

" روش کلی مشابه سازی در محاسبه امیدانس میله های روتور قفسه دار با شیار عمیق "

مهندس ثابت مزروقی
گروه مهندسی برق و الکترونیک
دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده:

روش حاضر برای طبقه بندی شیار عمیق از دو نظریه جدید تشکیل می شود .

۱- طبقه بندی براساس ارتفاعات مقاطع شیار (شمش) .

۲- طبقه بندی براساس سطوح مقاطع .

در حالت خاص که شکل شیارها را سگوشه باشند ، روش عمومی به روش طبقه بندی براساس ارتفاعات تبدیل می شود در این مقاله چهار برش (مقطع) برای شیار (شمش) در نظر گرفته می شود که تعداد اپتیمم می باشد چون در این صورت یک آنالوگ کامپیوتر ساده با ابعاد کوچک و ارزان کافی است .

با وجود براین روش کلی حتی با محدودیت فوق الذکر در تعداد برش ها (شیار) برای اشکال مختلفه شیار جواب های مطلوبی می دهد .

طبعاً " روش مذکور با افزایش تعداد برش ها به دقتی مورد نظر خواهید انجامید .

است . ولی این روش برای داشتن دقت کافی ، مستلزم تعداد زیادی برش است و در نتیجه به کامپیوتری بزرگ و گران قیمت نیاز دارد .

۱- روشهای شناخته شده برای شیار عمیق :

برای بررسی تحلیلی مقاومت و اندوکتانس میله در

شیار عمیق برحسب فرکانس ، دو روش موجود است :

۱- روش دقیق :

Rigorous Method

۲- روش عمق نفوذ :

Depth of penetration

۱-۱- روش دقیق :

اثر پوست در واقع تنها در بخشی از هادی که در شیار

قرار دارد روی می دهد . بنابراین مقاومت r_2 و راکتانس

(واکنایی) القایی X_2 سیم پیچی روتور می تواند با عبارت زیر

بیان شود :

$$r_2 = K_r \cdot r_2 + r_{e \text{ end}}$$

$$X_2 = K_1 \cdot X_2 + X_{e \text{ end}}$$

که در آن :

$$r_2 = \text{مقاومت هادی درون شیار روتور سیم پیچی شده}$$

باتوزیع جریان یکنواخت در طول سطح مقطع هادی .

خلاصه: ارائه روش کلی برای بخش ، بخش کردن میله بنا بردونظریه نوین زیر :

۱- طبقه بندی براساس ارتفاعهای مقاطع شیار .

۲- طبقه بندی براساس سطوح مقاطع .

مقدمه:

موتورهای القایی قفس سنجابی در اغلب واحدهای

صنعتی به کار می روند و از مزایای این موتورها ارزانی و تعمیر ساده

آنها در مقایسه با دیگر انواع موتورهای جریان متناوب است .

یکی از مسائل اصلی این موتورها مطالعه و بررسی دقیق تغییرات

اندوکتانس (القاکنایی) و مقاومت میله قفس برحسب فرکانس

است . حدود تغییرات فرکانس ، از فرکانس منبع است در حالت

سکون موتور تا ۲ یا ۳ Hz در حالت گردش آن با سرعت نامی .

نتیجتاً " یک بررسی کامل از پارامترهای میله و سهولت

مشابه سازی بر روی کامپیوتر قیاسی برای کنترل عملکرد در هنگام

راه اندازی و مسائل دینامیکی چنین موتورهای با میله (شیار)

عمیق بسیار مفید است . روشهای زیادی برای مشابه سازی شیار

عمیق در نظریه قفس دوپل به کار رفته (۱ و ۲) که خصوصاً "

برای میله های غیر مستطیلی و با عمق زیاد به دقت اثبات شده است .

در روش (۴ و ۵) ، عمق شیار به تعداد زیادی برش

تقسیم شده و هر کدام با پارامترهای فشرده نمایش داده شده

همچنین روابط پیچیده تری که برای میله‌های دوزنقه‌ای و میله‌های مرکب در شکل ۱ نمایش داده شده‌اند از (۸) مشتق شده‌است. یادآور می‌شود که ابعاد شکل ۱ برای مقایسه آتسی نتایج، این تحقیق همگی مطابق با (۸) برگزیده شده‌اند. هر سه میله به ترتیب دارای مساحت کل 378 mm^2 و ارتفاع یکسان $35/7 \text{ mm}$ هستند.

۲-۱- روش عمق نفوذ:

این روش برای تعیین پارامترهای میله (شیار) عمیق سودمند است، به ویژه برای میله‌هایی که بررسی آنها به محاسبات پیچیده و خسته‌کننده نیاز دارد.

در میله مستطیلی عمق نفوذ اندازه گرفته شده از سطح بالا برای مقاومت با h_{pr} و برای اندوکنانس با h_{pl} نمایش داده شده و به طور ساده به صورت زیر مشخص می‌شوند:

$$h_{pr} = \frac{h}{K_r} \quad K_r > 1 \quad (4)$$

$$h_{pl} = h \cdot K_1 \quad K_1 < 1 \quad (5)$$

بنابراین روش عمق نفوذ ذر (۳) و (۷)، فرض می‌شود که h_{pr} و h_{pl} به شکل میله عمیق بستگی ندارند. یعنی در میله‌های مرکب، میله‌های دوزنقه‌ای و یا میله‌های مستطیلی با ارتفاع کل h یکسان، یک مقدار دارند.

مسئله اساسی برای هر میله، خلاصه کردن محاسبات با استفاده از معادلات ۱-۵ است. نسبت $\frac{R_{a.c}}{R_{d.c}}$ برابر مساحت کل میله تقسیم بر مساحت جزء پایینی میله با عمق h_{pr} است و به همین ترتیب، نسبت $\frac{L_{a.c}}{L_{d.c}}$ برابر اندوکنانس $d.c$ یک میله با مساحت میله‌ای با عمق h_{pl} تقسیم بر اندوکنانس $d.c$ یک میله با مساحتی برابر مجموع مساحت حقیقی است.

درستی این روش برای هر شکل میله آزمایش شده است (۷) و تنها در مواردی که تغییر ناگهانی در پهنای میله وجود دارد (مانند میله‌های مرکب در شکل ۱C) خطای اندکی رخ می‌دهد. در این مقاله تغییر پارامترهای مختلف میله بر حسب فرکانس (بسامد) بار و روشهای دقیق و عمق نفوذ از روش مشابه سازی به کمک کامپیوتر قیاسی محاسبه و برای امتحان نتایج حاصل، مقایسه شده است.

$K_r =$ ضریب افزایش مقاومت به علت اثر پوست.

$r_{e \text{ end}}$ = مقاومت ثابت اتصالات کناری سیم پیچی روتور.
 X_2 و $X_{e \text{ end}}$ = راکتانس القایی نشت در شیار و اتصالات کناری سیم پیچی روتور.

با توزیع یکنواخت در سطح مقطع هادی با فرکانس f_1 ، (فرکانس منبع تغذیه).

$K_1 =$ ضریب کاهش راکتانس القایی X_2 به علت اثر پوست.
 K_1 و K_r از روابط زیر (۱۲) به دست می‌آیند:

$$K_r = \frac{R_{a.c}}{R_{d.c}} = \xi \frac{\sin h 2\xi + \sin 2\xi}{\cos h 2\xi - \cos 2\xi} \quad (1)$$

$$K_1 = \frac{L_{a.c}}{L_{d.c}} = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sin h 2\xi - \sin 2\xi}{\cos h 2\xi - \cos 2\xi} \quad (2)$$

و ξ با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\xi = h \sqrt{\pi \mu_0 \cdot \frac{b_b}{b_s} \cdot \frac{f_2}{\rho}} \quad (3)$$

که در آن: ρ = مقاومت مخصوص ماده میله.

h = ارتفاع میله.

b_b b_s = پهنای میله و شیار.

f_2 = فرکانس جریان در میله.

