

ЧУТЛИВІСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ВЛАСНИХ ЗАГАСАЮЧИХ КОЛИВАНЬ ПЕРЕХІДНОЇ НАПРУГИ НАКЛАДНОГО ВИХРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА НАД ОБ'ЄКТОМ КОНТРОЛЮ У ФОРМІ ПЛАСТИНИ ДО ЇЇ МАГНІТНОЇ ПРОНИКНОСТІ І ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ

Ї Яцун М.А., Яцун А.М., 2008

Досліджено чутливості колової частоти, коефіцієнта загасання, амплітуди і початкової величини перехідної напруги на обмотці збудження накладного екранованого кільцевого первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу над провідною пластиною як об'єктом контролю до її магнітної проникності і електричної провідності після вимикання первинного вимірного кола з конденсатором від джерела постійної напруги

Explored to the sensitiveness of circle frequency, coefficient of fading, amplitude and initial size of transitional tension on the puttee of excitation of the superimposed screened circular primary transformer of rectangular transversal to the cut above a leading plate as control object to its permeance and electric conductivity after the shutdown of primary measurable circle with a condenser from the source of permanent tension

Постановка проблеми. Для контролю геометричних розмірів і фізико-механічних параметрів електропровідних матеріалів, виробів і деталей використовують методи і засоби електромагнітного контролю. Дослідження і розробка засобів неруйнівного контролю матеріалів і виробів імпульсним вихрострумним методом передбачають питання чутливості інформативних величин до відповідних розмірів і параметрів. У разі первинного перетворювача параметричного типу інформативною величиною часто слугує напруга на ньому після вимикання первинного вимірного кола з конденсатором від джерела постійної напруги (рис. 1), коли виникають у колі власні загасаючі коливання, які періодично повторюються під час живлення кола перетворювача імпульсами прямокутної форми (від мультівібратора). При тому актуальним є дослідження чутливості перехідної напруги на первинному перетворювачі до параметрів об'єкта контролю з метою виявлення оптимальних моментів часу для відбору і розв'язки багатопараметрової інформації. Обмежимося тут напругою на обмотці збудження.

Аналіз останніх досліджень. У літературі [1] обґрунтована форма напруги живлення і струму в обмотці збудження вихрострумного перетворювача, дана оцінка характеру комутації і визначені основні величини первинного вимірного кола для виділення корисної інформації про об'єкт контролю на збудливій і вимірювальній обмотках. У літературі [2] отриманий вираз в операторній формі для напруги на обмотці збудження накладного екранованого кільцевого первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу над провідною пластиною (об'єктом контролю) після вимикання первинного вимірного кола з конденсатором від джерела постійної напруги.

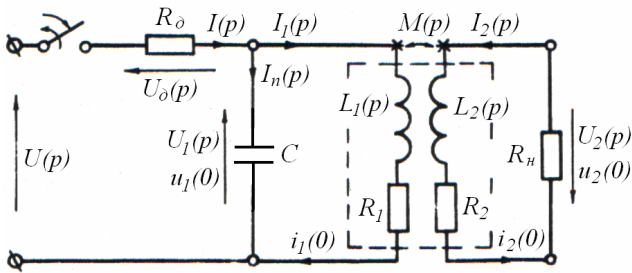


Рис. 1. Принципова схема первинного вимірювального кола вихрострумове перетворювача

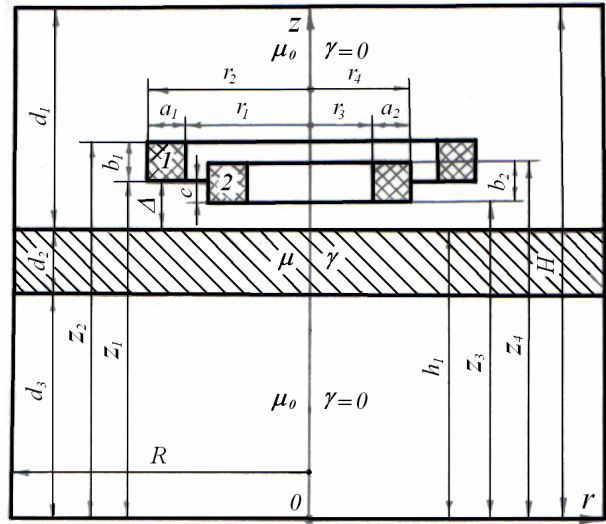


Рис. 2. Розрахункова модель накладного екранованого кільцевого первинного давача над електропровідною пластинною

