

## STUDIO DI UN AMMORTIZZATORE ELETTROMAGNETICO A RECUPERO DI ENERGIA

G.Barbaraci<sup>a</sup>, G. Virzì Mariotti<sup>b</sup>, M. Porretto<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Università Kore di Enna, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale e delle Infrastrutture Aeronautiche; [gabriele.barbaraci@libero.it](mailto:gabriele.barbaraci@libero.it);

<sup>b</sup>Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria Chimica, Gestionale, Informatica Meccanica; e-mail: [gabriele.virzimariotti@unipa.it](mailto:gabriele.virzimariotti@unipa.it); [porretto.mario@libero.it](mailto:porretto.mario@libero.it)

### Sommario

Questo lavoro ha come obiettivo principale lo studio teorico e con supporto di software F.E.M. di un dispositivo che consenta recupero energetico da una sospensione automobilistica. In sostituzione allo smorzatore viscoso, che dissipa l'energia cinetica del veicolo a seguito dell'attraversamento di strade sconnesse o ostacoli più marcati, si è usato uno smorzatore elettromagnetico che svolga le funzioni dello smorzatore viscoso consentendo un recupero di energia elettrica. Lo smorzatore elettromagnetico è di tipo a magneti permanenti e il suo funzionamento si basa sul fenomeno dell'induzione elettromagnetica. Il modello matematico descrive il funzionamento dello smorzatore, restituendo i valori delle grandezze elettriche e meccaniche in funzione della velocità relativa tra stelo e statore. Si è valutato il recupero energetico considerando una minicar elettrica che transita su una strada mediamente sconnessa. La potenza elettrica recuperata ha un valore complessivo di circa 250 W.

### Abstract

Main objective of this work is the theoretical study and support of FEM software of a device that allows for energy recovery from an automotive suspension. In replacing the viscous damper, which dissipates the kinetic energy of the vehicle due to rough roads or obstacles more marked, an electromagnetic damper is used that performs the functions of the viscous damper allowing a recovery of electricity. The damper is of the electromagnetic type with permanent magnets and its operation is based on the phenomenon of electromagnetic induction. The mathematical model describes the operation of the damper, restoring the values of the electrical and mechanical magnitudes as a function of the relative speed between the rod and the stator. Energy recovery has been estimated considering an electric minicar that transits on a bumpy road. The recovered power has a total value of about 250W.

### 1.INTRODUZIONE

La sospensione automobilistica svolge il compito di attenuare le oscillazioni della massa sospesa, per far ciò quest'ultima deve essere dotata di uno smorzatore di vibrazioni che dissipi l'energia della massa sospesa del veicolo. L'obiettivo di questo lavoro è quello di studiare uno smorzatore elettromagnetico in grado di svolgere i compiti di un normale smorzatore viscoso e che consenta un recupero di energia. Lo smorzatore studiate è di tipo *semi-attivo* cioè in grado di fornire una costante di smorzamento variabile.

Il principio fisico di funzionamento è quello dell'induzione elettromagnetica di Faraday. Una spira di materiale conduttore che è immersa in un campo magnetico, è soggetta ad una variazione di flusso del campo magnetico. Tale variazione di flusso induce nella spira un passaggio di corrente, la cui interazione con il campo magnetico fa nascere una forza di modulo proporzionale alla velocità di traslazione della spira e di verso opposto.

L'ammortizzatore studiato è del tutto originale ed innovativo, tanto che non sono stati trovati riferimenti bibliografici su argomenti simili.

## 2.GEOMETRIA E MATERIALI

Lo smorzatore elettromagnetico è costituito da una parte tubolare statorica, che presenta delle cave atte ad ospitare gli avvolgimenti elettrici, e da uno stelo mobile situato all'interno dello statore. Solidali allo stelo si trovano i magneti permanenti al neodimio per la generazione del campo magnetico. Il moto dello stelo si traduce nella generazione di un campo magnetico traslante che a sua volta genera la voluta variazione di flusso negli avvolgimenti. La fig. 1 mostra lo schema dello smorzatore nella posizione di massimo flusso raccolto dagli avvolgimenti.

