



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO  
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE  
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA NUMERO	102007901486571
Data Deposito	23/01/2007
Data Pubblicazione	23/07/2008

Sezione	Classe	Sottoclasse	Gruppo	Sottogruppo
B	60	T		

Titolo

PROCEDIMENTO PER LA VALUTAZIONE DELLA TEMPERATURA DEGLI ELEMENTI  
FRENANTI DI UN VEICOLO, IN PARTICOLARE DI UN VEICOLO FERROVIARIO.

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:  
"Procedimento per la valutazione della temperatura  
degli elementi frenanti di un veicolo, in partico-  
lare di un veicolo ferroviario"

Di: FAIVELEY TRANSPORT ITALIA S.p.A., nazionalità  
italiana, Via Volvera 51, I-10045 Piossasco (Tori-  
no)

Inventori designati: Roberto TIONE

Depositata il: 23 gennaio 2007

\* \* \*

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda un procedimen-  
to per la valutazione della temperatura degli ele-  
menti frenanti di un veicolo, in particolare di un  
veicolo ferroviario.

Più specificamente l'invenzione riguarda un  
procedimento per la valutazione della temperatura  
di un disco freno secondo il preambolo della riven-  
dicazione 1.

Nella frenatura, per effetto dell'attrito i  
dischi freno e le associate pastiglie di frenatura  
si riscaldano ed al superamento di una determinata  
temperatura possono insorgere problemi, sia di na-  
tura strutturale (deformazioni, danneggiamento del  
disco freno), sia di tipo funzionale (decadimento

dell'azione frenante).

La domanda di brevetto europeo EP 1 083 360 A propone un sistema che implementa un algoritmo per la previsione della temperatura di un primo elemento di freno (disco freno) e di un secondo elemento di freno (pastiglia) in un veicolo appartenente ad un convoglio o treno ferroviario. Tale algoritmo è basato su un bilancio energetico espresso mediante l'applicazione del primo principio della termodinamica all'intero veicolo ed ai suoi sottosistemi costituenti.

Tale algoritmo valuta la potenza termica sviluppata nel sistema disco freno-pastiglia tenendo conto della variazione dell'energia cinetica e potenziale complessiva del veicolo, dei contributi delle resistenze al moto e dell'eventuale intervento di dispositivi di freno supplementari, diversi dal tradizionale freno pneumatico.

Per un'implementazione dell'algoritmo noto dal documento sopra citato sono necessari un'unità elettronica di elaborazione, sensori di pesatura per la determinazione della forza-peso del carico, mezzi per valutare e classificare le resistenze al moto ordinarie (aerodinamiche e dovute agli attriti di strisciamento/rotolamento), mezzi per determina-

re le variazioni di energia potenziale (legate alle variazioni di quota altimetrica) ad esempio tramite un sensore di elevazione e/o con l'impiego di profili pre-memorizzati di elevazione della tratta, previa conoscenza della posizione istantanea del veicolo lungo la tratta.

L'algoritmo noto comporta inoltre la valutazione dei contributi alla variazione di energia cinetica complessiva del veicolo, dovuti all'eventuale intervento di freni supplementari, ad esempio freni di tipo elettrodinamico e/o elettromagnetico.

Il sistema noto da EP 1 083 360 risulta pertanto oneroso dal punto di vista strutturale e computazionale, in quanto comporta la gestione di una pluralità di grandezze ed un'elaborazione complessa degli stessi per la valutazione delle grandezze desiderate.

Uno scopo della presente invenzione è di proporre un procedimento innovativo e più diretto per la valutazione della temperatura degli elementi frenanti, in particolare dei dischi freno, di un veicolo, il quale non richieda tra l'altro il calcolo né dell'energia cinetica del veicolo, né delle variazioni dell'energia potenziale del medesimo, né il riconoscimento dell'intervento di altri tipi di

freno.

Questo ed altri scopi vengono realizzati secondo l'invenzione con un procedimento le cui caratteristiche principali sono definite nell'annessa rivendicazione 1.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione appariranno dalla descrizione dettagliata che segue, effettuata a puro titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

la figura 1 è una vista parziale in pianta di un carrello di un veicolo ferroviario, e mostra in particolare un assile cui sono associati due dispositivi di freno a disco;

la figura 2 è una vista prospettica parziale di due diversi dischi freno;

la figura 3 è una rappresentazione schematica illustrativa di un modello di simulazione unidimensionale di un disco freno utilizzato nel procedimento secondo l'invenzione;

la figura 4 è uno schema a blocchi illustrativo dell'algoritmo attuato nel procedimento secondo l'invenzione;

la figura 5 è uno schema a blocchi del sistema di elaborazione e degli associati dispositivi uti-

lizzati per attuare il procedimento secondo l'invenzione;

la figura 6 presenta andamenti esemplificativi delle temperature di un disco freno valutate con il procedimento secondo l'invenzione;

la figura 7 è una serie di due diagrammi che mostrano, in funzione del tempo riportato in ascissa, andamenti simulati della velocità di avanzamento del veicolo e della forza di frenante applicata in direzione normale al disco freno, e

la figura 8 mostra i corrispondenti valori di temperatura calcolati con il procedimento secondo l'invenzione in relazione agli andamenti simulati della velocità di avanzamento e della forza di frenatura di cui ai grafici della figura 7.

Nella figura 1 con B è complessivamente indicato un carrello di un veicolo ferroviario. In modo per sé noto tale carrello comprende una struttura portante S in cui è sopportata in modo girevole una pluralità di assili, uno solo dei quali è illustrato nella figura 1, ove è complessivamente indicato con A. In modo per sé noto tale assile comprende un albero 1, sulle cui estremità sono calettate le rispettive ruote 2.

All'assile A sono associati due dispositivi di

frenatura a disco, complessivamente indicati ciascuno con 10. Ciascuno di tali dispositivi comprende un disco complessivamente indicato con D, sulle cui superfici laterali opposte agiscono rispettive pastiglie di freno P portate da associate ganasce oscillabili C azionabili a mezzo di associati cilindri pneumatici.

Ciascun disco freno D comprende due anelli di estremità D1, fra i quali si estendono alette o palette V che durante la corsa generano una ventilazione forzata. Tali alette possono essere di tipo radiale oppure di tipo tangenziale, come è mostrato nella figura 2.

Con riferimento alla figura 1, ciascun disco freno D presenta una conformazione essenzialmente simmetrica rispetto ad un suo piano trasversale mediano a-a.

Il procedimento secondo l'invenzione è basato su un modello fisico-matematico unidimensionale del disco freno D, e tale modello sfrutta la condizione di simmetria rispetto al piano trasversale mediano a-a. Tale modello in effetti considera il bilancio energetico, specificamente termico, in uno dei due semi-dischi in cui il disco D è suddiviso dal piano a-a.

Con riferimento alla figura 3, la fascia F di ciascun semi-disco viene, nell'algoritmo implementato nel procedimento secondo l'invenzione, considerata suddivisa in N elementi anulari discreti trasversalmente adiacenti, con N intero, ad esempio pari ad 8.

Con riferimento alla figura 3, gli elementi anulari della fascia F sono stati indicati  $E_i$ , con  $i = 1, \dots, N$ , a partire dall'elemento assoggettato all'azione di una pastiglia freno P, verso l'elemento terminale assoggettato all'azione del flusso di ventilazione indotto dalle alette o palette V.

Agli elementi anulari discreti  $E_1, \dots, E_N$ , corrispondono rispettive temperature medie indicate con  $\bar{T}_1, \dots, \bar{T}_N$ .