Виклад основного матеріалу. Із [2] для напруги в формі перетворення за Лапласом (операторній формі) на обмотці збудження накладного екранованого кільцевого первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу над провідною пластинною (рис. 2) одержимо вираз:

$$U_1 = -I_1 Z_p + \frac{U_{1p}}{p}, \quad \text{де } I_1 = \frac{Z_{2H} U_{10} - p M U_{20}}{Z_{1p} Z_{2H} - p^2 M^2}; \quad (1)$$

$$Z_p = \frac{1}{p C_1}; \quad U_{1p} = \frac{R_1}{R_d + R_1}; \quad Z_{2H} = Z_2 + R_H; \quad Z_2 = R_2 + p L_2; \quad L_2 = L_{20} + L_{2B};$$

$$Z_{1p} = Z_1 + Z_p; \quad Z_1 = R_1 + p L_1; \quad L_1 = L_{10} + L_{1B};$$

$$L_{20} = \frac{4\pi\mu_0 W_2^2}{a_2^2 b_2^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_2^2}{\lambda_i^2 J_0^2(\lambda_i)} \left[b_2 + \frac{Y_{02} \text{ch}(p_1 z_3) - Y_{92} \text{ch}[p_1 (H - z_4)]}{p_1 \text{sh}(p_1 H)} \right];$$

$$L_{2B} = \frac{4\pi\mu_0 W_2^2 R}{a_2^2 b_2^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_2^2 Y_{02}^2 Y_1}{\lambda_i^3 J_0^2(\lambda_i) Y \text{sh}(p_1 H)};$$

$$U_{10} = U_{1p}/p + L_{1k} I_{1p} + M_k I_{2p}; \quad U_{1p} = R_1/(R_d + R_1) \quad L_{1k} = L_1|_{p=0}; \quad L_1 = L_{10} + L_{1B};$$

$$I_{1p} = 1/(R_d + R_1); \quad I_{2p} = 0; \quad U_{2p} = 0; \quad M_k = M|_{p=0}; \quad L_{2k} = L_2|_{p=0}; \quad L_2 = L_{20} + L_{2B};$$

$$L_{10} = \frac{4\pi\mu_0 W_1^2}{a_1^2 b_1^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_1^2}{\lambda_i^2 J_0^2(\lambda_i)} \left[b_1 + \frac{Y_{01} \text{ch}(p_1 z_1) - Y_{91} \text{ch}[p_1 (H - z_2)]}{p_1 \text{sh}(p_1 H)} \right];$$

$$L_{1B} = \frac{4\pi\mu_0 W_1^2 R}{a_1^2 b_1^2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_1^2 Y_{01}^2 Y_1}{\lambda_i^3 J_0^2(\lambda_i) Y \text{sh}(p_1 H)};$$

$$M = M_0 + M_B;$$

$$M_0 = \frac{4\pi\mu_0 W_1 W_2 R}{a_1 b_1 a_2 b_2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_1 S_2 \Psi_1}{\lambda_i^3 J_0^2(\lambda_i) \text{sh}(p_1 H)};$$

$$M_B = \frac{4\pi\mu_0 W_1 W_2 R}{a_1 b_1 a_2 b_2} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{S_1 S_2 Y_0 \Psi_2}{\lambda_i^3 J_0^2(\lambda_i) Y \text{sh}(p_1 H)}$$