نسبت پهنای میله به پهنای شکاف b_b/b_s را به طور

عادی مساوی واحد می‌گیرند. چون $f_2 = S f_1$ ، با در نظر گرفتن $f_1 = 50 \text{ Hz}$ (فرکانس منبع تغذیه) و:

$$\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{Sec}}{\Omega \cdot \text{m}}$$

$$P = 0/02 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}} \quad (\text{برای مس})$$

و اندازه گیری h بر حسب سانتی متر داریم:

$$\xi = h S$$

$$\xi = h \quad S = 1 \quad \text{و بنابراین:}$$

با داشتن ξ می‌توان ضریبهای K_1 و K_r را به دست

آورد. به ازای مقادیر:

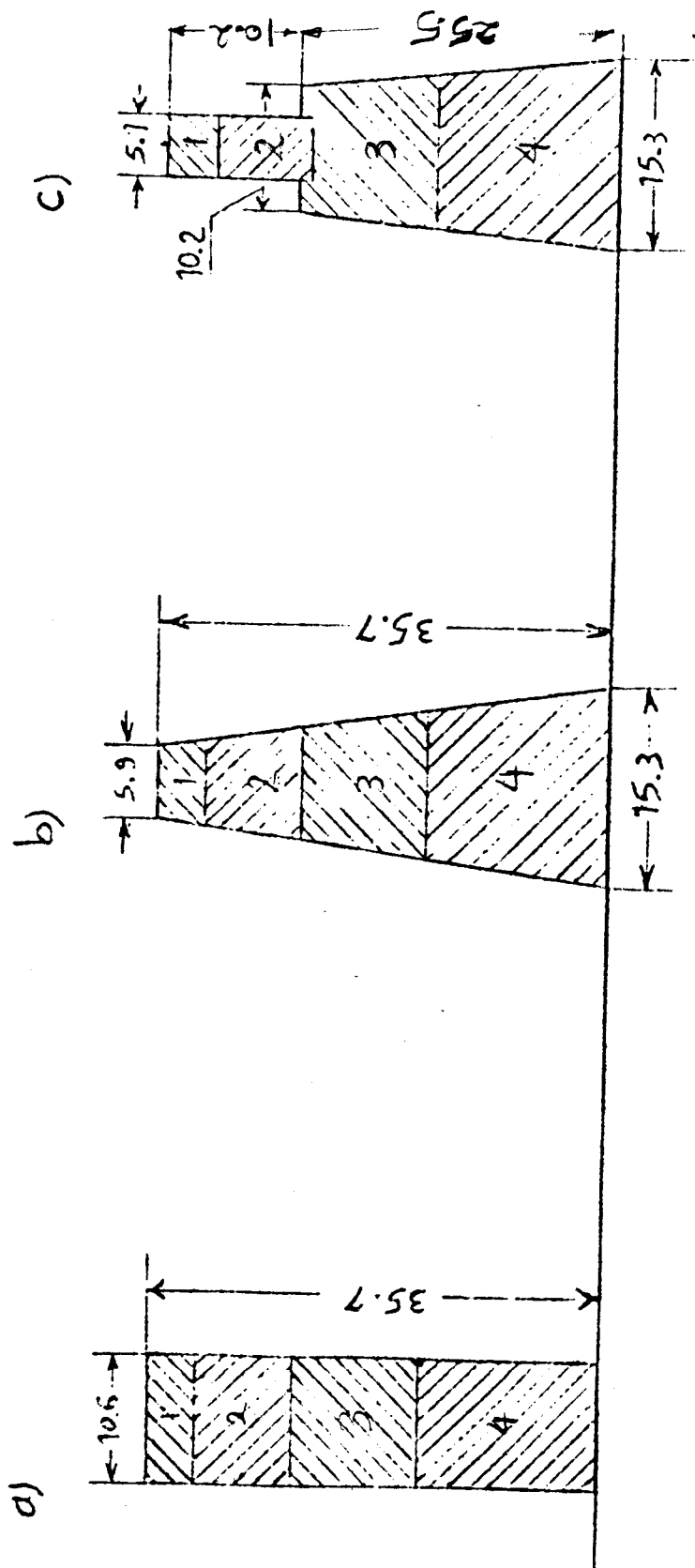
$$\xi > 2 \quad \text{و} \quad \sin h 2\xi \quad \cos h 2\xi$$

و هر دو از $\cos 2\xi$ و $\sin 2\xi$ بسیار بزرگترند.

بنابراین به ازای مقادیر $\xi > 2$ داریم:

$$K_r = \xi \quad K_1 = \frac{3}{2} \xi$$

شکل (۱) - شکل‌های مختلف میله: ابعاد برحسب میلی‌متر



(Rectangular) مستطیلی (a) (Tapered) دوزنقه‌ای (b) (Composite) ترکیبی (c)

نتایج مربوط به چهاربرش و مشابه سازی، برای میلهء مستطیلی شکل 1a به صورت شکل (۳) است. در همین شکل، نتایج حاصل از روش تحلیل دقیق نیز داده شده است. مقایسه این دو نتیجه خطای قابل ملاحظه ای برای مقاومت و اندوکتانس میلهء مستطیلی نشان می دهد.

می توان پیش بینی کرد که با استفاده از این روش برای شکلهای پیچیده تر، خطا افزایش هم بیاید. بنابراین در روش ارتفاع یکسان اگر تعداد برشها کم انتخاب شوند (حتی با میله های مستطیلی ساده) دقت قابل قبولی به دست نمی آید. این نتیجه رهگشای کوششهای جدید برای حصول دقت قابل قبول می شود.

۲-۳-۲- طبقه بندی ارتفاعات:

نتیجه نارضایت بخشی بالا مکان طبقه بندی ارتفاعهای میله برای به حساب آوردن تغییر سریعتر چگالی جریان نزدیک بالای میله را مطرح می کند. از این رو به جای استفاده از میله ها هم ارتفاع، ارتفاع چهاربرش بر اساس یک قاعده ساده و بخاطر سپردنی ۱:۲:۳:۴ طبقه بندی می شوند در این صورت ارتفاع برشها به ترتیب عبارت خواهد شد از:

$$h/10, 2h/10, 3h/10, 4h/10$$

نتایج کامپیوتری برای شکلهای میله مستطیلی و مرکب

به ترتیب در شکلهای ۴ و ۵ نشان داده شده است. واضح است که نتایج حالت میلهء مستطیلی با نتایج میلهء مرکب اختلاف دارد. سازگاری کامل روش دقیق و روش طبقه بندی ارتفاعات به ویژه در مورد مقاومت میله در این شکلهای دیده می شود. این نتیجه، برتری روش طبقه بندی ارتفاعات را بر روش ارتفاعهای مساوی نشان می دهد. از این رو برای میله های مستطیلی به کار می رود.

۲-۳-۳- طبقه بندی مساحتها:

باموفقیت روش طبقه بندی ارتفاعات در مورد میله های مستطیلی و خطائی که این روش در مورد شکلهای دیگر نظیر میله های مرکب به همراه دارد، روش طبقه بندی مساحت برشها در نسبت ۱:۲:۳:۴ پیشنهاد می شود. این فکر از این امر ریشه می گیرد که در حالت میلهء مستطیلی طبقه بندی ارتفاعات و طبقه بندی مساحتها نسبتهای یکسانی دارند. حال با محدود کردن تعداد برشها به ۴ مساحت آنها به ترتیب عبارت خواهند بود از:

۲- روش مشابه سازی پیشنهادی و روش کلی:

جهت بیان مدار معادل از روشهای شناخته شده برای شیار (میلهء) عمیق که در قسمت 1 شرح داده شده، استفاده می شود. هر قسمت از شیار با مقادیر ثابتی نمایش داده می شود و نهایتاً "مدار معادل میله را می توان از اتصال متوالی مدارهای معادل همهء برشها به دست آورد.

