

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання практичних робіт

з дисципліни

**СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ  
ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

*(для студентів 5 курсу усіх форм навчання  
та слухачів другої вищої освіти спеціальності*

*141 – Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2018**

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт з дисципліни «Спеціальні електроприводи транспортних засобів» (для студентів 5 курсу усіх форм навчання та слухачів другої вищої освіти спеціальності 141 – Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : О. М. Петренко, О. В. Донець. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018 – 30 с.

Укладачі : О. М. Петренко,  
О. В. Донець

Рецензент : доц. каф. ЕТ, ХНУМГ ім. О. М. Бекетова В. П. Андрійченко

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту, протокол № 2  
від 12 січня 2014 р.

## **Заняття 1.**

### **Обчислення магнітного кола додаткових полюсів методом схем заміщення (стаціонарні режими)**

Тема 6. Порушення комутації в стаціонарних режимах роботи двигунів та методи експериментального дослідження машин на стенді (10 годин)

1. Правомірність застосування схем заміщення до розрахунків магнітних кіл.

2. Лінійність задачі для магнітного кола додаткових полюсів із комутаційних вимог.

3. Вигляд схеми заміщення порівнюючи її із ескізом міжполюсного вікна двигуна (бажаний плакат, наведено нижче).

4. За допомогою схеми заміщення можна оцінити ступінь насиченості магнітного кола додаткових полюсів, а також оцінити викликаний цим дефіцит комутуючого магнітного потоку. Схема дозволяє мати повну картину проходження магнітного потоку у осерді полюсу, а також потоків магнітного розсіювання із визначенням коефіцієнту розсіювання.

5. Для простоти розгляду і розрахунків використовуємо лінійну схему (тобто таку, що не має нелінійних провідностей ділянок). Всі провідності сталевих ділянок вважаються безконечно великими, а магнітні потенціали осердя головних, додаткових полюсів, поверхні якоря незмінними за довжиною. Таке представлення схеми дозволяє шляхом переносу джерел живлення перетворити її до двохвузлової схеми, зображеної на плакаті 2.

6. Після пояснень перетворень в схемі за формулами наведеними на плакатах визначити провідності в схемі 2 та величини МРС у гілках схеми. При цьому студентам бажано на своїх ескізах міжполюсних вікон дотримуватися розбиття на трубки провідності згідно із плакатом.

У формулах для визначення провідностей розсіювання та провідностей зони повітряного зазору відношення середньої ширини до середньої довжини трубки розбиття на практиці часто замінюють через числа умовних квадратиків,

на які поділяють трубку за її довжиною, тобто  $\frac{b_{mpi}}{l_{mpi}} = \frac{1}{n_{kvi}}$ , величина  $l$  є довжина полюсів (що дорівнює активній довжині машини), константа  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – питома магнітна провідність повітря (вакууму).

Провідність повітряного зазору біля якоря слід зменшити поділення на коефіцієнт Картера для зазору під додатковим полюсом, який обчислюється за відомою формулою ( $k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta}$ ).

При визначенні коефіцієнтів розподілення МРС ДП у міжполюсному вікні  $k_{p2}, k_{p3}, k_{p4}$ , користуються формулами, наведеними на плакаті 2, де знаменник  $h_{\partial n}$  являє довжину обмотки додаткових полюсів у вікні, а чисельник є поточною висотою обмотки рахуючи від її верху до нижньої межі поточної трубки.

Розрахунки варто проводити двічі: для номінального режиму (ненасиченого, коли МРС ДП та якоря визначаються за значеннями номінального струму та лінійного навантаження, що відповідає номінальному режиму), а також для режиму робочого максимального перевантаження, наприклад, кратності 2,5 (найменшої за ГОСТ) до номінального, або заданого викладачем.

#### 7. МРС між вузлами схеми

$$F_{ab} = \frac{F_{\partial n}(Y_\delta + k_{p2}Y_2 + k_{p3}Y_3 + k_{p4}Y_4) - Y_\delta F_a}{Y_{\partial j} + Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4 + Y_\delta}$$

#### 8. Потоки в схемі:

$$\text{потік в станині } \Phi_j = Y_{\partial j} F_{ab},$$

потоки в гілках розсіювання:

$$\Phi_1 = F_{ab} Y_1; \quad \Phi_2 = Y_2(k_{p2} F_{\partial n} - F_{ab}); \quad \Phi_3 = Y_3(k_{p3} F_{\partial n} - F_{ab}); \quad \Phi_4 = Y_4(k_{p4} F_{\partial n} - F_{ab});$$

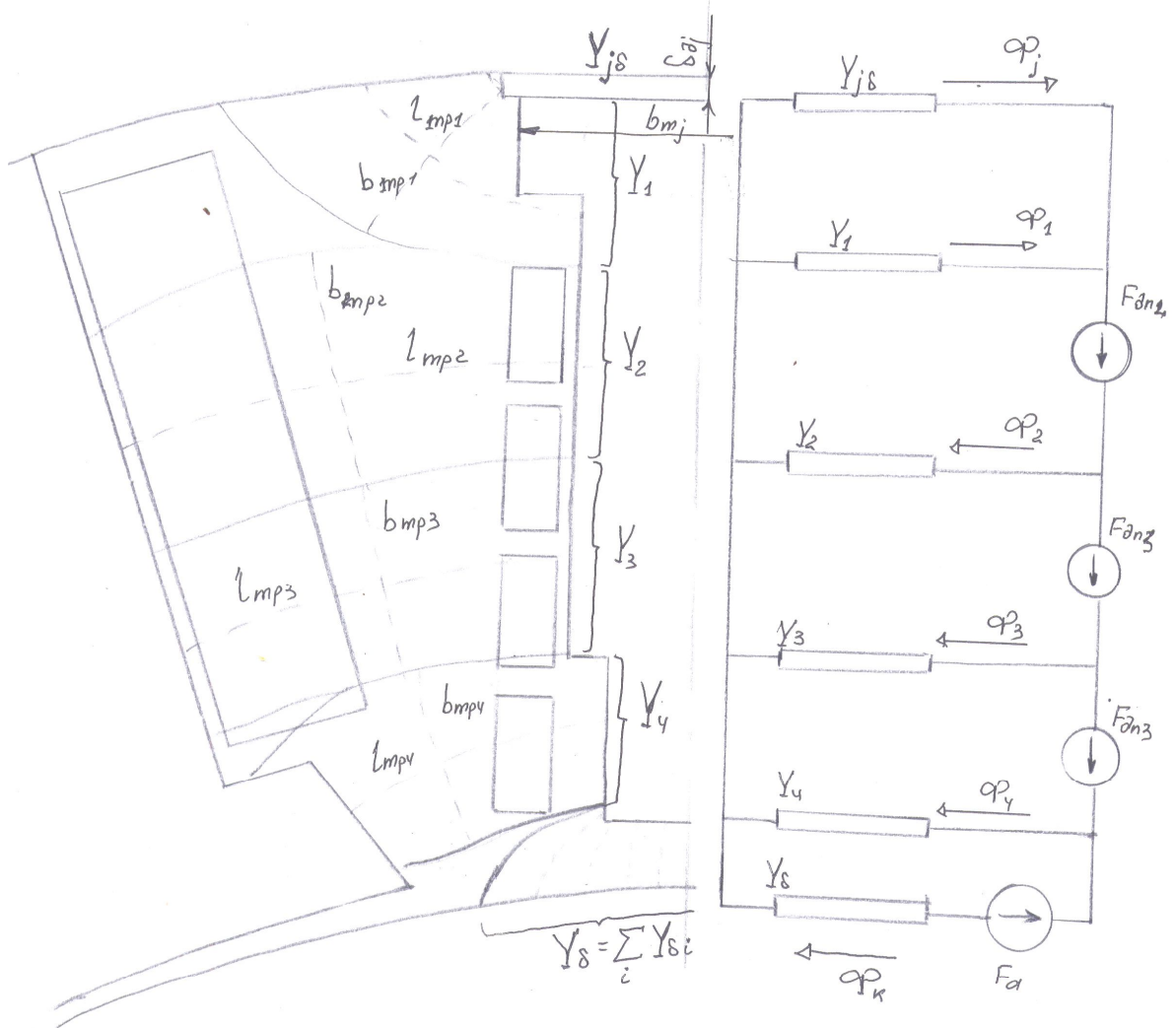
$$\text{комутуючий потік } \Phi_\kappa = Y_\delta(F_{\partial n} - F_a - F_{ab}).$$

9. Побудувати епюру магнітних індукцій вздовж осердя додаткового полюсу, індукції визначати за значенням потоку на ділянках з урахуванням їх перетинів (тільки для режиму перевантаження).