Le temperature in corrispondenza delle interfacce fra gli elementi anulari esterni  $E_1$  ed  $E_N$  e l'ambiente esterno sono indicate con  $T_1$  e rispettivamente  $T_{N+1}$ . Le temperature alle interfacce fra gli elementi anulari contigui sono indicate, nell'ordine, con  $T_2, T_3, \dots, T_N$ .

Nel seguito, con il pedice aggiuntivo t si indicherà il valore di una grandezza all'istante t. Ad esempio, con  $T_{i,t}$  ( $i = 2, \dots, N+1$ ) si indicherà

la temperatura all'interfaccia fra gli elementi annulari  $E_i$  e  $E_{i-1}$  all'istante  $t$ .

Nel procedimento secondo l'invenzione a mezzo di un sensore 11 (figure 4 e 5) ad uscita elettrica viene rilevata la velocità angolare relativa fra il disco freno D1 e l'associato elemento di freno o pastiglia P. Viene inoltre rilevata l'intensità della forza applicata al disco freno D per effetto di un'attivazione dell'associato attuatore di frenatura. Ciò viene realizzato ad esempio con l'impiego di un sensore di pressione 12 che rileva la pressione di frenatura applicata all'associato attuatore (cilindro freno).

Con riferimento alla figura 5, i sensori 11 e 12 sono collegati a corrispondenti ingressi di un'unità elettronica di elaborazione ECU, realizzata ad esempio con l'impiego di un microprocessore. Tale unità è in particolare predisposta per attuare l'algoritmo cui si riferisce la rappresentazione schematica della figura 4 e che verrà meglio descritto nel seguito.

Con riferimento alla figura 4, l'algoritmo attuato dall'unità elettronica ECU prevede che a quest'ultima vengano preliminarmente forniti dati indicativi di numerose caratteristiche geometriche

degli elementi interessati, in particolare caratteristiche geometriche del disco freno D, dei suoi elementi D1 e delle alette V interposte, nonché caratteristiche geometriche della timoneria di frenatura, del cilindro freno e delle ruote 2 del carrello B.

All'unità ECU vengono inoltre preliminarmente forniti dati indicativi di caratteristiche dei materiali costituenti i suddetti elementi, quali la conduttività termica e la capacità termica massica e la densità del materiale costituente il disco freno D e le associate pastiglie P.

Sulla base dei segnali o dati forniti dai sensori 11 e 12, nonché dei dati indicativi delle caratteristiche geometriche e delle caratteristiche dei materiali, l'unità elettronica ECU calcola, nel modo che verrà meglio descritto nel seguito, la potenza meccanica convertita in calore quando il disco freno D e le associate pastiglie P vengono portati a contatto di attrito fra loro, e quindi calcola la potenza termica netta applicata al disco freno come differenza fra detta potenza meccanica e la potenza termica scambiata dal disco freno con le pastiglie e l'ambiente circostante.

L'unità ECU ricava quindi un'indicazione quan-

titativa della temperatura del disco freno D in funzione di tale potenza termica netta, nonché della massa e della capacità termica del disco freno.

L'unità di elaborazione e controllo ECU pilota quindi corrispondentemente un dispositivo di visualizzazione e/o di controllo, complessivamente indicato con 13 nella figura 5, come verrà meglio descritto nel seguito.

Ai fini della determinazione della temperatura e/o dell'usura del disco freno D e delle associate pastiglie P l'algoritmo implementato dall'unità ECU valuta la potenza termica introdotta che si origina per effetto dell'attrito tra detti elementi D e P in moto relativo (potenza meccanica che si trasforma in potenza termica dissipata). A tale scopo il coefficiente di attrito  $\mu$  può essere ad esempio ricavato con precisione durante le prove di omologazione al banco dinamometrico del sistema disco/pastiglia richieste dalla norma UIC541-3.

L'algoritmo parte dal calcolo della forza di attrito tra il disco D e una delle due associate pastiglie P, la quale ha la seguente espressione:

$$F_{fr} = \frac{\mu \cdot i \cdot \eta_{ng} \cdot (\eta_{seal} \cdot p A_{cyl} - F_{spr})}{2n_{disc}} = \mu(k_1 \cdot p + k_2) \quad (1)$$

dove  $\mu$  è il coefficiente di attrito tra disco freno e una pastiglia,  $i$  è il rapporto totale di timoneria che amplifica verso il disco freno la forza applicata al cilindro freno,  $\eta_{rig}$  è il rendimento della timoneria,  $\eta_{seal}$  è il rendimento della guarnizione applicata al pistone del cilindro freno,  $p$  è la pressione pneumatica nel cilindro freno,  $A_{cyl}$  è la superficie frontale attiva del pistone,  $F_{spr}$  è la forza della molla antagonista associata al cilindro freno, e  $k_1$  e  $k_2$  sono costanti.

La potenza meccanica dissipata per attrito in corrispondenza dell'elemento  $E_1$  del disco freno  $D$ , ove si ha lo strisciamento tra il disco e la pastiglia, vale:

$$P_{fr} = F_{fr} \cdot v_{brm} \quad (2)$$

dove  $v_{brm}$  è la velocità di strisciamento della pastiglia  $P$  in corrispondenza del raggio medio di frenatura. Nell'ipotesi di puro rotolamento tra la ruota 2 e la rotaia si ha:

$$v_{brm} = \omega \cdot R_{brm} \quad (3)$$

dove  $\omega$  è la velocità angolare del disco freno  $D$  e  $R_{brm}$  è il raggio medio di frenatura.

Sostituendo la (1) e la (3) nella (2) si ottiene:

$$P_f = \mu \cdot (k_3 \cdot p \cdot \omega + k_4 \cdot \omega) \quad (4)$$

ove  $k_3$  e  $k_4$  sono costanti.

Nel caso in cui la forza  $F_{spr}$  della molla antagonista (non illustrata) del cilindro freno sia trascurabile rispetto alla forza di pressione (come si ha ad esempio nel tipico profilo di missione di un servizio di trasporto metropolitano), si ottiene un'espressione semplificata:

$$P_f = \mu \cdot k_3 \cdot p \cdot \omega \quad (5)$$

La potenza  $P_{fr}$  si trasforma in potenza termica ceduta ai due elementi (il disco D e la pastiglia P) a contatto fra loro.

Con riferimento all'espressione (5) sopra riportata, il coefficiente di attrito  $\mu$  tra pastiglia e disco dipende dai seguenti fattori principali:

- velocità di strisciamento: la legge di variazione di  $\mu$  con la velocità relativa  $\omega$  delle due superfici dipende dalla coppia di materiali (i materiali costituenti il disco e la pastiglia);
- temperatura T all'interfaccia (superficie di contatto) fra disco e pastiglia: normalmente  $\mu$  diminuisce al crescere della temperatura T;

- pressione specifica di contatto fra disco e pastiglia: normalmente  $\mu$  si riduce al crescere di tale pressione; e

- umidità delle superfici.

Il coefficiente di attrito  $\mu$  viene rilevato sperimentalmente: pertanto la legge di variazione di  $\mu$  si deve considerare disponibile ovvero nota ai costruttori di impianti frenanti.

L'algoritmo attuato nel procedimento oggetto dell'invenzione utilizza un coefficiente di attrito  $\mu$  funzione della velocità angolare relativa  $\omega$  fra disco freno e pastiglia; tuttavia, se la dipendenza di  $\mu$  dalle suddette grandezze non è nota, è possibile in prima approssimazione utilizzare un valore medio costante.

La pressione al cilindro freno  $p$  e la velocità angolare  $\omega$  sono grandezze di ingresso del modello di simulazione per la valutazione della temperatura raggiunta dal disco freno nel funzionamento; i corrispondenti segnali sono forniti dai sensori 11 e 12, i quali normalmente sono già presenti nei veicoli ferroviari sui quali sono installati sistemi frenanti delle generazioni più recenti, ad esempio

il sistema EPAC (Electro Pneumatic Advanced Control) realizzato dalla stessa Richiedente.

