Misurazioni su relè

Commutazione on-off (lenta)

La commutazione lenta viene realizzata con Arduino collegato al PC via cavo USB.

Sul PC si utilizza “Snap for Arduino” programmabile con una interfaccia molto simile a quella di Scratch.

Questa modalità di utilizzo della scheda Arduino è comoda perché permette di modificare rapidamente alcuni parametri e di conoscerne il valore mentre si fanno le prove di misura senza dover ricaricare il codice e senza dover inserire trimmer e pulsanti.

La commutazione viene considerata “lenta” in quanto il relè riesce ad agganciare e sganciare l’ancora seguendo il comando ad impulsi.

Il codice usato è il seguente:

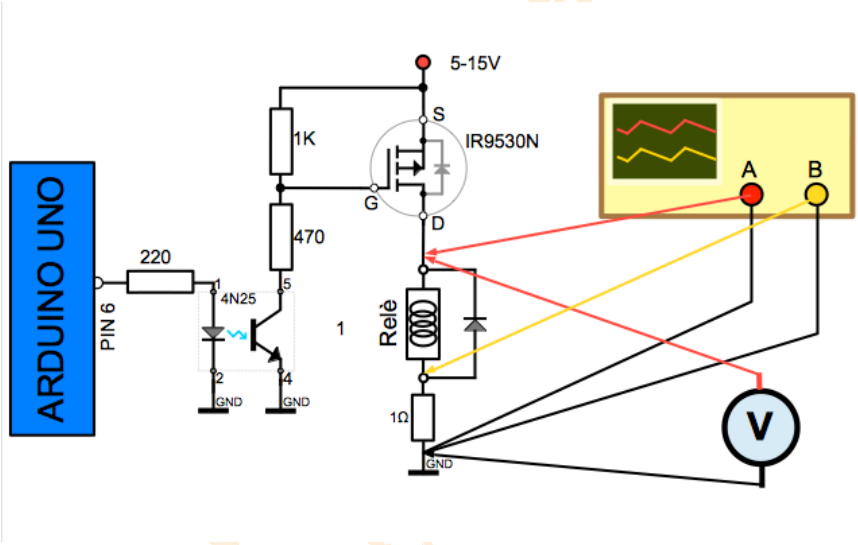
Con **[tasto 1]** si attiva un ciclo che ripete la successione di chiusura ed apertura.

Tramite i tasti **[freccia sx]**, **[freccia dx]**, **[freccia su]**, **[freccia giù]** si possono cambiare i tempi di commutazione per rilevare gli oscillogrammi alle varie velocità.

Uno schema simile per il comando degli output digitali di Arduino ha fatto uso di **mblock** conseguendo analoghi risultati.

Risultati con comando on/off lento

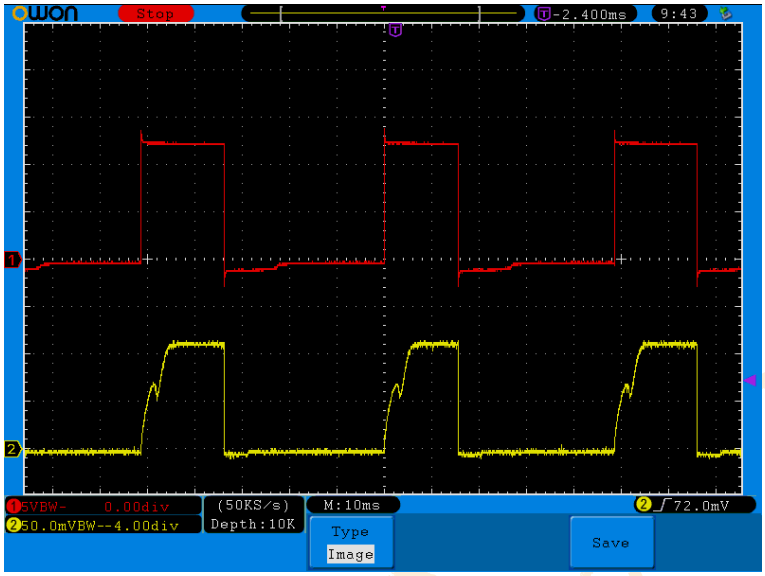
Lo schema iniziale della prova prevede l'uso di una resistore a valle del relè per misurare la corrente tramite l'oscilloscopio.