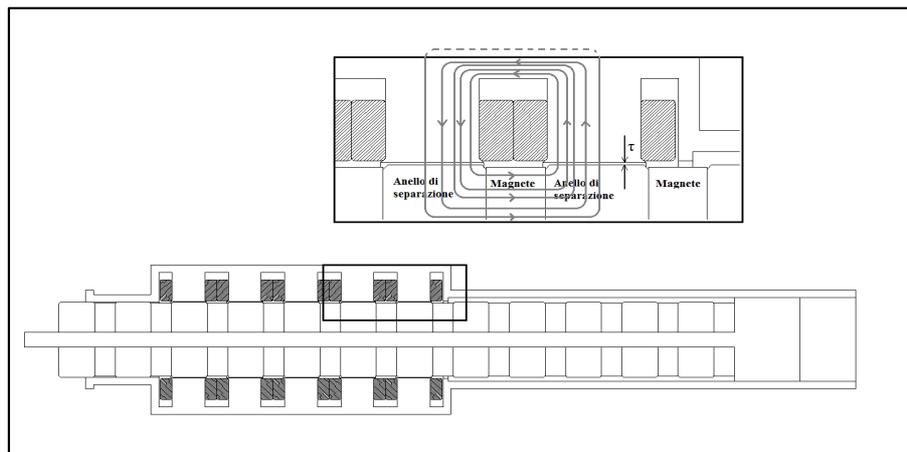


Figura 1 – Schema dello smorzatore nella posizione di massimo flusso

La scelta dei materiali con cui realizzare i componenti principali dello smorzatore si basa sulla necessità di massimizzare l'effetto che i magneti permanenti hanno sullo statore. Per massimizzare il flusso magnetico concatenato si sceglie per lo statore un materiale avente un'altissima permeabilità magnetica. Si deve prestare molta attenzione anche alla forma del ciclo di isteresi di tale materiale: un materiale con un ciclo d'isteresi molto "ampio" viene detto *magneticamente duro* poiché per magnetizzarlo o smagnetizzarlo bisogna sottoporlo ad un campo magnetico molto elevato (materiali utilizzati per i magneti permanenti); i materiali che hanno invece un ciclo d'isteresi molto "stretto" sono detti *magneticamente morbidi*, essi si magnetizzano facilmente e tendono a non rimanere magnetizzati. Il materiale scelto per lo statore è il Supermendur, utilizzato nel campo delle macchine elettriche per le sue ottime qualità magnetiche.

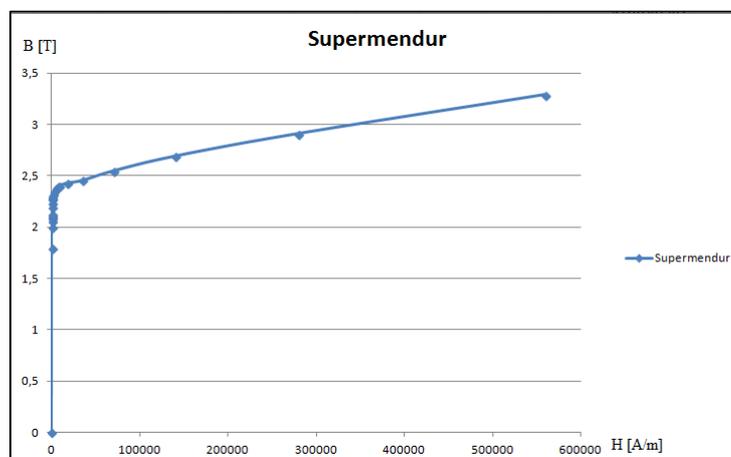


Figura 2 – caratteristica B-H del Supermendur

Esso è una lega di Ferro-Cobalto e Vanadio nelle percentuali 49% Fe – 49% Co – 2% V. La fig. 2 mostra la caratteristica B-H di tale materiale. La permeabilità magnetica relativa è definita come

—; per questo materiale fino a un'induzione  $B = 2 \text{ T}$  si ha tale valore  
 scende di molto già per  $B = 2.3 \text{ T}$ , valore per il quale si ha [1]

Anche gli anelli di separazione che sono interposti tra i magneti sono costituiti da tale materiale, poiché essi hanno il compito di deviare le linee di flusso del campo magnetico incanalandole verso lo statore. Invece lo stelo, su cui vengono impilati i magneti e gli anelli, non può essere costituito dallo stesso materiale, perché le linee del campo magnetico prodotto dai magneti si richiuderebbero sullo stelo e lo statore sarebbe investito da un flusso notevolmente minore. Si è scelto allora di realizzare lo stelo in acciaio inossidabile che ha una riluttanza molto elevata; la permeabilità relativa — di tali acciai è infatti compresa tra 100 e 5000. Si riesce così a massimizzare il flusso magnetico che si concatena con lo statore e quindi con gli avvolgimenti.

## 2.1. Determinazione del flusso magnetico concatenato

Una prima stima del valore del flusso magnetico concatenato con ognuno dei 20 avvolgimenti è stata fatta per via analitica considerando il circuito magnetico formato dai magneti e dallo statore. La riluttanza del circuito magnetico è stata calcolata prendendo in considerazione solo le riluttanze dei traferri e trascurando la riluttanza del Supermendur (di entità molto minore).

È stato ricavato il punto di lavoro, dato dall'intersezione della curva caratteristica del magnete con la retta di lavoro del circuito magnetico, e di conseguenza il flusso concatenato, come mostrato in fig. 3.