#### 10. Визначити коефіцієнт розсіювання додаткових полюсів

$$\sigma = \frac{\Phi_j}{\Phi_\kappa}.$$

# 11. Розрахунки оформити

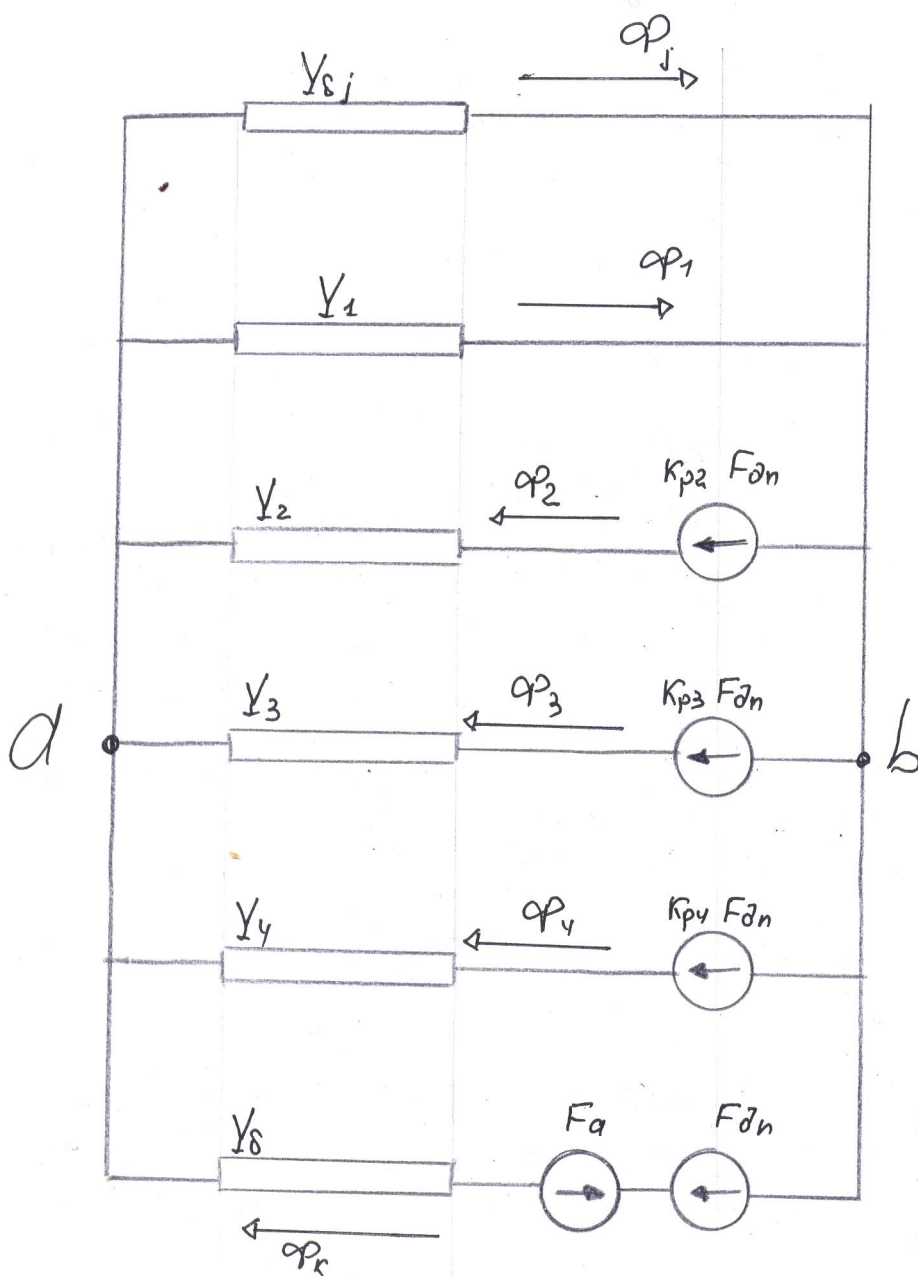


$$Y_{j8} = \mu_0 \cdot l \cdot \frac{b_{mj}}{\delta_{aj}};$$

$$Y_i = \mu_0 \cdot l \cdot \frac{b_{mpi}}{l_{mpi}}; \quad i = 1, 2, 3, 4; \quad F_{an i} \approx F_{an} \cdot \frac{b_{mpi}}{h_{an}};$$

$$Y_8 = \mu_0 \cdot l \cdot \sum_k \frac{b_{mp\delta k}}{l_{mp\delta k}}; \quad F_a = A \cdot \frac{\tau}{2};$$

Схема замещения цепи добавочного полюса



$$F_{\partial n} = w_{\partial n} \cdot I;$$

$$K_{p2} = \frac{b_{mp2}}{h_{\partial n}}; \quad K_{p3} = \frac{b_{mp2} + b_{mp3}}{h_{\partial n}};$$

$$K_{p4} = \frac{b_{mp2} + b_{mp3} + b_{mp4}}{h_{\partial n}};$$

Схема, преобразованная к двум узлам

## Заняття 2

### Обчислення магнітного кола додаткових полюсів методом схем заміщення (нелінійні режими)

Тема 7. Порушення комутації в перехідних режимах роботи двигунів та при пульсуючому живленні (16 годин)

1. Задачею цього заняття є дослідження впливу нелінійних властивостей станини та якорю при спільному проходженні потоків головних та додаткових полюсів, або задача про асиметрію пліч схеми заміщення та її впливу на комутуючий потік.
2. Реалізація задачі ґрунтується на розрахунковому дослідженні узагальненої схеми заміщення двохполюсної машини, наведеною на плакаті.
3. Нелінійність схеми призводить до розв'язання задачі ітераційним шляхом, тобто методами послідовного наближення. Реалізація задачі має бути комп'ютерною.
4. Параметри схеми заміщення визначаються на підставі задачі попереднього заняття (заняття 6) та результатів розрахунку магнітного кола машини і її кривої намагнічування.

*Ланка додаткових полюсів:*

- провідність повітряного зазору  $Y_{\delta}$  обчислено на занятті 6;
- нелінійна провідність  $Y_{\partial i}$  визначається за кривою намагнічування відповідної сталі:  $Y_{\partial i} = \frac{H_{\partial i} \times L_m}{\Phi_{\partial i}}$ , де магнітна напруга  $H_{\partial i}$  визначається за кривою намагнічування осердя полюсу відповідно до індукції  $B_{\partial i} = \frac{\Phi_{\partial i}}{S_{\partial i}}$ ,  $S_{\partial i}, L_m$  – відповідно вибраний перетин осердя полюсу і довжина магнітної ділянки полюса (як при розрахунку кривої намагнічування у завданні 3);
- провідність між вузлами 14 і 15 та між 8 і 9 дорівнює провідності  $Y_{\delta j}$ , як у занятті 6;

- визначення МРС  $F_a, F_{\partial n}$  таке саме, як і в занятті 6, але коефіцієнти розподілу МРС ДП (ГП) в міжполюсному вікні є

$$K_{pi} = K_{p2}, K_{pi+1} = \frac{h_{\partial n} - h_2}{h_{\partial n}}.$$

*Ланка головних полюсів:*

- провідність повітряного зазору та зубцової зони  $Y_{\Sigma} = \frac{F_{\delta} + F_z}{\Phi_{\delta}}$  обчислюється за кривою намагнічування машини (заняття 3);

- нелінійна провідність  $Y_{zi}$  визначається за кривою намагнічування відповідної сталі:  $Y_{zi} = \frac{H_{zi} \times L_m}{\Phi_{zi}}$ , де магнітна напруга  $H_{zi}$  визначається за кривою намагнічування осердя полюсу відповідно до індукції  $B_{zi} = \frac{\Phi_{zi}}{S_m}$ ,  $S_m, L_m$  – відповідно вибраний перетин осердя полюсу і довжина магнітної ділянки полюса (як при розрахунку кривої намагнічування у завданні 3);

- визначення МРС  $F_z$  – з МРС збудження, а коефіцієнти розподілу МРС ДП (ГП) в міжполюсному вікні такі самі, як і для додаткових полюсів.

*Ланка якорю:*

- нелінійна провідність  $Y_a$  визначається за кривою намагнічування відповідної сталі:  $Y_a = \frac{H_a \times L_a}{\Phi_a}$ , де магнітна напруга  $H_a$  визначається за кривою намагнічування осердя полюсу відповідно до індукції  $B_a = \frac{\Phi_a}{S_a}$ ,  $S_a, L_a$  – відповідно вибраний перетин осердя якоря і довжина магнітної ділянки якоря (як при розрахунку кривої намагнічування у завданні 3).



*Ланка станини:*

- нелінійна провідність  $Y_j$  визначається за кривою намагнічування відповідної сталі:  $Y_j = \frac{H_j \times L_j}{\Phi_j}$ , де магнітна напруга  $H_j$  визначається за кривою намагнічування осердя полюсу відповідно до індукції  $B_j = \frac{\Phi_j}{S_j}$ ,  $S_j, L_j$  – відповідно вибраний перетин осердя станини і довжина магнітної ділянки станини (як при розрахунку кривої намагнічування у завданні 3).

