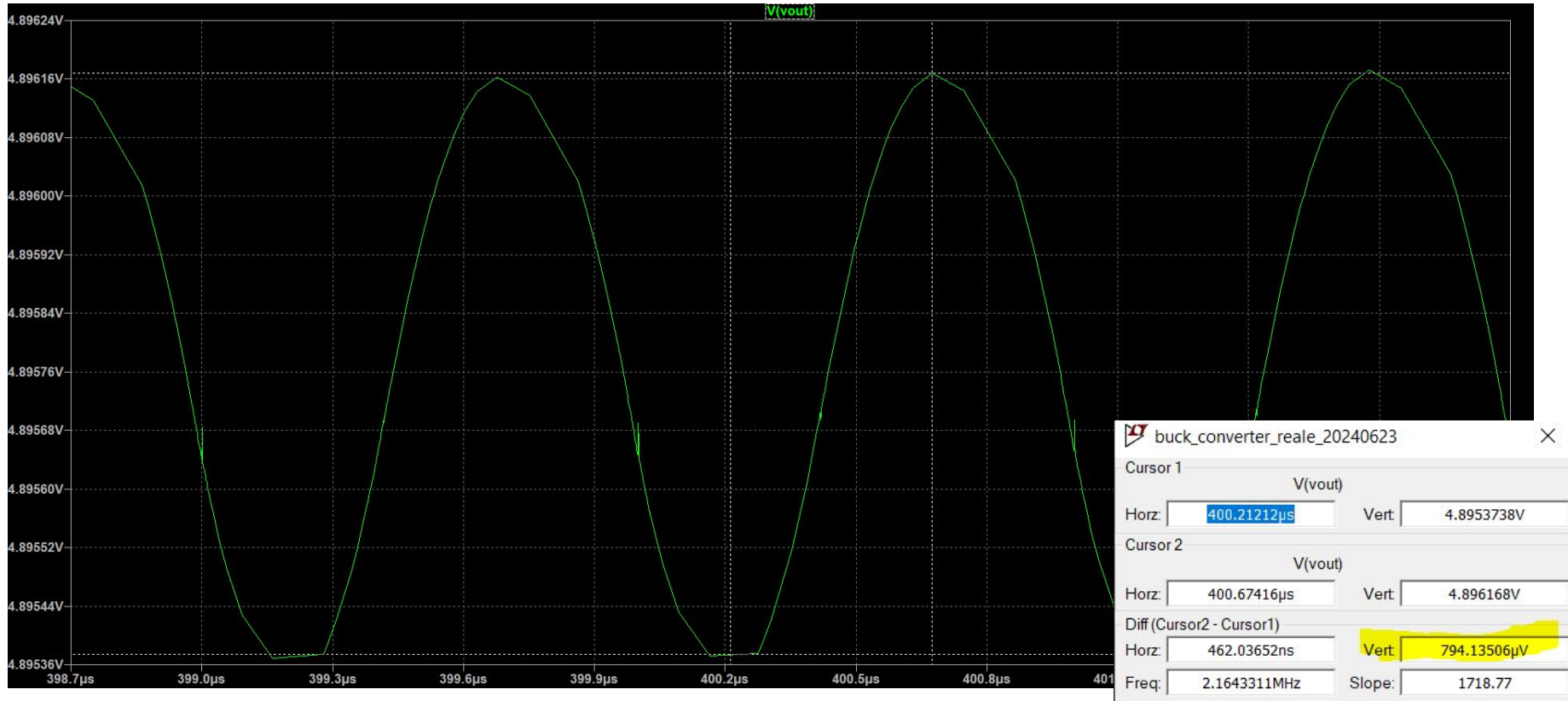
Equiv. Parallel Resistance[Ω]:

Equiv. Parallel Capacitance[F]:

