

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА**

М.І. КИСЕЛЬОВ, В.М. ФАТЕЄВ

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової роботи
з дисципліни**

«ТЯГОВІ ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ»

*(для студентів 2, 3 курсів денної та заочної форм навчання
за напрямом підготовки 0922 (6.050702)– «Електромеханіка»)*

Тягові електричні апарати. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни (для студентів 2, 3 курсу денної та заочної форм навчання за напрямом підготовки 0922 (6.050702) – «Електромеханіка») / Укл.: М.І. Кисельов, В.М. Фатєєв. – Харків: ХНАМГ, 2010.–48с.

Укладачі: М.І.Кисельов,
В.М.Фатєєв

Рецензент: В.М.Гаряжа

Методичні вказівки затверджені на засіданні кафедри електричного транспорту, протокол №4 від 20.10.09.

Вступ

При проектуванні тягових електричних апаратів про їхню роботоздатність судять за статичною тяговою характеристикою приводного електромагніта. Необхідно прагнути до того, щоб статична тягова характеристика протягом усього ходу якоря розташовувалася вище характеристики протидіючих зусиль. Статична тягова характеристика визначається при сталій величині струму в обмотці електромагніта.

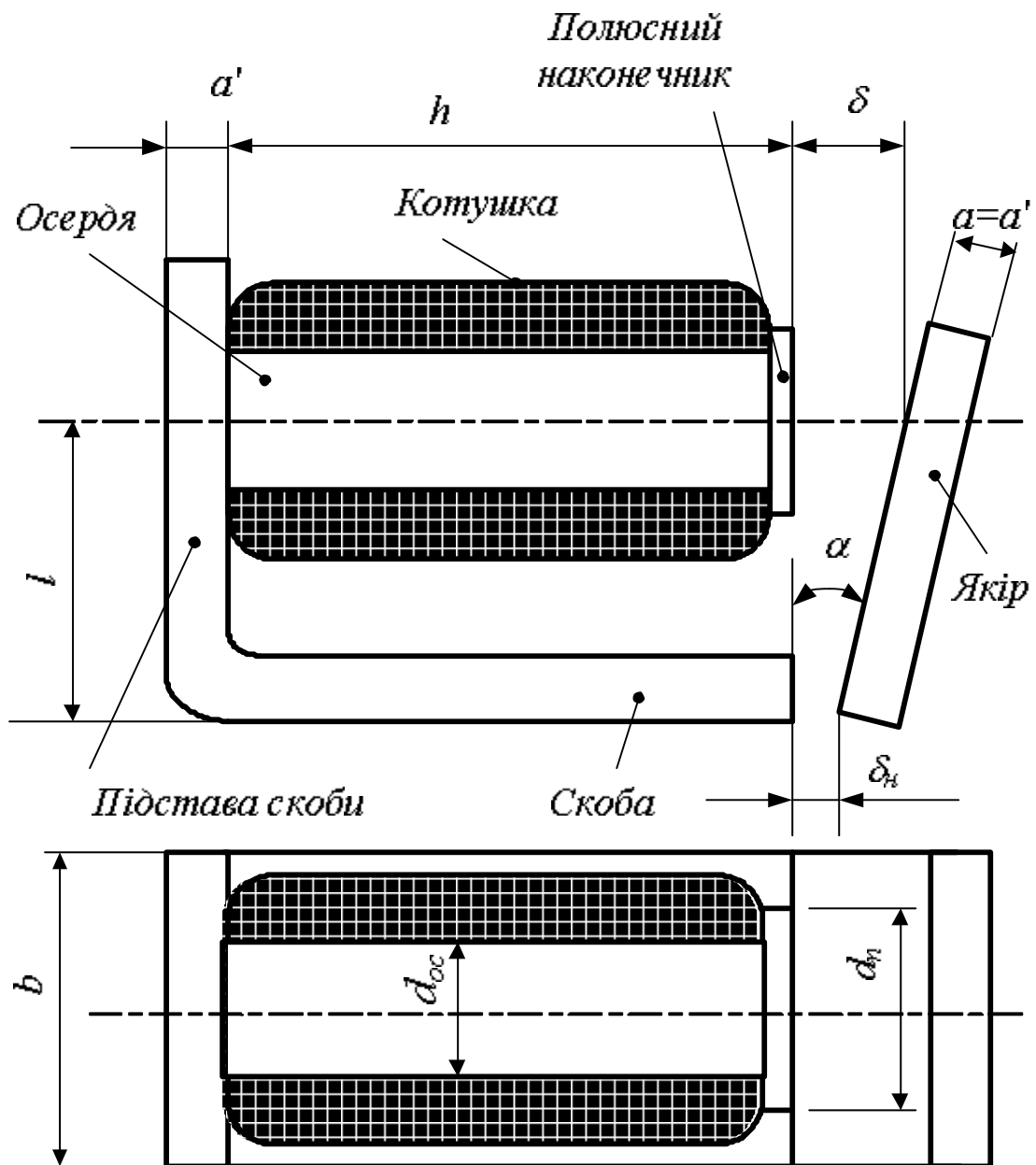
Вихідні дані для розрахунку тягової характеристики електромагніта:

- тип і конструкція тягового електричного апарата;
- матеріал і розміри магнітопроводу електромагніта;
- дані обмотки електромагніта: тип котушки (каркасна чи бескаркасна), матеріал проводу;
- напруга живлення котушки;
- робочий хід якоря електромагніта (може бути заданий максимальним кутом повороту якоря);
- намагнічуюча сила

Розрахунок електромагніта проводять графоаналітичним методом.

Основні розміри магнітопроводу приведені на рис. 1, де показаний ескіз магнітної системи і літерні позначення основних розмірів магнітопроводу. Числові значення цих розмірів (вихідні дані) вказуються у завданні на курсовий проект (роботу).

Ці методичні вказівки призначені для курсового проектування з тягових електричних апаратів клапанного типу, використовуваних на рухомому складі міського електричного транспорту і других транспортних засобах, а також на тягових підстанціях.



Де: δ —робочий зазор; δ_n —неробочий зазор

Рис. 1 - Ескіз магнітної системи й основні розміри магнітопроводу електромагніта клапанного типу.

1. Розрахунок магнітних провідностей повітряних зазорів

Розрахунок магнітного кола електромагніта клапанного типу починають з визначення магнітних провідностей повітряних зазорів (робочого G_δ і неробочого G_{δ_n}) і питомої провідності шляхів потоків розсіювання g .

У більшості випадків лінії індукції розподіляються у просторі нерівномірно. У зв'язку з цим завдання визначення провідності повітряних зазорів ускладнюється. Магнітне поле між полюсами можна розглядати, так немовби воно складається з двох частин: однорідного поля і поля, обумовленого витріщанням ліній індукції. Цей потік називається крайовим потоком.

У практичних розрахунках застосовують кілька методів визначення провідності. У цьому курсовому проекті використаний емпіричний, аналітичний і метод розбивки поля на прості фігури.

1.1 Розрахунок магнітної провідності робочого повітряного зазору і її похідної

Для визначення падіння магнітного потенціалу в робочому повітряному зазорі необхідно обчислити магнітну провідність цього зазору при декількох положеннях якоря. Рекомендується задатися наступними значеннями повітряних зазорів: $\delta = 1, 2, 4, 8, 12$ і максимальне значення зазора в міліметрах. Максимальне значення зазора визначають згідно з рис. 1:

$$\delta_{\max} = l * \operatorname{tg} \alpha,$$

де α - максимальний кут повороту якоря електромагніта.

Провідність у даному випадку зручно знаходити за емпіричною формулою, запропонованою В.В.Вишнівським:

$$G_{\delta} = \mu_0 * \frac{d_n^2}{0,00233 * d_n + 1,068 * \delta}, \quad (1)$$

де $\mu_0 = 1,25 * 10^{-6}$ Гн/м - магнітна проникність повітря;

δ - величина повітряного зазору, м;

d_n - діаметр полюсного наконечника, м.

Після диференціювання формули В.В. Вишніовського:

$$\frac{dG_{\delta}}{d\delta} = -\mu_0 * \frac{1,068 * d_n^2}{(0,00233 * d_n + 1,068 * \delta)^2}, \quad (2)$$

для тих же значень повітряного зазору знаходимо похідну.

1.2 Визначення магнітної провідності шляхів потоків розсіювання

При розрахунку магнітних систем клапанного типу можна з достатнім ступенем точності обмежитися обліком потоків розсіювання між осердям і скобою, як найбільш істотних. Магнітні провідності для потоків розсіювання можна вважати постійними і незалежними від положення якоря.

Поверхні скоби і осердя не є еквипотенційні, тому в даному випадку при визначенні магнітної провідності шляхів потоків розсіювання зручно користуватися провідністю на одиницю довжини осердя - питомою провідністю. Тоді повна провідність на ділянці довжиною X буде

$$G_{\sigma} = g * X, \quad (3)$$

де: g - питома провідність, Гн/м;

X - довжина ділянки, м;

G_{σ} - повна провідність, Гн.

Питома провідність шляхів потоків розсіювання між осердям циліндричної форми і паралельно розташованою вертикальною площиною скоби (рис. 1) можна знайти за рівнянням

$$g = \mu_0 * \frac{2 * \pi}{\ln \frac{c + \sqrt{c^2 - r^2}}{r}}, \quad (4)$$

де r - радіус осердя, м;

c – відстань між віссю осердя і скобою

$$r = d_c / 2; \quad c = l - a.$$

При розрахунку магнітне коло треба розбити на чотири рівних ділянки, звідки довжина кожної ділянки X :

$$X = h / 4.$$

1.3 Визначення магнітної провідності неробочого повітряного зазору

Магнітну провідність неробочого повітряного зазору між якорем і скобою у проекті визначають методом розбивки поля на прості фігури, зробивши при цьому два допущення:

- провідність при переміщенні якоря не змінюється;
- площини торця скоби і якоря рівнобіжні.

Сутність цього методу полягає в тому, що все поле повітряного зазору розбивається на ряд трубок магнітного потоку, які мають форму простих геометричних фігур (циліндрів, напівциліндрів, паралелепіпедів і т.д.)

Провідність елементарної трубки потоку пропорційна відношенню середнього перерізу трубки S_{cp} і її довжини l_{cp}

$$G_i = \mu_0 * \frac{S_{cp}}{l_{cp}} . \quad (5)$$

Якщо середнє значення визначити важко, то провідність такої фігури знаходять за формулою

$$G_i = \mu_0 * \frac{V_i}{l_{cp}^2} , \quad (6)$$

де V_i - обсяг i -тої фігури.

Загальна провідність зазору дорівнює сумі провідностей окремих фігур, тому що прикладену до кінців різницю магнітних потенціалів для усіх фігур можна вважати однаковою (фігури з'єднані паралельно).

Для визначення магнітної провідності неробочого повітряного зазору знаходимо величину неробочого зазору за формулою

$$\delta_n = \frac{a}{2} * tg \alpha$$

і потім після розбивки поля на прості фігури (рис. 2) визначаємо їхню провідність. Формули провідності окремих фігур мають такий вигляд:

$$G_1 = \mu_0 * \frac{a * b}{\delta_{H'}}; G_2 = \mu_0 * \frac{2 * a}{\pi * ((\delta_{H'}/a) + 1)}; G_{2'} = \mu_0 * \frac{2 * b}{\pi * ((\delta_{H'}/a) + 1)};$$

$$G_3 = \mu_0 * 0,26 * a; G_{3'} = \mu_0 * 0,26 * b; G_4 = \mu_0 * \frac{2 * b}{\pi * ((\delta_{H'}/a) + 0,5)};$$

$$G_5 = \mu_0 * 0,52 * b; G_6 = G_{6'} = \mu_0 * 0,25 * a; G_7 = \mu_0 * 0,077 * \delta_{H'}$$

Підставляючи значення величин, що входять у ці формули, відповідно до завдання, знаходимо провідності окремих фігур і повну провідність неробочого повітряного зазору:

$$G_{\delta} = G_1 + 2 * G_2 + G_{2'} + 2 * G_3 + G_{3'} + G_4 + G_5 + 4 * G_6$$

Провідність G_7 незначна і нею можна знехтувати.

Приклад: визначити магнітну провідність неробочого повітряного зазору при $\delta_{H'} = 0,85$ мм, $a = 80$ мм методом розбивки на прості фігури за приведеними вище формулами

$$G_1 = 1,25 * 10^{-6} * ((5,6 * 80) * 1 * 10^{-6}) / 0,85 * 10^{-3} = 0,660 * 10^{-6} \text{ Гн};$$

$$G_2 = (1,25 * 10^{-6} * 2 * 5,6 * 10^{-3}) / (3,14 * (0,85/5,6 + 1)) = 0,39 * 10^{-8} \text{ Гн};$$

$$G_{2'} = (1,25 * 10^{-6} * 2 * 80 * 10^{-3}) / (3,14 * (0,85/5,6 + 1)) = 0,555 * 10^{-7} \text{ Гн}$$

$$G_3 = 1,25 * 10^{-6} * 0,26 * 5,6 * 10^{-3} = 0,18 * 10^{-8} \text{ Гн};$$

$$G_{3'} = 1,25 * 10^{-6} * 0,26 * 80 * 10^{-3} = 0,26 * 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$G_4 = (1,25 * 10^{-6} * 2 * 80 * 10^{-3}) / (3,14 * (0,85/5,6 + 0,5)) = 0,1 * 10^{-6};$$

$$G_5 = 1,25 * 10^{-6} * 0,52 * 80 * 10^{-3} = 0,52 * 10^{-7} \text{ Гн};$$

$$G_6 = 1,25 * 10^{-6} * 5,6 * 10^{-3} * 0,25 = 0,18 * 10^{-8};$$

$$G_7 = 1,25 * 10^{-6} * 0,077 * 0,85 * 10^{-3} = 0,8 * 10^{-10};$$

Повна провідність дорівнює:

$$G_{\delta H'} = (0,66 + 2 * 0,0039 + 0,0555 + 2 * 0,0018 + 0,026 + 0,1 + 0,052 + 4 * 0,0018) = 0,983 * 10^{-6} \text{ Гн}$$

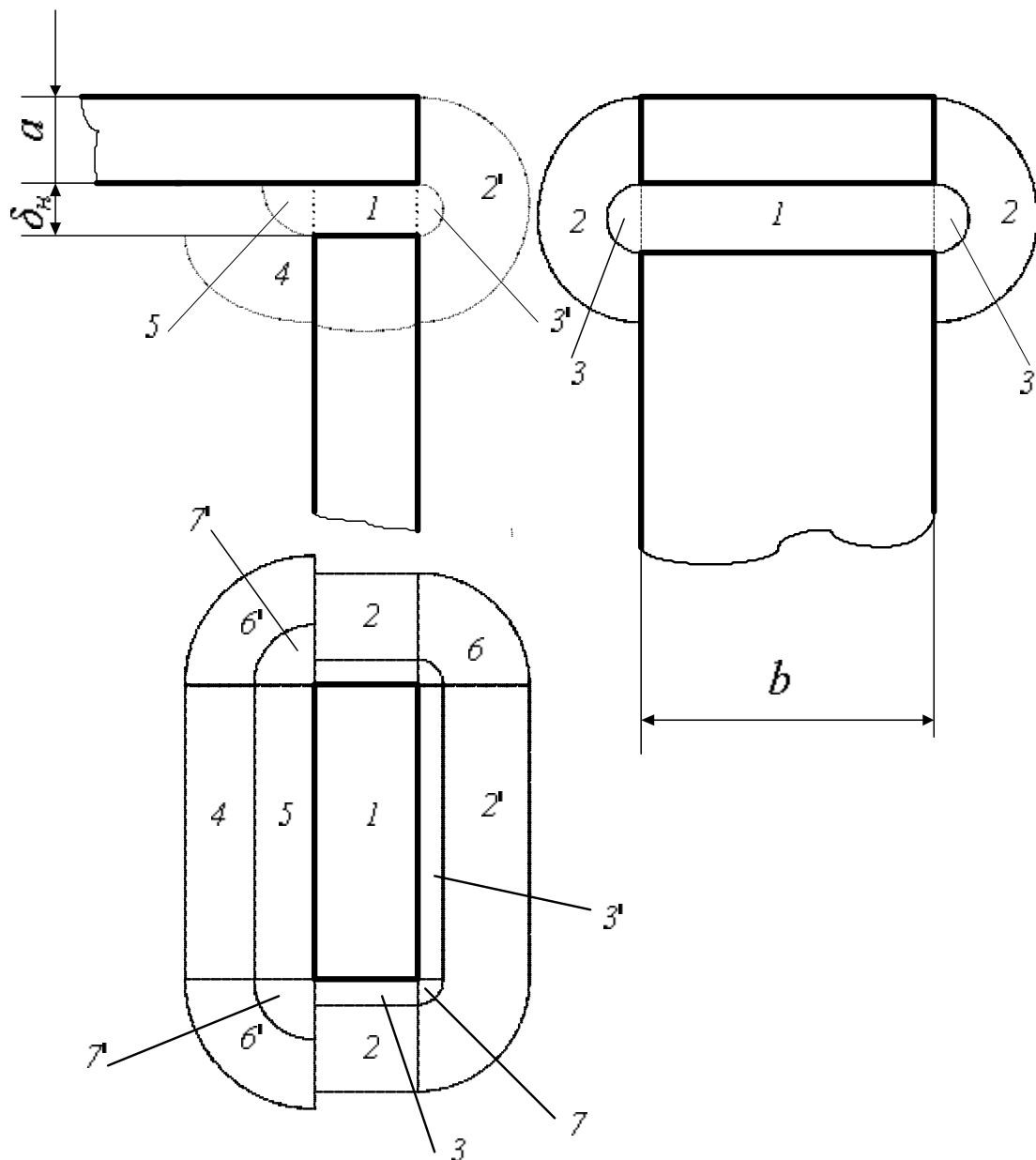


Рис. 2 - Магнітне поле між якорем і скобою:

- 1- прямокутний паралелепіпед розмірами $a \cdot b \cdot \delta_n$;
- 2- половина порожнього циліндра довжиною a , внутрішній діаметр δ_n , зовнішній діаметр $\delta_n + 2 \cdot a$;
- 2'- половина порожнього циліндра довжиною b , внутрішній діаметр δ_n і зовнішній діаметр $\delta_n + 2 \cdot a$;
- 3- половина циліндра довжиною a і діаметром δ_n ;
- 3'- половина циліндра довжиною b і діаметром δ_n ;
- 4- чверть порожнього циліндра довжиною b із внутрішнім радіусом δ_n , зовнішнім $\delta_n + a$;
- 5- чверть циліндра довжиною b і радіусом δ_n ;
- 6- чверть кульової оболонки діаметром $\delta_n + 2 \cdot a$;
- 6'- чверть кульової оболонки діаметром $2 \cdot (\delta_n + a)$;
- 7- чверть кулі діаметром δ_n ;
- 7'- чверть кулі діаметром $2 \cdot \delta_n$.

