

UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Elettronica

Strumentazione di misura "liquida": applicazione allo studio di dispositivi piezoelettrici

"Liquid" instrumentation: a case study on piezoelectric devices

Tesi di laurea di:

CONCETTI DENISE

Relatore:

Prof.
SPINSANTE SUSANNA

Correlatore:

Ing.
CIATTAGLIA GIANLUCA

Anno Accademico 2022-2023

A mio padre,

alla mia roccia e il mio eroe,

la persona che ho sempre ammirato

Abstract

La presente tesi di laurea è il risultato di un approfondito studio volto ad approfondire il comportamento di dispositivi piezoelettrici, sollecitati dalla pressione manuale, attraverso l'utilizzo della strumentazione liquida.

In un primo momento si è andati a valutare la carica e la scarica del condensatore in un circuito, con un condensatore in serie al parallelo tra due resistenze uguali, per approfondire la conoscenza dello strumento: l'oscilloscopio del Moku. Il circuito è composto da elementi affetti da incertezza che contribuiscono a dare un contributo di incertezza tipo composta, alla costante di tempo. Si misura la carica e la scarica del condensatore partendo dalle leggi costitutive ricavate dalla risoluzione di un circuito RC ideale.

Dopo aver approfondito le diverse funzioni dello strumento, si è andati a studiare il comportamento dei dispositivi piezoelettrici sollecitati dalla pressione manuale su di essi. Attraverso numerose prove si è voluto evidenziare come, nelle medesime condizioni in fase di misura, la forma d'onda di tensione presenti andamenti non perfettamente sovrapponibili gli uni con gli altri. In questa seconda parte si sono effettuate due analisi: una prima analisi sperimentale in cui, viene prelevata l'onda di tensione con l'oscilloscopio del Moku, picchiettando il dispositivo sulla parte superficiale; mentre nella seconda parte si è fatta un'analisi approfondita dei risultati attraverso il linguaggio di programmazione Matlab.

Indice

Indice **4**
Capitolo 1 ..... **7**
Strumentazione liquida **7**
1. Moku 7
1.1 Moku:Go 10
1.1.1 Datasheet dello strumento 12
1.1.2 Strumenti del Moku:Go 13
1.1.2.1 Spectrum Analyzer 14
1.1.2.2 Waveform Generator 14
1.1.2.3 Frequency Response Analyzer 14
1.1.2.4 Phasemeter 14
1.1.2.5 Digital Filter Box 15
1.1.2.6 Lock-in Amplifier 15
1.1.2.7 Logic Analyzer/ Pattern Generator 15
1.1.2.8 PID Contoller 15
1.1.2.9 Arbitrary Waveform Generator 16
1.1.2.10 FIR Filter Builder 16
1.1.2.11 Data Logger 16
Capitolo 2 ..... **17**
Oscilloscopio **17**
2.1 Lo strumento 17
2.2 Datasheet dello strumento 19
2.3 Oscilloscopio Moku:Go 20
2.3.1 Trigger level 21
Capitolo 3 ..... **22**
Misure di carica e scarica di un condensatore **22**
3.1 Materiale di supporto: breadboard 22
3.2 Analisi circuito ideale 23
3.3 Prove con lo strumento 25
3.3.1 Prove carica e scarica di un condensatore circuito RC 26
3.3.1.1 Prima configurazione 26
3.3.2 Seconda configurazione 32

3.3.3 Terza configurazione 34
3.4 Costante di tempo 36
Capitolo 4 41
Generatore di forme d'onda del Moku:Go 41
4.1 Generatore di forme d'onda Moku:Go 41
4.2 Carica e scarica condensatore in un circuito RC 41
Capitolo 5 46
Dispositivi piezoelettrici 46
5.1 Dispositivi 46
5.2 La piezoelettricità 47
Capitolo 6 50
Analisi sperimentale 50
6.1 Prove con piezoelettrico 50
6.1.1 Prove sul piezoelettrico senza feltro 52
6.1.1.1 Piezoelettrico a vuoto 52
6.1.1.2 Circuito resistivo alimentato dal dispositivo piezoelettrico 53
6.1.1.3 Circuito RC alimentato con il sensore di vibrazione piezoelettrico 55
6.1.2 Prove sul circuito alimentato dal piezoelettrico con il feltrino 57
6.1.2.1 Piezoelettrico con il feltro a vuoto 58
6.1.2.2 Circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico con il feltro 58
6.1.2.3 Circuito RC alimentato dal piezoelettrico con il feltro 60
Capitolo 7 64
Analisi dei dati 64
7.1 Estrazione dati dall'oscilloscopio/voltmetro del Moku:Go 64
7.1 Matlab 66
7.2 Prove 66
7.2.1 Prove con il piezoelettrico a vuoto 66
7.2.1.1 Prima forma d'onda 69
7.2.1.2 Seconda forma d'onda 70
7.2.1.3 Terza forma d'onda 72
7.2.1.4 Quarta forma d'onda 73
7.2.1.5 Quinta forma d'onda 75
7.2.2 Prove con il piezoelettrico con il feltro 77
7.2.3 Prove su circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico senza feltro 79
7.2.4 Prove su circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico con il feltro 80

7.2.5 Prove su circuito RC alimentato dal piezoelettrico senza feltro 82
7.2.6 Prove su circuito RC alimentato dal piezoelettrico con il feltro 85
7.3 Confronto risultati 87
Conclusioni 89
Elenco tabelle 90
Elenco immagini 91
Bibliografia 94
Ringraziamenti 96

Capitolo 1

Strumentazione liquida

1. Moku

La strumentazione elettronica inizia la sua storia a partire dagli anni ’70 quando vengono introdotti i tradizionali strumenti stand-alone. Ciascun tipo di strumento stand-alone viene sviluppato per un determinato scopo, e sebbene questo tipo di dispositivi con scopi limitati e con scarse possibilità di essere estesi o personalizzati.

A metà degli anni ’80 cominciò ad apparire la strumentazione virtuale. L’idea era quella di utilizzare la combinazione flessibile di hardware e software: in genere viene utilizzato hardware fisso per uso generale, mentre tutte le modifiche e le personalizzazioni necessarie possono essere eseguite in software. Oggi, con la denominazione “strumentazione liquida” si intende, in generale, strumentazione progettata su base FPGA (Field-Programmable Gate Array) e dunque caratterizzata dalla capacità di riconfigurarsi in base alla specifica programmazione dell’hardware[1].

Varie aziende oggi propongono sul mercato strumenti cosiddetti liquidi. Tra esse, la Liquid Instruments ha lanciato una nuova tecnologia mettendo a disposizione tre tipologie hardware della famiglia dei Moku, in base alle proprie necessità: Moku:Lab, Moku:Pro.e Moku:Go.



Fig. 1.1 Moku:Lab

Moku:Lab è utilizzato da centinaia di istituti di ricerca e sviluppo in tutto il mondo e riunisce oltre 12 strumenti di alto valore in un dispositivo compatto e intuitivo che ha semplificato notevolmente i flussi di lavoro sperimentale.

Nella tabella sottostante sono riportate le specifiche dello strumento ricavate dal datasheet di quest'ultimo[2].

Tab. 1.1 Moku:Lab

Specifiche del Moku:Lab [2]

Peso	3.5 Ib / 1.6 kg
Range d'ingresso	+/- 5 V
Ingresso analogico del canale	500 MSa/s[1]
Uscita analogica del canale	1 GSa/s[2]
Larghezza di banda analogica in ingresso	200 MHz
Larghezza di banda analogica in uscita	300 MHz
Ingresso/Uscita (I/O)	Porta TTL del trigger
Software utilizzati	iOS App; Windows; mac OS; Matlab; LabVIEW

[1] Megasample al secondo
[2] Gigasample al secondo

Strumenti integrati	Generatore di forme d'onda arbitrarie; Data logger; Costruttore di filtri di tipo FIR; Risposta in frequenza; Oscilloscopio; Fasometro; Analizzatore di spettro; Generatore di forme d'onde



Fig 1.2 Moku:Pro

Tab. 1.2 Moku:Pro

Specifiche Moku:Pro [2]

Peso	14.77 Ib / 1.6 kg
Range d'ingresso	+/- 5 V
Ingresso analogico del canale	5 GSa/s
Uscita analogica del canale	1.25 GSa/s
Larghezza di banda analogica in ingresso	600 MHz
Larghezza di banda analogica in uscita	500 MHz
Ingresso/Uscita (I/O)	Porta TTL del trigger

Software utilizzati	iOS App; Windows; mac OS; Matlab; LabVIEW
Strumenti integrati	Generatore di forme d'onda arbitrarie; Data logger; Boxe filtri digitali; Costruttore di filtri di tipo FIR; Risposta in frequenza; Oscilloscopio; Fasometro; Analizzatore di spettro; Generatore di forme d'onde, Amplificatore di tipo Lock-in, Controllo del PID

Si evince dalle tabelle che gli strumenti all'interno dei dispositivi sono molto simili, con delle differenze sui valori di tensione ammessi.

In particolare andremo a spiegare meglio la strumentazione più semplice utilizzata da ingegneri e studenti, il Moku:Go.

1.1 Moku:Go

Moku:Go è uno strumento di progettazione e test portatile che aiuta gli ingegneri a studiare ed elaborare dati anche fuori da un laboratorio, grazie al design semplice ma essenziale; inoltre aiuta gli studenti ad apprendere i concetti essenziali dei circuiti. Tale dispositivo lavora interfacciandosi ad un software intuitivo, scaricabile su PC, dal quale poter dare i comandi desiderati. È un dispositivo che unisce l'elettronica audio e di potenza alla progettazione analogica e digitale.

Moku:Go consente di implementare le funzioni di oltre 10 strumenti, come per esempio: l'oscilloscopio, il generatore di forme d'onda, l'analizzatore di spettro, l'amplificatore lock-in e tanti altri come si può vedere dalla Fig. 1.3[3]. È possibile, inoltre, interfacciare tra loro due dispositivi Moku:Go per lavorare insieme creando così un banco di prova e facendo in modo che un dispositivo lavori come generatore

di tensione, ad esempio, collegato all'ingresso di un secondo Moku, che riporta in uscita il segnale ricevuto in ingresso.

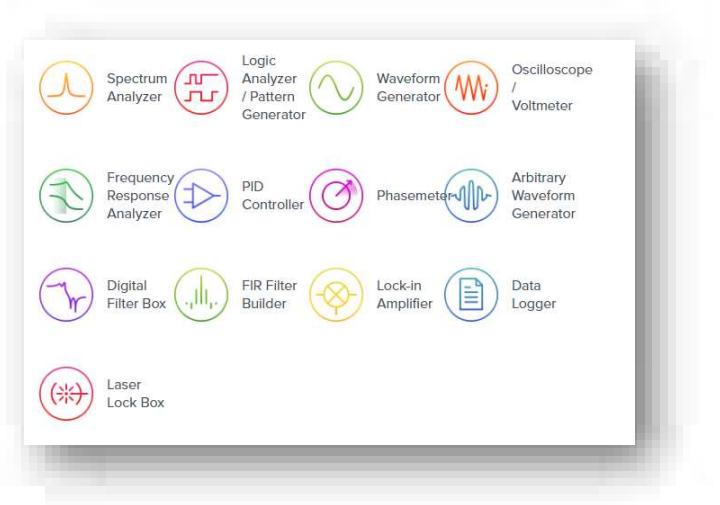


Fig. 1.3 Strumenti disponibili con il dispositivo Moku:Go

Tab. 1.3 Specifiche del Moku:Go

Specifiche Moku:Go[2]

2 canali	+ 5 V a – 5 V → 150 mA 0 a 16 V → 150 mA
4 canali	+ 5 V a – 5V → 150 mA 0 a 16 V → 150 mA Doppio canale da 0.6 a 5 V → 1 A
Range della tensione in ingresso	+/- 25 V
Ingresso analogico del canale	125 MSa/s
Uscita analogica del canale	125 MSa/s
Larghezza di banda analogica in ingresso	30 MHz (-3 dB)
Larghezza di banda analogica in uscita	20 MHz
Massimo range in uscita	+/- 5 V

Ingresso/Uscita (I/O)	5 V di tolleranza Supporta 3 V del livello logico
Software utilizzati	iOS App; Windows; mac OS; Matlab; LabVIEW
Strumenti integrati	Generatore di forme d'onda arbitrarie; Data logger; Filtri digitali; Costruttore di filtri di tipo FIR; Risposta in frequenza; Oscilloscopio; Fasometro;Analizzatore di spettro; Generatore di forme d'onda, Amplificatore di tipo Lock-in, Controllore PID

1.1.1 Datasheet dello strumento



Fig. 1.4 Componenti hardware

Come si evince dalla Fig. 1.4[2] il dispositivo è semplice, essenziale e comodo da utilizzare. Presenta rispettivamente 2 porte di ingresso e uscita; 4 canali di alimentazione e 2 canali riservati alla massa; il connettore per l'alimentazione attraverso un elemento magnetico; la porta USB-C per interfacciare il dispositivo al PC attraverso un software dedicato. Quest'ultimo è compatibile sia con Microsoft

che iOS e permette in modo rapido ed intuitivo di pilotare il dispositivo attraverso chiari segnali.

Dispone inoltre di una connettività completa con hotspot Wi-Fi e USB-C, di robuste caratteristiche hardware e di protezione elettrica per garantire che gli studenti possano esplorare nuovi progetti senza mettere a rischio se stessi o le loro apparecchiature. Gli esclusivi alimentatori integrati sono programmabili dall'utente con opzioni di alta tensione e alta corrente per qualsiasi progetto.

La linea di prodotti di soluzioni hardware e software sfrutta la potenza di calcolo delle moderne FPGA per creare una strumentazione altamente personalizzabile per il controllo degli esperimenti, l'acquisizione e l'analisi dei dati.

1.1.2 Strumenti del Moku:Go

Diverse sono le funzioni interne allo strumento[3]:

- *Spectrum Analyzer: Analizzatore di spettro;*
- *Waveform Generator: Generatore di forme d'onde;*
- *Frequency Response Analyzer; Analizzatore di risposta in frequenza;*
- *Phasemeter: Fasometro;*
- *Digital Filter Box;*
- *Lock-in Amplifier;*
- *Laser Lock Box;*
- *Logic Analyzer/ Pattern Generator;*
- *PID Contoller;*
- *Arbitrary Waveform Generator;*
- *FIR Filter Builder;*
- *Data Logger;*
- *Oscilloscope/Volmeter: Oscilloscopio/Voltmetro*

1.1.2.1 Spectrum Analyzer

L'analizzatore di spettro del Moku:Go permette di osservare i segnali in ingresso, nel dominio della frequenza, tra la componente continua e i 300 MHz con la presenza di un rumore di fondo basso e inoltre permette di visualizzare fino a quattro canali contemporaneamente con una larghezza di banda di risoluzione di 470 mHz e uno span minimo di 100 Hz.

1.1.2.2 Waveform Generator

Il generatore di forme d'onda permette di generare fino a quattro forme d'onda indipendenti e possiede una larghezza di banda massima pari a 500 MHz. Le forme d'onda possibili sono: l'onda sinusoidale, l'onda quadra, la rampa, l'impulso, il rumore oppure l'onda in corrente continua. Inoltre, lo strumento permette di scegliere la modulazione ad alta larghezza di banda della fase, della frequenza, dell'ampiezza o dell'ampiezza dell'impulso, oppure generare burst o sweep innescati da una sorgente interna o esterna. Infine, tale generatore permette di impostare il valore picco-picco della tensione da generare e la frequenza. Maggiore è la frequenza, minore sarà il periodo essendo legati dalla relazione: $f = \frac{1}{T}$.

1.1.2.3 Frequency Response Analyzer

Tale funzione permette di misurare e ricavare la risposta in frequenza utilizzando un'uscita sinusoidale.

1.1.2.4 Phasemeter

Strumento che misura la fase, rispetto a un clock di riferimento, di massimo quattro segnali in ingresso. È costruito su di una architettura ad anello con aggancio di fase, la quale è stata implementata digitalmente. La precisione del fasometro Moku

supera le prestazioni degli amplificatori *lock-in* e dei contatori di frequenza convenzionali.

1.1.2.5 Digital Filter Box

Si utilizza per generare e progettare filtri a risposta impulsiva infinita in modo interattivo. È possibile scegliere diverse tipologie di filtri: passa-basso, passa-alto, passa-banda; filtri configurabili come ad esempio: Butterworth, Chebyschev ed ellittico.

1.1.2.6 Lock-in Amplifier

L'amplificatore Lock-in Moku supporta la demodulazione a doppia fase (X/Y o R/θ) dalla continua (CC) a 600 MHz. È inoltre dotato di un oscilloscopio e di un data logger integrati a due o quattro canali, che consentono di osservare segnali fino a 1,25 GSa/s e di registrare dati fino a 10 MSa/s.

1.1.2.7 Logic Analyzer/ Pattern Generator

L'analizzatore di protocollo e il generatore di pattern integrati, vengono utilizzati per stimolare, monitorare, catturare ed eseguire il debug dei sistemi digitali. I dati, le schermate e i registri possono essere facilmente acquisiti per e-mail oppure per servizi basati su cloud, per una rapida condivisione e valutazione.

1.1.2.8 PID Contoller

Con il controllore PID Moku è facile sfruttare fino a quattro controllori PID completamente configurabili per semplificare la retroazione e la stabilizzazione del sistema. È possibile utilizzarli in applicazioni che richiedono larghezze di banda di retroazione sia basse che elevate, come la stabilizzazione della temperatura e della corrente del laser. Per ottenere la massima flessibilità, è possibile utilizzare il

controllore PID Moku anche come compensatore lead-lag, saturando i controllori integrale e differenziale con impostazioni di guadagno indipendenti.

1.1.2.9 Arbitrary Waveform Generator

Il generatore di forme d'onda arbitrarie Moku è maggiormente utilizzato per generare forme d'onda personalizzate con un massimo di 65.536 punti a frequenze di campionamento fino a 1,25 GSa/s. Per ottenere la massima flessibilità nella generazione di forme d'onda veramente arbitrarie, è facile caricare le forme d'onda da un file o inserirle come funzioni matematiche parziali con un massimo di 32 segmenti.

1.1.2.10 FIR Filter Builder

Moku FIR Filter Builder lo si utilizza per progettare e implementare filtri passa-basso, passa-alto, passa-banda e passa-banda a risposta impulsiva finita (FIR) con un massimo di 14.819 coefficienti. È possibile scegliere tra quattro forme di risposta in frequenza, cinque risposte all'impulso comuni e fino a otto funzioni di finestratura (‘window’).

1.1.2.11 Data Logger

Il Data Logger Moku consente di registrare i dati direttamente su una scheda SD, su un disco collegato in rete o sulla memoria interna con velocità di campionamento fino a 10 MSa/s. Su Moku:Pro, il rumore di ingresso è misurato a 30 nV/√Hz a 100 Hz con la tecnologia ADC mista della strumentazione liquida, che fornisce una registrazione dei dati a bassissimo rumore dalle frequenze acustiche a quelle RF. Moku:Pro e Moku:Lab sono dotati di I/O di sincronizzazione del clock a 10 MHz, che consentono un'integrazione flessibile con altri dispositivi elettronici.

In particolare si passa a descrivere ed analizzare in modo più approfondito lo strumento oscilloscopio/voltmetro nel capitolo successivo.

Capitolo 2

Oscilloscopio

Come visto precedentemente il Moku permette di utilizzare più strumenti in base alle operazioni e analisi da fare. Una di queste funzioni è l'Oscilloscopio.

2.1 Lo strumento

L'oscilloscopio è uno strumento di test e misura che rileva i valori di tensione in funzione del tempo. In particolare, se considerassimo un sistema di riferimento



Fig. 2.1 Oscilloscopio digitale

cartesiano, si vedrebbero riportati sull'asse delle ascisse gli istanti di tempo mentre sull'asse delle ordinate i valori di tensione, secondo il Sistema Internazionale dell'unità di misura.

