

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних та самостійних робіт
з дисципліни

"ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА"

*(для студентів 3, 4 курсів усіх форм навчання
напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» та слухачів другої вищої
освіти спеціальності 7.05070203 «Електричний транспорт»)*

Харків
ХНАМГ
2013

Методичні вказівки до виконання практичних та самостійних робіт з дисципліни "Теорія електропривода" (для студентів 3, 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» та слухачів другої вищої освіти спеціальності 7.05070203 «Електричний транспорт») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: О. В. Донець, П. М. Пушков, М. І. Шпіка. – Х. : ХНАМГ, 2013. – 39 с.

Укладачі: О. В. Донець
П. М. Пушков
М. І. Шпіка

Рецензент: В. П. Андрійченко доц. каф. ЕТ, ХНАМГ

Рекомендовано кафедрою електричного транспорту.
Протокол № 2 від 12 жовтня 2010 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Основні електромагнітні співвідношення для електроприводів машин постійного струму.....	5
2. Типи електричних машин, використовуваних в електроприводі.....	8
3. Розрахунок магнітного кола машини.....	11
4. Електромагнітні процеси в двигуні постійного струму.....	12
5. Порухення комутації в стаціонарних режимах роботи двигунів та методи експериментального дослідження машин на стенді.....	13
6. Перехідні режими роботи електродвигунів.....	15
7. Тепловий стан тягових електродвигунів.....	19
8. Визначення параметрів схеми заміщення та побудова кругової діаграми асинхронного двигуна.....	27
9. Розрахунок характеристики динамічного гальмування АД.....	33
10. Питання для самоконтролю.....	36
Список джерел.....	37
Додаток 1.....	38

ВСТУП

Електричний привод перетворює електричну енергію на механічну і передає її робочому органу машини, який, в свою чергу, перетворює механічну енергію на роботу, пов'язану з переміщенням матеріалів або виробів. Для виконання цієї роботи у кожному циклі роботи електропривода відбувається: розгін, рух із установленою швидкістю, зменшення швидкості, або зупинка, якщо встановлений шлях переміщення закінчився. Основними факторами, від яких залежить рух електропривода, є складність кінематичних кіл, маси, що рухаються, рушійні, гальмівні сили і моменти.

Одна з основних функцій електропривода – функція керування, відповідно до якої електропривод не тільки повинен привести до руху промисловий механізм, але й керувати цим рухом згідно з технологією. Координатами електропривода є струм, момент, швидкість, переміщення, прискорення тощо. Технологічні вимоги до керування координатами можуть бути різними.

Основні задачі керування координатами такі:

- забезпечення заданого значення координати на сталому рівні в умовах дії збурень (задача стабілізації координати);
- зміна координати за попередньо заданим, у тому числі й оптимальним, законом (програмне керування);
- зміна контролюємого параметра в умовах, коли задаючи значення параметра довільно змінюються (слідкуючий електропривод);
- обмеження параметра на максимально допустимому рівні.

Виконуючі завдання практичних робіт студент отримує можливість, поступово виконуючи завдання, аналітично та графічно закріпити теоретичні знання лекційного курсу.

1. ОСНОВНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ СПІВВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Видаючи завдання на курсове проектування (курсову роботу), слід прокоментувати на прикладі основні габаритні та електромагнітні співвідношення у тяговому двигуні.

1. Головні дані електричної машини – її номінальні дані: потужність, напруга, струм, оберти. Наприклад, тяговий тролейбусний двигун типу ЕД-138 приводу вітчизняного тролейбуса ЮМЗ спроектований на такі номінальні дані: потужність – 132 кВт, напруга контактної мережі – 550 В, номінальні оберти – 1860 об/хв.

Посилаючись на курс теорії електроприводу, слід розтлумачити *поняття номінальних даних*, як таких, що еквівалентні за нагрівом у тривалому режимі роботи (S1) до найбільш важкого робочого реального режиму експлуатації даного двигуна. Доцільно згадати криву нагріву двигуна, поняття постійної нагріву (охолодження), залежність температури нагріву від параметрів, поняття коефіцієнту тепловіддачі α . А також нагадати від чого залежить термін служби електротехнічного приладу, яким є електричний двигун (правило 8° Монтзінгера).

2. Продовжуючи розбір даних на проектування, слід зосередитись на поняттях максимальних обертів, діапазону регулювання частоти обертання.

Посилаючись на курс теорії електроприводу, слід згадати основні способи регулювання частоти обертання тягового двигуна. Зазначити основні обмеження щодо глибини діапазону регулювання швидкості (регулювання полем). Основними обмеженнями тут мають бути комутаційні (неможливість забезпечення задовільних умов комутації у робочому діапазоні частот обертання), та нестійка робота приводу при глибокому ослабленні поля.

