STUDIO TECNICO · RIPRODUZIONE ANALOGICA

Interfacciamento meccanico, geometrico ed elettrico testina-braccio

Dinamica del sistema di lettura, geometrie di allineamento, regolazioni fini e interfacciamento elettrico con lo stadio phono

Premessa

La lettura di un disco fonografico è un processo di trasduzione in più stadi, nel quale ogni elemento della catena impone condizioni al contorno a quello che lo segue. L'informazione è incisa come modulazione geometrica del solco: lo stilo la converte in moto meccanico, il generatore della testina in tensione elettrica, e il circuito d'ingresso dello stadio phono, insieme al cablaggio, ne determina la risposta finale. Testina, braccio, cavo e preamplificatore vanno quindi valutati come un unico sistema, perché le loro grandezze caratteristiche (massa, cedevolezza, geometria, induttanza, capacità, resistenza di carico) interagiscono tra loro.

Il primo dominio è quello meccanico. Il complesso braccio-testina si comporta come un oscillatore smorzato del secondo ordine, nel quale la massa efficace del braccio, riferita alla punta dello stilo, e la cedevolezza viscoelastica della sospensione fissano una frequenza di risonanza fondamentale. La posizione di questa risonanza rispetto alle ondulazioni del disco e all'estremo inferiore della banda audio, insieme al grado di smorzamento, condiziona la stabilità del tracciamento prima ancora che entrino in gioco le caratteristiche del trasduttore.

Il secondo dominio è cinematico. Il bulino del tornio incide il solco muovendosi lungo un raggio, mentre un braccio imperniato descrive un arco di cerchio: ne deriva un errore angolare di tangenza che si può soltanto distribuire lungo la facciata. Le geometrie di allineamento classiche (Loefgren A/Baerwald, Loefgren B, Stevenson) sono soluzioni dello stesso problema di ottimizzazione e differiscono per il criterio con cui pesano l'errore residuo. A queste si aggiungono le regolazioni fini (forza d'appoggio, compensazione dello skating, angolo verticale di lettura e azimuth), che governano il contatto tra il diamante e le pareti del solco.

Il terzo dominio è elettromagnetico. Il generatore della testina, sensibile alla velocità, presenta un'impedenza interna che forma una rete del secondo ordine con la capacità del cablaggio e con l'impedenza d'ingresso dello stadio phono. Nelle testine a magnete mobile e a ferro mobile, ad alta induttanza, questa rete risuona nella parte alta della banda audio e va dimensionata insieme alla risposta meccanica dello stilo. Nelle bobine mobili a bassa impedenza la risonanza si sposta nel campo delle radiofrequenze, e il carico resistivo, applicato direttamente o riflesso da un trasformatore di step-up, agisce soprattutto sullo smorzamento e sul rapporto segnale/rumore.

Lo studio affronta i tre domini in quest'ordine, con un capitolo intermedio sulle risonanze strutturali di canna e conchiglia. Il riepilogo che segue ne sintetizza i risultati; i capitoli successivi sviluppano i modelli fisici e le equazioni, mentre le due appendici raccolgono le derivazioni analitiche delle geometrie di allineamento e l'applicazione numerica a combinazioni reali di bracci e testine.

Riepilogo Esecutivo (TL;DR)

- **Modellazione Meccanica:** Il sistema testina-braccio costituisce un oscillatore armonico smorzato del secondo ordine (massa-molla-smorzatore). La massa efficace totale interagisce con la cedevolezza dinamica dell'elastomero generando una risonanza fondamentale che deve essere confinata tra 8 Hz e 12 Hz (target ideale: 9–11 Hz).
- **Momento d'Inerzia:** La massa efficace del braccio non coincide con la massa statica ma dipende dalla distribuzione radiale delle masse rispetto al fulcro ($I = \Sigma m_i \cdot r_i^2$).

- **Cinematica e Allineamento:** I bracci imperniati introducono un errore angolare di tangenza che genera distorsione di seconda armonica inversamente proporzionale al raggio del solco. Le geometrie di Loefgren A (Baerwald), Loefgren B e Stevenson ottimizzano la distribuzione dell'errore pesato tramite due punti di errore nullo (Null Points).
- **Tribologia e Forze Vettoriali:** Il tracciamento è governato dal precarico verticale (VTF), dalla forza centripeta di skating legata all'attrito dinamico e all'offset angle, dall'angolo di incidenza verticale (VTA/SRA) e dalla simmetria assiale nel solco (Azimuth).
- **Interfacciamento Elettrico:** Le testine MM/MI (alta induttanza) formano un circuito risonante LC del secondo ordine con la capacità del cavo e del preamplificatore in banda audio superiore (10–20 kHz). Le testine MC a bassa uscita (bassa induttanza e bassissima impedenza interna) presentano risonanze elettriche ultrasoniche (MHz) e lavorano in regime resistivo (accoppiamento in tensione, smorzamento elettrodinamico di Lenz o accoppiamento in corrente con amplificatori a transimpedenza o trasformatori di step-up).

1. Modellazione Fisica e Dinamica Meccanica

1.1 Il Sistema del Secondo Ordine (Massa-Molla-Smorzatore)

Dal punto di vista della meccanica razionale, l'insieme formato dal braccio di lettura, dal corpo della testina e dall'equipaggio mobile (cantilever + sospensione elastomerica) si comporta come un sistema vibrante a un grado di libertà per ciascuno dei due piani ortogonali (orizzontale/laterale e verticale).

- **Sotto la frequenza di risonanza ($f < f_0$):** La sospensione si comporta come un collegamento rigido. Il braccio segue integralmente il profilo del solco (ondulazioni del disco o warp) senza deflessione relativa tra cantilever e corpo testina; l'uscita elettrica tende a zero (filtro passa-alto meccanico a 12 dB/ottava).
- **Alla frequenza di risonanza ($f = f_0$):** L'energia meccanica trasferita al sistema subisce un'amplificazione dipendente dal fattore di merito Q. Se scarsamente smorzata, l'escursione del cantilever raggiunge il limite elastico, modulando la forza di appoggio istantanea fino alla perdita di contatto (mistracking).
- **Sopra la frequenza di risonanza ($f > f_0$):** L'inerzia della massa totale mantiene il braccio e il corpo testina stazionari rispetto alle modulazioni ad alta frequenza. Lo stilo segue le ondulazioni del solco trasmettendo integralmente il moto relativo al generatore magnetico.

1.2 Equazione Differenziale del Moto e Frequenza Fondamentale (f_0)

L'equazione differenziale che governa il moto relativo z(t) tra lo stilo (eccitato dal solco x(t)) e la massa efficace totale M_{tot} è:

$$\mathbf{M_{tot} \cdot (d^2z / dt^2) + R_m \cdot (dz / dt) + (1 / C_{dyn}) \cdot z = -M_{tot} \cdot (d^2x / dt^2)}$$

Dove:

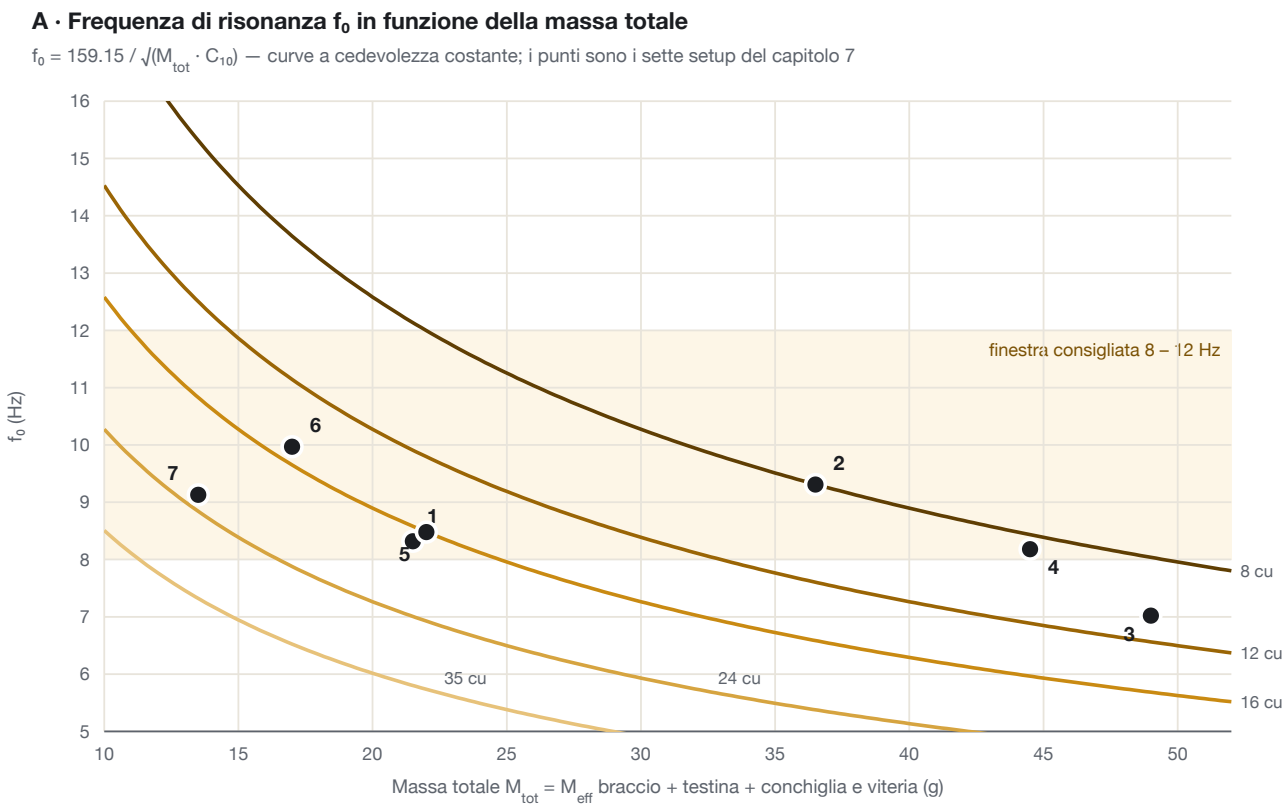
- **M_{tot}:** Massa efficace totale riferita alla punta dello stilo, espressa in grammi (g) o chilogrammi (kg). È data dalla somma: $M_{tot} = M_{eff}$ (massa efficace del braccio) + M_c (massa della testina) + M_h (massa di viti, dadi, rondelle e spessori).
- **R_m:** Resistenza meccanica viscosa dell'elastomero di sospensione (N·s/m).
- **C_{dyn}:** Cedevolezza dinamica (inverso della costante elastica k della molla, $C_{dyn} = 1/k$), espressa in µm/mN (equivalente a 10^{-6} cm/dyne o "cu" - Compliance Units).

