

COMITATO NAZIONALE PER L'ENERGIA NUCLEARE
Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-74/20(R)
6 Maggio 1974

F.G. Moscati, G. Sacerdoti e M.G. Veca : CALCOLO DELLE
FORZE ESERCITATE SU UNA LASTRA DI ALLUMINIO CHE SI
MUOVE DI MOTO UNIFORME, IN UN CAMPO MAGNETICO
TRASLANTE, AVENTE ANDAMENTO SINUSOIDALE NELLA
DIREZIONE DEL MOTO.

F. G. Moscati^(x), G. Sacerdoti e M. G. Veca^(o): CALCOLO DELLE FORZE ESERCITATE SU UNA LASTRA DI ALLUMINIO CHE SI MUOVE DI MOTO UNIFORME, IN UN CAMPO MAGNETICO TRASLANTE, AVENTE ANDAMENTO SINUSOIDALE NELLA DIREZIONE DEL MOTO.

INTRODUZIONE. -

In relazione allo studio di sospensioni magnetiche per corpi in movimento si è eseguito il calcolo delle forze agenti su un supporto conduttore in moto uniforme lungo l'asse x e immerso in un campo magnetico traslante avente andamento sinusoidale nella direzione del moto (v. Fig. 1). I calcoli sono stati svolti nel caso piano di cui allo schema riportato in Fig. 1, ove si è indicato con s lo spessore della lastra (supposta di lunghezza infinita nella direzione degli assi x e z). Di tale lastra si è preso poi in esame un tratto di profondità (asse z) unitaria. Questa lastra è affacciata (bordo inferiore) ad una successione di conduttori rettilinei e paralleli tra loro, costituenti l'avvolgimento trifase dello statore di un motore asincrono lineare, sistemati in una intercapedine tra un nucleo di ferro e la lastra. Il bordo superiore di questa è affacciato ad una superficie sempre di ferro, supposto di permeabilità infinita. Con t si è indicato il traferro tra la lastra sospesa e la superficie statorica inferiore. Con λ si è indicato il semipasso di avvolgimento ovvero il passo polare.

(x) - Borsista dell'Università di Roma presso l'Istituto di Elettrotecnica.
(o) - Assistente ordinario dell'Università di Roma presso l'Istituto di Elettrotecnica.

2.

Elenco dei simboli usati nel testo

j	= unità immaginaria
ρ	= resistività della lamina ($= 3.5 \times 10^{-8} \Omega m$)
s	= spessore lastra
t	= traferro inferiore
t'	= traferro superiore
λ	= semipasso d'avvolgimento, ovvero passo polare
v_0	= velocità di traslazione della lamina
v	= velocità di traslazione del campo magnetico
f	= frequenza di eccitazione
ω	= pulsazione di eccitazione
f'	= frequenza indotta nella lamina
ω'	= pulsazione indotta nella lamina
\vec{E}	= campo elettrico
\vec{J}	= densità di corrente indotta nella lamina
\vec{B}	= induzione magnetica
\vec{H}	= campo magnetico
μ_0	= permeabilità magnetica del vuoto
M	= modulo di \vec{J}
ϑ	= argomento di \vec{J}
F_y	= forza di sostentamento per unità di superficie
F_x	= forza di trascinamento per unità di superficie
$\overline{P}_{\text{Joule}}$	= potenza media dissipata per effetto Joule nella lamina
$[NI]_{\text{avv}}$	= amperspire di eccitazione

I coefficienti che compaiono nelle espressioni analitiche sono espressi nel sistema MKSQ.

1. - IMPOSTAZIONE DEL PROBLEMA.

I conduttori disposti nella parte di ferro sottostante la lamina generano un campo magnetico che si muove nella direzione dell'asse x con velocità $v = 2\lambda f$, ove f è la frequenza delle correnti impresse ($\omega = 2\pi f$). La lamina, che trasla con velocità v_0 , vede il campo magnetico animato dalla velocità $v - v_0$, pertanto la frequenza della f. e. m. e delle correnti indotte in essa vale:

$$f' = f - \frac{v_0}{2\lambda} = \frac{\omega'}{2\pi} .$$

Si possono anche scrivere le seguenti relazioni:

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} ; \quad \text{rot } \vec{H} = \vec{J} . \quad (1)$$

La prima delle (1), in un sistema di riferimento quale quello di Fig. 1 solidale con la lastra, essendo $\vec{E} = \rho \vec{J}$ (con ρ resistività

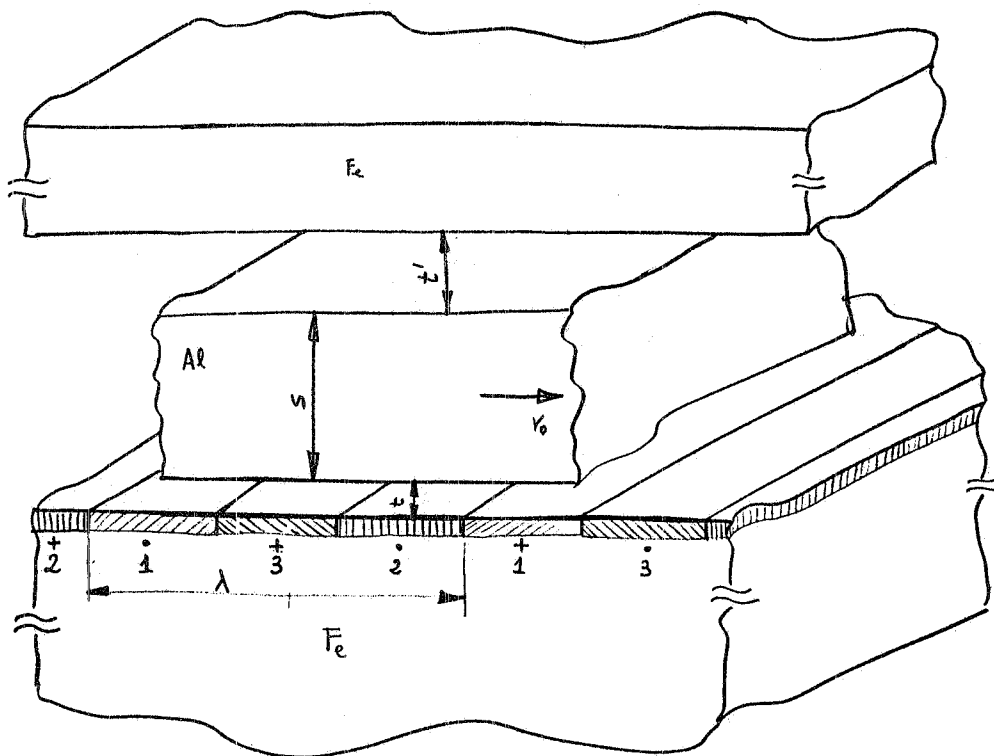


FIG. 1 - Configurazione geometrica della sospensione.

della lamina), $J_x = J_y = 0$ ed inoltre avendo $\vec{B}(x, y)$ un andamento di tipo sinusoidale nel tempo e in x , si traduce nelle seguenti relazioni:

$$B_z = 0 ; \quad \frac{\partial J_z}{\partial y} = -j \frac{\omega'}{\rho} B_x ; \quad \frac{\partial J_z}{\partial x} = j \frac{\omega'}{\rho} B_y . \quad (2)$$

4.

Nelle stesse ipotesi, dalla seconda delle (1) si ricava:

$$\frac{\partial B_x}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial B_y}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu_0 J_z. \quad (3)$$

Ricavando B_x e B_y dalle (2) e sostituendo in (3) si ottiene l'espressione:

$$\frac{\partial^2 J_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 J_z}{\partial y^2} = j \frac{\omega' \mu_0}{\rho} J_z. \quad (4)$$

La precedente costituisce un'equazione differenziale alle derivate parziali da risolvere con le seguenti condizioni al contorno:

1) $y = 0$ (bordo inferiore della lamina)

$$J_z(x=y=0) = J_{z0} \exp(j \frac{\pi}{\lambda} x) \quad (5)$$

2) $y = s$ (bordo superiore della lamina)

$$\left. \frac{dJ_z}{dy} \right|_{y=s} \Big|_{x=x} \equiv B_x = 0.$$

La seconda condizione è determinata dal fatto che al di sopra della lamina conduttrice vi è un nucleo di materiale ferromagnetico supposto non saturato.

2. - DETERMINAZIONE DELLA FUNZIONE DENSITA' DI CORRENTE (J_z) NELLA LASTRA CONDUTTRICE.

Si può dimostrare che nella (4) la funzione incognita $J_z = J_z(x, y, t)$ è del tipo:

$$J_z(x, y, t) = J_z(y) \exp(j \left[2\pi f' t + \frac{\pi}{\lambda} x \right]) \quad (6)$$

ove $J_z(y)$ è una funzione complessa del tipo $m(y) + jn(y)$.