*Провідності розсіювання* мають відповідати тим, що були визначені у попередньому завданні (заняття 6), а саме  $Y_i = Y_1 + Y_2$ ,  $Y_{i+1} = Y_3 + Y_4$ .

5. В процесі ітерацій мають коригуватися провідності ділянок станини та якорю, які саме і впливають на дефіцит комутуючого потоку та визначають явище магнітної асиметрії. Ітераційний процес контролюється за величиною комутуючого потоку  $\Phi_k$ . Він припиняється, коли зміни комутуючого потоку між двома спільними ітераціями не перевищують задану точність (в межах 5%) методом.

6. Реалізація розрахунку схеми заміщення проводиться методом вузлових потенціалів, але із застосуванням методів топології електричних схем (подібний метод розглядається у курсі «Математичного моделювання електромеханічних систем»). Математично граф схеми заміщення моделюється за допомогою матриці сполучень (інциденцій) у якій строки відповідають за вузли схеми, а стовпці за гілки схеми. На перетині відповідного номеру гілки і вузла, тобто елементом матриці, є +1, якщо дана гілка виходить із даного вузла, -1, якщо дана гілка входить до даного вузла, або 0, якщо дана гілка і вузол не сполучені між собою. Для невиродженості матриці сполучень строку, що відповідає нульовому вузлу, потенціал якого згідно до методу вузлових потенціалів приймається рівним нулю, опускають, тоді вигляд матриці сполучень схеми представлено нижче:

# Вигляд матриці С

## ГІЛКИ

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
2	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0
6	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0

Метод вузлових потенціалів полягає у рішенні системи лінійних алгебраїчних рівнянь, права частина яких складається із власних та взаємних провідностей вузлів, а ліва – із вектору вузлових струмів.

Власна провідність вузла дорівнює сумі із знаком «плюс» всіх провідностей, які підходять до цього вузлу.

Взаємні провідності вузлів дорівнюють сумі усіх провідностей, які безпосередньо з'єднують названі вузли із знаком «мінус», таким чином, матриця вузлових провідностей є симетричною.

Вузловий струм – це добуток ЕРС гілок, приєднаних до даного вузлу, помножені на провідності цих гілок і взятих із знаком «плюс» в разі, якщо гілка до вузла підходить і зі знаком «мінус», якщо гілка відходить від вузла.

У матричному вигляді метод виглядає як

$$\Psi = Y^{-1} * F,$$

де  $\Psi$  – вектор потенціалів, що потребує знаходження, відносно базового (нульового) вузла;

$Y = C * R^{-1} * C^T$  – матриця вузлових провідностей;

$F = -C * R^{-1} * E$ , - вектор вузлових струмів, а  $E$  - вектор ЕРС гілок;

$I = R^{-1} * (E + C^T * \Psi)$  - вектор струмів гілок.

Вихідними даними для розрахунку мають бути:

- матриця  $R^{-1}$  провідностей гілок, що має діагональний вигляд розміром  $28 \times 28$ , головну діагональ якої складають провідності гілок схеми згідно прийнятої нумерації;

- $C^T$  транспонована матриця з'єднань;

- $E$  вектор ЕРС гілок, елементами якого є ЕРС гілок із позитивним знаком, якщо вибраний напрямок струму гілки співпадає із напрямком ЕРС і навпаки.

Ці дані студенти мусять заносити до програми самостійно. Решта обчислень реалізована у вигляді програми на мові MatLab у вигляді М-книги.

7. Розрахунок варто провести двічі – перший раз для ненасиченого стану магнітної системи, що відповідає номінальному режиму роботи, а другий раз для режиму максимального робочого перевантаження із коефіцієнтом  $K_{пер}$ .

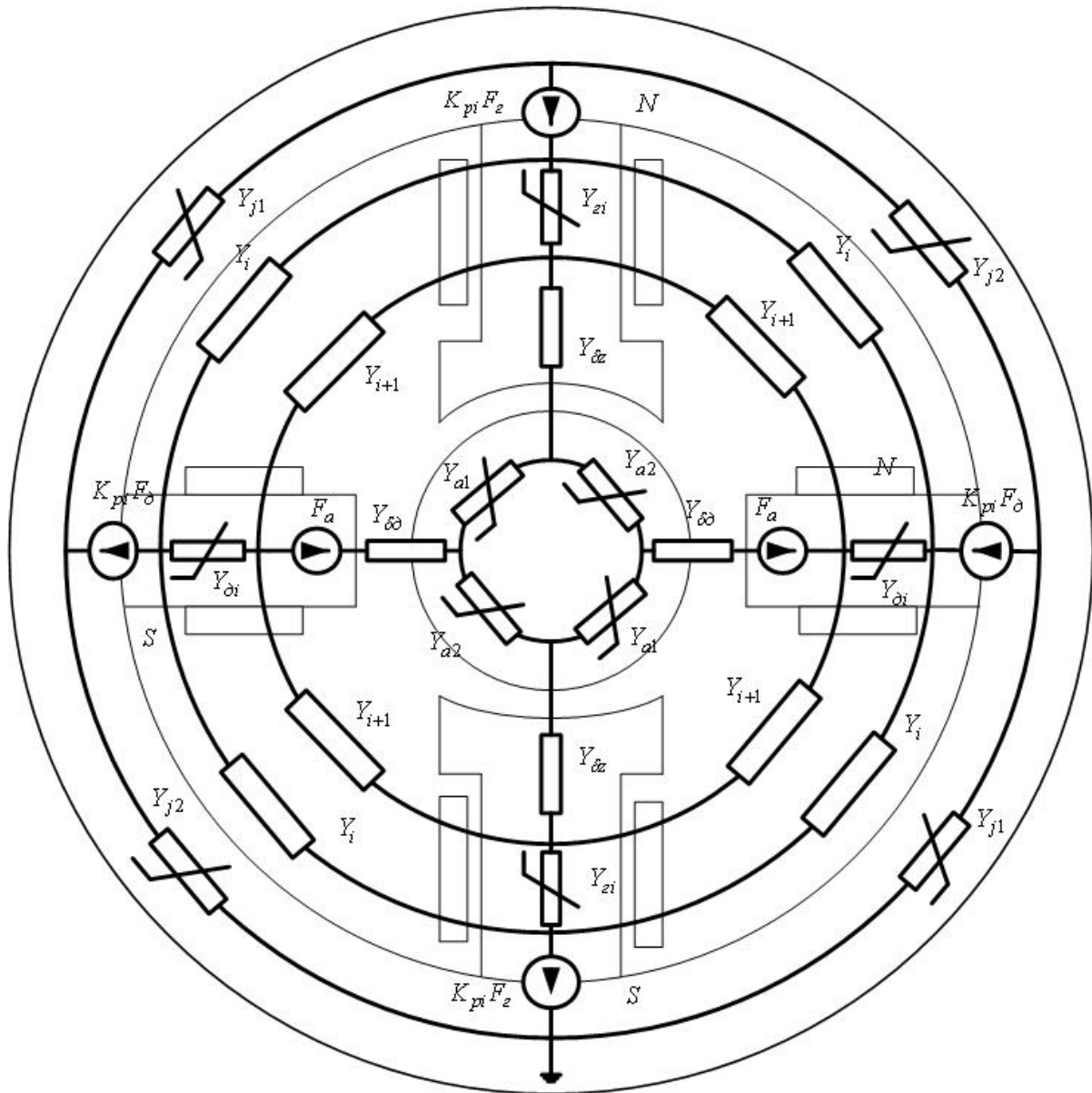
Дефіцит комутуючого потоку оцінюється як

$$\Delta\Phi_{нб} = \frac{\kappa_{пер} \times \Phi_{кном} - \Phi_{кпер}}{\kappa_{пер} \times \Phi_{кном}} \times 100\%,$$

Небалансна комутуюча ЕРС визначається як

$$\Delta e_{нб} = (\kappa_{пер} \times e_{гнно} + 0.5) \times \frac{\Delta\Phi_{нб}}{100}, B,$$

де  $e_{гнно}$  – номінальне значення реактивної ЕРС.



### Заняття 3.

#### Тепловетиляційні розрахунки тягових машин

Тема 10. Тепловий стан тягових електродвигунів. Режими роботи тягових моторів за тепловим станом. Термотривкість ізоляції. Теплові розрахунки тягових моторів (16 годин)

#### Метод дослідження

Перегрів окремих ділянок обмоток можуть відрізнятися від середніх величин. Тому для надійної оцінки теплового стану тягового двигуна потрібна перевірка допустимих нагрівів в критичних місцях основних обмоток.