3. Розбір основних нормативних документів (ГОСТ 183-74 та ГОСТ 2582-81). Поняття робочого перевантаження та його значення для двигуна згідно до вимог ГОСТ.

Поняття класу нагрівостійкості ізоляції. Класи за ГОСТ та їх властивості (ілюстрація на макетах). Вимоги до електричної міцності ізоляції.

Системи охолодження (ілюстрація на макетах). Вимоги до охолодження.

Решта вимог до тягових двигунів: способів монтажу (ІМ), кліматичні, умови експлуатації (вимоги до вібрації тощо), установчі та приєднувальні розміри.

4. Основні електромагнітні співвідношення:

$$\begin{cases} M = c \cdot \Phi \cdot I; & c = \frac{pN}{2\pi \cdot a}; \\ U = E + I \times R_{ca}; \\ E = c\Phi \times \omega. \end{cases}$$

Типи збудження тягових двигунів, посиляючись на курс теорії електроприводу нагадати вигляд робочих характеристик.

Бажана розрахункова ілюстрація на прикладі розгляданого тягового двигуна.

5. Визначення головних розмірів машини спирається на два головних габаритних обмеження: комутацію та міжламельну напругу.

Звідси залежність реактивної ЕРС від питомих навантажень якоря (головним з яких є лінійне навантаження).

Залежності середньої та максимальної міжламельної напруги.

Поняття про габарит. Головний габаритний розмір – зовнішній діаметр якоря. Шкала габаритів та діаметрів якоря.

Бажана розрахункова ілюстрація на прикладі розгляданого тягового двигуна.

6. Зв'язок питомих навантажень із габаритом. Машинна стала Арнольда

$$\frac{D_a^2 \cdot l_a \cdot n}{P_g} = \frac{6.1 \cdot 10^{11}}{\alpha \cdot B_\delta \cdot A} = C.$$

Визначення ваги двигуна за габаритом та оцінка його вартості.

Бажана розрахункова ілюстрація на прикладі розгляданого тягового двигуна.

Тепловий чинник нагріву машини

$$p_{ayy} = \frac{I_a^2 \cdot r_{na}}{\pi \cdot D_a \cdot l_a} = \frac{I_a^2 \times \rho \cdot N \cdot l_a}{\pi \cdot D_a l_a q_a (2a)^2}.$$

З урахуванням $j_a = \frac{I_a}{2aq_a}$, и $\frac{I_a}{2a} \times \frac{N}{\pi \cdot D_a} = A$, маємо

$$p_{ayy} = \rho \times (A \cdot j_a), \text{ или } p_{ayy} \approx A \cdot j_a.$$

Бажана розрахункова ілюстрація на прикладі розгляданого тягового двигуна.

7. Граничні значення головних питомих електромагнітних навантажень: лінійного навантаження, питомого струму у різних обмотках, магнітних індукцій у різних частинах магнітного кола.

Бажана розрахункова ілюстрація на прикладі розгляданого тягового двигуна.

8. Інші режими роботи тягового двигуна: повторно-короткочасний, годинний. Перерахунок потужності у згаданих режимах.

Бажана розрахункова ілюстрація на прикладі розгляданого тягового двигуна.

2. ТИПИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН, ВИКОРИСТОВУВАНИХ В ЕЛЕКТРОПРИВОДІ

1. Розглянути основні типи якірних обмоток та їхні властивості: хвильової та петльової.

2. Конструкція паза якоря – короткий огляд. Укладання секцій обмотки в якірному пазу.

3. Вибір числа пазів якоря. Поняття пазового поділу, поняття колекторного поділу.

Геометрія зубцевої зони, як найбільш насиченої у магнітному відношенні. Визначення коефіцієнтів ущільнення магнітного потоку у зубцях (зубцевих коефіцієнтів).

4. Визначення числа секцій в котушці обмотки u_n . Особливості для хвильової обмотки та умови рівносекційності обмотки при визначенні кроків обмотки.

Застосування багатовиткових секцій обмотки при високих напругах та малих потужностях.

5. На прикладі розглядуваної машини визначення параметрів обмотки для її побудови: кроків по колектору, скорочення, потенційного кроку вирівнювальних з'єднань, тощо.

6. Алгоритм побудови розгорнутої схеми обмотки:

6.1 Оскільки всі виміри на схемі роблять у частках колекторних пластин, у нижній частині схеми викреслюють розгортку колектора з K пластин з їхньою нумерацією. Ширину пластини варто вибирати достатньою для читання схеми. У вертикальному напрямку відводять довільно межі лобових і пазової частин обмотки, при цьому межі для лобових частин не повинні бути вузькими (інакше лобові з'єднання можуть зливатися на кресленні).