Dalla pulsazione naturale $\omega_0 = 1 / \sqrt{(M_{tot} \cdot C_{dyn})}$, si ricava la formula ingegneristica standard:

$$\mathbf{f_0 = 1 / (2\pi \cdot \sqrt{(M_{tot} \cdot C_{dyn})}) \approx 159.155 / \sqrt{(M_{tot} \cdot C_{dyn})}\ [Hz]}$$

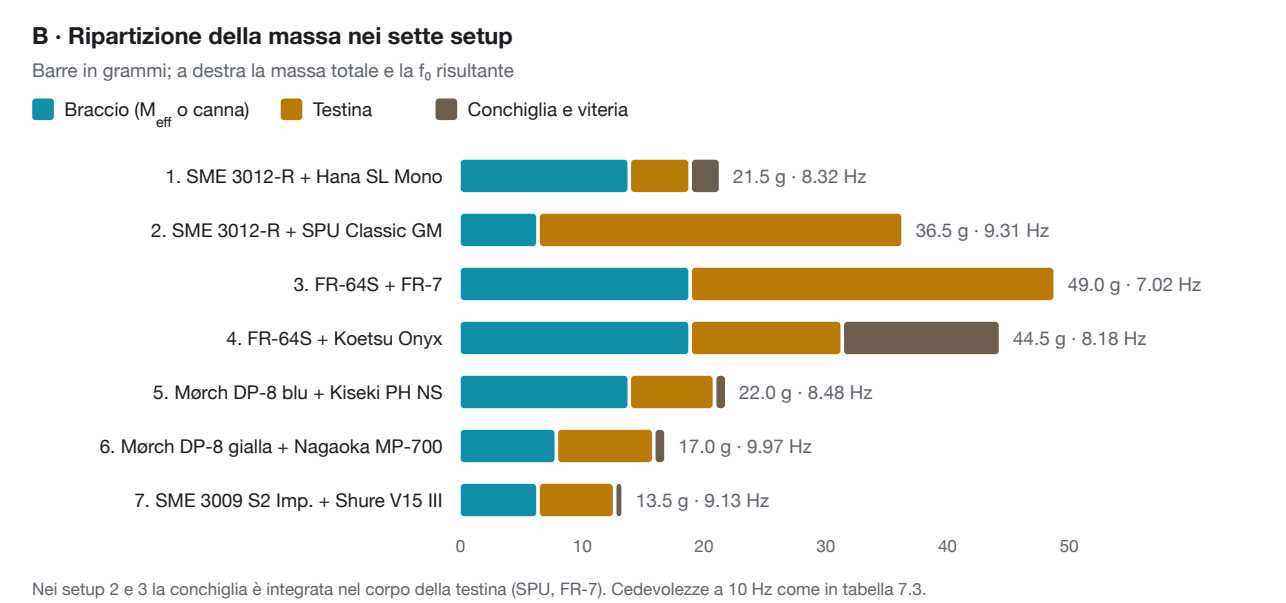
La finestra operativa ottimale è compresa tra 8 Hz e 12 Hz (target nominale: 9–11 Hz):

- **Limite inferiore (< 8 Hz):** Sovrapposizione con lo spettro energetico delle ondulazioni fisiche del vinile (warp spectrum, concentrato tra 0.55 Hz e 5 Hz), del rumble dei cuscinetti del piatto e delle risonanze del telaio sospeso.
- **Limite superiore (> 12 Hz):** Eccessiva vicinanza all'estremo inferiore della banda audio incisa (20 Hz), con conseguente alterazione della risposta in fase e ampiezza sulle basse frequenze e intermodulazione meccanica.



A · Frequenza di risonanza f_0 in funzione della massa totale

$f_0 = 159.15 / \sqrt{(M_{tot} \cdot C_{10})}$ — curve a cedevolezza costante; i punti sono i sette setup del capitolo 7



B · Ripartizione della massa nei sette setup

Barre in grammi; a destra la massa totale e la f_0 risultante

Nei setup 2 e 3 la conchiglia è integrata nel corpo della testina (SPU, FR-7). Cedevolezze a 10 Hz come in tabella 7.3.

Figura 1 *— Frequenza di risonanza f_0 in funzione della massa totale, per cedevolezze da 8 a 35 cu (A), e ripartizione della massa tra braccio, testina e conchiglia nei sette setup della tabella 7.3 (B). La fascia evidenziata è la finestra consigliata 8–12 Hz.*

1.3 Momento d'Inerzia e Massa Efficace del Braccio (M_{eff})

La massa efficace di un braccio non è una grandezza misurabile con una bilancia statica (che misura la forza peso una volta sbilanciato il contrappeso), bensì una grandezza inerziale derivata dal secondo principio della dinamica

rotazionale.
Dato un braccio di lunghezza effettiva L_{eff} (distanza tra il fulcro e la punta dello stilo), il momento d'inerzia totale rispetto all'asse di rotazione è:

$$I = \int r^2 \, dm \approx \Sigma \, (m_i \cdot r_i^2)$$

La massa efficace equivalente concentrata sullo stilo è definita come:

$$M_{eff} = I / (L_{eff})^2 = [\, I_{canna} + M_{headshell} \cdot L_{eff}^2 + M_{cw} \cdot R_{cw}^2 \,] / L_{eff}^2$$

Conseguenze progettuali e operative:

- **Posizione e massa del contrappeso (M_{cw}):** Per bilanciare staticamente il braccio, il momento torcente anteriore e posteriore devono equivalersi ($M_{anteriore} \cdot L_{eff} = M_{cw} \cdot R_{cw}$). Tuttavia, poiché il momento d'inerzia dipende dal quadrato della distanza (R_{cw}^2), un contrappeso di massa maggiore posizionato molto vicino al fulcro riduce drasticamente R_{cw}^2, abbassando la massa efficace complessiva del sistema rispetto a un contrappeso più leggero posizionato lontano dal fulcro.
- **Cambiamento di canna o conchiglia:** La massa aggiunta sull'headshell ($r \approx L_{eff}$) contribuisce in rapporto 1:1 alla massa efficace totale, mentre la massa distribuita lungo la canna contribuisce per circa 1/3 della sua massa statica (per un cilindro uniforme imperniato a un estremo, $I = 1/3 \cdot m \cdot L^2$).
- **Asimmetria Orto-Verticale:** Nei bracci tangenziali a carrello corto o nei bracci imperniati con masse eccentriche o articolazioni asimmetriche (es. cuscinetti a lama solo verticali e perno orizzontale disassato), la massa efficace orizzontale $M_{eff,H}$ differisce da quella verticale $M_{eff,V}$, dando origine a due distinte frequenze di risonanza f_0,H e f_0,V.

1.4 Comportamento Viscoelastico dell'Elastomero e Conversione 100 Hz → 10 Hz

Il gommino di sospensione (damper in butile o elastomeri sintetici) non è una molla ideale ma un elemento viscoelastico non lineare il cui modulo di taglio complesso $G^*(\omega) = G'(\omega) + jG''(\omega)$ aumenta con la frequenza.

- **Standard Europeo/USA (10 Hz):** La cedevolezza dinamica viene misurata direttamente a 10 Hz, rendendo il dato immediatamente utilizzabile nella formula di f_0.
- **Standard Giapponese JIS (100 Hz):** Produttori come Denon, Audio-Technica, Nagaoka e Fidelity Research specificano la cedevolezza dinamica misurata a 100 Hz (C_{100}). A 100 Hz l'elastomero presenta una rigidità dinamica sensibilmente superiore rispetto a 10 Hz.
- **Relazione empirica di conversione:**

$$C_{10} \approx k_{conv} \cdot C_{100}$$ *(con k_{conv} compreso tra 1.5 e 2.0, valore medio tipico = 1.75)*

Nota di rigore metodologico: Il fattore k_{conv} non è una costante fisica universale, poiché dipende dalla formulazione chimica dell'elastomero, dall'età della sospensione e dalla temperatura operativa (variazioni di ±5 °C rispetto ai 20 °C standard spostano significativamente la cedevolezza). La verifica strumentale tramite disco test rimane l'unico metodo esatto.

1.5 Fattore di Merito (Q) e Smorzamento Fluido (Fluid Damping)

Il fattore di merito meccanico alla risonanza è definito come:

$$Q_m = [\, \sqrt{(M_{tot} / C_{dyn})} \,] / R_m$$

- Un valore di Q_m elevato (> 3, corrispondente a un picco > +9.5 dB a f_0) comporta un'oscillazione prolungata del braccio dopo un impulso o un'ondulazione, causando intermodulazione da effetto Doppler (modulazione di frequenza del segnale audio dovuta all'oscillazione longitudinale dello stilo nel solco) e variazioni cicliche della VTF.

- **Smorzamento tramite fluido siliconico:** L'inserimento di una vaschetta contenente fluido siliconico ad alta viscosità cinematica (es. dimetilpolisilossano da 30 000 cSt a 200 000 cSt) in cui pesca una paletta solidale al braccio introduce una resistenza viscosa esterna R_{ext} proporzionale alla velocità angolare ($F_d = -R_{ext} \cdot dz/dt$). A frequenze audio (f > 20 Hz), dove l'ampiezza di spostamento del braccio è infinitesima, il fluido risulta trasparente; alla frequenza f_0 (grandi ampiezze di moto), il fluido dissipa energia termica abbattendo il picco di risonanza e riducendo Q_m verso 0.7–1.0 (lo smorzamento critico corrisponde a $Q_m = 0.5$; $Q_m \approx 0.707$ è l'allineamento di Butterworth, a risposta massimamente piatta).

1.6 Tabella di Accoppiamento: Archetipi di Bracci e Testine

Categoria Sistema	Massa Efficace Braccio (M_{eff})	Cedevolezza Testina a 10 Hz (C_{10})	Esempi Storici e Moderni di Riferimento	Massa Totale Tipica (M_{tot})	f_0 Risultante
Massa Ultra-Bassa / Alta Cedevolezza	4 g – 8 g	20 – 45 µm/mN	Bracci: SME 3009 S2 Improved (conchiglia fissa), Mørch DP-8 (canna verde/rossa), Infinity Black Widow. Testine: Shure V15 Type III/IV, Ortofon OM30/40.	11 g – 15 g	6.1 – 10.7 Hz (estremi della fascia)
Massa Media / Media Cedevolezza	9 g – 14 g	14 – 22 µm/mN	Bracci: Rega RB300/RB3000, SME Series V, SME 3012-R, Technics EPA-100, Mørch (canna gialla/blu). Testine: Nagaoka MP-500/700, Hana SL, Lyra Delos.	18 g – 23 g	7.1 – 10.0 Hz (estremi della fascia)
Massa Elevata / Bassa Cedevolezza	18 g – 35 g	5 – 11 µm/mN	Bracci: Fidelity Research FR-64S, Ortofon RMA-309. Testine: Ortofon SPU, Fidelity Research FR-7, Denon DL-103, Koetsu Onyx.	32 g – 50 g	6.8 – 12.6 Hz (estremi della fascia)

2. Cinematica e Geometria di Tracciamento (Bracci Imperniati)

2.1 Origine dell'Errore di Tangenza e Distorsione Armonica

In fase di masterizzazione, il bulino incisore del tornio (es. Neumann VMS-70/80) si muove lungo una guida lineare perfettamente radiale: l'asse longitudinale del bulino è sempre perpendicolare al raggio R del disco (tangente al solco).
Un braccio imperniato ruota invece attorno a un fulcro fisso, descrivendo un arco di cerchio. Di conseguenza, l'asse del generatore della testina forma un angolo di errore laterale θ_e (Tracking Error Angle) rispetto alla tangente del solco.

Secondo la trattazione classica di Erik Loefgren (1938) [1] e H.G. Baerwald (1941) [2], la distorsione di seconda armonica (THD) generata dall'errore di tangenza per un segnale sinusoidale registrato con velocità di picco v_0 è espressa da:THD_2 (%) $\approx [v_0 \cdot |\tan(\theta_e)| / (\Omega_{disco} \cdot R)] \cdot 100 \approx (v_0 / \Omega_{disco}) \cdot [|\theta_e \text{ (rad)}| / R] \cdot 100$ (Ω_{disco} = velocità angolare del disco: 3.49 rad/s a 33⅓ giri; v_0 in mm/s, R in mm)

Poiché a velocità angolare costante (33.33 o 45 rpm) la velocità tangenziale del solco diminuisce linearmente con il raggio R ($v_t = \omega_{disco} \cdot R$), la lunghezza d'onda fisica incisa sul vinile si comprime verso i solchi interni. Pertanto, la grandezza da minimizzare matematicamente non è l'errore angolare assoluto θ_e, bensì il **Weighted Tracking Error (WTE, Errore di Tracciamento Pesato)**:

> **$WTE(R) = |\theta_e(R)| / R$ [gradi/mm o rad/m]**

2.2 Equazioni Fondamentali di Allineamento (Overhang, Offset Angle, Null Points)

Per contenere θ_e entro frazioni di grado per archi lunghi 9", 10" o 12", si introducono due modifiche geometriche rispetto a un braccio dritto che termina sul perno:

1. **Overhang (O):** La lunghezza effettiva del braccio L_{eff} supera la distanza tra fulcro e perno del piatto D_{p2s} (Pivot-to-Spindle): $O = L_{eff} - D_{p2s}$.
2. **Offset Angle (α):** La testina (o la conchiglia) viene ruotata verso l'interno di un angolo α rispetto alla retta che congiunge il fulcro alla punta dello stilo.