مدار معادل دقیق و معتبر به نمایش تعداد زیادی برش در میله (شیار) عمیق نیاز دارد. این امر نیز مستلزم تعداد زیادی تقویت کننده برای مشابه سازی و نتیجتاً "کامپیوتر قیاسی گران قیمت است. حال باید دید نتایج حاصل از کدام روش مناسب تر است.

طبق شکل 2a برای نمایش هر قسمت از میلهء مدار معادل π به کار می رود. برای قسمت K ام، مقاومت و اندوکتانس عبارت است از:

$$R_k = \frac{\rho \cdot l}{A_k}$$

$$L_k = \mu_0 \cdot l \cdot \frac{h_k}{w_k}$$

شکل 2b مدار معادل کامل 4 برش میله را با نمادهای

معرفی شد، در جدول (1) نشان می دهد.

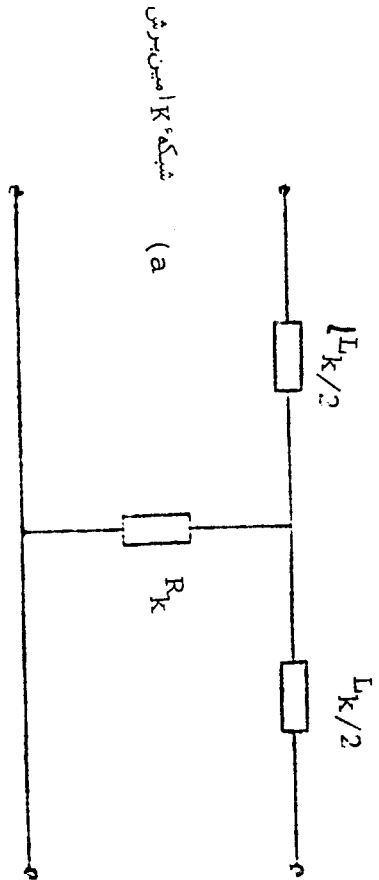
۲-۳-۳- طرح تقسیم میله سه:

سعی بر این است که میله به چهاربرش طوری تقسیم شود تا بهترین نتیجه برای شکلهای مختلف میله به دست آید. چنانکه گفته شد سه طرح در شکل 1 انتخاب شده است. تحت ارتفاع میله را به چهاربخش مساوی تقسیم می کنیم و گام به گام به روش رضایت بخش تر می رسیم.

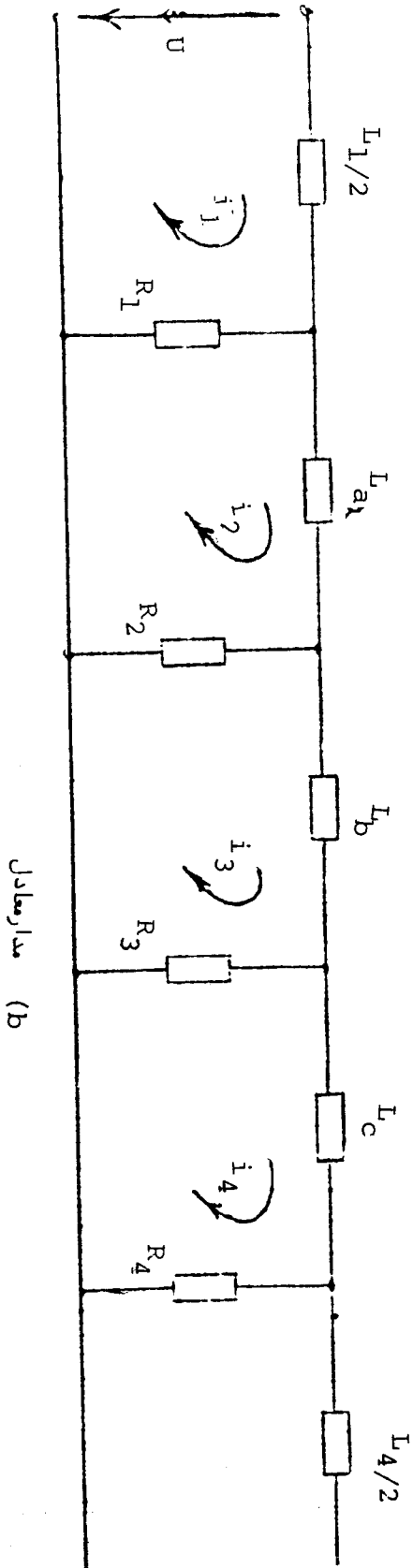
۱-۲-۳- برشهای با ارتفاع مساوی:

در این روش، ارتفاع هر برش $h/4$ در نظر گرفته می شود و این موضوع در 3 و 4 در ارتباط با میله های مستطیلی با تعداد زیادی برش پیشنهاد شده است. اما در اینجا فقط 4 برش در نظر می گیریم و با این محدودیت دقت لازم را ارزیابی می کنیم.

شکل (۲) + مدار معادل چهار پورت میوه



(a) شبکه K امین پورت



(b) مدار معادل

$$L_a = \frac{L_1 + L_2}{2}$$

$$L_b = \frac{L_2 + L_3}{2}$$

$$L_c = \frac{L_3 + L_4}{2}$$

جدول ۱ - لیست نمادهای اصلی:

A	مساحت کل میله‌ها
A_K	مساحت K امین برش میله
b_b	پهنای میله
b_s	پهنای شکاف
v	سرعت زاویه الکتریکی
h	ارتفاع کل میله
h_1, h_k	ارتفاع اولین و K امین برش میله به ترتیب
h_{pl}	اندوکتانس عمق نفوذ
h_{pr}	مقاومت عمق نفوذ
i_1, i_2, i_3, i_4	جریان حلقه (L_0P) در مدار معادل میله
K_1	ضریب کاهش اندوکتانس DC میله
K_r	ضریب افزایش مقاومت DC میله
L	مجموع اندوکتانس DC میله
L_k, R_k	اندوکتانس و مقاومت K امین برش به ترتیب
l	طول محوری میله
n	تعداد برشهای میله
R	مجموع مقاومت‌های مؤثر میله
U	ولتاژ میله
W_k	پهنای متوسط K امین برش
Z	مجموع امپدانس مؤثر میله
ξ	فرکانس تغییرپذیر (بدون بعد)
μ_0	تراوندگی خلاء
ρ	مقاومت مخصوص