Per risolvere la (4) si sostituisce in essa la (6) ottenendo quindi l'equazione differenziale (7) cui $J_z(y)$ deve soddisfare:

$$\frac{d^2 J_z(y)}{dy^2} - (a + jb) J_z(y) = 0 \quad (7)$$

ove

$$a = \frac{\pi^2}{\lambda^2} ; \quad b = \frac{2\pi f'}{\rho} \mu_0 .$$

La (7) è un'ordinaria equazione differenziale omogenea del 2° ordine a coefficienti complessi, il cui integrale generale ha la seguente espressione :

$$J_z(y) = A e^{-(\sqrt{a+jb})y} + B e^{(\sqrt{a+jb})y} \quad (8)$$

con A e B costanti arbitrarie di integrazione da determinarsi in base alle condizioni al contorno (5) precedentemente viste. Le (5) sostituite in (8) danno :

$$A + B = J_{z0} ; \quad A - B e^{2s\sqrt{a+jb}} = 0 . \quad (9)$$

Risolvendo il precedente sistema si ha :

$$A = \frac{J_{z0}}{1 + e^{-2s\sqrt{a+jb}}} ; \quad B = \frac{J_{z0}}{1 + e^{2s\sqrt{a+jb}}} . \quad (10)$$

Introducendo la rappresentazione polare per i numeri complessi si ha :

$$a + jb = Q e^{j\phi}$$

ove

$$Q = \sqrt{a^2 + b^2} ; \quad \phi = \arctg \frac{b}{a}$$

da cui :

$$\sqrt{a + jb} = \sqrt{Q} e^{j\frac{\phi}{2}} = \sqrt{Q} (\cos \frac{\phi}{2} + j \sen \frac{\phi}{2}) . \quad (11)$$

Con tali notazioni la seconda delle (10) si scrive nel seguente modo :

$$B = \frac{J_{z0}}{R + jZ} = B_1 + jB_2 \quad (12)$$

ove

$$R = 1 + e^{2s\sqrt{Q} \cos \frac{\phi}{2}} \left[\cos (2s\sqrt{Q} \sen \frac{\phi}{2}) \right]$$

$$Z = e^{2s\sqrt{Q} \cos \frac{\phi}{2}} \left[\sen (2s\sqrt{Q} \sen \frac{\phi}{2}) \right] .$$

Dalla prima delle (9) si ricava :

$$A = J_{z0} - B = A_1 + jA_2 \quad (13)$$

6.

ove :

$$A_1 = J_{z0} - B_1 ; \quad A_2 = -B_2 .$$

Le (12) e (13) introdotte in (8) portano alla seguente espressione di $J_z(y)$:

$$J_z(y) = (A_1 + jA_2) e^{-y\sqrt{a+jb}} + (B_1 + jB_2) e^{y\sqrt{a+jb}} = V + jW \quad (14)$$

con V e W funzioni della sola y .

Facendo uso della (14) e della (6) la funzione che descrive l'andamento della densità di corrente nella lastra conduttrice potrà scriversi :

$$J_z(x, y, t) = \sqrt{V^2 + W^2} \operatorname{sen} \left[\omega t + \operatorname{arctg} \frac{W}{V} + \frac{\pi}{\lambda} x \right] = M \operatorname{sen} [\omega t + \theta] \quad (15)$$

con

$$|M(y)| = \sqrt{V^2 + W^2} , \quad (16)$$

e

$$\theta(x, y) = \operatorname{arctg} \left(\frac{W}{V} \right) + \frac{\pi}{\lambda} x .$$

3. - DETERMINAZIONE DELLA FORZA DI SOSTENTAMENTO.

Ai fini del calcolo della forza di sostentamento esercitata sulla lamina conduttrice dal campo traslante si utilizza la II^a formula di Laplace :

$$dF_y = I_z dz \cdot B_x \quad (17)$$

con :

$$I_z = J_z(x, y, t) dx dy .$$

Si ottiene allora :

$$dF_y(x, y, t) = J_z(x, y, t) \cdot B_x(x, y, t) dx dy dz . \quad (18)$$

Considerando un tratto di lamina di dimensione unitaria nella direzione dell'asse z ed estendendo l'integrazione allo spessore s della lamina ed ad un passo intero di avvolgimento (2λ), si avrà :

$$F_y(t) = \int_0^s \int_0^{2\lambda} J_z(x, y, t) \cdot B_x(x, y, t) dx dy . \quad (19)$$

Poichè:

$$B_x(x, y, t) = -\rho \int_0^t \frac{\partial J_z(x, y, t)}{\partial y} dt = -\rho \int_0^t \left\{ \frac{\partial M}{\partial y} \text{sen}[\omega't + \theta] + \right. \\ \left. + M \frac{\partial \theta}{\partial y} \cos[\omega't + \theta] \right\} dt = \frac{\rho}{\omega'} \left\{ \frac{\partial M}{\partial y} [\cos(\omega't + \theta) - \cos \theta] - \right. \\ \left. - M \frac{\partial \theta}{\partial y} [\text{sen}(\omega't + \theta) - \text{sen} \theta] \right\}$$

si avrà per la (19) una espressione del tipo:

$$F_y(t) = \int_0^s \int_0^{2\lambda} [M \text{sen}(\omega't + \theta)] \frac{\rho}{\omega'} \left\{ \frac{\partial M}{\partial y} [\cos(\omega't + \theta) - \cos \theta] - \right. \\ \left. - M \frac{\partial \theta}{\partial y} [\text{sen}(\omega't + \theta) - \text{sen} \theta] \right\} dx dy. \quad (20)$$

Per cui il valore medio della (20) sarà:

$$\overline{F}_y = -\frac{\rho}{2\pi} \int_0^{1/f'} \int_0^s \int_0^{2\lambda} M^2 \frac{\partial \theta}{\partial y} \text{sen}^2(\omega't + \theta) dx dy dt = \\ = -\frac{\rho}{2\omega'} \int_0^s \int_0^{2\lambda} M^2(y) \frac{\partial \theta(x, y)}{\partial y} dx dy \quad (21)$$

per ottenere dalla (21) la forza di sostentamento specifica (per unità di superficie di lamina) si divide per 2 .

La (21) è stata valutata mediante tecniche numeriche (il relativo programma di calcolo è riportato nell'Appendice B) avendo calcolato in modo discreto le funzioni analitiche $M(y)$ e $[\partial \theta(x, y)] / \partial y$.

4. - DETERMINAZIONE DELLA FORZA DI TRASCINAMENTO.

Analogamente a quanto fatto nel paragrafo precedente, la forza di trascinamento agente sulla lamina, è data da :

$$dF_x(x, y, t) = J_z(x, y, t) \cdot B_y(x, y, t) dx dy dz \quad (22)$$

ed integrando la (22) rispetto ad x e a y si ha:

8.

$$F_x(t) = \int_0^s \int_0^{2\lambda} J_z(x, y, t) B_y(x, y, t) dx dy . \quad (23)$$

Tenendo presente la seconda delle (2):

$$\begin{aligned} B_y(x, y, t) &= \rho \int_0^t \frac{\partial J_z(x, y, t)}{\partial x} dt = \rho \int_0^t M \left[\cos(\omega't + \theta) \right] \frac{\partial \theta}{\partial x} dt = \\ &= \frac{\rho M}{\omega'} \frac{\partial \theta}{\partial x} \left[\text{sen}(\omega't + \theta) - \text{sen} \theta \right] \end{aligned}$$

La (23) diventa:

$$F_x(t) = \int_0^s \int_0^{2\lambda} \rho \frac{M^2}{\omega'} \frac{\partial \theta}{\partial x} \left[\text{sen}(\omega't + \theta) - \text{sen} \theta \right] \left[\text{sen}(\omega't + \theta) \right] dx dy . \quad (24)$$

Il valor medio della (24) sarà allora:

$$\begin{aligned} \overline{F}_x &= \frac{\rho}{2\pi} \int_0^{1/f'} \int_0^s \int_0^{2\lambda} M^2 \frac{\partial \theta}{\partial x} \text{sen}^2(\omega't + \theta) dx dy dt = \\ &= \frac{\rho \pi}{2 \omega' \lambda} \int_0^s \int_0^{2\lambda} M^2(y) dx dy \end{aligned} \quad (25)$$

per avere la forza per metro quadrato di lastra basta dividere per $2\lambda \times 1 \text{ m}^2$. Il calcolo della F_x è stato fatto analogamente al caso precedente mediante discretizzazione delle funzioni con l'ausilio di un elaboratore (Il relativo programma di calcolo è in Appendice B).

5. - DETERMINAZIONE DELLE PERDITE E DELLE AMPERSPIRE DI ECCITAZIONE.

La potenza dissipata nell'unità di volume della lamina avrà la seguente espressione:

$$\begin{aligned} \overline{P}_{\text{Joule}} &= \frac{\rho f'}{2\lambda s} \int_0^{1/f'} \int_0^s \int_0^{2\lambda} J_z^2(x, y, t) dx dy dt = \\ &= \frac{\rho}{4\pi \lambda s} \int_0^{1/f'} \int_0^s \int_0^{2\lambda} M^2 \text{sen}^2(\omega't + \theta) d(\omega't + \theta) dx dy = \end{aligned} \quad (26)$$

$$= \frac{\rho}{4\lambda s} \int_0^s \int_0^{2\lambda} M^2(y) dx dy = \frac{\rho}{2s} \int_0^s M^2(y) dy .$$

Il valore della \bar{P}_{Joule} è espresso in watt per metro cubo; per il calcolo si veda l'Appendice B.

Per calcolare, in prima approssimazione, il valore minimo delle amperspire efficaci^(x) per metro lineare necessarie alla creazione del campo magnetico ed al sollevamento della lamina ci si può riferire alla Fig. 2.

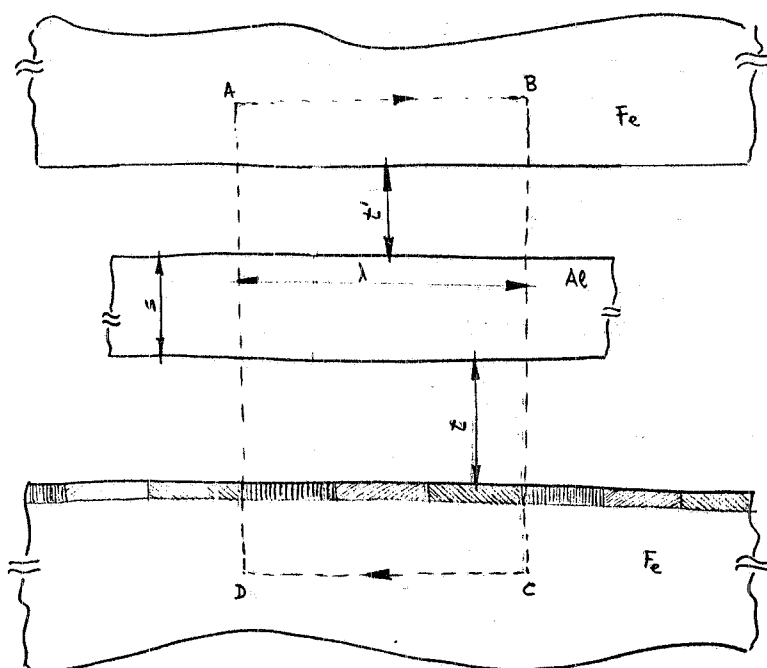


FIG. 2 - Circuitazione del campo magnetico.