In questo schema il diodo di libera circolazione è collegato direttamente ai morsetti della bobina per cui sul resistore da 1Ω non viene rilevata la extracorrente di estinzione da parte della sonda gialla.

Si parte con un ritardo di un secondo con **[tasto 1]** e si diminuisce progressivamente fino ad annullare il ritardo usando i tasti freccia.

Con il ritardo ridotto al minimo si ottiene il seguente grafico sull'oscilloscopio:



Il periodo è di 48 ms per cui la frequenza risulta essere di 20,8 Hz.

Non è ancora il limite di frequenza cercato ma con questo tipo di comando non si può andare più velocemente con le commutazioni.

Si possono fare numerose osservazioni interessanti.

Aspetti notevoli

Il periodo minimo

La massima velocità consentita da cicli realizzati con Snap for Arduino è legata alla necessità di tradurre prima il codice da inviare ad Arduino a partire dalle istruzioni scritte nel programma interpretato e poi di scambiare informazioni tramite la connessione USB (vedi articolo "**S4A e la comunicazione fra PC e Arduino**").

Si nota anche che la durata della chiusura, che si ha quando l'impulso è alto, è inferiore a quella dell'apertura.

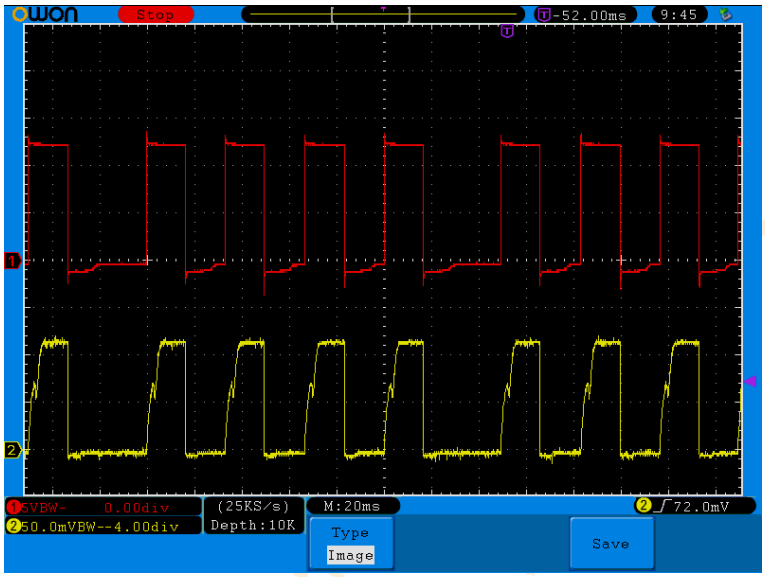
In particolare si misura il tempo di eccitazione t_{on} = 16 ms e toff = 34 ms con una differenza di ben 18 ms.

La ragione di questa dissimmetria è da cercare intorno alla circostanza che al termine del ciclo il codice impiega del tempo per riprendere l'esecuzione dalla prima istruzione.

Non avendo motivi per pensare che le due istruzioni siano di durata diversa, l'unica conclusione plausibile riguarderebbe il fatto che la ripresa del ciclo dalla prima istruzione significherebbe consumare 18 ms.

Più veloci di così si può andare se si inviano sequenze consecutive senza l'istruzione di ripetizione del ciclo.

Con il codice richiamato con **[tasto M]** si ottiene:



Con questo comando si inviano 4 commutazioni on-off consecutive prima della ripetizione del ciclo.

I quattro cicli consecutivi sono simmetrici mentre la ripetizione presenta il ritardo già considerato.