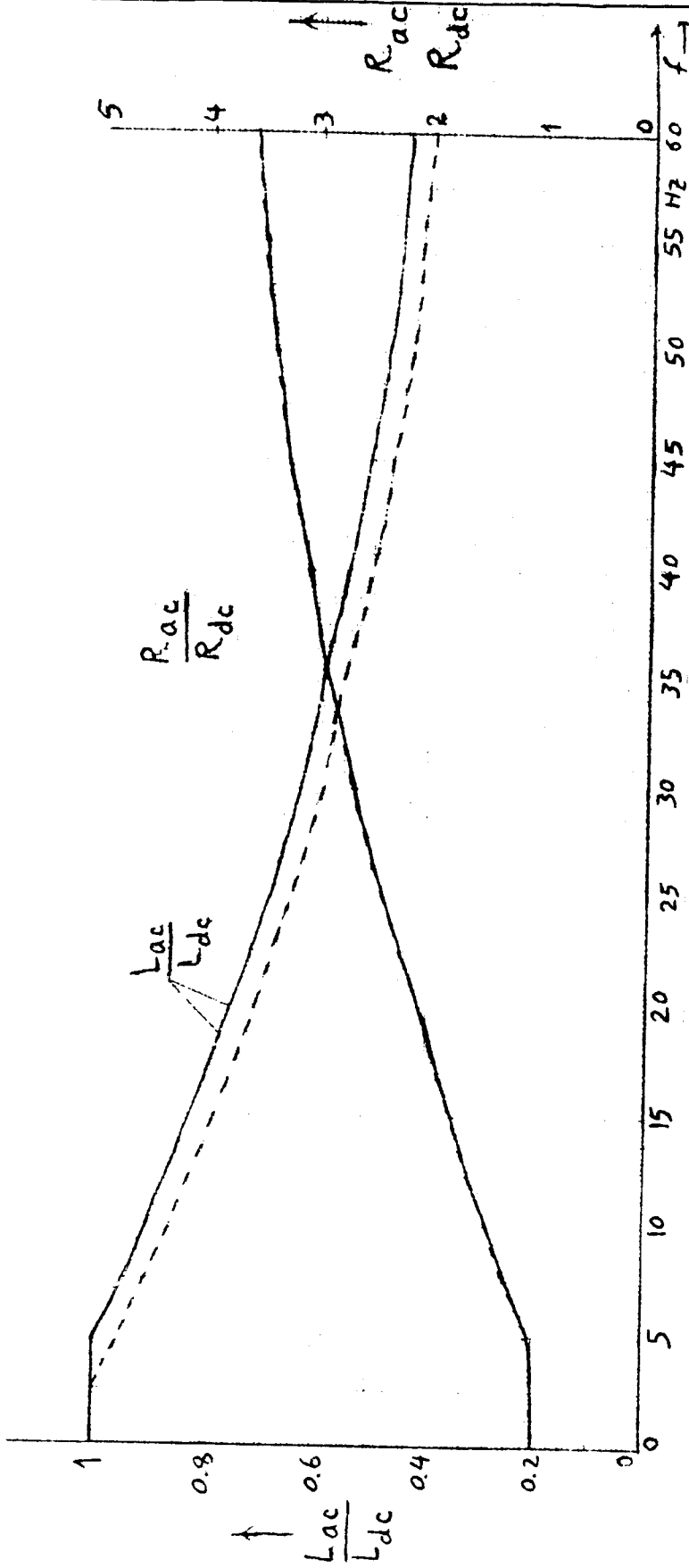
شکل (۳) تغییر پارامترهای

$$K_I = \frac{I_{ac}}{I_{dc}} \quad \text{و} \quad K_T = \frac{R_{ac}}{R_{dc}}$$

میله مستطیلی $K_I = \frac{I_{ac}}{I_{dc}}$

————— روش ارتفاع مساوی

----- روش سختگیرانه



1/10 A, 2/10 A, 3/10 A, 4/10 A

$$\frac{35.7 \times 10.6}{10.6} \cdot \frac{4}{10} = 14.28 \text{ mm}$$

که A کل مساحت میله است.

و قسمت سوم $35.7 - 14.28 - 7.14 - 3.57 = 10.71 \text{ mm}$ می شود. نتایج نمونه های دیگر در جدول ۲ آورده شده است. دیده می شود که با میله مستطیلی ارتفاعات برشها با آنچه از روش طبقه بندی ارتفاعها به دست آمده فرقی ندارد. شکلهای ۷ و ۸ نتایج کامپیوتری روش کلی پیشرفته را به ترتیب برای میله های دوزنقه ای و میله مرکب نشان می دهند. همچنین در این شکلهای نتایج به دست آمده از روشهای عمق نفوذ و دقیق برای مقایسه باروش کلی رسم شده اند.

این روش را برای میله دوزنقه ای (شکل ۱) به کار برده ایم و نتایج کامپیوتری را برای تغییر پارامترهای میله در شکل ۶ نشان داده ایم. از مقایسه نتایج حاصل با روش عمق نفوذ، مقدار خطای قابل ملاحظه ای خصوصاً "درمقادیر مقاومت دیده می شود که پذیرفتنی نیست.

روش کلی پیشرفته:

این روش ترکیبی از روش طبقه بندی ارتفاعات و روش طبقه بندی مساحت است. بدین طریق که تعداد تقسیمات از بالای شیار را باروش طبقه بندی ارتفاعات در نظر می گیریم و برای قسمتهای پایینی به غیر از بالاترین قسمت باقیمانده روش طبقه بندی مساحت را به کار می بریم (در هر قسمت، فرض می کنیم روش طبقه بندی مساحت یا طبقه بندی ارتفاعات برای کلی میله منظور شده است) گ ابعاد بخش باقیمانده بین دو روش با کم کردن ارتفاعها و مساحتها برشها از کل ارتفاع و مساحت به دست خواهد آمد.

بنابراین در صورتی که میله به چهار قسمت تقسیم شود ارتفاع دو قسمت اول $1/10h$ و $2/10h$ و مساحت آخرین بخش $4/10 A$ خواهد بود.

۳- مشابه سازی بر روی کامپیوتر قیاسی

با استفاده از مدار معادل میله که در شکل ۲ ب نشان داده شد و همچنین با در نظر گرفتن حلقه های مدار، معادلات دیفرانسیل زیر نوشته می شوند:

$$U_1 = \frac{L_1}{2} \frac{di_1}{dt} + (i_1 - i_2)R_1 \quad (9a)$$

$$0 = L_a \frac{di_2}{dt} + (i_2 - i_3)R_2 + (i_2 - i_1)R_1 \quad (9b)$$

جدول ۲

شمش	$h_1(\text{mm})$	$h_2(\text{mm})$	$h_3(\text{mm})$	$h_4(\text{mm})$
مستطیلی	3.57	7.14	10.71	14.28
دوزنقه ای	3.57	7.14	13.94	11.05
مرکب	3.57	7.14	14.49	10.50

به طور مثال برای میله مستطیلی که در شکل (۱) نشان داده شده ارتفاع قسمت اول 3.57 mm قسمت دوم $3.57 \times 2 = 7.14 \text{ mm}$ قسمت چهارم:

$$0 = L_b \frac{di_3}{dt} + (i_3 - i_2)R_2 + (i_3 - i_4)R_3 \quad (9c)$$

$$0 = L_c \frac{di_4}{dt} + (i_4 - i_3)R_3 + i_4 R_4 \quad (9d)$$

معادله های (9a-d) سپس به نمودار بلوکی شکل ۹ می انجامند که بانماهای زیر معرفی می شوند :

$$\begin{aligned} P_{10} &= \frac{2}{L_1} & P_{11} &= \frac{2R_1}{L_1} & P_{12} &= \frac{2R_1}{L_a} \\ P_{21} &= \frac{R_1}{L_a} & P_{22} &= \frac{R_1 + R_2}{L_a} & P_{23} &= \frac{R_2}{L_a} \\ P_{32} &= \frac{R_2}{L_b} & P_{33} &= \frac{R_2 + R_3}{L_b} & P_{34} &= \frac{R_3}{L_b} \\ P_{43} &= \frac{R_3}{L_c} & P_{44} &= \frac{R_3 + R_4}{L_c} \end{aligned}$$

(۱۰)

روابط (9a-d) با توجه به روابط (۱۰) به صورت زیر درمی آیند :

$$U = \frac{L_1}{2} \frac{di_1}{dt} + (i_1 - i_2)R_1$$

$$U \left(\frac{2}{L_1} \right) i_1 + \left(\frac{2R_1}{L_1} \right) i_2 = \frac{di_1}{dt}$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{P_{10}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{P_{11}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{P_{12}}$

$$0 = L_a \frac{di_2}{dt} + (i_2 - i_3)R_2 + (i_2 - i_1)R_1$$

$$- \left(\frac{R_1 + R_2}{L_1} \right) i_2 + \left(\frac{R_2}{L_a} \right) i_2 + i_1 \left(\frac{R_1}{L_a} \right) = \frac{di_2}{dt}$$