Applicando il teorema della circuitazione alla linea chiusa ABCD di Fig. 2, si avrà:

$$\begin{aligned} [NI]_{\text{avv}} + \int_0^{\lambda} \int_0^s J_z(x, y, t) dx dy &= \\ &= \int_A^D \bar{H}_y(x, y) \times \bar{d}y + \int_C^B \bar{H}_y(x+\lambda, y) \times \bar{d}y . \end{aligned} \quad (27)$$

(x) - definiamo come amperspire efficaci il valore massimo dell'integrale delle amperspire necessarie a generare il campo magnetico per una lunghezza d'onda λ diviso per $\sqrt{2\lambda}$.

Nella (27) il termine $[\text{NI}]_{\text{avv}}$ rappresenta il valore delle amperspire relative ad un semipasso dell'avvolgimento di eccitazione (λ). La (27) è valida trascurando i due termini della circuitazione relativi ai tratti \overline{AB} e \overline{CD} che si sviluppano nel ferro non saturato (secondo quanto stabilito nelle ipotesi iniziali). Si consideri l'avvolgimento di eccitazione costituito da una distribuzione superficiale trifase di passo 2λ , si trascuri il traferro superiore t' (cioè si è supposta la massa di ferro superiore a contatto con la lastra di alluminio) ed analogamente trascuriamo il traferro inferiore t . Quando lo scorrimento tra campo magnetico e lamina è uguale a uno (lamina ferma), si ha $\omega = \omega'$ (cioè la frequenza delle correnti indotte nella lastra è uguale alla frequenza di eccitazione). In tali condizioni si può considerare un unico riferimento per la lamina; pertanto la $[\text{NI}]_{\text{avv}}$ avrà una espressione del tipo:

$$[\text{NI}]_{\text{avv}} = (\text{NI})_m \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{\lambda} x \right).$$

Tenendo presente la terza delle (2), e che i due termini a secondo membro della (27) sono tra loro uguali si ha:

$$\begin{aligned} (\text{NI})_m \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{\lambda} x \right) = & - \int_0^s \int_0^\lambda J_z(x, y, t) dx dy + \\ & + \frac{2\rho}{\mu_0} \int_0^t \int_0^s \left[\frac{\partial J_z(x, y, t)}{\partial x} \right] dy dt. \end{aligned} \quad (28)$$

Ricordando la (15) e la (16) e ponendo $\theta' = \text{arctg} \frac{W(y)}{V(y)}$, la (28) si potrà scrivere:

$$\begin{aligned} (\text{NI})_m \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{\lambda} x \right) = & - \int_0^s \int_0^\lambda M(y) \text{sen}(\omega t + \theta) dx dy + \\ & + \frac{2\rho}{\mu_0} \int_0^t \int_0^s M(y) \cos(\omega t + \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} dy dt. \end{aligned} \quad (29)$$

Il valore efficace delle amperspire di eccitazione varrà:

$$\text{NI}_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{(K1)^2}{2} + \frac{(K2)^2}{2}} \quad (30)$$

ove:

$$K1 = \frac{2\rho\pi}{\lambda\mu_0\omega} \int_0^s M(y) \text{sen } \theta' dy - \frac{2\lambda}{\pi} \int_0^s M(y) \text{cos } \theta' dy$$

$$K2 = \frac{2\lambda}{\pi} \int_0^s M(y) \text{sen } \theta' dy + \frac{2\rho\pi}{\lambda\mu_0\omega} \int_0^s M(y) \text{cos } \theta' dy .$$

Tutti i passaggi relativi alle precedenti espressioni sono riportati in Appendice A.

6. - RISULTATI E CONCLUSIONI.

In relazione alla struttura di Fig. 1 si sono calcolate, per via numerica, le entità delle grandezze meccaniche (forza di trascinamento e di sostentamento) e della potenza dissipata per effetto Joule nella lastra traslante, per diversi valori dei parametri caratteristici della struttura stessa, sia geometrici che elettrici.

In particolare i parametri che sono stati oggetto di variazione sono i seguenti:

- a) spessore della lastra $s = (1 \div 13) \text{ mm}$;
- b) passo d'avvolgimento $2\lambda = (2 \div 40) \text{ cm}$;
- c) frequenza di eccitazione $f = (5 \div 900) \text{ Hz}$;
- d) scorrimento $sc = \frac{v - v_0}{v} = (0.1 \div 1)$.

I risultati numerici dei casi studiati sono riportati nelle Tabelle I - IX e sono stati calcolati per un valore base di Amperspire efficaci di eccitazione per metro lineare di avvolgimento (asse x) pari a 10.000 Asp/m. Tali risultati sono facilmente riportabili ad un generico valore NI delle Amperspire di eccitazione moltiplicandoli per il coefficiente K pari a:

$$K = \left(\frac{NI}{10.000} \right)^2 . \quad (31)$$

In Tabella IX sono riportati, per alcuni dei casi esaminati, i valori assunti dalla potenza in gioco nell'avvolgimento di eccitazione a meno della dissipazione per effetto Joule nell'avvolgimento stesso. Tale potenza è la somma della potenza dissipata per effetto Joule nella lamina pari a $\bar{P} \cdot s$ e di quella necessaria al trascinamento della lamina pari a $F_x \cdot v_0$.

E' da notare che per $sc = 1$ questa potenza si riduce al solo primo termine ($v_0 = 0$).

Per alcuni casi esaminati si sono tracciati gli andamenti delle forze e delle potenze in funzione dei parametri variati. Tali curve sono riportate nelle Figure 3 - 8.

Dalle Figg. 3 e 4 si rileva un identico effetto delle variazioni di f e di λ sulle forze di trascinamento e sostentamento. Ciò si spiega quando si tenga presente l'espressione della velocità del campo magnetico $v = 2\lambda f$, per cui le variazioni di λ ed f equivalgono a variazioni di v . L'andamento della F_y si giustifica tenendo presente che in base al procedimento eseguito essa risulta proporzionale al quadrato della corrente indotta e che quest'ultima, per elevate velocità del campo inducente, tende a rimanere costante a causa della reazione smagnetizzante di indotto. Inoltre è facile riconoscere nell'andamento di F_x la tipica caratteristica meccanica delle macchine asincrone.

Nella Fig. 5 l'andamento di F_y con lo spessore è spiegabile con la contemporanea diminuzione di resistenza della lamina e conseguente aumento della corrente indotta, mentre F_x diminuisce secondo una legge pressochè quadratica, come del resto è confermato dalla teoria delle macchine asincrone.

Per quanto concerne le perdite per effetto Joule nella lamina si ha lo stesso andamento rilevato per la forza di sostentamento, sia in funzione della frequenza che del semipasso di avvolgimento. In funzione dello spessore della lamina si osserva la caratteristica diminuzione di potenza dissipata, diminuzione dovuta alla minore resistenza della lamina stessa.

La Fig. 6 riporta l'andamento della forza di sostentamento in funzione dello scorrimento per alcune configurazioni geometriche ed elettriche. Tali curve si possono utilizzare per individuare il valore di scorrimento per cui una data lamina (di peso unitario noto e supportante un dato carico) inizia il sostentamento.

λ_{cm} sc	1	3	4	5	7	10	15	20
0.1	0.002	0.08	0.12	0.14	0.15	0.16	0.16	0.16
0.2	0.007	0.32	0.48	0.56	0.61	0.63	0.63	0.63
0.3	0.016	0.72	1.1	1.26	1.38	1.41	1.42	1.42
0.4	0.028	1.3	1.9	2.24	2.45	2.51	2.53	2.53
0.5	0.044	2.0	3.0	3.5	3.8	3.9	3.95	3.96
0.6	0.064	2.9	4.3	5.0	5.5	5.65	5.7	5.7
0.7	0.087	3.9	5.9	6.9	7.5	7.7	7.7	7.7
0.8	0.11	5.1	7.7	9.0	9.8	10.0	10.1	10.1
0.9	0.14	6.5	9.8	11.3	12.4	12.7	12.8	12.8
1.0	0.18	8.0	12.1	14.0	15.3	15.7	15.8	15.8

TABELLA I - Forza di sostentamento per unità di superficie (F_y) in kg/m^2 in funzione del semipasso d'avvolgimento (λ) espresso in cm, per diversi valori di scorrimento (sc). Spessore della lamina: $s = 3$ mm; frequenza di eccitazione: $f = 50$ Hz; amperspire efficaci di eccitazione: $10.000/m$; peso proprio lamina: $8.1 kg/m^2$.