Una delle caratteristiche principali dell'oscilloscopio è la velocità con la quale riporta i valori di tensione rilevati e infatti spesso si parla di frequenza di campionamento, ovvero del numero di campioni che è in grado di rilevare in un secondo tenendo conto della frequenza di campionamento fondamentale detta frequenza di Nyquist. I segnali che superano la frequenza di taglio vengono attenuati. Da ciò si deduce che la frequenza di campionamento e la larghezza di banda sono aspetti essenziali di un oscilloscopio e sono strettamente collegati tra loro in quanto la frequenza di campionamento è tipicamente progettata in base alla larghezza di banda.

Gli oscilloscopi moderni hanno frequenze di campionamento che vanno dai centinaia di mega campioni alle decine di giga campioni al secondo e presentano delle larghezze di banda che vanno dalle decine di MHz a qualche GHz.

Un oscilloscopio, come regola generale, dovrebbe presentare una frequenza almeno 3 o 5 volte maggiore della frequenza di Nyquist.

La Fig. 2.1 mostra le componenti principali di un oscilloscopio, in questo caso si tratta di un oscilloscopio digitale che necessita di due sonde in ingresso, il cavo di alimentazioni, e, altri componenti specifici dello strumento che si va ad utilizzare.

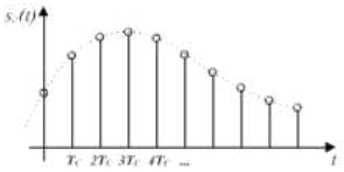


Fig. 2.2 Frequenza di campionamento

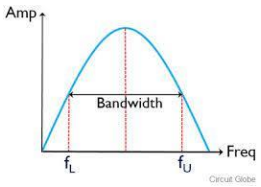


Fig. 2.3 Larghezza di banda

2.2 Datasheet dello strumento

Tab. 2.1 Specifiche dal Datasheet[6]

Frequenza di campionamento	**Larghezza di banda**	**Risoluzione ADC**	**Impedenza d'ingresso**	**Accoppiamento in ingresso**	**Generatore di forme d'onda**
Fino a 125 MSa/s	30 MHz	12 bits	1 MΩ	AC o DC	2 canali fino a 20 MHz

Tab. 2.2 Specifiche oscilloscopio Moku

Specifiche dello strumento

Risoluzione verticale	12 bit
Range d'ingresso	+/- 5 V o +/- 25 V
Frequenza di campionamento	125 MSa/s
Larghezza di banda in ingresso	1 MΩ
Accoppiamento in ingresso	20 MHz
Larghezza di banda in uscita	20 MHz
Forma d'onda in uscita	Sinusoide, onda quadra, rampa, DC, rumore

2.3 Oscilloscopio Moku:Go

Lo strumento oscilloscopio Moku:Go può essere utilizzato per osservare, analizzare e registrare segnali nel tempo su due canali, con larghezza di banda analogica di 30MHz e una frequenza di campionamento fino a 125 MSa/s.

L'interfaccia utente di Moku:Go, inoltre, consente un controllo e un'impostazione efficienti dell'oscilloscopio e il generatore di forme d'onda integrato fornisce un comodo stimolo di prova. In questo particolare oscilloscopio sono tre gli aspetti fondamentali da considerare prima di andare ad effettuare le analisi e le misure: il range in ingresso, ovvero la scala verticale in cui si trovano i valori di tensione; l'accoppiamento (AC o DC) e l'impedenza.

La scala verticale è solitamente collegata all'input dato in ingresso, attraverso dei cursori è possibile sistemarla in base al valore di tensione percepito e riportato in modo digitale dallo strumento e che è possibile leggere attraverso il software dedicato; inoltre, l'oscilloscopio presenta un valore limite che si può dare in ingresso.

L'accoppiamento è molto importante e va selezionato prima di eseguire la misura, a seconda che si voglia avere un accoppiamento in continua o in alternata. Attraverso l'accoppiamento in continua entrambe le componenti in continua e in alternata vengono rilevate mentre con l'accoppiamento in alternata la sola componente AC passa indisturbata. La frequenza di cut-off per l'accoppiamento in AC è tipicamente intorno ai 50-60 Hz.

Infine, occorre valutare l'impedenza. Tipicamente, viene utilizzata la resistenza di 1 MΩ per misurare tensioni in modo accurato, in quanto tale valore di resistenza non perturba in modo significativo il segnale in ingresso, mentre vengono maggiormente utilizzati resistori da 50Ω per rilevare potenze ad alta frequenza oppure per collegarsi ad altre impedenze aventi lo stesso valore di resistenza.

2.3.1 Trigger level

Uno dei più importanti fattori che caratterizzano un oscilloscopio è il valore del Trigger, detto ‘Trigger Level’.

Come detto precedentemente, la frequenza di campionamento è fondamentale in un oscilloscopio ma in un’analisi non è sempre possibile pendere qualsiasi numero di punti, con il trigger si va a prendere un certo numero di punti dati. Nelle misure eseguite è stato preso, come si vedrà successivamente, un numero di dati pari a 16380 campioni.

L’oscilloscopio ha il compito di catturare le continue forme d’onda in seguito all’attivazione del trigger.

Il Moku consente di impostare, il valore del trigger e la modalità di funzionamento, prima che si vada ad eseguire la misura. Il trigger può essere settato in tre diverse modalità: “Auto”, “Normal” o “Single”, in base a ciò che si vuol rilevare.

La modalità “Single” permette di catturare la forma d’onda rilevata, in seguito all’evento di trigger successivo, dopo il quale mette in pausa lo schermo e mostra la forma d'onda catturata con quell'innesco.

In modalità "Auto", l'attivazione "forzata" avviene quando non si rileva un evento di attivazione dopo un certo tempo. Questa modalità permette di vedere come la tensione sale o scende in modo costante rispettivamente durante la carica e la scarica del condensatore nel momento in cui si chiude e si apre l’interruttore avendo in ingresso una tensione costante.
In modalità "Normale", l'oscilloscopio viene attivato solo quando viene soddisfatta la condizione di attivazione impostata. In questa modalità, l'oscilloscopio aspetterà sempre l'evento di trigger successivo, invece di applicare un trigger "forzato". In modalità "Single", l'oscilloscopio attende l'evento di trigger successivo.

Capitolo 3

Misure di carica e scarica di un condensatore

Sia al fine di comprendere meglio il funzionamento e le configurazioni disponibili dello strumento liquido, che per poter poi passare allo studio del comportamento di dispositivi piezoelettrici, si è deciso di studiare dapprima le fasi di carica e scarica di un condensatore. Lo strumento configurato come oscilloscopio ha permesso di rilevare le curve di carica e di scarica, gli intervalli di tempo interessati e i valori di tensione. Inoltre, è stato possibile evidenziare la dipendenza della tensione in funzione del tempo attraverso il grafico dell'andamento del segnale fornito dall'oscilloscopio.

3.1 Materiale di supporto: breadboard

La carica e la scarica del condensatore sono state studiate ponendo attenzione ad un circuito progettato fisicamente mediante una breadboard, delle resistenze e condensatore ceramico. La breadboard è uno strumento utilizzato per creare prototipi di circuiti elettrici. Essa non richiede saldature ed è completamente riutilizzabile, consiste in una base di plastica con numerosi fori nei quali si inseriscono i reofori, ovvero i terminali conduttori o i piedini dei componenti elettrici ed elettronici. I fori della breadboard vengono fermati meccanicamente e collegati elettricamente mediante delle clip metalliche posizionate all'interno della breadboard. La distanza tra i fori è tipicamente di 2.54 mm, misura presa come

riferimento per la compatibilità con i circuiti integrati nel “package dual inline (DIPs)”. Quest’ultimo è un contenitore di un dispositivo elettronico che viene utilizzato per i circuiti integrati o per file di componenti discreti uguali. Le breadboar presentano piste di conduzione che consistono in collegamenti elettrici tra i fori, chiamati ‘strips’ e che permettono il passaggio di corrente tra i vari componenti.

Il circuito di riferimento, è stato realizzato con un resistore, posto in serie al parallelo tra una resistenza, avente valore pari al primo resistore, ed un condensatore.

3.2 Analisi circuito ideale

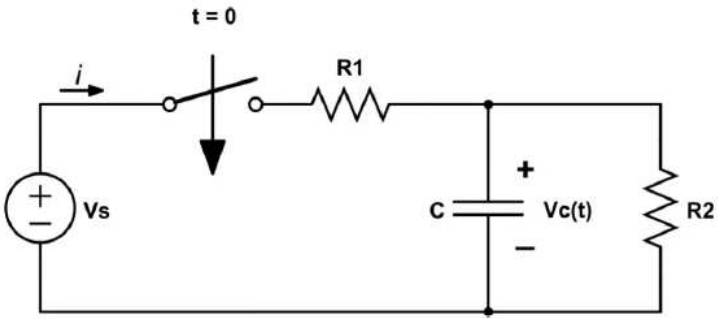


Fig. 3.1 Circuito di carica del condensatore preso come esempio

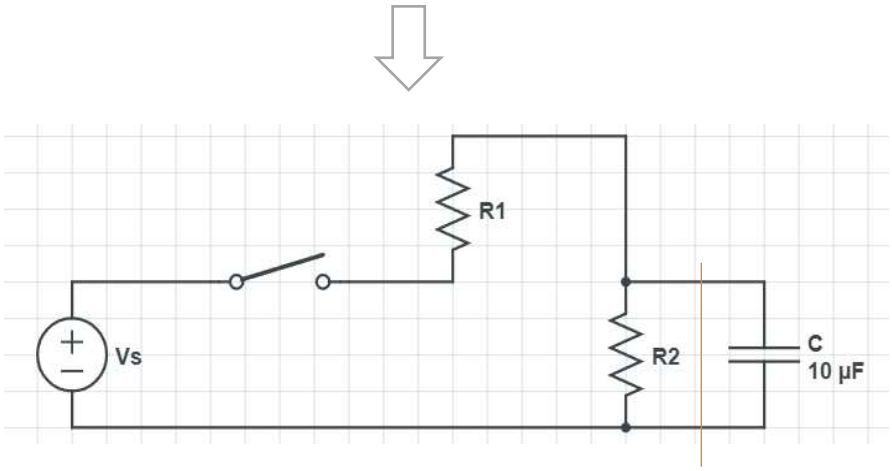


Fig. 3.2 Circuito equivalente al circuito in Fig. 3.1 con una linea rossa che separa il circuito per applicare il Teo. di Thevenin

Inizialmente si va a studiare il comportamento del circuito ideale per poi eseguire l'analisi sul circuito fisico.

La Fig. 3.2 mostra la disposizione ideale dei componenti per la risoluzione analitica del circuito. Per prima cosa si va a studiare analiticamente il circuito per poi verificare sperimentalmente se i valori misurati sono gli stessi oppure presentano delle differenze particolarmente evidenti.

Lo studio si effettua sia per la carica che per la scarica del condensatore e si ricavano le equazioni costitutive.

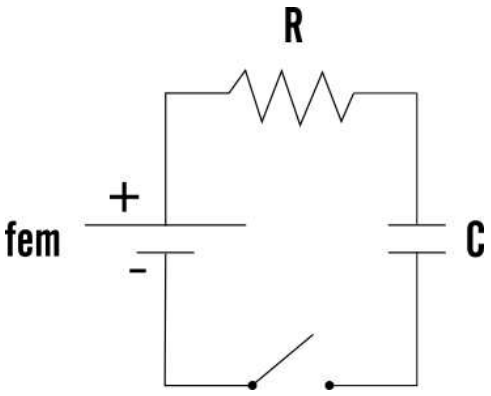


Fig. 3.3 Circuito RC ideale con interruttore

Per ricavare le leggi per la carica e la scarica del condensatore, si considera, inizialmente, il circuito ideale, Fig. 3.3, con il generatore, l'interruttore e la serie tra il resistore e il condensatore. L'interruttore al tempo t=0, si chiude per iniziare la fase di carica; mentre nella fase di scarica al tempo t = 0, si apre.

Il circuito ideale RC presenta una costante τ = RC, chiamata costante di tempo; l'equazione che definisce la carica del condensatore è data dalla legge:

$$v_c = V_s \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{RC}}\right)$$

Mentre la scarica del condensatore è definita dalla legge:

$$v_C = V_s * e^{-\frac{t}{RC}}$$

Dove Vs è la tensione erogata dal generatore che alimenta il circuito (source).

All'istante t = 0 la tensione v_c è pari a 0 mentre se pongo l'istante di tempo t pari alla costante RC ottengo la relazione costitutiva seguente: $v_c = 63.2\%\, V_s$, per la fase di carica.
La costante di tempo è il tempo necessario per caricare il condensatore attraverso il resistore al 63.2 % della sua capacità totale; mentre rappresenta il tempo necessario per scaricarlo al 36.8 % della sua tensione iniziale espressa in Volt.

3.3 Prove con lo strumento

Le resistenze utilizzate sono caratterizzate da un valore di riferimento, detto valore medio e, da un valore percentuale che rappresenta la relativa incertezza (spesso chiamata tolleranza del resistore).

Tutti gli strumenti che vengono utilizzati sono affetti da incertezza, stimata dai costruttori e riportata nei relativi datasheet, come per il Moku:Go. L'incertezza viene stimata attraverso misure fatte sugli strumenti a parità di condizioni confrontati con strumenti più accurati, tarati con uno strumento principale, detto campione di riferimento primario, conservato all'INRIM[7], che ha il compito di realizzare, mantenere e sviluppare i campioni nazionali di riferimento delle unità di misura del sistema internazionale (SI).

Il circuito, sulla breadboard è realizzato applicando il teorema di Thevenin a ciò che si trova a sinistra della linea rossa presente nel circuito in Fig. 3.2. Inoltre, essendo le due resistenze uguali si ha: R1 = R2 = R.

Per applicare il Teo. di Thevenin si eseguono due passagi:

1. viene spento il generatore ottenendo:

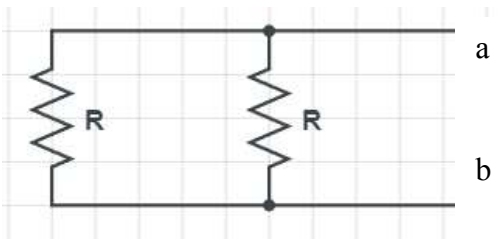


Fig. 3.4 Equivalente di Thevenin per il calcolo della resistenza equivalente

$$R_{eq} = R_{\backslash\backslash} = \frac{R}{2}$$

La resistenza equivalente dal Teo. di Thevenin è pari al parallelo delle due resistenze. Queste ultime risultano uguali perciò la resistenza equivalente è pari alla metà di quella presente nel circuito di partenza.

2. Si determina la tensione equivalente di Thevenin, che è la tensione "a vuoto" tra i nodi 'a' e 'b':

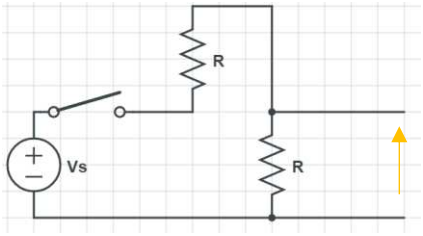


Fig. 3.5 Circuito per il calcolo della tensione equivalente di Thevenis

$$V_{eq} = \frac{V_s}{2R} * R = \frac{V_s}{2}$$

Il circuito utilizzato per realizzare il circuito reale, sulla breadboard, è il circuito ideale in Fig. 3.3 dove $fem = V_{eq}$ e R = R_{eq}.

3.3.1 Prove carica e scarica di un condensatore circuito RC

Il primo circuito studiato è un circuito RC costituito da due resistori di uguale valore di resistenza nominale e un condensatore la cui capacità è la stessa in tutti i circuiti progettati e studiati di seguito. Tali valori di resistenza e capacità sono dati dal costruttore con un'incertezza pari al 5%, che definisce il range di valori che i resistori e il condensatore possono assumere.

3.3.1.1 Prima configurazione

La prima configurazione studiata è:

- R = 330 Ω

- C = 10 μF
- Vs = 15.5 V

Per lo studio viene preso il Moku:Go configurato come oscilloscopio/voltmetro così da valutare l'andamento della tensione in funzione del tempo: v(t).

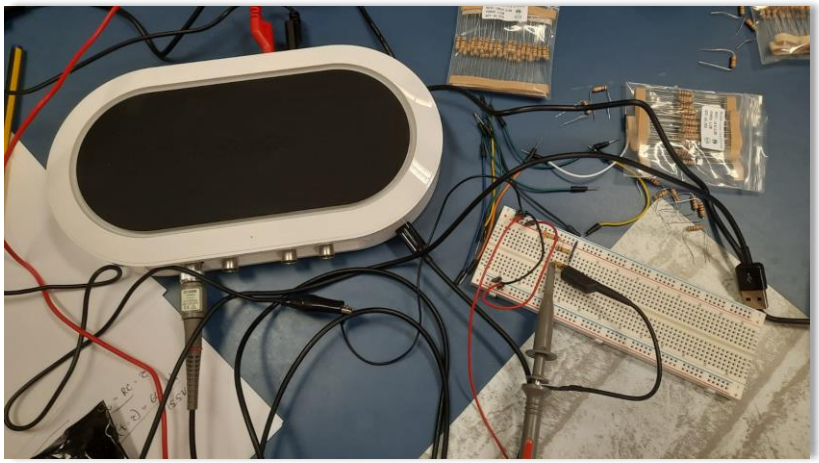


Fig. 3.6 Circuito RC collegato alle sonde dell'oscilloscopio Moku:Go

Per prima cosa, dal software del dispositivo si va ad impostare una tensione costante V_s da far erogare agli alimentatori presenti nel dispositivo, per alimentare il circuito attraverso dei connettori a banana che vengono posizionati nei fori dell'output dello strumento rispettivamente sull'alimentazione e sulla massa.

Il cavo rosso porta l'alimentazione al circuito e viene collegato al polo positivo della breadboard; mentre il cavo nero viene collegato alla massa dello strumento e collegato al polo negativo della scheda.

La Fig. 3.6 mostra la disposizione degli elementi sulla breadboard e i collegamenti fatti dallo strumento alla scheda in base al circuito in Fig. 3.3. Si nota che il piede della prima resistenza è collegato ad una tensione positiva mediante un ponticello che la collega alla tensione positiva che arriva dallo strumento alla breadboard; allineato ad essa c'è il piede della seconda resistenza posta in parallelo al

condensatore. Infine, la massa è collegata, tramite un secondo ponte che porta il riferimento in corrispondenza del piede del condensatore.

La sonda per prelevare la tensione è posta ai capi del condensatore in corrispondenza del polo positivo e negativo.

- ***Fase di carica del condensatore***

La carica segue un andamento esponenziale secondo la legge:

$$v_c = V_s \cdot \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}\right)$$

La tensione V_s erogata dal dispositivo è pari a 15.5 V.

Per effettuare le varie prove ci si pone nella condizione in cui l'istante di tempo considerato è pari alla costante di tempo. Nel caso analizzato, la costante di tempo è pari a $\tau = \frac{R^2}{2R} C$ perché si deve considerare il parallelo tra le due resistenze, come mostrato in Fig. 3.2, che nel caso specifico risultano uguali, dando una costante di tempo pari alla metà della costante di tempo del circuito RC, $\tau = \frac{R}{2} C$.

Come mostrato in precedenza, dopo un tempo pari alla costante di tempo del circuito considerato, la tensione ai capi del condensatore è proprio pari a $v_c = 63{,}2\%\, V_s$, nel caso della carica del condensatore. La tensione costante V_s, è pari alla metà della tensione erogata dallo strumento a causa del parallelo tra le due resistenze di uguale valore e risulta pari a 7.75 V.

La costante di tempo ideale del circuito vale $\tau = \frac{R}{2} C = \frac{330\Omega}{2} * 10\mu F = 1.650$ ms.

Per ricavare l'andamento della carica del condensatore si imposta il trigger dello strumento, in particolare: il livello e l'Edge. Il livello è pari al valore di v_c, ossia pari al 63.2% di V_s, mentre l'Edge del trigger viene impostato su 'rising' perché si valuta la carica.