$$U_{20} = -U_{2p}/p + L_{2k} I_{2p} + M_k I_{1p};$$

$$S_1 = \int_{r_1}^{r_2} J_1(p_1 r) r dr; \quad S_2 = \int_{r_3}^{r_4} J_1(p_1 r) r dr;$$

$$Y = \text{th}(p_2 d_2) \left[p_2^2 \text{sh}(p_1 d_1) \text{sh}(p_1 d_3) + \mu_r^2 p_1^2 \text{ch}(p_1 d_1) \text{ch}(p_1 d_3) \right] + \mu_r p_1 p_2 \text{sh}[p_1 (d_1 + d_3)];$$

$$Y_1 = \text{th}(p_2 d_2) \left[p_2^2 \text{sh}[p_1 (d_2 + d_3)] \text{sh}(p_1 d_3) - \mu_r^2 p_1^2 \text{ch}(p_1 d_3) \text{ch}[p_1 (d_2 + d_3)] \right] + \mu_r p_1 p_2 \text{sh}(p_1 d_2);$$

$$Y_{01} = \text{ch}[p_1 (H - z_2)] - \text{ch}[p_1 (H - z_1)]; \quad Y_{91} = \text{ch}(p_1 z_2) - \text{ch}(p_1 z_1);$$

$$Y_{02} = \text{ch}[p_1 (H - z_4)] - \text{ch}[p_1 (H - z_3)]; \quad Y_{92} = \text{ch}(p_1 z_4) - \text{ch}(p_1 z_3);$$

$$\Psi_1 = p_1 b_2 \text{sh}(p_1 H) + \text{ch}(p_1 z_1) [\text{ch}[p_1 (H - z_4)] - \text{ch}[p_1 (H - z_3)]] + \text{ch}[p_1 (H - z_2)] [\text{ch}(p_1 z_3) - \text{ch}(p_1 z_4)];$$

$$\Psi_2 = Y_1 [\text{ch}[p_1 (H - z_4)] - \text{ch}[p_1 (H - z_3)]];$$

$\mu = \mu_r \mu_0$; $p_1 = \lambda_i / R$; $p_2 = \sqrt{p_1^2 + p \mu \gamma}$; J_0 – функція Бесселя першого роду нульового порядку; J_1 – функція Бесселя першого роду першого порядку; λ_i – корені рівняння $J_1(\lambda) = 0$.

На рис. 2 і в поданих виразах прийняті такі позначення: μ_0 – магнітна стала; μ_r і γ – відносна магнітна проникність і питома електрична провідність пластини завтовшки d_2 ; d_1 і d_3 – товщина шару повітря над і під пластиною; r_1 і r_2 – внутрішній і зовнішній радіуси обмотки збудження; r_3 і r_4 – внутрішній і зовнішній радіуси вимірної обмотки; a_1 і b_1 – ширина і висота обмотки збудження; a_2 і b_2 – ширина і висота вимірної обмотки; z_1 і z_2 – нижня і верхня ординати обмотки збудження; z_3 і z_4 – нижня і верхня ординати вимірної обмотки; W_1 і W_2 – кількість витків обмотки збудження і вимірної обмотки; R і H – радіус і висота екрана.

На рис. 3 показані графіки операторних напруг $U_1(p)$, розрахованої за виразом (1), і $U_1'(p)$, розрахованої за виразом

$$U_1'(p) = \frac{C(p+q)}{(p+\delta)^2 + \omega^2}, \quad (2)$$

під час живлення первинного вимірного кола періодичними одиничними імпульсами прямокутної форми. Коефіцієнти C і q , колова частота ω і коефіцієнт загасання δ у виразі (2) визначаються із такої системи чотирьох рівнянь:

$$\begin{aligned} U_1(p=0) (\delta^2 + \omega^2) &= Cq; \\ U_1(p=p_{j-1}) \left[(p_{j-1} + \delta)^2 + \omega^2 \right] &= C(p_{j-1} + q); \\ U_1(p=p_j) \left[(p_j + \delta)^2 + \omega^2 \right] &= C(p_j + q); \\ U_1(p=p_{j+1}) \left[(p_{j+1} + \delta)^2 + \omega^2 \right] &= C(p_{j+1} + q), \end{aligned}$$