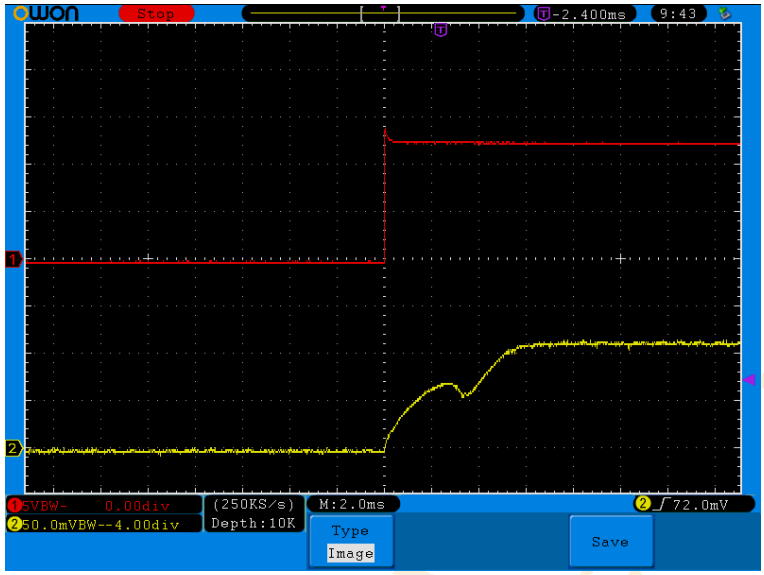
La durata di un periodo risulta essere di 33 ms, meno di così non è possibile utilizzando questa modalità di controllo del relè.

Il turn on

La tensione di alimentazione ha un fronte ripido dovuto alla capacità del MOSFET di modificare la propria resistenza molto rapidamente.

La corrente all'accensione, invece, deve seguire la legge di crescita esponenziale in quanto il circuito ha una resistenza R ed una induttanza L dovuta alla bobina avvolta su armatura in ferro (vedi **questo** articolo).

La curva di crescita della corrente è, però, spezzata per colpa di una flessione visibile nel grafico.



La flessione del grafico si verifica in corrispondenza dello spostamento dell'ancora che avviene a scatto.

La doppia curva è spiegabile con la variazione dell'induttanza dovuta alla variazione della riluttanza magnetica (**unipv**)

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

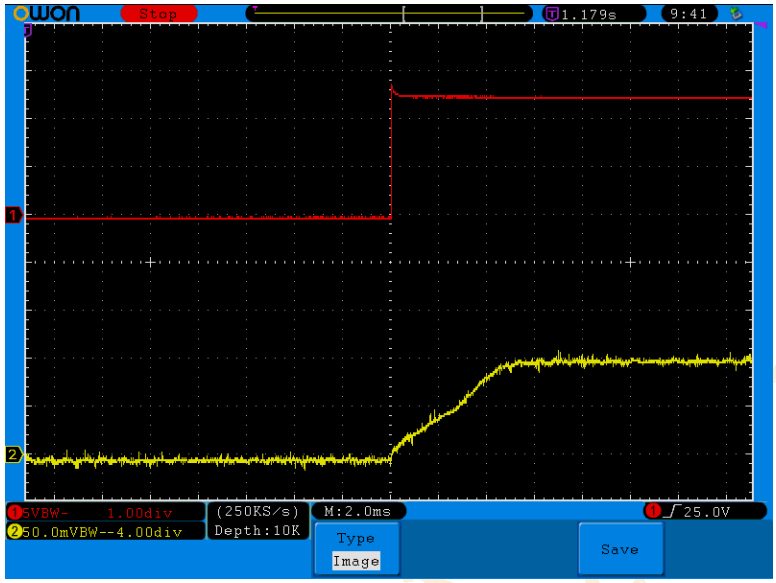
Quando l'ancora del relè è lontana (sganciata) c'è un traferro notevole, quando l'ancora si trova attratta dal campo magnetico (agganciata) il traferro si annulla o quasi.

Nel momento in cui compare il cambio di pendenza si ha il movimento di aggancio dell'ancora.