Dal grafico, dopo aver ricavato la curva, vado a posizionare i cursori: sono elementi messi a disposizione dallo strumento per trovare i valori corrispondenti agli istanti

di tempo e alla tensione. I cursori di tensione sono posizionati in corrispondenza del valore di tensione massimo, minimo, medio e in corrispondenza del 63.2% della tensione massima erogata al condensatore; mentre gli istanti di tempo son posizionati in modo da ricavare la costante di tempo relativa che va dal punto in cui inizia la fase di carica all'istante in cui si raggiunge un valore di tensione pari al 63.2% V_s.

La tensione massima rilevata è pari a 7.291 V, la quale risulta minore rispetto a quella erogata dal dispositivo perché il condensatore non riesce, a causa delle non idealità a caricarsi fino alla tensione nominale di 7.75 V.

Ricavato il valore di tensione massima rilevato dal condensatore, si calcola il 63.2% di 7.291 V, ovvero 4.566 V. Questo valore è relativo al punto di carica del condensatore ed è ottenuto ad un tempo pari a 1.234 ms, minore del valore ideale della costante di tempo. È necessario un tempo minore perché la tensione massima raggiunta dalla carica del condensatore è minore rispetto al valore di tensione che si sarebbe dovuto raggiungere.

Da ciò si evidenziano delle discrepanze tra l'istante di tempo reale e la costante di tempo ricavata idealmente, la quale non tiene conto delle incertezze sui dispositivi elettrici utilizzati, quali il Moku, la sonda, i resistori, le capacità e anche la breadboard, inoltre non considera le non idealità del circuito come per esempio gli elementi che vengono utilizzati, i resistori e il condensatore che presentano incertezze del 5%, la breadbooard dove vengono posizionati gli elementi, i cavi che portano la tensione al circuito e infine, l'interruttore manuale, che viene collegato nel momento della carica e viene scollegato in fase di scarica.

- ***Fase di scarica del condensatore***

Analoga alla fase di carica, la fase di scarica segue anch'essa un andamento esponenziale secondo la legge:

$$v_C = V_{in} * e^{-\frac{t}{RC}}$$

e considera un tempo di scarica pari alla costante di tempo del circuito ma, in questo caso, si ricava che la tensione misurata al tempo τ è pari a: $v_c = 32{,}8\%\, V_{in}$. Per valutare la fase di scarica devo impostare il trigger sul valore nuovo di v_c dove V_{in} è la tensione con la quale si carica il condensatore nel momento in cui si collega l'interruttore; mentre "Edge" viene settato su "Falling" così da ottenere la scarica del condensatore.

Con l'utilizzo delle due resistenze da 330 Ω si nota la presenza di rumore nel momento in cui si chiude e si apre l'interruttore, l'andamento della curva presenta delle piccole interferenze e la curva non appare omogenea e uniforme come si evince dalla figura sottostante.

Curva di carica



Fig. 3.7 Fase di carica del condensatore con resistenza da 330 Ω con il trigger impostato su 'Edge'

Curva di scarica

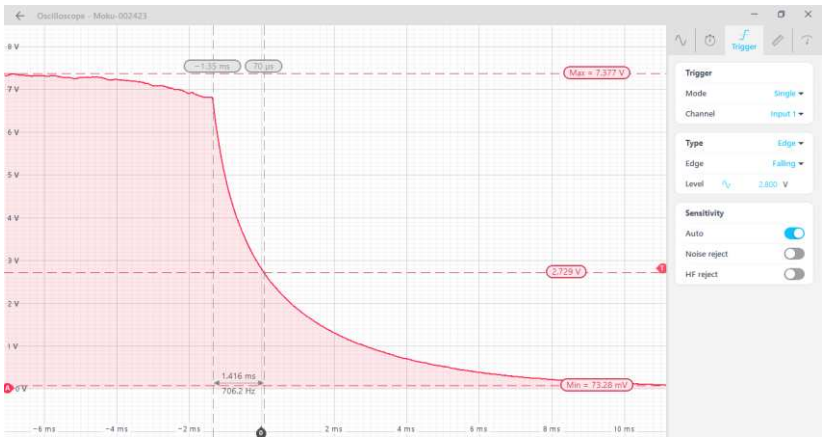


Fig. 3.8 Fase di scarica del condensatore con resistenza da 330 Ω con il trigger impostato sul 'Falling'

Sia per la fase di carica che per la fase di scarica del condensatore, il trigger dello strumento viene settato in modalità 'Auto' inizialmente. Per la fase di carica, in modalità auto, si controlla che il condensatore sia scarico quindi si mantiene l'interruttore scollegato dall'alimentazione. Una volta scaricato completamente si passa alla modalità "Single" e l'interruttore viene collegato ricavando la curva di carica.

Per la scarica, la procedura è equivalente però inizialmente, con il trigger in modalità "Auto" si carica completamente il condensatore, e una volta caricato completamente, si passa con il trigger alla modalità "Single" e si scollega l'alimentazione dal circuito ottenendo la curva di scarica.

Nella modalità sopra riportata sono state eseguite 4 prove, utilizzando le due resistenze da 330 Ω cambiando di volta in volta il condensatore di capacità pari a 10 μF, come mostrato in Tab. 3.1 in cui sono riportate tutte le prove e i relativi valori studiati.

Dalle varie prove risulta che il valore massimo è variabile e diverso in tutte e quattro le prove di poco minore del valore di riferimento.

La costante di tempo di riferimento è maggiore di quale decimo di *ms* rispetto ai valori ricavati dalla curva di carica e scarica del condensatore. In corrispondenza di tale valore di tempo ottengo una tensione percentuale diversa rispetta a quella che dovrei ottenere mettendomi nel caso in cui il tempo trascorso sia pari a τ.

Ho provato 4 volte a cambiare il condensatore per dimostrare che, a parità di temperatura, con le stesse condizioni in cui mi ero messa in precedenza i valori di tensione tendono a variare anche se di poco.

3.3.2 Seconda configurazione

La seconda configurazione studiata è:

- R = 1 kΩ
- C = 10 μF
- Vs = 5 V

La tensione in ingresso erogata dal generatore si abbassa a 5 V e si aumenta il valore delle due resistenze lasciando inalterato il valore della capacità del condensatore.

Come nel caso precedente anche per il nuovo circuito faccio un paio di prove lasciando le stesse resistenze ma considerando esemplari di condensatori diversi, aventi la medesima capacità.

Curva di carica

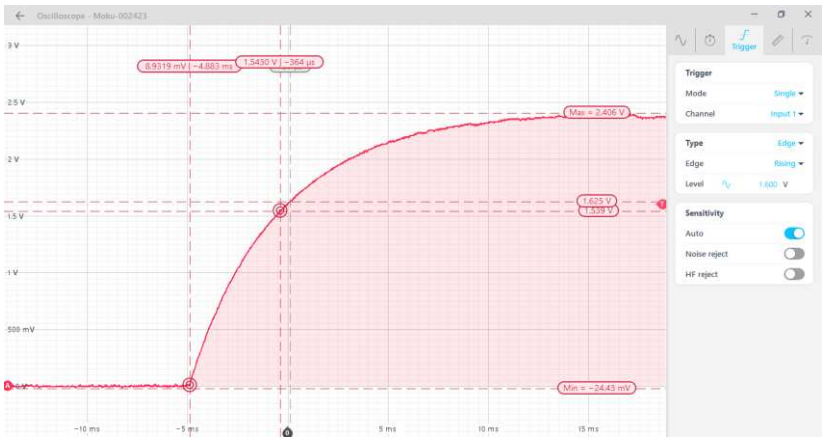


Fig. 3.9 Fase di carica del condensatore con resistenza da 1 kΩ con il trigger impostato su 'Edge'

Curva di scarica

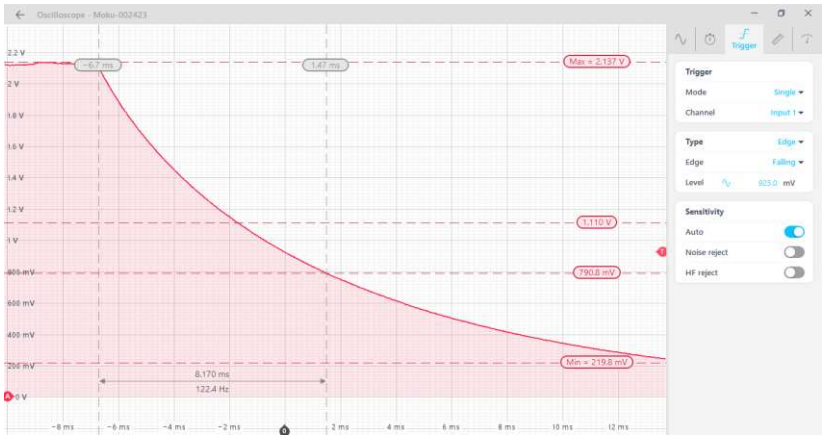


Fig. 3.10 Fase di scarica del condensatore con resistenza da 1 kΩ con il trigger impostato sul 'Falling'

La tensione che il condensatore vede in ingresso è pari alla metà della tensione erogata dallo strumento a causa del parallelo tra le due resistenze, quindi V_{eq} è pari a 2,5V in questo caso.

Per ricavare le due curve di carica e di scarica devo lavorare sul trigger dello strumento. Inizialmente, per la fase di carica devo impostare la modalità 'Auto' e scaricare completamente il condensatore mantenendo aperto l'interruttore. Una volta scaricato imposto il trigger al 63.2% del valore massimo di tensione e l'edge su 'rising'. Infine, metto la modalità single e ottengo la curva che descrive la fase di carica del condensatore. Come si evince dallo screen della prova il condensatore non riesce a caricarsi del tutto, non arriva alla tensione effettiva di 7,75 V.

3.3.3 Terza configurazione

La terza configurazione studiata è:

- R = 100 kΩ
- C = 10 µF
- Vs = 5 V

In quest'ultima configurazione è evidente come l'andamento della carica e della scarica assumano un aspetto più ideale rispetto alle precedenti, anche quando si apriva o chiudeva l'interruttore la curva seguiva un andamento più preciso.

Curva di carica

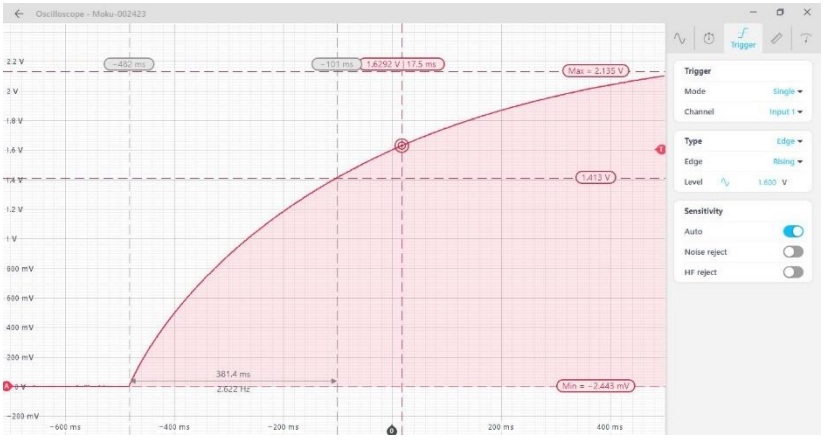


Fig. 3.11 Fase di carica del condensatore con resistenza da 100 kΩ con il trigger impostato su 'Edge'

Curva di scarica

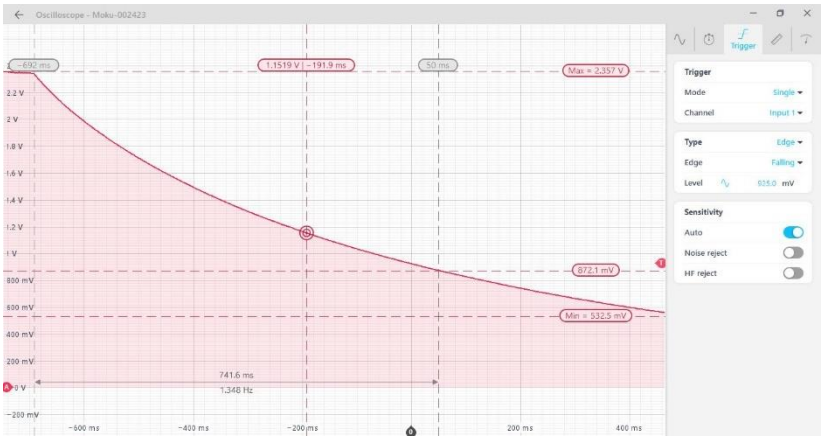


Fig. 3.12 Fase di scarica del condensatore con resistenza da 100 kΩ con il trigger impostato sul 'Falling'

Dalle seguenti rilevazioni risulta evidente che, avendo un parallelo tra le due resistenze la tensione che il circuito vede in ingresso è meno della metà rispetto a quella che lo strumento eroga per via anche delle non idealità presenti nel circuito.

In seguito alle seguenti prove eseguite su un circuito alimentato da una tensione costante erogata dal dispositivo Moku noto che, cambiando di volta in volta il condensatore, si ricavano delle tensioni che oscillano intorno al valore di tensione ideale ma sono sempre inferiori rispetto al valore atteso a causa delle non idealità del circuito dovute ai componenti resistivi e capacitivi che presentano incertezze del 5%.

Come si evince dalle schermate catturate durante le fasi di misura, l'andamento delle curve differisce da un caso all'altro a seconda delle due resistenze poste nel circuito.

3.4 Costante di tempo

Dalle varie prove sono state ricavate le curve di carica e di scarica di un condensatore e inoltre, è stata ottenuta la costante di tempo relativa, la quale segue la seguente legge: $\tau = \frac{R^2}{2R} C = \frac{R}{2} C$. Nel circuito analizzato è presente il parallelo tra i due resistori che hanno lo stesso valore di resistenza e ciò influisce sul valore della costante di tempo. In prima battuta si calcola analiticamente la tensione percepita e la costante di tempo relativa, poi, attraverso i cursori, messi a disposizione dal software dedicato dello strumento, si estrapolano i valori realmente misurati.

Si nota che la costante di tempo misurata è inferiore rispetto a quella ideale nel caso della carica del condensatore utilizzando tutte le configurazioni; mentre nella fase di scarica, utilizzando la coppia di resistori da 1 kΩ e 100 kΩ la costante di tempo misurata risulta maggiore di quella attesa secondo il modello analitico.

Questo è noto anche dal fatto che la costante di tempo, oltre a subire delle alterazioni a causa delle non idealità del circuito e alla capacità del condensatore di caricarsi e scaricarsi, è affetta da un'incertezza tipo composta perché ottenuta dal prodotto di variabili affette anch'esse da un'incertezza, che è data in termini relativi ed è del 5%. Tramite la legge di propagazione delle incertezze si è in grado di indicare un range di valori che la costante di tempo può assumere.

Legge di propagazione delle incertezze per il calcolo dell'incertezza tipo composta, considerando che $\tau = \frac{R}{2} C$: $u_C(\tau) = \sqrt{\left(\frac{\partial \tau}{\partial R}\right)^2 * u^2(R) + \left(\frac{\partial \tau}{\partial C}\right)^2 * u^2(C)} = \sqrt{\left(\frac{C}{2}\right)^2 * u^2(R) + \left(\frac{R}{2}\right)^2 * u^2(C)}$.

Andando a ricavare le incertezze tipo composte delle varie combinazioni di resistori e condensatore, si ottengono tutti i possibili valori che la costante di tempo può assumere.

- Prima configurazione:
  - R = 330 Ω
  - C = 10 μF

Prima di tutto si vanno a calcolare le incertezze estese dei singoli componenti, partendo dall'incertezza relativa del 5%, data dal costruttore:

$$Uc(R) = 5 * \frac{330\Omega}{100} = 16.5\ \Omega$$

$$Uc(C) = 5 * 10 * \frac{10^{-6}F}{100} = 5 * 10^{-7}\ F$$

Poi si passa al calcolo dell'incertezza tipo composta:

$$u_C(\tau) = \sqrt{\left(\frac{10^{-5}}{2}\ F\right)^2 * (16.5\ \Omega)^2 + \left(\frac{330}{2}\ \Omega\right)^2 * (5 * 10^{-7}\ F)^2} = 0.00011667\ s =$$

$$= 0.11667\ ms = 0.12\ ms$$

La costante di tempo τ = 1.65 ms, è una misura che viene rappresentata dal valore medio e dalla relativa incertezza e, di conseguenza, può assumere tutti i valori compresi nel seguente intervallo: [1.65 – 0.12; 1.65 + 0.12] ms. Secondo la GUM l'incertezza può essere approssimata al massimo con due cifre diverse da zero, utilizzando un'approssimazione per eccesso.

- Seconda configurazione
  - R = 1 kΩ
  - C = 10 μF

$$Uc(R) = 5 * \frac{1 * 10^3\Omega}{100} = 50\ \Omega$$

$$Uc(C) = 5 * 10 * \frac{10^{-6}F}{100} = 5 * 10^{-7}\ F$$

$$u_C(\tau) = \sqrt{\left(\frac{10^{-5}}{2}F\right)^2 * (50\ \Omega)^2 + \left(\frac{10^4}{2}\Omega\right)^2 * (5 * 10^{-7}\ F)^2} = 0.00035355\ s =$$

$$= 0.35355\ ms$$

La costante di tempo τ = 5.0 ms, è una misura composta identificata dal suo valore medio e dalla sua incertezza e, di conseguenza, può assumere tutti i valori compresi nel seguente intervallo: [5.0 – 0.4; 5.0 + 0.4] ms.

- Terza configurazione
  - R = 100 kΩ
  - C = 10 μF

$$Uc(R) = 5 * \frac{100 * 10^3 \Omega}{100} = 5 * 10^3\ \Omega$$

$$Uc(C) = 5 * 10 * \frac{10^{-6} F}{100} = 5 * 10^{-7} F$$

$$u_C(\tau) = \sqrt{\left(\frac{10^{-5}}{2} F\right)^2 * (5 * 10^3 \Omega)^2 + \left(\frac{10^5}{2} \Omega\right)^2 * (5 * 10^{-7} F)^2} = 0.035355\ s =$$

$$= 0.04\ s$$

La costante di tempo τ = 500.0 ms = 0.50 s, è una misura composta, rappresentata dal suo valore medio e dalla sua incertezza e, di conseguenza, può assumere tutti i valori compresi nel seguente intervallo: [0.50 – 0.04; 0.50 + 0.04] s.

Tab. 3.1 Dati sperimentali fase di carica del condensatore, dati a confronto

Fase di carica

	Vs	**τ= R/2 * C**	V_{eq}	**Vc max misurata**	**Trigger level**	**64% Vc max**	**τ misurata**
R = 330 Ω ; C = 10 μF							
1° prova	15,5 V	1,650 ms	7,75V	7,291 V	4,96 V	4,6656 V	1,234 ms
2° prova	15,5 V	1,650 ms	7,75V	7,4 V	4,83 V	4,736 V	1,447 ms
3° prova	15,5 V	1,650 ms	7,75V	6,9 V	4,96 V	4,416 V	1,406 ms
4° prova	15,5 V	1,650 ms	7,75V	7,316 V	4,96 V	4,682 V	1,44 ms
R = 1 kΩ ; C = 10 μF							
1° prova	5 V	5 ms	2,5 V	2,406 V	1,6 V	1,54 V	4,519 ms
2° prova	5 V	5 ms	2,5 V	2,357 V	1,6 V	1,508 V	4,679 ms
R = 100 kΩ ; C = 10 μF							
1° prova	5 V	500 ms	2,5 V	2,208 V	1,6 V	1,413 V	381,4 ms

Tab. 3.2 Dati sperimentali fase di scarica del condensatore, dati a confronto

Fase di scarica

	V_{in}	37% V_{in}	Trigger level	τ misurata
R = 330 Ω ; C = 10 µF				
1° prova	7,572 V	2,8 V	2,73 V	1,416 ms
2° prova	7,523 V	2,784 V	2,78 V	1,398 ms
3° prova	7,438 V	2,752 V	2,8 V	1,56 ms
4° prova	7,377 V	2,729 V	2,8 V	1,497 ms
R = 1 kΩ ; C = 10 µF				
1° prova	2,137 V	790,7 mV	925 mV	8,170 ms
2° prova	2,201 V	814,37 mV	925 mV	8,011 ms
R = 100 kΩ ; C = 10 µF				
1° prova	2,357 V	872,1 mV	925 mV	741,6 ms

Nelle tabelle sono stati riportati i vari valori ricavati dalle prove eseguite con l'oscilloscopio sul circuito.