яка складена із умови рівності площ, обмежених кривими $U_1(p)$ і $U_1'(p)$ щодо осі p (перше рівняння), а три наступні рівняння виражають збіг обох кривих у трьох точках: p_{j-1} , p_j і p_{j+1} , причому в точці з абсцисою p_j похідна $dU_1(p)/dp$ приймає за модулем максимальне значення (на рис. 3 $j=15$). Тоді

$$u_1(t) = U_{1m} e^{-\delta t} \sin(\omega t + \beta), \quad (3)$$

де

$$A = C \sqrt{(q-\delta)^2 + \omega^2} / \omega; \quad \beta = \text{ath}[\omega / (q-\delta)]$$

Похибка від апроксимації (між $U_1(p)$ і $U'_1(p)$) не перевищує 0,15 % від максимального за модулем значення, що зрозуміло із рис. 3). Перехідна напруга на обмотці збудження давача показана на рис. 4.

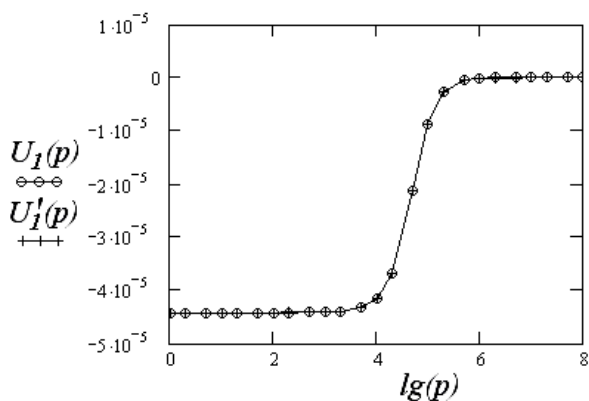


Рис. 3. Операторна напруга на обмотці збудження давача

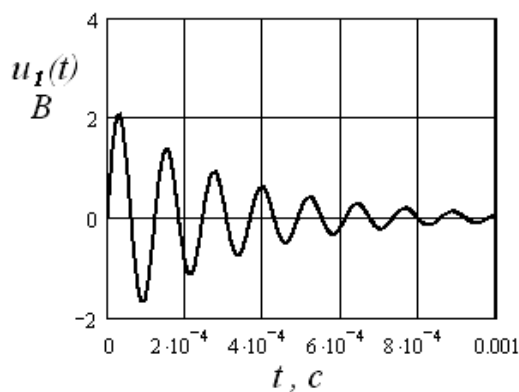


Рис. 4. Перехідна напруга на обмотці збудження давача

На рис. 5–12 зображені (у логарифмічному масштабі по осі абсцис) результати розрахунків у програмному середовищі MathCAD чутливості колової частоти, коефіцієнта загасання, амплітуди і початкової величини перехідної напруги на обмотці збудження накладного екранованого кільцевого первинного перетворювача прямокутного поперечного перерізу над провідною пластиною до її магнітної проникності і електричної провідності. Ці розрахунки виконані для таких значень параметрів і геометричних розмірів (розміри подані в м): $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м; $\mu_r = 1$; $W_1 = W_2 = 1000$; $R = 0.1$; $H = 0.1$; $d_1 = 0.05$; $d_2 = d = 0.01$; $d_3 = 0.04$; $r_1 = 0.015$; $r_2 = 0.025$; $r_3 = 0.005$; $r_4 = 0.015$; $a_1 = a_2 = b_1 = b_2 = 0.01$; $z_1 = 0.055$; $z_2 = 0.065$; $z_3 = 0.055$; $z_4 = 0.065$. Параметри елементів первинного вимірного кола (рис. 1): $R_1 = 100$ Ом; $R_d = 1000$ Ом; $R_2 = 100$ Ом; $R_H = 10000$ Ом; $C_1 = 10^{-8}$ Ф. Прийнято також, що вимірне коло живиться періодичними імпульсами напруги прямокутної форми величиною в 1 В.