Il turn on con blocco meccanico dell'ancora

Per verificare quanto scritto si tiene meccanicamente bloccata l'ancora in posizione di chiusura col risultato di avere una sola rampa come previsto:

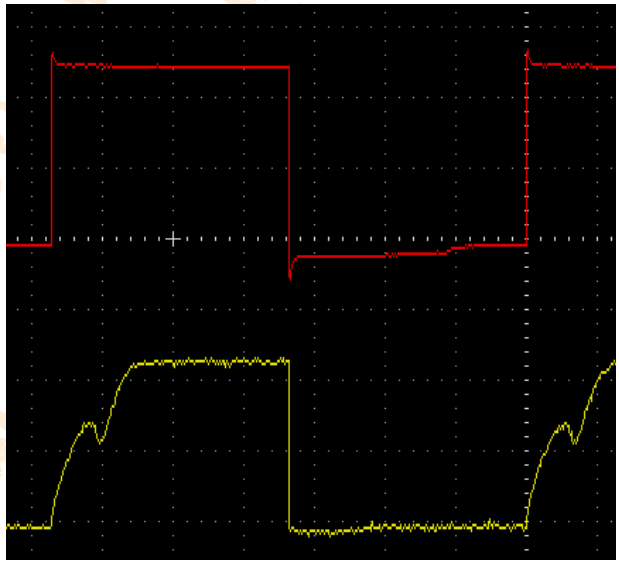
Giovanni Mastropaolo www.mastropaolo.it



Nota. Non è una curva esponenziale ma un chiarimento presuppone un'indagine molto approfondita su come si comporta il relè in queste condizioni e come varia effettivamente la resistenza totale del circuito che dipende principalmente dalla transizione del MOSFET dallo stato di off allo stato di on; non è qui il caso.

Il turn off

Allo spegnimento, che si presenta con l'interruzione dell'alimentazione della bobina grazie all'aumento repentino della resistenza drain-source del MOSFET, si ha una extracorrente di circolazione che interessa il diodo collegato ai suoi capi.



Nell'oscillogramma si vede una tensione negativa sulla bobina prodotta dalla corrente di estinzione dovuta alla caduta di tensione sulla giunzione del diodo di libera circolazione.

La durata dipende dalla quantità di energia accumulata dall'induttanza e dalla consistenza dei fenomeni dissipativi in gioco dovuti alla resistenza della bobina ed all barriera di potenziale del diodo.

La durata misurata di questa tensione negativa è di circa 120 ms.

Nota. La corrente nella resistenza si annulla istantaneamente solo perché è collocata al di fuori del circuito di circolazione della corrente di estinzione.

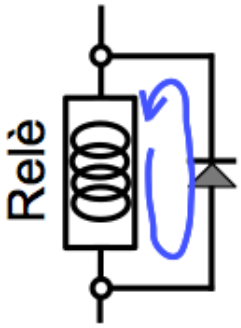
La extracorrente di estinzione

Il circuito che comprende la bobina del relè è un circuito LC alimentato on/off.

Il MOSFET si comporta come un interruttore, non come un generatore ad onda quadra:

- nella fase on (acceso), il MOSFET si trova in bassa resistenza e conduce; il circuito è un tipico LC con i parametri L e C della bobina; la corrente cresce come una curva esponenziale (come si è visto a doppia pendenza per la variazione della riluttanza);
- nella fase off (spento), il MOSFET si trova in alta resistenza ed impedisce così la circolazione della extracorrente di induttore; questa extracorrente può provocare sovratensioni distruttive sul MOSFET.

Il diodo di libera circolazione (free weeling diode), inserito in parallelo alla bobina, raggiunge lo scopo di lasciare circolare ed estinguere l'extracorrente (argomento trattato in **apposito** articolo) senza che ci siano sovratensioni nel circuito.