$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{P_{22}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{P_{23}} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{P_{21}}$

$$0 = L_b \frac{di_3}{dt} + (i_3 - i_2) R_2 + (i_3 - i_2) R_3$$

$$- \underbrace{\left(\frac{R_2 + R_3}{L_b} \right)}_{P_{33}} i_3 + \underbrace{\left(\frac{R_2}{L_b} \right)}_{P_{32}} i_2 + \underbrace{\left(\frac{R_3}{L_b} \right)}_{P_{34}} i_4 = \frac{di_3}{dt}$$

$$0 = L_c \frac{di_4}{dt} + (i_4 - i_3) R_3 + i_4 R_4$$

$$- \underbrace{\left(\frac{R_3 + R_4}{L_c} \right)}_{P_{49}} i_4 + \underbrace{\left(\frac{R_3}{L_c} \right)}_{P_{43}} i_3 = \frac{di_4}{dt}$$

در این صورت، نتایج مربوط به شیار مستطیلی شکل ۲

با ابعاد داده شده و به ازای:

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{V} \cdot \text{Sec}}{\text{A} \cdot \text{m}} \quad P = 2.1 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$$

چنین خواهد شد:

$$R_1 = 2.1 \times 10^{-5} \times \frac{35.7}{10.6 \times 3.57} = 2 \times 10^{-5} \Omega \quad R_2 = 1 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R_3 = 0.7 \times 10^{-5} \Omega \quad R_4 = 0.5 \times 10^{-5} \Omega$$

$$L_1 = 1.5 \times 10^{-8} \text{ H} \quad L_2 = 3 \times 10^{-8} \text{ H} \quad L_3 = 4.5 \times 10^{-8} \text{ H} \quad L_4 = 6 \times 10^{-8} \text{ H}$$

$$\frac{di_1}{dt} = 3.14 \times 10^5 \sin \omega t - 2.67 \times 10^5 \frac{i_1}{100} - 2.67 \times 10^5 \cdot \frac{i_2}{100}$$

$$\frac{di_2}{dt} = 0.89 \times 10^5 \cdot \frac{i_1}{100} - 1.34 \times 10^5 \frac{i_2}{100} + 0.44 \times 10^5 \frac{i_3}{100}$$

$$\frac{di_3}{dt} = 0.267 \times 10^5 \frac{i_2}{100} - 0.455 \times 10^5 \frac{i_3}{100} + 0.187 \times 10^5 \frac{i_4}{100}$$

$$\frac{di_4}{dt} = \left(0.1335 \cdot \frac{i_3}{100} - 0.267 \cdot \frac{i_4}{100} \right) \times 10^5$$

$$\frac{1}{10^6} \cdot \frac{di_1}{dt} = 0.314 \sin \omega t - 0.267 \cdot \frac{i_1}{100} - 0.267 \cdot \frac{i_2}{100}$$

$$\frac{1}{10^6} \cdot \frac{di_2}{dt} = 0.089 \cdot \frac{i_1}{100} - 0.134 \frac{i_2}{100} + 0.44 \cdot \frac{i_3}{100}$$

$$\frac{1}{10^5} \cdot \frac{di_3}{dt} = 0.267 \cdot \frac{i_2}{100} - 0.454 \cdot \frac{i_3}{100} + 0.187 \cdot \frac{i_4}{100}$$

$$\frac{1}{10^5} \cdot \frac{di_4}{dt} = 0.1335 \frac{i_3}{100} - 0.267 \cdot \frac{i_4}{100}$$

نتیجه کلی:

بامقایسه نتایج به دست آمده می توان گفت باروش طبقه بندی مساحت دارای دقت خوبی برای شیارهای مستطیلی است ولی برای شیارهای مرکب و شیارهای ذوزنقه ای دقت در حد متوسط است. روش کلی پیشرفته برای شیارهای ذوزنقه ای دقت خوبی دارد و این دقت به ویژه در مورد شیارهای مرکب جالب است. بنابراین در مورد شیارهای مستطیلی روش طبقه بندی مساحتها و برای دوزنوع شیار دیگر روش کلی پیشرفته توصیه می شود.

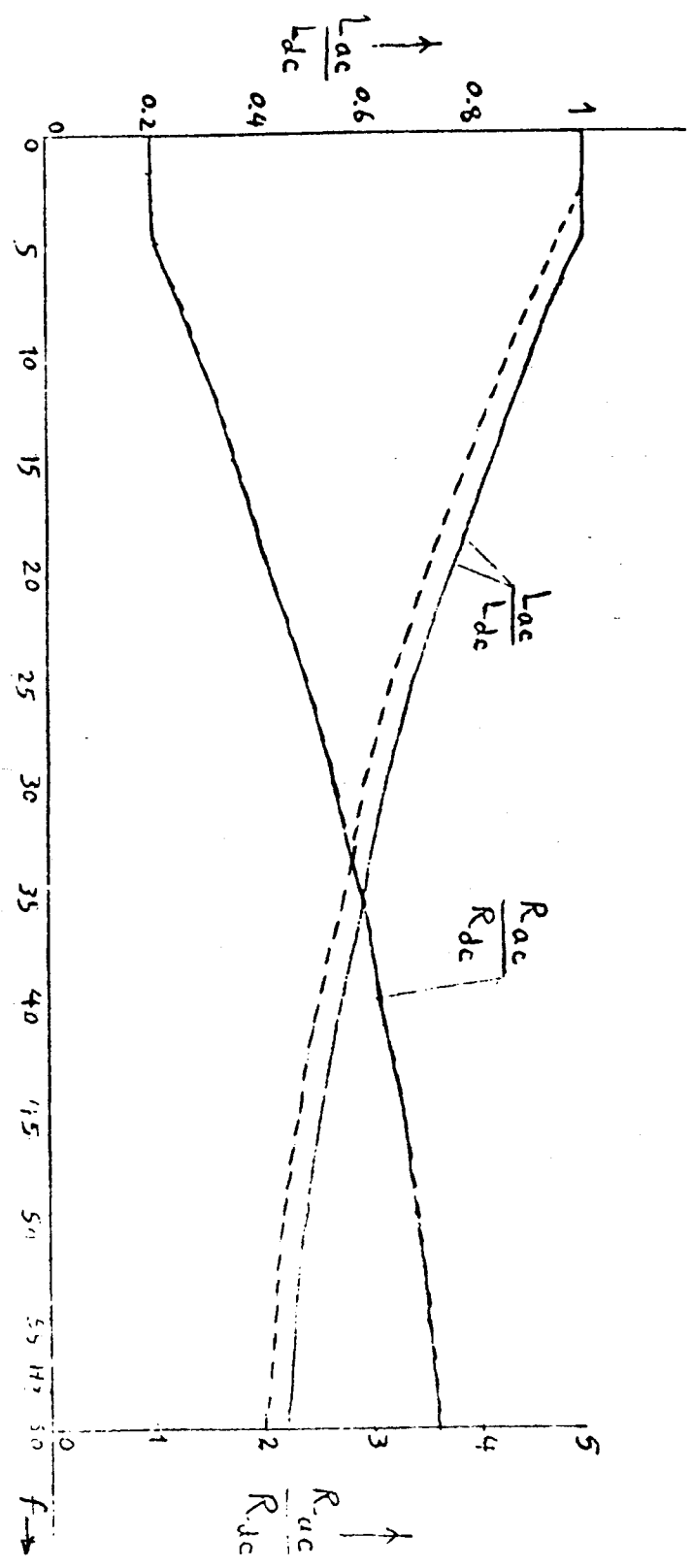
ولتاژ فرکانس متغیر درخواستی در خود کامپیوتر را نوسان سازی که در شکل ۱۰ به طور طرح واره ای نشان داده شده، فراهم می کند.