Applicando il teorema del coseno (Carnot) al triangolo formato da Perno del piatto, Fulcro del braccio e Punta dello stilo a un generico raggio inciso R, l'angolo tra il raggio R e la tangente all'arco del braccio conduce all'equazione esatta dell'errore angolare:

$$\theta_e(R) = \arcsin\left[\left(R^2 + L_{eff}^2 - D_{p2s}^2\right) / \left(2 \cdot R \cdot L_{eff}\right) \right] - \alpha$$

Sostituendo $D_{p2s} = L_{eff} - O$ e ponendo la quantità costante lineare $L_0 = (L_{eff}^2 - D_{p2s}^2) / (2 \cdot L_{eff}) = O \cdot [1 - O / (2 \cdot L_{eff})]$, per angoli piccoli (approssimazione del primo ordine $\sin(x) \approx x$) si ottiene:$\theta_e(R) \approx (R / (2 \cdot L_{eff})) + (L_0 / R) - \alpha$

Imponendo $\theta_e(R) = 0$, si ottiene un'equazione algebrica di secondo grado in R le cui due radici reali sono i **Raggi di Errore Nullo (Null Points)** R_1 (interno) e R_2 (esterno):

$$R^2 - \left(2 \cdot L_{eff} \cdot \sin\alpha\right) \cdot R + \left(L_{eff}^2 - D_{p2s}^2\right) = 0$$

(relazione esatta: è la condizione $\theta_e = 0$ dell'equazione con l'arcoseno)

Dalle relazioni tra coefficienti e radici (formule di Viète) per le equazioni esatte si ricavano i parametri costruttivi del braccio in funzione dei soli Null Points R_1 e R_2 e della lunghezza effettiva L_{eff}:

- **Media Armonica dei Raggi Nulli:** $R_{hm} = (2 \cdot R_1 \cdot R_2) / (R_1 + R_2)$
- **Media Aritmetica dei Raggi Nulli:** $R_{am} = (R_1 + R_2) / 2$
- **Distanza Pivot-to-Spindle (forma esatta):** $D_{p2s} = \sqrt{(L_{eff}^2 - R_1 \cdot R_2)}$. Ne derivano:
  - **Overhang (O):** $O = L_{eff} - \sqrt{(L_{eff}^2 - R_1 \cdot R_2)} \approx (R_1 \cdot R_2) / (2 \cdot L_{eff})$
  - **Offset Angle (α):** $\alpha = \arcsin[(R_1 + R_2) / (2 \cdot L_{eff})]$ (forma esatta) $\approx (R_1 + R_2) / (2 \cdot L_{eff})$ [in radianti]

2.3 Derivazione delle Geometrie Classiche (Loefgren A/Baerwald, Loefgren B, Stevenson)

Definiti il raggio minimo inciso R_{min} e il raggio massimo inciso R_{max} della facciata del disco, le tre geometrie storiche risolvono il problema di minimo con criteri differenti:

1. **Loefgren A (Baerwald, 1941) — Criterio Minimax di Chebyshev:**
   Minimizza il valore massimo assoluto dell'errore pesato WTE(R) sull'intero intervallo $[R_{min}, R_{max}]$. Per il teorema dell'alternanza di Chebyshev, l'ottimo si ottiene quando i tre massimi locali assoluti di $|WTE(R)|$ (situati a R_{min}, al raggio intermedio R_m e a R_{max}) sono esattamente uguali in modulo:
   $|WTE(R_{min})| = |WTE(R_m)| = |WTE(R_{max})|$
   Da cui si ricavano le posizioni dei Null Points:
   - $R_{hm} = (2 \cdot R_{min} \cdot R_{max}) / (R_{min} + R_{max})$
   - $R_{1,2} = (2 \cdot R_{min} \cdot R_{max}) / [(R_{max} + R_{min}) \pm (\sqrt{2} / 2) \cdot (R_{max} - R_{min})]$ (segno + per R_1, segno – per R_2; derivazione in §6.2)

2. **Loefgren B (1938) — Minimizzazione dell'Errore Quadratico Medio (RMS):**
   Minimizza l'integrale del quadrato dell'errore pesato lungo l'intera superficie incisa:
   $\int [WTE(R)]^2 \, dR$ = minimo (integrato da R_{min} a R_{max})
   Riduce di circa un terzo l'errore pesato e la distorsione tra i due punti nulli (per la maggior parte della durata del

brano), accettando un picco di errore leggermente superiore all'estremo interno R_{min} e all'estremo esterno R_{max} rispetto a Baerwald.

3. **Stevenson (J.K. Stevenson, 1966) [3] — Protezione dei Solchi Interni:**
   Impone il primo punto di errore nullo esattamente sul raggio minimo inciso ($R_1 = R_{min}$), dove la velocità lineare è minima e i pieni orchestrali della musica sinfonica sono più critici, ed eguaglia i soli due picchi rimanenti (il picco intermedio tra R_1 e R_2 e il picco sul bordo esterno R_{max}).

2.4 Standard dei Raggi di Incisione (IEC 60098 vs DIN 45547 vs JIS)

I valori numerici dei Null Points dipendono strettamente dai limiti radiali R_{min} e R_{max} assunti dallo standard di riferimento:

- **IEC 60098 (1958) / RIAA [4]:** R_{min} = 60.325 mm, R_{max} = 146.05 mm.
- **DIN 45547 (Germania) [5]:** R_{min} = 57.50 mm, R_{max} = 146.05 mm (considera dischi incisi molto vicino all'etichetta; edizioni successive di DIN e IEC portano R_{max} a 146.30 mm).
- **JIS S8502-1973 (Giappone) [6]:** R_{min} = 57.60 mm, R_{max} = 146.50 mm.

2.5 Tabella Comparativa Numerica: Bracci da 9", 10" e 12" (Standard IEC: R_{min} = 60.325 mm, R_{max} = 146.05 mm)

Lunghezza Nominale e L_{eff}	Geometria	Null Point Interno R_1 (mm)	Null Point Esterno R_2 (mm)	Overhang O (mm)	Distanza Pivot-Spindle D_{p2s} (mm)	Offset Angle α (gradi)	WTE Max (°/cm)
9 Pollici (L_{eff} = 229 mm)	**Loefgren A (Baerwald)**	66.00	120.90	18.14	210.86	24.08°	0.130
9 Pollici (L_{eff} = 229 mm)	**Loefgren B**	70.29	116.60	18.65	210.35	24.08°	0.212
9 Pollici (L_{eff} = 229 mm)	**Stevenson**	60.325	117.42	16.03	212.97	22.84°	0.158
10 Pollici (L_{eff} = 254 mm)	**Loefgren A (Baerwald)**	66.00	120.90	16.23	237.77	21.59°	0.115
10 Pollici (L_{eff} = 254 mm)	**Loefgren B**	70.29	116.60	16.68	237.32	21.59°	0.188
10 Pollici (L_{eff} = 254 mm)	**Stevenson**	60.325	117.42	14.35	239.65	20.48°	0.139
12 Pollici (L_{eff} = 305 mm)	**Loefgren A (Baerwald)**	66.00	120.90	13.37	291.63	17.84°	0.093
12 Pollici (L_{eff} = 305 mm)	**Loefgren B**	70.29	116.60	13.75	291.25	17.84°	0.152
12 Pollici (L_{eff} = 305 mm)	**Stevenson**	60.325	117.42	11.84	293.16	16.94°	0.113

(Nota tecnica sui bracci da 12 pollici come SME 3012 / 3012-R: l'incremento di L_{eff} da 229 mm a 305 mm riduce l'errore pesato massimo e la distorsione armonica da tracciamento di circa il 28% (WTE max di Baerwald da 0.130 a 0.093 °/cm), riducendo contemporaneamente anche l'angolo di offset α e di conseguenza il modulo della forza di skating).

3. Tribologia, Forze Vettoriali e Regolazioni Fini

3.1 Forza di Appoggio Verticale (VTF) e Centraggio del Generatore

La VTF (Vertical Tracking Force, espressa in grammi-forza o milliNewton, dove 1 g ≈ 9.81 mN) svolge due funzioni primarie:

1. **Mantenimento del contatto meccanico:** Fornisce la forza normale necessaria a contrastare le accelerazioni verticali e laterali impresse dalla modulazione del solco (alla punta dello stilo si superano diverse centinaia di g ad alta frequenza: 10 cm/s a 10 kHz corrispondono a circa 640 g).
2. **Allineamento geometrico del generatore magnetico:** Nelle testine MC in particolare, il precarico statico della VTF flette il tie-wire (filo di tensione posteriore) e comprime l'elastomero fino a portare la bobina mobile esattamente nel centro simmetrico del flusso magnetico generato dalle espansioni polari (traferro).
    - *VTF troppo bassa:* Rischio severo di mistracking (lo stilo rimbalza contro le pareti del solco danneggiando il vinile più di una VTF elevata) e asimmetria del campo magnetico con aumento della distorsione di seconda armonica.
    - *VTF troppo alta:* Le bobine lavorano fuori asse rispetto al centro del flusso magnetico, la sospensione entra in regione di compressione non lineare (irrigidimento dell'elastomero) e il corpo testina rischia di spanciare sul disco.

3.2 Analisi Vettoriale della Forza di Skating e Compensazione (Anti-Skating)

Poiché la retta d'azione della forza di attrito dinamico F_f (tangente al solco nel punto di contatto dello stilo) non interseca il fulcro del braccio a causa dell'overhang e dell'offset angle α, si genera una scomposizione vettoriale delle forze.
Detta $F_f = \mu \cdot VTF$ la forza di attrito radente tra diamante e PVC:

- La componente longitudinale $F_t = F_f \cdot \cos(\alpha + \theta_e)$ mette in trazione la canna del braccio verso il fulcro.
- La componente normale $F_{skating}$ genera un momento torcente che spinge il braccio verso il centro del disco:

$$\mathbf{F_{skating} = F_f \cdot \sin(\alpha + \theta_e) = \mu \cdot VTF \cdot \sin(\alpha + \theta_e)}$$

Variabili fisiche che impediscono una compensazione statica perfetta:

- Il coefficiente d'attrito dinamico μ (tipicamente compreso tra 0.22 e 0.45) non è costante: aumenta all'aumentare della velocità di modulazione del solco (un passaggio musicale ad alto livello genera una forza di skating fino al 30–40% superiore rispetto a un solco non modulato) e varia significativamente in base al profilo di taglio del diamante e alla pulizia del vinile.
- L'angolo $(\alpha + \theta_e)$ varia lungo il raggio del disco, presentando un minimo in corrispondenza del raggio intermedio e due massimi sul bordo esterno e interno.
- *Regolazione strumentale:* L'uso di un disco liscio (senza solchi) sovrastima o falsifica il punto di equilibrio perché l'area di contatto della punta poggia sul fondo anziché sulle due pareti a 45°; la taratura corretta si effettua osservando su oscilloscopio l'insorgenza simmetrica del clipping (mistracking) sui canali L e R con tracce test ad alta modulazione (es. 300 Hz o 315 Hz a +12 dB / +15 dB, corrispondenti a 50–80 µm di ampiezza laterale).

3.3 Geometria del Diamante, VTA (Vertical Tracking Angle) e SRA (Stylus Rake Angle)

- **VTA (Vertical Tracking Angle):** È l'angolo formato dalla retta che congiunge il fulcro del cantilever alla punta dello stilo rispetto alla superficie del disco, proiettato sul piano verticale laterale. Lo standard moderno IEC/RIAA prevede un angolo di incisione nominale di 20° (±5°).
- **SRA (Stylus Rake Angle):** È l'angolo formato dall'asse verticale del profilo di contatto del diamante rispetto alla perpendicolare al piano del disco. Poiché durante il taglio del master in lacca il bulino incisore (riscaldato e aspirato) è inclinato leggermente in avanti per facilitare l'espulsione del truciolo (chip), l'angolo effettivo inciso è tipicamente compreso tra **92° e 93°** (2°–3° oltre la verticale).
- **Sensibilità geometrica:** Una variazione di altezza della base del braccio (VTA pillar) di 1 mm su un braccio da 9 pollici (229 mm) produce una variazione angolare di appena:

$$\mathbf{\Delta\theta = \arctan(1 / 229) \approx 0.25^\circ}$$ ***(un quarto di grado)***

Per ottenere una variazione di 1° dell'SRA su un braccio da 9" occorrono circa 4 mm di escursione verticale della torretta (e circa 5.3 mm su un braccio da 12").