La potenza termica  $P_{fr}$  generata all'interfaccia tra il disco freno D e una pastiglia P viene in parte trasmessa al disco D e la rimanente parte viene trasmessa alla pastiglia P o dissipata nell'ambiente sotto forma di calore.

La percentuale di potenza termica inviata al disco freno dipende dalle caratteristiche termiche dei materiali costituenti il disco e la pastiglia, in particolare dai rispettivi valori della conduttività termica, della capacità termica massica e della densità.

Nell'algoritmo attuato secondo la presente invenzione, per simulare correttamente la conduzione, la fascia trasversale F di un semidisco D1 viene suddivisa in un numero intero finito N di elementi  $E_1, \dots, E_N$ , per ciascuno dei quali viene calcolata la variazione di temperatura nel tempo per effetto della potenza termica netta entrante all'interno di ciascuno di essi.

La potenza termica netta entrante per ciascun elemento della fascia F è data dall'equazione:

$$\dot{Q}_{net_{i,j}} = m_i c_{p,i} \frac{dT_{i,j}}{dt} \quad (6)$$

dove  $m$  è la massa di ogni elemento  $E_1, \dots, E_N$ ,

$c$  ne è la capacità termica massica,  $\bar{T}$  è la temperatura media.

Il pedice  $i$  nella (6) si riferisce all' $i$ -esimo elemento di suddivisione della fascia trasversale  $F$  di un semidisco  $D_1$ ;  $t$  indica il tempo.

La potenza netta entrante nei due elementi di estremità  $E_1$  e  $E_N$  tiene conto degli scambi termici per convezione e irraggiamento con l'ambiente circostante e per conduzione con l'elemento ( $E_2, E_{N-1}$ ) adiacente, oltre che della potenza termica generata all'interfaccia disco-pastiglia.

Gli elementi intermedi  $E_2, \dots, E_{N-1}$  scambiano invece calore sostanzialmente soltanto per conduzione con i due elementi adiacenti a ciascuno di essi.

L'algoritmo tiene conto del fatto che il disco freno  $D_1$  è ventilato. La ventilazione avviene attraverso lo scambio termico convettivo tra gli elementi terminali  $E_1$  ed  $E_N$  del disco freno e il flusso d'aria circolante.

La potenza termica scambiata in generale per

convezione vale:

$$Q_{conv} = \alpha \cdot A_{conv} \cdot (T_{parete} - T_{aria}) \quad (7)$$

dove  $\alpha$  è il coefficiente di scambio termico convettivo,  $A_{conv}$  è l'area di convezione,  $T$  è la temperatura.

I coefficienti di scambio termico convettivo lato ventilazione e lato pastiglia, cioè per gli elementi terminali  $E_1$  ed  $E_N$ , dipendono dalla specifica geometria, e risultano tanto maggiori quanto più elevata è la velocità di avanzamento del treno o equivalentemente la velocità angolare  $\omega$ .

Il coefficiente di scambio termico convettivo lato pastiglia vale (elemento anulare discreto  $E_1$ ):

$$\alpha_f = k_s \cdot \bar{\rho}_f^{el} \cdot \omega^{el} \quad (8)$$

dove  $\bar{\rho}_f$  è la densità dell'aria in corrispondenza della superficie di attrito disco-pastiglia,  $k_s$  è una costante, ed  $el$  è un esponente.  $\bar{\rho}_f$  dipende dalla temperatura e dalla pressione ambiente.

In questo caso, con riferimento alla (7), la temperatura di parete  $T_{parete}$  coincide con  $T_1$  (temperatura della parete in aria del primo elemento  $E_1$  della fascia F partendo dal lato pastiglia), cioè la parete coincide con la corona del disco D su cui

scorre la pastiglia P.

Il coefficiente di scambio termico lato ventilazione vale:

$$\alpha_{ven} = k_6 \cdot \bar{\rho}_{ven}^{e_2} \cdot \omega^{e_2} \quad (9)$$

dove  $\bar{\rho}_{ven}$  è la densità media dell'aria fra gli elementi ventilanti V, la quale dipende dalla velocità angolare  $\omega$  e dalle temperature delle superfici di tali elementi ventilanti e dalla temperatura dell'aria ambiente,  $e_2$  è un esponente, e  $k_6$  è una costante.

In questo caso la temperatura di parete  $T_{parete}$  coincide con  $T_{N+1}$ , (temperatura della parete in aria dell'N-esimo elemento  $E_N$  della fascia F partendo dal lato pastiglia).

Nel caso in cui si utilizzino alette tangenziali (come nel disco freno a destra nella figura 2) anziché radiali, l'equazione (9) ha un'espressione che è funzione delle stesse grandezze, ma avente diversi coefficienti.

La potenza termica scambiata per conduzione in corrispondenza dell'interfaccia tra due elementi discreti consecutivi della fascia F vale:

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda(T_i) \cdot A_{cond} \cdot \left. \frac{dT(t)}{dx} \right|_i \quad (10)$$

dove  $\lambda$  è la conduttività termica,  $x$  è la coordinata di posizione lungo l'asse del disco freno, e  $A_{\text{cond}}$  è l'area della superficie di conduzione.

Infine, la potenza termica scambiata per irraggiamento tra le pareti del disco D e l'aria vale:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\text{rad}} \cdot (T_i^4 - T_{\text{air}}^4) \quad (11)$$

dove  $\varepsilon$  è il coefficiente di emissività,  $\sigma$  è la costante di Stefan-Boltzmann,  $A_{\text{rad}}$  è l'area della superficie di irraggiamento.

L'algoritmo attuato dal procedimento secondo l'invenzione utilizza valori memorizzati in una tabella, o polinomi interpolatori, per valutare la capacità termica massica  $c$  e la conduttività termica  $\lambda$  del disco D al variare della temperatura, con una legge di variazione che dipende dal materiale.

Risolvendo a sistema le equazioni (5), (6), (10) e (11) l'algoritmo consente di calcolare le temperature  $\bar{T}_i$  al generico istante di tempo  $t$  in corrispondenza dei singoli elementi discreti  $E_1, \dots, E_N$ , secondo l'equazione:

$$\bar{T}_{i,t} = \bar{T}_{i,t=0} + \Delta T_{\text{Algoritmo},t} \quad (12)$$

dove  $\Delta T_{\text{Algoritmo},t}$  è l'incremento di temperatura calcolato dall'algoritmo fino all'istante  $t$  per effet-

to della potenza termica introdotta per attrito tra il disco D e la pastiglia P e degli scambi termici per convezione, conduzione e irraggiamento sopra descritti.  $\Delta T_{\text{Algoritmo},t}$  è funzione della velocità angolare  $\omega$ , della pressione pneumatica p nei cilindri freno, dei materiali e della geometria degli elementi frenanti e delle condizioni dell'ambiente.

Nella figura 6 sono illustrati andamenti esemplificativi delle temperature  $T_1-T_{N+1}$  alle N+1 interfacce di cui alla figura 3, calcolati con il procedimento sopra descritto per un disco freno D una cui fascia P è stata considerata ripartita in N=8 elementi discreti.

Nel grafico principale di figura 6 si ha  $T_N=T_{N+1}$ , ovvero  $T_8=T_9$ , condizione che si può ritenere ragionevolmente valida in prima approssimazione.