Такими місцями є струмопровідні частини машини. Гірші умови охолодження мають внутрішні області багат шарових обмоток полюсів, окремі частини якірних стрижнів або стрижнів компенсаційної обмотки. Темою практичного заняття буде визначення максимальних очікуваних температур нагріву стрижнів. У якості стрижня розглянемо секції якірної обмотки.

Теоретичний матеріал, наданий у посібнику, знайомить студентів із тепловими схемами заміщення – аналогом електричних схем, де в якості струмів виступають теплові потоки, визначувані втратами потужності у ділянках (гілках) схеми, в якості напруг застосовуються перепади температури на ділянках (сама температура еквівалентна до електричного потенціалу), також визначаються теплові опори ділянок  $R_{\lambda} \left[ \frac{\text{град}}{\text{Вт}} \right]$ . Теплові опори розрізняють на

опори теплопровідності  $R_{\lambda} = \left( \frac{1}{\lambda_{yc}} \right) \cdot \frac{\delta_{yc}}{S_{yc}}, \frac{\text{град}}{\text{Вт}}$ , де  $\lambda_{yc}$  – коефіцієнт теплопровіднос-

ті ділянки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{град}}$  і опори конвективного теплообміну  $R_{\alpha\delta} = \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot S_a}, \frac{\text{град}}{\text{Вт}}$ ,

де  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні (КТО)  $S, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{град}}$ .

В чистому виді метод теплових схем заміщення застосовують рідко. Але у поєднанні із іншими дослідницькими методами він має звичайне своє застосування. Таким прикладом буде розгляд задачі розподілу температури уздовж стрижня, що описується диференціальним рівнянням

$$\lambda_m \frac{d^2 \theta}{dx^2} - \frac{u}{f} w_s + q_0 (1 + \alpha_t \theta) = 0$$

тут  $\lambda_m$  – теплопровідність провідника, для міді,  $u$ ,  $f$  – відповідно периметр і площа поперечного перетину провідника  $w_s$  – кількість тепла, відведена з одиниці зовнішньої поверхні провідника (щільність теплового потоку),  $q_0$  – втрати в одиниці об'єму провідника тепла при 20°C,  $\alpha_t$  – температурний коефіцієнт опору, для міді  $\alpha_t = 0.004 \text{ } 1/\text{град}$ .

В рівнянні третій доданок характеризує внутрішні тепловиділення, а другий – тепловіддачу з ділянки, тому саме ця складова є для кожної з ділянок визначаючою, її представляють у вигляді теплового опору відповідної ділянки.

В режимі теплового балансу тепловий потік, що проходить шляхами теплопровідності, шляхом конвективного теплообміну передається охолоджуючому середовищу. Для  $i$ -ї ділянки стрижня це означає

$$w_s = \frac{\lambda_{iu}}{\beta_{iu}} (\theta - \theta_{из}) = \alpha_i (\theta_{из} - \theta_{среды})$$

виключаючи  $\theta_{из}$ , одержуємо вираження для результуючого КТО ділянки або питомого його теплового опору

$$\alpha_{pi} = \frac{1}{\frac{\beta_{iu}}{\lambda_{ui}} + \frac{1}{\alpha_i}} = \frac{\lambda_{iu} \alpha_i}{\beta_{iu} \alpha_i + \lambda_{iu}},$$

тут  $\beta_{из}$  – товщина ізоляції на ділянці  $\lambda_{из}$ , – теплопровідність ізоляції, для класу нагрівостійкості "F" і "H",  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі з поверхні ділянки, Вт / (м<sup>2</sup> град).

Рівняння розподілу температури по довжині стрижня представляється як

$$\lambda_m \frac{d^2\theta}{dx^2} - \frac{u \cdot \alpha(\theta - \theta_{\text{среди}})}{f} + q_0(1 + \alpha_i \theta) = 0 \quad \text{або}$$

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} - a_i^2 \theta + b_i = 0,$$

$$a_i^2 = \frac{1}{\lambda_m} \left( \frac{u \cdot \alpha_{pi}}{f} - \alpha_i q_0 \right), \quad b_i = \frac{1}{\lambda_m} (q_0 + \alpha_{pi} \cdot \theta_{\text{среди}} \cdot \frac{u}{f})$$

$q_0$  – втрати в одиниці об'єму провідника, де  $j$  – щільність струму на ділянці, а  $\rho_m$  – питомий опір мідного провідника при 20°C  $\rho_m = 0.176 \times 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

Форма рішення основного рівняння залежить від знаку  $a_i^2$ , при  $a_i^2 > 0$ .

$$\theta_i(x) = C_i e^{a_i x} + B_i e^{-a_i x} + \frac{b_i}{a_i^2};$$

а при  $a_i^2 < 0$   $\theta(x) = C_i \cos(a_i x) + B_i \sin(a_i x) - \frac{b_i}{a_i^2}.$

Але в обох випадках постійні інтегрування  $C_i$  і  $B_i$  визначаються граничними умовами для ділянок, що становлять стрижень, з умови рівності температури кінця попереднього і початку наступної ділянки, а також перших похідних на границі ділянок. Тому для визначення постійних  $C_i$  і  $B_i$  вирішують систему лінійних рівнянь, порядок якої визначається кількістю ділянок розбиття.

### Опис задачі

Уявляючи секцію обмотки як стрижень, виділяємо на ній 4 ділянки, згідно до плакату (див. нижче)

1-а – передня лобова частина, 2-а – пазова частина, 3-я – задня лобова частина, 4-а – півнік колектора та колекторна пластина.

Згідно до зазначеного поділу відбувається індексація відповідних параметрів цих ділянок. Відповідно до наведених рішень основного рівняння для характеристики ділянки слід мати такі параметри:

- периметри теплоохолодження  $u_i$ ;
- перетини провідників  $f_i$ ;
- $q_0$  – втрати в одиниці об'єму провідника;
- товщину ізоляції  $\beta_{из}$ ;
- КТО ділянок.

### Ділянки лобової частини 1 і 3

Теплоохолоджуючі периметри дорівнюють подвоєній ширині котушки обмотки у лобовій частині, яка визначається конструктивно побудовою ескізу за ізоляційною нормаллю, подібною до побудови пазової ізоляції.

$$u_1 = u_3 = 2b_{\text{катушки}}$$

перетини ділянок є перетинами котушки

$$f_1 = f_3 = u_n s_a$$

де  $u_n$  – число секцій в котушці, а  $s_a$  – перетин провідника обмотки.

втрати в одиниці об'єму

$$q_1 = q_3 = \left( \frac{2i_a u_n}{s_a} \right)^2 \times 0.176 \cdot 10^{-7}$$

тепловідведення ділянок лобових частин відбувається в двох напрямках – напрямку бандажу та у напрямку обмоткоутримувача. Відповідно до цього розглядаються дві товщини ізоляції – у бік бандажу

$$\beta'_{из} = \delta_{\text{бандаж}} + \frac{\delta_{\text{корпусная лобовая}}}{2}$$

– та у бік обмоткоутримувача

$$\beta''_{из} = \delta_{\text{подбандаж}} + \frac{\delta_{\text{корпусная лобовая}}}{2}$$

результуючий приведений коефіцієнт тепловіддачі лобових ділянок обчислюється за формулою

$$\alpha_{\text{резі}} = \frac{1}{2 \times \frac{l_{\text{лобов}}}{l_{\text{вылета}}}} \left[ \frac{1}{\frac{\beta'_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha'_i}} + \frac{1}{\frac{\beta''_{из}}{\lambda_{из}} + \frac{1}{\alpha''_i}} \right],$$

де відношення довжини лобової частини до її вильоту  $\frac{l_{\text{лобов}}}{l_{\text{вылета}}} \approx 1.4$ .



## Ділянки пазової частини 2

Теплоохолоджуючий периметр визначають на підставі ескізу паза і він дорівнює

$$u_2 = 2a_{\text{катушки}} + b_{\text{катушки}}.$$

Перетин ділянок є перетином катушки і такий самий як і на попередній ділянці

$$f_2 = f_1 = f_3 = u_n s_a$$

теж саме стосується і втрат в одиниці об'єму

$$q_1 = q_2 = q_3 = \left( \frac{2i_a u_n}{s_a} \right)^2 \times 0.176 \cdot 10^{-7}$$

тепловідведення пазової частини йде у напрямку стінок пазу, тому товщина ізоляції приймається  $\beta_2 = \delta_{\text{корпусная}} + \frac{\delta_{\text{витковая}}}{2}$  (див. ескіз пазу).