λ_{cm} sc	1	3	4	5	7	10	15	20
0.1	0.38	5.0	5.6	5.2	4.1	2.9	1.96	1.5
0.2	0.77	10.0	11.3	10.0	8.15	5.8	3.9	2.9
0.3	1.15	15.1	17.0	15.7	12.2	8.7	5.9	4.4
0.4	1.54	20.2	22.6	21.0	16.3	11.7	7.8	5.9
0.5	1.92	25.2	28.3	26.2	20.4	14.6	9.8	7.3
0.6	2.31	30.2	34.0	31.4	24.4	17.5	11.7	8.8
0.7	2.69	35.3	39.6	36.7	28.5	20.4	13.7	10.3
0.8	3.10	40.3	45.3	41.9	32.6	23.3	15.7	11.8
0.9	3.46	45.3	51.0	47.1	36.6	26.2	17.6	13.2
1.0	3.84	50.4	56.5	52.3	40.7	29.2	19.6	14.7

TABELLA II - Forza di trascinamento per unità di superficie (F_x) in kg/m^2 in funzione del semipasso di avvolgimento (λ) espresso in cm, per diversi valori di scorrimento (sc). Spessore della lamina: $s = 3$ mm; frequenza di eccitazione: $f = 50$ Hz; amperspire efficaci di eccitazione: $10.000/m$; peso proprio lamina: $8.1 kg/m^2$.

s _{mm}	1	3	5	7	10	13
	2.7	8.1	13.5	18.9	27.0	35.1
sc	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²
0.1	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13
0.2	0.48	0.48	0.48	0.48	0.49	0.52
0.3	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.16
0.4	1.95	1.9	1.9	1.9	1.9	2.0
0.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1
0.6	4.4	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
0.7	5.9	5.9	5.8	5.8	5.7	5.7
0.8	7.8	7.7	7.6	7.5	7.4	7.2
0.9	9.8	9.8	9.6	9.5	9.1	8.8
1.0	12.2	12.1	11.9	11.6	11.1	10.5

TABELLA III - Forza di sostentamento per unità di superficie (F_y) in kg/m² in funzione dello spessore (s) della lamina espresso in mm, per diversi valori di scorrimento (sc). Semipasso di avvolgimento: $\lambda = 4$ cm; amperspire efficaci di eccitazione: 10.000/m con una frequenza (f) di 50 Hz.

0.1	0.16	0.16	0.16	0.16	0.19	0.24
0.2	0.63	0.63	0.64	0.66	0.75	0.94
0.3	1.42	1.42	1.44	1.48	1.66	2.1
0.4	2.53	2.53	2.55	2.62	2.9	3.5
0.5	3.95	3.96	3.98	4.1	4.5	5.3
0.6	5.7	5.7	5.7	5.8	6.3	7.2
0.7	7.7	7.7	7.8	7.9	8.4	9.3
0.8	10.1	10.1	10.2	10.3	10.7	11.4
0.9	12.8	12.8	12.8	12.9	13.1	13.6
1.0	15.8	15.8	15.8	15.8	15.7	15.7

TABELLA III bis - Come la Tab. III ad eccezione del valore del semipasso di avvolgimento $\lambda = 20$ cm.

s mm sc	1	3	5	7	10	13
	2.7 kg/m ²	8.1 kg/m ²	13.5 kg/m ²	18.9 kg/m ²	27.0 kg/m ²	35.1 kg/m ²
0.1	17.0	5.6	3.4	2.5	2.0	1.7
0.2	34.0	11.3	6.9	5.0	3.8	3.3
0.3	51.0	17.0	10.3	7.5	5.7	5.0
0.4	68.0	22.6	13.7	10.0	7.6	6.5
0.5	85.0	28.3	17.0	12.5	9.4	8.0
0.6	102	34.0	20.0	15.0	11.0	9.4
0.7	119	39.6	24.0	17.0	13.0	11.0
0.8	136	45.3	27.0	20.0	14.0	12.0
0.9	153	51.0	30.0	22.0	16.0	13.0
1.0	170	56.5	34.0	24.0	17.5	14.0

TABELLA IV - Forza di trascinamento per unità di superficie della lamina (F_x) espressa in kg/m² in funzione dello spessore della lamina (s) espresso in mm per diversi valori di scorrimento (sc). Semipasso di avvolgimento $\lambda = 4$ cm; amperspire efficaci di eccitazione = 10.000/m ad una frequenza di 50 Hz.

0.1	4.4	1.5	0.9	0.66	0.5	0.5
0.2	8.8	2.9	1.8	1.3	1.0	1.0
0.3	13.2	4.4	2.7	2.0	1.5	1.5
0.4	17.6	5.9	3.6	2.6	2.0	1.9
0.5	22.0	7.3	4.4	3.3	2.5	2.3
0.6	26.4	8.8	5.3	3.9	3.0	2.7
0.7	31.0	10.3	6.2	4.5	3.4	3.0
0.8	35.0	11.8	7.1	5.1	3.8	3.2
0.9	39.0	13.2	8.0	5.7	4.2	3.5
1.0	44.0	14.7	8.8	6.3	4.5	3.6

TABELLA IV bis - Come in Tab. IV ad eccezione del valore del semipasso di avvolgimento $\lambda = 20$ cm.

f \ sc	$16\frac{2}{3}$	50	60	100	400	900
0.1	0.04	0.12	0.13	0.15	0.17	0.23
0.2	0.17	0.48	0.52	0.59	0.68	0.9
0.3	0.38	1.1	1.2	1.3	1.53	2.0
0.4	0.67	1.9	2.1	2.3	2.7	3.4
0.5	1.1	3.0	3.2	3.6	4.2	5.2
0.6	1.5	4.3	4.7	5.3	5.9	7.0
0.7	2.1	5.9	6.4	7.2	8.0	9.2
0.8	2.7	7.7	8.3	9.4	10.3	11.3
0.9	3.4	9.8	10.5	11.8	12.8	13.5
1.0	4.2	12.1	13.0	14.6	15.6	15.6

TABELLA V - Forza di sostentamento per unità di superficie (F_y) in kg/m^2 in funzione della frequenza di eccitazione (f) per diversi valori di scorrimento (sc). Semipasso d'avvolgimento $\lambda = 4$ cm; spessore della lamina $s = 3$ mm; amperspire efficaci d'eccitazione: 10.000/m.

0.1	0.16	0.24	0.25	0.25	0.25	0.26
0.2	0.66	0.94	0.98	0.98	0.98	1.0
0.3	1.5	2.1	2.1	2.1	2.2	2.2
0.4	2.6	3.5	3.7	3.7	3.7	3.8
0.5	4.1	5.3	5.5	5.5	5.5	5.6
0.6	5.8	7.2	7.5	7.5	7.5	7.7
0.7	7.9	9.3	9.5	9.5	9.6	9.8
0.8	10.2	11.4	11.7	11.7	11.7	11.9
0.9	12.8	13.6	13.8	13.8	13.8	14.1
1.0	15.6	15.7	15.9	15.9	15.9	16.2

TABELLA V bis - Come in Tab. V, ma con un semipasso d'avvolgimento $\lambda = 20$ cm ed uno spessore della lamina $s = 13$ mm.

f \ sc	5	$16\frac{2}{3}$	50	60	100	400	900
0.1	2.38	5.9	5.6	5.1	3.5	1.0	0.6
0.2	4.75	11.9	11.3	10.2	6.9	2.0	1.2
0.3	7.13	17.9	17.0	15.2	10.3	3.0	1.7
0.4	9.5	23.8	22.6	20.3	13.7	4.0	2.3
0.5	11.9	29.8	28.3	25.4	17.2	4.9	2.8
0.6	14.3	35.7	34.0	30.5	20.6	5.8	3.2
0.7	16.6	41.7	39.6	35.5	24.0	6.7	3.5
0.8	19.0	47.7	45.3	40.6	27.4	7.6	3.8
0.9	21.4	53.6	51.0	45.6	30.8	8.5	4.1
1.0	23.8	59.6	56.5	50.7	34.2	9.3	4.4

TABELLA VI - Forza di trascinamento (F_x) per unità di superficie della lamina in kg/m^2 in funzione della frequenza (f) di eccitazione per diversi valori di scorrimento (sc). Semipasso di avvolgimento $\lambda = 4$ cm; spessore della lamina $s = 3$ mm; amperspire efficaci di eccitazione: 10.000/m.

0.1	3.2	1.1	0.5	0.48	0.38	0.2	0.12
0.2	6.5	2.15	1.0	0.9	0.73	0.37	0.25
0.3	9.8	3.2	1.5	1.4	1.1	0.54	0.36
0.4	13.0	4.3	1.9	1.8	1.4	0.7	0.47
0.5	16.2	5.3	2.3	2.1	1.6	0.8	0.56
0.6	19.5	6.3	2.7	2.5	1.9	0.95	0.64
0.7	22.7	7.4	3.0	2.7	2.1	1.1	0.71
0.8	25.9	8.3	3.2	2.9	2.3	1.1	0.77
0.9	29.2	9.3	3.5	3.1	2.4	1.2	0.8
1.0	32.4	10.3	3.6	3.3	2.5	1.3	0.9

TABELLA VI bis - Come in Tab. VI, ma con un semipasso di avvolgimento $\lambda = 20$ cm ed uno spessore della lamina $s = 13$ mm.