Nel grafico principale della figura 6 è altresì riportata una linea orizzontale che rappresenta la temperatura limite associata al disco freno. La "distanza" fra tale linea e la temperatura istantanea valutata del disco freno (in particolare la temperatura all'interfaccia più "calda", cioè la temperatura  $T_1$  all'interfaccia che corrisponde alla superficie di attrito disco-pastiglia) costituisce un'indicazione del margine di temperatura disponi-

bile. A tale margine di temperatura corrisponde un valore massimo della velocità di avanzamento del veicolo che consente ancora di evitare il raggiungimento della temperatura limite del disco freno con qualunque modalità di frenatura.

L'unità di elaborazione ECU può essere predisposta per fornire al guidatore del veicolo, tramite il dispositivo di visualizzazione e/o controllo 13 (figura 5), l'indicazione di tale valore massimo ammissibile della velocità di avanzamento. Eventualmente, l'unità di elaborazione ECU può essere predisposta per attuare (o provocare l'attuazione di) interventi attivi sulla trazione del veicolo, volti ad "imporre" il rispetto della velocità massima calcolata.

Tornando ora nuovamente alla figura 6, il grafico secondario che compare nella sua parte destra indica la variazione del valore massimo della temperatura  $T_1$  in corrispondenza della superficie di attrito disco-pastiglia, al crescere dell'usura del disco. Come si vede, tale valore massimo della temperatura  $T_1$  cresce progressivamente al crescere dell'usura del disco D.

La figura 8 mostra gli andamenti delle temperature  $T_1-T_9$  alle nove interfacce degli  $N=8$  elementi

in cui la fascia F di un semidisco D1 di un disco freno è stata considerata suddivisa in un procedimento secondo l'invenzione. I grafici della figura 8, ottenuti mediante simulazione computerizzata, si riferiscono a una condizione operativa del veicolo, (anch'essa simulata) rappresentata nei grafici della figura 7 in termini di velocità di avanzamento (figura 7, grafico superiore) e di interventi di frenatura (forza normale scambiata all'interfaccia pastiglia-disco; figura 7; grafico inferiore).

Nel grafico superiore della figura 7 la curva in grassetto rappresenta l'andamento del valore della velocità massima ammissibile per il veicolo, calcolato in relazione alla temperatura stimata del disco freno.

Nel grafico della figura 8 la curva tratteggiata rappresenta l'andamento della temperatura calcolata con l'algoritmo sopra descritto con N=1, ovvero considerando il (semi)disco come un elemento unico o "monoblocco".

Facendo ora nuovamente riferimento all'equazione (12) in prima approssimazione si può considerare che sia:

$$\bar{T}_{i,i} = (T_{i,i} + T_{i+1,i})/2 \quad (13)$$

dove  $\bar{T}_{i,i=0}$  è la temperatura media iniziale dell'*i*-esimo elemento  $E_i$  della fascia  $F$  del disco  $D$ .

Lo spessore di materiale asportato (dal disco e/o dalla pastiglia) nell'unità di tempo può essere stimato attraverso la seguente formula empirica:

$$V = k \cdot p_c^{e^3} \cdot v^{e^4} \cdot T^{e^5} \quad (14)$$

dove le costanti  $k$ ,  $e^3$ ,  $e^4$ ,  $e^5$  sono determinabili sperimentalmente;  $p_c$  è la pressione al contatto,  $v$  è la velocità di strisciamento tra il disco  $D$  la pastiglia  $P$ ,  $T$  è la temperatura.

Nel caso di profili di missione (velocità di avanzamento e pressione pneumatica ai cilindri freno in funzione dello spazio percorso o del tempo) prestabiliti per la tratta percorsa, è possibile memorizzare nell'unità di elaborazione i livelli di usura del disco  $D$  e/o delle pastiglie  $P$  misurati nelle prove di omologazione al banco dinamometrico per diverse velocità di inizio frenatura e forze normali applicate al disco. Durante l'esecuzione dell'algoritmo, in alternativa alla formula (14) è possibile stimare l'usura degli elementi frenanti  $D$ ,  $P$  mediante interpolazione sulla base dei valori memorizzati nell'unità di elaborazione.

Il procedimento secondo l'invenzione ha molte possibili applicazioni e comporta numerosi vantaggi.

Con il procedimento secondo l'invenzione si può ad esempio effettuare una diagnostica remota del disco con registrazione della sua temperatura in funzione del tempo o dello spazio di percorrenza. I sistemi di diagnostica remota, noti anche come telemetric systems, sono sistemi integrati che si interfacciano con sistemi di comunicazione a bordo del veicolo (ad esempio MVP, FIP, CAN, CANOpen o ECHELON), con sistemi di trasmissione dei dati, ossia sistemi di comunicazione del tipo GSM-R/GPRS oppure Wi-Fi, in cui possono essere implementati eventuali sistemi di comunicazione di eventi/allarmi via SMS verso terra e verso una "home base".

Il procedimento consente inoltre l'individuazione di eventuali surriscaldamenti ripetuti e/o prolungati che possono essere pericolosi per l'integrità del disco freno e che consentono di prevedere il raggiungimento anticipato del limite di usura del disco e/o delle pastiglie, la comparsa anticipata di cretti e il rischio di scalettamento del disco e della ruota.

Attraverso la diagnostica del disco freno è possibile prevedere la durata del componente e pianificare gli eventuali interventi di manutenzione in funzione delle condizioni di funzionamento: da ciò deriva una riduzione del LCC (Life Cycle Cost) e dei tempi di fermo-macchina.

L'algoritmo attuato nel procedimento secondo l'invenzione è parametrizzabile per ogni specifica applicazione semplicemente attraverso l'impostazione di corrispondenti valori di termini costanti.

Il procedimento nella sua versione più semplice, ossia senza il calcolo dell'usura del disco freno e delle pastiglie, consente di adeguare il calcolo delle temperature alle nuove condizioni del disco freno rilevate in fase di manutenzione ordinaria; si può allora eseguire una riparametrizzazione dell'algoritmo.

In una variante di attuazione il procedimento comprende una verifica che, dopo un tempo predefinito di marcia del veicolo trascorso dall'ultima applicazione del freno pneumatico, la temperatura calcolata dall'algoritmo coincida con la temperatura ambiente rilevata a mezzo di un sensore di bordo.

Con il procedimento secondo l'invenzione l'in-

cremento delle temperature in diversi punti del disco freno può essere calcolato a partire da un valore iniziale che quando coincide con la temperatura ambiente può essere letto da uno o più sensori di temperatura di bordo (ad es. misuratori di temperatura per il controllo del clima nella carrozze) e fornito come segnale di ingresso all'algoritmo. Quando non fosse disponibile un sensore di temperatura ambiente, tale valore può anche essere fornito sotto forma di tabelle, oppure può essere rilevato in prossimità dei dischi freno attraverso uno o più sensori di temperatura dedicati.

Il procedimento secondo l'invenzione può essere integrato con una simulazione del processo di raffreddamento dei dischi freno in condizioni stazionarie (treno fermo, ad esempio in deposito), durante un periodo di tempo in cui l'unità di elaborazione ECU è spenta, al fine di stimare la temperatura dei dischi freno all'istante di riaccensione di tale unità. Per periodi di spegnimento brevi di detta unità, la temperatura dei dischi alla riaccensione dell'unità non coincide con la temperatura ambiente e allora, nella fase di inizializzazione dell'unità dopo la riaccensione, se ne stima il valore simulando il processo di raffreddamento dei

dischi per effetto degli scambi termici per convezione e/o irraggiamento dall'ultimo spegnimento dell'unità fino alla sua riaccensione.