3.4 Tabella Comparativa dei Profili di Taglio dello Stilo

Profilo dello Stilo	Raggio Minore r (µm) × Raggio Maggiore R (µm)	Area di Contatto Tipica (µm²)	Sensibilità a VTA/SRA e Azimuth	Caratteristiche di Tracciamento e Usura
Sferico / Conico (es. Denon DL-103, Ortofon SPU Classic)	15 – 18 µm (raggio unico, 25 µm per mono/LP storici)	~18 – 22	Molto bassa (il profilo di contatto non cambia al variare di VTA e Azimuth).	Effetto "Pinch Effect" sulle alte frequenze; eccellente immunità ai difetti superficiali; durata ~400–600 ore.
Ellittico (Biradiale)	8 × 18 µm (o 7 × 18 µm)	~12 – 15	Moderata.	Migliore risposta in alta frequenza nei solchi interni rispetto al conico; maggiore pressione specifica; durata ~500–700 ore.
Hyper-Ellittico / Shibata / Fine Line	6 × 40 µm ÷ 6 × 75 µm	~25 – 35	Alta (richiede allineamento accurato di SRA e Azimuth).	Grande impronta verticale che distribuisce la VTF riducendo l'usura del solco; nata per il quadrifonico CD-4 (fino a 45 kHz).
MicroRidge / MicroLine / Replicant 100 / Gyger S	2 × 75 µm ÷ 5 × 100 µm	~35 – 45	Estrema (tolleranza SRA ideale entro ±0.5° da 92°).	Raggio minore di 2–3 µm che eguaglia il profilo del bulino incisore; distorsione da tracciamento minima fino a fine disco; durata ~1000+ ore grazie alla cresta micrometrica costante.

3.5 Azimuth, Diafonia (Crosstalk) e Bilanciamento di Fase

Nel sistema stereofonico Westrex 45°/45°, il canale sinistro (L) è inciso sulla parete interna del solco e il canale destro (R) sulla parete esterna, ortogonali tra loro.

- Un errore di Azimuth (rotazione assiale della testina vista frontalmente) altera l'ortogonalità tra l'asse di sensibilità dei generatori L/R e le pareti del solco, degradando la separazione tra i canali (Crosstalk) e introducendo uno sfasamento relativo ad alta frequenza tra L e R.
- Poiché il montaggio meccanico del diamante sul cantilever e delle bobine sul nucleo presenta tolleranze costruttive di ±1° ÷ 2°, mettere perfettamente "in bolla" il guscio superiore dell'headshell non garantisce il corretto Azimuth elettrico.
- **Procedura di taratura strumentale:** Si riproduce una traccia test a 1 kHz incisa solo sul canale L e si misura in dBV (o mV RMS) il segnale residuo indotto sul canale R (Crosstalk L→R), ripetendo poi l'operazione con la traccia solo R (Crosstalk R→L). L'Azimuth ottimale si ottiene quando le due attenuazioni di diafonia si equivalgono (es. -30 dB su entrambi i canali) con il minimo sfasamento relativo.

4. Risonanze Strutturali, Modi Flessionali e Smorzamento dei Materiali

Oltre alla risonanza rigida fondamentale f_0 (8–12 Hz), la canna del braccio e il portatestina sono soggetti a modi propri di vibrazione elastica (flessionali e torsionali) in piena banda audio (tipicamente tra 150 Hz e 2500 Hz), eccitati dall'energia meccanica che lo stilo non converte in segnale elettrico ma trasmette attraverso il corpo della testina.

- **Equazione della frequenza flessionale di una trave (Eulero-Bernoulli):**
  La prima frequenza propria di flessione di una canna tubolare è proporzionale alla velocità di propagazione del suono nel materiale e al raggio di inerzia della sezione:

$$f_{flessione} \propto (d_{ext} / L^2) \cdot \sqrt{(E / \rho)}$$

Dove:

- **E:** Modulo di Young (elasticità longitudinale).
- **ρ:** Densità volumetrica del materiale.
- **√(E / ρ):** Velocità specifica di propagazione acustica nel mezzo.
- **d_{ext}:** Diametro esterno del tubo (a parità di massa, con parete sottile la rigidità flessionale cresce con il quadrato del diametro e la frequenza flessionale cresce in proporzione al diametro).
- **Proprietà Acustiche dei Materiali per Canne e Conchiglie:**
  - **Alluminio (es. Lega 6061/7075):** √(E / ρ) ≈ 5100 m/s; smorzamento interno (fattore di perdita η) basso. Spesso trattato superficialmente (anodizzazione dura) o riempito internamente con schiume poliuretaniche/legno di balsa per abbattere il Q delle risonanze tubolari.
  - **Magnesio (es. fusione monoblocco SME Serie V):** √(E / ρ) ≈ 5000 m/s; densità bassissima (1.74 g/cm³) ed elevatissimo coefficiente di smorzamento interno (η ~ 10 volte superiore all'alluminio).
  - **Titanio / Acciaio Inox (es. Fidelity Research FR-64S):** Alta densità e altissima rigidità strutturale; sposta le riflessioni energetiche grazie al disadattamento di impedenza meccanica tra guscio testina e canna pesante.
  - **Fibra di Carbonio (CFRP):** √(E / ρ) ≈ 9000 – 11 000 m/s; sposta i modi flessionali verso le altissime frequenze, ma richiede resine smorzanti o stratificazioni ibride per evitare risonanze ad alto Q tra 800 Hz e 2 kHz.
  - **Legni Densi (Ebano, Cocobolo, Panzerholz per headshell e spessori):** Velocità acustica anisotropa e alto smorzamento viscoso interno delle fibre cellulari; eccellenti come interfaccia meccanica (spacers) tra corpo testina e conchiglia metallica per interrompere le onde stazionarie.

5. Interfacciamento Elettrico Avanzato: Testina, Cablaggio, SUT e Stadio Phono

5.1 Modello Circuitale Equivalente di Thévenin e Funzione di Trasferimento Complessa

Dal punto di vista elettrotecnico, qualsiasi testina magnetodinamica (MM, MI, MC) è un trasduttore elettromeccanico reciproco che opera secondo la legge di Faraday-Neumann-Lenz ($V_{gen} = -N \cdot d\Phi/dt$). Essendo un generatore sensibile alla velocità, la forza elettromotrice a vuoto $V_{gen}(\omega)$ cresce linearmente con la frequenza (+6 dB/ottava, ovvero +20 dB/decade) a parità di ampiezza di modulazione del solco.
Il modello equivalente di Thévenin/Norton vede il generatore ideale V_{gen} posto in serie con l'impedenza interna della bobina $Z_c(s)$:

- **R_c:** Resistenza ohmica in corrente continua (DC resistance) degli avvolgimenti in rame o argento.
- **$L_c(\omega)$:** Induttanza serie della bobina (variabile con la frequenza a causa delle perdite per correnti parassite o Foucault nel nucleo magnetico, specialmente nelle MM/MI con espansioni polari laminate).
- **$R_{loss}(\omega)$:** Resistenza parallela equivalente alle perdite nel ferro (isteresi magnetica ed eddy currents) ad alta frequenza.

Questo generatore alimenta un quadripolo passivo (cablaggio braccio + cavo phono esterno) chiuso sull'impedenza d'ingresso dello stadio phono attivo (o del trasformatore di step-up):

- **C_{tot}:** Capacità parallela totale vista dai terminali della testina:
  $C_{tot} = C_{pins}$ (capacità inter-elettrodica testina/pagliuzze, ~3–5 pF) + C_{arm} (fili Litz interni al braccio, ~15–35 pF) + C_{cable} (cavo phono esterno, tipicamente 45–120 pF/m) + C_{in} (capacità d'ingresso discreta del preamplificatore) + C_{Miller} (capacità dinamica di Miller dello stadio attivo d'ingresso).
- **R_{in}:** Resistenza di terminazione d'ingresso dello stadio phono (o resistenza secondaria riflessa al primario nel caso di accoppiamento a trasformatore).

La funzione di trasferimento in tensione $H(s) = V_{out}(s) / V_{gen}(s)$ (con $s = j\omega$) forma un filtro passa-basso risonante del secondo ordine:

$$\mathbf{H(s) = [\ R_{in} / (R_c + R_{in})\ ] / [\ s^2 \cdot L_c \cdot C_{tot} \cdot (R_{in} / (R_c + R_{in})) + s \cdot (\ (L_c + R_c \cdot R_{in} \cdot C_{tot}) / (R_c + R_{in})\ ) + 1\ ]}$$

Assumendo la condizione standard di trasferimento di tensione ($R_{in} >> R_c$), i parametri canonici del polo complesso coniugato sono:

- **Frequenza naturale non smorzata (f_e):**
  $f_e = 1 / [\ 2\pi \cdot \sqrt{(L_c \cdot C_{tot})}\ ]$
- **Fattore di smorzamento (ζ) e Fattore di Merito Elettrico (Q_e):**
  $\zeta = (1 / 2) \cdot [\ R_c \cdot \sqrt{(C_{tot} / L_c)} + (1 / R_{in}) \cdot \sqrt{(L_c / C_{tot})}\ ]$
  $Q_e = 1 / (2 \cdot \zeta) = 1 / [\ R_c \cdot \sqrt{(C_{tot} / L_c)} + (1 / R_{in}) \cdot \sqrt{(L_c / C_{tot})}\ ]$

Per ottenere una risposta massimamente piatta (allineamento di Butterworth, dove $Q_e = 1/\sqrt{2} \approx 0.707$, assenza di sovraelongazione in banda passante e roll-off monotono), la relazione tra resistenza di carico R_{in}, induttanza L_c e capacità totale C_{tot} deve soddisfare (trascurando R_c rispetto a R_{in}):

$$\mathbf{R_{in}(ottimale_Butterworth) \approx \sqrt{(L_c / (2 \cdot C_{tot}))}}$$

5.2 Dinamica Elettrica delle Testine MM (Moving Magnet) e MI (Moving Iron)

- **Parametri fisici tipici:**
  - Tensione nominale (1 kHz, 5 cm/s RMS): 2.5 mV – 6.0 mV.
  - Induttanza interna (L_c): 350 mH – 800 mH (es. Shure V15 Type III: L_c = 500 mH, R_c = 1350 Ω; Nagaoka MP-700 / serie MP: MI a bassa massa, induttanza non pubblicata da Nagaoka, stimata in ~450–550 mH).
- **Equalizzazione elettromeccanica coniugata:**
  Nelle testine MM, la massa effettiva della punta (Effective Tip Mass, ETM, tipicamente 0.3 – 0.6 mg) introduce una risonanza meccanica del cantilever sul vinile (dovuta alla cedevolezza elastica locale del PVC del solco, legge di Hertz) intorno ai 14–18 kHz, seguita da un severo roll-off meccanico. I progettisti scelgono L_c e prescrivono una specifica C_{tot} (es. 100–200 pF per Audio-Technica, 250–300 pF per Ortofon, 400–500 pF per Shure V15 Type III) affinché il polo elettrico f_e sostenga esattamente il calo meccanico prima del taglio definitivo sopra i 20 kHz.
- **Deviazioni dal carico ottimo (R_{in} e C_{tot}):**
  - **Eccesso di capacità ($C_{tot} > C_{target}$):** Abbassa f_e a 9–12 kHz e contemporaneamente riduce lo smorzamento (poiché il termine $(1/R_{in})\cdot\sqrt{(L_c/C_{tot})}$ diminuisce, facendo salire Q_e). Il risultato è un picco acuto di +3 ÷ +6 dB intorno a 10 kHz seguito da un'attenuazione di -12 dB/ottava che cancella la prima ottava superiore (12–20 kHz).
  - **Variazione di R_{in} oltre lo standard 47 kΩ (es. 33 kΩ o 68–100 kΩ):** Ridurre R_{in} a 32–38 kΩ abbassa direttamente Q_e smorzando i picchi di risonanza su testine MM particolarmente brillanti senza spostare la frequenza centrale f_e; al contrario, alzare R_{in} a 68–100 kΩ esalta il picco a f_e.
- **Effetto della Capacità di Miller negli Stadi Phono a Valvole (Triodi):**
  Quando il primo stadio del preamplificatore phono utilizza un triodo ad alto guadagno (es. 12AX7 / ECC83 nei classici circuiti tipo McIntosh C22 o Conrad-Johnson PV12), la capacità dinamica d'ingresso vista dalla testina non è solo la capacità geometrica griglia-catodo ($C_{gk} \approx 1.6$ pF), ma include la capacità griglia-anodo ($C_{ga} \approx 1.7$ pF) moltiplicata per il guadagno in tensione dello stadio invertente (Effetto Miller):
  $C_{Miller} = C_{gk} + C_{ga} \cdot (1 + A_v)$
  Con un guadagno di primo stadio $A_v \approx 35–45$ (circa 31–33 dB), la sola valvola presenta una capacità dinamica di:
  $C_{Miller} \approx 1.6\ pF + 1.7\ pF \cdot (1 + 40) \approx$ **71.3 pF**
  Sommando a questi 71 pF la capacità dei condensatori di ingresso a norme CE/FCC e il cavo del giradischi, si supera facilmente la soglia di 200–250 pF. Ciò rende indispensabile l'impiego di cavi phono a bassissima capacità lineare (es. Mogami 2964 da 65 pF/m o Van den Hul D-502 Hybrid da 75 pF/m) per non sovraccaricare

le testine MM e MI che richiedono carichi complessivi bassi (es. Nagaoka MP: 100 pF; Audio-Technica: 100–200 pF).