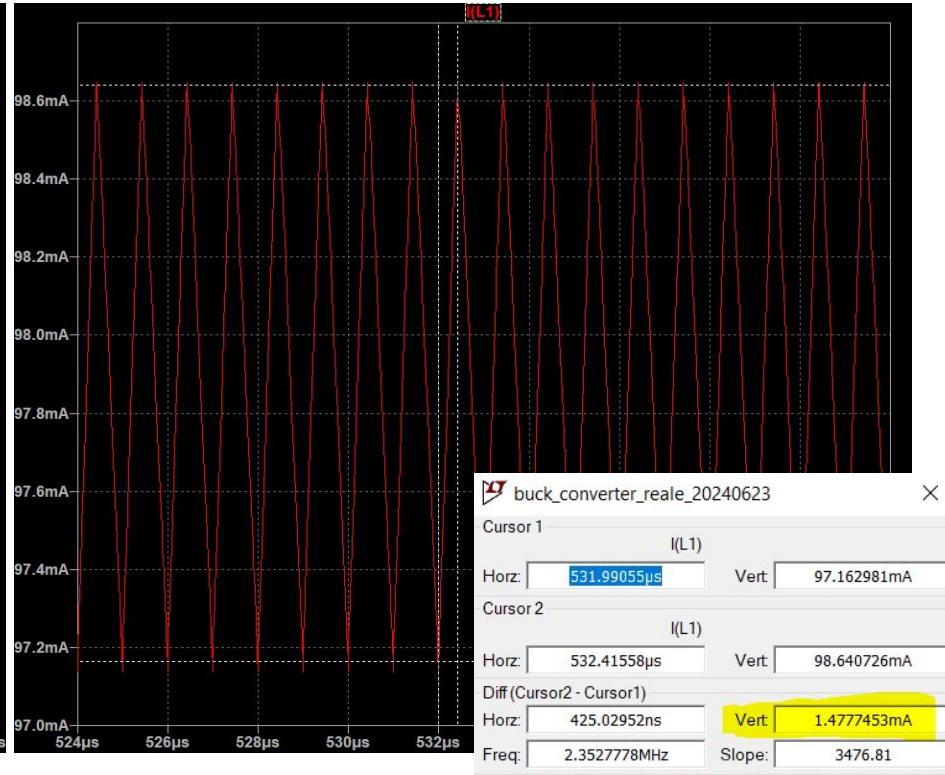
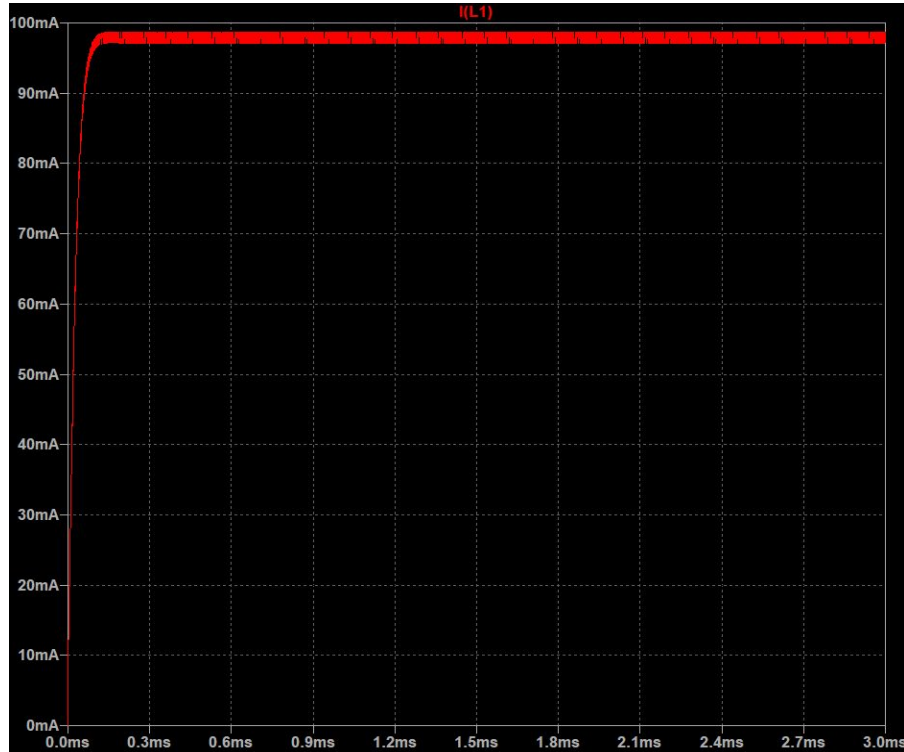
Tensione di uscita - Vout



Tensione di uscita - Vout



Corrente induttore - IL



Dissipazione potenza ed efficienza

Calcoliamo la potenza in ingresso e la potenza in uscita in modo da calcolare l'efficienza del circuito.