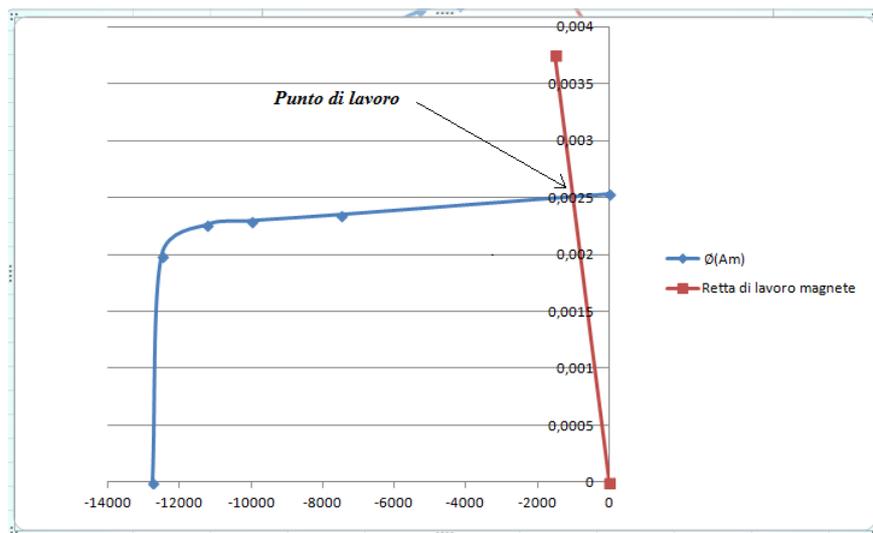


Figura 3 – Punto di lavoro e determinazione del flusso magnetico

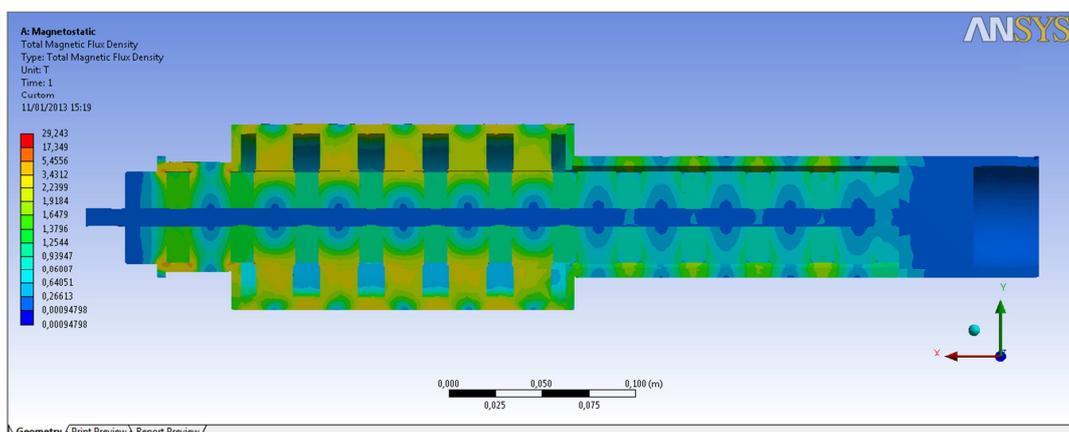


Figura 1 – densità del flusso magnetico (FEM)

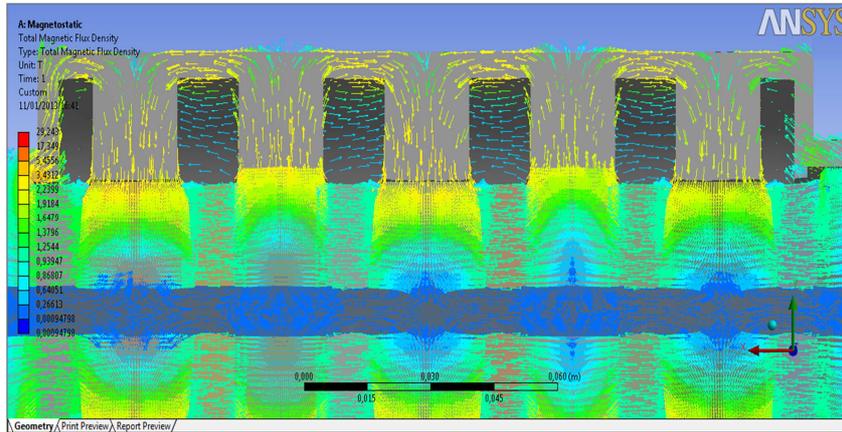


Figura 2 – andamento delle linee di flusso (FEM)

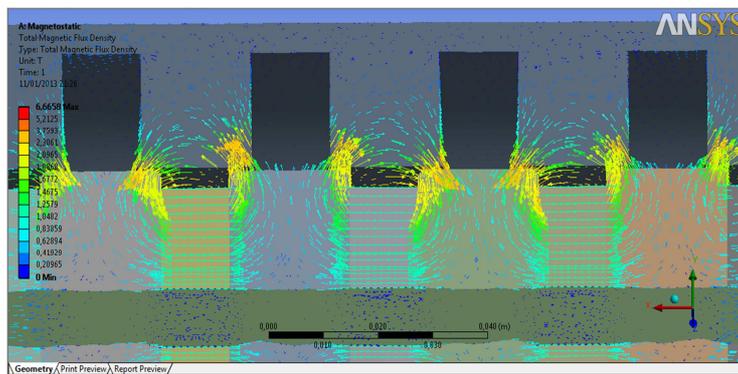


Figura 6 – linee di flusso nella posizione di massima riluttanza (FEM).