2. Складання схеми заміщення магнітного кола

При розрахунку складних розгалужених магнітопроводов для зручності визначення необхідних співвідношень (між цікавлячими нас величинами) складають схему заміщення магнітного кола, причому зображують її аналогічно електричній схемі. У схемі заміщення умовно показують магнітні опори робочих і неробочих повітряних зазорів, шляхів потоків розсіювання магнітопроводу.

Для розрахунку все магнітне коло розбивають на рівні ділянки (рис. 3). У нас магнітне коло розбито на чотири ділянки. При збільшенні числа ділянок зростає точність розрахунків, але підвищується трудомісткість ручного розрахунку. Магнітний потік у кожній ділянці приймають постійним. Розподілену провідність шляхів потоків розсіювання і намагнічуючу силу котушки, заміняють декількома зосередженими провідностями і силами, що намагнічують. На підставі сказаного відповідно до рис. 3,а будемо схему заміщення магнітного кола (рис. 3,б). На рис. 3,б використані такі позначення:

R_{δ} - магнітний опір робочого повітряного зазору;

$R_{я}$ - магнітний опір якоря;

R_{δ_i} - магнітний опір неробочого повітряного зазору;

$(G_{\sigma l} \div G_{\sigma a})$ - магнітні провідності шляхів потоків розсіювання;

R_{c1}, R_{c2} - нелінійні магнітні опори ділянок магнітопроводу;

$F'_{1} \div F'_{4}$ - намагнічуючі сили котушки на окремих ділянках магнітного кола, причому

$$F'_{1} = F'_{2} = F'_{3} = F'_{4} = (I * W) / 4. \quad (7)$$

У схемі заміщення (рис. 3,б) нелінійні магнітні опори магнітопроводу з'єднані попарно, послідовно, тому можна спростити схему заміщення і привести до вигляду, показаного на рис. 4. Тоді опори $R_1 \div R_4$ на рис. 4 відповідно дорівнюють:

$$R_1 = R_{c1} + R_{ck1} + R_{ck0};$$

$$R_2 = R_{c2} + R_{ck2};$$

$$R_3 = R_{c3} + R_{ck3} ;$$

$$R_4 = R_{c4} + R_{ck4} ,$$

де R_{ci} - магнітні опори ділянки осердя;

R_{cki} - магнітні опори ділянки скоби;

R_{ck0} - магнітні опори підстави скоби.

Геометричні розміри осердя і скоби на всіх ділянках однакові, але через нелінійність їхні магнітні опори різні. Аналогічні міркування стосуються скоби. Це впливає з того, що магнітні потоки на ділянках відрізняються один від одного через наявність потоків розсіювання, так:

$$R_{c1} \neq R_{c2} \neq R_{c3} \neq R_{c4}.$$

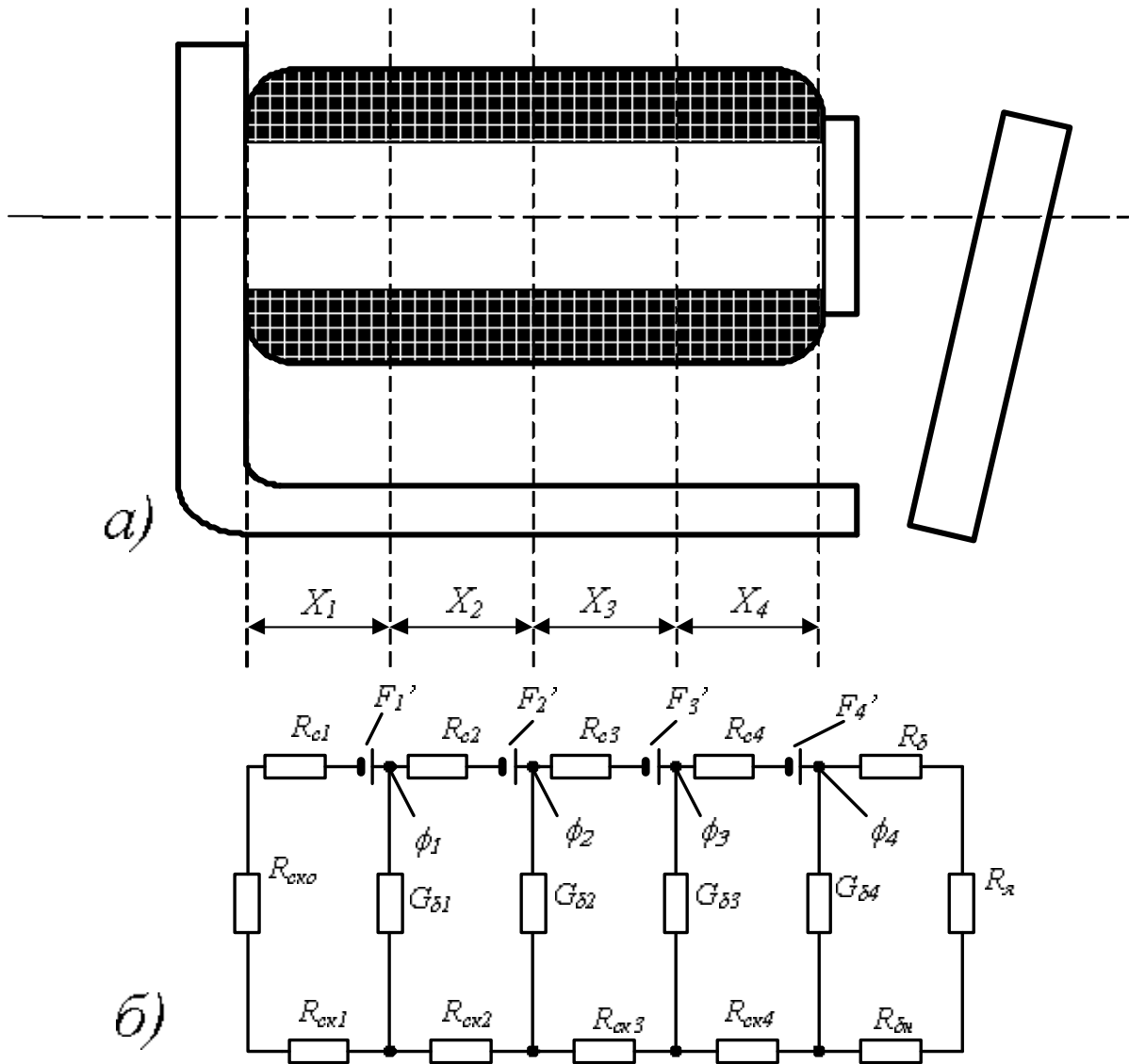


Рис. 3 – Схема заміщення магнітного кола

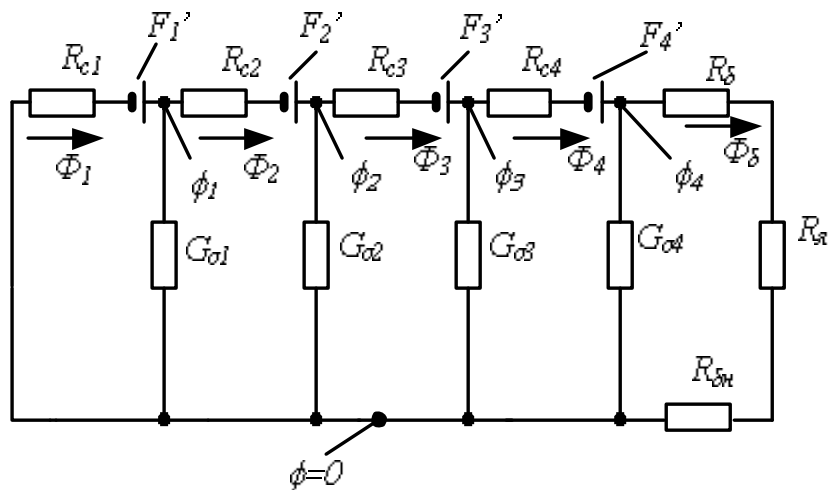


Рис. 4 – Спрощена схема заміщення магнітного кола

3. Побудова вебер-амперних характеристик ділянок магнітного кола

Вебер-амперна характеристика являє собою залежність магнітного потоку на ділянці магнітного кола від падіння магнітного потенціалу на ньому $\Phi(F)$. Вона відіграє таку ж важливу роль при розрахунку магнітних колів, як вольт-амперна характеристика нелінійних опорів при розрахунку електричних кіл.

Побудову вебер-амперних характеристик кожної ділянки роблять за допомогою основних кривих намагнічування феромагнітних матеріалів.

3.1 Побудова вебер-амперних характеристик 1, 2, 3, 4 -го ділянок магнітного кола

Порядок побудови такий:

1. Визначають площі перерізу осердя і скоби у квадратних метрах:

$$S_c = \frac{\pi * d_c^2}{4} ; S_{ск} = a * b.$$

2. Знаходять довжину ділянки в сантиметрах (оскільки напруженість магнітного поля на основній кривій намагнічування задана в А/см):

$$X = h / 4. \quad (8)$$

3. Задаються поруч значень магнітної індукції B у найменшому перерізі . Нехай $S_c < S_{ск}$. Тоді для електротехнічної сталі, крива намагнічування якої приведена в додатку на рис. Д11 і рис. Д12, значення індукції в осерді доцільно вибирати такі: 0; 0,4; 0,8; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0 Тл. Для інших марок сталей при інших значеннях індукції насичення ці значення можуть бути іншими. Найбільше значення магнітної індукції вибирають близьким до індукції насичення. Марку сталі вказують у завданні на курсовий проект, а основні криві намагнічування для них наведені в додатку цих методичних вказівок.

4. За основними кривими намагнічування для всіх обраних значень індукції B_{ci} знаходять напруженість магнітного поля H_{ci} і падіння магнітного потенціалу на ділянці осердя:

$$F_{ci} = H_{ci} * X. \quad (9)$$

5. Визначають магнітний потік в осерді (такий же потік буде й у скобі , оскільки потік на всій ділянці постійний). Для всіх обраних значень індукції

$$\Phi_i = \Phi_{ci} = \Phi_{cki} = B_{ci} * S_c. \quad (10)$$

6. Знаходять магнітну індукцію у скобі для всіх отриманих значень потоку

$$B_{cki} = \Phi_i / S_{ск}. \quad (11)$$

При такій послідовності операцій $B_{ск}$ може перевершити індукцію насичення для великих значень B_c , якби $S_{ск}$ було менше S_c . Тому треба задаватися індукцією в **найменшому** перерізі.

7. За основною кривою намагнічування для всіх отриманих значень B_{cki} знаходять напруженість магнітного поля H_{cki} і падіння магнітного потенціалу на ділянці скоби

$$F_{cki} = H_{cki} * X. \quad (12)$$

8. Тому що геометричні розміри осердя і скоби на всіх ділянках однакові, то для тих самих потоків можна записати:

$$F_{2i} = F_{3i} = F_{4i} = F_{ci} + F_{cki} . \quad (13)$$

Падіння магнітного потенціалу на першій ділянці

$$F_{li} = F_{ci} + F_{cki} + F_{ck0}, \quad (14)$$

де $F_{ck0} = H_{cki} * (l - a/2)$ - падіння магнітного потенціалу в підставі скоби.

Результати розрахунків зводимо в табл. 1

За даними табл. 1 будемо вебер-амперні характеристики ідентичні кривим $F_i(\Phi)$:

$$F_i(\Phi) = F_c(\Phi) + F_{ck}(\Phi). \quad (15)$$

Остання $F_i(\Phi)$ являє собою вебер-амперну характеристику другої, третьої і четвертої ділянок. Криві будують на міліметровому папері формату А3 (рис. 7).

Таблиця 1

B_{ci} , Тл							
H_{ci} , А/см							
F_{ci} , А							
Φ_i , Вб							
B_{cki} , Тл							
H_{cki} , А/см							
F_{cki} , А							
$F_{ci} + F_{cki}$, А							
F_{ck0} , А							
F_{li} , А							

Послідовність по вертикалі величин (табл. 1) буде іншою, якщо $S_{ck} < S_c$. У цьому випадку, мабуть, необхідно 1,2,3-го рядка поміняти місцями з 5,6 і 7 рядками відповідно.

3.2 Побудова вебер-амперної характеристики шляхів потоків розсіювання

Магнітна провідність для потоків розсіювання залежить від геометричних розмірів магнітної системи і не залежить від потоку, тому вебер - амперна характеристика шляхів потоків розсіювання зобразиться прямою лінією, що

проходить через початок координат. Для її побудови досить знайти ще одну точку цієї прямої.

Задаємося будь-яким значенням різниці магнітних потенціалів “ $\varphi - \varphi_0$ ”, наприклад 1000 А, і знаходимо потік, приймаючи $\varphi_0 = 0$ (рис. 7). Одержуємо

$$\Phi = \varphi * G_{\sigma} \quad (16)$$

Прямую $\varphi(\Phi_{\sigma})$ проводимо на тому же графіку, що і $F_1(\Phi)$, $F_i(\Phi)$ (рис. 7).

Отримана характеристика $\varphi(\Phi_{\sigma})$ справедлива для всіх ділянок. Це впливає з того, що магнітне коло розбивали на рівні ділянки і, мабуть,

$$G_{\sigma 1} = G_{\sigma 2} = G_{\sigma 3} = G_{\sigma 4} = g * X. \quad (17)$$

3.3 Побудова вебер-амперної характеристики якоря і неробочого повітряного зазору

Магнітна провідність неробочого повітряного зазору вважається незмінною при всіх положеннях якоря. У цьому випадку можна побудувати результуючу вебер-амперну характеристику для якоря і неробочого повітряного зазору. У загальному випадку, коли провідність неробочого повітряного зазору змінна, варто будувати результуючу вебер-амперну характеристику робочого і неробочого повітряного зазорів.

Для побудови характеристики використовуємо попередні розрахунки. Оскільки переріз якоря і скоби, а також середню довжину силової лінії в якорі і підставі скоби можна вважати однаковими, то падіння магнітних потенціалів у них при тих самих потоках будуть рівні. Звідки випливає, що результати обчислень Φ_i і $F_{\sigma k 0}$ (табл. 1) можна перенести в табл.2, але падінню магнітного потенціалу в підставі скоби додати інший індекс $F_{я}$.

Таблиця 2

Φ_i , Вб							
$F_{я}$, А							
$F_{\delta i}$, А							
$F_{я} + F_{\delta i}$, А							

Падіння магнітного потенціалу в неробочому повітряному зазорі для різних значень потоків визначаємо за формулою

$$F_{\delta_H} = \Phi_i / G_{\delta_H} \quad (18)$$

Магнітна провідність неробочого зазору G_{δ_H} була знайдена раніше. За даними табл. 2 будемо вебер-амперну характеристику на окремому аркуші міліметрового папера (рис. 5).