P_{IN}	
Interval Start:	0s
Interval End:	3ms
Average:	586.39mW
Integral:	1.7592mJ

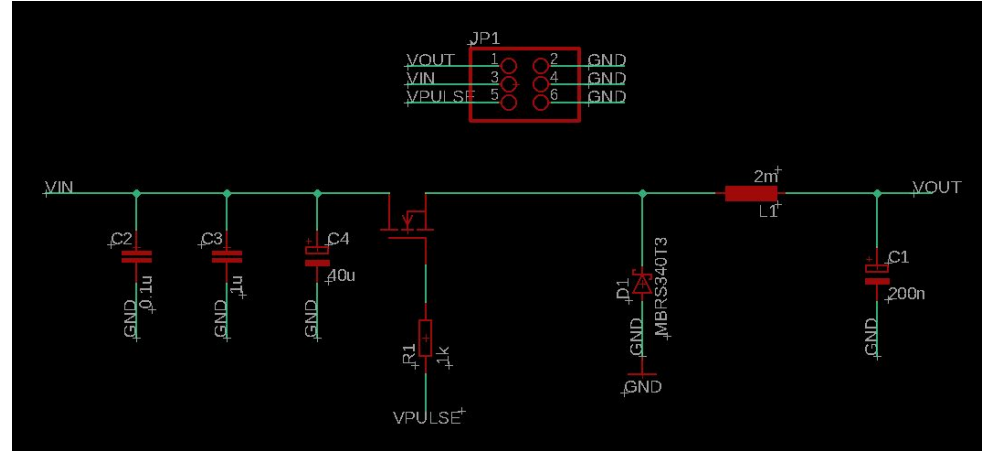
P_{OUT}	
Interval Start:	0s
Interval End:	3ms
Average:	471.54mW
Integral:	1.4146mJ

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \simeq 0.804$$

Realizzazione della PCB - schematico

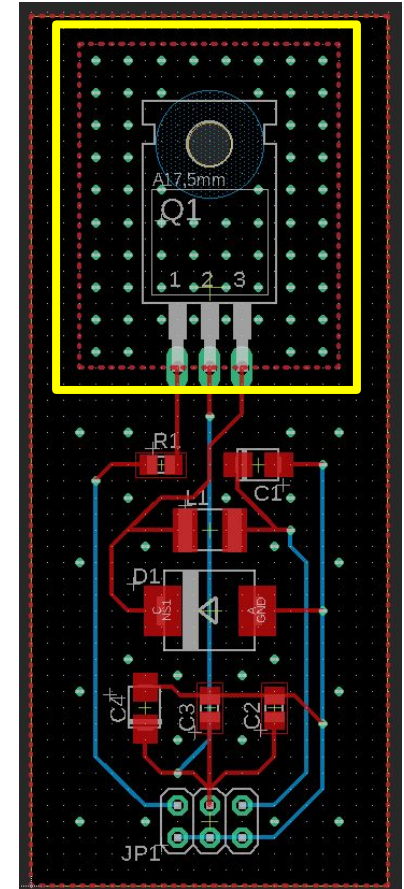
Si noti che, a differenza di quanto descritto precedentemente, sono state aggiunte le seguenti componenti:

- **R1 elevata**, al fine di evitare correnti indesiderate sul gate del MOSFET che potrebbero danneggiarlo
- **C in parallelo**, i quali consentono di filtrare il segnale in ingresso, rimuovendo eventuali disturbi a differenti frequenze, e migliorarne la stabilità