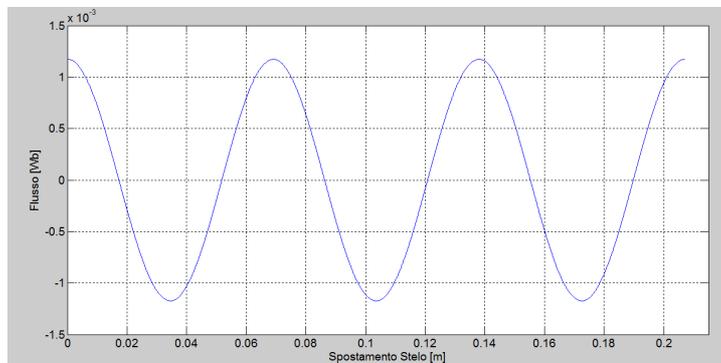


Figura 7 – variazione del flusso a seguito della traslazione dello stelo

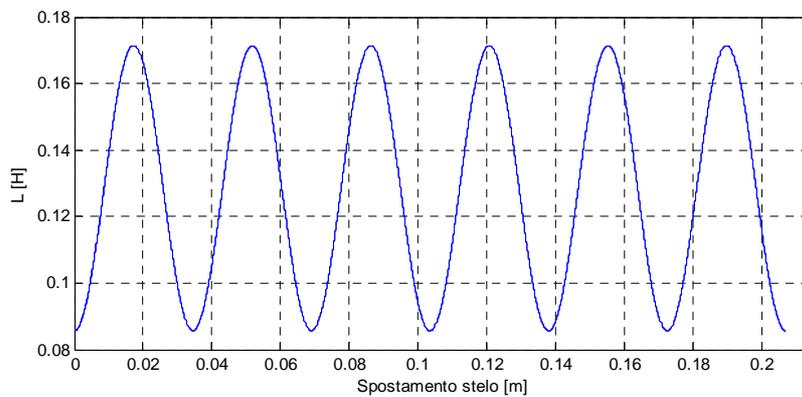


Figura 8 – Andamento del coefficiente di autoinduzione

Il valore del flusso ricavato analiticamente è stato confermato dall'analisi magnetostatica agli Elementi Finiti. La figura 4 mostra la densità del flusso magnetico, e la figura 5 l'andamento delle linee di flusso. Spostando lo stelo di una quantità pari al semipasso dei magneti, il circuito magnetico si porta nella posizione di massima riluttanza, quindi di flusso concatenato è prossimo a zero. Le linee di flusso si richiudono su se stesse come mostrato nella figura 6.

I magneti sono disposti sullo stelo con verso di magnetizzazione alternato, la traslazione dello stelo per l'intera corsa fa sì che ognuno dei 20 avvolgimenti sia soggetto ad una variazione del flusso che ha andamento riportato in fig. 7. Altro parametro di fondamentale importanza è il coefficiente di autoinduzione degli avvolgimenti, questo è funzione della riluttanza del circuito magnetico e della posizione dello stelo. L'andamento del coefficiente di autoinduzione è riportato in fig. 8.

### 3. MODELLO MATEMATICO E ANALISI DEL FUNZIONAMENTO

Noti tutti i parametri è stata calcolata la legge della forza elettromotrice indotta in ogni avvolgimento.

$$\mathcal{E}_{i1} = -N \frac{d\Phi(x)_1}{dx} V_s = -N \left[ -\phi(x)_{max} \frac{\pi}{p} \sin\left(\frac{\pi}{p} x\right) \right] \omega \frac{C}{2} \sin(\omega t) \quad (1)$$

Considerando il circuito equivalente degli avvolgimenti si è scritta l'equazione:

$$\mathcal{E}_i(t) = (R_{int} + R_{ext}) i(t) + L(t) \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Dove compaiono la resistenza propria dell'avvolgimento, la resistenza esterna di carico (eventuale carico connesso allo smorzatore) e l'autoinduttanza. [2]

Moltiplicando i termini della precedente equazione per la corrente  $i(t)$  si ottiene la potenza elettrica fornita agli avvolgimenti ed effettuando un bilancio energetico si risale alla forza applicata allo stelo e quindi al coefficiente di smorzamento dello smorzatore.

$$C_s(t) = \frac{n \mathcal{E}_i(t) i(t)}{V_s^2(t)} \quad (3)$$

Il modello matematico è stato implementato in ambiente Matlab-Simulink e si sono analizzati i funzionamenti dello smorzatore al variare di alcuni dati di input.

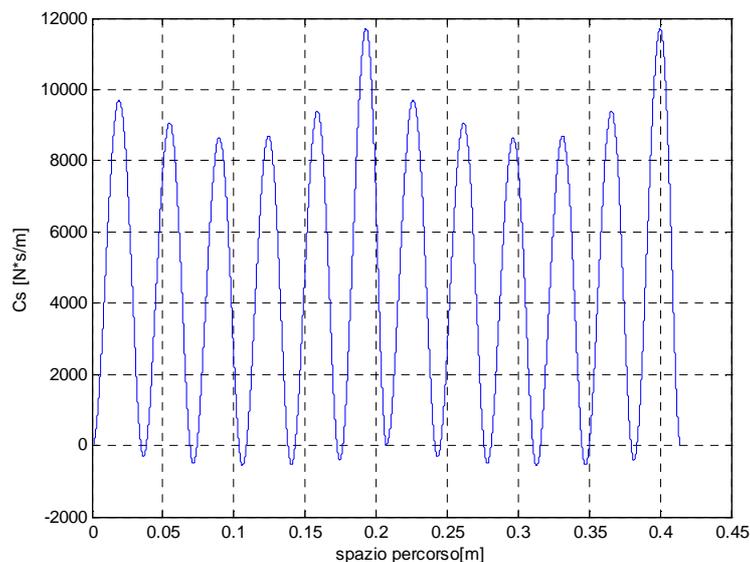


Figura 9 – Andamento del coefficiente di smorzamento con lo spazio percorso dallo stelo in due corse.

La prima analisi è stata effettuata considerando nulla la resistenza di carico esterna, dunque quando gli avvolgimenti sono posti in cortocircuito. In questa condizione si è dimostrato che, date le dimensioni della sezione dell'avvolgimento, il valore di coefficiente di smorzamento non dipende dal numero di spire. Assegnando allo stelo una velocità di tipo sinusoidale si sono ricavati gli andamenti di tensione, corrente, potenza e coefficiente di smorzamento. Si è visto come il coefficiente di smorzamento dipenda fortemente dalla posizione dello stelo come mostra la figura 9.

A giudicare dalla figura 9, il dispositivo non sembra adatto alla sospensione di un autoveicolo, infatti il coefficiente di smorzamento dovrebbe essere quanto più possibile indipendente dalla posizione dello stelo [3]. Per rendere il dispositivo adeguato si è pensato di modificare la geometria dello smorzatore e fare in modo che gli avvolgimenti, anziché agire tutti in modo sincronizzato, siano disposti in modo che il loro effetto in termini di forza sullo stelo sia sfasato. Per ottenere lo sfasamento basta spostare secondo la direzione dello stelo 10 avvolgimenti di una quantità pari al passo, in questo modo il flusso concatenato con questi ultimi sarà sfasato di  $90^\circ$ .