Висновки. Із результатів розрахунків, зображених на рис. 5 і 6, можна зробити висновок, що залежність колової частоти власних загасаючих коливань перехідної напруги від відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності має однозначний і монотонний характер, причому зі збільшенням магнітної проникності частота спадає, а зі збільшенням електричної провідності – зростає. Тому частота загасаючих коливань може слугувати інформативною величиною під час контролю магнітної проникності і електричної провідності.

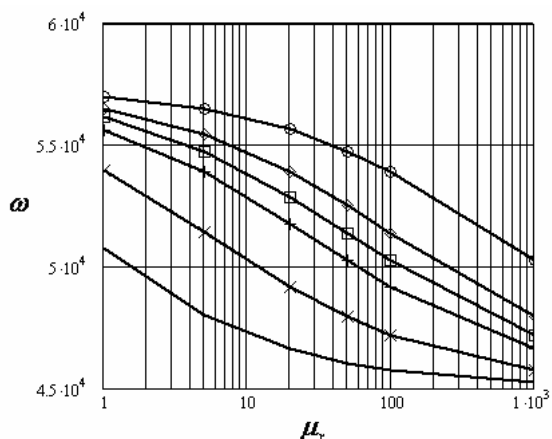


Рис. 5. Залежність частоти перехідної напруги давача від відносної магнітної проникності за різних значень питомої електричної провідності γ (МСм/м):
 — 10^5 ; $\times\times\times\times$ 10^6 ; $+++$ $5 \cdot 10^6$;
 $\square\square\square$ 10^7 ; \diamond $2 \cdot 10^7$; $\circ\circ\circ$ 10^8

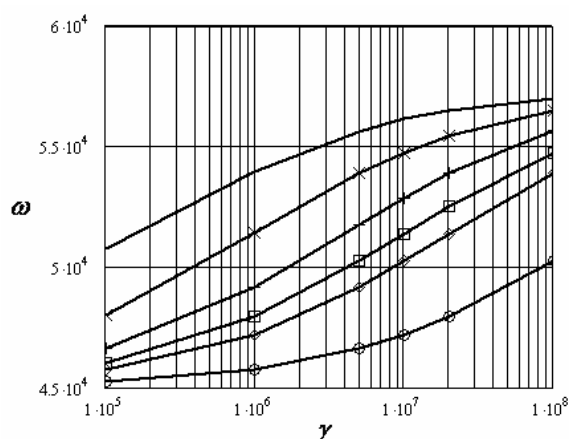


Рис. 6. Залежність частоти перехідної напруги давача від питомої електричної провідності за різних значень відносної магнітної проникності μ_r :
 — 1; $\times\times\times\times$ 5; $+++$ 20;
 $\square\square\square$ 50; \diamond 100; $\circ\circ\circ$ 1000

Коефіцієнт загасання можна використати як інформативну величину для оцінки магнітної проникності феромагнітних матеріалів і виробів (рис. 7), коли $\mu_r \geq 150$. Інформативною величиною для визначення електричної провідності феромагнітних об'єктів контролю може бути і коефіцієнт загасання (рис. 8), якщо $\gamma < 3,5 \cdot 10^5$ МСм/м.