Tab.. 3.3 Differenza tra il valore atteso della costante di tempo e quello effettivamente misurato

Costanti di tempo

	τ= R/2 * C	τ misurata nella fase di carica = τ_C	τ misurata nella fase di scarica = τ_S	Differenza τ -τ_C	Differenza τ -τ_S
R = 330 Ω ; C = 10 µF					
1° prova	1,650 ms	1,234 ms	1,416 ms	0.416 ms	0.234 ms
2° prova	1,650 ms	1,447 ms	1,398 ms	0.203 ms	0.252 ms
3° prova	1,650 ms	1,406 ms	1,560 ms	0.244 ms	0.090 ms
4° prova	1,650 ms	1,440 ms	1,497 ms	0.210 ms	0.153 ms
R = 1 kΩ ; C = 10 µF					
1° prova	5 ms	4,519 ms	8,170 ms	0.471 ms	- 3.170 ms
2° prova	5 ms	4,679 ms	8,011 ms	0.321 ms	- 3.011 ms

	τ= R/2 * C	**τ misurata nella fase di carica = τ_C**	**τ misurata nella fase di scarica = τ_S**	**Differenza $\tau - \tau_C$**	**Differenza $\tau - \tau_S$**
R = 100 kΩ ; ***C = 10 μF***					
1° prova	500 ms	381,4 ms	741,6 ms	118.6 ms	- 241.6 ms

Tali differenze mostrano di quanto la costante di tempo misurata si discosta dal valore ideale. Tali valori sono dovuti alle incertezze relative di ciascun elemento presente nel circuito che dà un contributo di incertezza alla costante di tempo. Tale incertezza è chiamata incertezza tipo composta ed è stata calcolata precedentemente.

Capitolo 4

Generatore di forme d’onda del Moku:Go

4.1 Generatore di forme d’onda Moku:Go

Un secondo strumento del Moku:Go che è stato utilizzato, è il generatore di forme d’onda.

Il generatore di forme d’onda del Moku:Go è uno strumento che può generare una delle cinque onde predefinite: sinusoidale, quadra, a rampa, l’impulso e l’onda in continua (DC) [6] .

4.2 Carica e scarica condensatore in un circuito RC

Per il caso in questione, si prendono due dispositivi Moku:Go: uno configurato come generatore di forme d’onda e un secondo Moku configurato come oscilloscopio, descritto e presentato nella precedente analisi.

Nel caso analizzato, per la carica e la scarica di un condensatore in un circuito RC, si è posto il generatore di forme d’onda del Moku:Go, come alimentatore del circuito.

È possibile pilotare entrambi i dispositivi utilizzando lo stesso PC e lo stesso software del Moku perché, attraverso l’interfaccia utente, entrambi i dispositivi

risultano collegati ed è possibile passare da uno strumento ad un altro, senza perdere i dati salvati nelle due interfacce utente.

Si considera il circuito RC costituito da una resistenza da 10 kΩ, in serie ad un condensatore da 0,1 μF. La serie tra i due elementi circuitali è realizzata mediante una breadboard, collegando un ponte dalla tensione positiva al primo reoforo del resistore e un ponte che collega la tensione negativa al secondo reoforo del condensatore. Il primo reoforo del condensatore viene allineato al secondo reoforo del resistore.

Durante la prova si deve collegare il Moku:Go come generatore di forme d'onda, all'alimentazione del circuito RC attraverso una sonda, collegata rispettivamente ai cavi del circuito, posti sulla linea a tensione positiva della breadboard e sulla linea a tensione negativa, collegata alla massa della sonda del generatore.

L'oscilloscopio del Moku:Go, invece, ha due sonde, le quali vengono collegate come descritto di seguito:

-la sonda del Channel A vede collegato il polo positivo sul piede del resistore a tensione positiva; mentre il polo negativo a massa;

-la sonda del Channel B ha il polo positivo collegato al secondo piedino del resistore, detto reoforo e, il polo negativo sul reoforo del condensatore che va a massa, sul quale scorre una tensione negativa.



Fig. 4.1 Collegamenti tra i due Moku:Go e il circuito RC

Si calcola la costante RC, rispetto alla quale si individua la frequenza dell'onda generata da uno dei due Moku. Oltre alla frequenza occorre inserire la tensione picco-picco, scelta pari a 10 Vpp, che corrisponde ad erogare una tensione pari a 5 V. Successivamente si abilita la forma d'onda scelta che è la forma d'onda quadra.

La frequenza ottenuta dal calcolo della costante RC è pari a f=100 Hz. Infatti, dato che la costate di tempo del circuito è pari a:

$$\tau = RC = 10\ \text{k}\Omega * \ 0{,}1\ \mu\text{F} = 1\ \text{ms}$$

si cerca di prendere un periodo dell'onda quadra generata abbastanza ampio, affinché il condensatore abbia la possibilità di caricarsi e scaricarsi, come mostrato nelle immagini sottostanti Fig. 4.2 e Fig. 4.3.

Il periodo viene scelto pari a $\text{T} = 10 * \tau = 10\ \text{ms} = 1 * 10^{-2}$ s. Il periodo e la frequenza sono legati dalla legge $\text{T} = \frac{1}{\text{f}}$ con $\text{f} = 100$ Hz.

Fase di carica

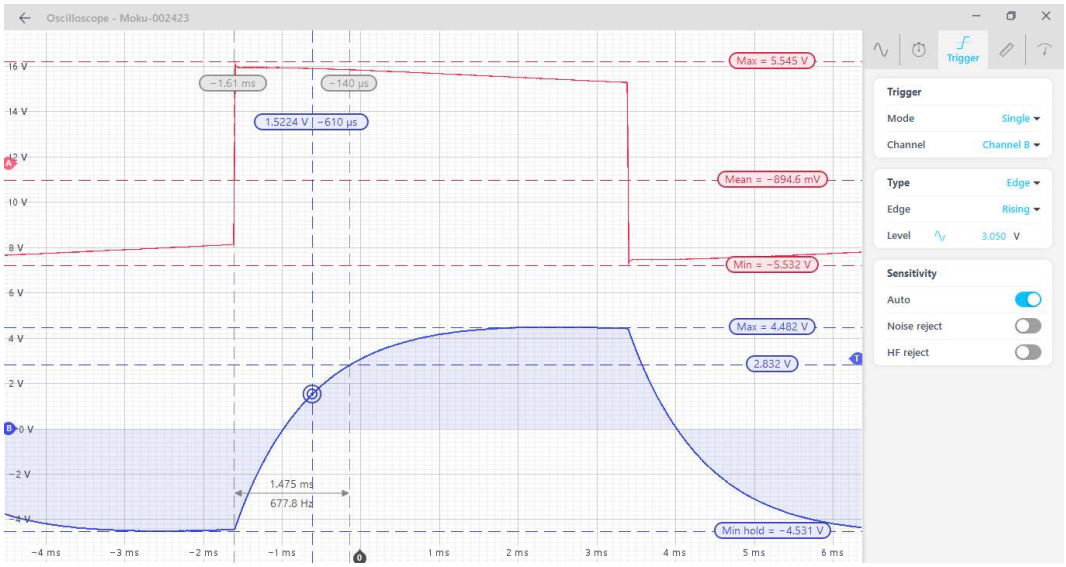


Fig. 4.2 Fase di carica del condensatore con f = 100 Hz

Fase di scarica

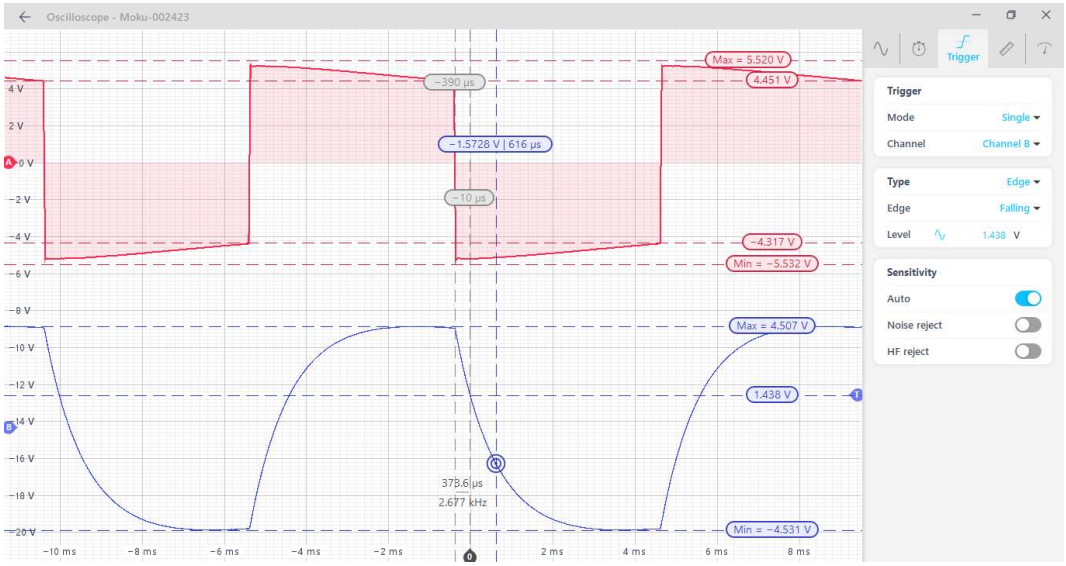


Fig. 4.3 Fase di scarica del condensatore con f = 100 Hz

Successivamente, si vuol mostrare come, a parità di componenti, se si sceglie una frequenza pari a $f = 500$ Hz, il condensatore non raggiunge la piena carica-scarica ma riesce ad arrivare, ad esempio, quasi a metà della tensione massima, come è evidente dalle immagini Fig. 4.4 e Fig. 4.5.

Fase di carica

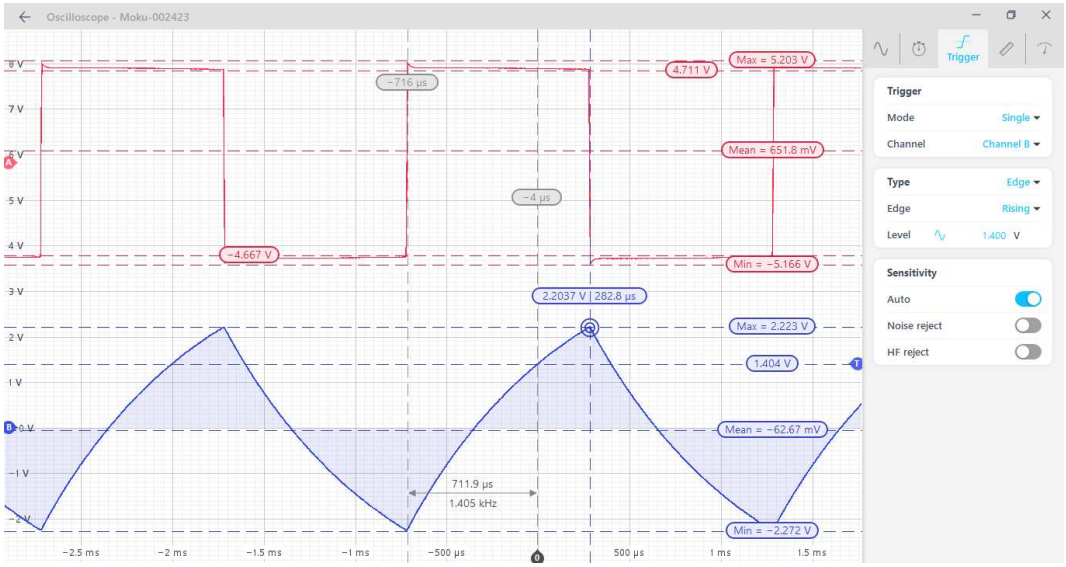


Fig. 4.4 Fase di carica del condensatore con f = 500 Hz

Fase di scarica

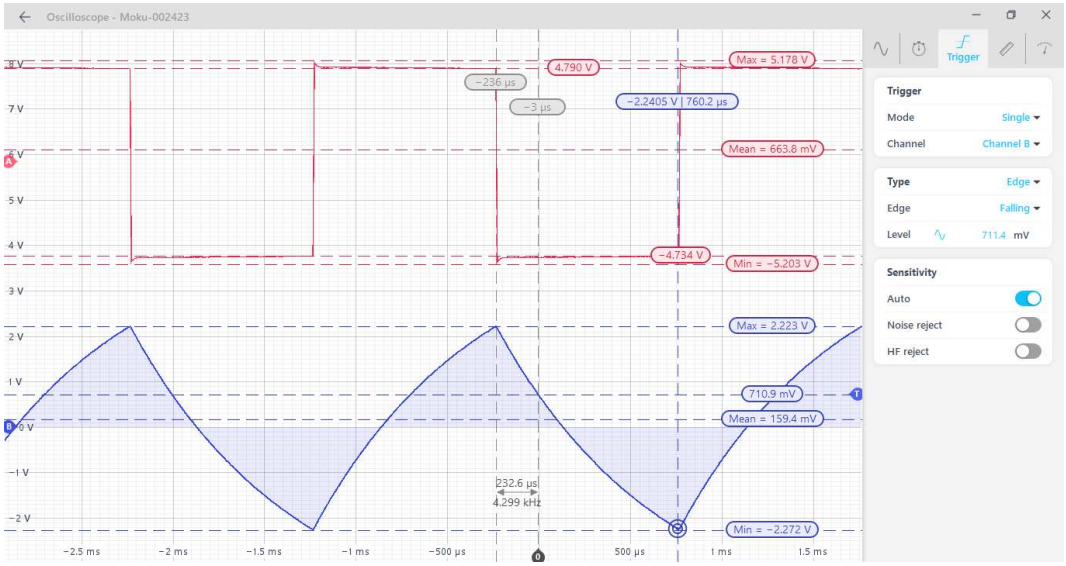


Fig. 4.5 Fase di scarica del condensatore con f = 500 Hz

Capitolo 5

Dispositivi piezoelettrici

5.1 Dispositivi

I dispositivi utilizzati durante la fase sperimentale sono sensori di vibrazione piezoelettrici. Il sensore viene utilizzato per catturare i segnali di vibrazione, sfruttando il principio per cui un materiale piezoelettrico (in questo caso una ceramica) sottoposto ad una sollecitazione meccanica come una pressione produce una tensione in qualche maniera proporzionata alla pressione applicata.

Tabella 5.1 Specifiche tecniche del dispositivo[11]

Diametro	**Capacità**	**Temperatura**
35 mm	37 nF	-20°C / + 60°C

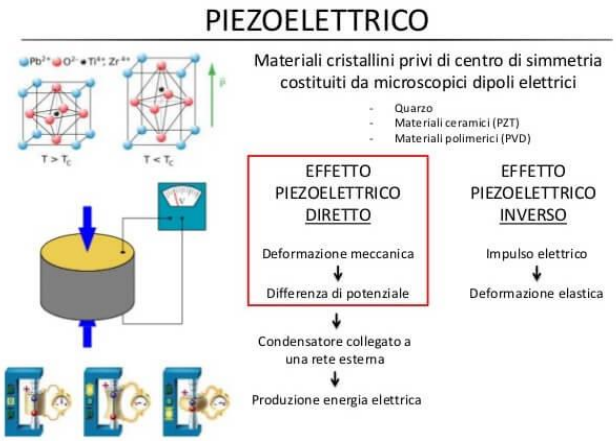


Fig. 5.1 Schema funzionamento del piezoelettrico

I dispositivi piezoelettrici sfruttano dunque la proprietà di piezoelettricità.

5.2 La piezoelettricità

La piezoelettricità è la proprietà di alcuni materiali cristallini di polarizzarsi generando una differenza di potenziale quando sono soggetti a una deformazione meccanica, detto effetto piezoelettrico diretto e, al tempo stesso, di deformarsi in maniera elastica quando sono sottoposti a una tensione elettrica, nel caso dell'effetto piezoelettrico inverso oppure chiamato effetto Lippmann. Questo effetto viene sfruttato per ottenere sorgenti sonore o, soprattutto, ultrasonore.[9]

L'effetto piezoelettrico è presente in quasi tutti i materiali cristallini che sono privi di centro di simmetria. La struttura di tali cristalli è costituita da microscopici dipoli elettrici. In condizioni di quiete, questi dipoli elettrici sono disposti in maniera tale che le facce del cristallo abbiano tutte lo stesso potenziale elettrico. Quando viene applicata una forza dall'esterno, comprimendo il cristallo, la struttura del cristallo viene deformata e si perde la condizione di neutralità elettrica del materiale, per cui una faccia del cristallo risulta carica negativamente e la faccia opposta risulta carica positivamente. Nel caso in cui il cristallo venga sottoposto a trazione, il segno della carica elettrica di tali facce si inverte.

Il cristallo si comporta dunque come un condensatore al quale è stata applicata una differenza di potenziale. Quindi se le due facce vengono collegate tramite un circuito esterno viene generata una corrente elettrica, detta corrente piezoelettrica.

Se io applico una differenza di potenziale al cristallo, esso si espande o si contrae lungo un asse determinato provocando una vibrazione anche violenta. L'espansione volumetrica è facilmente pilotabile ed è strettamente dipendente dalla stimolazione elettrica.

Per una maggiore precisione nella conversione del segnale di corrente prodotto dal cristallo piezoelettrico si può utilizzare un amplificatore di carica (charge sensitive preamplifier), il quale accumula la carica prodotta dal sensore in un condensatore

di feedback, trasformandola quindi in tensione. In questo caso minore è la capacità del condensatore e maggiore sarà la tensione prodotta (noi abbiamo utilizzato un condensatore di feedback da 1 nF).
Prima di utilizzare i dispositivi piezoelettrici all'interno del circuito si fanno delle misure di tensione, in alternata, con il multimetro per verificare la quantità tensione che essi erogano.

Si prendono tre piezoelettrici identici e si sollecitano, in vari punti, mettendo sotto la superfice di ogni dispositivo, un feltro.

Tab. 5.2 Misure fatte su tre dispositivi piezoelettrici attraverso un multimetro che rileva la tensione generata dalla sollecitazione col dito sul sensore, settando lo strumento in alternata

	Valore minimo	**Valore massimo**
***1° sensore**: in basso*	0,24 V	1,037V
al centro	0,135V	0,36V
a destra (polo negativo)	0,24V	0,4V
a sinistra (polo positivo)	0,31V	0,47V
in alto	0,1V	0,4V
***2° sensore**: in basso*	0,20V	0,31V
a destra (polo negativo)	0,12V	0,25V
a sinistra (polo positivo)	0,16V	0,49V
al centro	0,15V	0,30V
in alto	0,09V	0,3V
***3° sensore**: in basso*	0,27V	0,8V
a destra (polo negativo)	0,21V	1,5V
a sinistra (polo positivo)	0,22V	0,5V
in alto	0,3V	0,8V
al centro	0,14V	0,35V

Alcuni piezoelettrici, se eccitati possono raggiungere anche i 100 V, però dalle rilevazioni, riportate in Tabella 5.2, è noto che tali dispositivi raggiungono al

massimo le decine di Volt e quindi è stato possibile collegarli allo strumento Moku, senza rischi di danneggiarlo, per rilevare l'onda di tensione.

È stato necessario studiare prima il comportamento dei dispositivi visto che l'oscilloscopio del Moku:Go può accetare in ingresso, al massimo 25 V.