Алгоритм визначення приведенного коефіцієнту тепловіддачі пазової ділянки досить складний, **факультативно він наведений нижче** (позначення величин загальноприйняті, як, наприклад, у посібнику). Викладач може уникати цього розгляду і задавати цю величину (вона неодмінно вища за відповідні КТО лобових частин).

$$F_1 = (\pi D_a - Z b_n) l,$$

$$F_2 = \pi D_i l,$$

$$F_3 = 2 \left[ \frac{\pi}{4} (D_a^2 - D_i^2) - Z b_n h_n \right]$$

$$\alpha_c = \frac{\alpha_a F_1 + \alpha_i F_2}{F_1 + F_2}$$

$$\Lambda_{Fe} = \frac{\lambda_{uz}}{\beta_2} u_2 l Z$$

$$\Lambda_S = \frac{6 F_3 k_q}{l}$$

де  $k_q = 4 \text{ Вт} / \text{м} \times \text{град}$  – коефіцієнт теплопровідності впоперек шихтованого заліза,

$$\Lambda_p = \Lambda_{Fe} (F_1 + F_2),$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{\Lambda_{Fe}}{\Lambda_p}}$$

$$\lambda_{\text{вк}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{вк}}} + \frac{\beta_2}{\lambda_{\text{из}}}}$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{\text{вк}} + \gamma \frac{\lambda_{\text{из}}}{\beta_2}}{l}$$

В ці вирази входять такі КТО:  $\alpha_{\text{вк}}$  – КТО у вентиляційному каналі,  $\alpha_a$  – КТО із зовнішньої поверхні якоря у зазор,  $\alpha_i$  – КТО із внутрішньої поверхні якоря.

#### ***Ділянка колекторного півника і колектора 4***

Теплоохолоджуючий периметр дорівнює подвоєній ширині півника, може бути прийнятий  $u_4 = 2b_{\text{мет}} = 0.05 \text{ м}$ .

Перетин дорівнює перетину півника і може бути прийнятий  $f_4 = s_{\text{мет}} = 0.48 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ .

Втрати в одиниці об'єму  $q_4 = \left( \frac{4i_a}{f_4 \times \frac{K}{a}} \right)^2 \times 0.176 \cdot 10^{-7}$ , де  $K$  – число колектор-

них пластин, а  $a$  – число пар гілок якірної обмотки.

Ізоляції ділянка не має, а коефіцієнт тепловіддачі не приводиться, відразу заданий у вихідних даних.

#### ***Зауваження (факультативний матеріал)***

Певну погрішність в розрахунок вносить визначення коефіцієнтів тепло-віддачі ділянок  $\alpha_i$ . Взагалі, визначення КТО є ключовим моментом всякого теплового розрахунку. Тут рекомендується використання теорії подоби і рекомендації, приведені в літературі.

Коефіцієнт тепловіддачі обмотки залежить від швидкості охолоджуючого повітря і може бути визначений по наступних формулах:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_{\text{возд}}}{d_z} \quad \lambda_{\text{возд}} = 0,0266 \frac{Вт}{м \times ^\circ C} -$$

теплопровідність повітря,  $d_r$  – еквівалентний гідравлічний діаметр вікна, рівний відношенню  $d_z = \frac{4F_{\text{окна}}}{P_{\text{окна}}}$ ,

тут  $F_{\text{окна}}$ ,  $P_{\text{окна}}$  – площа вікна для проходу повітря і периметр цього простору відповідно,  $Nu$  – критерій Нуссельта, який, у свою чергу, визначається через критерії Рейнольдса  $Re$  і Прандтля  $Pr$ . Для повітря значення останнього критерію дорівнює

$$Pr=0.734.$$

$v_v$  – швидкість охолоджуючого повітря в м/с, яка визначається з вентиляційного розрахунку машини  $v=0,1752 \times 10^{-4} \text{ м}^2 / \text{с}$  – кінематична в'язкість повітря. Параметр  $\Lambda$  визначається геометрією вікна, точніше відношенням  $p$  його висоти до ширини

$$\Lambda = \frac{1}{11,6 + 17,76p + 10,44p^2}.$$

Приведене співвідношення застосовується для розрахунку КТО в зоні міжполюсних вікон, області лобових частин якірної обмотки (камер колектору та ін.).

Для розрахунку КТО сполучних дуг компенсаційної обмотки можна користуватися критерійною залежністю

$$Nu = 0.0432 Re^{0.78}$$

Для розрахунку КТО в повітряному зазорі двигуна прийнятні критерійні співвідношення:

$$Nu = 0.027(Re \times Pr)^{0.78}$$

Для розрахунку КТО в аксіальних вентиляційних каналах довжиною  $l$  і діаметром  $d$  застосовується співвідношення

$$Nu = 0.032 Re^{0.8} Pr^{0.3} \left(\frac{l}{d}\right)^{-0.054}$$

### **Формування системи лінійних рівнянь для визначення постійних інтегрування**

В найбільш часто зустрічаючихся випадках значення  $a_i^2 > 0$ , тому для пояснення формування системи рівнянь виходимо із рішення

$$\theta_i(x) = C_i e^{a_i x} + B_i e^{-a_i x} + \frac{b_1}{a_1^2}; \quad (1)$$

$$\text{його похідна} \quad \theta'(x) = a_i(C_i e^{a_i x} - B_i e^{-a_i x}). \quad (2)$$

Треба визначити для 4-х ділянок 8 невідомих коефіцієнтів. Між 4-ма ділянками буде лише три межі, кожна з яких дасть по 2 рівняння (рівність температури та її похідної), отже за граничними умовами маємо лише 6 рівнянь. Решту з двох рівнянь для однозначного визначення усіх коефіцієнтів отримуємо з умови рівності нулю похідних на початку та на кінці стрижня. Це цілком справедливо, бо саме в цих місцях є локальні екстремуми температури (ділянка колектора відповідає мінімуму, а ділянка передньої лобової частини, початок якої відповідає найбільш нагрітому місцю в середині гнutoї голівки секції). Як відомо, умови екстремуму відповідають нульовій похідній. Тому недостатні два рівняння витікають саме з цієї умови і означають

$$C_1 = B_1; \quad C_4 = B_4.$$

Решту умов отримуємо з рівнянь (1) і (2) на границях ділянок і зводимо до таблиці.

#### ЛІВА ЧАСТИНА

$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$B_2$	$B_3$
$e^{a_1 L_1} + e^{-a_1 L_1}$	-1	0	0	-1	0
$a_1(e^{a_1 L_1} - e^{-a_1 L_1})$	$-a_2$	0	0	$a_2$	0
0	$e^{a_2 L_2}$	-1	0	$e^{-a_2 L_2}$	-1
0	$a_2 e^{a_2 L_2}$	$-a_3$	0	$-a_2 e^{-a_2 L_2}$	$a_3$
0	0	$e^{a_3 L_3}$	$-(e^{a_4 L_4} + e^{-a_4 L_4})$	0	$e^{-a_3 L_3}$
0	0	$a_3 e^{a_3 L_3}$	$-a_4(e^{a_4 L_4} - e^{-a_4 L_4})$		$-a_3 e^{-a_3 L_3}$

**Зауважте! Напрямок останньої (4-ї) ділянки вибрано протилежним до перших трьох з метою спрощення системи.**

#### ПРАВА ЧАСТИНА

1	2	3	4	5	6
$\frac{b_2}{a_2^2} - \frac{b_1}{a_1^2}$	0	$\frac{b_3}{a_3^2} - \frac{b_2}{a_2^2}$	0	$\frac{b_4}{a_4^2} - \frac{b_3}{a_3^2}$	0

Розв'язання цієї системи доцільно провести за допомогою ЕОМ.

#### *Визначення максимумів температури на ділянках*

В силу проведеного аналізу і прийнятих умов при знаходженні постійних інтегрування, зміна функції температури на 1-й та 4-й ділянках є монотонною,

тому максимум температури для першої ділянки (лобова частина) спостерігається при  $x = 0$ , а максимум температури на 4-й ділянці (колектора) спостерігається на кінці ділянки  $x = L_4$  (враховуючи зміну напрямку відліку).