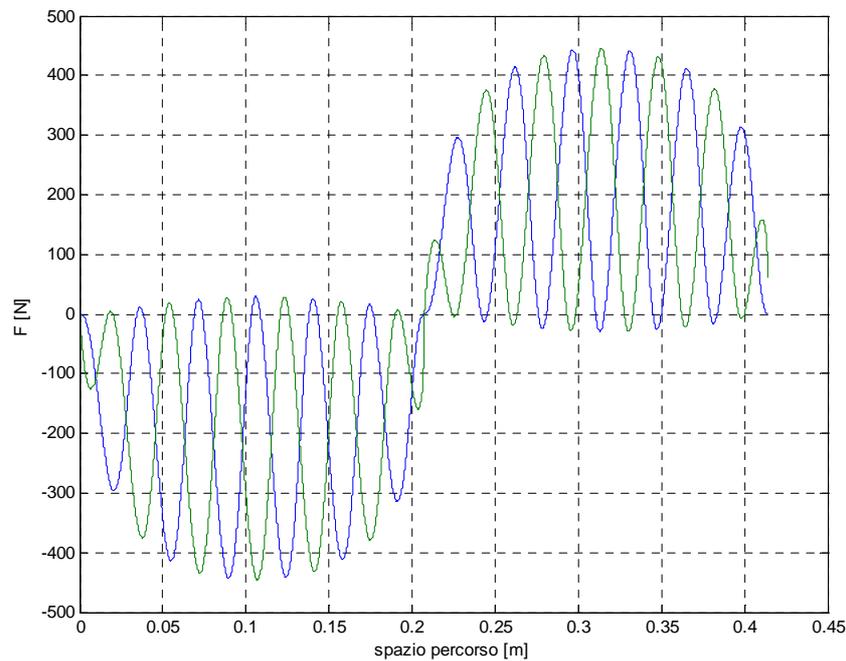


Figura 10 – Forza esercitata dai due blocchi da 10 avvolgimenti in funzione della posizione dello stelo.

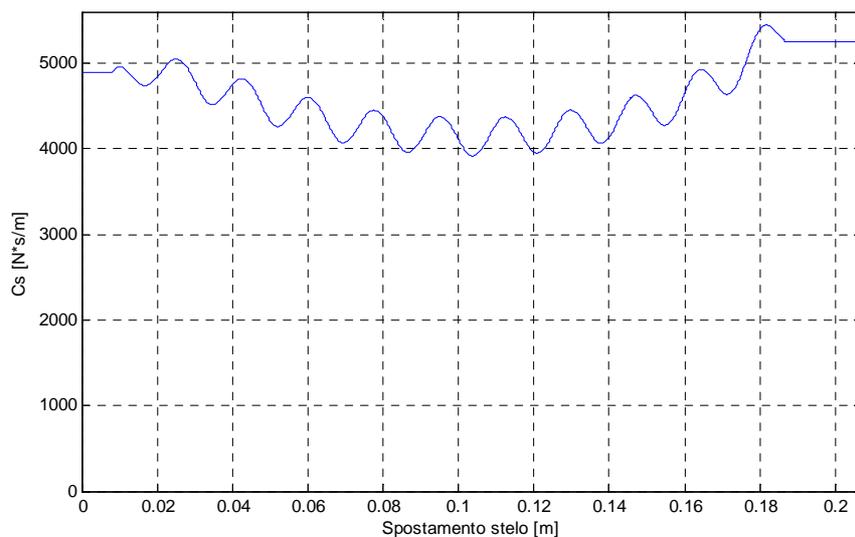


Figura 11 – andamento del coefficiente di smorzamento dopo lo sfasamento in funzione dello spostamento (una corsa).

Si riportano (fig.10) in uno stesso grafico gli andamenti delle forze esercitate dai due blocchi in funzione dello spazio percorso dallo stelo

In questo modo il coefficiente di smorzamento assume un andamento in funzione della posizione dello stelo più stabile attorno al suo valore medio, come mostra la figura 11.

Per accumulare l'energia elettrica prodotta dallo smorzatore, bisogna connettere gli avvolgimenti ad un sistema di accumulo. Un sistema di accumulo è per gli avvolgimenti un carico resistivo, infatti uno dei dati di targa degli accumulatori è proprio la resistenza di carica. Si considera quindi lo schema in figura tenendo presente che la resistenza esterna rappresenta il sistema di accumulo. La potenza  $P_{acc}(t) = R_{ext} i(t)^2$  è una potenza accumulata. Inserendo una resistenza esterna avremo un abbassamento delle correnti con conseguente abbassamento delle forze esplicate sullo stelo, essendo queste legate all'interazione tra campo magnetico e correnti. Considerando il rapporto:

$$\alpha = \frac{R_{ext}}{R_{int}} \quad (4)$$

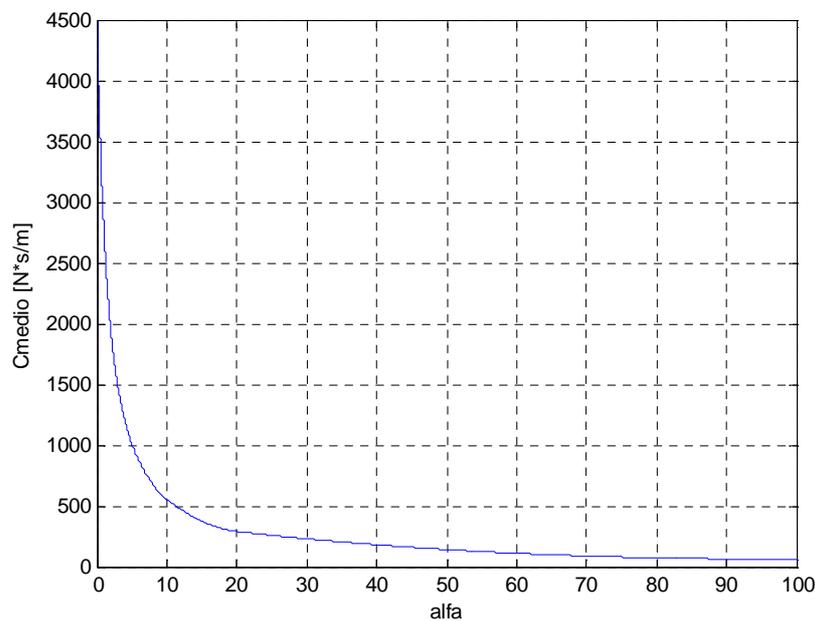


Figura 12 – coefficiente di smorzamento medio in funzione di  $\alpha$

ed eseguendo il calcolo del coefficiente di smorzamento medio al variare del rapporto  $\alpha$  si ottiene il grafico di figura 12. La possibilità di regolare il coefficiente di smorzamento del dispositivo agendo sul valore della resistenza di carico esterna rappresenta un aspetto di notevole interesse. Infatti, lo smorzatore elettromagnetico, a differenza degli altri smorzatori attivi, ad esempio lo smorzatore magnetoreologico, non ha bisogno di un'alimentazione esterna che consenta la variazione del coefficiente di smorzamento. Effettuando il bilancio delle potenze medie in un periodo, cioè per l'intervallo di tempo impiegato dallo stelo per spostarsi di una quantità pari al passo delle cave, si può scrivere:

$$P_{diss} + P_{acc} = \mathcal{E}_{i-m} i_m = R_{int} i_m^2 + R_{ext} i_m^2 \quad (5)$$

In essa non compare il termine della potenza reattiva, perché l'energia complessivamente assorbita e ceduta dall'induttore in un periodo è nulla. Il secondo termine a secondo membro indica la potenza accumulata, il primo indica la potenza dissipata per effetto joule. Il rendimento dello smorzatore/generatore elettrico è dato da:

$$\eta = \frac{P_{acc}}{P_{gen}} = \frac{P_{acc}}{P_{diss} + P_{acc}} = \frac{R_{ext} i_m^2}{R_{int} i_m^2 + R_{ext} i_m^2} = \frac{R_{ext}}{R_{int} + R_{ext}} \quad (6)$$

Dividendo numeratore e denominatore per  $R_{int}$  si ottiene:

$$\eta = \frac{R_{ext}/R_{int}}{R_{int}/R_{int} + R_{ext}/R_{int}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \quad (7)$$

L'andamento del rendimento viene mostrato in figura 13. Se si vuole un alto coefficiente di smorzamento si devono utilizzare bassi valori di resistenza esterna e quindi bassi valori di potenza accumulata, viceversa per avere rendimenti alti bisogna sacrificare il coefficiente di smorzamento.

Supponiamo che lo smorzatore debba equipaggiare un'autovettura elettrica di massa, a pieno carico,  $m_{tot} = 800 \text{ kg}$ . Considerando il carico uniformemente distribuito, la massa su ogni singola ruota è mediamente  $m = 200 \text{ kg}$ ; prendendo in considerazione il modello semplificato di sospensione a un grado di libertà si può determinare il coefficiente di smorzamento ottimo.

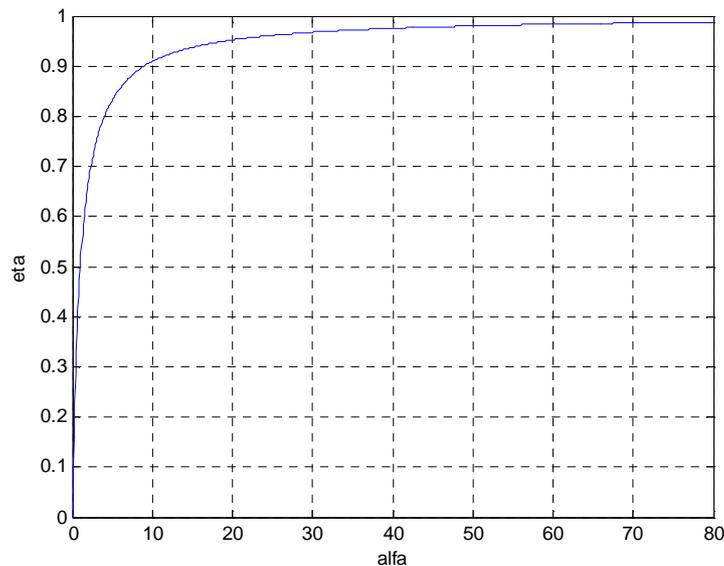


Figura 13 - Andamento del rendimento dello smorzatore in funzione di  $\alpha$

La costante elastica della molla può essere determinata con il metodo della freccia statica, cioè imponendo che sotto carico statico la molla sia compressa di una quantità  $\Delta x$ . Se si assume  $\Delta x = 80 \text{ mm}$  si ha:

$$k = \frac{m g}{\Delta x} = 24525 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (8)$$

Il coefficiente di smorzamento ottimo è [4]:

$$C_{ott} = \sqrt{\frac{k m}{2}} = 1566 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (9)$$