$\Phi * 10^{-4}$,
Вб

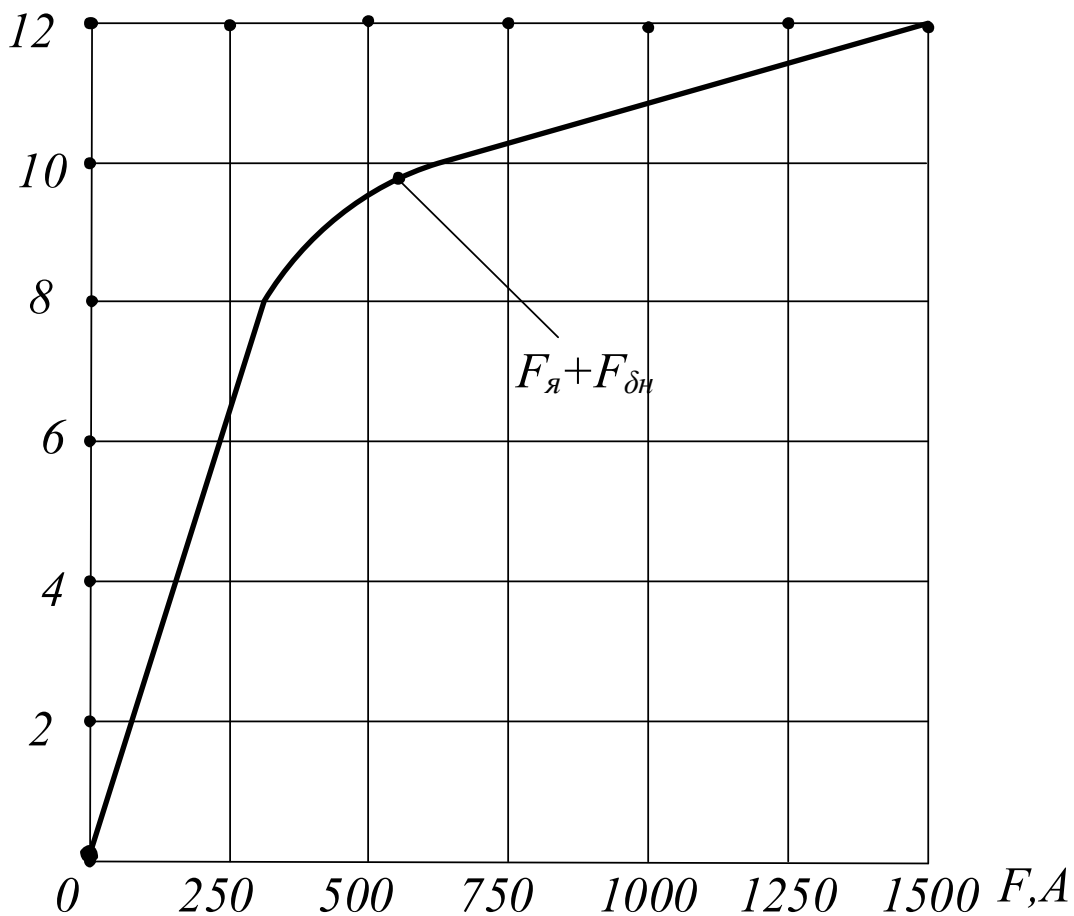


Рис. 5—Вебер-амперна характеристика неробочого повітряного зазору.

Приклад: Побудувати вебер-амперну характеристику для ділянки магнітного кола, приведеного на рис. 6,а. Нехай $X_1 = X_2 = 3$ см; $S_1 = 0,7 * 10^{-3}$ м²; $S_2 = 1,1 * 10^{-3}$ м². Магнітопровід виконаний з сталі марки (рис. Д11 і рис. Д12) і $\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi$.

Задаємося магнітною індукцією в перерізі S_1 (тому що $S_1 < S_2$), $B_1 = 0,4$ Тл.

За основною кривою намагнічування сталі (див. додаток) знаходимо, що індукції $B_1 = 0,4$ Тл відповідає напруженість магнітного поля $H_1 = 220$ А/м.

Визначаємо падіння магнітного потенціалу за формулою

$$F_1 = H_1 * X_1 = 220 * 0,03 = 6,6 \text{ А і знаходимо магнітний потік:}$$

$$\Phi_1 = B_1 * S_1 = 0,4 * 0,7 * 10^{-3} = 0,28 * 10^{-3} \text{ Вб.}$$

При даному потоці визначаємо магнітну індукцію в перерізі S_2 :

$$B_2 = \Phi / S_2 = 0,28 * 10^{-3} / 1,1 * 10^{-3} = 0,25 \text{ Тл.}$$

За основною кривою намагнічування встановлюємо, що індукції $B_2 = 0,25$ Тл відповідає напруженість магнітного поля $H_2 = 180$ А/м.

Визначаємо падіння магнітного потенціалу F_2 за рівнянням :

$$F_2 = H_2 * X_2 = 180 * 0,03 = 5,4 \text{ А.}$$

Падіння магнітного потенціалу на всій ділянці

$$F = F_1 + F_2 = 6,6 + 5,4 = 12,0 \text{ А.}$$

При інших значеннях магнітної індукції в перерізі S_1 розрахунок робимо аналогічно. Результати розрахунку зводимо в табл. 3.

Таблиця 3

B_1 , Тл	0,4	0,8	1,2	1,4	1,6	1,82	2,0
H_1 , А/см	2,2	4,0	7,7	15	34	80	170
F_1 , А	6,6	12	23	45	102	240	510
$\Phi * 10^{-4}$, Вб	2,8	5,6	8,4	9,8	11,2	12,6	14
B_2 , Тл	0,25	0,73	1,1	1,3	1,5	1,6	1,8
H_2 , А/см	1,8	3,6	6,5	10	24	34	80
F_2 , А	5,4	10,8	19,5	38	72	102	240
$F_1 + F_2$, А	12	22,8	42,6	75	171	342	750

За результатами табл. 3 на рис. 6,б побудована вебер-амперна характеристика заданої ділянки магнітопровода.

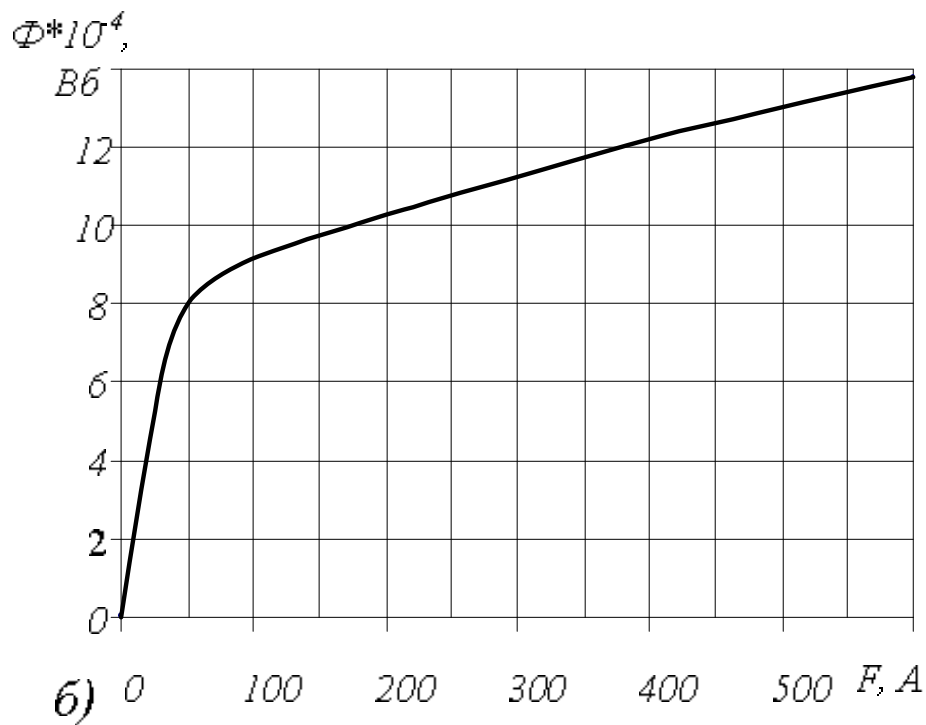
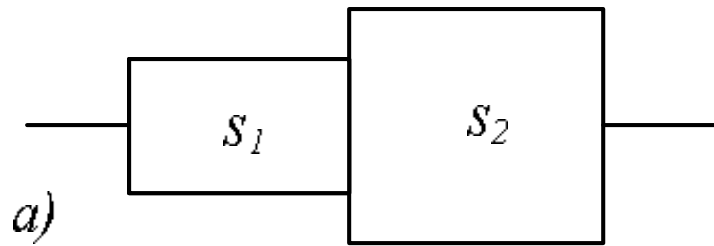


Рис. – б а – магнітопровід ; б – Вебер-амперна характеристика ділянки магнітного кола.

4. Розрахунок магнітного кола

Розрахунок магнітного кола при заданих геометричних розмірах магнітопровода зводиться до визначення сили котушки, що намагнічує, якщо відомий магнітний потік у робочому повітряному зазорі (пряма задача), або до обчислення магнітного потоку в робочому зазорі при заданій силі, що намагнічує (зворотна задача).

Для побудови тягової характеристики необхідно знати падіння магнітного потенціалу в робочому повітряному зазорі при декількох положеннях якоря. Тому в курсовому проекті використовується графічний метод розрахунку

магнітних колів, що дозволяє одержати необхідні дані.

Застосовуючи другий і перший закони Кирхгофа для кожної ділянки магнітного кола (рис. 4), запишемо такі рівняння:

$$\varphi_1(\Phi_1) = F'_1(\Phi_1) - F_1(\Phi_1); \quad (19)$$

$$\Phi_2(\varphi_1) = \Phi_1(\varphi_1) - \Phi_{\sigma 1}(\varphi_1); \quad (20)$$

$$\varphi_2(\Phi_2) = \varphi_1(\Phi_2) + F'_2(\Phi_2) - F_2(\Phi_2); \quad (21)$$

$$\Phi_3(\varphi_2) = \Phi_2(\varphi_2) - \Phi_{\sigma 2}(\varphi_2); \quad (22)$$

$$\varphi_3(\Phi_3) = \varphi_2(\Phi_3) + F'_3(\Phi_3) - F_3(\Phi_3); \quad (23)$$

$$\Phi_4(\varphi_3) = \Phi_3(\varphi_3) - \Phi_{\sigma 3}(\varphi_3); \quad (24)$$

$$\varphi_4(\Phi_4) = \varphi_3(\Phi_4) + F'_4(\Phi_4) - F_4(\Phi_4) \quad ; \quad (25)$$

$$\Phi_5(\varphi_4) = \Phi_4(\varphi_4) - \Phi_{\sigma 4}(\varphi_4). \quad (26)$$

Внаслідок того, що залежності $F_1(\Phi_1)$, $F_2(\Phi_2)$, $F_3(\Phi_3)$ і $F_4(\Phi_4)$ нелінійні, розрахункові операції, виражені цими рівняннями, виконуємо графічно.

Залежність $F_1(\Phi_1)$, що входить у рівняння (19), являє собою вебер – амперну характеристику першої ділянки (рис. 7). На цьому ж графіку нанесена частина сили котушки, що намагнічує, $F'_1(\Phi_1)$, яка припадає на першу ділянку магнітного кола. Тому що сила котушки, що намагнічує, $F=I*W$ не залежить від потоку, то характеристика $F'_1(\Phi_1)$ зобразиться прямій, рівнобіжній осі ординат. Дія, що виражається рівнянням (19) першої ділянки схеми заміщення, зводиться до вирахування абсцис характеристики $F_1(\Phi_1)$ з абсцис характеристики $F'_1(\Phi_1)$ (рис. 7). Отримана крива, що виражає залежність $\varphi_1(\Phi_1)$, ідентична кривій $\Phi_1(\varphi_1)$. Тоді дія, що відповідає рівнянню (20), зводиться до вирахування ординат прямої $\Phi_{\sigma 1}(\varphi_1)$ з відповідних ординат кривої $\Phi_1(\varphi_1)$. Отриману криву зміни потоку Φ_2 у функції від потенціалу φ_1 тепер можна розглядати як функцію $\varphi_1(\Phi_2)$.

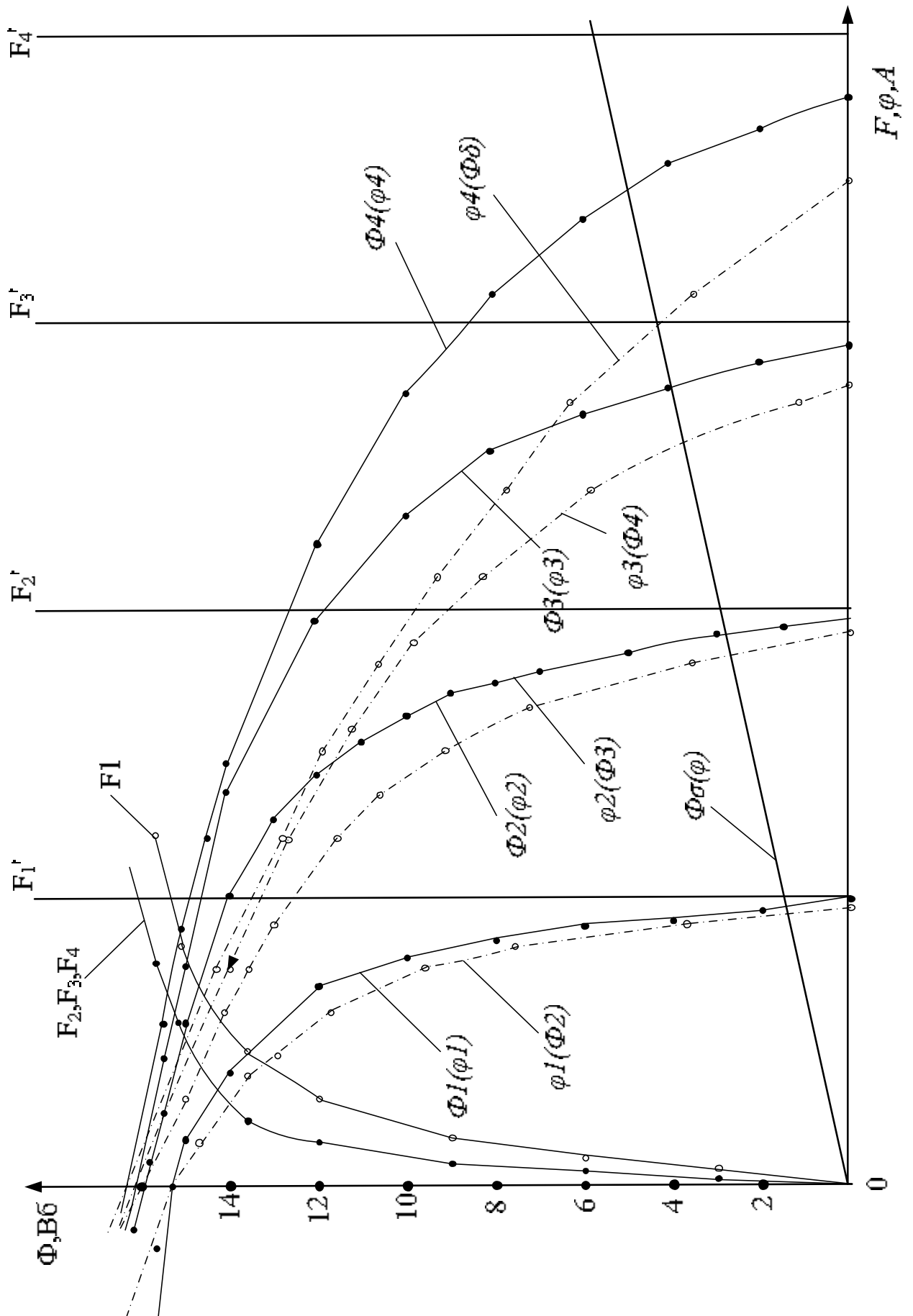


Рис. 7 – Розрахунок магнітного кола графічним методом

Розглянемо розрахунки, що відносяться до другої ділянки схеми заміщення (рис. 4). Для зручності виконання операцій над графіками характеристик наносимо пряму, рівнобіжну осі ординат і віддалену від її на відстані $F'_1 + F'_2$. Побудови, що відповідають зазначеним у рівнянні (21) діям, зображені на рис. 7. Криву залежності потенціалу φ_2 тепер можна розглядати як функцію $\Phi_2(\varphi_2)$. Залежність магнітного потоку Φ_3 від потенціалу φ_2 знаходимо графічним вирішенням рівняння (22). Для цього з ординат кривої $\Phi_2(\varphi_2)$ необхідно відняти ординати прямої $\Phi_{\infty}(\varphi_2)$.