Щодо 2-ї та 3-ї ділянок, то тут пошук екстремумів температури проводиться розв'язанням рівняння нулю першої похідної (2).

$$x_{\max i} = \frac{1}{2a_i} \ln\left(\frac{B_i}{C_i}\right), i = 2, 3.$$

$$\text{Відповідно } \theta_{\max} = C_i e^{a_i x_{\max}} + B_i e^{-a_i x_{\max}} + \frac{b_i}{a_i^2}, i = 2, 3.$$

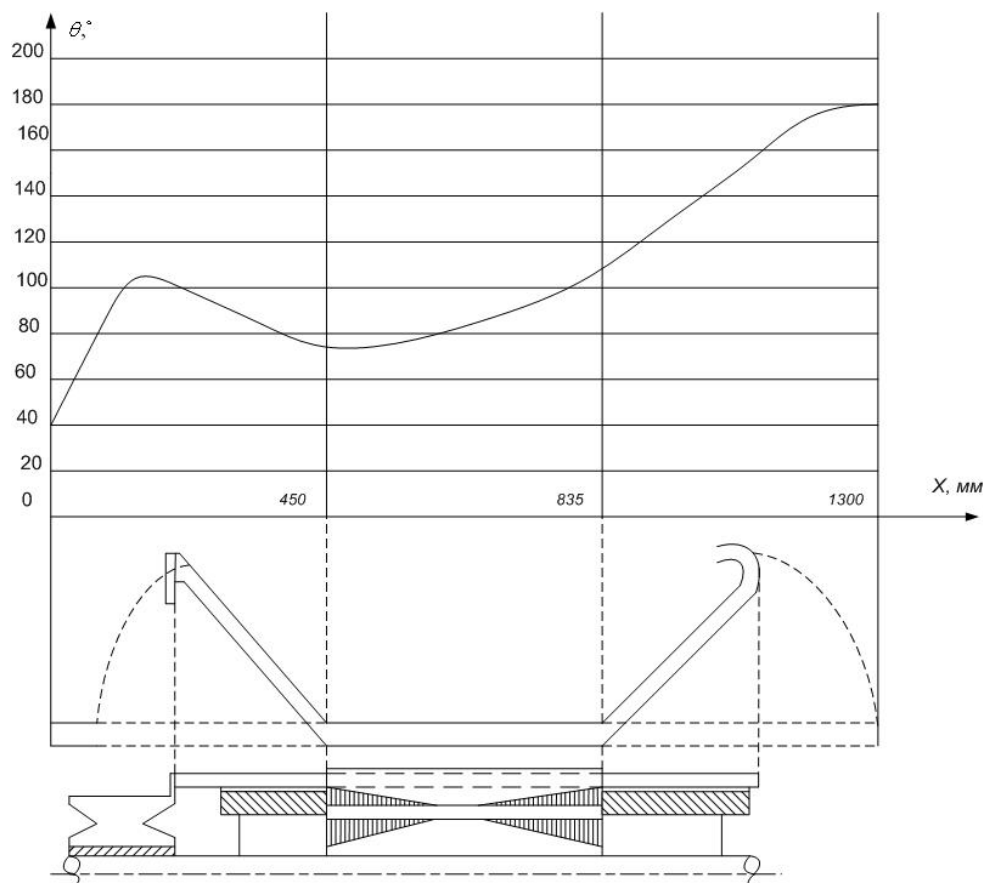
### ***Визначення середньої температури***

Середня температура визначається як середня математична величина

$$\theta_{\text{сеп}} = \frac{1}{L_1 + L_2 + L_3 + L_4} \left[ \int_0^{L_1} \theta(x) dx + \int_0^{L_2} \theta(x) dx + \int_0^{L_3} \theta(x) dx + \int_0^{L_4} \theta(x) dx \right]$$

Студентам пропонується самостійно провести потрібні перетворення і визначити середню температуру стрижня.

Варто тепер порівняти значення максимальних температур стрижня з його середнім значенням і зробити висновок про стан нагріву ізоляції.



## Заняття 4.

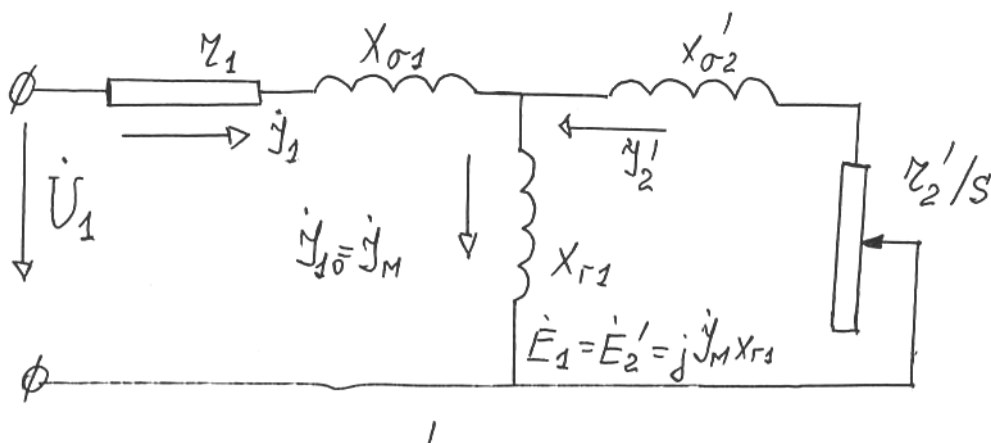
### Визначення параметрів схеми заміщення та побудова кругової діаграми асинхронного двигуна

#### Тема 12. Асинхронні тягові двигуни (28 годин)

1. За вихідними даними, які наведені нижче, для асинхронного трифазного двигуна з частотою живлячої напруги 50 Гц розрахувати параметри Т-подібної схеми заміщення та робочу механічну характеристику за формулою Клоса.

№ вар	P <sub>н</sub> , кВт	пн, об/мин	M <sub>мах</sub> /M <sub>н</sub>	статор						ротор				J, кг*м <sup>2</sup>	Схема д. торм.
				cosφ		I <sub>1ном</sub> , А	I <sub>10</sub> , А	r <sub>1</sub> , Ом	x <sub>s1</sub> , Ом	E <sub>рном</sub> , В	I <sub>2ном</sub> , А	r <sub>2</sub> , Ом	x <sub>s2</sub> , Ом		
				ном	хх										
1	2,2	885	2,3	0,72	0,39	7,2	5,2	3,67	2,47	135	12,8	0,61	0,506	0,05	1
2	3,5	910	2,5	0,73	0,35	10,3	7,5	2,09	1,56	204	12,2	0,77	0,73	0,08	2
3	5	940	2,9	0,68	0,32	14,9	10,9	1,11	1,07	164	20,6	0,24	0,406	0,15	3
4	7,5	945	2,8	0,69	0,27	20,9	15	0,685	0,735	227	21,6	0,29	0,544	0,2	4
5	11	953	3,1	0,71	0,24	28,4	19,2	0,415	0,465	200	35,4	0,132	0,27	0,3	5
6	7,5	702	2,6	0,69	0,22	21,2	16,7	0,788	0,898	185	28	0,211	0,33	0,3	6
7	11	715	2,9	0,67	0,22	30,8	22,2	0,43	0,515	155	46,7	0,084	0,171	0,6	1
8	16	718	3	0,69	0,22	42,5	29,6	0,271	0,354	222	46,3	0,105	0,24	0,8	2
9	22	723	3	0,7	0,23	56,5	36,1	0,179	0,297	197	70,5	0,05	0,136	1,5	3
10	30	725	3	0,74	0,23	71,6	44	0,136	0,225	257	74,3	0,06	0,174	1,8	4
11	30	574	3,3	0,67	0,2	80	55	0,113	0,273	142	133	0,023	0,038	4	5
12	45	577	3,2	0,71	0,18	110	71	0,065	0,186	206	138	0,028	0,055	4,9	6
13	60	577	2,9	0,77	0,16	133	73,8	0,055	0,16	153	160	0,033	0,07	6	1
14	80	582	3,3	0,71	0,23	190	119	0,028	0,113	294	167	0,027	0,07	10	2
15	100	584	3,3	0,71	0,19	239	149	0,02	0,088	368	170	0,03	0,082	12	3
16	125	585	3,4	0,73	0,18	286	170	0,015	0,073	442	175	0,034	0,1	15	4
17	1,4	885	2,3	0,65	0,15	5,3	3,9	5,98	3,93	112	9,3	0,695	0,57	0,02	5
18	2,2	895	2,3	0,67	0,13	7,5	5,4	3,6	2,58	144	11	0,67	0,585	0,04	6
19	3,5	915	2,3	0,7	0,11	10,5	6,6	2,16	2,03	181	13,7	0,525	0,755	0,05	1
20	5	925	2,5	0,69	0,12	14,8	9,5	1,32	1,39	206	16,6	0,5	0,43	0,08	2

2. Вигляд схеми заміщення наведено на рисунку.



Коефіцієнт приведення опорів вторинної обмотки до первинної і параметри схеми заміщення:

$$k = k_e^2 = \left( \frac{U_{1ном}}{E_{рном}} \right)^2; \quad x'_{\sigma 2} = k \times x_{\sigma 2}; \quad r'_2 = k \times r_2.$$

$$x_k = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}; \quad r_k = r_1 + r'_2. \quad x_{e1} = \frac{U_1}{I_{10}}$$

$$\text{Номінальний опір ротора } R_{2ном} = \frac{E_{рном}}{\sqrt{3} \times I_{2ном}}.$$

Механічна характеристика асинхронного двигуна традиційно представляється як залежність моменту від ковзання двигуна  $M(s)$ .

Для визначення ковзання потрібно визначити швидкість холостого ходу двигуна (швидкість обертання поля статора)  $\omega_0(n_0)$ . Остання визначається за номінальними даними згідно до таблиці (найближче більше значення із таблиці від номінальної частоти обертання). Також із цієї ж таблиці можна визначити число полюсів статора двигуна  $p$ .