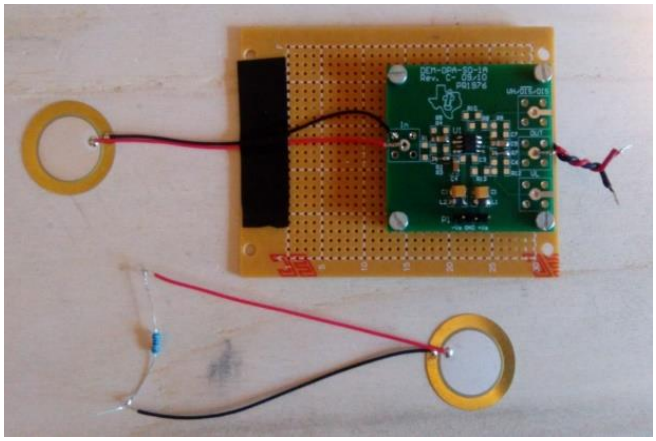


Fig. 5.2 Due sensori di vibrazioni piezoelettrici collegati rispettivamente ad un preamplificatore di carica e ad una resistenza

Capitolo 6

Analisi sperimentale

Nella sperimentazione riportata di seguito, si è andati a studiare il comportamento dei dispositivi piezoelettrici, in seguito alla sollecitazione mediante la pressione del dito sul sensore di vibrazione.

6.1 Prove con piezoelettrico

La tesi fin qui proposta fa una panoramica degli strumenti utilizzati durante la fase

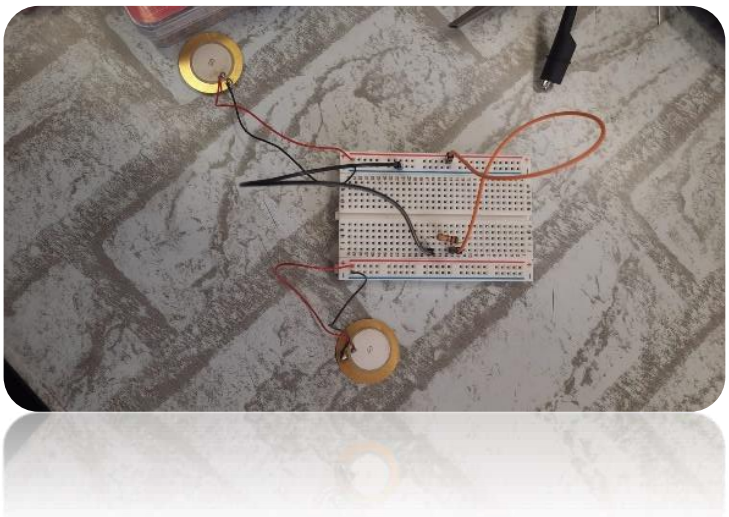


Fig. 6.1 Circuito RC con piezoelettrici usati come alimentazione

sperimentale che vede protagonisti i dispositivi piezoelettrici usati come generatori di tensione, che vanno ad alimentare il circuito.

Il circuito proposto in Fig. 6.1, rappresenta la disposizione dei due sensori di vibrazione piezoelettrici, i quali sono stati posizionati agli estremi della breadboard in corrispondenza delle linee di alimentazione di quest'ultima. Il cavo rosso che è soggetto a tensione positiva è posto in corrispondenza dell'alimentazione positiva del piezoelettrico; mentre il cavo nero, soggetto a tensione negativa, è collegato in corrispondenza della linea a massa della breadboard. Successivamente, attraverso dei semplici cavi, come quelli in Fig. 6.1, è possibile scegliere quali dei due dispositivi prendere per alimentare il circuito. Un cavo parte dalla linea a tensione positiva della breadbord e viene posizionato sul foro allineato al primo reoforo del resistore; mentre la massa viene presa collegando il corrispondente cavo dalla breadboard, fino al foro allineato al secondo reoforo del resistore.

In questo modo è possibile prelevare la tensione ai capi del resistore, generata dal piezoelettrico preso come riferimento.

Sono stati scelti due dispositivi piezoelettrici uguali, aventi le medesime specifiche tecniche, con la differenza che, su uno di essi è stato applicato un feltrino, il quale funge da rialzo, per evidenziare e studiare, in fase di analisi, le eventuali differenze sulle forme d'onda ottenute.

Diverse sono le prove proposte per verificare e valutare i diversi andamenti delle curve di tensione erogata dal piezoelettrico.

Attraverso le prove fatte in diverse configurazioni, si vuol mostrare il variare dell'andamento di tensione, erogata dal piezoelettrico, rilevata dall'oscilloscopio del Moku.

Le prove proposte sono:

1. Tensione erogata dal piezoelettrico a vuoto;
2. Piezoelettrico che alimenta un circuito resistivo;
3. Piezoelettrico che alimenta un circuito RC.

6.1.1 Prove sul piezoelettrico senza feltro



Fig. 6.2 Forma d'onda ricavata dal picco di tensione, erogato dal piezoelettrico collegato alla sonda dell'oscilloscopio del Moku:Go, con il trigger impostato in modalità "Single"

6.1.1.1 Piezoelettrico a vuoto

In queste rilevazioni si vogliono mostrare gli andamenti e i picchi di tensione delle prove, eseguite sollecitando il piezoelettrico.

In primo luogo si studia il piezoelettrico a vuoto, collegando la sonda ai capi di quest'ultimo in corrispondenza del polo positivo (filo rosso) e del polo negativo (filo nero).

La Fig. 6.2 mette in evidenza l'andamento del picco di tensione, che presenta un valore massimo di 2.582 V, ricavata dalla pressione del dito sul dispositivo piezoelettrico, collegato alla sonda dell'oscilloscopio del Moku:Go. L'andamento della forma d'onda descrive la sollecitazione che è avvenuta sul dispositivo.

La schermata catturata in Fig. 6.2 è il risultato della misura sul piezoelettrico a vuoto, sollecitato con la pressione del dito, dopo aver settato lo strumento in modalità single e aver collegato la sonda all'input 1 dello strumento (channel A),

con il polo positivo in corrispondenza del polo positivo del dispositivo e la massa sul filo nero del piezoelettrico.

Le forme d'onda ottenute in una successiva prova, eseguita sullo stesso piezoelettrico, alle medesime condizioni, mostra l'andamento di 4 pressioni successive del dito, sul piezoelettrico, scandite da intervalli di tempo regolari che possono essere considerati quasi periodici. Ogni forma d'onda presenta dei picchi di valori differenti, i quali evidenziano la diversa intensità con la quale il piezoelettrico viene sollecitato. In questa seconda prova la sonda è posizionata sull'input 2 dello strumento, in corrispondenza del 'Channel B', come si evince dalla Fig. 6.3, in cui la forma d'onda è di colore blu e il trigger dello strumento è settato in modalità "AUTO" sul 'Channel B'. Il livello del trigger è pari a 99,99 mV, un valore abbastanza piccolo così da riuscire a ricavare l'intera forma d'onda della sollecitazione.



Fig. 6.3 Forme d'onda ricavate dalla tensione erogata dal piezoelettrico senza feltro, con il trigger dello strumento in modalità "Auto" e il livello del trigger pari a 99.99 mV

6.1.1.2 Circuito resistivo alimentato dal dispositivo piezoelettrico

Si prende una breadboard, come quella in Fig. 6.1 e vi si posiziona un resistore che abbia un valore pari a 10 kΩ. In corrispondenza dei reofori del resistore si

posizionano i due terminali dei fili che portano la tensione, proveniente dal piezoelettrico senza il feltro.



Fig.6.4 Onda di tensione, che alimenta un circuito resistivo, ricavata settando il trigger dello strumento in modalità 'Single'

Nella prova in Fig. 6.4 è evidenziato l'andamento della tensione, settando il livello del trigger ad un valore molto basso pari a 500.0 mV. È un valore scelto manualmente, in quanto non si ha una tensione di riferimento iniziale come per la carica e la scarica del condensatore, analizzata in un capitolo precedente. Per poter prendere l'onda completa quindi, si è scelto di impostare il trigger ad un valore in millivolt, il più piccolo possibile.

I valori di tensione evidenziati sono dati dai cursori di tensione, messi a disposizione dal software dello strumento.

Con il tasto destro del mouse, oltre alle varie opzioni che si possono scegliere sull'interfaccia dello strumento, ci sono i cursori della tensione e del tempo. Premendo sul cursore della tensione è possibile posizionare manualmente il riferimento oppure, è possibile prendere il cursore della tensione massima che verrà posizionato automaticamente dal software, in corrispondenza del valore massimo che l'onda di tensione raggiunge, durante il suo percorso. Sulla figura è presente,

oltre al valore massimo, anche il valore minimo che la tensione assume, è un valore negativo.

6.1.1.3 Circuito RC alimentato con il sensore di vibrazione piezoelettrico

Il circuito proposto per questa prova ha il parallelo tra il resistore da $10k\Omega$, presente nel circuito resistivo analizzato precedentemente e, un condensatore da $0.1\mu F$, configurazione tipica del circuito RC.

In questo caso la sonda viene collegata alle estremità dei reofori del condensatore, rispettivamente sul polo positivo e sulla massa del condensatore. I fili che collegano l'alimentazione al parallelo, sono posizionati come nel circuito resistivo, allineati ai reofori del resistore.

Nel caso analizzato di seguito è evidente la presenza di rumore in ingresso che si sovrappone al segnale utile, a causa della presenza del parallelo tra il resistore e il condensatore. In queste prove si vuole misurare la carica e la scarica del condensatore, in un circuito RC. Nel caso della carica e scarica del condensatore, erano dati i valori di tensione in ingresso, da cui poi si andava a ricavare il valore del trigger e i valori di tensione relativi alla fase di carica e alla fase di scarica. Per tali prove, si andava a settare il trigger sulla modalità salita o discesa ovvero "Edge" oppure "Falling" a seconda se si trattava della carica o scarica del condensatore.

Per queste prove, non avendo in ingresso una tensione di riferimento, il trigger lo si pone in modalità "Edge" e si calcola poi il 63% della tensione massima e il 32% della tensione massima. La Fig. 6.5 ha diversi cursori:

- valore massimo = 58.62 mV;
- valore minimo di tensione: - 21.98 mV;
- la tensione che si avrebbe se la costante di tempo fosse pari a 1 ms, ovvero pari alla costante di tempo ideale del circuito: -8.549 mV;
- il valore di tensione della fase di scarica pari a: 32% * Vmax =
  32 % * 58.62 mV = 18.76 mV;

- la tensione pari alla fase di carica del condensatore: 63% * Vmax= 63% * 58.62 mV = 37.13 mV circa

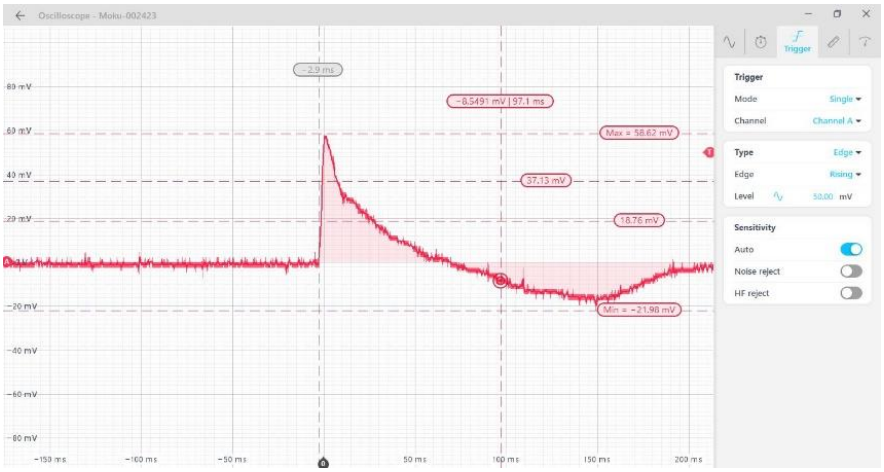


Fig. 6.5 Onda di tensione della fase di carica e di scarica del condensatore nel circuto RC, è il risultato della 3° prova eseguita

La Fig. 6.5 mostra la fase di carica e scarica del condensatore, generata dalla pressione del dito, sul piezoelettrico. La forma d'onda viene rilevata settando il trigger dello strumento in modalità 'SINGLE', dopo aver scelto 50.00 mV come livello del trigger.

In questa prova è evidente la presenza di rumore in ingresso rispetto alle prove fin qui analizzate, il quale dipende dalla non idealità del circuito, dal contatto del piezoelettrico e inoltre dal numero di dispositivi presenti nel circuito da analizzare che inoltre, sono affetti da incertezza pari al 5% del valore medio preso come riferimento e come valore vero degli elementi.

La presenza del condensatore, dà un contributo di rumore in ingesso a differenza delle onde di tensioni ricavate in precedenza, dove si aveva una curva più lineare e meno rumorosa.

Nelle varie prove, l'andamento di tensione è lo stesso. I picchi sono centrati nell'istante di tempo '0' e sono tutte sovrapponibili o quasi, come si vedrà dall'analisi delle forme d'onde nel capitolo successivo.

Come per la carica e la scarica del condensatore, anche qui si ha una costante di tempo del circuito RC pari a $\tau = R * C = 10k\Omega * 0{,}1\mu F = 1\, ms$ che è diversa dalla costante di tempo che invece si ha nel circuito. In corrispondenza dell'intervallo di tempo di 1 ms, si ha la carica e la scarica del condensatore, come è mostrato dalla Fig. 6.5.

6.1.2 Prove sul circuito alimentato dal piezoelettrico con il feltrino

Nella seconda parte dell'analisi sperimentale, si è andati ad alimentare il circuito con un secondo sensore di vibrazione piezoelettrico.

Le prove proposte sono:

1. Tensione erogata dal piezoelettrico a vuoto;
2. Piezoelettrico che alimenta un circuito resistivo;
3. Piezoelettrico che alimenta un circuito RC.

Nelle varie fasi di sperimentazione, si sono ricavate cinque prove per ogni modalità proposta, per verificare i vari andamenti del segnale, nelle medesime condizioni, utilizzando lo stesso alimentatore, lo stesso resistore e lo stesso condensatore. Inoltre, sia nelle prove con il dispositivo piezoelettrico con il feltro che con il dispositivo senza feltro, gli elementi del circuito restano invariati. Le onde differiscono le une dalle altre anche a causa della diversa pressione del dito sul dispositivo piezoelettrico.



Fig. 6.6 Forma d'onda generata dal picco di tensione dopo la pressione sul piezoelettrico a vuoto, settando il trigger dello strumento in modalità 'Auto'

6.1.2.1 Piezoelettrico con il feltro a vuoto

Nella prima fase, si prende il sensore di vibrazione piezoelettrico, si collegano i cavi del dispositivi in corrispondenza del polo positivo e negativo della sonda, collegata all'oscilloscopio del Moku:Go. Il cavo rosso si collega al polo positivo della sonda; mentre il cavo nero, in corrispondenza della massa della sonda.

La sonda collegata all'oscilloscopio mostra, sul software dello strumento, l'andamento della tensione dopo la pressione subita.

In questa fase, la prova evidenzia l'andamento irregolare della pressione del dito, è presente un picco di tensione dovuto alla pressione più incisiva, seguita da degli andamenti più o meno influenti. L'onda non è può essere considerata periodica perché l'andamento è irregolare anche se ogni picco è più o meno distanziato dello stesso intervallo di tempo.

6.1.2.2 Circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico con il feltro

Si alimenta un circuito formato da un generatore di tensione, ovvero il dispositivo piezoelettrico, in serie ad un resistore da 10 kΩ.

La sonda dello strumento si posiziona ai capi dei reofori del resistore in corrispondenza del polo positivo e del polo negativo. La tensione positiva si porta con un filo che funge da ponte tra, la linea positiva della breadbord e il reoforo del resistore, a cui è collegato il polo positivo della sonda; mentre l'alimentazione negativa è posta allineata, sulla breadbord, al secondo reoforo del resistore, a cui si collega la massa della sonda. La sonda viene collegata all'input 1 del Moku, che è identificata con la digitura 'Channel A' nell'interfaccia del software che pilota il dispositivo.

Il livello del trigger è impostato, come per le altre prove, circa a 50.00 mV in modo da riuscire a rilevare l'intera onda. Il trigger viene impostato molto basso così da evitare di troncare l'onda.



Fig. 6.7 Onda di tensione rilevata dall'oscilloscopio con il trigger impostato in modalità 'Normal', con valore pari a 940.0 mV

La Fig. 6.7 mostra l'andamento della tensione, erogata dal dispositivo piezoelettrico, in seguito alla sollecitazione con il dito, su di esso. L'onda presenta dei picchi che sono il risultato della pressione periodica avvenuta sul piezoelettrico. Avendo impostato il trigger in modalità 'Normal', la forma d'onda rileva le continue pressioni del dito e lo strumento cattura le fasi delle sollecitazioni.

L'oscillatore del Moku, consente di posizionare i cursori della tensione in corrispondenza, ad esempio dei picchi, del valore massimo raggiunto, del valore minimo che la tensione assume e inoltre, è possibile posizionare il cursore in corrispondenza del valore medio. La tensione del piezoelettrico può raggiungere picchi sia positivi che negativi a seconda dell'intensità e della periodicità delle sollecitazioni.

Le onde prelevate dallo strumento presentano lo stesso andamento con delle piccole differenze, dovute alla non perfetta riproducibilità della sollecitazione del piezoelettrico che, in base alla sollecitazione, eroga più o meno tensione. Inoltre, esse dipendono dal feltro posto sotto al piezoelettrico che dà instabilità al dispositivo durante la sollecitazione e infine derivano anche dalle componenti del circuito che presentano dei contributi di incertezza.

6.1.2.3 Circuito RC alimentato dal piezoelettrico con il feltro

Nell'ultima prova proposta nella tesi, si va ad analizzare l'andamento della tensione erogata dal piezoelettrico con il feltro, che alimenta un circuito RC. Il condensatore è posto in parallelo al resistore del circuito resistivo, proposto precedentemente, dove i fili dell'alimentazione sono allineati in corrispondenza dei reofori del resistore.

Per il circuito RC si vanno a studiare le fasi della carica e della scarica del condensatore, per cui la sonda viene posizionata ai capi del condensatore in corrispondenza del polo positivo e negativo del generatore.

Come per la carica e la scarica del condensatore studiata al Capitolo 3, anche in queste prove si va a valutare il valore della tensione al 63% di Vmax, per la carica e, il 32% del valore massimo della tensione, per la scarica del condensatore. Per il seguente circuito, come per il circuito alimentato dal piezoelettrico senza feltro, la costante di tempo τ è pari a $\tau = R*C = 10k\Omega * 0{,}1\mu F = 1$ ms.

A differenza dell'onda rilevata con il piezoelettrico senza feltro, nello stesso circuito, in questo caso, l'onda è soggetta ad un maggior rumore in ingresso, dovuto al feltro posto sotto al piezoelettrico che dà instabilità al dispositivo.



Fig. 6.8 Andamento onda di tensione che alimenta un circuito RC con il trigger posto in modalità 'Single'

Dalla Fig. 6.8, si evince come il dispositivo impiega un tempo molto più piccolo per caricarsi e scaricarsi rispetto alla costante di tempo $\tau = 1$ ms.

Lo strumento permette di posizionare, oltre ai cursori di tensione, anche i cursori del tempo. In questo caso sono stati presi due istanti di tempo, in corrispondenza dell'inizio della fase di carica del condensatore e, l'istante di tempo, distanziato dal primo di un fattore pari alla costante di tempo. L'intervallo copre l'intera onda, ovvero l'intero periodo in cui avviene la fase di carica e di scarica del condensatore.

Di tali prove si è andati a valutare la durata della fase di carica e di scarica del condensatore.



Fig. 6.8.1 Fase di carica

Nella Fig. 6.8.1 sono riportati:

- il cursore della tensione pari a:
  63% * Vmax = 63% * 63.51 mV = 40.07 mV;
- il cursore del tempo in corrispondenza all'istante di tempo in cui inizia la fase di carica;
- il cursore del tempo in corrispondenza del 63% della tensione massima.