Дії, що виражаються рівняннями (23) ÷ (26), виконуємо аналогічно. Графічні побудови здійснюємо на одному графіку. У цьому випадку відпадає необхідність у повторній побудові тих самих кривих. У результаті одержуємо криву залежності $\Phi_{\delta}(\varphi_4)$, яку переносимо на рис. 8, де побудована характеристика:

$$F_{\Sigma}(\Phi_{\delta}) = F_{я}(\Phi_{\delta}) + F_{\delta i}(\Phi_{\delta}). \quad (27)$$

5. Побудова тягової характеристики

Для визначення падіння магнітного потенціалу в робочому повітряному зазорі при декількох положеннях якоря треба побудувати вебер-амперну характеристику цього зазору. Застосовуючи другий закон Кірхгофа до останнього контуру схеми заміщення магнітного кола (рис. 4), запишемо

$$F_{\delta}(\Phi_{\delta}) = \varphi_4(\Phi_{\delta}) - F_{\Sigma}(\Phi_{\delta}). \quad (28)$$

Розв'язання рівняння (28) здійснюємо графічно (рис. 8), віднімаючи абсциси кривої:

$$F_{\Sigma}(\Phi_{\delta}) = F_{я}(\Phi_{\delta}) + F_{\delta i}(\Phi_{\delta}).$$

З абсцис кривої $\varphi_4(\Phi_{\delta})$ одержуємо криву $F_{\delta}(\Phi_{\delta})$, що представляє собою вебер-амперну характеристику робочого повітряного зазору. Залежність $F_{\delta}(\Phi_{\delta})$ не лінійна тому, що вона справедлива для будь-якого повітряного зазору. Вебер-амперна характеристика повітряного зазору при незмінній величині δ являє собою пряму лінію,

що проходить через початок координат.

Залежність стискального зусилля від величини робочого повітряного зазору (тягову характеристику) можна виразити формулою

$$Q_T = \frac{1}{2} * F_{\delta}^2 * \frac{dG_{\delta}}{d\delta}. \quad (29)$$

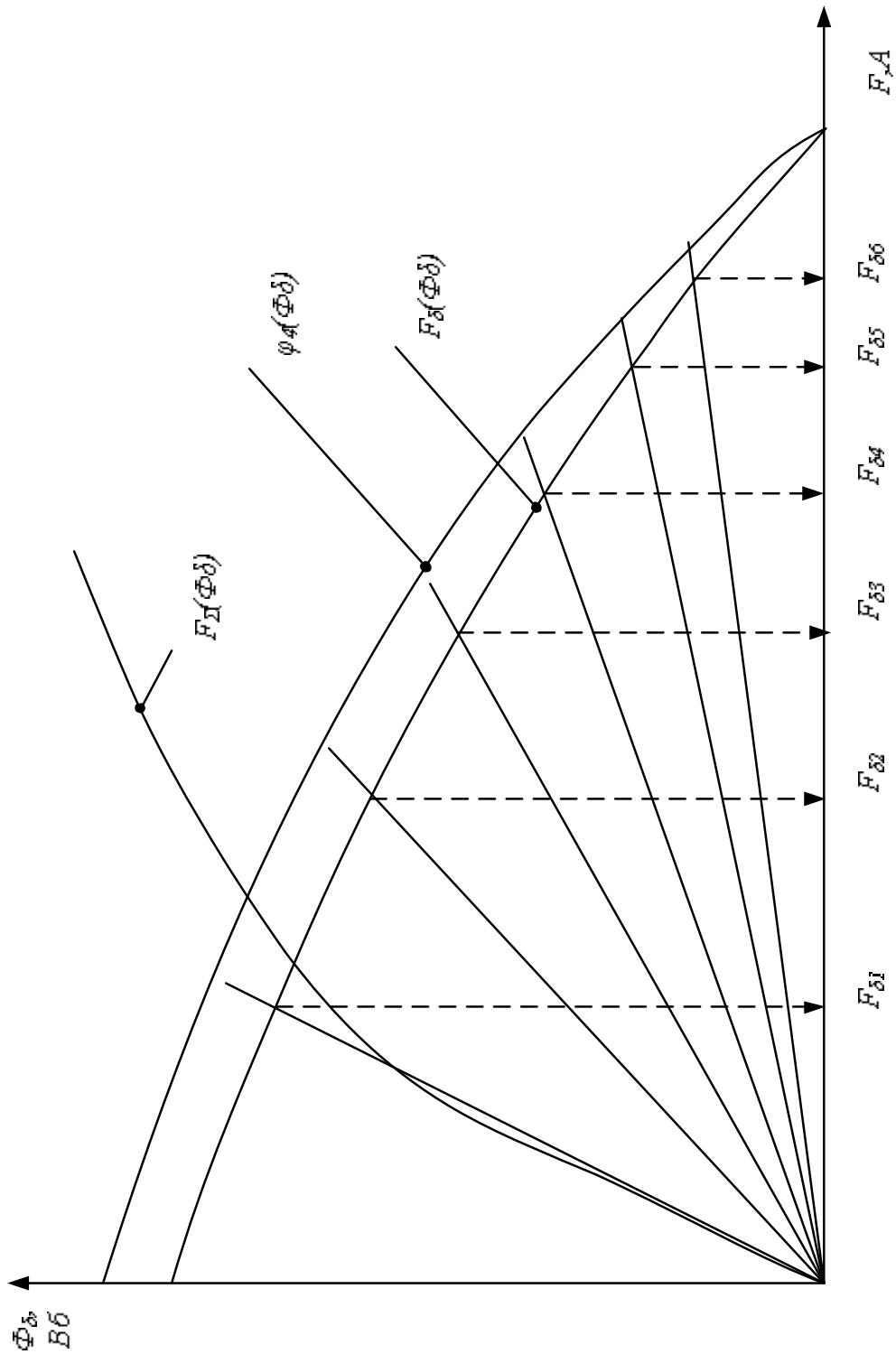


Рис. 8 – Розрахунок вебер-амперної характеристики
робочого повітряного зазору

Падіння магнітного потенціалу F_δ у робочому повітряному зазорі при різних положеннях якоря легко знайти за допомогою отриманої кривої $F_\delta(\Phi_\delta)$. Для цього досить побудувати вебер-амперну характеристику робочого повітряного зазору при значеннях δ , для яких визначалися провідності G_δ . З цією метою задаємося деяким значенням падіння магнітного потенціалу F'_δ і знаходимо магнітний потік за формулою

$$\Phi' = F'_\delta * G_\delta.$$

Значення F'_δ для зазору $\delta = 1$ мм доцільно вибирати рівним 500 А, а для інших – 1000 А. У цьому випадку розрахункові операції спрощуються. Через отримані точки початок координат проводимо прямі до перетину з кривої $F_\delta(\Phi_\delta)$. Значення провідності G_δ при різних положеннях якоря були отримані раніше. Для цих же значень “ δ ” були визначені й похідні $dG_\delta/d\delta$. Точка перетину вебер-амперної характеристики при конкретних значеннях δ із кривої $F_\delta(\Phi_\delta)$ визначає падіння магнітного потенціалу F_δ для даного зазору.

Підставляючи отримані значення F_δ і похідні у формулу (29), знаходимо стискальне зусилля. Результати розрахунків зводимо в табл. 4, за даними який будемо тягову характеристику.

Таблиця 4

δ_1 , мм							
G_δ , Гн							
F_δ , А							
$dG_\delta/d\delta$, Гн/м							
Q_T , Н							

Приклад: За допомогою вебер-амперної характеристики робочого повітряного зазору (рис. 8) побудувати тягову характеристику електромагніта. Нехай діаметр полюсного наконечника $d_n = 40$ мм, максимальний робочий зазор, $\delta = 16$ мм.

По формулі В.В. Вишнівського знаходимо магнітну провідність при $\delta = 1$ мм:

$$G_{\delta} = \mu_0 * \frac{d_{\Pi}^2}{0,00233 * d_{\Pi} + 1,068 * \delta} =$$

$$= \frac{1,25 * 10^{-6} * 0,04 * 0,04}{0,00233 * 0,04 + 1,068 * 0,001} = 1,72 * 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Для цього ж значення зазору виявляємо похідну

$$\frac{dG_{\delta}}{d\delta} = -\mu_0 * \frac{1,068 * d_{\Pi}^2}{(0,00233 * d_{\Pi} + 1,068 * \delta)^2} =$$

$$= -\frac{1,068 * 10^{-6} * 0,04 * 0,04}{(0,00233 * 0,04 + 1,068 * 0,001)^2} = -0,0016 \text{ Гн.}$$

Знак “мінус” означає, що зі збільшенням зазору похідна, а, отже, і стискальне зусилля зменшуються.

При $F'_{\delta} = 500$ А одержуємо магнітний потік $\Phi = F'_{\delta} * G_{\delta} = 500 * 1,72 * 10^{-6} = 0,86 * 10^{-6}$ Вб.

Через початок координат і точку з координатами $\Phi = 0,86 * 10^{-6}$ Вб, $F_{\delta} = 500$ А проводимо пряму до перетину з кривою $F_{\delta}(\Phi_{\delta})$, приведеною на рис. 9.

З точки перетину “1” опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис і знаходимо стискальне зусилля при $\delta = 1$ мм:

$$Q_T = \frac{1}{2} * F_{\delta}^2 * \frac{dG_{\delta}}{d\delta} = 0,5 * 650^2 * 0,0016 = 338 \text{ Н.}$$

Для інших зазорів стискальне зусилля знаходимо аналогічно. Результати розрахунків зводимо в табл. 5.

Таблиця 5

δ , мм	1	2	4	8	12	16
$G_{\delta} * 10^{-6}$, Гн	1,72	0,89	0,46	0,28	0,155	0,116
F_{δ} , А	650	1100	1650	2260	2600	2700
$(d_{\delta}/d\delta) * 10^{-4}$, Гн/м	1,60	0,43	0,11	0,029	0,013	0,0073
Q_T , Н	338	260	150	77	44	26

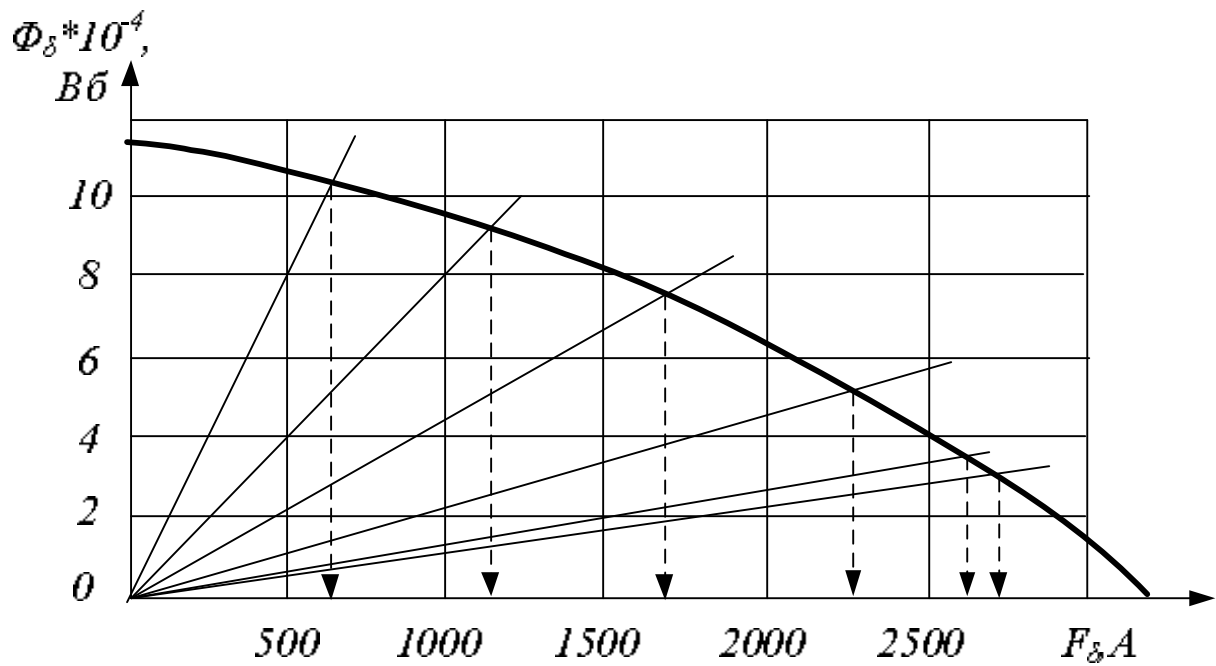


Рис. 9 - Розрахунок вебер-амперної характеристики робочого повітряного зазору

За даними табл. 5 на рис. 10 побудована тягова характеристика електромагніту клапанного типу.

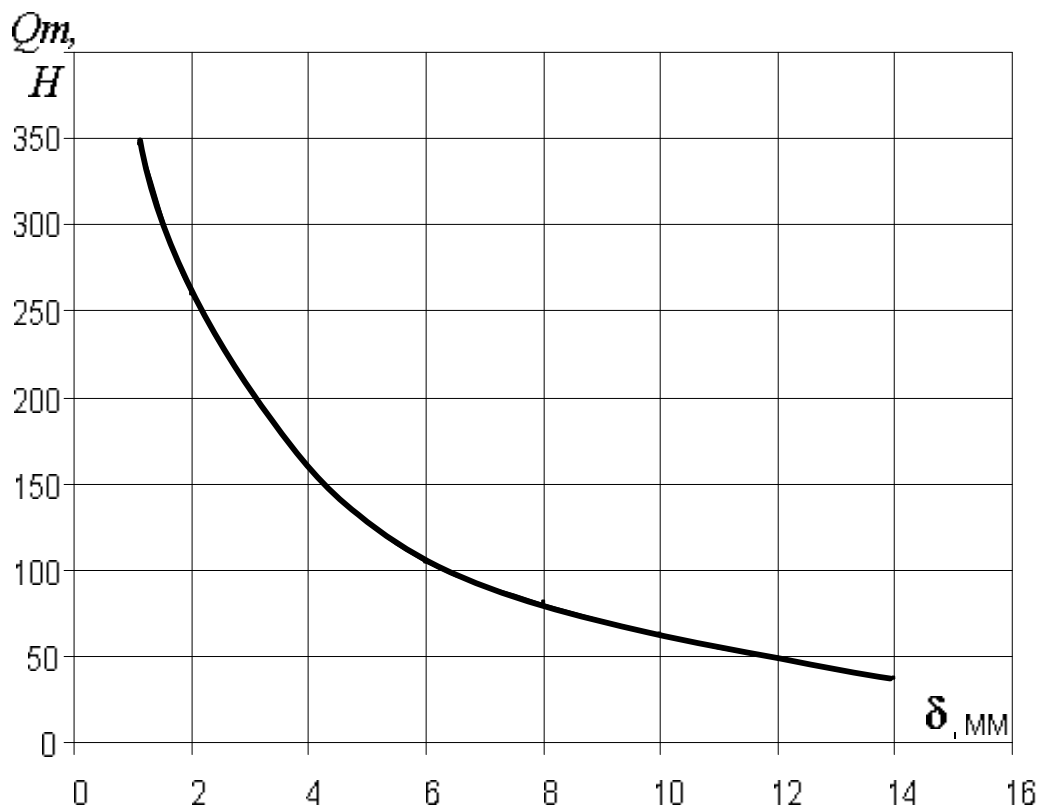


Рис. 10 - Тягова характеристика електромагніту клапанного типу.

6. Розрахунок параметрів обмотки

Розрахунок обмотки полягає в тому, щоб підібрати такі обмотувальні дані, що при заданій напрузі забезпечили б задану (обчислену) намагнічуючу силу.

Геометричні розміри магнітного кола дозволяють визначити максимальні розміри котушок, які можуть бути каркасними чи бескаркасними. Величина намагнічуючої сили котушки, що намагнічує, залежить від того, наскільки ефективно заповнений обсяг котушки обмотувальним проводом. Ця ефективність оцінюється коефіцієнтом заповнення по міді. Значення коефіцієнта визначається відношенням поперечного перерізу міді усіх витків S_m до площі обмотувального вікна котушки S_k :

$$K_{zm} = \frac{S_m}{S_k} = \frac{\pi * W * d^2}{4 * l_k * h_k}, \quad (30)$$

де d – діаметр голого проводу, мм;

W – число витків обмотки;

h_k, l_k – розміри обмотувального вікна котушки, мм.

Слід враховувати, що обмотувальне вікно котушки завжди менше всієї площі вікна за рахунок об'єму каркаса чи котушки ізоляції при бескаркасній котушці $S_{ob} = h_{ob} * l_{ob}$:

$$S_k = (0,8 \div 0,9) * S_{ob}.$$

Відповідно до рис. 1

$$h_{ob} = h - \Delta_n, \quad l_{ob} = l - d_c/2 - a,$$

де $\Delta_n = (0,1 \div 0,3) d_c$ – висота полюсного наконечника.