Convenientemente, sebbene non necessariamente, il treno può essere equipaggiato con almeno un sensore per il rilevamento della temperatura raggiunta dalla superficie di attrito disco-pastiglia, con cui si può poi tarare e verificare il modello di simulazione del comportamento termico degli elementi frenanti almeno durante la fase di messa a punto del sistema.

Il sistema può inoltre includere un dispositivo atto ad escludere una limitazione della trazione, onde garantire la prosecuzione inalterata della marcia se ciò è voluto dal macchinista.

Per l'attuazione della versione più completa del procedimento l'algoritmo necessita di prove sperimentali preliminari per la determinazione dei coefficienti caratteristici di usura. In tal caso, può non più essere necessaria una riparametrizzazione in quanto l'algoritmo stesso può valutare la riduzione delle fasce  $F$  in funzione della pressione applicata, della velocità di strisciamento e della temperatura.

In aggiunta a quanto sopra descritto, con il

procedimento secondo l'invenzione è possibile inoltre indicare al macchinista varie grandezze quali, ad esempio, la temperatura istantanea dei dischi freno o la velocità massima a partire dalla quale è possibile eseguire una frenatura di emergenza senza causare il danneggiamento dei dischi freno e/o il surriscaldamento delle pastiglie.

Naturalmente, fermo restando il principio del trovato, le forme di attuazione ed i particolari di realizzazione potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto è stato sopra descritto ed illustrato a puro titolo di esempio non limitativo, senza per questo uscire dall'ambito dell'invenzione come definito nelle annesse rivendicazioni.

## RIVENDICAZIONI

1. Procedimento per la valutazione della temperatura di un disco freno (D) di un veicolo, in particolare un veicolo ferroviario o feretrotramviario, operativamente cooperante con almeno un elemento di freno (P) suscettibile di essere portato a contatto di attrito con il disco (D) tramite un associato attuatore per la frenatura del veicolo; il procedimento comprendendo le operazioni di:

- rilevare la velocità angolare relativa fra il disco freno (D) e l'elemento di freno (P);
- rivelare l'intensità della forza applicata al disco freno (D) per effetto di un'attivazione dell'attuatore; e
- calcolare la potenza termica scambiata dal disco freno (D) con l'ambiente circostante e l'elemento di freno (P);

il procedimento essendo caratterizzato dal fatto di comprendere inoltre le operazioni di:

- calcolare la potenza meccanica convertita in calore quando il disco (D) e l'elemento di freno (P) vengono portati a contatto di attrito;
- calcolare la potenza termica netta applicata al disco freno (D) come differenza fra detta potenza meccanica dissipata per attrito e detta potenza

termica scambiata dal disco freno (D) con l'elemento di freno (P) e l'ambiente; e

- ricavare un'indicazione quantitativa della temperatura del disco freno (D) in funzione di detta potenza termica netta, della massa e della capacità termica del disco freno (P).

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, in cui la potenza termica netta applicata al disco freno (D) viene calcolata utilizzando un modello fisico-matematico unidimensionale del disco-freno (D), secondo il quale il disco-freno (D) viene considerato suddiviso in una pluralità (N) di elementi anulari discreti ( $E_1, \dots, E_N$ ) adiacenti, dei quali quelli di estremità ( $E_1; E_N$ ) sono in relazione di scambio termico con l'ambiente circostante e con un elemento discreto adiacente ( $E_2, E_{N-1}$ ), e quelli intermedi ( $E_2-E_{N-1}$ ) sono in relazione di scambio termico con gli elementi ad essi rispettivamente adiacenti.

3. Procedimento secondo la rivendicazione 2, in cui per ciascuno di detti elementi anulari discreti ( $E_1, \dots, E_N$ ) viene calcolata la rispettiva variazione di temperatura per effetto della potenza termica netta entrante in ciascuno di essi.

4. Procedimento secondo la rivendicazione 3, in

cui per gli elementi anulari terminali ( $E_1, E_N$ ) viene calcolata la rispettiva variazione di temperatura per effetto degli scambi termici per convezione ed irraggiamento con l'ambiente circostante, e per effetto dello scambio termico per conduzione con l'elemento adiacente ( $E_2; E_{N-1}$ ).

5. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui viene inoltre stimato lo spessore di materiale asportato dal disco freno (D) nell'unità di tempo.

6. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui viene inoltre calcolato dinamicamente il valore massimo ammissibile per la velocità di avanzamento del veicolo atto a consentire ancora la frenatura del veicolo senza raggiungere un valore limite predeterminato della temperatura del disco freno (D).

7. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, in cui le variazioni di temperatura del disco freno (D) vengono calcolate a partire da un valore iniziale ottenuto a mezzo di un sensore di temperatura ambiente normalmente utilizzato per altri scopi.

8. Procedimento secondo una delle rivendicazioni da 1 a 6, in cui le variazioni di temperatura del

disco freno (D) vengono calcolate a partire da dati memorizzati, ad esempio in forma di tabelle, rappresentativi della temperatura ambiente.

9. Procedimento secondo una delle rivendicazioni da 1 a 6, in cui le variazioni di temperatura dei dischi freno (D) vengono calcolate a partire da un valore iniziale ottenuto a mezzo di un sensore di temperatura dedicato ubicato in prossimità di un disco freno.

10. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti, includente una simulazione del raffreddamento del disco freno (D) in condizioni di stazionarietà del veicolo.

11. Procedimento secondo la rivendicazione 10, in cui viene utilizzata un'unità elettronica di elaborazione (ECU) e ad ogni riaccensione di tale unità (ECU) viene stimato mediante simulazione il valore della temperatura del disco freno (D), quando l'intervallo di tempo dal precedente spegnimento dell'unità (ECU) è inferiore ad un valore prestabilito.

12. Procedimento secondo una delle rivendicazioni precedenti comprendente una verifica che, dopo un tempo predefinito di marcia del veicolo dall'ultima frenatura, la temperatura del disco freno (D) cal-

colata coincida con la temperatura ambiente.

13. Procedimento secondo una delle rivendicazioni da 2 a 12, in cui a mezzo di un sensore viene rilevata la temperatura della superficie di attrito disco freno/pastiglia, e il valore rilevato di tale temperatura viene utilizzato per verificare e tarare il suddetto modello del disco-freno, almeno durante una fase di messa a punto del procedimento.