5.3 Dinamica Elettrica delle Testine MC (Moving Coil a Bassa Uscita)

- **Parametri fisici tipici:**
  - Tensione nominale (1 kHz, 5 cm/s RMS): 0.15 mV – 0.60 mV.
  - Induttanza interna (L_c): 1.5 µH – 35 µH.
  - Resistenza interna DC (R_c): 1.5 Ω – 40 Ω (es. Ortofon SPU Classic ~2 Ω, Fidelity Research FR-7 ~2 Ω, Koetsu Onyx ~5 Ω, Kiseki Purple Heart ~42 Ω, Hana SL Mono 30 Ω, MkII 23 Ω).
- **Comportamento in Radiofrequenza (RF) e Rete di Zobel (Snubber RC):**
  Con L_c = 8 µH e C_{tot} = 150 pF, la frequenza di risonanza elettrica cade a:
  $f_e = 1 / [2\pi \cdot \sqrt{(8 \cdot 10^{-6}\ H \cdot 150 \cdot 10^{-12}\ F)}] \approx$ **4.59 MHz**
  Il fattore di merito vale $Q_e = 1 / [R_c \cdot \sqrt{(C_{tot} / L_c)} + (1 / R_{in}) \cdot \sqrt{(L_c / C_{tot})}]$. Con un ingresso ad alta impedenza (47 kΩ) lo smorzamento è affidato quasi solo a R_c, che vale pochi ohm: con R_c = 5 Ω si ha $Q_e \approx 38$ (picco di oltre +30 dB in RF). Con un carico di 100 Ω domina invece il secondo termine e Q_e scende a circa 0.4: la risonanza RF è sovrasmorzata. È questo il motivo fisico per cui un carico resistivo basso ha effetto sulle MC pur senza toccare la banda audio.
- **Conseguenze pratiche:** Anche se il polo a 4.5 MHz non altera il modulo della risposta in frequenza a 20 kHz, con carico ad alta impedenza il circuito LC agisce come un circuito tank sintonizzato sulle onde corte/medie ed esalta il rumore impulsivo dei "click/pop" del vinile (che hanno fronti di salita sub-microsecondo), mandando in saturazione di slew-rate o in intermodulazione (rettificazione AM sui diodi parassiti di ingresso di JFET/BJT) il primo stadio attivo del pre phono.
  - **Calcolo della cella di Zobel (Smorzamento critico RF):** Per annullare il picco RF, molti preamplificatori MC allo stato dell'arte inseriscono in ingresso una serie RC ($R_z + C_z$) calcolata per smorzare criticamente L_c:
    $R_z \approx \sqrt{(L_c / C_{tot})}$ con $C_z \geq (3 \div 5) \cdot C_{tot}$

Partitore di Tensione, Fase e Smorzamento Elettrodinamico di Lenz:
In banda audio (20 Hz – 20 kHz) la reattanza induttiva $X_L = 2\pi \cdot f \cdot L_c$ è inferiore a 1–3 Ω. Il trasferimento del segnale verso uno stadio attivo con resistenza d'ingresso R_{in} è governato dalla legge del partitore resistivo:
Perdita di inserzione (dB) = $20 \cdot \log_{10} [R_{in} / (R_c + R_{in})]$

- **Se $R_{in} = 10 \cdot R_c$:** Perdita = -0.83 dB (trasferimento del 90.9% della tensione).
- **Se $R_{in} = 5 \cdot R_c$:** Perdita = -1.58 dB (trasferimento dell'83.3% della tensione).
- **Se $R_{in} = R_c$ (Adattamento di massima potenza):** Perdita = -6.02 dB (trasferimento del 50% della tensione).

Meccanismo fisico dello smorzamento elettromagnetico:
Quando il cantilever oscilla con velocità v(t), la corrente $I(t) = V_{gen}(t) / (R_c + R_{in})$ che scorre nella bobina immersa nel campo magnetico radiale B genera una forza controelettromotrice meccanica (Forza di Lorentz/Lenz):
$F_{em}(t) = (B \cdot l_{filo}) \cdot I(t) = [(B \cdot l_{filo})^2 / (R_c + R_{in})] \cdot v(t)$
Il termine $R_{em} = (B \cdot l_{filo})^2 / (R_c + R_{in})$ ha esattamente le dimensioni fisiche di uno **smorzatore meccanico viscoso (N·s/m)** che si somma direttamente in parallelo alla resistenza meccanica R_m del gommino in elastomero:
$R_m(totale) = R_m(elastomero) + [(B \cdot l_{filo})^2 / (R_c + R_{in})]$

1. Nelle testine MC con magneti potentissimi (Alnico massiccio o Neodimio con traferro stretto, come FR-7, SPU o Koetsu) e bobine avvolte su nucleo ferromagnetico (che moltiplica B), il prodotto $(B \cdot l_{filo})^2$ è elevato: chiudere la testina su un carico resistivo basso (es. $R_{in} = 2 \cdot R_c \div 5 \cdot R_c$) incrementa significativamente lo smorzamento meccanico totale, tenendo a freno la risonanza ad alta frequenza del cantilever (25–40 kHz) e conferendo maggiore fuoco e stabilità timbrica.
2. Nelle testine MC con bobine avvolte in aria (air-core, bassa induttanza e basso fattore Bl), la forza di Lenz è trascurabile e il carico R_{in} agisce quasi esclusivamente sullo smorzamento dei transitori RF.

5.4 Analisi Approfondita dei Trasformatori di Step-Up (SUT)

Il trasformatore di step-up rappresenta l'interfaccia elettromagnetica ottimale per accoppiare testine MC a bassa impedenza (1.5 Ω – 40 Ω) a stadi phono valvolari MM ad alta impedenza d'ingresso (47 kΩ), garantendo isolamento galvanico, reiezione del rumore di modo comune e una cifra di rumore termico prossima al limite fisico teorico (poiché gli avvolgimenti in rame non generano rumore shot o flicker 1/f).

Modello Circuitale Non Ideale del Trasformatore Audio

Un trasformatore reale con rapporto spire $N = N_2 / N_1$ presenta quattro elementi parassiti fondamentali che determinano la larghezza di banda e la risposta ai transitori:

- **1. R_p e R_s:** Resistenze in corrente continua (DC) dell'avvolgimento primario e secondario. L'impedenza effettiva vista dal secondario include le perdite nel rame riportate: $R_{cu}(sec) = R_s + N^2 \cdot R_p$.
- **2. L_p (Induttanza di magnetizzazione primaria):** Determina il polo passa-alto a bassa frequenza (-3 dB):
  f_{low} (-3 dB) = $(R_c + R_p) / (2\pi \cdot L_p)$
  Esempio: Per garantire una risposta estesa fino a 5 Hz (necessaria per non introdurre rotazioni di fase a 20–30 Hz) con una testina da $R_c = 23\ \Omega$ (o 40 Ω), l'induttanza primaria L_p deve essere almeno:
  $L_p \geq 25\ \Omega / (2\pi \cdot 5\ Hz) \approx$ **0.80 Henry** (idealmente > 2–5 H tramite nuclei ad altissima permeabilità iniziale $\mu_i > 50\,000$ come il Permalloy 80% Ni / Mu-Metal o leghe nanocristalline/amorfe).
  Per una SPU o FR-7 da 2 Ω, basta invece un'induttanza primaria di 0.15 – 0.30 H, permettendo meno spire primarie con filo di sezione maggiore.
- **3. L_{leak} (Induttanza di dispersione o Leakage Inductance, riferita al secondario):** Rappresenta il flusso magnetico che non concatena entrambi gli avvolgimenti. Si riduce utilizzando avvolgimenti intercalati (interleaved/bifilari).
- **4. C_w (Capacità distribuita di avvolgimento secondario):** Sommata alla capacità del cavo di uscita tra SUT e pre MM (C_{out}) e alla capacità d'ingresso del pre MM ($C_{MM} + C_{Miller}$), forma la capacità secondaria totale $C_{sec} = C_w + C_{out} + C_{in}(MM)$.

Risonanza ad Alta Frequenza del SUT e Calcolo della Rete di Zobel Secondaria

Al secondario del trasformatore, l'induttanza di dispersione L_{leak} (sommata all'induttanza della testina moltiplicata per N^2, ovvero $N^2 \cdot L_c$) entra in risonanza serie/parallelo con la capacità secondaria totale C_{sec} a una frequenza ultrasonica critica (tipicamente tra 18 kHz e 60 kHz):

$$\mathbf{f_{res}(SUT) = 1 / [\ 2\pi \cdot \sqrt{(\ L_{leak}(sec) \cdot C_{sec}\ )}\ ]}$$

- **Effetto dell'alto rapporto di trasformazione (N^2):** Poiché le impedenze si scalano con il quadrato del rapporto spire (N^2), un trasformatore con N = 20 (+26 dB) o N = 30 (+29.5 dB) vede la resistenza interna della testina moltiplicata per 400 o 900 volte ($R_c_sec = N^2 \cdot R_c$), e la capacità secondaria riflessa al primario moltiplicata per 400 o 900 volte:
  $C_{riflessa}(primario) = N^2 \cdot C_{sec}$
  (Esempio: 200 pF sul secondario di un SUT 1:30 equivalgono a ben 200 pF × 900 = 180 000 pF = **180 nF** visti direttamente dalla bobina della testina!).
- **Ringing su onda quadra e Rete di Zobel:** Se il carico secondario standard di 47 kΩ è troppo elevato rispetto all'impedenza caratteristica della risonanza parassita $Z_0 = \sqrt{(L_{leak} / C_{sec})}$, il trasformatore mostra un severo overshoot e ringing ultrasonico. Per ottenere lo smorzamento critico:
  - **1. Carico Resistivo Secondario (R_{load}):** Per abbassare l'impedenza vista dalla testina al valore target R_{target} (con $R_{target} < 47\,000 / N^2$), si inserisce in parallelo alle prese di uscita del SUT una resistenza secondaria R_{aux} calcolata come:
    $R_{eff}(secondario) = R_{target} \cdot N^2$
    $R_{aux} = (47\,000 \cdot R_{eff}) / (47\,000 - R_{eff})$

- **2. Rete RC di Zobel (Snubber Secondario):** Per smorzare selettivamente il picco ultrasonico a f_{res}(SUT) senza caricare la testina in banda audio, si collega in parallelo al secondario una resistenza R_z in serie a un condensatore C_z:
  $R_z \approx \sqrt{(L_{leak} / C_{sec})}$
  $C_z \approx (2 \div 4) \cdot C_{sec}$

5.5 Rumore Elettrico, Rapporto Segnale/Rumore (SNR) e Scelta della Topologia Attiva

Il limite fisico invalicabile di qualsiasi sistema di preamplificazione phono è il **rumore termico di Johnson-Nyquist** generato dalla resistenza reale del circuito alla temperatura assoluta T (a 20 °C = 293 K):

$$\mathbf{V_n(termico) = \sqrt{(4 \cdot k_B \cdot T \cdot R \cdot \Delta f)}}$$

Dove $k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K è la costante di Boltzmann e $\Delta f = 20\,000$ Hz è la banda audio. A 20 °C, una resistenza di 1 Ω genera una densità spettrale di rumore di **0.127 nV/√Hz** (ovvero ~18 nV RMS su 20 kHz di banda non pesata).
Ogni dispositivo attivo (JFET, BJT, Valvola Termoionica, Op-Amp) è caratterizzato da due generatori di rumore equivalenti in ingresso:

- **e_n (nV/√Hz):** Densità di tensione di rumore in serie.
- **i_n (pA/√Hz):** Densità di corrente di rumore in parallelo (che scorrendo nell'impedenza della testina $Z_c(\omega)$ genera una tensione di rumore aggiuntiva $V_{ni} = i_n \cdot |Z_c(\omega)|$).