При заданих значеннях сили, що намагнічує, $F = I * W$ і напруги кола керування (живлення) “ U ” можна знайти діаметр голого проводу d :

$$F = (U/r) * W \quad (31)$$

$$r = \rho * \frac{l_{cp} * 4 * W}{\pi * d^2}, \quad (32)$$

де ρ_v - питомий електричний опір, Ом*м;

r – електричний опір проводу обмотки, Ом;

l_{cp} - середня довжина витка, м;

d – діаметр голого проводу, м.

На міському електричному транспорті кола керування живляться від джерела напругою $U = 24$ В.

Вирішуючи спільно рівняння (31) і (32), одержимо:

$$d = \sqrt{\frac{4 * \rho_v * l_{cp} * F}{\pi * U}}. \quad (33)$$

Довжина середнього витка обмотки складає:

$$l_{cp} = \pi * (d_c/2 + l - a).$$

Питомий опір обмотки при нагріванні проводу до температури v_n визначаємо за формулою

$$\rho_v = \rho_0 * (1 + \alpha * v_n),$$

де $\alpha = 0,004$ 1/°С коефіцієнт;

$$\rho_0 = 0,0162 * 10^{-6} \text{ Ом * м, при } v = 0 \text{ °С.}$$

Питомий опір обмотки необхідно визначити при допустимій температурі нагрівання для даного класу ізоляції. Допустимі температури нагрівання для ізоляційних матеріалів різних класів відповідно до ДСТ 9219-88 приведені в табл. Д₁.

Визначивши діаметр голого проводу d і округливши його в бік збільшення, необхідно за табл. Д₂ підібрати провід, тобто вибрати d і d_1 (діаметри голого й ізолюваного проводів відповідно) і середнє значення коефіцієнта заповнення обмотки по міді $K_{зм}$ (табл. Д₁, табл. Д₂ Додатку).

Знаючи діаметр проводу і коефіцієнт заповнення, визначається число витків:

$$W = \frac{4 * S_k * K_{зм}}{\pi * d^2}. \quad (34)$$

Далі розрахуємо опір обмотки за рівнянням (32), а за рівнянням (31) уточнюємо значення сили, що намагнічує. Внутрішній діаметр обмотки приймається близьким до діаметра осердя з обліком толщин внутрішньої ізоляції:

$$D_{обв} = d_c + 2 * \Delta_{верб}. \quad (35)$$

де $\Delta_{верб} = (1 \div 2)$ мм – товщина внутрішньої ізоляції.

Зовнішній діаметр обмотки приймаємо приблизно рівним ширині якоря (підстави):

$$D_{обн} = 2 * (l - a - \Delta_{ин}).$$

Товщина зовнішньої ізоляції має бути не менше 2 мм.

7. Тепловий розрахунок обмотки

При протіканні струму по обмотці електромагніту в ній виділяється тепло, що відповідає потужності $P = I^2 * r$.

Ця потужність витрачається на підвищення температури обмотки і частково розсіюється в навколишнє середовище. При тривалому режимі включення обмотка нагрівається до сталої температури u_y . При цьому настає тепловий баланс (одержуване обмоткою тепло від джерела харчування дорівнює теплу, що віддається нею в навколишнє середовище).

Перевищення сталої температури обмотки над навколишнім середовищем $\tau_y = u_y - u_0$ можна визначити за формулою

$$\tau_y = P / (K_m * S_{охл}), \quad (37)$$

де P – споживана потужність обмотки, Вт;

K_m – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²*°C) (рис. 10);

$u_{про}$ – температура навколишнього середовища, °C;

$S_{охл}$ – охолодна поверхня обмотки, що складається з внутрішньої S_e і зовнішньої S_n бічних поверхонь: $S_e = (h - \Delta_n) * \pi * D_{обв}$, м²;

$$S_n = (h - \Delta_n) * \pi * D_{обн}, \text{ м}^2, \text{ при цьому } S_{охл} = S_n + \eta_m * S_e.$$

Коефіцієнт η_m характеризує ефективність внутрішньої охолодної поверхні. Для безкаркасних котушок $\eta_m = 0,9$; для котушок з металевим каркасом $\eta_m = 1,7$; для котушок, обмотка яких намотується на осердя, $\eta_m = 2,4$.

При обчисленні перевищення сталої температури обмотки необхідно знати величину коефіцієнта тепловіддачі, котрий сам залежить від температури. Тому вирішують задачу від зворотного, вважаючи, що відома температура, і визначають коефіцієнт тепловіддачі за рис. 11. Обчислюють розрахункову потужність за виразом (37) і порівнюють її зі споживаною потужністю. Якщо результати відрізняються менше ніж на 5%, то на цьому розрахунок закінчують, у противному виразі задаються новою температурою.

Якщо в результаті розрахунків встановлено, що перевищення температури над навколишнім середовищем нижче допустимої $\tau_y < \tau_{дон}$, то на цьому тепловий розрахунок закінчують. У тому випадку, коли отримане значення $\tau_y > \tau_{дон}$, і обмотувальне вікно зайняте цілком, те необхідно визначити тривалість включення ТВ при повторно-короткочасному режимі роботи (при цьому приймають $\tau_y = \tau_{нк}$).

Повторно-короткочасний режим (почергове включення t_p і відключення t_n) характеризується коефіцієнтом перевантаження за потужністю:

$$n_{ПК} = \frac{\tau_{УПК}}{\tau_{ДОП}} = \frac{P_{ПК}}{P_{ДЛ}} = \frac{t_p + t_n}{t_p}, \quad (38)$$

де $P_{нк}$ – потужність при повторно-короткочасному режимі, Вт;

$P_{дл}$ – допустима потужність при тривалому режимі, Вт, при цьому

$$P_{дл} = \tau_{дон} * K_m * S_{охл}.$$

Тривалість роботи при повторно-короткочасному режимі t_p можна визначити з умови, що при цьому температура не повинна перевершувати допустимого значення:

$$t_p = T_H * \ln \frac{\tau_{УПК}}{\tau_{УПК} - \tau_{ДОП}}. \quad (39)$$

Постійна часу нагрівання складає

$$T_H = \frac{C * m}{K_T * S_{охл}} ,$$

де $C = 390[(Вт * с)/(кг * °C)]$ – питома теплоємність обмотки;

$m = \gamma * V$ (кг) – маса обмотки;

$\gamma = 8,9$ (кг/дм³) – питома вага;

V (дм³) – об'єм міді.

Знаючи $n_{нк}$ і t_p , з (38) визначаємо t_n . Отримані параметри повторно-короткочасного режиму забезпечать допустимий перегрів обмотки над навколишнім середовищем.

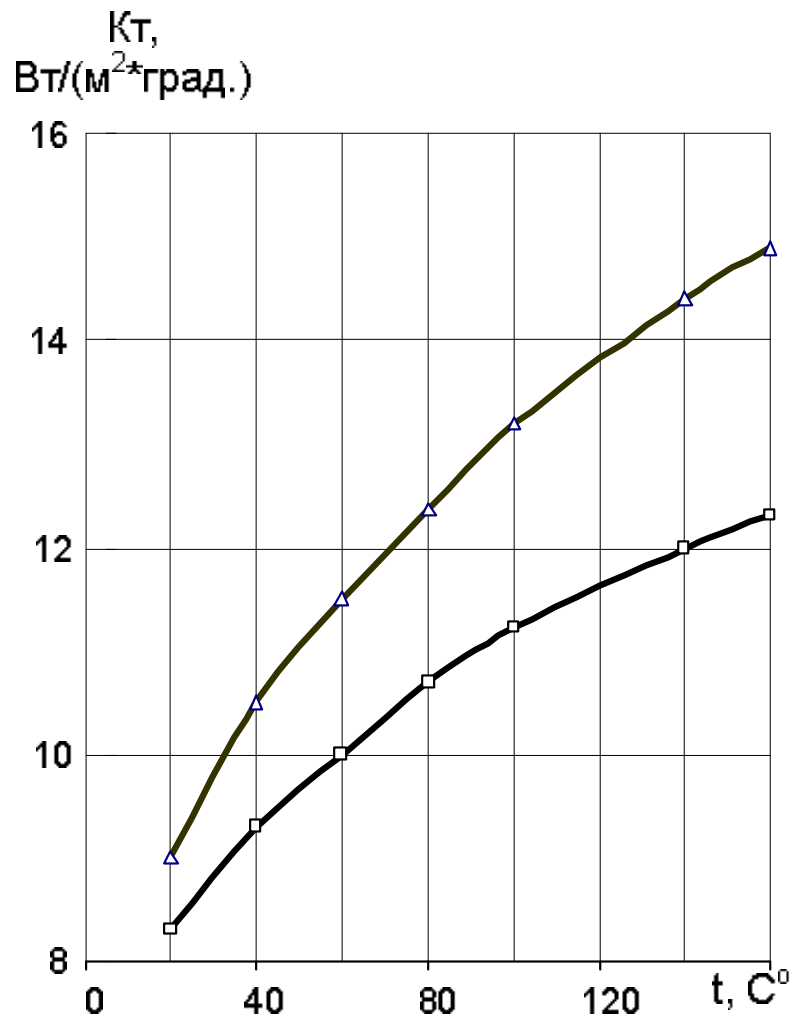


Рис. 11 - Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температури перегріву

котушки: – безкаркасна котушка; – каркасна котушка.

Таблиця Д₁

Тип ізоляції	Перевищення температури, °С	Температура, °С
Клас А	85	125
Клас Е	95	135
Клас В	105	145
Клас F	125	165
Клас Н	150	190

Таблиця Д₂

Діаметр голого проводу d, мм	Діаметр ізольовано го проводу d ₁ , мм	Коефіцієнт заповнення обмотки по міді K _{зм}	Діаметр голого проводу d, мм	Діаметр ізольовано го проводу d ₁ , мм	Коефіцієнт заповнення обмотки по міді K _{зм}
0,62	0,67	0,668	1,20	1,28	0,703
0,64	0,69	0,670	1,25	1,33	0,705
0,67	0,72	0,672	1,30	1,38	0,707
0,72	0,77	0,675	1,35	1,43	0,709
0,74	0,80	0,676	1,40	1,48	0,711
0,77	0,83	0,678	1,45	1,53	0,712
0,80	0,86	0,680	1,50	1,58	0,714
0,83	0,89	0,681	1,56	1,64	0,715
0,86	0,92	0,682	1,62	1,71	0,717
0,90	0,96	0,684	1,68	1,77	0,719
0,93	0,99	0,687	1,74	1,83	0,721
0,96	1,02	0,689	1,81	1,90	0,723
1,00	1,07	0,692	1,88	1,97	0,725
1,04	1,12	0,695	1,95	2,04	0,728
1,08	1,16	0,697	2,02	2,12	0,730
1,12	1,20	0,699	2,10	2,20	0,733
1,16	1,24	0,701	2,26	2,36	0,737