$p$	1	2	3	4	5	6
$n_0, \text{об/мин}$	3000	1500	1000	750	600	500

$$\text{Ковзання } s = \frac{n_0 - n}{n_0}, \text{ навпаки, } n = n_0 \times (1 - s).$$

Вигляд характеристики визначається **формулою Клоса**

$$M(s) = \frac{(2+q)M_k}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + q}.$$

де  $s_k$  – критичне ковзання

$$s_k = \frac{r_2'}{\sqrt{r_k'^2 + x_k^2}}$$

$M_k$  – критичний момент

$$M_k = \frac{3U_1^2}{2\omega_0(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2})}, \quad \omega_0 = n_0 \times \frac{\pi}{30}.$$

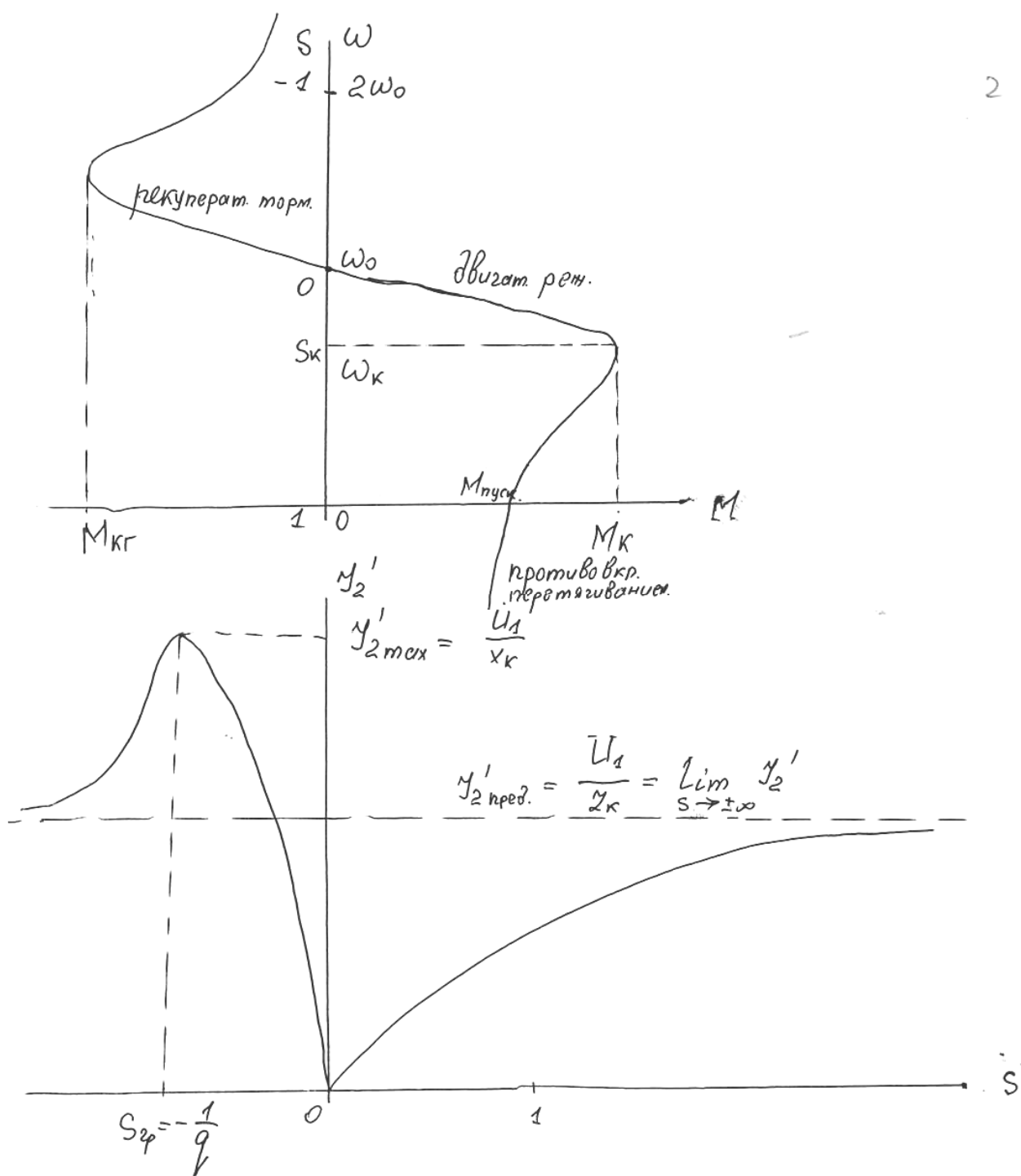
$$q = \frac{2r_1}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}.$$

Рівняння електромеханічної характеристики

$$I_2'(s) = \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + x_k^2}}$$

За формулами  $M(s)$ ,  $i_2'(s)$  слід збудувати таблиці значень характеристик (природньої), а самі характеристики відобразити на міліметрівці. Їхній вигляд наведено на рисунку.





### 3 Поняття та обґрунтування кругової діаграми асинхронного двигуна

Наступним завданням є побудова на міліметрівці кругової діаграми заданого асинхронного двигуна із графічним визначенням робочих характеристик.

Безпосередньо із схеми заміщення витікає, що струм статора визначається як

$$I_1 = \dot{U}_1 \frac{Z_m + Z_2'}{Z_1 Z_m + Z_2' (Z_1 + Z_m)},$$

з огляду на те, що комплексні опори  $Z_1$  і  $Z_m$  від ковзання  $s$  не залежать, а приведений опір роторного кола  $Z_2' = \frac{r_2'}{s} + jx_2'$  залежить від ковзання, то при  $U_1 = const$ , графік виразу струму статора при зміні величини ковзання  $s$

$$I_1 = \frac{\dot{a} + \dot{b}s}{\dot{c} + \dot{d}s}$$

представляє собою коло. Така властивість порушується щоправда для широко поширених асинхронних двигунів з пусковою обмоткою на роторі, або глибокопазних, де вигляд окружності спотворюється з-за зміни параметрів схеми заміщення за рахунок дії вихрових струмів чи змін самих опорів, тому розгляд для цих випадків не проводиться.

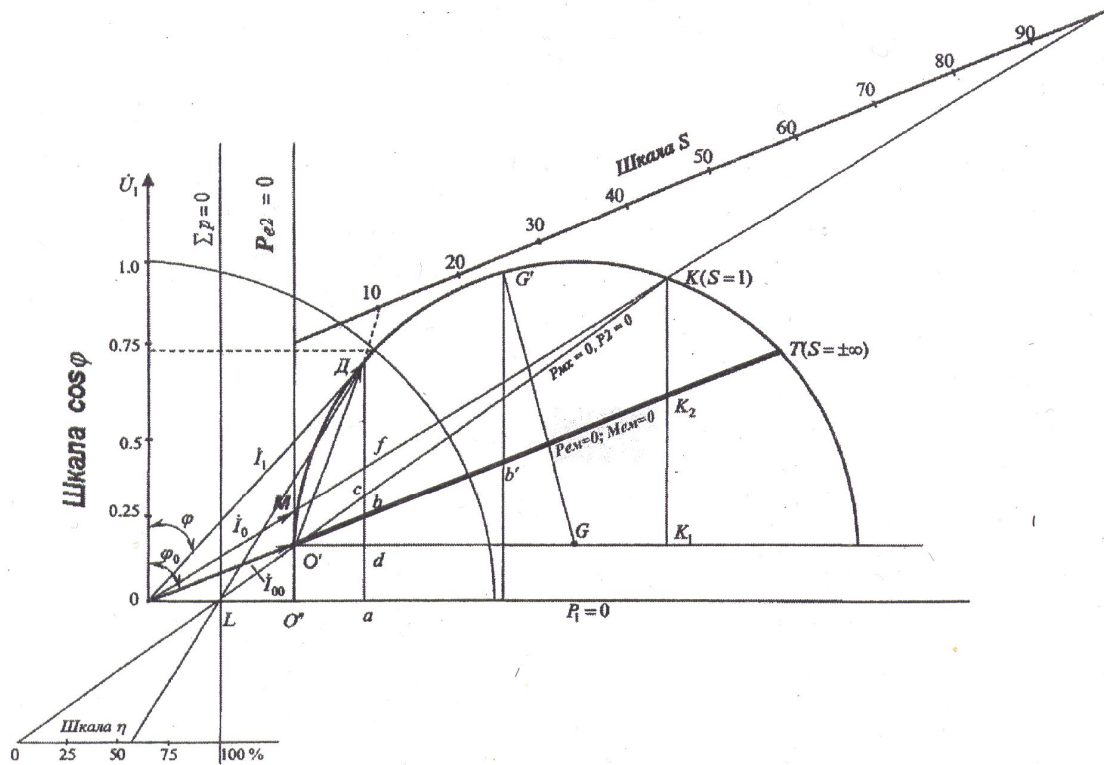
Самий вигляд кругової діаграми наведено нижче.