ولتاژ اولیه U از انتگرال گیر دوم، دامنه نوسان ولتاژ خروجی سینوسی را وقتی که فرکانس در دو پتانسیومتر در مدار تنظیم می شود، تعیین می کند.

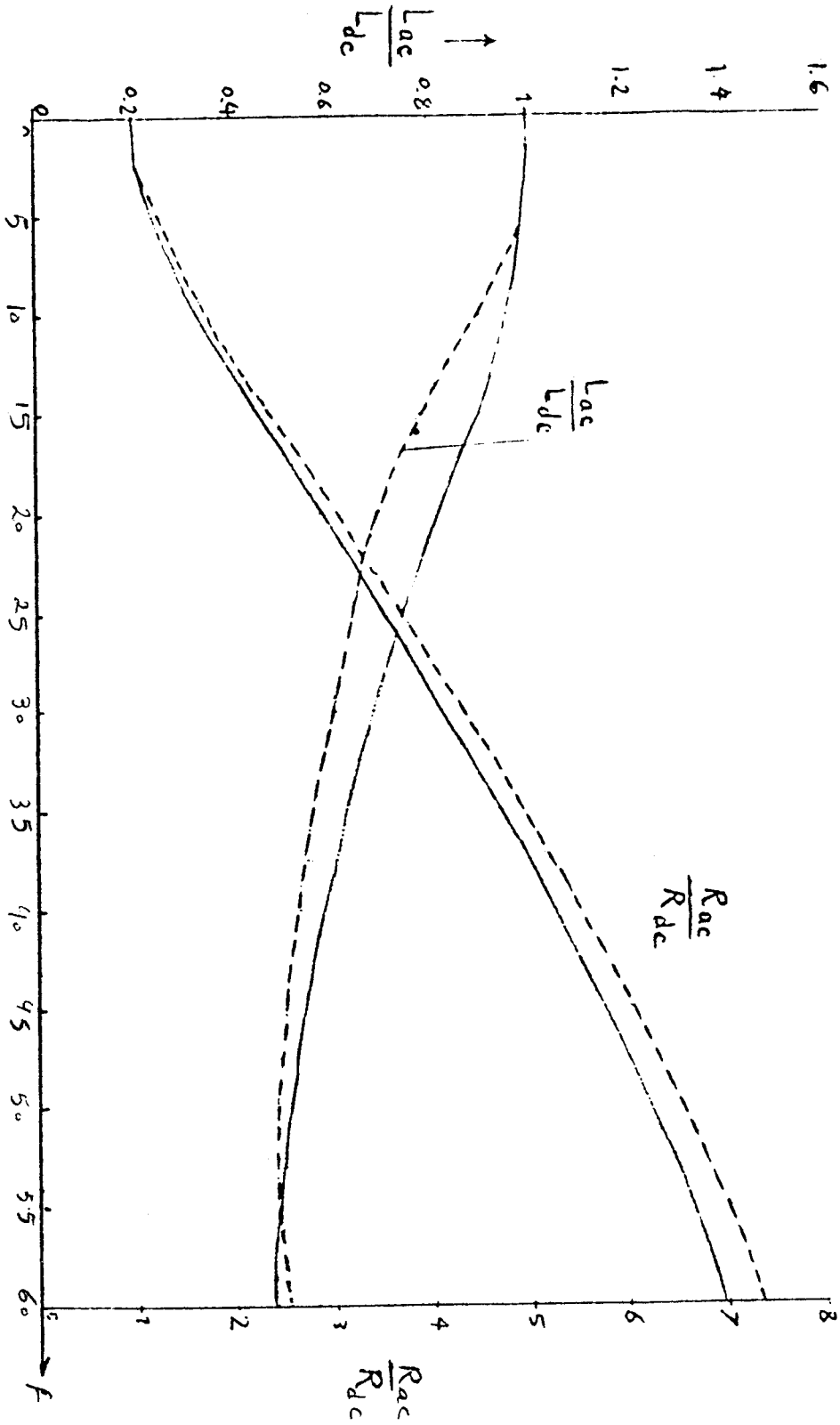
محاسبه پارامترهای میله بعد از مشابه سازی در شکل ۹ نیازمند اندازه گیری تاثیر فرکانس متغیر ولتاژ u، جریان i₁، و زاویه انحراف فاز l بین آنهاست. با استفاده از مدار معادل 2b پارامترهای مؤثر یعنی R و L از روابط زیر محاسبه می شود:

$$R = \mu \cos l$$

$$L = \frac{1}{2\pi f} u \sin l$$



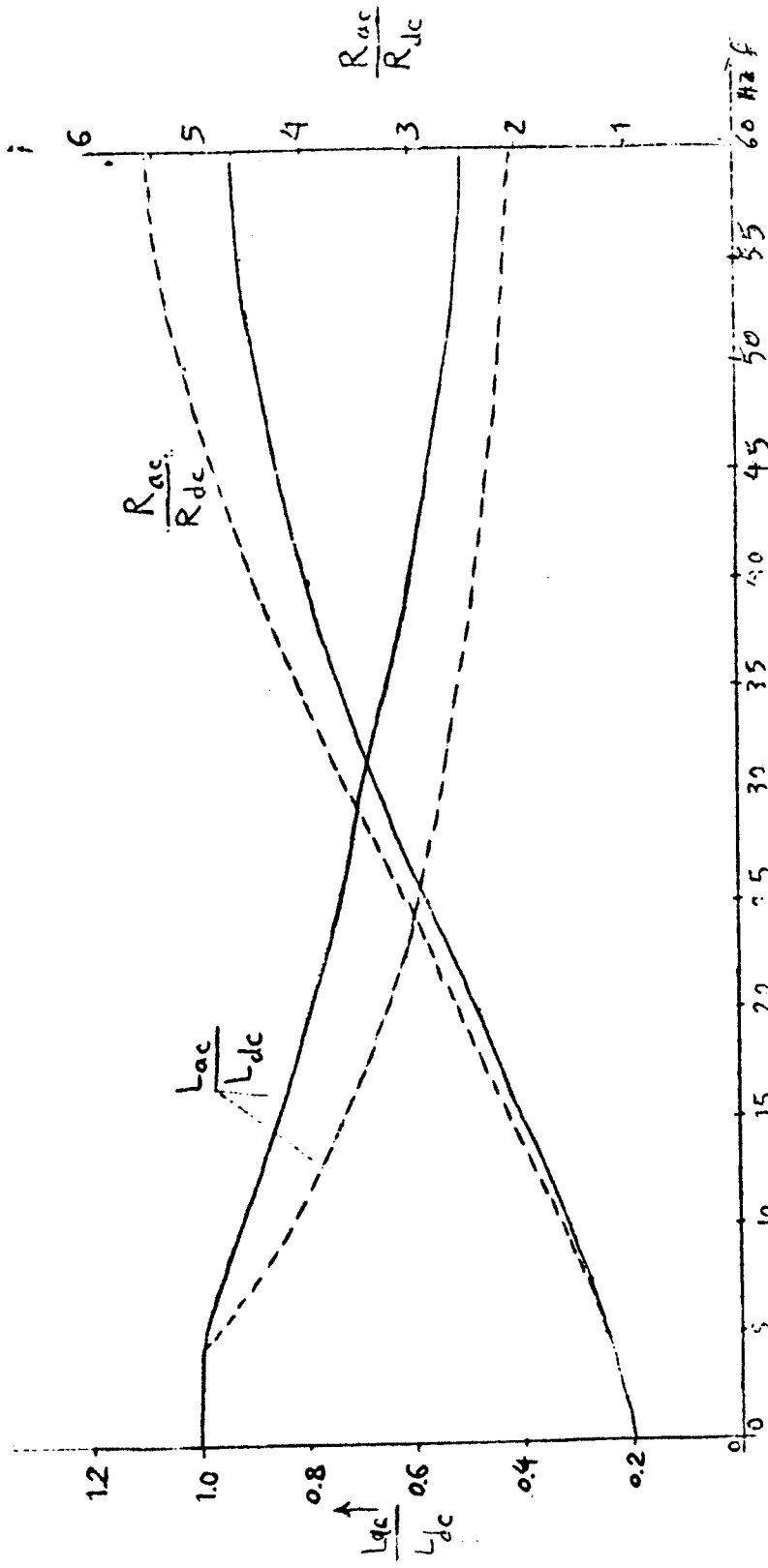
شکل (۴) تغییر پارامترهای میله مستطیلی
 طبقه بندی ارتفاعها
 روش سختگیرانه