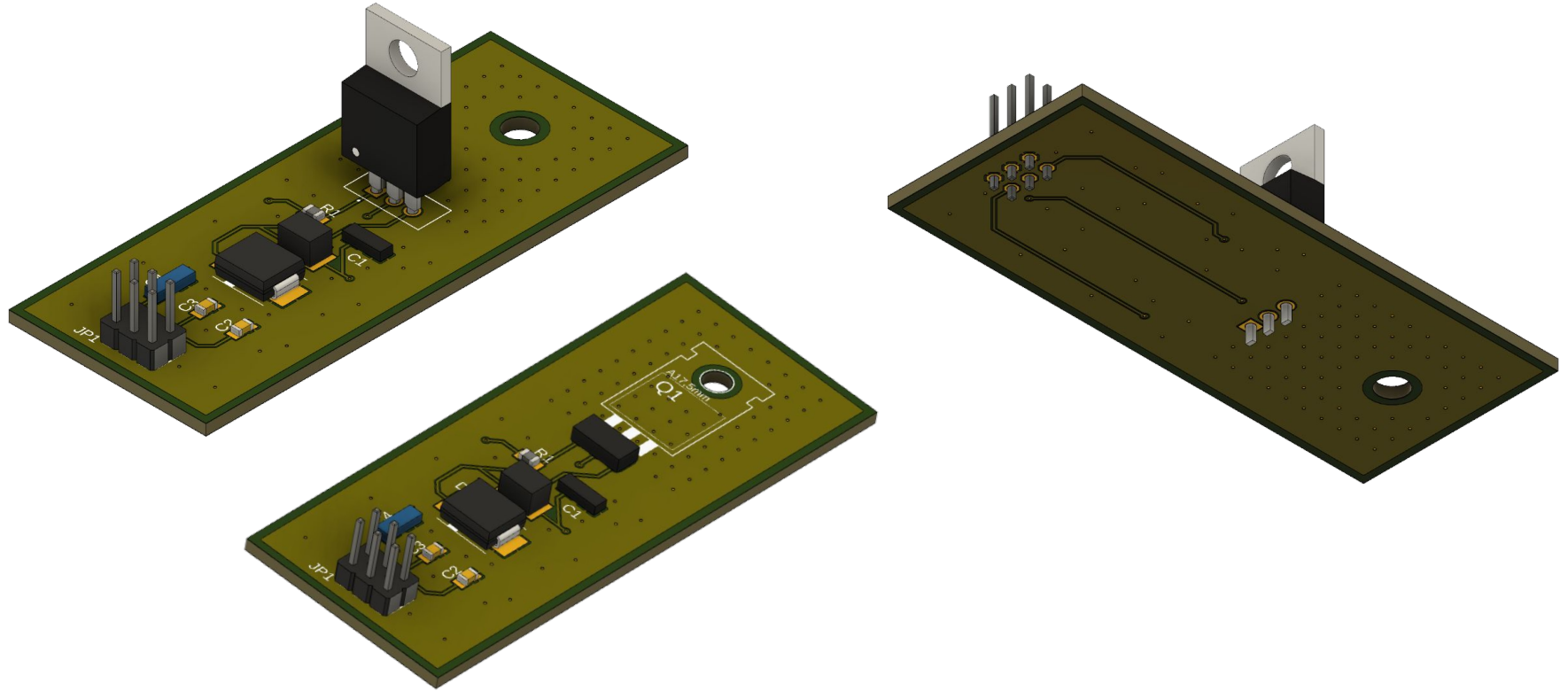


Realizzazione della PCB - board

Al fine di evitare problemi dovuti ad elevate temperature, è stato realizzato, tramite pad di rame, un dissipatore di calore (o **Heat Sink**). È una soluzione che aiuta a migliorare la dispersione di calore generato da componenti elettronici montati sulla scheda stessa riducendo le temperature di funzionamento dei componenti critici, migliorando l'efficienza e la durata del circuito elettronico.



Realizzazione della PCB - Modello 3D



Bibliografia

- *Understanding Buck Power Stages in Switchmode Power Supply - Texas Instruments, Application report* <https://www.ti.com/lit/an/slva057/slva057.pdf?ts=1717408887179>
- *Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage - Texas Instruments, Application report*
https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1685381431807&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- *Buck Converter Design and Feedback Controller Using Core Independent Peripherals - Microchip, AN3725*
<https://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Buck-ConvDesign-Feedback-Ctrl-Using-CIP-DS00003725A.pdf>
- <https://www.monolithicpower.com/en/learning/mpscholar/power-electronics/dc-dc-converters/buck-converters>
- *Every Layer Explained in Autodesk EAGLE:*
<https://www.autodesk.com/products/fusion-360/blog/every-layer-explained-autodesk-eagle/>