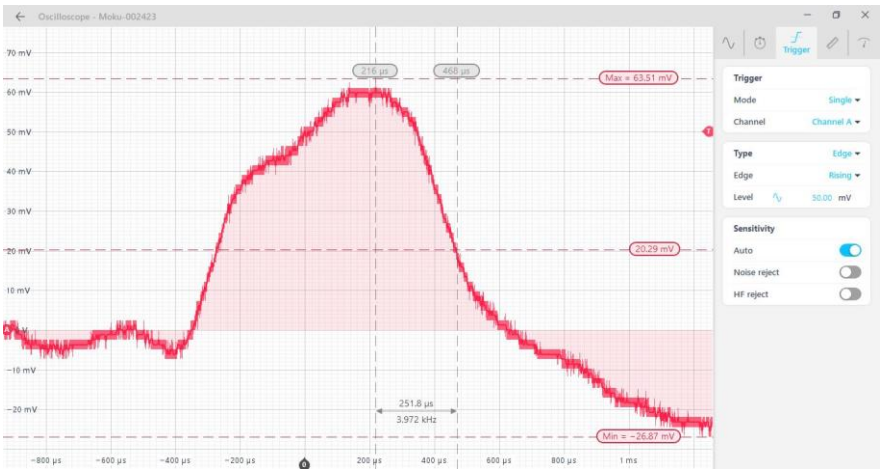


Fig. 6.8.2 Fase di scarica

Nella fase di scarica, mostrata in Fig. 6.8.2 vengono posizionati sull'onda di tensione i seguenti cursori:

- il cursore di tensione in corrispondenza del 32% della tensione massima: 32% * Vmax = 32% * 63.51 mV = 20.29 mV;
- il cursore del tempo in corrispondenza dell'inizio della fase di scarica;
- il cursore del tempo in corrispondenza del valore di tensione calcolato, pari al 32% di Vmax.

I cursori del tempo, posizionati in corrispondenza dell'inizio della fase di carica e di scarica, vengono posizionati manualmente dal programmatore, lavorando sugli assi cartesiani allargando o stringendo la scala dei tempi e delle tensioni, con i cursori del mouse, così da posizionare i cursori con maggiore precisione.

Capitolo 7

Analisi dei dati

7.1 Estrazione dati dall'oscilloscopio/voltmetro del Moku:Go

Dopo aver studiato le varie fasi delle forme d'onda attraverso il Moku, si esegue un'analisi approfondita dei dati rilevati utilizzando l'ambiente di calcolo Matlab.

L'oscilloscopio del Moku permette di estrarre i dati, direttamente dall'interfaccia utente del software dedicato allo strumento.

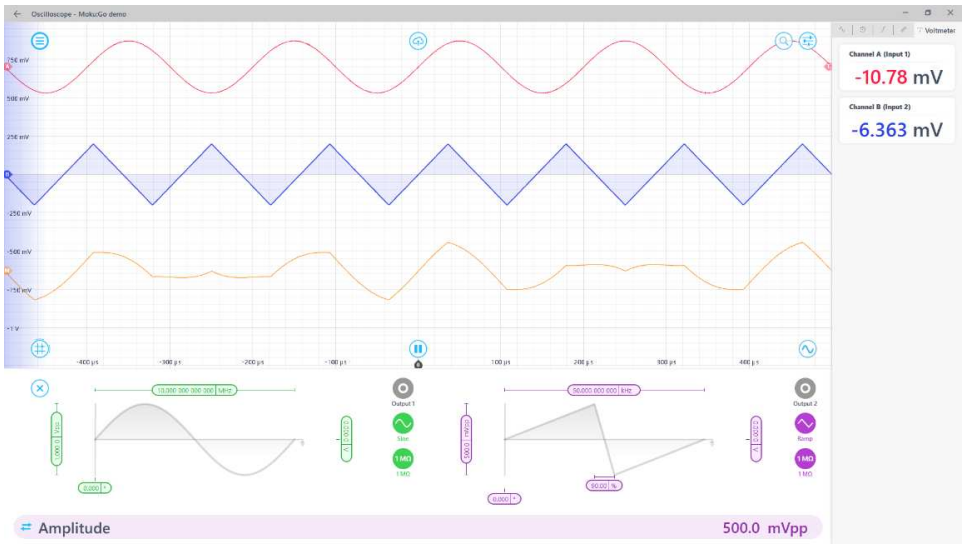


Fig. 7.1 Immagine presa dal datasheet dello strumento

Come mostrato in Fig. 7.1, cliccando con il tasto sinistro del mouse l'icona in alto al centro, si apre una finestra che permette di salvare in una cartella tutte le informazioni riguardo le misure di tensione eseguite.

Lo strumento permette quindi di scarica in una cartella all'interno del proprio PC:

- Il file dei dati;
- La schermata catturata (screenshot);
- Il file contenenti i dati in alta risoluzione;
- Il file di testo .TXT

I file contenente i dati possono essere salvati con diverse estensioni tipo: ".csv" o ".mat" a seconda che si voglia lavorare in ambiente Excel oppure Matlab.

Per poter lavorare in Matlab sui dati raccolti e quindi fare un confronto tra le varie rilevazioni di tensione, è stato necessario raggruppare in una cartella del Workspace di Matlab, i dati. In particolare, si prendono i file ".mat" estratti dalle prove, si caricano nel Workspace di Matlab, selezionando singolarmente le prove fatte sui dispositivi piezoelettrici con il feltro e quelle fatte sui sensori senza feltro.

Inoltre, si vanno a separare tutte le modalità, creando delle cartelle dal Workspace, in cui vengono salvate tutte le prove di ciascuna configurazione. Infatti, le prove fatte sui dispositivi sono frutto di configurazioni diverse del circuito. Per analizzare le forme d'onda della tensione, si vanno a studiare i valori delle singole prove per poi confrontarli tra loro.

In questo caso, si cerca di suddividere le cartelle in base alle configurazioni studiate:

- Piezoelettrico senza il feltro:
    - Piezoelettrico a vuoto;
    - Piezoelettrico che alimenta il circuito resistivo;
    - Piezoelettrico che alimenta il circuito RC.
- Piezoelettrico con il feltro:
    - Piezoelettrico a vuoto;
    - Piezoelettrico che alimenta il circuito resistivo;
    - Piezoelettrico che alimenta il circuito RC.

7.1 Matlab

L'ambiente di sviluppo utilizzato per l'analisi dei dati è il linguaggio di programmazione Matlab, che lavora su matrici e vettori e permette inoltre, di graficare i dati, raccolti all'interno delle tabelle[11].

Per ogni forma d'onda, attraverso opportuno codice scritto appositamente programmazione si vanno a valutare: tensione media, tensione efficace, tensione massima, rapporto percentuale tra tensione media e tensione massima e infine, il rapporto percentuale tra la tensione efficacie e la tensione massima.

7.2 Prove

7.2.1 Prove con il piezoelettrico a vuoto

Nel caso del piezoelettrico che eroga tensione a vuoto, sono state studiate le varie forme d'onde periodiche delle singole prove, in quanto, in questo esempio era chiara la periodicità delle diverse forme d'onda generate. Avendo un numero piccolo e limitato di forme d'onda è stato possibile lavorare sul numero di campioni. Il numero di campioni totali è pari a 16380 per tutte le rilevazioni avvenute con lo strumento.

Nel caso delle forme d'onda periodiche, si divide il numero totale di campioni per le forme d'onda presenti, per ottenere il numero di campioni, uguali per ogni forma d'onda. Il caso delle misure sul piezoelettrico a vuoto è l'unico in cui è presente una periodicità, evidente e per cui è possibile studiare i valori di tensione in ognuna di esse. Successivamente, dopo aver ricavato i valori di tensione per ogni forma d'onda, si va ricavare la media di tali rilevazioni, come se si andasse a valutare il valore di riferimento, detto valore medio, dalle prove fatte, ovvero le N rilevazioni che mi permettono di stimare anche l'incertezza di tipo A, cioè l'incertezza che è frutto delle varie misure ripetute.

Il codice proposto, descrive i passaggi che sono stati utilizzati per studiare le forme d'onda periodiche, prese singolarmente.

```
close all
clc

figure; plot(piezo22prova.data);
xlabel('Numero di campioni'); ylabel('Tensione (V)'); grid
on;
```

Dal plot, funzione che permette di graficare il segnale, risulta che son presenti 5 forme d'onda.

```
tempo2 = piezo22prova.data(:,1);
tensione2 = piezo22prova.data(:,2);
figure; plot(tempo2, tensione2);
xlabel('Istanti di tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)'); grid
on;
```

Attraverso la funzione messa a disposizione da Matlab è possibile ricavare i picchi presenti all'interno dei segnali.

```
figure;
findpeaks(tensione2, tempo2, 'MinPeakProminence',2);
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Tensione (V)');
title('Find max peaks');
```

In questo modo evidenzio i picchi superiori a 2V perché dal grafico si evince che l'onda più piccola presenta un picco poco sopra a 2 V.

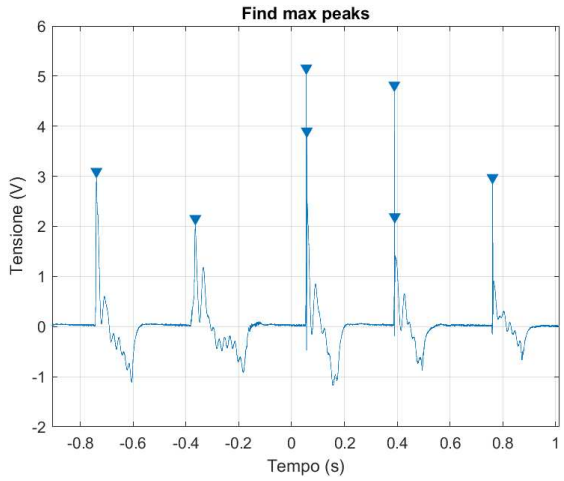


Fig. 7.2 Grafico del segnale con in evidenza i picchi di tensione superiori a 2 V

Il codice Matlab riporta la procedura di calcolo per considerare le forme d'onda in modo separato.

La seguente prova ha cinque forme d'onda da cui occorre ricavare per ognuna: il valore medio di tensione, il valore efficace di tensione, la tensione massima e i rapporti in percentuale.

`Piezo22prova.data` è la tabella estratta dall'oscilloscopio, che è caratterizzata da due colonne: una è relativa agli istanti di tempo mentre la seconda contiene i valori di tensione in funzione agli istanti di tempo. Inoltre la tabella è composta da 16380 righe che rappresentano i numeri di campioni finiti che definiscono le forme d'onda rilevate.

Per il codice Matlab, per studiare le forme d'onda, considerate quasi periodiche, si dividono i 16380 campioni per il numero di forme d'onda così da avere il numero di campioni per ogni forma d'onda. Nello studio proposto si divide 16380 campioni per le 5 forme d'onda, ottenendo un valore pari a 3276 campioni che caratterizzano ognuna delle cinque forme d'onda.

7.2.1.1 Prima forma d'onda

```
tempo2_1 = piezo22prova.data(1:3276,1);
tensione2_1 = piezo22prova.data(1:3276,2);

figure;
plot(tempo2_1, tensione2_1);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)'); grid on;
title("Prima forma d'onda 2°prova");
```

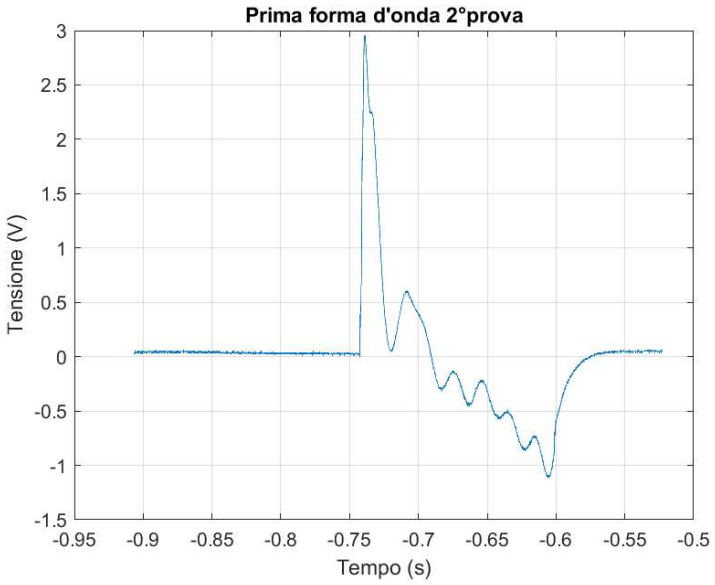


Fig. 7.2.1 Prima forma d'onda graficata

Tensione media

```
media1_2piezo = mean(tensione2_1);
```

media1_2piezo = -0.0018 V

Tensione efficace

```
rms1_2piezo = rms(tensione2_1);
```

rms1_2piezo = 0.5217 V

Tensione massima

```
max1_2piezo = max(tensione2_1);
```

max1_2piezo = 2.9555 V

Rapporto tra valore medio e valore massimo in percentuale

```
rapp_medio1 = (media1_2piezo./max1_2piezo);
```

rapp_medio1 = -6.0798*10^(-4)

Rapporto tra valore efficace e valore massimo in percentuale

```
rapp_rms1 = (rms1_2piezo./max1_2piezo)*100;
```

rapp_rms1 = 17.6514

7.2.1.2 Seconda forma d'onda

L'intervallo da considerare viene aumentato di 3275 campioni man mano che si vanno a studiare le successive forme d'onda.

```
tempo2_2 = piezo22prova.data(3277:6552,1);
tensione2_2 = piezo22prova.data(3277:6552,2);
figure;
plot(tempo2_2, tensione2_2);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)'); grid on;
title("Seconda forma d'onda 2°prova");
```

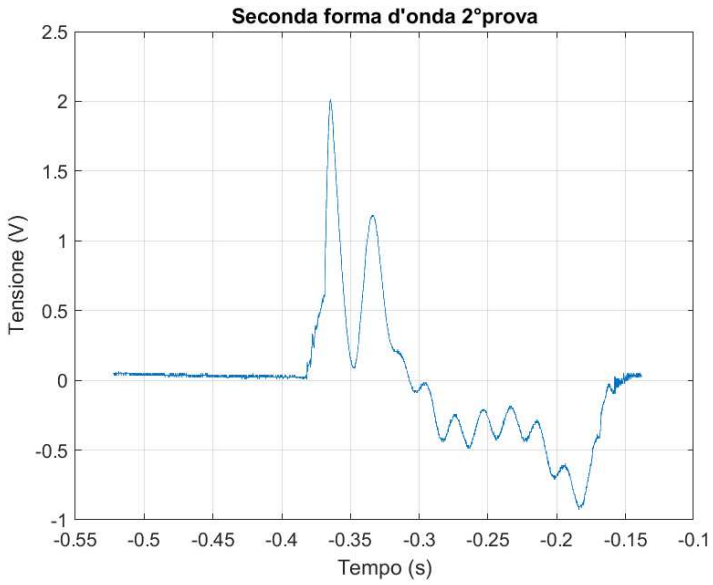


Fig. 7.2.2 Seconda forma d'onda graficata

Tensione media

```
media2_2piezo = mean(tensione2_2);
```

media2_2piezo = -0.0122 V

Tensione efficace

```
rms2_2piezo = rms(tensione2_2);
```

rms2_2piezo = 0.4500 V

Tensione massima

```
max2_2piezo = max(tensione2_2);
```

max2_2piezo = 2.0151 V

Rapporto tra valore medio e valore massimo in percentuale

```
rapp_medio2 = (media2_2piezo./max2_2piezo);
```

rapp_medio2 = -0.0060

Rapporto tra valore efficace e valore massimo in percentuale

```
rapp_rms2 = (rms2_2piezo./max2_2piezo)*100;
```

rapp_rms2 = 22.3315

7.2.1.3 Terza forma d'onda

```
tempo2_3 = piezo22prova.data(6553:9828,1);
tensione2_3 = piezo22prova.data(6553:9828,2);
```

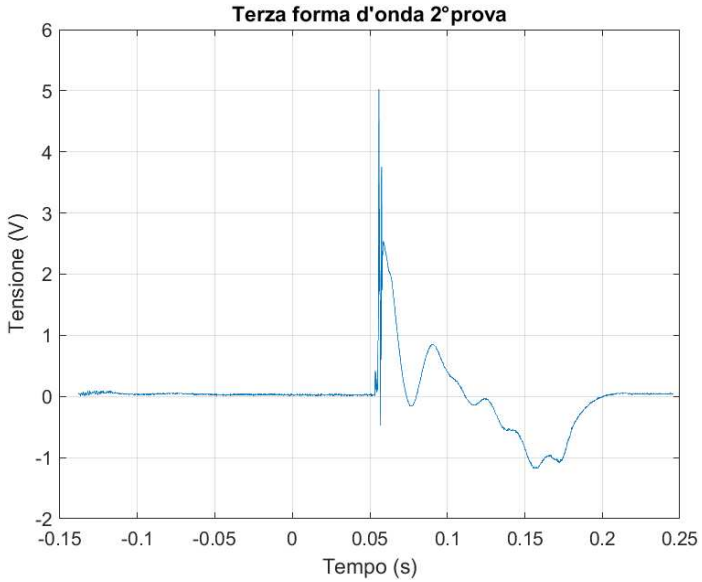


Fig. 7.2.3 Terza forma d'onda graficata

```
figure;
plot(tempo2_3, tensione2_3);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)'); grid on;
title("Terza forma d'onda 2°prova");
```

Tensione media

```
media3_2piezo = mean(tensione2_3);
```

media3_2piezo = 0.0078 V

Tensione efficace

```
rms3_2piezo=rms(tensione2_3);
```

rms3_2piezo = 0.5149 V

Tensione massima

```
max3_2piezo = max(tensione2_3);
```

max3_2piezo = 5.0195 V

Rapporto tra valore medio e valore massimo in percentuale

```
rapp_medio3 = (media3_2piezo./max3_2piezo);
```

rapp_medio3 = 0.0016

Rapporto tra valore efficace e valore massimo in percentuale

```
rapp_rms3 = (rms3_2piezo./max3_2piezo)*100;
```

rapp_rms3 = 10.2577

7.2.1.4 Quarta forma d'onda

```
tempo2_4 = piezo22prova.data(9829:13104,1);
tensione2_4 = piezo22prova.data(9829:13104,2);



figure;
plot(tempo2_4, tensione2_4);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)'); grid on;
title("Quarta forma d'onda 2°prova");
```

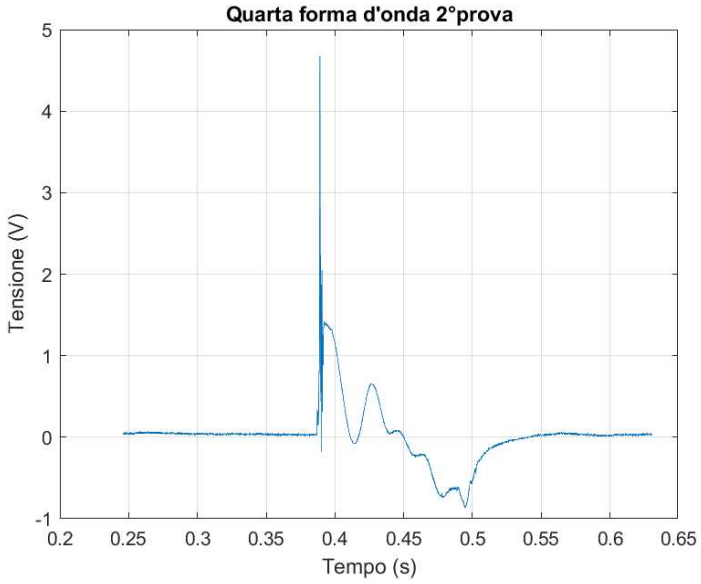


Fig. 7.2.4 Quarta forma d'onda graficata

Tensione media

```
media4_2piezo = mean(tensione2_4);
```

media4_2piezo = 0.0251 V

Tensione efficace

```
rms4_2piezo = rms(tensione2_4);
```

rms4_2piezo = 0.3563 V

Tensione massima

```
max4_2piezo = max(tensione2_4);
```

max4_2piezo = 4.6776 V

Rapporto tra valore medio e valore massimo in percentuale

```
rapp_medio4 = (media4_2piezo./max4_2piezo);
```

rapp_medio4 = 0.0054

Rapporto tra valore efficacee e valore massimo in percentuale

```
rapp_rms4 = (rms4_2piezo./max4_2piezo)*100;
```

rapp_rms4 = 7.6170

7.2.1.5 Quinta forma d'onda

```
tempo2_5 = piezo22prova.data(13105:16380,1);
tensione2_5 = piezo22prova.data(13105:16380,2);
```

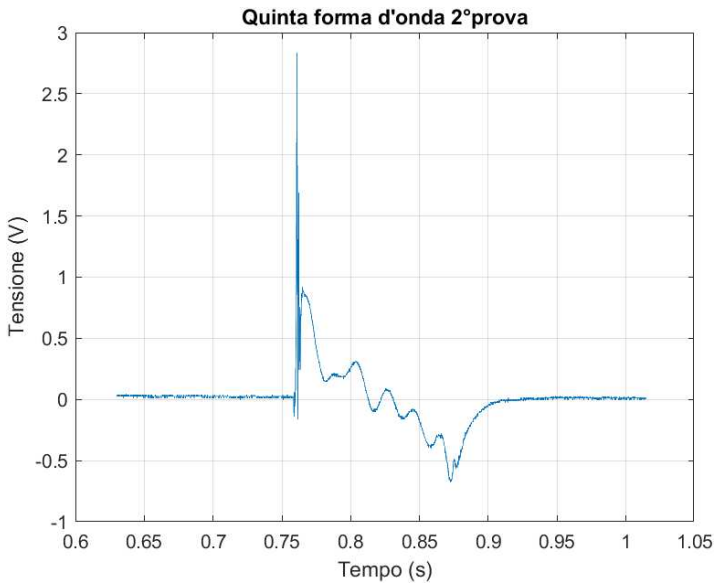


Fig. 7.2.5 Quinta forma d'onda graficata

```
figure;
plot(tempo2_5, tensione2_5);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)'); grid on;
title("Quinta forma d'onda 2°prova");
```

Tensione media

```
media5_2piezo = mean(tensione2_5);
```

media5_2piezo = 0.0127 V

Tensione efficace

```
rms5_2piezo = rms(tensione2_5);
```

rms5_2piezo = 0.2208 V

Tensione massima

```
max5_2piezo = max(tensione2_5);
```

max5_2piezo = 2.8334 V

Rapporto tra valore medio e valore massimo in percentuale

```
rapp_medio5=(media5_2piezo./max5_2piezo);
```

%rapporto medio = 0.0045

Rapporto tra valore efficace e valore massimo in percentuale

```
rapp_rms5 = (rms5_2piezo./max5_2piezo)*100;
```

rapp_rms5 = 7.7924

Dopo aver ricavato la tensione media e la tensione efficace delle cinque forme d'onda, si va a calcolare la media aritmetica di tali valori.