شکل (۵) تغییر پارامترهای میله مستطیلی

سطحی ارتفاعها

عمیق نفوذ



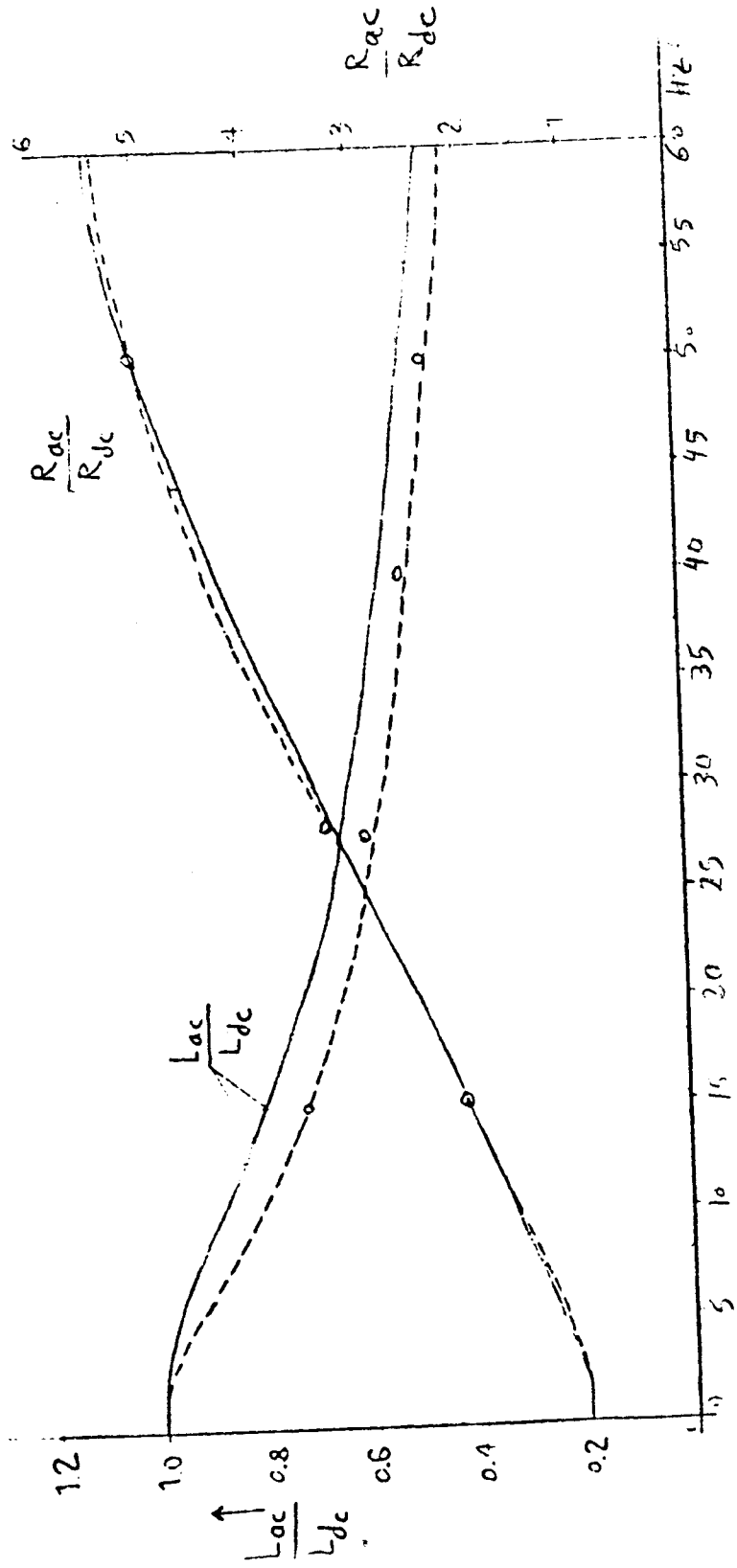
شکل (۶) تغییر پارامترهای میله دوزنقه‌ای

طبقه‌بندی مساحت —————

عمق نفوذ —————

شکل (۷) تغییر پارامترهای میله دوزنقهای

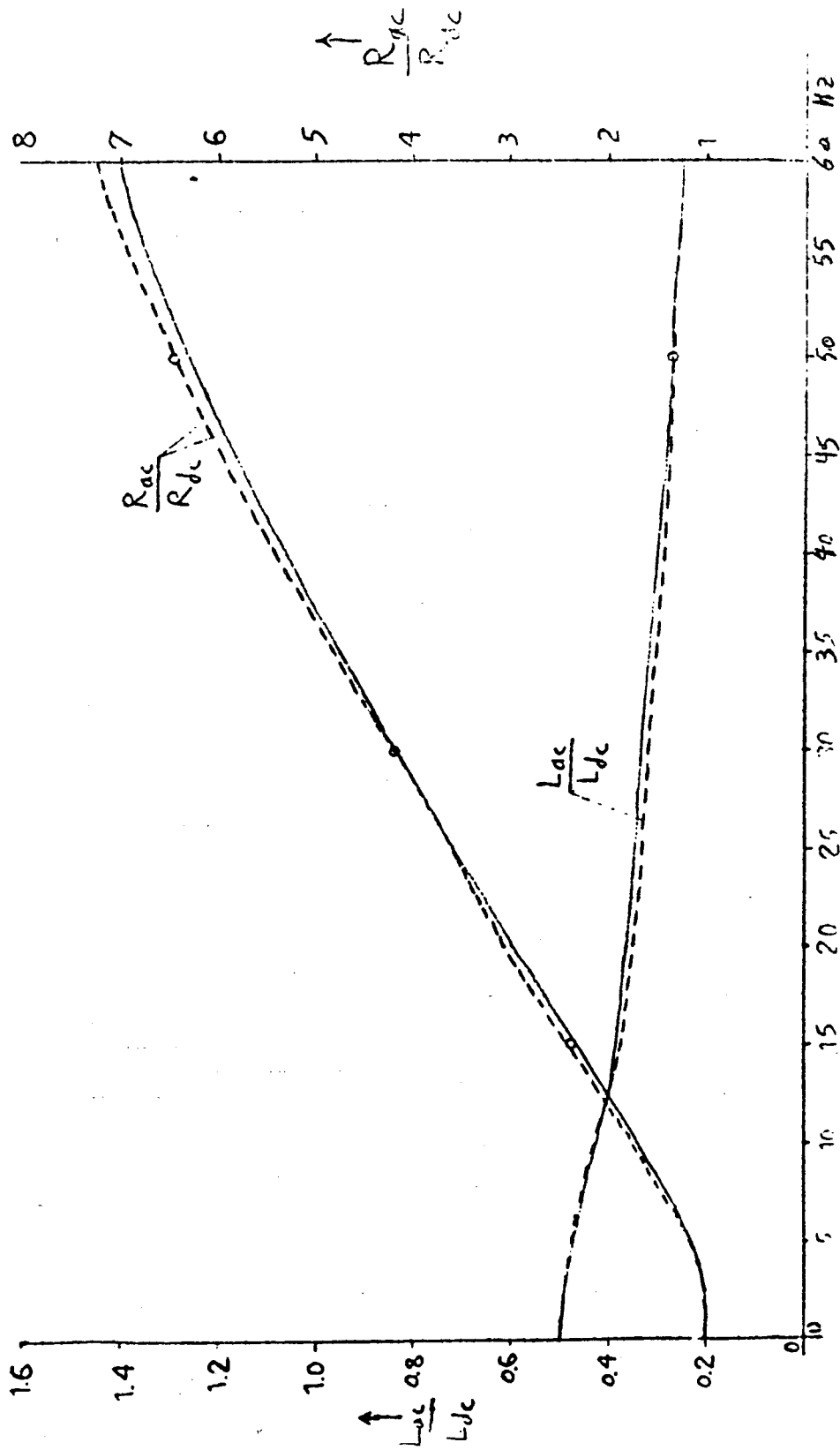
— روش کلی
 - - - عمق نفوذ



شکل (۸) تغییر پارامترهای میله مرکب

روش کلی

عمق نفوذ



$$P_{10} = \frac{2}{L_1}$$

$$P_{12} = \frac{2R_1}{L_1}$$

$$P_{11} = \frac{2R_1}{L_1}$$

شکل (۹) نمودار بلوکی کامپیوتر برای مشابه سازی ۴ برش میله

$$P_{21} = \frac{R_1}{La}$$

$$P_{23} = \frac{R_2}{La}$$

$$P_{22} = \frac{R_1 + R_2}{La}$$

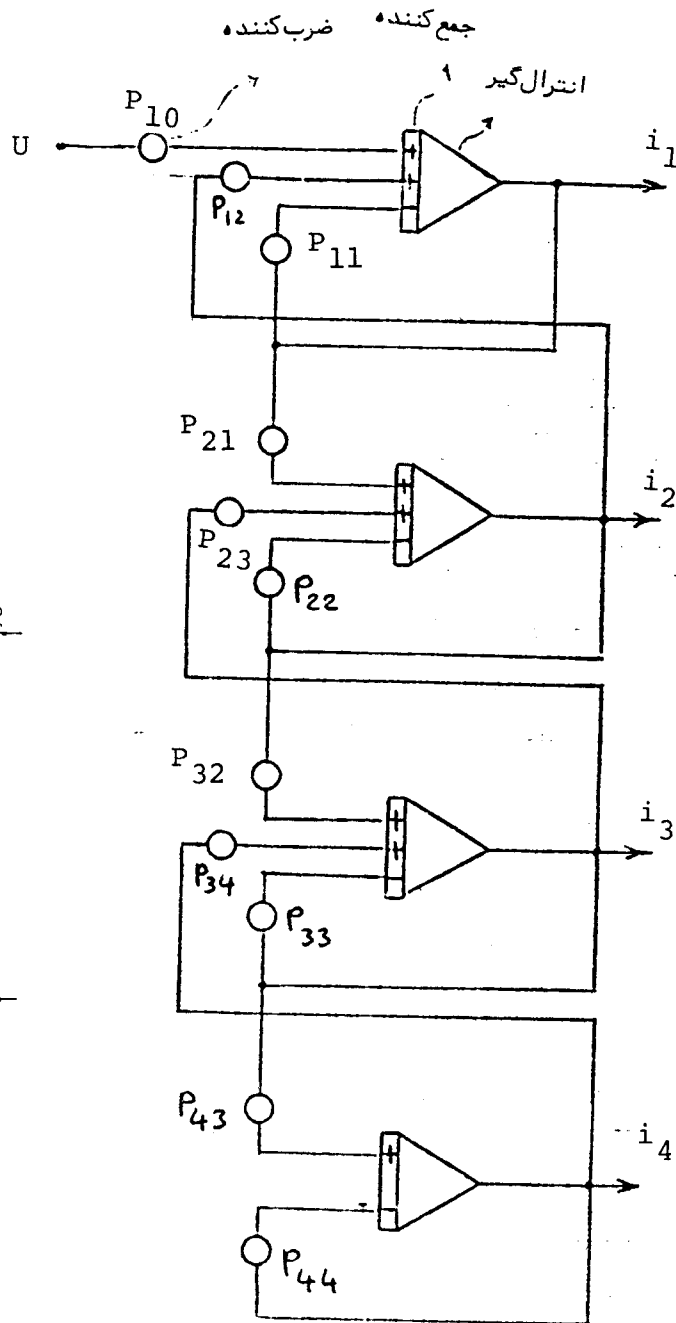
$$P_{32} = \frac{R_2}{Lb}$$

$$P_{34} = \frac{R_3}{Lb}$$

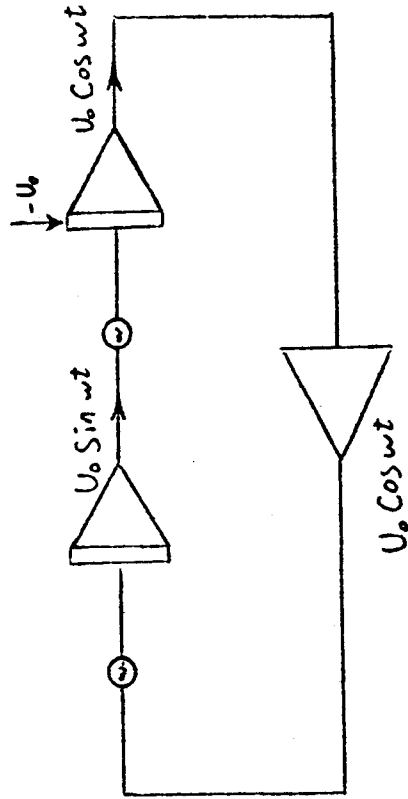
$$P_{33} = \frac{R_2 + R_3}{Lb}$$

$$P_{43} = \frac{R_3}{Lc}$$

$$P_{44} = \frac{R_3 + R_4}{Lc}$$



شکل (۱۰) مدار برای فرکانس قابل تغییر منبع



فهرست منابع

References

1. M. Stiebler: Die Nachbildung von Induktionsmaschinen mit stromverdrängungsläufer am Analogrechner unter Verwendung der Doppelkafignaherung. Arch. Elektrotechn. Bd. 49(1965).
2. M. Stiebler: Die Berechnung von Übergangsvorgängen bei Induktionsmaschinen mit Stromverdrängungsläufer. Arch. Elektrotechn. Bd. 51(1966).