FIG. 1

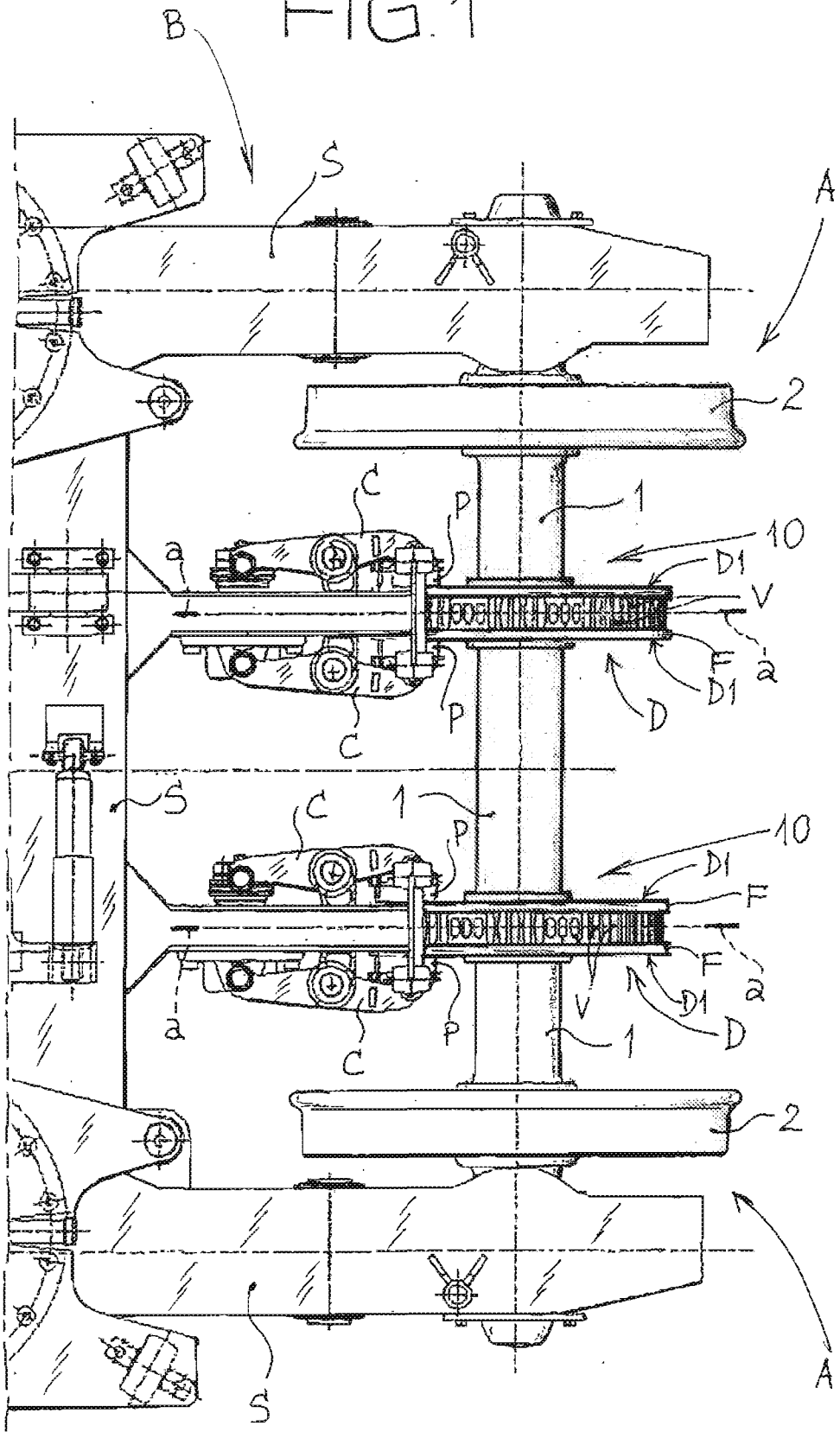


FIG. 2

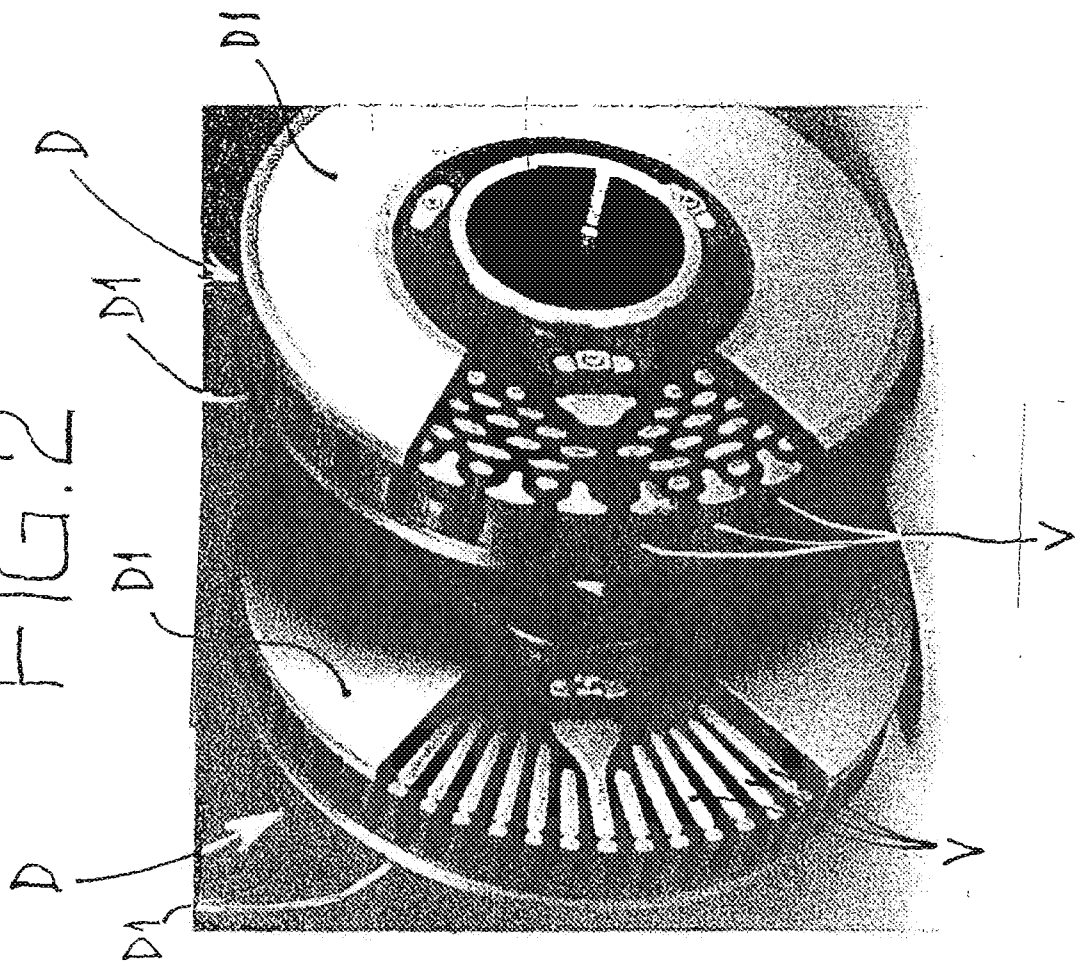


FIG. 3