λ \ sc	1	3	4	5	7	10	15	20
0.1	0.13	4.9	7.4	8.5	9.3	9.5	9.6	9.6
0.2	0.5	19.8	29.6	34.0	37.3	38.0	38.4	38.4
0.3	1.13	44.5	66.6	77.0	83.8	85.8	86.4	86.4
0.4	2.0	79.0	118	137	149	153	154	154
0.5	3.14	123	185	214	233	238	240	240
0.6	4.5	178	266	308	335	343	345	346
0.7	6.2	242	362	419	456	467	470	470
0.8	8.0	316	473	547	596	610	614	614
0.9	10.2	400	599	693	754	772	776	777
1.0	12.6	493	739	855	930	952	958	959

TABELLA VII - Potenza per unità di volume, dissipata per effetto Joule (P) nella lamina espressa in kW/m³ di materiale in funzione del semipasso di avvolgimento (λ) espresso in cm, per diversi valori di scorrimento (sc). Spessore dell'alluminio s = 3 mm; amperspire efficaci di eccitazione: 10.000/m con una frequenza f = 50 Hz.

s _{mm} \ sc	1	3	5	7	10	13
0.1	66.5	7.4	2.7	1.4	0.75	0.5
0.2	266	29.6	10.8	5.6	3.0	2.0
0.3	598	66.6	24.2	12.7	6.7	4.5
0.4	1060	118	43.0	22.4	11.8	7.8
0.5	1660	185	67.0	35.0	18.4	12.1
0.6	2390	266	96.0	50.0	26.2	17.0
0.7	3260	362	131	68.0	35.2	22.7
0.8	4250	473	171	88.0	45.3	29.0
0.9	5380	599	216	111	56.5	35.6
1.0	6650	739	267	137	68.6	42.7

TABELLA VII bis - Potenza dissipata per unità di volume di materiale nella lamina (P) per effetto Joule espressa in kW/m³, in funzione dello spessore dell'alluminio (s) espresso in mm, per diversi valori dello scorrimento (sc). Semipasso di avvolgimento $\lambda = 4$ cm; amperspire efficaci di eccitazione: 10.000/m con una frequenza f = 50 Hz.

f \ sc	5	$16\frac{2}{3}$	50	60	100	400	900
0.1	0.31	2.6	7.4	7.9	8.9	10.5	14.1
0.2	1.24	10.3	29.6	32.0	35.9	41.8	55.9
0.3	2.8	23.3	66.6	72.0	81.0	93.6	123
0.4	4.9	41.4	118	127	144	165	213
0.5	7.7	64.6	185	199	224	256	322
0.6	11.2	93.0	266	286	323	366	446
0.7	15.2	127	362	390	439	494	581
0.8	19.9	165	473	509	573	637	725
0.9	25.0	209	599	644	725	796	874
1.0	31.0	258	739	795	894	969	1030

TABELLA VIII - Potenza dissipata per effetto Joule nell'unità di volume di alluminio (P) espressa in kW/m³ in funzione della frequenza dell'eccitazione (f), per diversi valori dello scorrimento (sc). Spessore lamina: s = 3 mm; semipasso di avvolgimento: $\lambda = 4$ cm; amperspire efficaci di eccitazione: 10.000/m.

0.1	0.5	0.54	0.78	0.92	1.54	6.2	14.1
0.2	1.9	2.1	3.1	3.6	6.1	24.4	55.0
0.3	4.4	4.8	6.7	8.0	13.3	53.6	122
0.4	7.8	8.5	11.6	13.8	23.0	92	209
0.5	12.2	13.3	17.5	20.6	34.0	138	314
0.6	17.6	19.0	24.2	28.4	47.0	190	431
0.7	24.0	25.8	31.5	36.8	61.0	245	558
0.8	31.0	33.4	39.0	45.5	75.0	304	690
0.9	39.6	42.0	47.0	54.5	91.0	363	826
1.0	48.8	51.3	55.0	63.7	106	423	963

TABELLA VIII bis - Come in Tab. VIII, ma con un valore di spessore della lamina s = 13 mm ed un semipasso di avvolgimento $\lambda = 20$ cm.

λ sc	4 cm s=13 mm	20 cm s=3 mm
0.1	65.7	288
0.3	194	864
0.5	314	1440
0.7	421	2016
1.0	554	2878

TABELLA IX - Potenza in gioco nell'avvolgimento di eccitazione per metro lineare (W/m), a meno della dissipazione per effetto Joule nell'avvolgimento stesso.
f = 50 Hz.

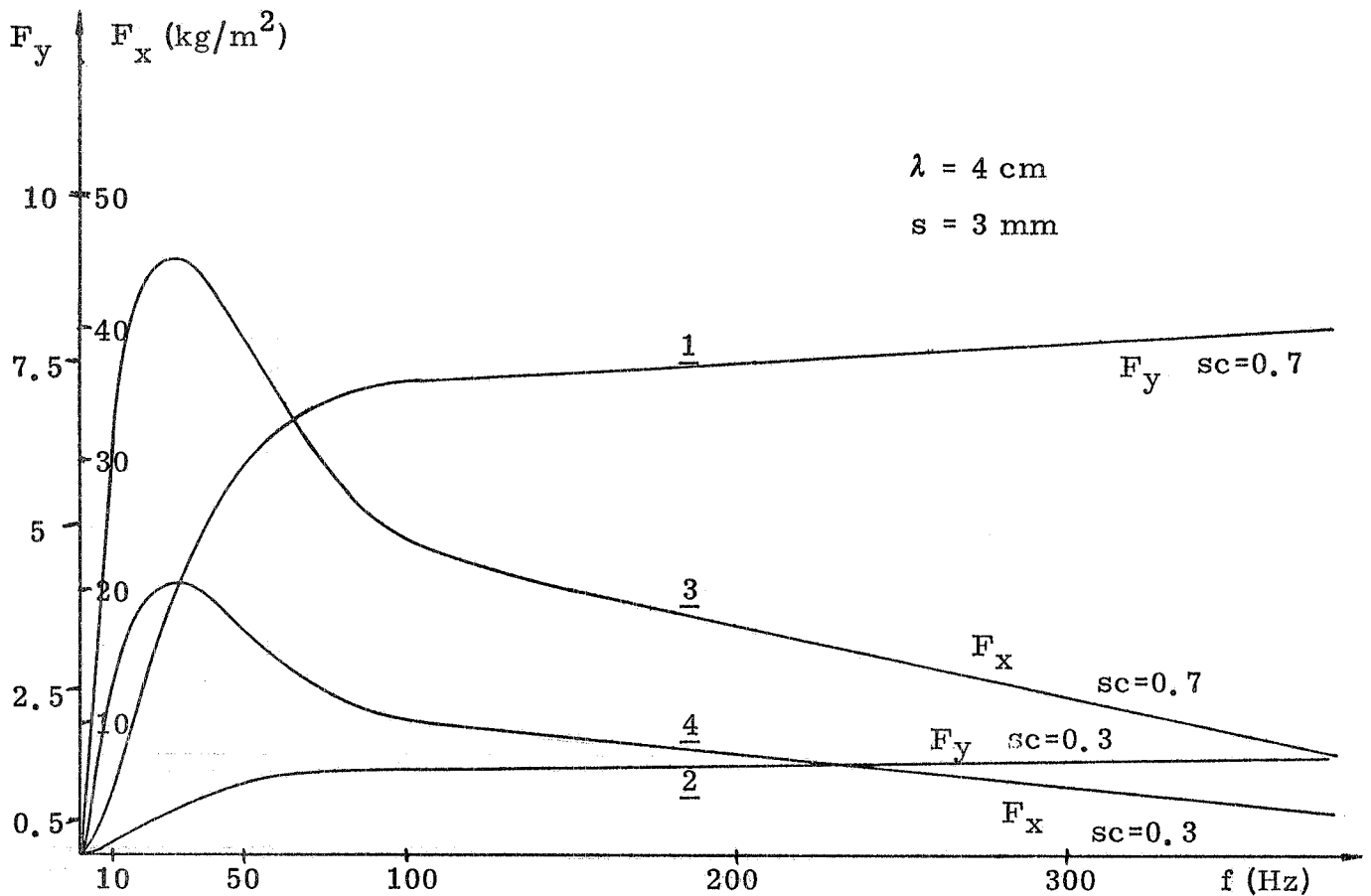


FIG. 3 - Le quattro curve si riferiscono a due e due, rispettivamente, alla forza di sostentamento specifica (F_y), espressa in kg/m^2 , che agisce sulla lamina ed alla relativa forza specifica di trascinamento (F_x), anch'essa espressa in kg/m^2 , in funzione della frequenza di eccitazione (f).

La curva 1 è stata tracciata per un valore dello scorrimento (sc) pari a 0.7, mentre la curva 2 si riferisce ad un valore di sc più basso, cioè $sc = 0.3$.

Le curve 3 e 4 sono le corrispondenti curve della F_x per i valori $sc = 0.7$ e $sc = 0.3$.

Le quattro curve sono state tracciate per uno spessore della lamina (s) pari a 3 mm ed un semipasso d'avvolgimento (λ) pari a 4 cm. Le amperspire efficaci di eccitazione sono pari a 10000 per metro lineare.