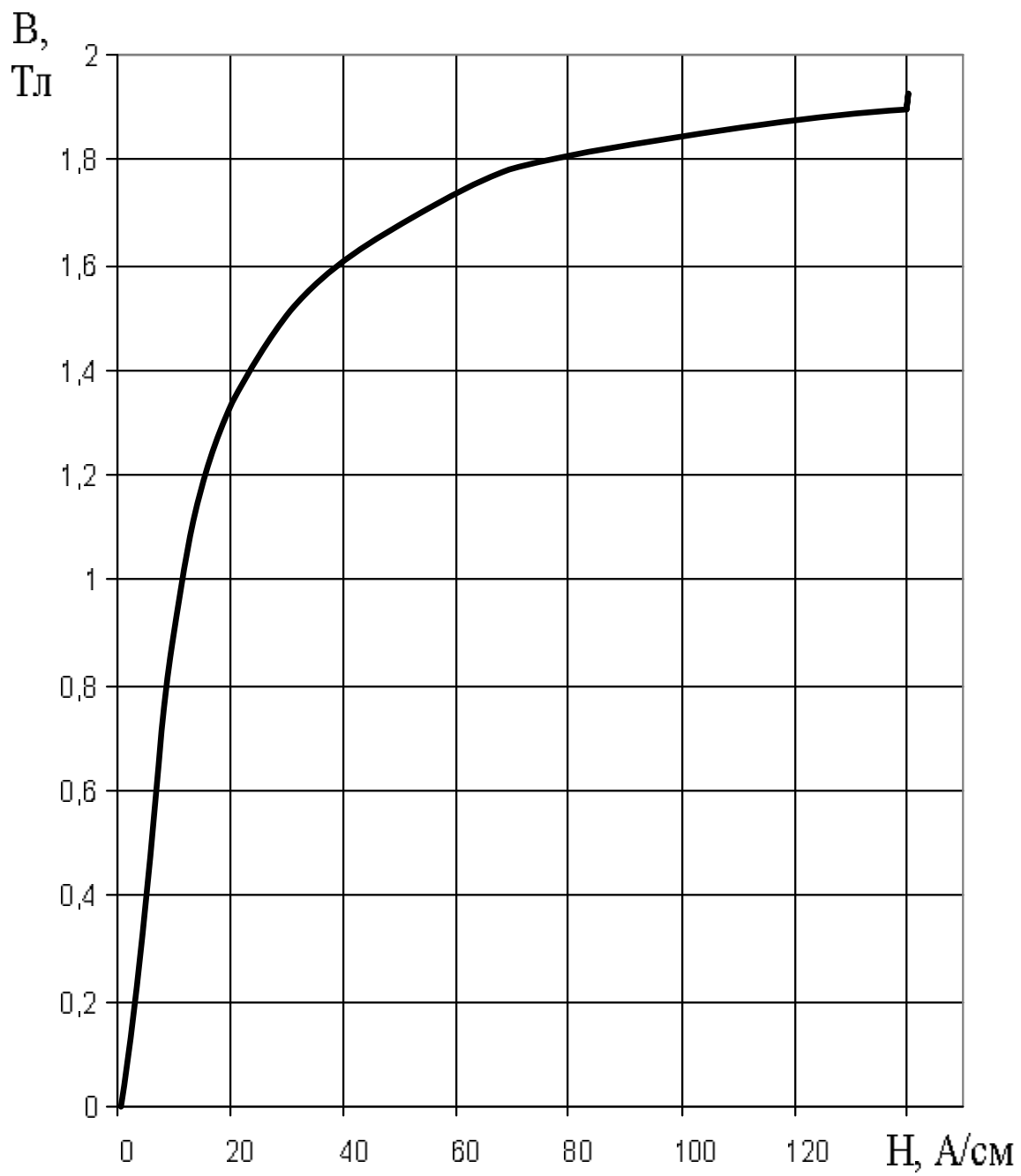


Рис. Д1 - Крива намагнічування сталі №1

$B, \text{Tл}$

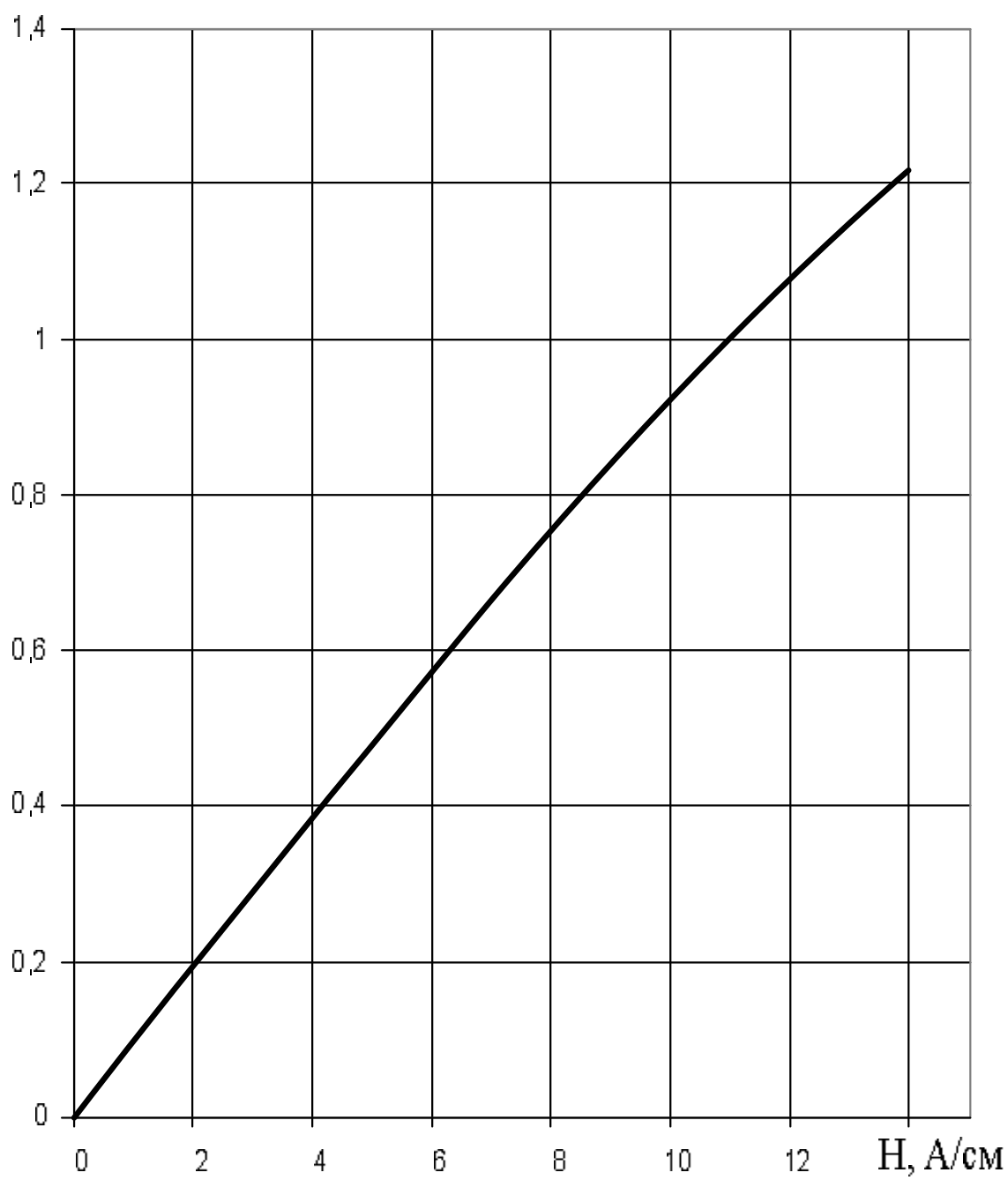


Рис. Д2 - Початок кривої намагнічування сталі №1

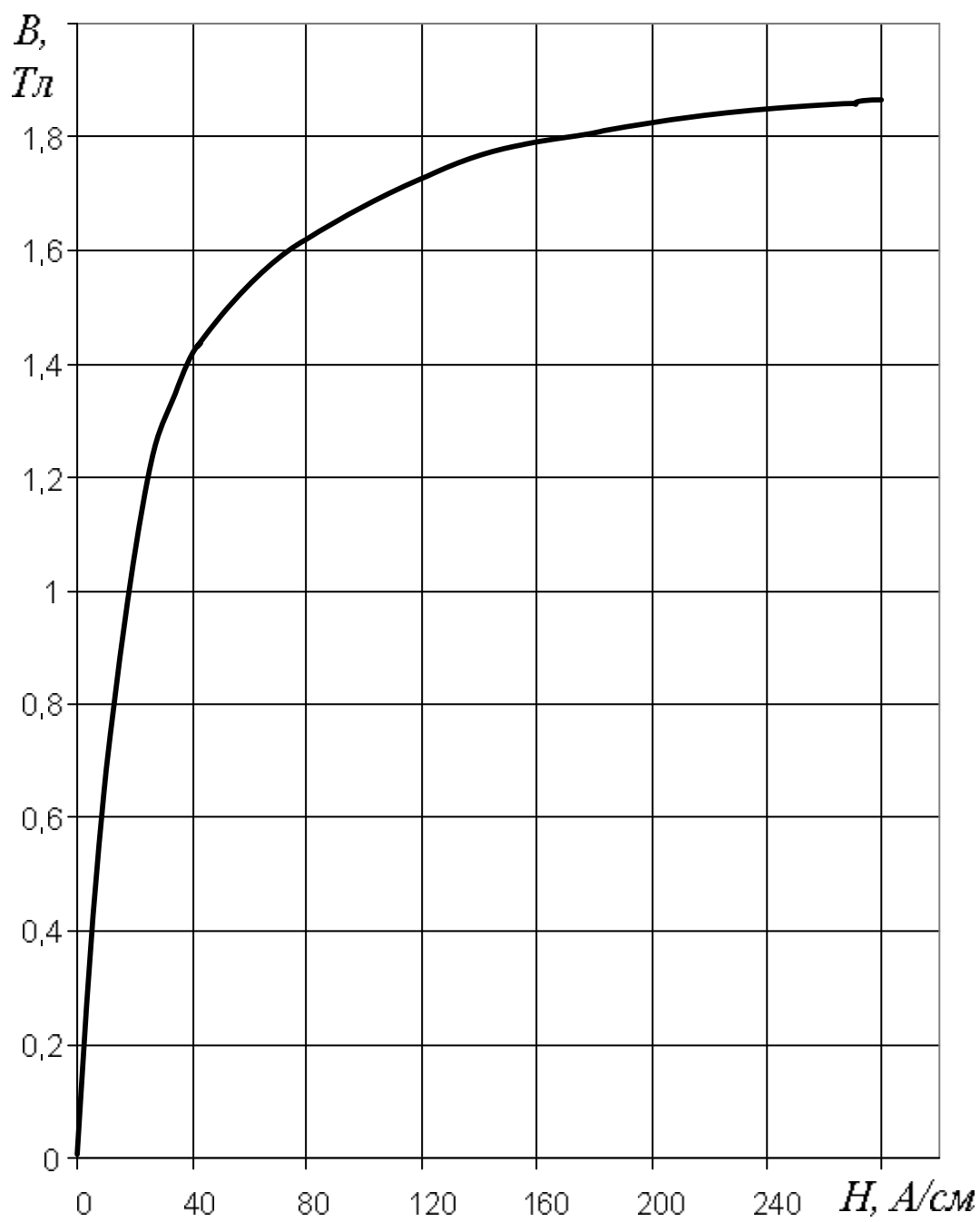


Рис. ДЗ - Крива намагнічування сталі №2

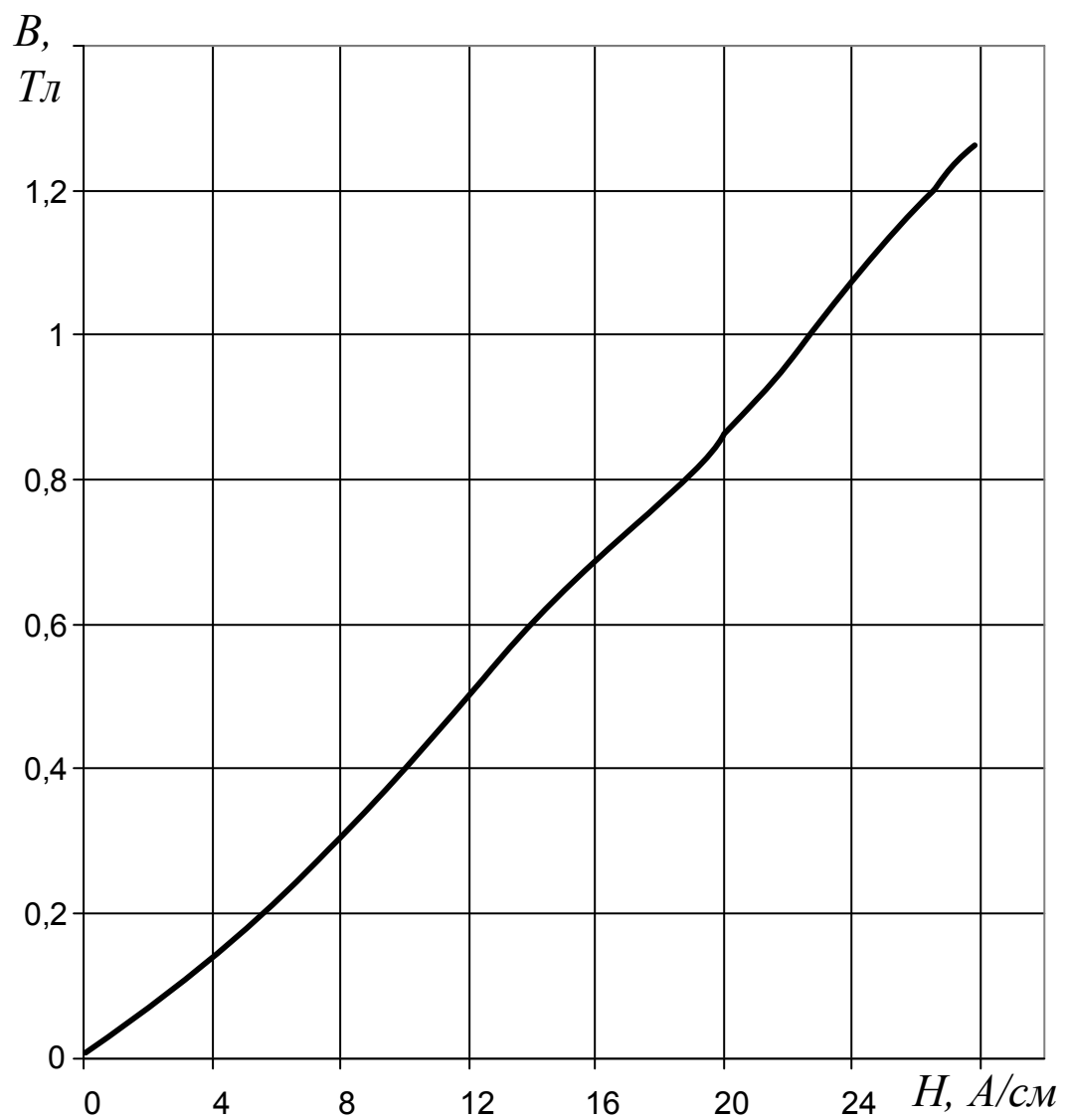


Рис. Д4 - Початок кривої намагнічування сталі №2

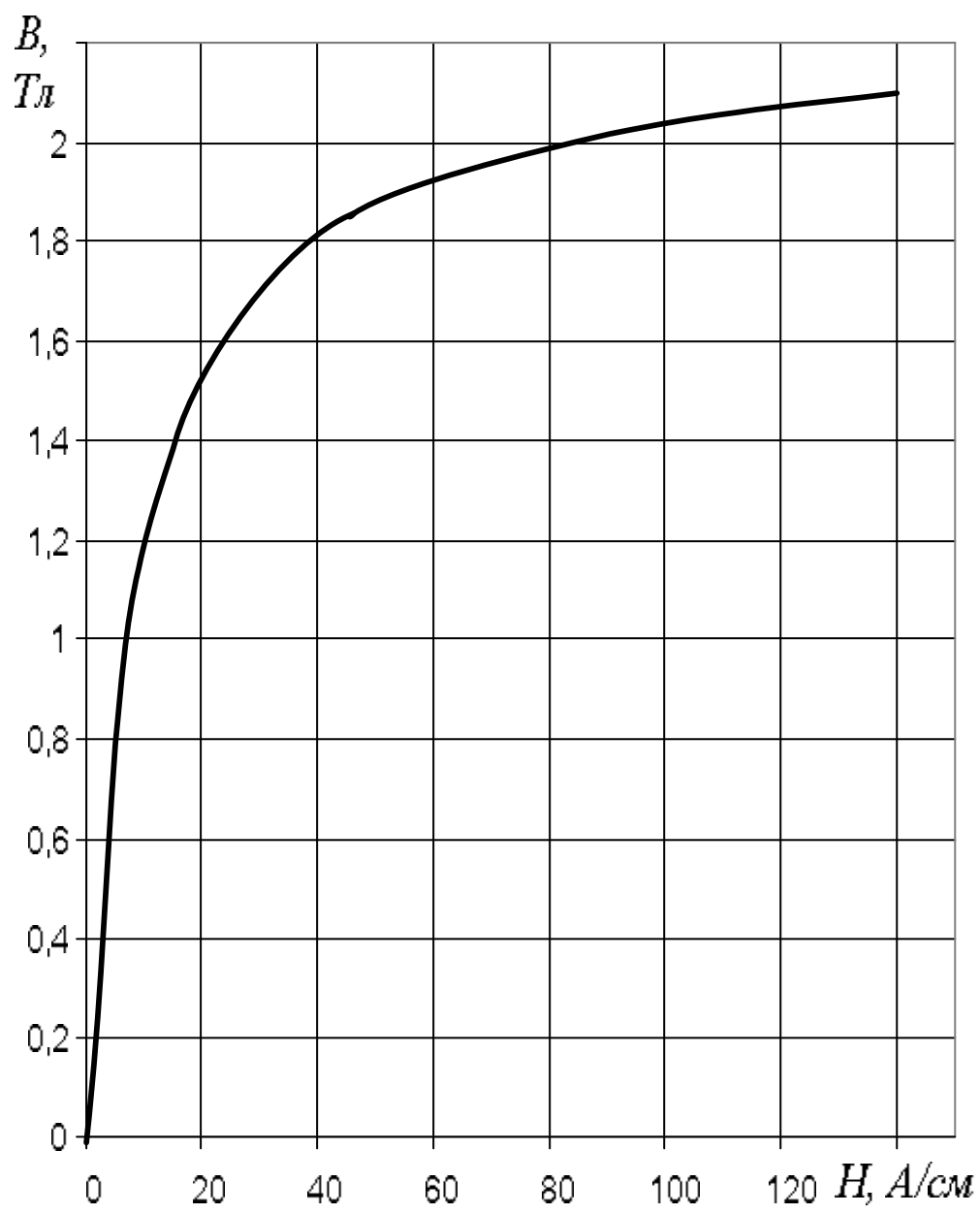


Рис. Д5 - Крива намагнічування сталі №3

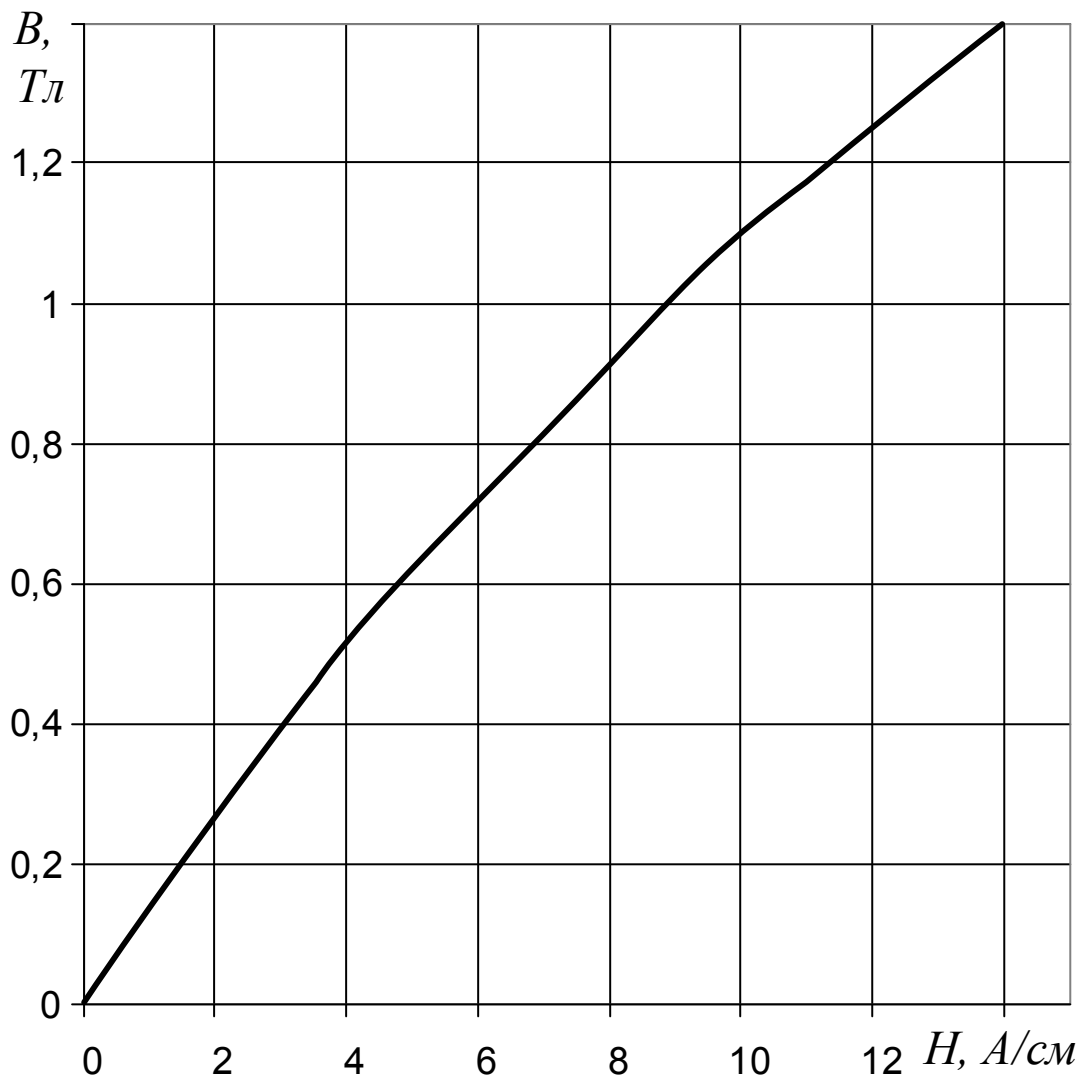


Рис. Д6 - Початок кривої намагнічування сталі №3

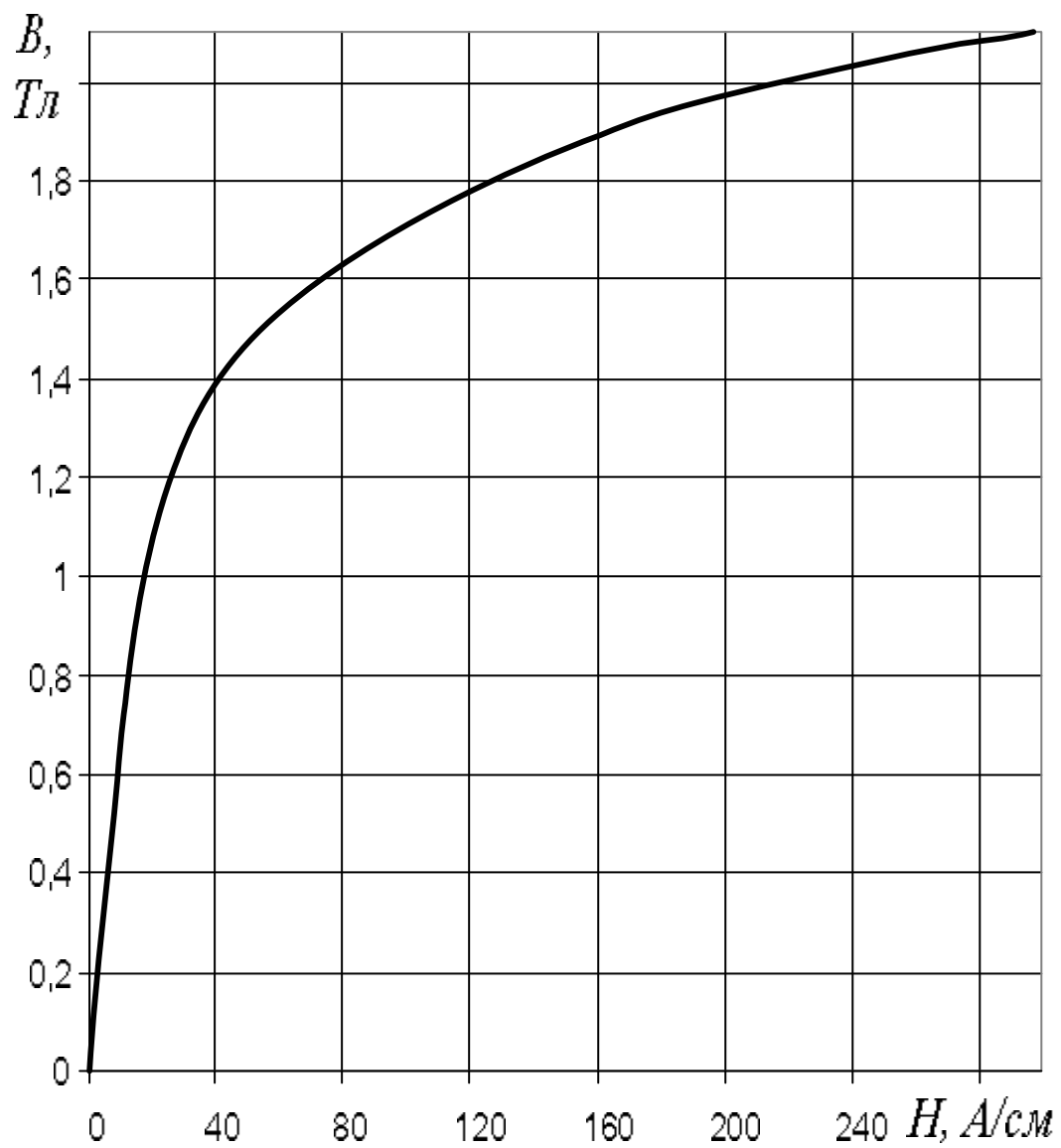


Рис. Д7 - Крива намагнічування сталі №4

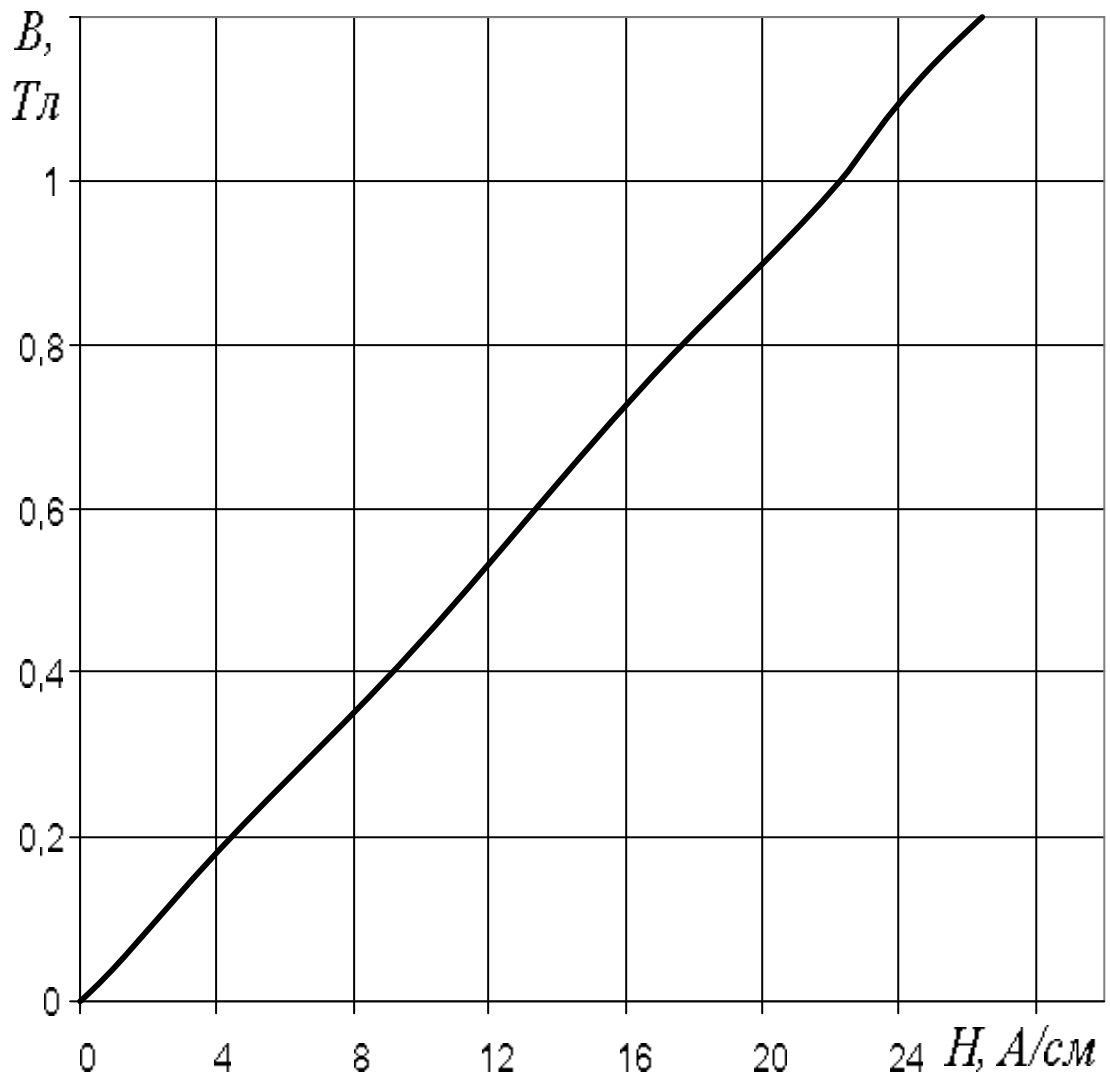


Рис. Д8 - Початок кривої намагнічування сталі №4

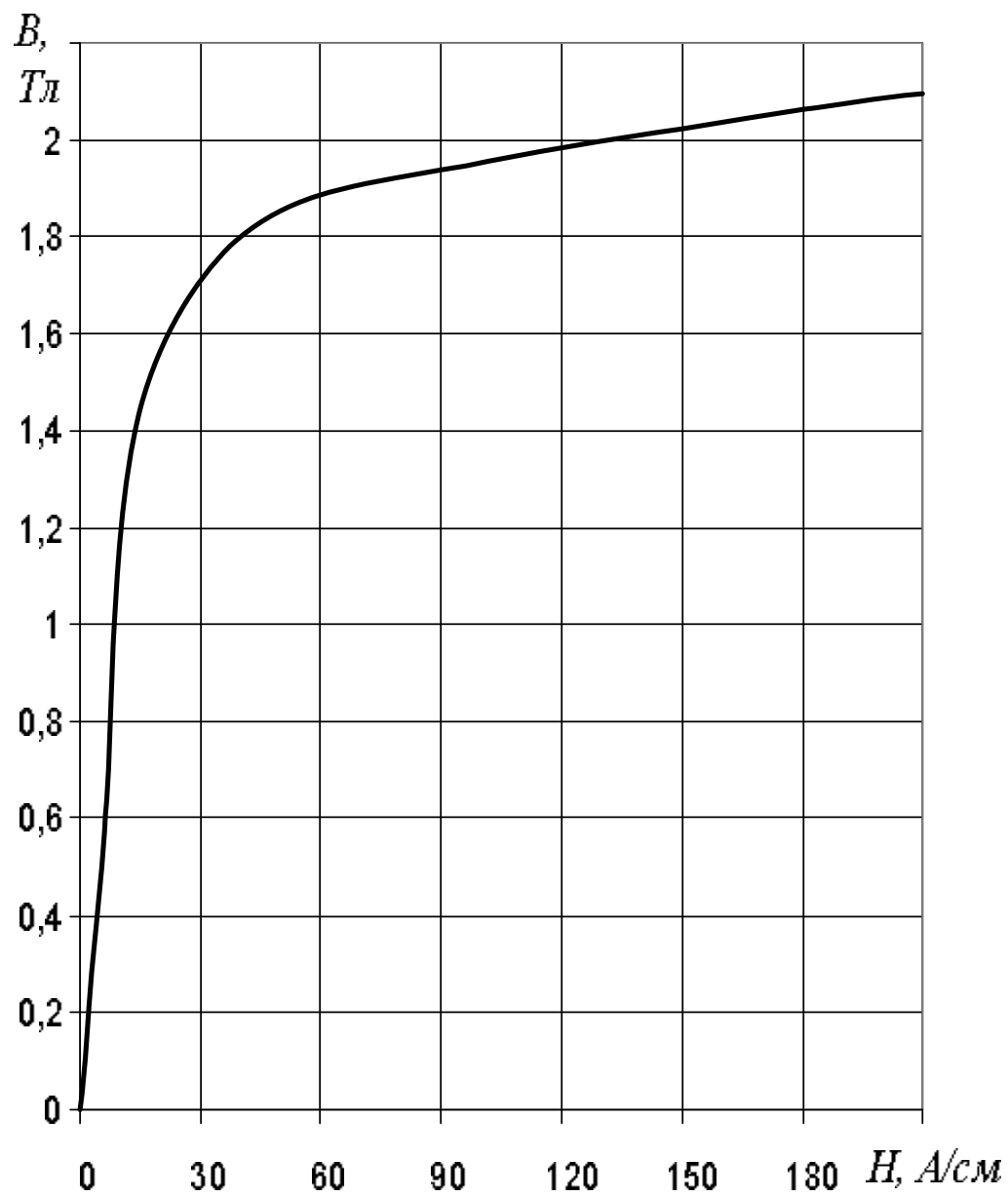


Рис. Д9 - Крива намагнічування сталі №5

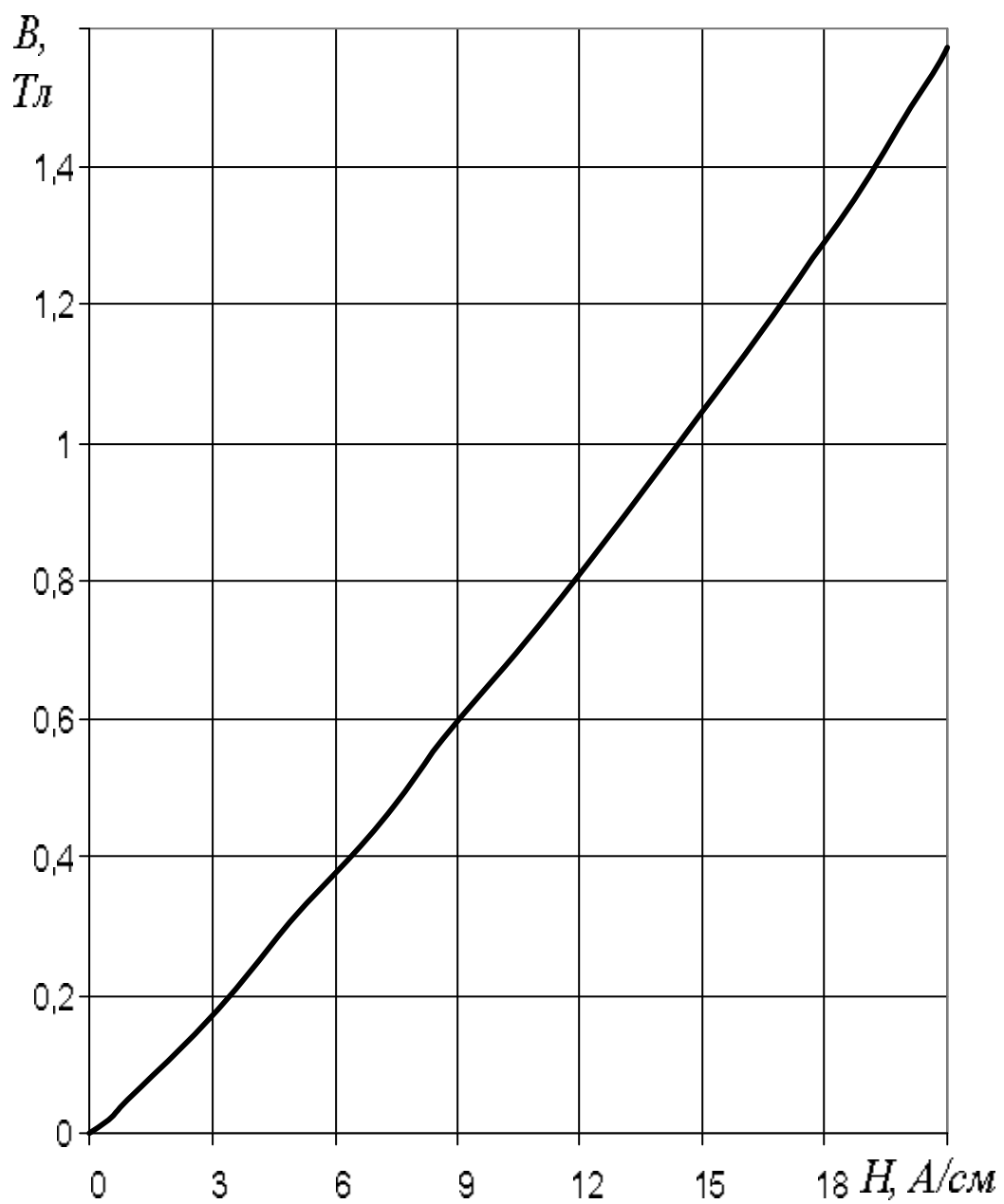


Рис. Д10 - Початок кривої намагнічування сталі №5

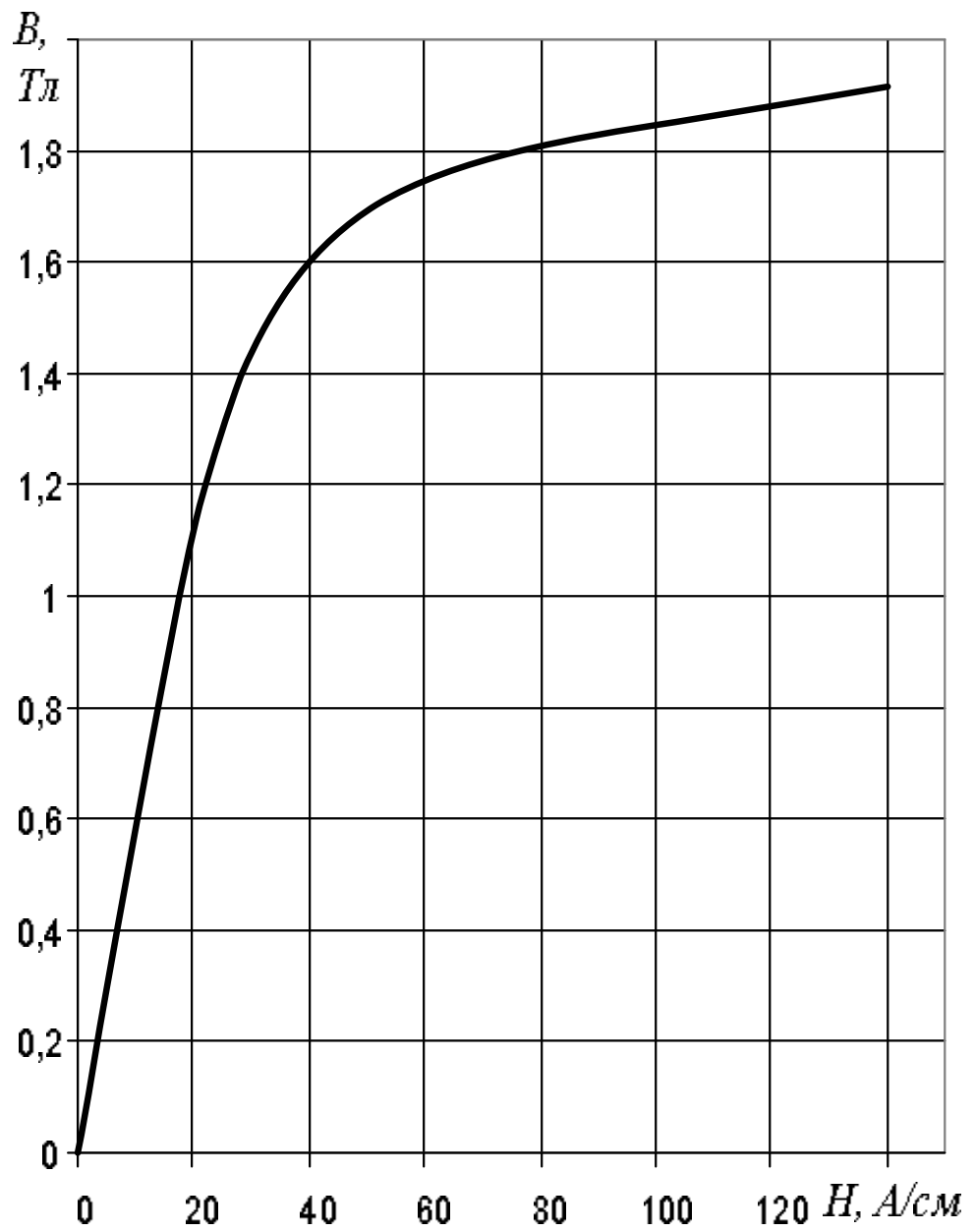


Рис. Д11- Крива намагнічування сталі №6

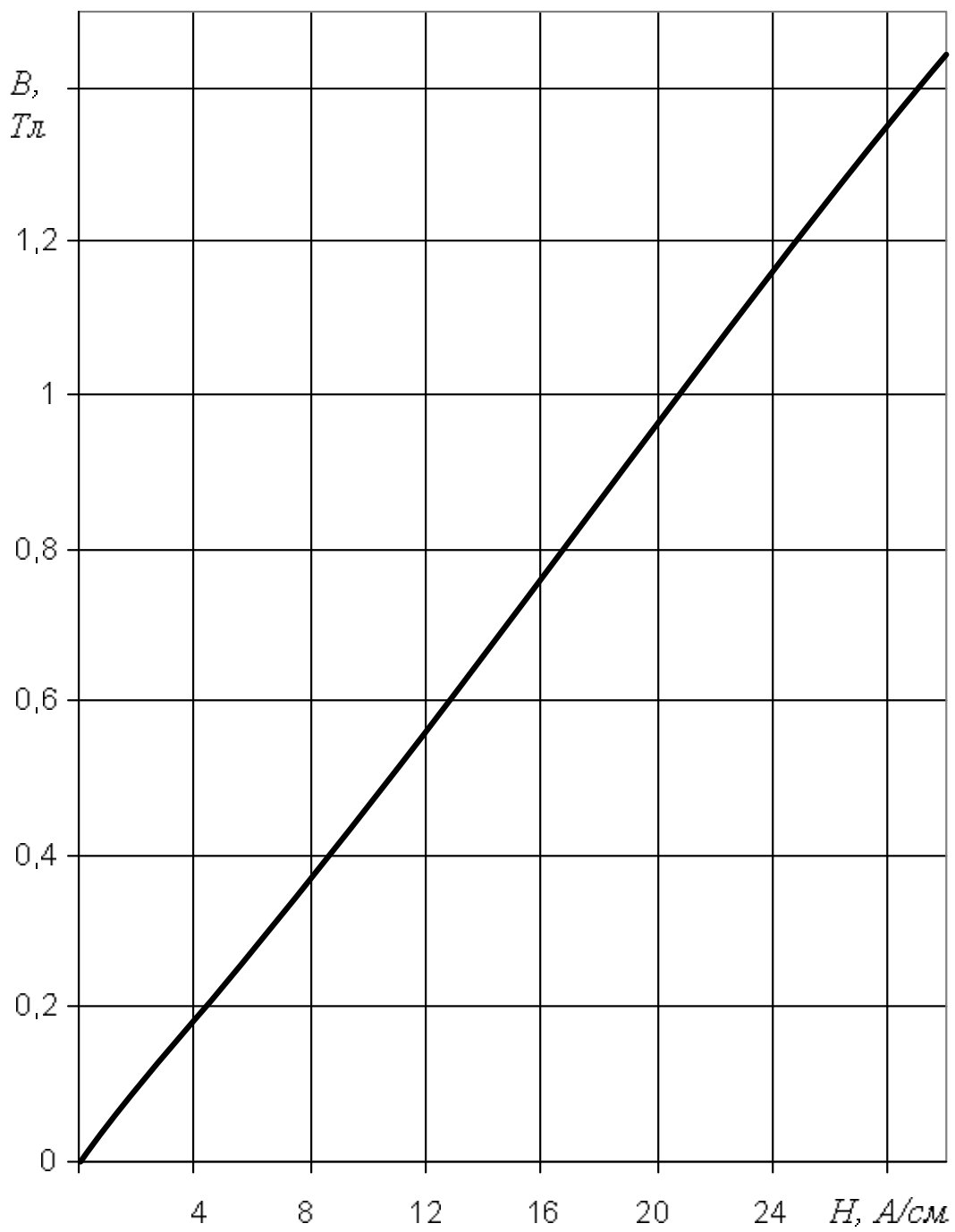


Рис. Д12 - Початок кривої намагнічування сталі №6

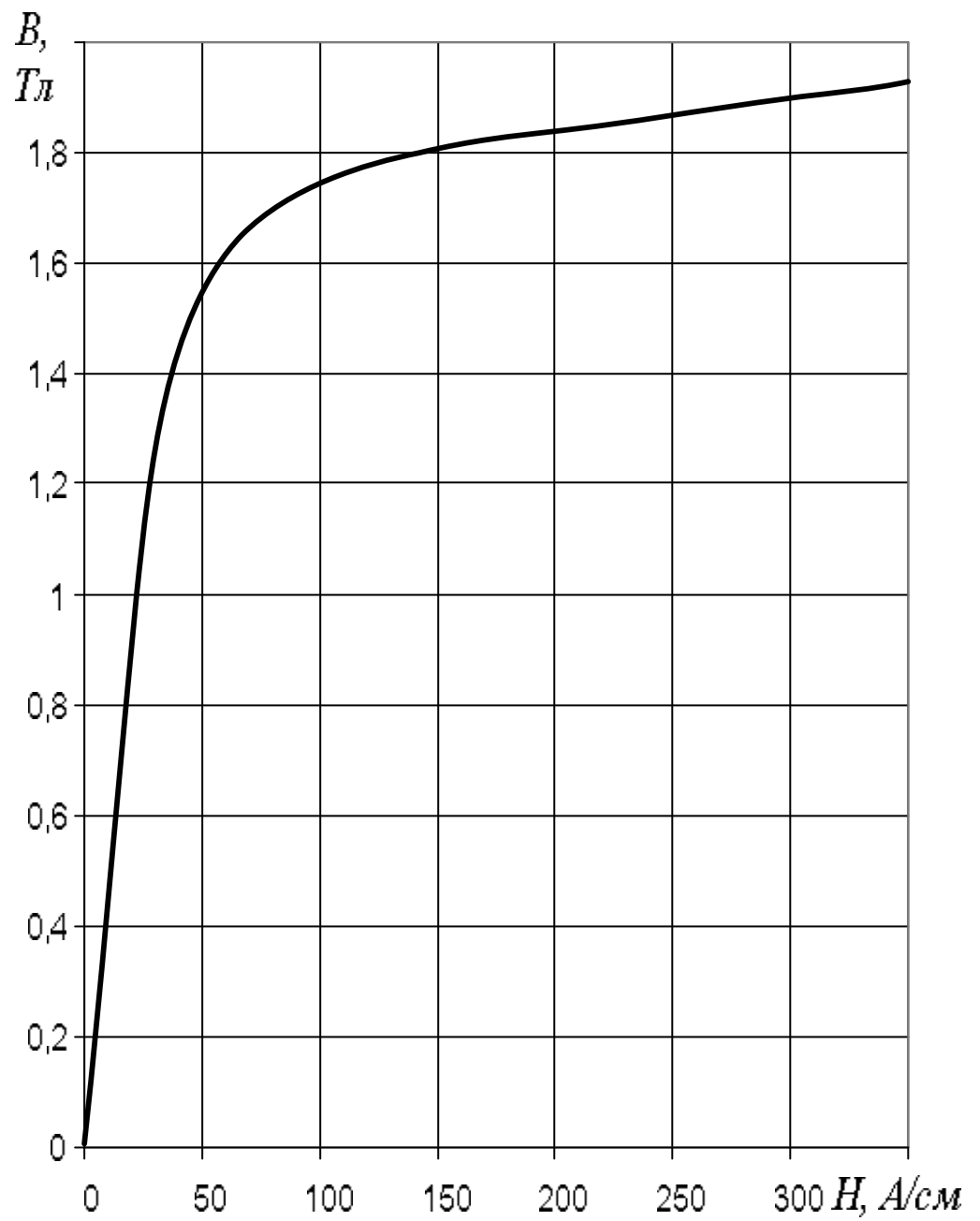


Рис. Д13 - Крива намагнічування сталі №7

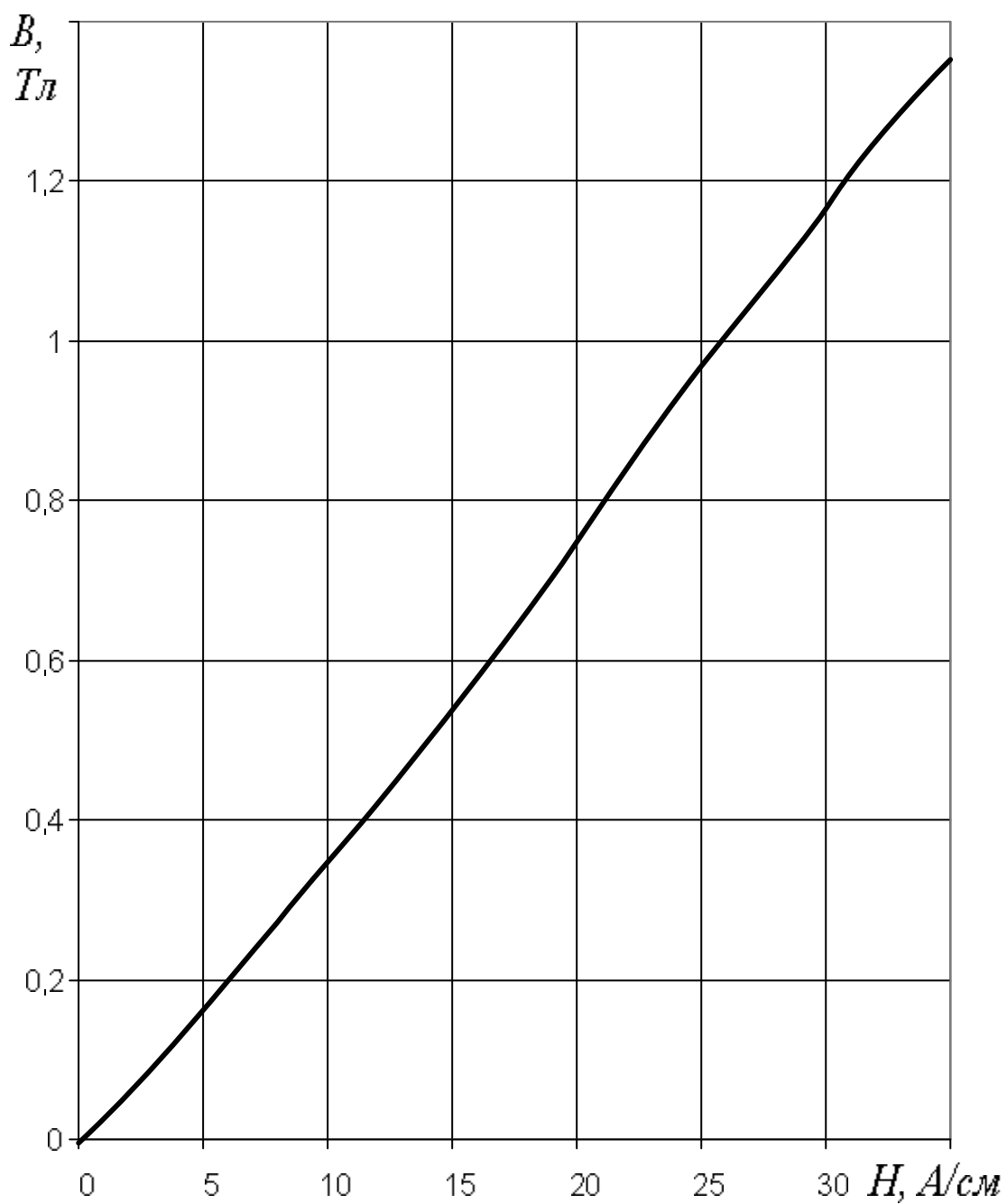