Media delle tensioni medie

Media_aritmetica = (media1_2piezo + media2_2piezo + media3_2piezo + media4_2piezo + media5_2piezo)/5 = 0.0316/5 = 0.00632 V

Media dei valori efficaci

Rms_media = (rms1_2piezo + rms2_2piezo + rms3_2piezo + rms4_2piezo + rms5_2piezo)/5 =2,0637 V

Media tensione massima

Max_media = (max1_2piezo + max2_2piezo + max3_2piezo + max4_2piezo + max5_2piezo)/5 = (2.9555 + 2.0151 + 5.0195 + 4.6776 + 2.8334)/5 V = 3.5002 V

Il plot delle figure mostra come, man mano, si è andati a considerare la forma d'onda corrente e di ognuna di esse si è calcolato, attraverso le funzioni integrate di Matlab:

- Il valore medio attraverso la funzione "mean";

- La tensione efficacie attraverso la funzione “rms”;
- La tensione massima calcolata tramite la funzione “max”.

7.2.2 Prove con il piezoelettrico con il feltro

Nelle successive prove, si prende l’intero intervallo di tempo come fosse il periodo sul quale si vanno a calcolare il valore medio e il valore di tensione efficace, dato che la periodicità non è evidente, come invece accade sulle prove eseguite sul piezoelettrico senza il feltro sotto.

Per le prove con il piezoelettrico con il feltro è stato possibile inoltre, considerare il grafico delle forme d’onda sovrapposte, così da evidenziare come, a parità di condizioni non ci sia una completa sovrapposizione, bensì ci siano delle incongruenze dovute a vari fattori quali: la non idealità degli elementi del circuito, la breadboard dove vengono posizionati gli elementi, la sollecitazione sul piezoelettrico stesso che non è sempre uguale.

```
figure; plot(piezo11prova.data);
xlabel('Numero di campioni'); ylabel('Tensione (V)');
```

Vettore dei tempi

```
tempo1_1piezo = piezo11prova.data(:,1);
```

Vettore di tensione

```
tensione1_1piezo = piezo11prova.data(:,2);
```

```
figure; plot(tempo1_1piezo, tensione1_1piezo);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)');
```

Tensione media

```
media1_1piezo = mean(tensione1_1piezo);
```

media1_1piezo = -2,0713*10^(-4)

Tensione efficace

```
rms1_1piezo = rms(tensione1_1piezo);
```

rms1_1piezo = 0.0297 V

Tensione massima

```
max1_1piezo = max(tensione1_1piezo);
```

max1_1piezo = 0.4177 V

Rapporto tra valore medio e valore massimo in percentuale

```
rapp_medio1 = (media1_1piezo./max1_1piezo);
```

rapp_medio1 = -4.9590*10^(-4)

Rapporto tra valore efficacie e valore massimo in percentuale

```
rapp_rms1 = (rms1_1piezo./max1_1piezo)*100;
```

rapp_rms1 = 7.1132

In questa analisi si prende come vettore dei tempi, la prima colonna della cartella `piezo11prova.data` mentre per il vettore delle tensioni, si estrae la seconda colonna della cartella. Attraverso Matlab è possibile estrarre la prima colonna e la seconda colonna del vettore presente nella cartella del Workspace, ricavata dal software dello strumento, in seguito alla misura fatta.

Oltre all'analisi di ogni prova, si vanno poi a graficare tutte le forme d'onda in un'unica finestra attraverso il seguente codice:

```
figure; plot(tempo1_1piezo, tensione1_1piezo);
hold on
plot(tempo2_1piezo, tensione2_1piezo);
hold on
plot(tempo3_1piezo, tensione3_1piezo);
hold on
plot(tempo5_1piezo, tensione5_1piezo);
hold on
```

```
plot(tempo6_1piezo, tensione6_1piezo);
title('Prove piezoelettrico con il feltro');
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)');
legend('1°prova','2°prova','3°prova','5°prova','6°prova');
```

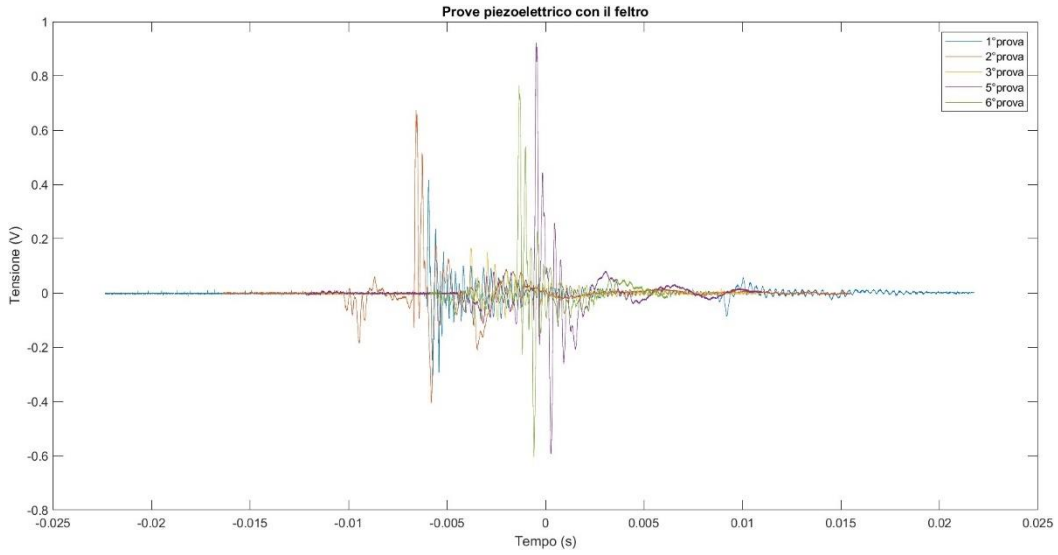


Fig. 7.3 Sovrapposizione forme d'onda, risultato della sollecitazione sul piezoelettrico con il feltro, a vuoto.

7.2.3 Prove su circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico senza feltro

Nel ricavare la forma d'onda di tensione con lo strumento si fanno cinque prove. Un paio di prove vengono fatte settando il trigger dello strumento in modalità 'Single' mentre le altre vengono estrapolate settando il trigger in modalità 'Normal'.

Anche in questo caso si vanno a graficare, attraverso la funzione 'plot' di Matlab, tutte le forme d'onda in un'unica finestra.

```
figure;
plot(tempo_R3_2piezo, tensione_R3_2piezo);
```

```
hold on
plot(tempo_R4_2piezo, tensione_R4_2piezo);
hold on
plot(tempo_R5_2piezo, tensione_R5_2piezo);
hold on
plot(tempo_R6_2piezo, tensione_R6_2piezo);
hold on
plot(tempo_R7_2piezo, tensione_R7_2piezo);
hold on
plot(tempo_R8_2piezo, tensione_R8_2piezo);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)');
title('Segnali R con il 2° piezo');
legend('3°prova', '4°prova', '5°prova', '6°prova', '7°prova',
'8°prova');
```

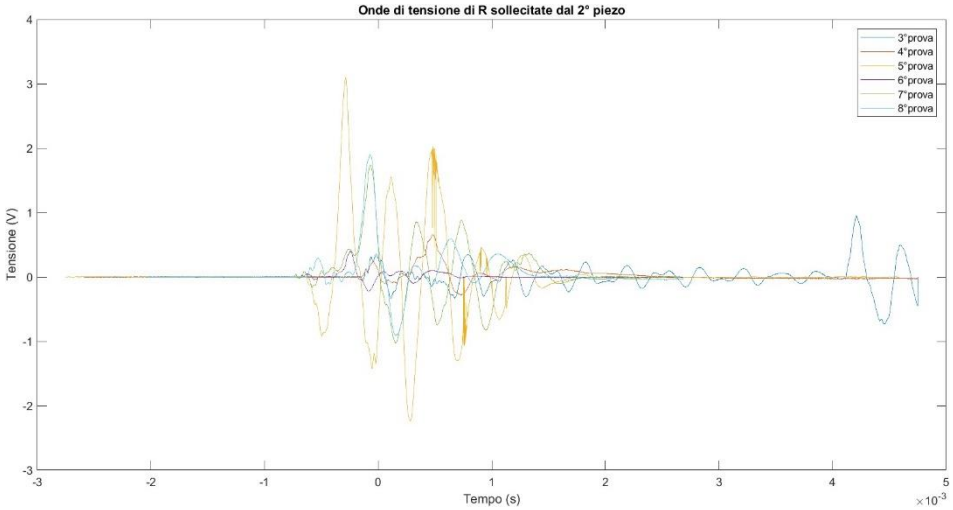


Fig. 7.4 Sovrapposizioni forme d'onda da circuito R alimentato con il piezoelettrico senza feltro.

7.2.4 Prove su circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico con il feltro

```
figure; plot(tempo1_R1piezo, tensione1_R1piezo);
```

```
hold on
plot(tempo2_R1piezo, tensione2_R1piezo);
hold on
plot(tempo3_R1piezo, tensione3_R1piezo);
hold on
plot(tempo4_R1piezo, tensione4_R1piezo);
hold on
plot(tempo5_R1piezo, tensione5_R1piezo);
title('5 Segnali R piezo con il feltro');
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)');
legend('1°prova',          '2°prova',          '3°prova',
'4°prova','5°prova');
```

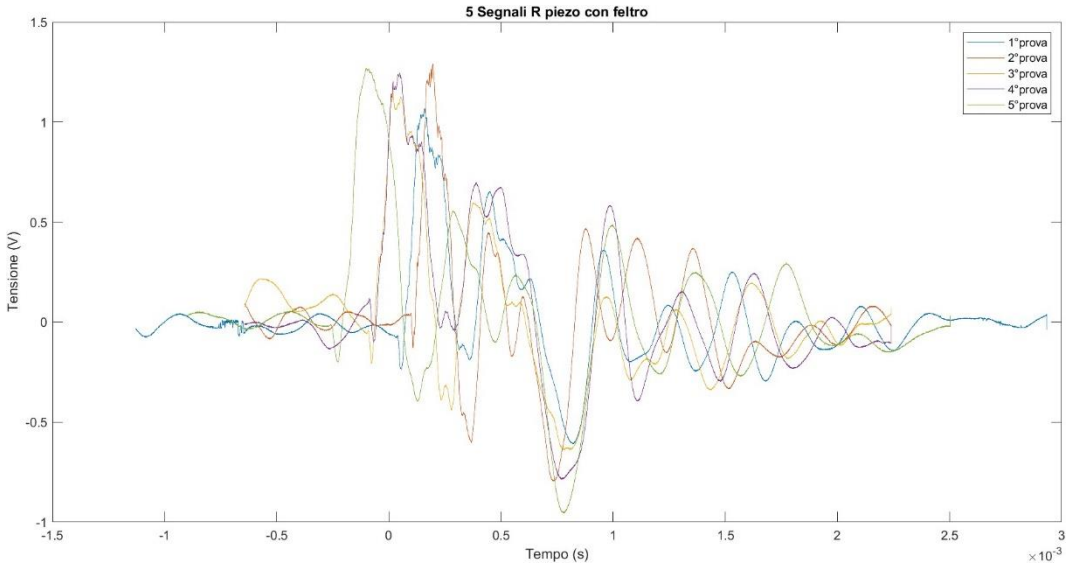


Fig. 7.5 Sovrapposizione delle forme d'onda circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico con il feltro.

Già con queste prove è evidente come, la presenza del feltro sotto al piezoelettrico, da un contributo di rumore in ingresso e inoltre, le forme d'onda, anche se presentano un andamento analogo, non sono sovrapponibili e non presentano un andamento in cui è evidente il picco di tensione come invece è maggiormente evidente nelle prove fatte sul piezoelettrico senza feltro, utilizzato come alimentatore e a vuoto. Nelle prove a vuoto è evidente come il piezoelettrico senza

feltro sollecitato dà origine a forme d'onda quasi periodiche, ciò che, con il piezoelettrico con il feltro non è possibile notare.

7.2.5 Prove su circuito RC alimentato dal piezoelettrico senza feltro

Il circuito RC sul quale sono state effettuate le prove ha come componenti un resistore in serie ad un condensatore, rispettivamente di valore pari a R=10 kΩ e C=10 μF, eccitato dal piezoelettrico senza feltrino.

Se si andasse a plottare l'intera cartella `RC1_piezo2_5prova.data` contenente i valori delle tensioni in funzione del tempo, considerando campione per campione, si otterrebbe il grafico della tensione in funzione del numero di campioni, ovvero 16380 campioni totali.

```
figure; plot(RC1_piezo2_5prova.data);
xlabel('Numero di campioni (16380)');
ylabel('Tensione (V)');
```

Dal plot si nota che in ascissa ho il numero di campioni, pari a 16380, mentre in ordinate ho i valori di tensione. È possibile andare a prelevare le colonne dei tempi e delle tensioni così da ottenere un grafico delle tensioni in funzione degli istanti di tempo v(t).

Vettore dei tempi

```
tempoRC_5=RC1_piezo2_5prova.data(:,1);
```

Vettore delle tensioni

```
tensioneRC_5=RC1_piezo2_5prova.data(:,2);
```

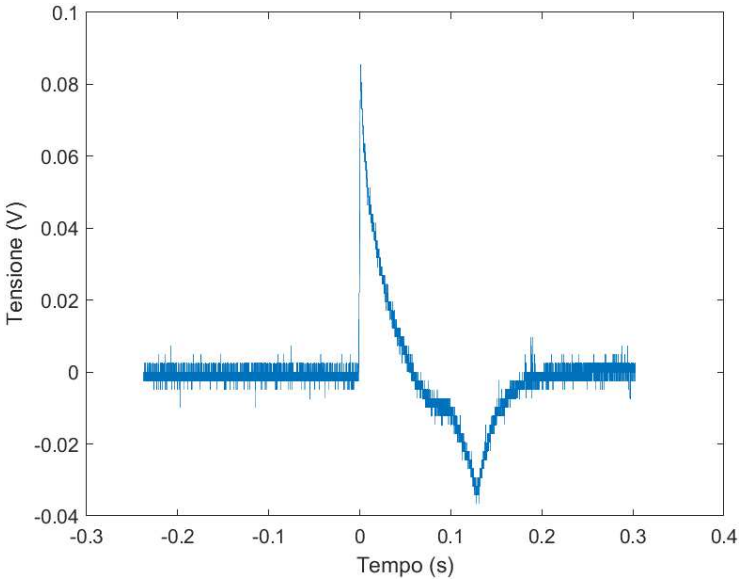


Fig. 7.6 Forma d'onda di tensione in funzione degli istanti di tempo

```
figure; plot(tempoRC_5, tensioneRC_5);
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)');
```

Tensione media

```
RC2piezo_medio4 = mean(tensioneRC_5);
```

RC2piezo_medio4 = -3.3448*10^(-4) V

Tensione efficace

```
RC2piezo_rms4 = rms(tensioneRC_5);
```

RC2piezo_rms4 = 0.0135 V

Tensione massima

```
RC2piezo_max4 = max(tensioneRC_5);
```

RC2piezo_max4 = 0.0855 V

Rapporto tra valore medio e tensione massima

```
rapp_medio4 = (RC2piezo_medio4./RC2piezo_max4)*100;
```

rapp_medio4 = -0.3912

Rapporto tra valore efficace e tensione massima

```
rapp_efficacie4 = (RC2piezo_rms4./RC2piezo_max4)*100;
```

rapp_efficace4 = 15.770

Sovrapposizione delle onde

```
figure; plot(tempoRC_2, tensioneRC_2);
hold on
plot(tempoRC_3, tensioneRC_3);
hold on
plot(tempoRC_4, tensioneRC_4);
hold on
plot(tempoRC_5, tensioneRC_5);
hold on
plot(tempoRC_6, tensioneRC_6);
title('Sovrapposizione onde circuito RC_2piezo');
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)');
legend('1°prova', '2°prova', '3°prova', '4°prova',
'5°prova');
```

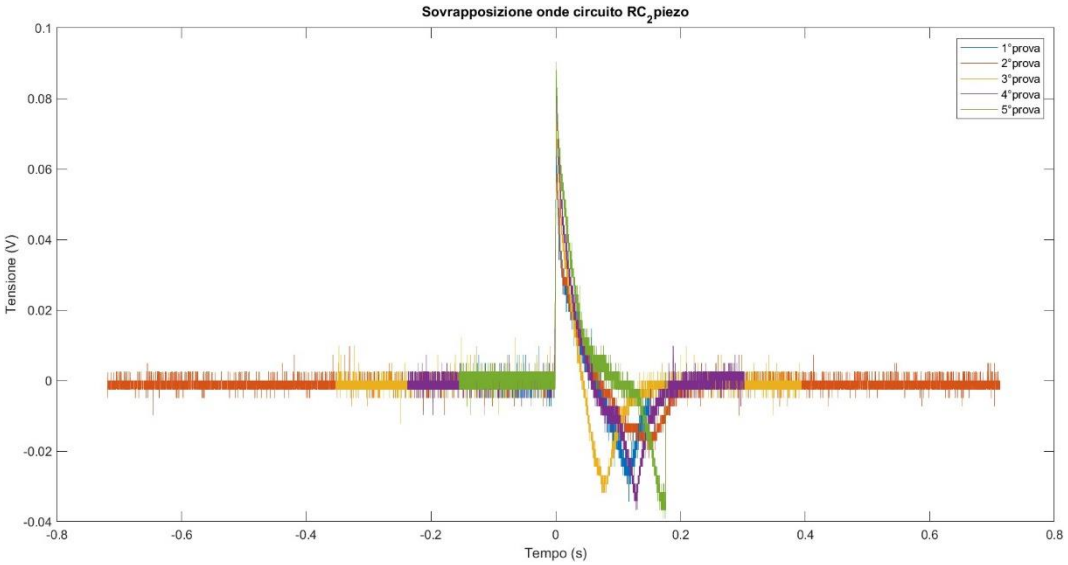


Fig. 7.7 Sovrapposizione forme d'onda rilevate sollecitando il piezoelettrico senza feltro che alimenta il circuito RC

Dalla Fig. 7.12 si osserva come le forme d'onda siano abbastanza sovrapponibili e, i picchi di tensione, si verificano per lo più, in prossimità dell'istante di tempo 0.