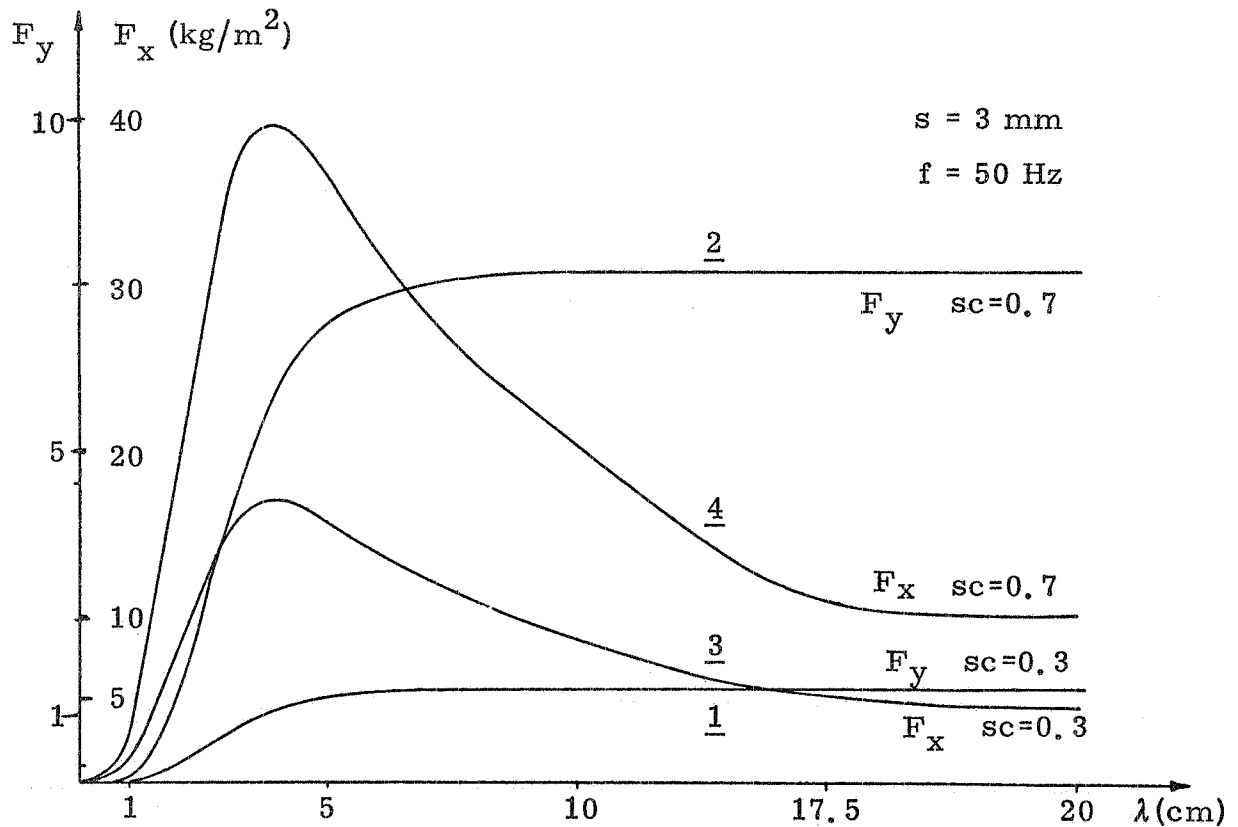


FIG. 4 - Le curve 1 e 2 forniscono l'andamento della forza specifica di sostentamento F_y (kg/m²) in funzione del semipasso d'avvolgimento λ , espresso in cm, per due valori di scorrimento (sc): la 1 ha $sc = 0.3$, mentre la 2 si riferisce ad uno scorrimento pari a $sc = 0.7$.

Le curve 3 e 4 danno l'andamento della forza specifica di trascinamento F_x (kg/m²) in funzione del semipasso d'avvolgimento λ , espresso in cm, per due valori di scorrimento: $sc = 0.3$ (curva 3) e $sc = 0.7$ (curva 4).

Le quattro curve sono state tracciate per uno spessore $s = 3$ mm della lamina e per una frequenza di eccitazione $f = 50$ Hz. Le amperspire efficaci di eccitazione sono pari a 10000 per metro lineare.

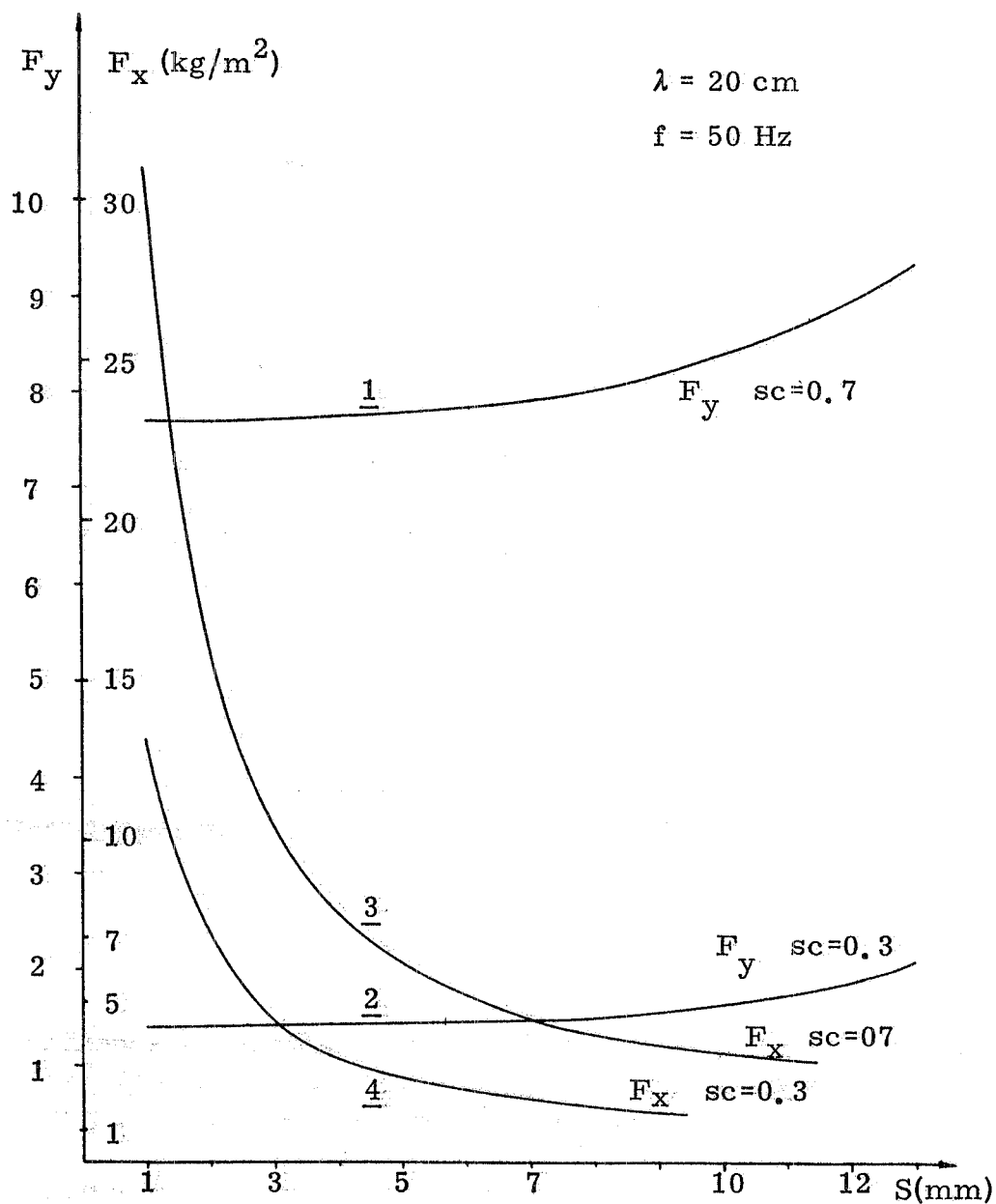


FIG. 5 - Le curve 1 e 2 mostrano l'andamento della forza specifica di sostentamento F_y (kg/m²) in funzione dello spessore (s), espresso in mm, della lamina per due valori di scorrimento: $sc = 0.7$ (curva 1), $sc = 0.3$ (curva 2).

Le curve 3 e 4 danno l'andamento della forza di trascinamento specifica F_x (kg/m²) in funzione dello spessore (s), espresso in mm, della lamina per due valori di scorrimento: $sc = 0.7$ (curva 3), $sc = 0.3$ (curva 4).

Le quattro curve sono state disegnate per la seguente configurazione dell'eccitazione: semipasso d'avvolgimento $\lambda = 20$ cm, frequenza $f = 50$ Hz, amperspire efficaci 10000 per metro lineare.

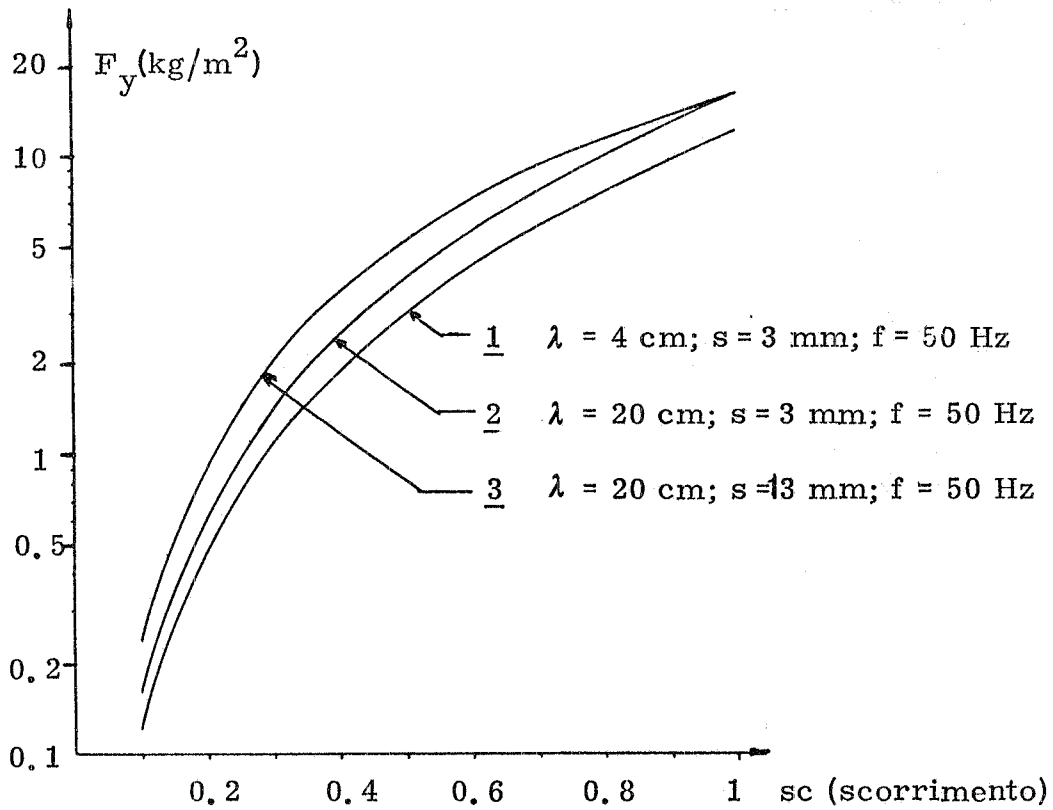


FIG. 6 - Le tre curve danno l'andamento della forza specifica di sostentamento F_y (kg/m^2) in funzione dello scorrimento (sc) per i seguenti valori di spessore della lamina: $s = 3$ mm (curva 1), $s = 3$ mm (curva 2), $s = 13$ mm (curva 3).