Наочний вигляд характеристик за допомогою кругової діаграми та їхнє визначення спирається на відлік відповідних відтинків, помножених на масштабні коефіцієнти відповідних величин, останні позначені латинськими літерами  $m_*$ , (в якості зірочки \* виступатимуть відповідні індекси величин).

$$I_1 = I_{10} + (-I_2'), \quad I_{10} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m}$$

при  $U_1 = const$  вектор струму  $I_{10} = const$ , він відповідає нульовому ковзанню  $s=0$ .

Відносно вибраного вертикального вектора напруги  $U_1$  він розташований під кутом  $\varphi_0 = \arctg \frac{x_1 + x_{21}}{r_1 + r_{\text{магн}}}$ . Цей вектор задає *першу характерну точку*  $O'$  діаграми, що відповідає нульовому ковзанню.



Струм навантаження ротора визначається як

$$-I_2' = \frac{\dot{U}_1}{(r_1 + \frac{r_2'}{s}) + j(x_1 + x_2')},$$

звідки витікає, що діаграма цього струму при зміні ковзання являє собою коло з діаметром  $\frac{U_1}{(x_1 + x_2')}$ . Цей годограф є *допоміжною побудовою*, яка дозволяє визначити головні характерні точки. Перша характерна точка на ній співпадає з початком координат  $O$ . Друга характерна точка  $K$  пускового режиму при ковзанні  $s = 1$  розташована відносно вектору напруги під кутом  $\varphi_s = \arctg \frac{x_1 + x_{21}}{r_1 + r_2'}$ .

Третя характерна точка Т відповідає значенням ковзання  $s = \pm\infty$  і цей відрізок розташований відносно вектору напруги під кутом  $\varphi_T = \arctg \frac{x_1 + x_{e1}}{r_1}$ .

Відповідно три характерні точки дають на діаграмі три головні робочі режими: – дуга ОК  $1 \geq s > 0$ , режим двигуна, – дуга КТ  $1 \leq s < +\infty$ , режим електромагнітного гальма, – дуга ОТ  $-\infty < s < 0$ , режим генераторний.

Зсувом допоміжної діаграми  $I_2'$  на величину вектору  $\dot{I}_{10}$  одержуємо робочу кругову діаграму (див плакат).

#### **4 Розрахунок робочих характеристик за круговою діаграмою**

Підведена потужність  $P_1$ :

Вона визначається активним значенням струму статора.

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \sim I_1 \cos \varphi_1. \quad I_{1a} = m_I \times Da, \quad P_1 = Da \times m_P, \quad m_P = m_I \times (m_1 U_1).$$

Вісь абсцис називають лінією підведеної потужності  $P_1 = 0$ .

Електромагнітна потужність  $P_{em}$

$P_{em} = m_1 (I_2')^2 \frac{r_2'}{s}$ , оскільки годограф струму  $I_2'$  є колом, то лінія потужності  $P_{em}$  є лінією, проведеною через точки на колі де ця потужність дорівнює нулю. Цими точками є точка О,  $s=0$  де  $I_2'=0$  і точка Т ( $s=\infty$ ). Тому лінія ОТ є лінією електромагнітної потужності і позначається  $P_{em}=0$ . Одночасно вона є і лінією електромагнітного моменту  $M_{em}=0$ , бо  $M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_0}$ .

$$P_{em} = Dv \times m_P, \quad M_{em} = Dv \times m_M, \quad m_M = \frac{m_P}{\omega_0}.$$

Повна механічна потужність  $P_{mx}$

$$P_{mx} = m_1 (I_2')^2 \cdot r_2' \times \frac{1-s}{s}, \text{ точки нуля механічної потужності є О (s=0), } I_2'=0, \text{ і}$$

К ( $s = 1$ ). Лінією механічної потужності ( $P_{mx} = 0$ ) є лінія ОК.

$$P_{mx} = Dc \times m_P.$$

### Втрати холостого ходу $p_0$

Головним чином, це магнітні втрати машини, тому

$$p_0 = p_{m\phi} = m_1 I_{10} U_1 \cos \varphi_0 = O'O'' m_p.$$

### Електричні втрати (статора і ротора)

$$(p_{e1} + p_{e2}) = P_1 - P_{mx} - p_{m\phi} = (Da - Dc - ad) \times m_p.$$

$$p_{e2} = P_{em} - P_{mx} = (Dv - Dc) \times m_p = cv \times m_p.$$

$$p_{e1} = (cd - vc) \times m_p = vd \times m_p.$$

При експериментальній побудові кругової діаграми неможливо виміряти струм при ковзанні  $s=\infty$ . Тому положення на діаграмі характерної точки Т часто визначають співвідношенням відрізків електричних втрат

$$\frac{\kappa_1 \kappa_2}{\kappa_1 \kappa} = \frac{p_{e1}}{p_{ek}} = \frac{r_1}{r_k}, \text{ опори взяті при робочій температурі.}$$

### Механічні і додаткові втрати

Ці втрати вимірюють експериментально, а на діаграму наносять реальне значення струму холостого ходу  $I_0$ , який проходить вище вектора струму ідеального холостого ходу  $I_{10}$ .

$$p_{mx} + p_\phi = cf \times m_p.$$

### Корисна потужність $P_2$

$$P_2 = P_1 - \sum p = (Da - af) \times m_p = Df \times m_p.$$

Лінія МК визначає рівень корисної потужності і позначена  $P_2 = 0$ .

### Коефіцієнт корисної дії (ККД)

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{Df}{Da}$$

Шкалу ККД будують в такий спосіб: – продовжують лінію КО (повної механічної потужності) до перетину з віссю абсцис у точці L;

- через точку L проводиться пряма, паралельна вісі ординат (лінія  $\sum P = 0, \eta = 100\%$ );

- паралельно вісі абсцис між лініями  $\sum P = 0$  та  $P_2 = 0$  (її продовженням) вибирається відтінок розбитий у вигляді шкали ККД.

### *Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1$*

Для розрахунку  $\cos\varphi_1$  будують шкалу на вісі ординат і на цьому обраному відрізку, як на радіусі, будується допоміжна чверть кола.

Для визначення величини  $\cos\varphi_1$  проектують на шкалу точку перетину вектора струму (або його продовження)  $I_1$  із зазначеною чвертю кола.

### Ковзання асинхронного двигуна.

Безпосередньо  $s = \frac{P_{e2}}{P_{em}} = \frac{вс}{Дв}$ , але для визначення ковзання користуються шкалою, яку будують у такий спосіб:

- через точку О ( $s=0$ ) проводиться паралельно вісі ординат пряма, яка є лінією електричних втрат у роторі ( $P_{e2} = 0$ );
- шкалою ковзань є відтинок між лініями  $P_{e2} = 0$  і  $P_{mx} = 0$  (її продовженням) паралельний лінії електромагнітної потужності  $P_{em} = 0$  (ОТ).

### Перевантажувальна здатність (критичний момент)

Якщо точка, що розглядається (Д) відповідає номінальному навантаженню, то  $M_n = Дв \times m_M$ .

Для визначення критичного моменту з центру кола точки Г опускають перпендикуляр на лінію  $M_{em} = 0$  до перетину з колом струмів у точці Г'. З точки Г' опускають перпендикуляр на вісь абсцис і в точці б' одержують відрізок, пропорційний максимальному (критичному) моменту.

$$M_k = G'b' \times m_M, \quad k_M = \frac{M_k}{M_n} = \frac{G'b'}{Дв}.$$

При розрахунку робочих характеристик знаходять значення  $s, \cos\varphi, \eta, M_{em}$  для ряду значень потужності  $P_2$ . Доцільно вибирати такі значення потужності:  $0; 0.25P_2; 0.5P_2; 0.75P_2; 1.0P_2; 1.25P_2$ .

Якщо точка Д на окружності струмів відповідає номінальному режиму роботи, то поділом відрізка Дв на зазначені співвідношення готують розрахунків. Зносячи точки поділу на окружність струмів починають визначення характеристик за вже описаною методикою.

За даною роботою оформлюють звіт.

Виробничо-практичне видання

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
до виконання практичних робіт  
з дисципліни

## **СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРОПРИВОДИ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ**

*(для студентів 5 курсу усіх форм навчання  
та слухачів другої вищої освіти спеціальності  
141 – Електромеханічні системи і комплекси транспортних засобів)*

Укладачі: **ПЕТРЕНКО** Олександр Миколайович,  
**ДОНЕЦЬ** Олександр Вадимович

Відповідальний за випуск *Ю. П. Бархаєв*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2013, поз. 125М

---

Підп. до друку 27.03.2014      Формат 60×84/16

Друк на ризографі.      Ум. друк. арк. 0,7

Тираж 50 пр.      Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.