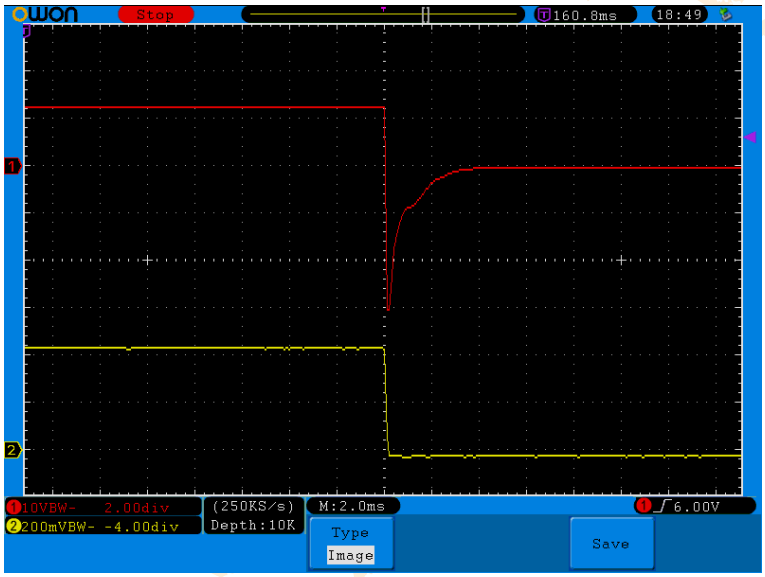
La extracorrente circolante produce una caduta di tensione costante, che è quella della giunzione del diodo, osservabile come tensione negativa ai capi della bobina.

L'energia magnetica immagazzinata nel campo magnetico del relè si estingue in parte sulla resistenza della bobina ed in parte sul diodo.

A frequenze di interruzione molto alte, la corrente non si estingue mai per mancanza di tempo.

Senza diodo di libera circolazione

Il diodo viene scollegato e quindi si ripetono le misurazioni per meglio capire cosa accade; l'oscillogramma è il seguente:



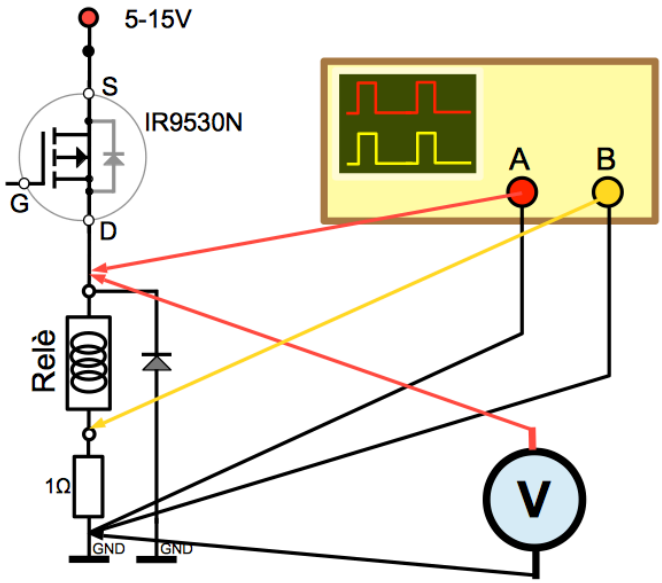
La sovratensione negativa raggiunge 30 V per poi risalire a 0 V.

Nota. Il MOSFET sopporta 100 V per cui non patisce danni da sovratensioni; potrebbe patirne per eccesso di energia di commutazione da dissipare in quanto l'impulso di tensione si accompagna ad una corrente che non è nulla perché l'apertura del circuito è sempre graduale per quanto rapida.

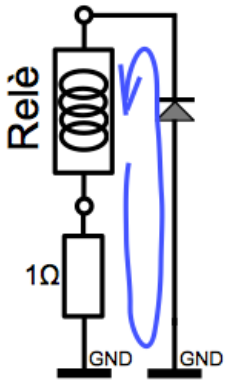
La durata della extracorrente è inferiore 0,2 ms mentre il ripristino della tensione segue la tipica curva della carica di una capacità e dura 4 ms.