Рис. Д14 - Початок кривої намагнічування сталі №7

Список літератури

1. Методичні вказівки до курсового проектування для студентів 2, 3 курсів денної форми навчання спеціальності 7.092.202/ Уклад. М.І.Кисельов, К.О.Сорока.–Харків,ХГАГХ,2002 р. – 46с.
2. Кисельов, М.І. Конспект лекцій з дисципліни «Тягові електричні апарати» (для студентів 2,3 курсів денної і заочної форм навчання за напрямом підготовки 0922 – «Електромеханіка») [Текст] / М.І Кисельов, В.М. Фатєєв; Харківська нац. академія міського господарства.-Х.: ХНАМГ, 2009.- 84 с.
3. Основы теории электрических аппаратов: Учебник для вузов по спец. “Электрические аппараты”/И.С.Таев, Б.К.Буль, А.Г.Годжелло и др.- М.:Высш. шк., 1987.-352с.
4. Бородин М.Г. Расчет электромагнитов постоянного тока: учеб. пособие для курсового проектирования.-М.: МЭИ, 1979.-58с.
5. Корягина Е.Е.,Коськин О.А. Электрооборудование трамваев и троллейбусов.-М.: Транспорт, 1982.- 296с.
6. Корякин–Черняк С.Л., Партала О.Н. Справ очник електрика для профи и не только... –СПб.:Наука и техника, 2008. –592с.

Зміст

	Стор.
Вступ.....	3
1. Розрахунок магнітних провідностей повітряних зазорів.....	4
1.1 Розрахунок магнітної провідності робочого повітряного зазору і її похідної.....	5