6.2. На схемі наносять осі головних(d) і додаткових (q) полюсів. Першу вісь d проводять довільно, а інші осі прив'язують до неї - осі d на відстані, кратній τ , а осі q на відстані $\tau/2$ з періодом у τ .

Полюсне ділення в частках колекторної пластини

$$[\tau]_{\partial\kappa} = \frac{K}{2p}; \quad \left[\frac{\tau}{2}\right]_{\partial\kappa} = \frac{K}{4p}.$$

6.3. У тонких лініях олівцем позначають в пазовій частини обмотки контури головних полюсів. Ширина полюсної дуги в частках колекторної пластини

$$[b_{\text{пол}}]_{\partial\kappa} = \alpha \cdot [\tau]_{\partial\kappa}.$$

Контури полюсів мають бути симетричними щодо осей d.

6.4. Знаючи кроки обмотки, нанести першу і наступну секції обмотки на схемі, причому секції нижнього шару паза зображують суцільними лініями, а секції верхнього шару – пунктиром рис.1.

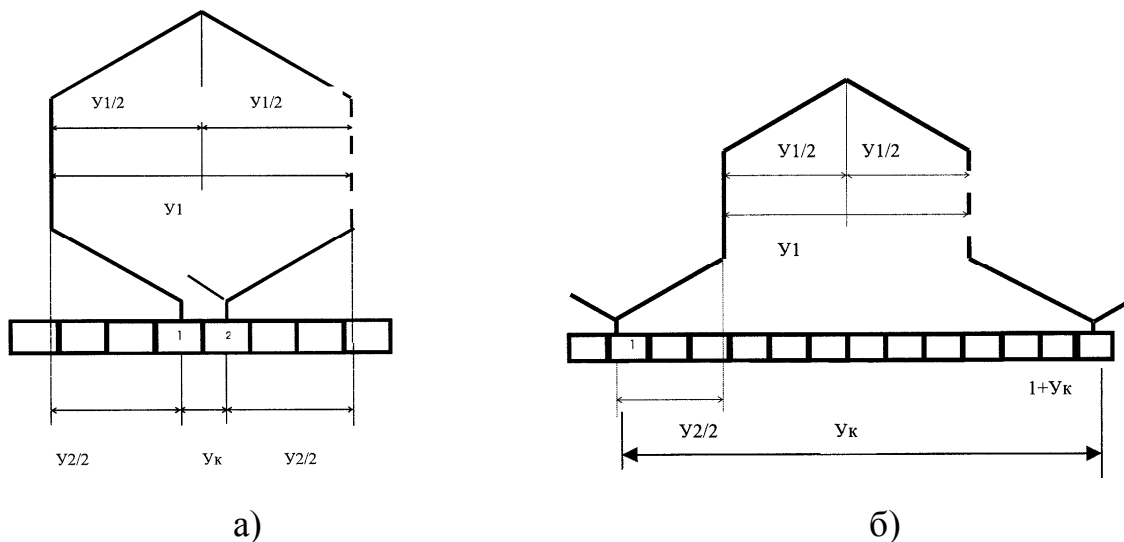


Рис. 1 – а) секція петльової обмотки; б) секція хвильової обмотки

6.5. У тонких лініях на схемі нанести розподіл провідників обмотки по пазах, групуючи в пази секції і орієнтуючись на нумерацію нижнього шару обмотки (суцільні лінії) по up провідників.

6.6. Зазначити розміщення щіток на колекторі: вважаючи вісь q (вісь ДП) центром зони комутації, продовжити її до перерізу з розгорткою колектора і зміститися для хвильової обмотки вліво, а для петльової обмотки – вправо по колектору на відстань $Y2/2$, визначивши тим самим положення геометричної нейтралі на колекторі, що відповідає центру щітки. Положення інших щіток на

колекторі визначають щодо знайденої з періодом у полюсне ділення $[\tau]_{\text{дк}}$. Умовно прийнявши ширину щітки (приблизно 4 колекторних пластини), нанести розташування щіток.

6.7. Задавши на схемі полярність полюсів і напрямок обертання якоря (довільно), визначити напрямок струму в обмотці якоря (за правилом «лівої руки», «буравчика» та ін.) і полярність щіток двигуна, вважаючи, що до «позитивної щітки» струм підводиться ззовні і «входить» в обмотку із збігаючого краю щітки.