La tensione totale di rumore riferita all'ingresso (prima della de-enfasi RIAA) è:

$$\mathbf{E_n(tot) = \sqrt{[4 \cdot k_B \cdot T \cdot R_c + e_n^2 + (i_n \cdot |R_c + j\omega L_c|)^2]}}$$

Da questa equazione fondamentale discende l'accoppiamento perfetto tra tipo di testina e architettura elettronica:

- **1. Stadi a Triodi Valvolari (es. 12AX7, 6DJ8/ECC88, 6922, E88CC):**
  - Hanno corrente di rumore di griglia quasi nulla ($i_n \rightarrow$ fA/√Hz), ma una densità di tensione di rumore relativamente alta ($e_n \approx 2 – 12$ nV/√Hz: circa 2 per 6DJ8/ECC88, 5–6 per 12AX7).
  - Sono **eccellenti per testine MM** (dove l'impedenza della sorgente a 10 kHz supera i 30 kΩ e domina il termine $i_n \cdot |Z_c|$, rendendo i BJT rumorosi), ma sono inadatti a pilotare direttamente testine MC a bassa uscita (0.2 mV) senza l'interposizione di uno Step-Up Transformer (SUT), poiché il SUT eleva il segnale di N volte portandolo sopra il pavimento di rumore e_n della valvola.
- **2. Stadi a JFET Discreti (es. 2SK170, 2SK369, LSK389 in parallelo):**
  - Presentano e_n bassissima (~0.8 – 1.2 nV/√Hz per singolo dispositivo, ridotta di √M mettendo M JFET in parallelo) e corrente di rumore i_n trascurabile (~0.01 pA/√Hz).
  - Costituiscono l'architettura a stato solido più versatile sia per MM che per MC a media impedenza (10 – 40 Ω), con l'unica accortezza di gestire l'elevata capacità di gate-source C_{iss} (30–60 pF per singolo 2SK170) tramite configurazione Cascode per annullare l'effetto Miller.
- **3. Stadi a Transistor Bipolari BJT (es. 2SB737, MAT02/03, SSM2210, BJT a larga area di base):**
  - Offrono la più bassa tensione di rumore esistente ($e_n \approx 0.4 – 0.7$ nV/√Hz) grazie alla bassissima resistenza parassita di base r_{bb}', ma presentano una corrente di rumore i_n significativa (~1.5 – 3 pA/√Hz).
  - Sono **imbattibili per testine MC a bassissima impedenza interna ($R_c = 1.5 – 10$ Ω)**, dove il termine $i_n \cdot R_c$ è irrilevante, mentre risultano rumorosi su testine MM ad alta induttanza.

5.6 Architettura di Cablaggio: Connessione Bilanciata (XLR) vs Sbilanciata (RCA)

Una testina fonografica è per sua natura fisica un **generatore nativamente bilanciato e flottante (floating balanced source)**: i quattro pin di uscita (L+, L-, R+, R-) sono gli estremi isolati di due avvolgimenti indipendenti, privi di riferimento a massa (a meno di una linguetta metallica rimovibile sul pin RG o LG in alcune MM).

1. **Connessione Sbilanciata (RCA / Coassiale):**
   Il polo freddo (L- / R-) viene collegato alla calza di schermo o al conduttore di ritorno riferito al telaio del preamplificatore. Qualsiasi corrente parassita o disturbo elettromagnetico indotto sul conduttore di ritorno si somma direttamente in serie al segnale utile (caduta di tensione IR lungo la massa). Per minimizzare questo difetto si utilizzano cavi in configurazione ***Pseudo-Bilanciata (Semibilanciata / Directional Shield)***: una coppia ritorta (twisted pair) interna porta L+ e L-, mentre la calza di schermatura in rame è collegata a massa esclusivamente dal lato del giradischi/preamplificatore, fungendo da gabbia di Faraday senza trasportare corrente di segnale.
2. **Connessione Bilanciata Pura (True Balanced su XLR o DIN-5 → Dual XLR):**
   I poli L+ e L- della bobina viaggiano su due conduttori identici simmetrici verso un ingresso differenziale (o gli estremi dell'avvolgimento primario flottante di un SUT), mentre lo schermo è collegato al Pin 1 (Chassis Ground) isolato dal segnale.
   - **Vantaggi misurabili:** I campi magnetici alternati a 50 Hz (trasformatori di alimentazione, motori sincroni ad alta coppia come quelli dei giradischi classici a puleggia) e le interferenze RF si accoppiano in modo identico su entrambi i conduttori (modo comune) e vengono cancellati dalla reiezione di modo comune (CMRR > 60–80 dB) dello stadio differenziale o del trasformatore di step-up, abbattendo il tappeto di ronzio (hum) di 20–30 dB.

5.7 De-Enfasi RIAA e Margine di Sovraccarico (Overload Margin)

La curva di equalizzazione standard RIAA (1954) [7] è definita da tre costanti di tempo che determinano due poli e uno zero nella rete di de-enfasi del preamplificatore:

1. τ_1 **= 3180 µs** → Frequenza di taglio dei bassi (polo): $f_1 = 1 / (2\pi \cdot 3180 \cdot 10^{-6})$ = **50.05 Hz** (+19.3 dB a 20 Hz rispetto a 1 kHz).
2. τ_2 **= 318 µs** → Frequenza di transizione centrale (zero): $f_2 = 1 / (2\pi \cdot 318 \cdot 10^{-6})$ = **500.5 Hz** (0 dB a 1 kHz).
3. τ_3 **= 75 µs** → Frequenza di taglio degli acuti (polo): $f_3 = 1 / (2\pi \cdot 75 \cdot 10^{-6})$ = **2122 Hz** (-19.6 dB a 20 kHz rispetto a 1 kHz).
   (Nota sulla costante di Neumann τ_4 = 3.18 µs / 50.05 kHz: introdotta in alcuni pre phono per compensare il presunto taglio ultrasonico dei torni Neumann, in realtà non fa parte dello standard di incisione ed esalta artificialmente l'estremo acuto di +0.17 dB a 10 kHz e +0.64 dB a 20 kHz).

Il Problema Critico del Margine di Sovraccarico in Alta Frequenza

Poiché il disco viene inciso con una **pre-enfasi di +20 dB a 20 kHz**, la velocità di picco del solco nei transienti ad alta frequenza (piatti della batteria, consonanti sibilanti, ottoni, oppure un semplice graffio/tick superficiale) raggiunge valori fino a 40–60 cm/s a 10–20 kHz (ovvero **10 volte (+20 dB)** il livello nominale di riferimento di 5 cm/s a 1 kHz).

1. **RIAA Passiva (Split o Full Passive):** Il primo stadio di guadagno amplifica il segnale "piatto" prima del filtro RIAA passivo. Se il primo stadio ha un guadagno troppo elevato o una tensione di alimentazione bassa, un transiente ad alta frequenza o un click del vinile (amplificato di +20 dB dall'incisione prima ancora di incontrare l'attenuazione RIAA) manda in clipping il primo stadio attivo, trasformando un micro-impulso inorecchiabile di pochi microsecondi in uno "schiocco" largo e sgradevole in banda audio.
2. **RIAA Attiva in Retroazione Negativa (NFB):** Il tasso di controreazione aumenta di 20 dB passando da 1 kHz a 20 kHz, aumentando proporzionalmente il margine di sovraccarico in ingresso alle alte frequenze, ma richiede che il primo stadio abbia uno Slew-Rate elevatissimo e un margine di stabilità in fase incondizionato quando l'impedenza di retroazione crolla verso lo zero in banda ultrasonica.

5.8 Tabella di Riferimento Tecnico: Calcoli di Interfacciamento Elettrico per Testine Classiche e Moderne

Modello Testina	Tipologia	Tensione Uscita (1 kHz, 5 cm/s)	R_c Interna (Ω)	L_c Interna	Carico Attivo Ottimale (R_{in} / C_{tot})	Accoppiamento SUT Ideale (Rapporto N e R_{ref} su 47 kΩ)	Guadagno Phono Totale Consigliato (per ~500 mV out)
Ortofon SPU Classic GE / Mono	MC Bassa Impedenza	0.20 mV	2.0 Ω	~2.5 µH	R_{in}: 20 Ω – 50 Ω (o Current-Mode)	1:30 (+29.5 dB) → R_{ref} = 52 Ω (oppure 1:40 → 29 Ω)	66 – 70 dB
Fidelity Research FR-7	MC Bassa Impedenza (push-pull, due magneti)	0.20 mV	2.0 Ω	~2.0 µH	R_{in}: 20 Ω – 40 Ω	1:30 (+29.5 dB) → R_{ref} = 52 Ω	66 – 70 dB
Koetsu Onyx / Rosewood	MC Bassa Impedenza	0.30 – 0.40 mV	5.0 Ω	~6.0 µH	R_{in}: 50 Ω – 100 Ω	1:20 (+26 dB) → R_{ref} = 117.5 Ω	62 – 66 dB
Hana SL / SL Mono	MC Media Impedenza (Alnico)	0.50 mV (MkII: 0.40 mV)	30 Ω (SL Mono prima serie) / 23 Ω (SL Mono MkII)	~28 µH	R_{in}: ≥ 400 Ω (MkII: ≥ 230 Ω)	1:10 (+20 dB) → R_{ref} = 470 Ω (o 1:12 → 326 Ω)	60 – 63 dB
Kiseki Purple Heart NS	MC Media Impedenza	0.48 mV	42.0 Ω	~38 µH	R_{in}: 400 Ω – 800 Ω	1:10 (+20 dB) → R_{ref} = 470 Ω	60 – 63 dB
Denon DL-103	MC Storica Broadcast	0.30 mV	40.0 Ω	~35 µH	R_{in}: 400 Ω – 1000 Ω	1:10 (+20 dB) → R_{ref} = 470 Ω (o 1:13 → 278 Ω)	62 – 65 dB
Shure V15 Type III	MM Classica (Laminata)	3.50 mV	1350 Ω	500 mH	R_{in} = 47 kΩ / C_{tot} = 400 – 500 pF	Non applicabile (Ingresso MM diretto)	40 – 43 dB
Nagaoka MP-700 / MP-500	MI (Permalloy / Samario-Cobalto)	4.00 mV (MP-700)	n.d. (non pubblicata)	n.d. (stima ~500 mH)	R_{in} = 47 kΩ / C_{tot} = 100 pF (dato Nagaoka)	Non applicabile (Ingresso MM diretto)	40 – 42 dB

6. Appendice Matematica: Derivazione Analitica Completa delle Geometrie di Allineamento

6.1 Modello Geometrico Esatto e Linearizzazione del Primo Ordine

Si consideri il triangolo formato dal perno del piatto O_p (Spindle), dal fulcro del braccio P (Pivot) e dalla punta dello stilo S (Stylus) posta a distanza radiale R da O_p.
Siano:

- **L:** Lunghezza effettiva del braccio (L_{eff} = distanza PS).
- **D:** Distanza tra fulcro e perno del piatto (D_{p2s} = distanza PO_p).
- **O:** Overhang lineare (O = L - D).
- **α:** Angolo di offset della testina rispetto all'asse longitudinale PS.