1.2 Визначення магнітної провідності шляхів потоків розсіювання.....	6
1.3 Визначення магнітної провідності неробочого повітряного зазору.....	7
2. Складання схеми заміщення магнітного кола.....	9
3. Побудова вебер-амперних характеристик ділянок магнітного кола.....	13
3.1 Побудова вебер-амперних характеристик 1, 2, 3, 4 -ї ділянок магнітного кола.....	13
3.2 Побудова вебер-амперної характеристики шляхів потоків розсіювання.....	15
4. Розрахунок магнітного кола.....	19
5. Побудова тягової характеристики.....	22
6. Розрахунок параметрів обмотки.....	27
7. Тепловий розрахунок обмотки.....	29
Додатки.....	32
Список літератури.....	47

НАВЧАЛЬНЕ ВИДАННЯ

Тягові електричні апарати. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни (для студентів 2, 3 курсу денної та заочної форм навчання за напрямом підготовки 0922 (6.050702) – «Електромеханіка»).

Автори: Михайло Іванович Кисельов,
Віктор Миколайович Фатєєв

Редактор: М.З.Аляб'єв

Комп'ютерна верстка: І.В. Волосожарова

План 2009, поз. 697М

Підп. до друку 25.12.09
Друк на ризографі
Тираж 50 прим.

Формат 60x84 1/16
Умовн.-друк арк. 2.0
Зам. №

Папір офісний
Обл.-вид.арк. 2,3

61002, м. Харків, ХНАМГ вул. Революції, 12

Сектор оперативної поліграфії ЦНІТ ХНАМГ
61002, м. Харків, вул. Революції, 12