Con diodo a massa

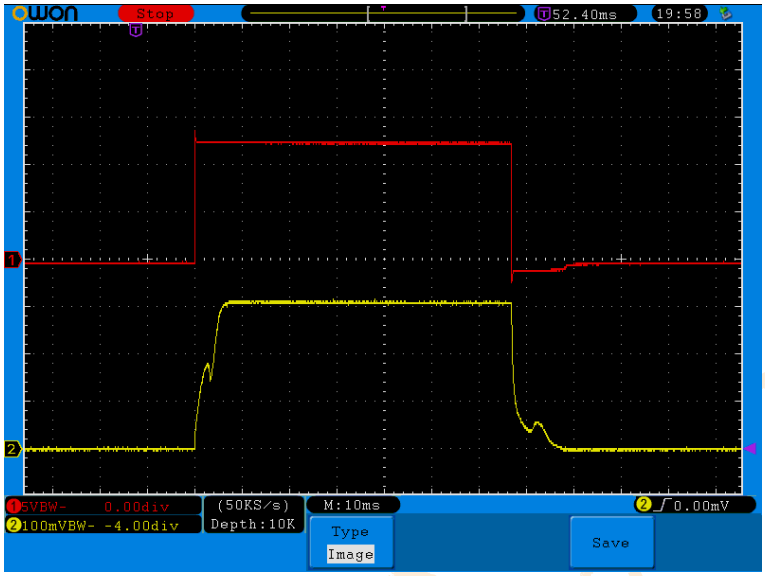
Se si collega il diodo a massa per visualizzare anche la extracorrente di estinzione si usa il seguente grafico:



La sonda gialla misura ancora la tensione sulla resistenza da 1Ω solo che così la resistenza usata per misurare la corrente si trova ad essere percorsa dalla corrente di estinzione che si chiude sul circuito come in figura:



per cui se ne può osservare l'andamento:



La sovratensione di apertura è negativa e corrisponde alla caduta di tensione sulla giunzione del diodo; la corrente di estinzione presenta di nuovo due distinte curve dovute ancora alla variazione della riluttanza del circuito magnetico con l'ancora che ad un certo punto si allontana aumentando il traferro.

Si nota anche un brevissimo impulso di tensione negativa della durata di 0,4 ms subito all'inizio dell'evento di spegnimento.

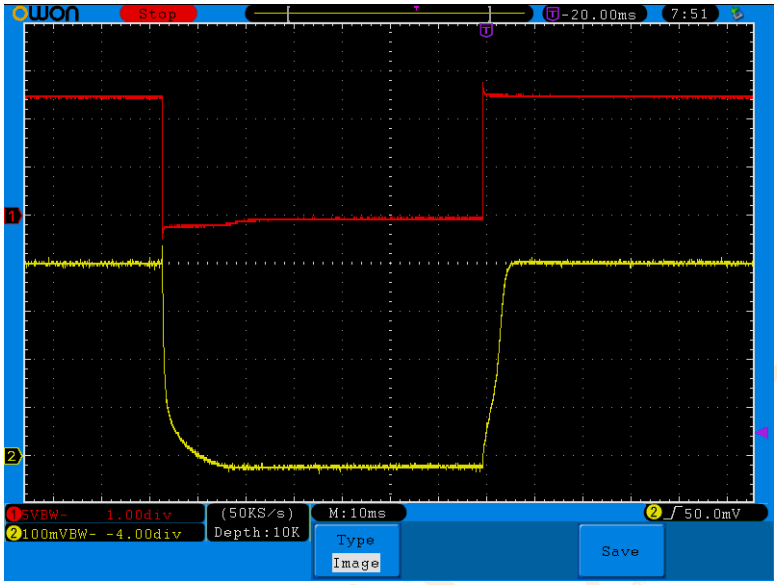
L'impulso negativo di tensione è dovuto al fatto che il diodo non entra in conduzione istantaneamente (non è un "fast diode", è un 1N4001) per cui all'inizio si instaura il regime di sovratensione visto sopra come se il diodo non ci fosse.