Applicando il teorema del coseno al triangolo O_p-P-S, l'angolo γ formato dal segmento R (raggio del solco) e dal segmento L (asse del braccio) vale:

$$\cos(\gamma) = (R^2 + L^2 - D^2) / (2 \cdot R \cdot L)$$

Poiché la tangente al solco è ortogonale al raggio R, l'angolo tra l'asse longitudinale del braccio L e la tangente al solco è (90° - γ), il cui seno coincide con cos(γ):

$$\sin(\phi(R)) = (R^2 + L^2 - D^2) / (2 \cdot R \cdot L)$$

Introducendo l'angolo di offset α del corpo testina, l'errore angolare di tracciamento assoluto $\theta_e(R)$ è:

$$\theta_e(R) = \arcsin[(R^2 + L^2 - D^2) / (2 \cdot R \cdot L)] - \alpha$$

Definendo il parametro geometrico lineare costante $K = (L^2 - D^2) / 2 = L \cdot O - O^2 / 2$, ed effettuando lo sviluppo in serie di Taylor al primo ordine per piccoli angoli ($\arcsin(x) \approx x$ in radianti), l'errore di tracciamento pesato sul raggio $WTE(R) = \theta_e(R) / R$ assume la forma algebrica razionale:

$$\mathbf{WTE(R) = [\ 1 / (2 \cdot L)\ ] - (\alpha / R) + [\ K / (L \cdot R^2)\ ]}$$

Cambio di variabile canonico di Loefgren/Baerwald:
Ponendo la variabile inversa del raggio $u = 1 / R$ (curvatura del solco, compresa tra $u_{min} = 1 / R_{max}$ sul bordo esterno e $u_{max} = 1 / R_{min}$ sul solco interno), la funzione WTE(u) diventa una parabola convessa nel dominio della curvatura u:

$$\mathbf{W(u) = (K / L) \cdot u^2 - \alpha \cdot u + [\ 1 / (2 \cdot L)\ ]}$$

Le due radici della parabola $W(u) = 0$ corrispondono alle curvature nulle $u_1 = 1 / R_1$ e $u_2 = 1 / R_2$. Per le relazioni tra radici e coefficienti di un polinomio quadratico:

- $u_1 + u_2 = (R_1 + R_2) / (R_1 \cdot R_2) = \alpha \cdot L / K$
- $u_1 \cdot u_2 = 1 / (R_1 \cdot R_2) = 1 / (2 \cdot K) \implies \mathbf{K = (R_1 \cdot R_2) / 2}$

Da cui seguono le due leggi universali che legano qualsiasi coppia di Null Points (R_1, R_2) alla geometria meccanica del braccio:

1. **Distanza Fulcro-Perno:** $D = \sqrt{(L^2 - R_1 \cdot R_2)} \implies$ **Overhang: $O = L - \sqrt{(L^2 - R_1 \cdot R_2)}$**
2. **Angolo di Offset:**

   > $$\mathbf{\alpha = \arcsin[\ (R_1 + R_2) / (2 \cdot L)\ ]}$$

   (relazione esatta, senza approssimazioni: compare il seno, non la tangente).

6.2 Soluzione Analitica di Loefgren A (Baerwald) — Polinomio di Chebyshev $T_2(x)$

Il criterio di Loefgren A / Baerwald impone la minimizzazione della norma infinito (picco massimo assoluto) di W(u) sull'intervallo $[u_{min}, u_{max}]$.
Secondo il teorema di Chebyshev, il polinomio monico di grado 2 che presenta la minima deviazione massima dall'asse zero sull'intervallo normalizzato [-1, +1] è il polinomio di Chebyshev di primo tipo $T_2(x)$ diviso per 2:

$$\mathbf{P_2(x) = (1 / 2) \cdot T_2(x) = x^2 - 1/2}$$

I cui tre estremi di uguale ampiezza in modulo ($|P_2| = 1/2$) si trovano in $x = -1$, $x = 0$, $x = +1$, e i cui due zeri (Null Points) cadono in:

$$\mathbf{x_{1,2} = \pm \sqrt{(1 / 2)} = \pm (\sqrt{2} / 2) \approx \pm 0.7071068}$$

Mappando linearmente l'intervallo fisico delle curvature $[u_{min}, u_{max}]$ sull'intervallo normalizzato [-1, +1] tramite la trasformazione affine:

$$\mathbf{u(x) = u_m + \Delta u \cdot x}$$

Dove:

- **u_m (curvatura media):** $u_m = (u_{max} + u_{min}) / 2 = (R_{max} + R_{min}) / (2 \cdot R_{min} \cdot R_{max}) = 1 / R_{hm}$
- **Δu (semidispersione di curvatura):** $\Delta u = (u_{max} - u_{min}) / 2 = (R_{max} - R_{min}) / (2 \cdot R_{min} \cdot R_{max})$

Gli zeri ottimali di Baerwald nel dominio dei raggi sono quindi:

$$\mathbf{R_1 \text{ (interno)} = 1 / (u_m + \Delta u \cdot (\sqrt{2} / 2)) = (2 \cdot R_{min} \cdot R_{max}) / [\ (R_{max} + R_{min}) + (\sqrt{2} / 2) \cdot (R_{max} - R_{min})\ ]}$$
$$\mathbf{R_2 \text{ (esterno)} = 1 / (u_m - \Delta u \cdot (\sqrt{2} / 2)) = (2 \cdot R_{min} \cdot R_{max}) / [\ (R_{max} + R_{min}) - (\sqrt{2} / 2) \cdot (R_{max} - R_{min})\ ]}$$

Sostituendo i valori IEC ($R_{min} = 60.325$ mm, $R_{max} = 146.05$ mm):

- $u_m = 0.0117066\ mm^{-1}$

- $\Delta u = 0.0048647\ mm^{-1}$
- **$R_1 = 1 / (0.0117066 + 0.0034399) = 66.02$ mm** (66.00 mm con equazione trigonometrica non linearizzata).
- **$R_2 = 1 / (0.0117066 - 0.0034399) = 120.97$ mm** (120.90 mm con equazione trigonometrica non linearizzata).

6.3 Soluzione Analitica di Loefgren B — Minimizzazione della Norma L_2 (Minimi Quadrati)

Il criterio di Loefgren B minimizza il valore efficace (RMS) dell'errore pesato rispetto al raggio R (o rispetto alla curvatura u). Imponendo la condizione integrale di minimo sui quadrati sull'intervallo normalizzato [-1, +1]:

$$\partial / \partial c_0, c_1 \int_{-1}^{+1} (x^2 + c_1 \cdot x + c_0)^2\, dx = 0$$

Con peso uniforme nella curvatura normalizzata x il vertice della parabola resterebbe su u_m ($c_1 = 0$) e il minimo darebbe $c_0 = -1/3$, cioè zeri in $x = \pm 1/\sqrt{3} \approx \pm 0.577$: la distanza tra gli zeri si ridurrebbe di un fattore $\sqrt{(2/3)} \approx 0.816$ rispetto a Chebyshev. La formulazione originale di Loefgren integra invece lungo il raggio R ($dR = du / u^2$), che dà più peso ai solchi esterni: il vertice si sposta verso le curvature minori ($u_v = 0.01140\ mm^{-1}$ contro $u_m = 0.01171\ mm^{-1}$) e la semidistanza tra gli zeri vale circa $0.58 \cdot \Delta u$. I valori IEC risultanti sono:

- **R_1 (Loefgren B, IEC) = 70.29 mm**
- **R_2 (Loefgren B, IEC) = 116.60 mm**

Questo avvicina tra loro i due Null Points di circa 8.6 mm complessivi, riducendo di circa un terzo il picco centrale di errore pesato (tra R_1 e R_2) rispetto a Baerwald, a prezzo di un errore maggiore agli estremi (WTE max 0.212 °/cm contro 0.130 °/cm su un braccio da 9").

6.4 Soluzione Analitica di Stevenson — Vincolo al Contorno Interno

Stevenson fissa il primo zero esattamente sul raggio minimo inciso:

- **$u_1 = u_{max} \Longrightarrow R_1 = R_{min} = 60.325$ mm (IEC)**

E impone che il massimo locale intermedio (al vertice della parabola $u_v = (u_1 + u_2) / 2$) sia uguale in modulo al valore assunto sul bordo esterno $u_{min} = 1 / R_{max}$:

$$|W(u_v)| = |W(u_{min})|$$

Risolvendo l'equazione algebrica per la seconda radice u_2 in funzione di u_{min} e u_{max}:
$(u_{max} - u_2)^2 / 4 = (u_{min} - u_{max}) \cdot (u_{min} - u_2)$

Ponendo la distanza normalizzata, si ottiene la relazione chiusa:
$u_2 = u_{max} - 2 \cdot (\sqrt{2} - 1) \cdot (u_{max} - u_{min}) \approx u_{max} - 0.828427 \cdot (u_{max} - u_{min})$

Sostituendo i parametri IEC:

- **$R_1 = 60.325$ mm**
- **$R_2 = 117.42$ mm**

7. Appendice Applicativa: Matrice di Calcolo per Setup di Riferimento Reali

Di seguito viene sviluppata la modellazione numerica completa (meccanica, geometrica ed elettrica) su quattro bracci di riferimento (SME 3012-R, Fidelity Research FR-64S, Mørch DP-8, SME 3009 S2 Improved) accoppiati a un parco testine rappresentativo delle diverse tecnologie (MC a bassissima impedenza con portatestina integrato, MC a bassa/media impedenza, Moving Iron e Moving Magnet ad alta cedevolezza). I dati di bracci, testine e cavi provengono dalle schede tecniche dei costruttori [8–18].

7.1 Parametri Fisici dei Bracci Analizzati

1. **SME 3012-R (12 pollici, canna in acciaio inox a parete sottile smorzata):**
   - Lunghezza effettiva (L_{eff}): 307.34 mm (12⅛", dal manuale SME).

- Distanza Pivot-to-Spindle (D_{p2s} nominale SME): 294.1 mm (11 9/16", dal manuale SME; regolabile tramite la slitta della base). Con L_{eff} = 307.34 mm questo valore corrisponde a Baerwald.
- Massa efficace (M_{eff}): **14.0 g** (senza testina, con headshell SME S2-R da 7.5 g incluso; sostituendo l'headshell con una SPU G-shell integrata, la massa efficace della sola canna nuda contribuisce per ~6.5 g, valore stimato).

2. **Fidelity Research FR-64S (9.6 pollici, acciaio inossidabile ad alta inerzia con bilanciamento dinamico a molla):**
   - Lunghezza effettiva (L_{eff}): 245.0 mm.
   - Distanza Pivot-to-Spindle (D_{p2s}): 230.0 mm (Overhang nominale = 15.0 mm; Offset angle = 21.5°).
   - Massa efficace (M_{eff}): **~31.0 g – 35.0 g** (incluso headshell originale FR-S/3 da 16.2 g; ~19 g stimati per la sola canna senza conchiglia, dato non pubblicato dal costruttore).
3. **Mørch DP-8 (9 pollici, doppio punto di appoggio di precisione con masse eccentriche stabilizzatrici e canne intercambiabili):**
   - Lunghezza effettiva (L_{eff}): 230 mm con canna da 9" (307.4 mm con canna da 12"); per Baerwald D_{p2s} = 211.9 mm.
   - Masse efficaci (M_{eff}) in base alla canna:
     - *Canna Punto Verde (Green Dot):* **4.0 g** (ultra-leggera).
     - *Canna Punto Rosso (Red Dot):* ***6.0 g*** *(media; alcune fonti indicano 7 g*).
     - *Canna Punto Giallo (Yellow Dot):* ***8.0 g*** *(pesante*).
     - *Canna Punto Blu (Blue Dot):* **14.0 g** (pesante Precision).
4. **SME 3009 Series II Improved (9 pollici, canna in alluminio, massa ultra-bassa):**
   - Lunghezza effettiva (L_{eff}): 229.0 mm (D_{p2s} = 215.4 mm).
   - Massa efficace (M_{eff}): **6.5 g** (versione Fixed Headshell) / **9.5 g** (versione S2 Detachable Headshell). Per Baerwald la slitta va portata a D_{p2s} = 210.9 mm.