Si può adesso scegliere il rapporto delle resistenze  $\alpha$  per cui il coefficiente di smorzamento medio dello smorzatore elettromagnetico è pari a quello ottimo. Come visto in precedenza il coefficiente di smorzamento non è perfettamente costante con la posizione dello stelo, ma vi sono delle oscillazioni intorno a un valore medio. Per tenere in considerazione questo aspetto si considera un  $C_{ott}$  maggiorato del 10% circa affinché il valore minimo del coefficiente di smorzamento non scenda al di sotto del valore calcolato nella precedente equazione. Quindi si ha:

$$C_{ott} = 1750 \frac{kg}{s} \quad (10)$$

Per ottenere tale valore il rapporto di resistenze dovrà essere pari a:

$$\alpha = 2,35 \quad (11)$$

Il rendimento è:

$$\eta = \frac{\alpha}{1 + \alpha} = 0,701 \quad (12)$$

L'andamento del coefficiente di smorzamento con la posizione dello stelo in questo caso è mostrato in figura 14. Si nota che rispetto al caso di avvolgimenti in cortocircuito le fluttuazioni sono di minore entità, perché all'aumentare della resistenza di carico esterna il circuito assume un carattere maggiormente resistivo e gli effetti dovuti all'autoinduttanza degli avvolgimenti sono ridotti.

La potenza che lo smorzatore deve dissipare e di conseguenza la potenza elettrica generata, sono funzioni dell'indice di regolarità del manto stradale e della velocità della vettura. Si sceglie un indice di irregolarità del manto stradale  $IRI = 3$  e una velocità del veicolo  $V = 80$  km/h; per un'altezza del profilo  $h = 0,03$  m si ricava la frequenza di oscillazione della sospensione [5].

$$f = \frac{V}{\lambda} = 2,22 [Hz] \quad (13)$$

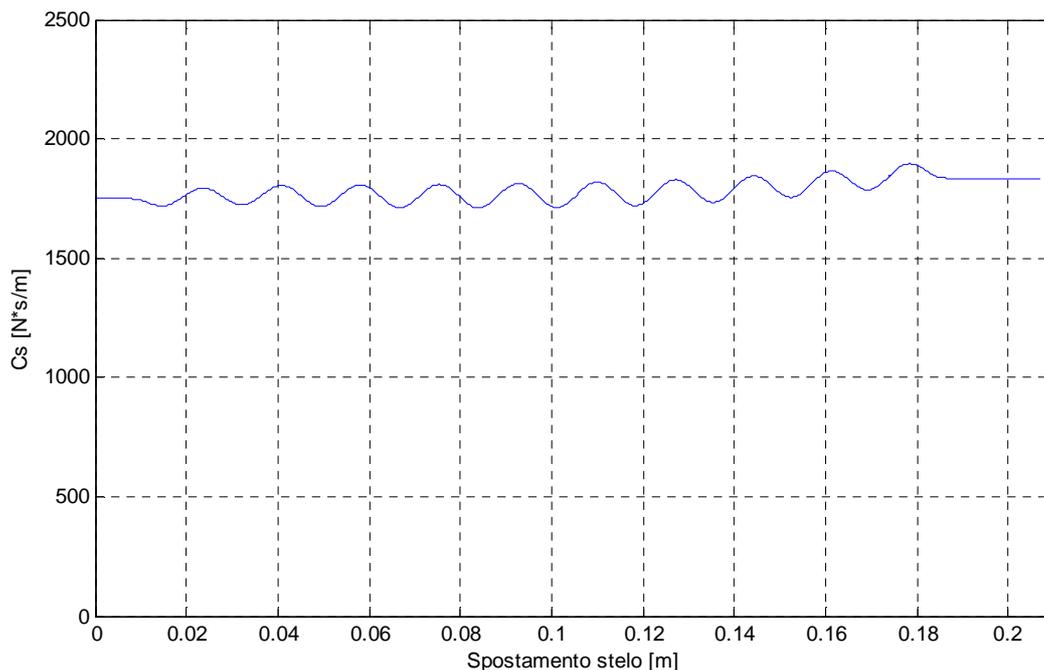


Figura 14 – Coefficiente di smorzamento in funzione dello spostamento dello stelo (con connessione ad un circuito di accumulo)

Per tale frequenza di oscillazione si ricava la potenza elettrica totale generata negli avvolgimenti che ha l'andamento mostrato in figura 15. Il valore medio della potenza generata è :

$$P_{mg} = 102,4 W \quad (14)$$

Questa potenza viene in parte accumulata e in parte dissipata per effetto joule:

$$P_{acc} = P_{mg} \eta = 71,8 W \quad (15)$$

$$P_{diss} = P_{mg}(1 - \eta) = 30.61 \text{ W} \quad (16)$$

La potenza accumulabile considerando l'effetto di tutti e 4 gli smorzatori di qui è dotato il veicolo è quindi circa 280 W.

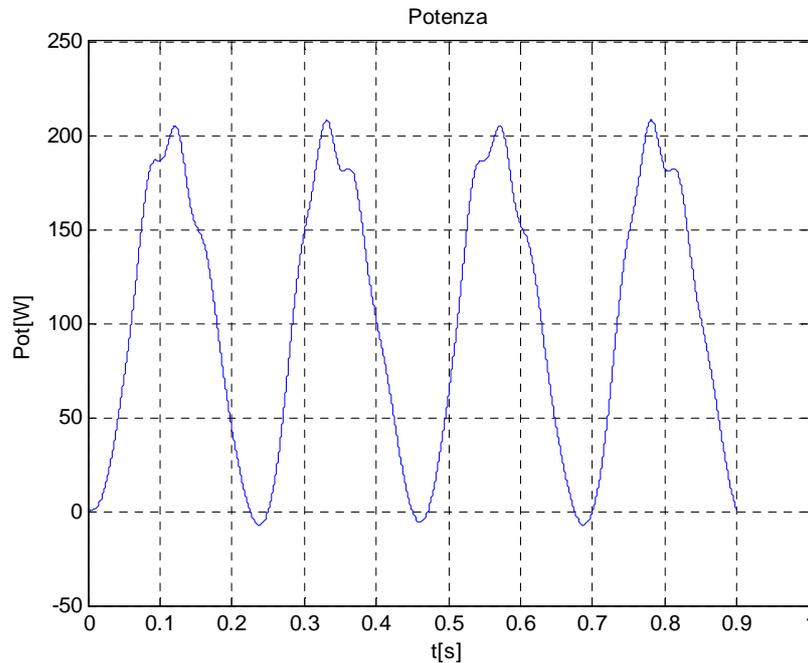


Figura 15 – Andamento della potenza elettrica totale ( 20 avvolgimenti )