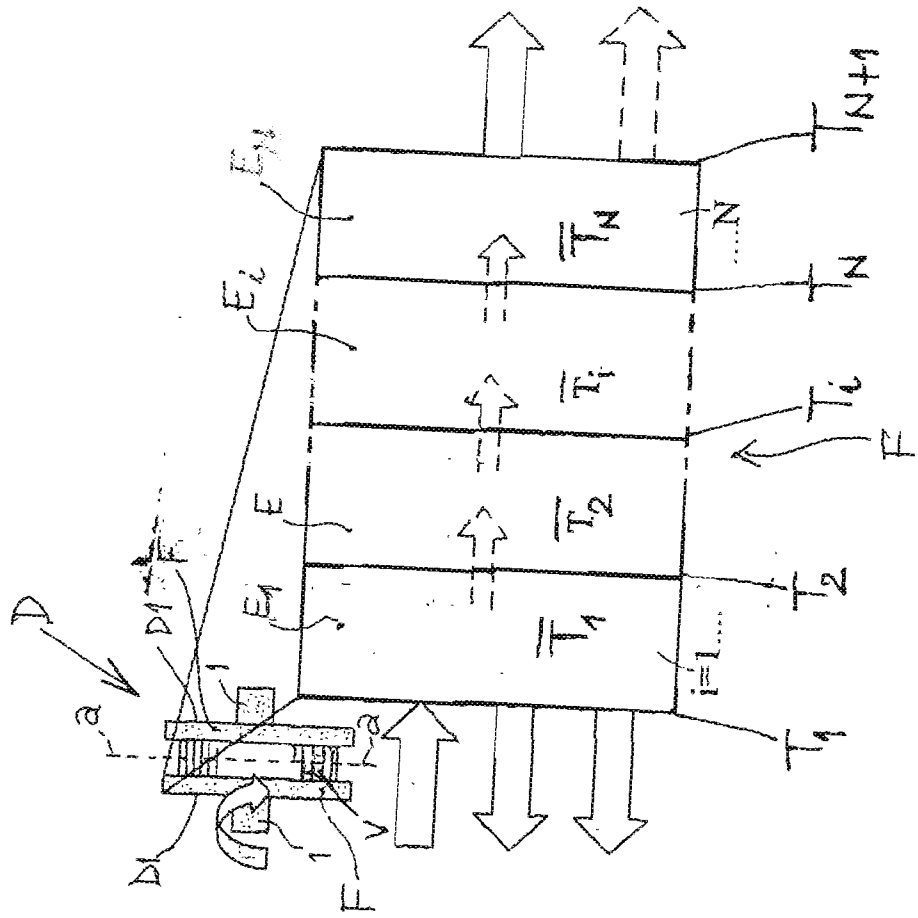


FIG.4

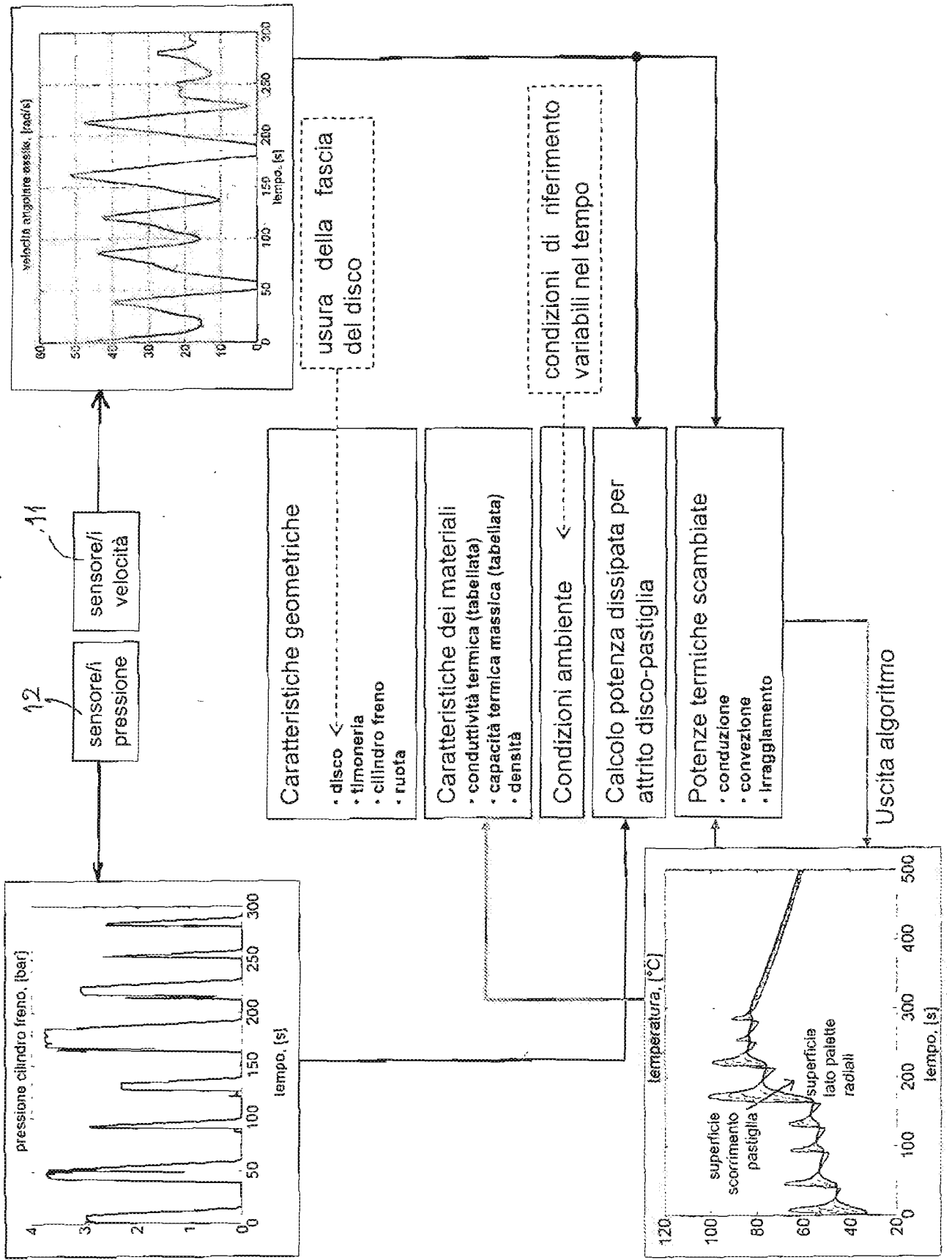


FIG.5

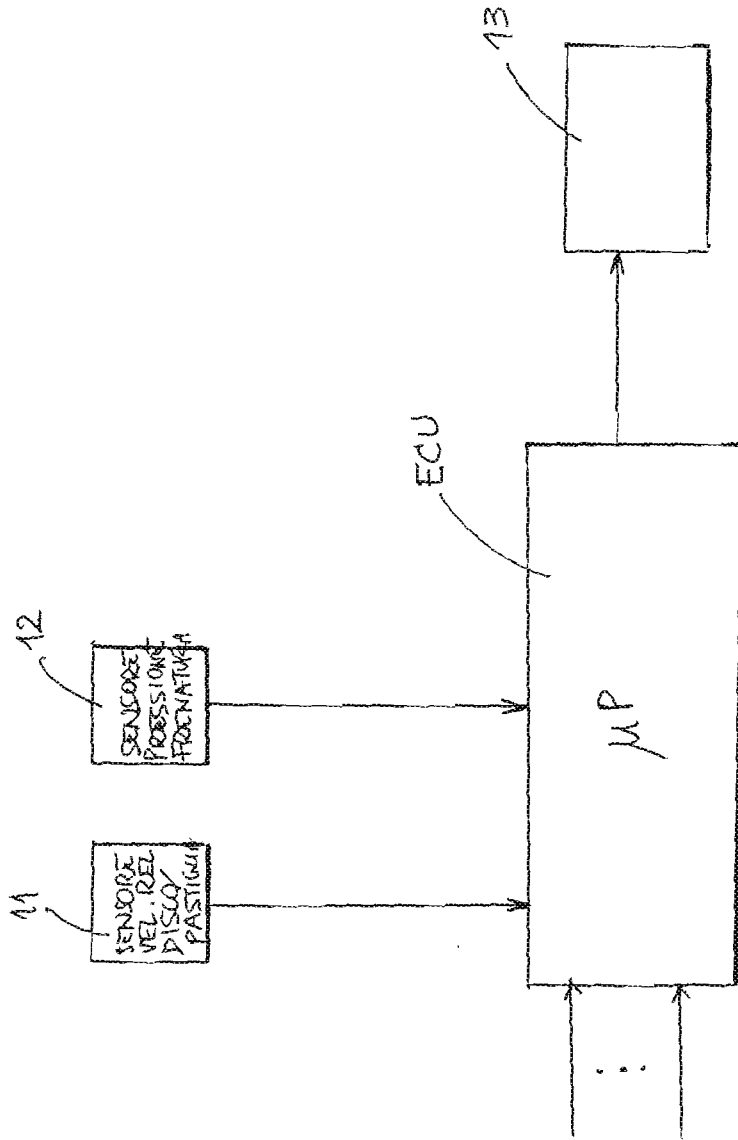