La configurazione dell'eccitazione è, relativamente al semipasso d'avvolgimento, rispettivamente: $\lambda = 4$ cm (curva 1), $\lambda = 20$ cm (curve 2 e 3); la frequenza è 50 Hz e le amperspire efficaci sono 10000 per metro lineare.

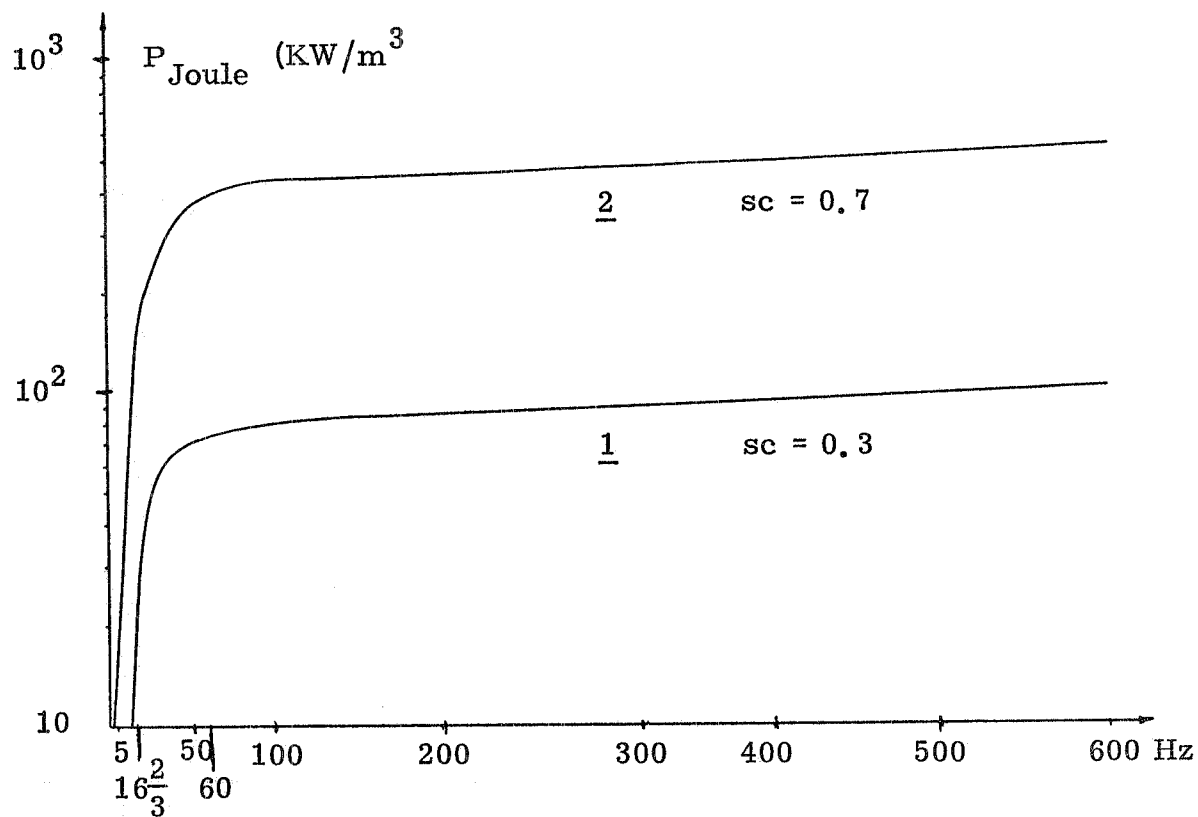


FIG. 7 - Le curve danno l'andamento della potenza dissipata per metro cubo (P_{Joule} KW/m^3) nella lamina per effetto Joule per due valori di scorrimento: $sc = 0.3$ (curva 1); $sc = 0.7$ (curva 2) in funzione della frequenza di eccitazione (f).

Le amperspire efficaci sono pari a 10000 per metro lineare, il se mipasso d'avvolgimento (λ) è pari a 4 cm, lo spessore della lamina (s) vale 3 mm.

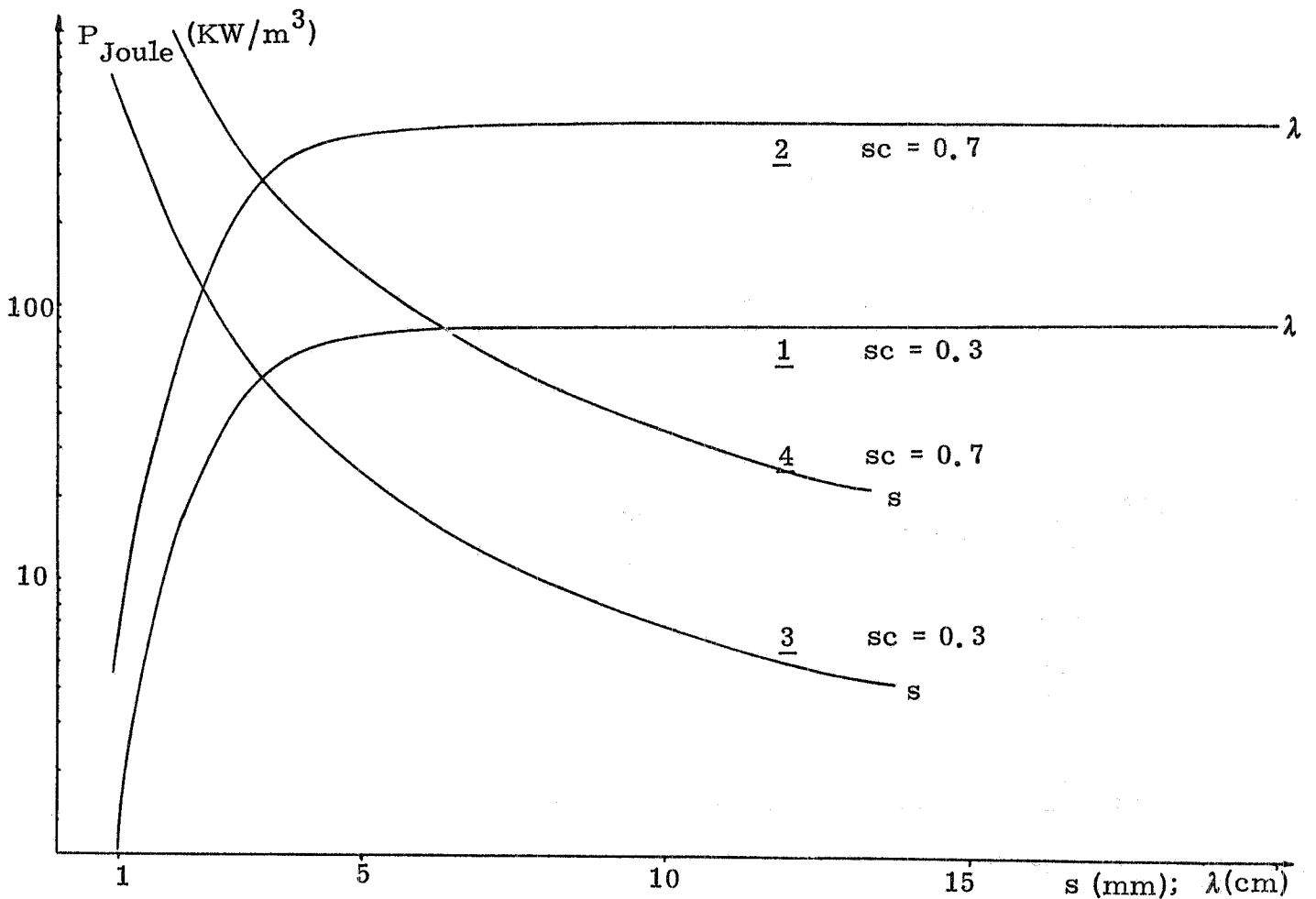


FIG. 8 - In ascisse sono riportati: lo spessore della lamina (s), espresso in mm, ovvero il semipasso d'avvolgimento (λ) espresso in cm; in ordinata c'è il valore della potenza dissipata in calore per metro cubo di lamina (P_{Joule} in KW/m^3).

Le curve 1 e 2 sono relative al semipasso d'avvolgimento per scorrimento, rispettivamente: $sc = 0.3$ (curva 1) e $sc = 0.7$ (curva 2). Lo spessore della lamina è pari a 3 mm.

Le curve 3 e 4 si riferiscono alla variazione di spessore della lamina (s), rispettivamente per scorrimento $sc = 0.3$ (curva 3) e $sc = 0.7$ (curva 4). Il semipasso d'avvolgimento (λ) è uguale a 4 cm.

Frequenza di eccitazione $f = 50$ Hz, con amperspire efficaci pari a 10000 per metro lineare.