#### 4.CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è affrontato lo studio di un ammortizzatore elettromagnetico a recupero di energia per applicazioni automobilistiche.

Nella costruzione degli autoveicoli, oggi, non si prescinde più dall'utilizzo di componenti elettromeccanici in grado di aumentare non solo il confort di guida ma anche la sicurezza e le prestazioni. L'obiettivo principale dei costruttori di mezzi di locomozione è fondato sulla costruzione di vetture a basso consumo, ridotte emissioni di inquinanti e alto rendimento energetico. Si cerca quindi di migliorare ogni componente presente a bordo dei veicoli di moderna concezione.

Le sospensioni, essendo una fonte di dissipazione di energia, possono essere oggetto di studio che porti alla progettazione di sistemi innovativi che consentano il recupero di tale energia. L'avvento di moderni sistemi elettronici consente un'ottima manipolazione dell'energia elettrica e le macchine elettriche sono quelle che hanno i rendimenti più elevati; questo ha spinto gli autori di questo lavoro a studiare un sistema di smorzamento delle vibrazioni di tipo elettromagnetico. I moderni magneti permanenti in terre rare hanno caratteristiche che consentono di realizzare macchine elettriche a magneti permanenti con valori di potenza inconcepibili fino a qualche anno addietro. Si è deciso, quindi, di studiare un generatore lineare a magneti permanenti e ottimizzarlo per il funzionamento da smorzatore di vibrazioni. La realizzazione del modello matematico è stata resa possibile grazie all'utilizzo di software di simulazione numerica. Infatti i valori di campo e flusso magnetico, dapprima calcolati analiticamente, sono stati confermati dall'analisi F.E.M. L'utilizzo del MATLAB e del Simulink ha reso possibile la risoluzione del modello matematico che restituisce tutte le grandezze di interesse al variare delle condizioni di input. Si è visto che la caratteristica smorzante del dispositivo è fortemente dipendente dal valore di resistenza di carico esterna. I moderni sistemi di accumulo di energia elettrica sono in grado di variare gli effetti che questi hanno sui generatori a cui sono connessi, questa caratteristica consente una regolazione del comportamento smorzante della sospensione. Lo smorzatore elettromagnetico è dunque semi-attivo e la variazione del coefficiente di smorzamento

avviene regolando il carico esterno, il comportamento “morbido” e di massimo confort si ha con alti valori di resistenza di carico e quindi con alti valori di potenza accumulata; il comportamento “rigido” si ha quando il sistema di accumulo fornisce una resistenza esterna bassa e di conseguenza accumula a potenze inferiori. Infine si è stimato il valore di potenza recuperata dal sistema di sospensioni quando il veicolo marcia in condizioni ordinarie.

I principali vantaggi di un sistema di sospensioni con smorzatore elettromagnetico sono quindi:

- Aumento dell'autonomia di un autoveicolo elettrico o ibrido, grazie all'energia recuperata dalle sospensioni.
- Aumento delle prestazioni su strada poiché lo smorzatore elettromagnetico è semi-attivo, cioè è possibile variare la sua caratteristica di smorzamento tramite un sistema di controllo elettronico.

Il dispositivo presenta però degli svantaggi: aumentando le frequenze di oscillazione dello stelo gli effetti dell'autoinduttanza degli avvolgimenti sono sempre più evidenti e l'andamento del coefficiente di smorzamento in funzione della posizione dello stelo diviene sempre più instabile intorno al suo valore medio; ciò può avere effetti negativi sul confort dei passeggeri. Con uno studio successivo ci si potrebbe occupare dell'analisi dinamica della sospensione per studiare gli effetti sulle accelerazioni a causa della variazione del coefficiente di smorzamento e cercare di ottimizzare il dispositivo in modo da rendere costante il coefficiente di smorzamento. Un altro svantaggio del sistema è l'elevato costo di realizzazione rispetto a un normale smorzatore viscoso. Dopo avere ottimizzato il suo funzionamento, bisogna valutare se effettivamente i vantaggi del recupero energetico possano giustificare il maggior costo dell'intero sistema.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Goldman, “*Handbook of Modern Ferromagnetic Materials*”, Kluwer Academic Publishers, New York, 1999.
- [2] F. Barozzi, “*Fondamenti di elettrotecnica*” UTET, Milano, 1989.
- [3] J. Reimpell, H. Stoll, J. W. Betzler, “*The Automotive Chassis: Engineering Principles*”, Butterworth-Heinemann, Linacre House Jordan Hill, Oxford 2001.
- [4] G. Genta, “*Meccanica dell'autoveicolo*”, Levrotto & Bella, Torino 1997.
- [5] M. Coni, G. Silanos, F. Annunziata, “*Le vibrazioni indotte dalle irregolarità superficiali del profilo stradale*”, Convegno Nazionale Traffico e Ambiente Trento, 21-25 febbraio 2000.