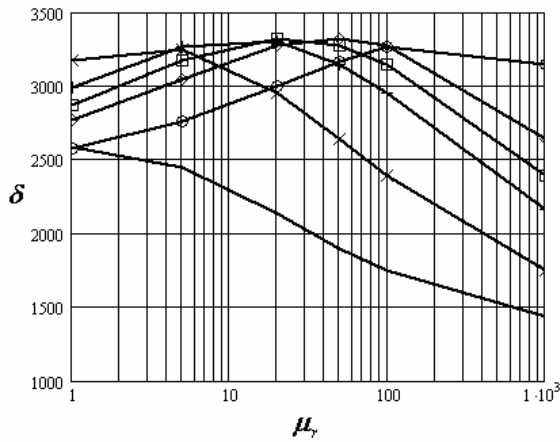


Рис. 7. Залежність коефіцієнта загасання перехідної напруги давача від відносної магнітної проникності за різних значень питомої електричної провідності γ (МСм/м):
 — 10^5 ; $\times \times \times$ 10^6 ; $+++$ $5 \cdot 10^6$;
 $\square \square \square$ 10^7 ; \diamond $2 \cdot 10^7$; $\circ \circ \circ$ 10^8

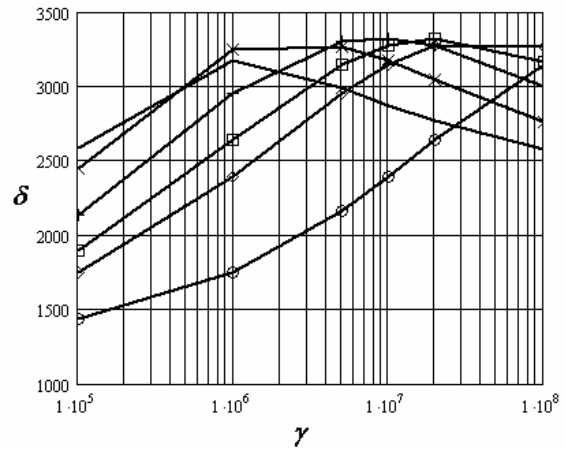


Рис. 8. Залежність коефіцієнта загасання перехідної напруги давача від питомої електричної провідності за різних значень відносної магнітної проникності μ_r :
 — 1; $\times \times \times$ 5; $+++$ 20;
 $\square \square \square$ 50; \diamond 100; $\circ \circ \circ$ 1000

Амплітуда перехідної напруги давача чутлива до магнітної проникності в області $\mu_r \leq 20$ і менш чутлива – в області $\mu_r \geq 100$, а в області $20 \leq \mu_r \leq 100$ – слабо чутлива до магнітної проникності і може використовуватися для відлаштування від неї під час контролю електричної провідності, що очевидно з рис. 9 і 10.

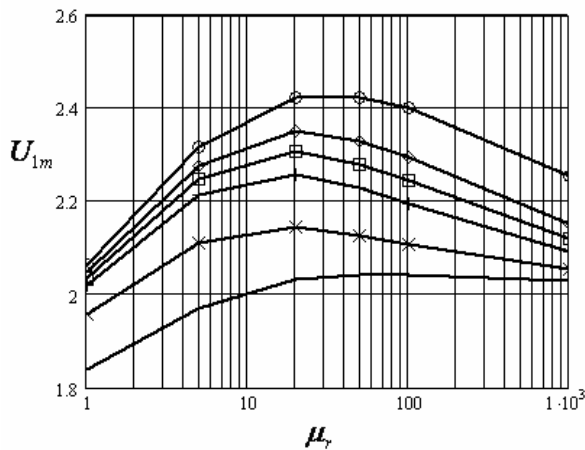


Рис. 9. Залежність амплітуди перехідної напруги давача від відносної магнітної проникності за різних значень питомої електричної провідності γ (МСм/м):
 — 10^5 ; $\times \times \times$ 10^6 ; $+++$ $5 \cdot 10^6$;
 $\square \square \square$ 10^7 ; \diamond $2 \cdot 10^7$; $\circ \circ \circ$ 10^8