7.2 Parametri Fisici ed Elettrici delle Testine Analizzate

Testina	Tipologia e Taglio Stilo	Massa Corpo M_c (g)	Cedevolezza Dichiarata	Cedevolezza Effettiva a 10 Hz (C_{10})	Impedenza Interna R_c / Induttanza L_c	Uscita Nominale (1 kHz, 5 cm/s)	VTF Nominale (g)
Ortofon SPU Classic GM MkII	MC Bassa Uscita (Conico 18 µm, G-shell integrato)	30.0 g (GM; la GE pesa 28 g)	8 µm/mN (a 10 Hz)	**8.0 µm/mN**	**2 Ω** (6 Ω serie storiche) / ~2.5 µH	0.20 mV	4.0 g (3.0 – 5.0 g)
Fidelity Research FR-7	MC Bassa Uscita, generatore push-pull a due magneti (Ellittico 7.6×15.2 µm, shell integrato)	30.0 g (integrata)	6×10^{-6} cm/dyne (100 Hz; FR-7f: 7×10^{-6}) → ~10.5–13 cu a 10 Hz	**~10.5 – 13 µm/mN**	**2 Ω** / ~2 µH	0.20 mV	2.5 g (2.0 – 3.0 g)
Hana SL Mono	MC Bassa Uscita (Shibata su cantilever alluminio)	5.0 g	10×10^{-6} cm/dyne (100 Hz)	**~16.0 – 17.5 µm/mN**	**30 Ω** (prima serie; MkII: 23 Ω, 8.6 g, 0.4 mV) / ~28 µH	0.50 mV	2.0 g
Koetsu Onyx Platinum	MC Bassa Uscita (Corpo in onice, stilo Sugano Line Contact)	12.5 g	n.d. (non pubblicata; stima 5×10^{-6} cm/dyne a 100 Hz)	**~8.5 – 9.0 µm/mN**	**~5 Ω** (stima: dato della Rosewood Signature Platinum) / ~5 µH	0.30 mV (0.4 mV serie std)	1.9 g (1.8 – 2.0 g)
Kiseki PurpleHeart N.S.	MC Bassa Uscita (Corpo legno Amaranto, Line Contact su boro)	7.0 g	16 µm/mN (a 10 Hz)	**16.0 µm/mN**	**42 Ω** / ~38 µH	0.48 mV	2.2 g (2.0 – 2.4 g)
Nagaoka MP-700	MI Permalloy (MicroRidge su boro)	8.0 g	n.d. (non pubblicata; stima 8.5×10^{-6} cm/dyne a 100 Hz)	**~15.0 µm/mN** (stima)	**n.d. / n.d. (stima ~500–580 mH)**	4.0 mV	1.4 g
Shure V15 Type III	MM Alta Cedevolezza (Ellittico / VN35MR MicroRidge)	6.3 g	30×10^{-6} cm/dyne (statica, Shure); ~22×10^{-6} dinamica	**~22.5 µm/mN**	**1350 Ω** / **500 mH**	3.5 mV	1.0 g (0.75 – 1.25 g)

7.3 Matrice di Calcolo Meccanico (f_0), Geometrico ed Elettrico per Combinazioni Specifiche

Combinazione Braccio + Testina	Calcolo Massa Totale M_{tot} (g)	Frequenza Risonanza f_0 (Hz)	Allineamento Geometrico Consigliato (D_{p2s} / Null Points)	Carico Elettrico Ottimale (SUT o Pre Phono Attivo)	Valutazione Ingegneristica
1. SME 3012-R + Hana SL Mono (con headshell SME S2-R + spessore/viti da 2.5 g)	M_{eff} (14.0) + M_c (5.0) + M_h (2.5) = **21.5 g**	Con C_{10} = 17 cu: f_0 = 159.15 / √(21.5 × 17) = **8.32 Hz** (Con C_{10} = 16 cu: **8.58 Hz**)	**Loefgren A (Baerwald):** D_{p2s} = 294.1 mm, O = 13.3 mm, R_1 = 66.0 mm, R_2 = 120.9 mm.	**R_c = 30 Ω (prima serie):** carico attivo consigliato da Hana **≥ 400 Ω** (attenuazione < 0.7 dB). Con SUT: rapporto **1:10 (470 Ω riflessi)**.	**Ottimo per Mono Moderni.** Per alzare f_0 verso 9.5 Hz è possibile usare un headshell ultraleggero da 5 g (M_{tot} = 19.0 g → f_0 = 8.9 Hz).
2. SME 3012-R + Ortofon SPU Classic GM (montaggio diretto senza S2-R)	M_{canna} (6.5, stima) + M_{SPU} (30.0) = **36.5 g** (richiede contrappeso supplementare SPU)	Con C_{10} = 8 cu: f_0 = 159.15 / √(36.5 × 8) = **9.31 Hz**	**Stevenson:** D_{p2s} = 295.6 mm (O = 11.7 mm), R_1 = 60.3 mm, R_2 = 117.4 mm. Con il D_{p2s} del manuale (294.1 mm) si ottiene invece Baerwald.	**R_c = 2 Ω:** Con SUT rapporto **1:26 ÷ 1:36** (R_{ref} = 36 Ω – 69 Ω) o **Pre Attivo a 20 – 50 Ω** (o Current-Mode).	**Riferimento Assoluto.** Sinergia meccanica perfetta (f_0 = 9.31 Hz, al centro della finestra).
3. Fidelity Research FR-64S + Fidelity Research FR-7	M_{canna} (19.0) + M_{FR7} (30.0) = **49.0 g**	Con C_{10} = 10.5 cu: f_0 = 159.15 / √(49.0 × 10.5) = **7.02 Hz** (con C_{10} = 13 cu: **6.31 Hz**)	**Geometria FR Originale / Stevenson:** D_{p2s} = 230.0 mm (O = 15.0 mm), che coincide con Stevenson IEC (D_{p2s} = 230.1 mm, O = 14.9 mm).	**R_c = 2 Ω:** SUT dedicato a bassissima impedenza (es. rapporto **1:30 → 52 Ω riflessi**, o avvolgimento 2–3 Ω dedicato).	**Accoppiamento Storico Dedicato**, ma con f_0 sotto la finestra 8–12 Hz. L'elevata massa blocca qualsiasi risonanza parassita del telaio; richiede piatti a puleggia/trazione su plinto rigido esente da modi a 6–7 Hz.
4. Fidelity Research FR-64S + Koetsu Onyx Platinum (con headshell da 12 g + viti 1 g)	M_{canna} (19.0) + M_{hs} (12.0) + M_c (12.5) + M_h (1.0) = **44.5 g**	Con C_{10} = 8.5 cu: f_0 = 159.15 / √(44.5 × 8.5) = **8.18 Hz**	**Loefgren A (Baerwald):** Impostare D_{p2s} = **228.1 mm** (O = 16.9 mm) per ottenere R_1 = 66.0 mm, R_2 = 120.9 mm.	**R_c = 5 Ω:** Con SUT rapporto **1:20 (117.5 Ω riflessi)** o **Pre Attivo tra 50 Ω e 100 Ω**.	**Eccellente.** Sostituendo l'headshell FR originale da 16.2 g con uno in ebano/magnesio da 10–12 g si mantiene f_0 sopra gli 8.2 Hz.
5. Mørch DP-8 (Canna Blu 14 g) + Kiseki PurpleHeart N.S.	M_{eff} (14.0) + M_c (7.0) + M_h (1.0) = **22.0 g** (oppure **16.0 g** con Canna Gialla da 8 g, 14.0 g con Canna Rossa da 6 g)	Canna Blu (14 g): **8.48 Hz**. Canna Gialla (8 g): f_0 = 159.15 / √(16 × 16) = **9.95 Hz**. Canna Rossa (6 g): 10.63 Hz	**Loefgren B o Baerwald:** Baerwald con D_{p2s} = 211.9 mm, O = 18.1 mm, α = 23.97° (Loefgren B: D_{p2s} = 211.4 mm).	**R_c = 42 Ω:** Richiede carico alto, **400 Ω – 1000 Ω** in attivo, oppure SUT **1:10 (470 Ω riflessi)**. Evitare SUT 1:20 (117 Ω soffoca la dinamica).	**Canna Gialla (8 g) Vincitrice:** porta f_0 a **9.95 Hz**, al centro della finestra; la Canna Rossa (6 g) dà 10.6 Hz e la Canna Blu scende a 8.5 Hz.

6. Mørch DP-8 (Canna Gialla 8 g) + Nagaoka MP-700	M_{eff} (8.0) + M_c (8.0) + M_h (1.0) = **17.0 g**	Con $C_{10} \approx 15$ cu (stima: Nagaoka non pubblica la cedevolezza): $f_0 = 159.15 / \sqrt{(17.0 \times 15)}$ = **9.97 Hz**	**Loefgren A (Baerwald):** D_{p2s} = 211.9 mm, R_1 = 66.0 mm, R_2 = 120.9 mm; SRA rigoroso a 92.0°.	**R_{in} = 47 kΩ**, Capacità totale target **C_{tot} = 100 – 150 pF** (Nagaoka indica 100 pF; con L_c stimata 580 mH e 120 pF → f_e = 19.08 kHz). Cavo a bassa capacità (es. Mogami 2964, 65 pF/m).	**Allineamento Ideale:** Risonanza meccanica a 9.97 Hz e risonanza elettrica a 19.1 kHz per massima estensione del MicroRidge su boro.
7. SME 3009 S2 Improved + Shure V15 Type III	M_{eff} (6.5) + M_c (6.3) + M_h (0.7) = **13.5 g**	Con $C_{10} \approx 22.5$ cu (dinamica): $f_0 = 159.15 / \sqrt{(13.5 \times 22.5)}$ = **9.13 Hz** (con la versione a conchiglia staccabile da 9.5 g: 8.26 Hz; la vaschetta FD-200 riduce comunque Q_m)	**Baerwald:** R_1 = 66.0 mm, R_2 = 120.9 mm, con la slitta a D_{p2s} = 210.9 mm (il valore nominale SME di 215.4 mm dà una geometria diversa).	**R_{in} = 47 kΩ**, **C_{tot} = 400 – 450 pF** (la V15 Type III con L_c = 500 mH richiede specificamente 400–500 pF per linearizzare il picco meccanico dello stilo a 11.2 kHz).	**Classico Anni '70:** A differenza delle MM moderne che vogliono bassa capacità, la V15-III richiede un carico capacitivo elevato (~450 pF) per non risultare brillante.

8. Riferimenti

Letteratura tecnica e norme

[1] E. Löfgren, studio sulla distorsione non lineare nella riproduzione dei dischi causata dalla deviazione angolare del pick-up, Akustische Zeitschrift, vol. 3, novembre 1938 (titolo inglese: «On the Non-Linear Distortion in the Reproduction of Phonograph Records Caused by Angular Deviation of the Pickup Needle»).

[2] H. G. Baerwald, «Analytic Treatment of Tracking Error and Notes on Optimal Pick-Up Design», Journal of the Society of Motion Picture Engineers, vol. 37, n. 12, dicembre 1941.

[3] J. K. Stevenson, «Pickup Arm Design», Wireless World, maggio e giugno 1966.

[4] IEC 60098 (già IEC 98, 1958): norma sui dischi fonografici analogici e sulle apparecchiature di riproduzione.

[5] DIN 45547: norma tedesca da cui derivano i raggi minimo e massimo di incisione citati al §2.4.

[6] JIS S 8502:1973: norma giapponese sui dischi fonografici.

[7] RIAA: curva di equalizzazione standard per l'incisione e la riproduzione dei dischi (1954).

Schede tecniche dei costruttori (consultate a novembre 2026)

[8] Ortofon, SPU Classic GE MkII: scheda tecnica (ortofon.com).

[9] Fidelity Research, FR-7, FR-7f e FR-64S: dati di catalogo (audio-database.com).

[10] Koetsu, Onyx: specifiche (hifiverse.io).

[11] Hana (Excel Sound), SL Mono e SL Mono MkII: specifiche del costruttore riportate dai distributori (Music Direct, Audio Advisor).

[12] Kiseki, Purple Heart NS: specifiche (kjwestone.co.uk); recensioni di The Absolute Sound e Audiophilia.

[13] Denon, DL-103: specifiche (stereophile.com).

[14] Shure, V15 Type III: User Guide (pubs.shure.com).

[15] Nagaoka, MP-700: specifiche del costruttore riportate dai distributori.

[16] SME, 3012-R: manuale d'uso (manualslib.com) e hifi-wiki.com; SME 3009 Series II Improved: radiomuseum.org.

[17] Mørch, DP-8: specifiche (playstereo.com); Stereophile, «Analog Corner» n. 248.

[18] Mogami, W2964: specifiche del cavo (bhphotovideo.com).