7.2.6 Prove su circuito RC alimentato dal piezoelettrico con il feltro

```
figure; plot(tempoRC1_1piezo, tensioneRC1_1piezo);
hold on
plot(tempoRC2_1piezo, tensioneRC2_1piezo);
hold on
plot(tempoRC3_1piezo, tensioneRC3_1piezo);
hold on
plot(tempoRC4_1piezo, tensioneRC4_1piezo);
hold on
plot(tempoRC5_1piezo, tensioneRC5_1piezo);
title('Sovrapposizione onde RC_1piezo');
xlabel('Tempo (s)'); ylabel('Tensione (V)');
legend('1°prova', '2°prova', '3°prova', '4°prova',
'5°prova');
```

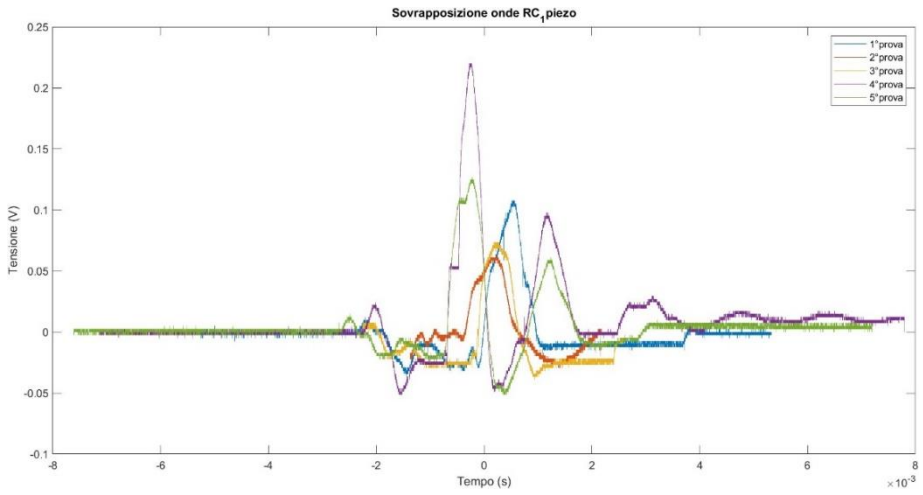


Fig. 7.8 Sovrapposizioni forme d'onda di tensione circuito RC alimentato dal piezoelettrico con il feltro

Tab. 7.1 Confronto valori di tensione delle varie prove effettuate

	Tensione media	**Valore efficace**	**Tensione massima**	**Rapp. % (Vm/Vmax)*100**	**Rapp. % (Veff/Vmax)*100**
Piezoelettrico senza feltro					
1° prova	-16,3 mV	0,3293 V	2,5818 V	-0,6299	0,3293
2° prova	7,4 mV	0,4127 V	3,5002 V	0,2114	11,791
1° forma d'onda	1,8 mV	0,5217 V	2,9555 V	-0,60798	17,6514
2° forma d'onda	-12,2 mV	0,45 V	2,0151 V	-6,0	22,3315
3° forma d'onda	7,8 mV	0,5149 V	5,0195 V	1,6	10,2577
4° forma d'onda	25,1 mV	0,3563 V	4,6776 V	0,0054	7,617
5° forma d'onda	0,0127 V	0,2208 V	2,8334 V	0,0045	7,7924
3° prova	5,848 mV	0,452 V	6,5889 V	0,08875	6,86002
1° forma d'onda	0,0108 V	0,4165 V	6,2531 V	0,0017	6,6601
2° forma d'onda	0,89622 mV	0,4875 V	6,9248 V	0,00012942	7,0397
4° prova	-12,958 V	1,0216 V	8,4738 V	-0,00245	12,0819
1° forma d'onda	-0,0251 V	0,9744 V	8,2316 V	-0,003	11,8371
2° forma d'onda	-21,7 mV	1,0326 V	8,0239 V	-0,0027	12,8688
3° forma d'onda	-15,8 V	1,0024 V	8,5002 V	-0,0019	11,7932
4° forma d'onda	-21,9 V	1,0181 V	8,1094 V	-0,0027	12,5543
5° forma d'onda	-18,7 V	0,9568 V	7,9995 V	-0,0023	11,9603
6° forma d'onda	-21,3 V	1,1453 V	9,978 V	-0,0021	11,4778
Piezoelettrico con il feltro					
1° prova	-0,20713 mV	29,7 mV	417,7 mV	-0,0004959	7,1132
2° prova	-0,083806 mV	0,065 V	674,2 mV	-0,00012431	9,6396
3° prova	-0,81659 mV	22,5 mV	163,7 mV	-0,499	13,7674
4° prova	0,058008 mV	93,9 mV	923,3 mV	0,0063	10,1743
5° prova	1,6 mV	110,9 mV	764,5 mV	0,2042	14,5048
Resistenza utilizzando un piezoelettrico senza feltro					
1° prova	44,7 mV	373,3 mV	1,744 V	2,5637	21,4059
2° prova	67,9 mV	324,7 mV	1,9077 V	3,5583	17,0199
3° prova	2,3 mV	173,9 mV	0,9526 V	0,2455	18,2562
4° prova	21,0 mV	101,1 mV	0,6546 V	3,2121	15,4412
5° prova	8,4 mV	58,3 mV	0,4006 V	2,0994	14,5646
6° prova	8,3 mV	551,4 mV	3,1045 V	0,2659	17,7603

	Tensione media	Valore efficace	Tensione massima	Rapp. % (Vm/Vmax)*100	Rapp. % (Veff/Vmax)*100
Resistenza utilizzando un piezoelettrico con il feltro					
1° prova	12,6 mV	0,2399 V	1,0674 V	1,1843	22,4734
2° prova	19,5 mV	0,3072 V	1,2921 V	1,5078	23,7716
3° prova	31,6 mV	0,3334 V	1,1578 V	2,7326	28,7962
Resistenza utilizzando un piezoelettrico con il feltro					
4° prova	54,5 mV	0,3815 V	1,2457 V	4,3778	30,6233
5° prova	36,6 mV	356,4 mV	1,2702 V	2,8806	28,0588
Circuito RC con piezoelettrico senza feltro					
1° prova	-0,47406 mV	14,6 mV	68,4 mV	-0,6931	21,3106
2° prova	-0,7292 mV	6,4 mV	58,6 mV	-1,2439	10,8583
3° prova	-1,0 mV	10,4 mV	73,3 mV	-1,4322	14,235
4° prova	-0,33448 mV	13,5 mV	85,5 mV	-0,3912	15,77
5° prova	3,4 mV	18,6 mV	90,4 mV	3,7762	20,5938
Circuito RC con piezoelettrico con il feltro					
1° prova	-0,88473 mV	23,1 mV	107,5 mV	-0,8232	21,4816
2° prova	23,0 mV	25,0 mV	63,5 mV	3,5543	39,4177
3° prova	-9,1 mV	29,5 mV	73,3 mV	-12,4683	40,3236
4° prova	10,0 mV	36,8 mV	219,8 mV	4,54	16,7214
5° prova	4,2 mV	24,8 mV	127,0 mV	3,2994	19,4911

7.3 Confronto risultati

La tabella Tab. 7.1 mette in evidenza la differenza di valori rilevati attraverso le prove, eseguite sul piezoelettrico, per la stessa quantità.

Nel caso delle forme d'onda periodiche, dopo aver studiato le singole forme d'onda separatamente, si calcolano le medie delle misure ripetute e, si riportano tali valori nella tabella.

Dalle prove risulta che i valori efficaci delle tensioni sono molto vicini tra di loro e in alcuni esempi, si discostano di sole poche unità di millivolt tra le stesse configurazioni. Invece, il valore massimo dipende dall'intensità della pressione del dito sul piezoelettrico che può essere più o meno incisiva e di conseguenza è abbastanza variabile. In alcuni casi la tensione media risulta negativa perché, come appare dalle figure, la forma d'onda è centrata in corrispondenza dell'istante zero e presenta picchi di massimo e di minimo anche al di sotto dello zero di tensione. Sappiamo che non è possibile considerare tempi negativi ma in questo caso l'andamento dell'onda presenta il picco di massimo, ovvero l'istante in cui viene sollecitato il piezoelettrico, in corrispondenza dell'istante di tempo zero, ciò che si trova prima dello zero e dopo lo zero sono delle sollecitazioni deboli della pressione del dito che, non possono essere considerate periodiche a causa della non completa riconoscibilità dell'onda.

I valori di tensione ricavati dal piezoelettrico senza il feltro sono maggiori e più simili tra loro, in particolare nella configurazione del circuito RC, sono presenti picchi di tensione centrati in zero e perfettamente sovrapponibili.

La tensione erogata dal piezoelettrico con il feltro ha meno sensibilità al tocco e presenta maggiore rumore in ingresso, con picchi di tensione che raggiungono massimo una tensione di poco più di 1 V.

Conclusioni

La tesi proposta mostra come, a parità di condizioni, i risultati ottenuti siano diversi gli uni dagli altri. Nel caso della rilevazione delle costanti di tempo, per la carica e la scarica del condensatore, il valore dipende sia dall'incertezza di tipo composta, poiché la costante di tempo è una grandezza derivata ed è il risultato del prodotto di due valori affetti entrambi da una incertezza, la quale viene fornita dal costruttore. Inoltre, l'incertezza della costante di tempo dipende anche dalla non idealità del circuito, dalla non idealità della breadboard sul quale vengono posizionati gli elementi e dal parallelo tra le due resistenze. Ultimo, ma non meno importante, è il ruolo dell'interruttore che presenta del rumore in ingresso nel momento in cui viene collegato e scollegato il cavo dall'alimentazione.

Tali misure sono state fatte per dimostrare che, anche se le condizioni in cui vengono effettuate sono le stesse per le varie prove, il risultato può variare di volta in volta.

Nel caso dei dispositivi piezoelettrici, sono state eseguite cinque prove per ogni caso, proprio per dimostrare l'incertezza che influenza tali misurazioni e inoltre, per valutare come, dopo aver aggiunto un feltro sotto ad uno dei due dispositivi, sia presente del rumore in ingresso e ci siano delle difficoltà nell'intercettazione dei picchi nella forma d'onda. Soprattutto dopo l'analisi in Matlab, si evince che le forme d'onda hanno più o meno un andamento simile ma non sono del tutto sovrapponibili.

Nelle prove sui dispositivi piezoelettrici, le forme d'onda generate sono influenzate dalla diversa sollecitazione della pressione del dito che risulta scostante e non ha sempre la medesima intensità, inoltre i due piezoelettrici utilizzati, anche se uguali per caratteristiche costruttive, presentano picchi di tensione differenti. Su uno dei due infatti è stato posto un feltro sotto, per evidenziare la diversa sensibilità alla sollecitazioni

Elenco tabelle

- *Tab. 1.1 Moku:Lab*
- *Tab. 1.2 Moku:Pro*
- *Tab. 1.3 Specifiche del Moku:Go*
- *Tab. 2.1 Datasheet oscilloscopio Moku*
- *Tab. 2.2 Specifiche oscilloscopio Moku*
- *Tab. 3.1 Dati sperimentali fase di carica del condensatore, dati a confronto*
- *Tab. 3.2 Dati sperimentali fase di scarica del condensatore, dati a confronto*
- *Tab. 3.3 Differenza tra il valore atteso della costante di tempo e quello effettivamente misurato*
- *Tab. 5.1 Specifiche tecniche del dispositivo*
- *Tab. 5.2 Misure fatte su tre dispositivi piezoelettrici attraverso un multimetro che rileva la tensione generata dalla sollecitazione col dito sul sensore, settando lo strumento in alternata*
- *Tab. 7.1 Confronto valori di tensione delle varie prove effettuate*

Elenco immagini

- *Fig. 1.1 Moku:Lab*
- *Fig 1.2 Moku:Pro*
- *Fig. 1.3 Strumenti disponibili con il dispositivo Moku:Go*
- *Fig. 1.4 Componenti hardware del Moku:Go*
- *Fig. 2.1 Oscilloscopio digitale*
- *Fig. 2.2 Frequenza di campionamento*
- *Fig. 2.3 Larghezza di banda*
- *Fig. 3.1 Circuito di carica del condensatore*
- *Fig. 3.2 Circuito equivalente al circuito in Fig. 3.1 con linea rossa che separa il circuito per applicare il Teo. di Thevenin*
- *Fig. 3.3 Circuito RC ideale con interruttore*
- *Fig. 3.4 Equivalente di Thevenin per il calcolo della resistenza equivalente*
- *Fig. 3.5 Circuito per il calcolo della tensione equivalente di Thevenis*
- *Fig. 3.6 Circuito RC collegato alle sonde dell'oscilloscopio Moku:Go*
- *Fig. 3.7 Fase di carica del condensatore con resistenza da 330 Ω con il trigger impostato su' 'Edge'*
- *Fig. 3.8 Fase di scarica del condensatore con resistenza da 330 Ω con il trigger impostato sul 'Falling'*
- *Fig. 3.9 Fase di carica del condensatore con resistenza da 1 kΩ con il trigger impostato su 'Edge'*
- *Fig. 3.10 Fase di scarica del condensatore con resistenza da 1 kΩ con il trigger impostato sul 'Falling'*
- *Fig. 3.11 Fase di carica del condensatore con resistenza da 100 kΩ con il trigger impostato su 'Edge'*
- *Fig. 3.12 Fase di scarica del condensatore con resistenza da 100 kΩ con il trigger impostato sul 'Falling'*
- *Fig. 4.1 Collegamenti tra i due Moku:Go e il circuito RC*

- *Fig. 4.2 Fase di carica del condensatore con f = 100 Hz*
- *Fig. 4.3 Fase di scarica del condensatore con f = 100 Hz*
- *Fig. 4.4 Fase di carica del condensatore con f = 500 Hz*
- *Fig. 4.5 Fase di scarica del condensatore con f = 500 Hz*
- *Fig. 5.1 Schema funzionamento del piezoelettrico*
- *Fig. 5.2 Due sensori di vibrazioni piezoelettrici collegati rispettivamente ad un preamplificatore di carica e ad una resistenza*
- *Fig. 6.1 Circuito RC con piezoelettrici usati come alimentazione*
- *Fig. 6.2 Forma d'onda ricavata dal picco di tensione, erogato dal piezoelettrico collegato alla sonda dell'oscilloscopio del Moku:Go, con il trigger impostato in modalità "Single"*
- *Fig. 6.3 Forme d'onda ricavate dalla tensione erogata dal piezoelettrico senza feltro, con il trigger dello strumento in modalità "Auto" e il livello del trigger pari a 99.99 mV*
- *Fig.6.4 Onda di tensione, che alimenta un circuito resistivo, ricavata settando il trigger dello strumento in modalità 'Single'*
- *Fig. 6.5 Onda di tensione della fase di carica e di scarica del condensatore nel circuto RC, è il risultato della 3° prova eseguita*
- *Fig. 6.6 Forma d'onda generata dal picco di tensione dopo la pressione sul piezoelettrico a vuoto, settando il trigger dello strumento in modalità 'Auto'*
- *Fig. 6.7 Onda di tensione rilevata dall'oscilloscopio con il trigger impostato in modalità 'Normal', con valore pari a 940.0 mV*
- *Fig. 6.8 Andamento onda di tensione che alimenta un circuito RC con il trigger posto in modalità 'Single'*
- *Fig. 6.8.1 Fase di carica*
- *Fig. 6.8.2 Fase di scarica*
- *Fig. 7.1 Immagine presa dal datasheet dello strumento*
- *Fig. 7.2 Grafico del segnale con in evidenza i picchi di tensione superiori a 2 V*
- *Fig. 7.2.1 Prima forma d'onda graficata*
- *Fig. 7.2.2 Seconda forma d'onda graficata*
- *Fig. 7.2.3 Terza forma d'onda graficata*

- *Fig. 7.2.4 Quarta forma d'onda graficata*
- *Fig. 7.2.5 Quinta forma d'onda graficata*
- *Fig. 7.3 Sovrapposizione forme d'onda, risultato della sollecitazione sul piezoelettrico con il feltro, a vuoto.*
- *Fig. 7.4 Sovrapposizioni forme d'onda da circuito R alimentato con il piezoelettrico senza feltro.*
- *Fig. 7.5 Sovrapposizione delle forme d'onda circuito resistivo alimentato dal piezoelettrico con il feltro.*
- *Fig. 7.6 Forma d'onda di tensione in funzione degli istanti di tempo*
- *Fig. 7.7 Sovrapposizione forme d'onda rilevate sollecitando il piezoelettrico senza feltro che alimenta il circuito RC*
- *Fig. 7.8 Sovrapposizioni forme d'onda di tensione circuito RC alimentato dal piezoelettrico con il feltro*

Bibliografia

[1] I. Aleksejev, A. Jutman, S. Devadze, S. Odintsov and T. Wenzel, "FPGA-based synthetic instrumentation for board test," 2012 IEEE International Test Conference, Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 1-10, doi: 10.1109/TEST.2012.6401571

[2] Datasheet dello strumento Moku:Go

[3] Liquid instrument https://www.liquidinstruments.com/ (18/09/2023)

[4] Ansa.it Economia Liquid Instruments Introduces Moku:Go – The Robust Lab Education Solution for the Next Generation of Scientists and Engineers

sito web https://www.ansa.it/sito/notizie/economia/business_wire/news/2021-03-23_123160546.html (18/09/2023)

[5] BusinessWire

[6] Datasheet dell'oscilloscopio/voltmetro del Moku:Go

[7] INRim Istituto nazionale di ricerca metrologica sito web https://www.inrim.it/it/ricerca/campioni-primari (18/09/2023)

[8] Datasheet del generatore di forme d'onda del Moku

[9] Sapere.it enciclopedia sito web https://www.sapere.it/enciclopedia/Lippmann%2C+Gabriel.html#:~:text=Effetto%20Lippmann,sonore%20e%2C%20soprattutto%2C%20ultrasonore. (18/09/2023)

[10] PhysicsOpenLab: Modern DIY Physics Laboratory for Science Enthusiasts

Sito web https://physicsopenlab.org/2018/10/16/piezoelettricita-e-piroelettricita/ (18/09/2023)

[11] Matlab sito web https://it.mathworks.com/products/matlab.html (20/09/2023)

[12] Geekandjob sito web https://www.geekandjob.com/wiki/matlab (19/09/2023)

Ringraziamenti

Volevo prendere queste poche righe per ringraziare tutte le persone che mi sono state vicine durante questo percorso.

Prima di tutti voglio ringraziare i miei genitori che mi hanno dato la possibilità di intraprendere questo percorso universitario e mi hanno dato la forza e la spinta per migliorare giorno dopo giorno.

Inoltre, voglio ringraziare la mia tutor, la professoressa Spinsante Susanna, che mi ha mostrato questo lato dell'elettronica e mi ha permesso di mettere mano ad aspetti che conoscevo per lo più teoricamente.

Infine, volevo ringraziare le persone che mi sono state vicine in questi anni e mi hanno sempre spronata a fare del mio meglio e guardare le difficoltà da un'altra prospettiva per affrontarle nel modo migliore.