3. E. Zur Nieden: Calculation of bars for skin-effect motors. Elektrotechn. U. Masch. Bau (1933) S. 129-134.
4. D.S. Babb; J.E. Williams: Circuit analysis method for determination of AC impedance of machine conductors. AIEE Trans. on Power, Apparatus & Systems. Vol. 70(1951). P.661-666.
5. D.S. Bobb; J.E. Williams: Network analysis of AC machine conductors. AIEE Trans. on Power, Apparatus & Systems. Vol. 70(1951). P.2001-2005.
6. A.K. Eugere; E.J. Howarde: Simulation of polyphase induction machines in the deep bars. IEE Trans. on Power, Apparatus & Systems. Vol. 89 (1970) P. 1038-1043.
7. M.M. Liwschitz-Garik: Computation of skin-effect in bars of squirrel-cage rotors. AIEE Trans on Power, Apparatus & Systems. Vol. 74 (1955) P. 768-771.
8. M.M. Liwschitz-Garik: Skin-effect bars of squirrel-cage rotors. AIEE Trans on Power, Apparatus & Systems. Vol. 73 (1954). P. 255-258

- ۹ - جزوه‌های ماشین‌های الکتریکی مهندس ثابت مرزوقی
 ۱۰ - جزوه آزمایشگاه ماشین‌های الکتریکی مهندس ثابت مرزوقی
 ۱۱ - جزوه آزمایشگاه انتقال انرژی مهندس ثابت مرزوقی

12. The Analysis of Eddy Currents. By: Richard Stoll.