FIG.6

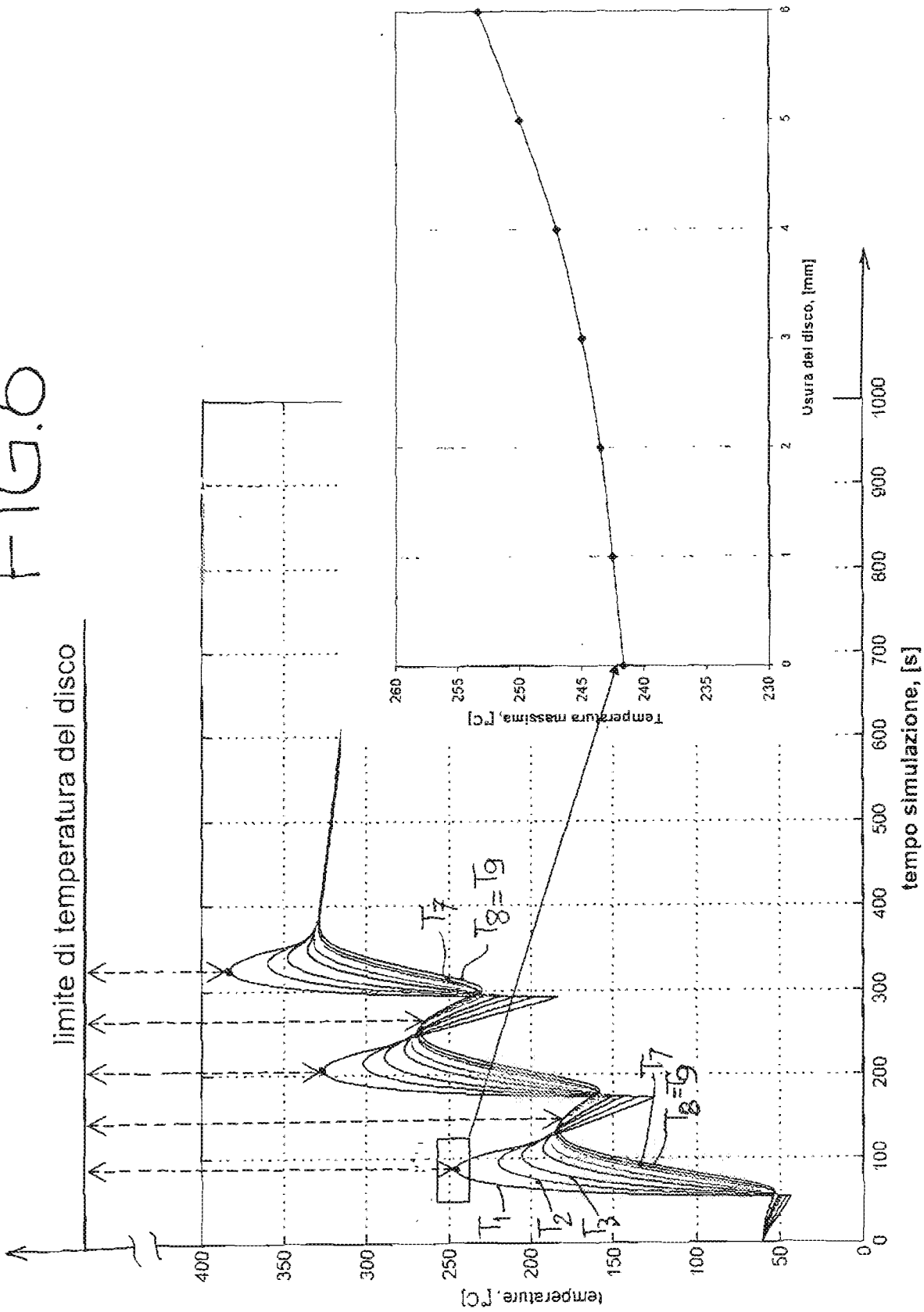


FIG.7

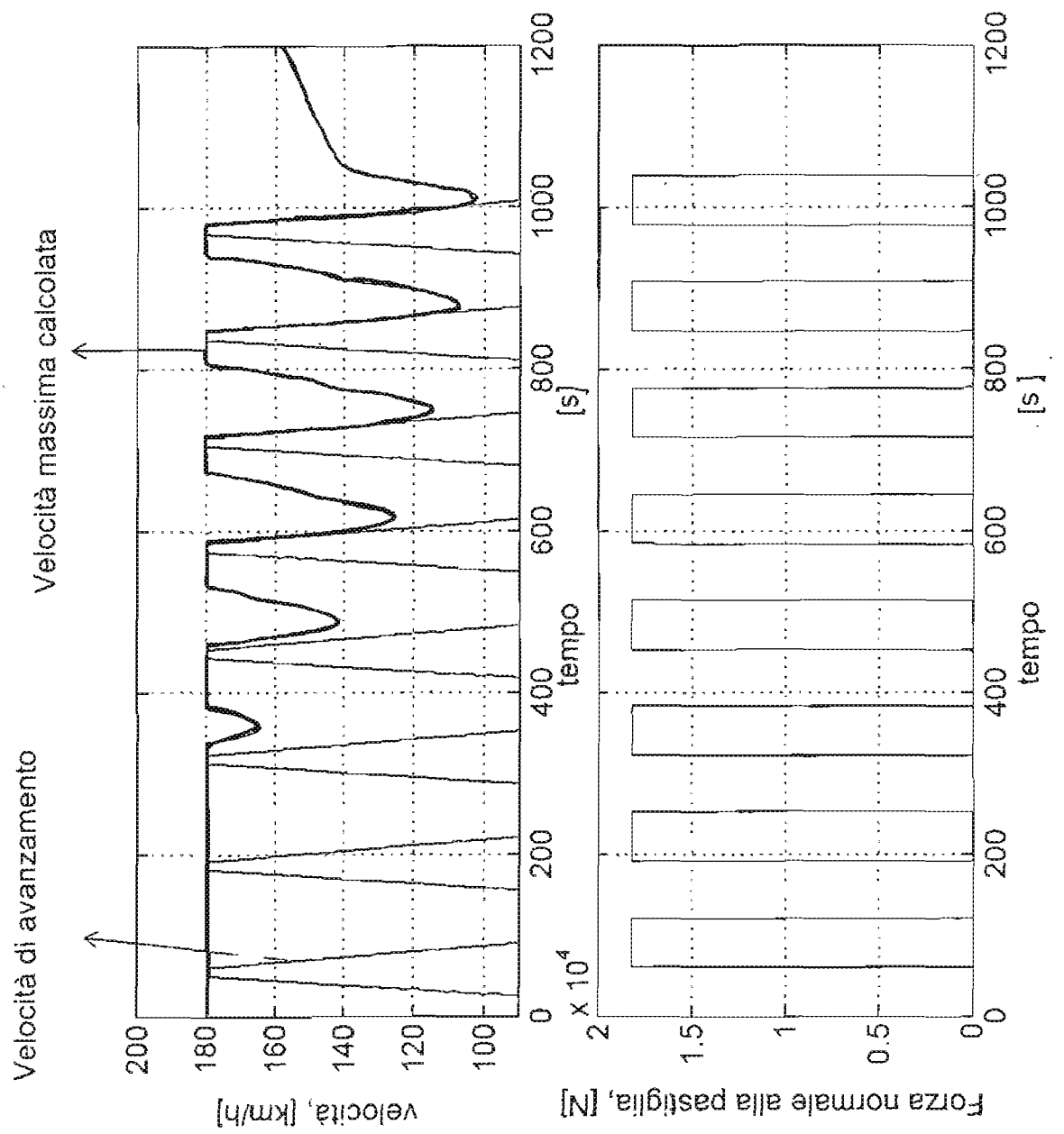


FIG. 8