Si nota anche che all'accensione il cambio di pendenza della curva di corrente avviene a valori superiori che non allo spegnimento.

Questo aspetto può essere indizio di un diverso comportamento elettrico e magnetico del relè nelle due condizioni.

Con diodo a massa e relè tenuto agganciato

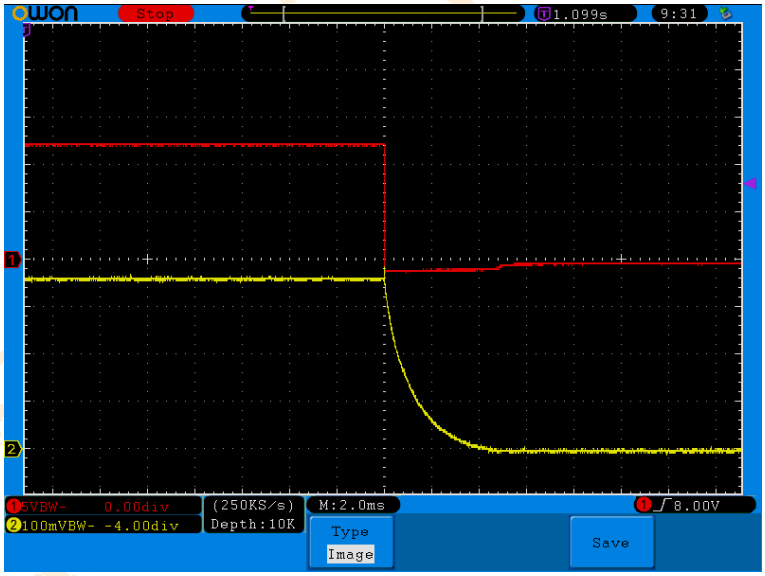
Se si blocca il meccanismo del relè tenendolo chiuso si rileva questo oscillogramma:



La curva di corrente presenta una sola configurazione non essendoci variazione di riluttanza.

Con diodo a massa e relè tenuto sganciato

Se si blocca il meccanismo del relè tenendolo aperto si rileva questo oscillogramma:



che è diverso dal precedente in quanto presenta una curva esponenziale della curva di extracorrente di estinzione[1].

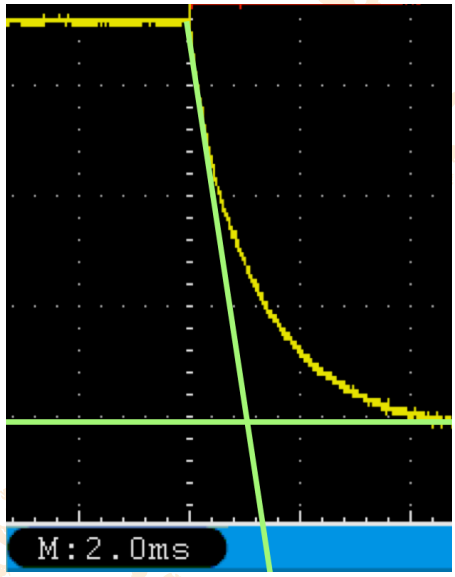
Valutazione dell'induttanza

Può essere interessante valutare il valore dell'induttanza della bobina a partire dalla curva di estinzione della corrente.

Si sa che un circuito RL ha una costante di tempo

$$\tau = \frac{L}{R}$$

Disegnando la tangente alla curva di scarica



si trova una valutazione della costante di tempo sull'intercetta tra la retta tangente alla curva e la linea dello zero /(in verde chiaro) che, dalla figura, risulta essere di circa 1 ms.

Data la resistenza misurata di 250 Ω, l'induttanza calcolata risulterebbe

$$L = \tau * R = 0{,}001 * 250 = 0{,}25H$$

[1] *Tenendo il relè bloccato in apertura si lascia fisso il traferro col risultato di diminuire gli effetti della saturazione e quindi di rendere costante l'induttanza. Con il relè bloccato in aggancio, il traferro è nullo e gli effetti della saturazione influiscono sul valore dell'induttanza a diversi valori di corrente.*