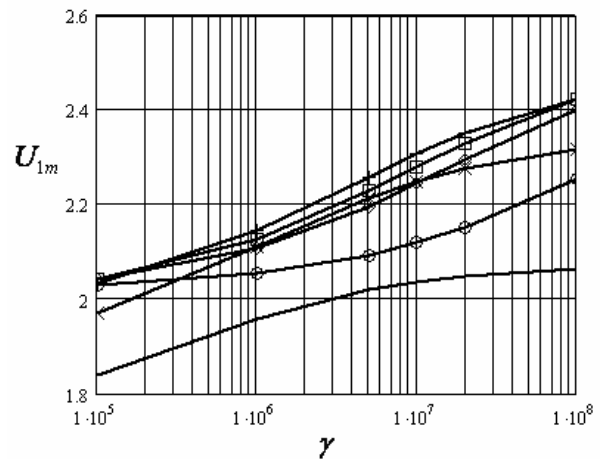


Рис. 10. Залежність амплітуди перехідної напруги давача від питомої електричної провідності за різних значень відносної магнітної проникності μ_r :
 — 1; $\times \times \times$ 5; $+++$ 20;
 $\square \square \square$ 50; \diamond 100; $\circ \circ \circ$ 1000

Початкова величина перехідної напруги давача (рис. 11 і 12) малоінформативна. Її можна використовувати тільки для наближеної оцінки величини електричної провідності неферомагнітних об'єктів контролю або магнітної проникності феромагнітних матеріалів і виробів з високими магнітними властивостями $\mu_r \geq 500$.

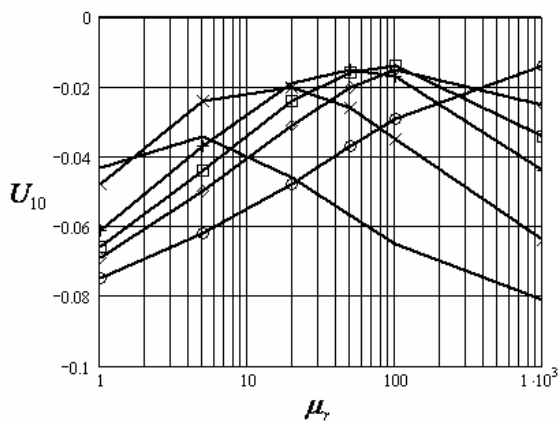


Рис. 11. Залежність початкової величини перехідної напруги давача від відносної магнітної проникності за різних значень питомої електричної провідності γ (МСм/м):
 ———— 10^5 ; $\times\times\times\times$ 10^6 ; ++++ $5 \cdot 10^6$;
 BBBB 10^7 ; $\text{—}\diamond\text{—}$ $2 \cdot 10^7$; OOOO 10^8

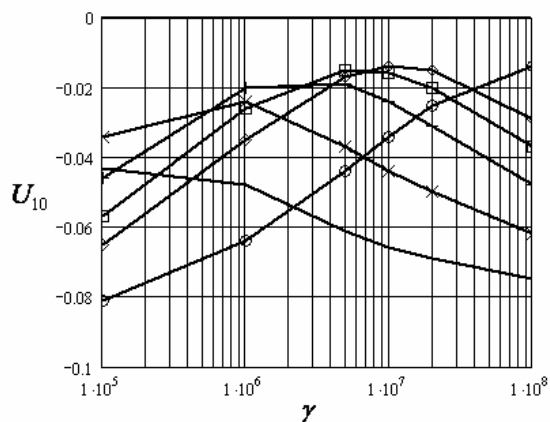


Рис. 12. Залежність початкової величини перехідної напруги давача від питомої електричної провідності за різних значень відносної магнітної проникності μ_r :
 ———— 1 ; $\times\times\times\times$ 5 ; ++++ 20 ;
 BBBB 50 ; $\text{—}\diamond\text{—}$ 100 ; OOOO 1000

1. Яцун М., Яцун А. Виділення інформації вихрострумowego перетворювача на елементах первинного вимірювального кола у перехідному режимі // Теоретична електротехніка. – 2005. – Вип. 58. – С. 183–188. 2. Яцун М.А. Разработка теории экранированных вихретоковых преобразователей и их применение для контроля труб нефтяного сортамента // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Ивано-Франковск, 1983. – 374 с.