APPENDICE A

Per giustificare l'espressione del valore efficace delle amperspire di eccitazione relative ad un semipasso di avvolgimento (), data dalla (30), si consideri inizialmente la (29):

$$\begin{aligned}
 (NI)_m \operatorname{sen}(\omega t + \frac{\pi}{\lambda} x) = & - \int_0^s \int_0^\lambda M(y) \operatorname{sen}(\omega t + \theta) dx dy + \\
 & + \frac{2\rho}{\mu_0} \int_0^s \int_0^t M(y) \cos(\omega t + \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} dy dt
 \end{aligned} \tag{A.1}$$

ove

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{W(y)}{V(y)} + \frac{\pi}{\lambda} x = \theta' + \frac{\pi}{\lambda} x .$$

Il primo termine del secondo membro può svilupparsi nel modo che segue:

$$\begin{aligned}
 \int_0^s \int_0^\lambda M(y) \operatorname{sen}(\omega t + \theta) dx dy &= \frac{1}{\pi} \int_0^s \int_0^\lambda M(y) \operatorname{sen}(\omega t + \theta) d(\omega t + \theta) dy = \\
 &= \frac{2\lambda}{\pi} \int_0^s M(y) \cos(\omega t + \theta') dy = \\
 &= \frac{2\lambda}{\pi} \left[\int_0^s M(y) \cos \theta' dy \right] \cos \omega t - \frac{2\lambda}{\pi} \left[\int_0^s M(y) \operatorname{sen} \theta' dy \right] \operatorname{sen} \omega t .
 \end{aligned} \tag{A.2}$$

Il secondo termine a secondo membro dà luogo a:

$$\begin{aligned}
 \frac{2\rho}{\mu_0} \int_0^s \int_{t_0}^t M(y) \cos(\omega t + \theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} dy dt &= \\
 &= \frac{2\rho}{\mu_0} \frac{\pi}{\lambda \omega} \int_0^s \int_{t_0}^t M(y) \cos(\omega t + \theta) d(\omega t + \theta) dy = \\
 &= \frac{2\rho \pi}{\mu_0 \lambda \omega} \int_0^s M(y) \operatorname{sen}(\omega t + \theta) dy =
 \end{aligned} \tag{A.3}$$

$$= \frac{2\rho\pi}{\mu_0\lambda\omega} \left[\int_0^s M(y) \operatorname{sen} \theta \, dy \right] \cos \omega t + \frac{2\rho\pi}{\mu_0\lambda\omega} \left[\int_0^s M(y) \cos \theta \, dy \right] \operatorname{sen} \omega t.$$

Nella (A. 3) deve intendersi $\theta = \theta'$ in quanto la circuitazione di H_y è fatta per $x=0$ e $x=\lambda$. Inoltre l'espressione ricavata per la (A. 3) si riferisce al termine sinusoidale di regime poichè si è posto $t_0 = -\theta/\omega$.

Il secondo membro della (A. 1) diventa quindi:

$$\begin{aligned} & \left[-\frac{2\lambda}{\pi} \int_0^s M(y) \cos \theta' \, dy + \frac{2\rho\pi}{\mu_0\lambda\omega} \int_0^s M(y) \operatorname{sen} \theta' \, dy \right] \cos \omega t + \\ & + \left[\frac{2\lambda}{\pi} \int_0^s M(y) \operatorname{sen} \theta' \, dy + \frac{2\rho\pi}{\mu_0\lambda\omega} \int_0^s M(y) \cos \theta \, dy \right] \operatorname{sen} \omega t = \\ & = k_1 \cos \omega t + k_2 \operatorname{sen} \omega t. \end{aligned} \tag{A. 4}$$

APPENDICE B

Programma di calcolo eseguito in FORTRAN e utilizzato presso il Centro di Calcolo dell'Università di Roma per la determinazione dei valori correlati con il problema oggetto del presente lavoro.

```

C CALCOLO DELLA FORZA DI SOSTENTAMENTO,DI TRASCINAMENTO E PERDITE PER UNA
C LAMINA DI 'AL' IMMERSA IN UN CAMPO TRASLANTE CON VELOCITA V.
C   SC=SCORRIMENTO LAMINA
C   JZO=VALORE MASSIMO DI DENSITA DI CORRENTE SUL BORDO INF. LAMINA PER SI
C   LANDA PASSO DELL'AVVOLGIMENTO GENERATORE DEL CAMPO
C   S=SPESSORE DELLA LAMINA
C   RO= RESISTIVITA' DELL'AL A 80. IN LEGA IN OHM*CM
C   FA= FREQUENZA FONDAMENTALE
C   F=FREQUENZA CORRENTE INDOTTE
C   PTR=PROFONDITA DI PENETRAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO
C   PS=PESO SPECIFICO DELL'AL IN KG/M3
C
C   DIMENSION T(201),PSI(201),P(200),RS(200),V(201),W(201),RT(200),DTE
C   I(200)
C   REAL JZO,LANDA,II,JZ
C
C PARAMETRI DI BASE
C   PG=3.1415927
C   PS=2700.
C   RO=3.5E-9
C   3 READ(5,200)JZ,LANDA,S,FA,KS,KL
C   200 FORMAT(4E12.3,2I5)
C   WRITE(6,23)
C   23 FORMAT(10X,'PARAMETRI INPUT',/)
C   WRITE(6,102)JZ,LANDA,S,FA
C   102 FORMAT(1X,'CORRENTE=',E12.4,3X,'SEMIPASSO DI AVVOLGIMENTO='
C   1,E12.4,3X,'SPESSORE LASTRA=',E12.4,3X,'FRE=',E12.4,3X,///)
C   VOL=PS*S
C   K1=KS+1
C   K2=KS-1
C   SC=1.
C   K=1
C   WRITE(6,24)
C   24 FORMAT(10X,'DATI GEOMETRICI INPUT',/)
C   WRITE(6,106)VOL
C   106 FORMAT(1X,'PESO PROPRIO LAMINA=',F10.2,1X,'KG/MQ')
C   WRITE (6,101)KS,K1,K2,KL
C   101 FORMAT(1X,'KS=', I10,'K1=',I10,'K2=',I10,'KL=',I10)
C   WRITE(6,25)K2,KL
C   25 FORMAT(1X,'SPESSORE LASTRA=',I4,1X,'DECIMI DI MILLIMETRO',10A,
C   1'PASSO DI AVVOLGIMENTO LANDA=',I5,1X,'MILLIMETRI',///)
C   9 CONTINUE
C   JZO=JZ*SC
C   F=SC*FA
C   PTR=(RO*1.E+11)/F
C   PTR=SQRT(PTR)
C   PTR=(1./6.28)*PTR*1.E-2
C   CPTR=PTR*100.
C   WRITE(6,22)CPTR,SC
C   22 FORMAT(1X,'PROFONDITA DI PENETRAZIONE CAMPO MAGNETICO =',F8.3,'CM
C   ITRI CON SCORRIMENTO SC=',F10.4,/)
C   IF(PTR-S)16,15,15
C   16 S=PTR

```

```

WRITE(6,105)S
105 FORMAT(1X,'SPESSORE EFFETTIVO',F12.5)
PKS=S*10000.+1.
KS=PKS
K1=KS+1
K2=KS-1
WRITE(6,890) KS,K1,K2
890 FORMAT(1X,3I15)
15 CONTINUE
DO 2 I=1,K2
T(I)=0
DTE(I)=0.
P(I)=0.
RS(I)=0.
RT(I)=0.
V(I)=0.
W(I)=0.
2 PSI(I)=0.
V(KS)=0.
T(KS)=0.
PSI(KS)=0.
W(KS)=0.

C
C CALCOLO DEI PARAMETRI COSTANTI
C
A=(3.1416/LANDA)**2
B=((8.*(3.1416)**2)*F)/RO
B=B*1.E-7
Q=SQRT(A*A+B*B)
FI=ATAN2(B,A)
COM1=2.*S*COS(FI/2.)*SQRT(Q)
COM2=2.*S*SIN(FI/2.)*SQRT(Q)
R1=1.+(EXP(COM1))*(COS(COM2))
Z1=(EXP(COM1))*(SIN(COM2))
B1=(JZO*R1)/(R1*R1+Z1*Z1)
B2=- (JZO*Z1)/(R1*R1+Z1*Z1)
A1=JZO-B1
A2=-B2
T(1)=JZO
W(1)=0.
V(1)=JZO

C
C CALCOLO DEI VALORI ASSUNTI DALLA FUNZIONE CON LA Y
C
C
DO 1 I=1,K2
I1=I
Y=I1*1.E-4
COM1=Y*SQRT(Q)*COS(FI/2)
COM2=Y*SQRT(Q)*SIN(FI/2)
C1=(EXP(COM1))*COS(COM2)
C2=(EXP(COM1))*SIN(COM2)
D1=C1/(C1*C1+C2*C2)
D2=-C2/(C1*C1+C2*C2)

```

```

V(I+1)=A1*D1-A2*D2+B1*C1-B2*C2
W(I+1)=A2*D1+D2*A1+B2*C1+B1*C2
T(I+1)=(V(I+1)**2+W(I+1)**2)
T(I+1)=SQRT(T(I+1))
PSI(I+1)=ATAN2(W(I+1),V(I+1))
P(I)=(T(I+1)+T(I))/2.
1 CONTINUE
C CALCOLO DELLE AMPERSPIRE
FAT1=0.
FAT2=0.
DO 7 I=1,K2
FAT1=FAT1+P(I)*SIN((PSI(I)+PSI(I+1))/2.)
FAT2=FAT2+P(I)*COS((PSI(I)+PSI(I+1))/2.)
7 CONTINUE
CB=FAT1*1.E-4
CA=FAT2*1.E-4
CC=(2.*LANDA)/PG
CD=RO/(LANDA*4.*PG*1.E-7*F)
900 ASP1=(CC*CB+CD*CA)
ASP2=(CD*CB-CC*CA)
ASP1=ASP1**2
ASP2=ASP2**2
ASP=ASP1/2.+ASP2/2.
ASP=SQRT(ASP)
IF(K-2) 30,31,31
30 CONTINUE
WRITE(6,104)ASP
31 CONTINUE
104 FORMAT(1X,'ASP=',E16.4)
C CALCOLO DEI CAMPI EFFICACI
HY=ASP/S
BY=HY*4.*PG*1.E-7
WRITE(6,26)HY,BY
26 FORMAT(1X,'HY EFFICACE MEDIO =',F15.3,'AMPERSPIRE/METRO,CUI
CORRISPONDE UNA BY MEDIA DI',F11.6,'TESLA')
IF(K-2)19,20,21
19 CONTINUE
COEF1=ASP/LANDA
DIF=10000.-COEF1
DIF=ABS(DIF)
IDIF=DIF
IF(IDIF-10)17,17,27
27 CONTINUE
COEF2=10000./COEF1
JZ=JZ*COEF2
GO TO 9
17 CONTINUE
SC=0.1
K=2
WRITE(6,102)JZ,LANDA,S,FA
GO TO 9
C CALCOLO DELLA FORZA DI SOSTENTAMENTO DELLA LASTRA (FS)
20 CONTINUE
FS=0.

```