Схема з'єднань і укладання простої хвильової обмотки якоря з параметрами $2p=4$, $Z=31$, $u_n=5$, $K=155$, $Y_k=77$, $Y_1=35$, $Y_2=42$

6.8. На закінчення контролюють дві величини - число пазів на полюс і число пазів на полюсну дугу:

$$\frac{Z}{2p}, \text{ и } \frac{Z}{2p} \times \alpha.$$

Перша величина побічно характеризує використання активного шару якоря. У [2] рекомендується для якорів діаметром до 500мм мати $\frac{Z}{2p} \approx 7 \div 10$,

а понад 500мм $\frac{Z}{2p} \approx 10 \div 16$. Крім того, вказані величини значною мірою ви-

значають магнітний шум і магнітну вібрацію зубчатої частоти, тому якщо вони є цілими числами, то магнітна провідність під полюсом (полюсною дугою) стрибком змінюється при повороті якоря на одне зубчате ділення. Іншими словами, під полюсом буває то більше пазів, то більше зубців. Це приводить до коливань електромагнітного моменту, що діє на полюс і викликає або акустичні, або механічні високочастотні змушені коливання. Небезпечними є резонансні явища, зв'язані з власними коливаннями станини. Прагнуть, по можливості, показники $\frac{Z}{2p}, \text{ и } \frac{Z}{2p} \times \alpha$ вибирати не цілими, а (ціле число з половинкою).

3. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОГО КОЛА МАШИНИ

1. Склад магнітного кола машини. Магнітні властивості сталей. Визначення напруги магнітного поля за індукцією та визначення коефіцієнту магнітної проникності μ .

2. Властивості кожної ділянки магнітного кола у послідовності: повітряний зазор, його параметри, поняття коефіцієнту Картера, зубцева зона, поняття ущільнення магнітного потоку, допустимі рівні магнітного насичення, ділянка якоря, поняття про спинку якоря, урахування наявності вентиляційних каналів, коефіцієнт заповнення сталлю осердя якоря, ділянка полюсів, ділянка станини, немагнітний проміжок між полюсами та станиною.

3. Визначення параметрів ділянок магнітного кола, користуючись плакатом (наведений нижче).

4. Розгляд алгоритму розрахунку кривої намагнічування двигуна.

5. Комп'ютерна реалізація розрахунку кривої намагнічування.

6. Визначення параметрів обмотки збудження (наприклад, послідовного)

Ділянка	Довжина магнітних силових ліній	Перетин ділянок
Зазор	$\delta_p = \delta \times k_\delta, мм$	-----
Зубці	$L_z = 0.1h_n, см$	Коефіцієнт ущільнення магнітного поля K_z
Осердя якоря,	$L_a = \frac{\pi(D_i + h'_a)}{2p} + \frac{h'_a}{2}, см$	$S_a = 0.93 \times l \times h_a, см^2$
Осердя полюса,	$L_m = \frac{D_j - D_a}{2} - 0.1(\delta + h_{mn}), см$	$S_m = 0.95 \times l \times L_m, см^2$
Наконечник полюса, при наявності компенсаційної обмотки	$L_{mz} = 0.1h_{mn} см$	$S_m = 0.95 \times l \times L_{mz}, см^2$
Станина, (5.18), (4.40)	$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p} + \frac{h_j}{2} см$	$S_j = l_j \times h_j, см^2$, або визначена окремо

4. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В ДВИГУНІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1. Магнітне поле під полюсною дугою на холостому ході машини.
2. Магнітне поле при навантаженні. Взаємний вплив поля обмотки якоря на поле збудження. Змінення форми поля при незмінності величини магнітного потоку у лінійному магнітному колі.
3. Розмагнічуюча дія реакції якоря, як прояв нелінійності магнітного кола зони взаємного впливу полів якоря та збудження.
4. Поняття перехідної характеристики. Перевірка її домашньої заготовки після розрахунку кривої намагнічування двигуна на попередньому практичному занятті.
5. Зв'язок форми поля у зазорі із величиною міжламельної напруги на колекторі. Визначення максимальної міжламельної напруги та коефіцієнту спотворення поля під полюсною дугою за перехідною характеристикою
6. Графічне визначення розмагнічуючої дії реакції якоря за методом Касьянова на перехідній характеристиці.
7. Підбір параметрів компенсаційної обмотки: числа витків, зубців полюса, можливого профілю міді.
8. Оформлення розрахункової роботи.

5. ПОРУШЕННЯ КОМУТАЦІЇ В СТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ ДВИГУНІВ ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ДОСДЖЕННЯ МАШИН НА СТЕНДІ

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

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

8. Потоки в схемі:

потік в станині $\Phi_j = Y_\delta F_{ab}$,

потоки в гілках розсіювання:

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

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

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

6. ПЕРЕХІДНІ РЕЖИМИ РОБОТИ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

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_{δ} обчислено на занятті 6

- нелінійна провідність Y_{oi} визначається за кривою намагнічування відповідної сталі: $Y_{oi} = \frac{H_{oi} \times L_m}{\Phi_{oi}}$, де магнітна напруга H_{oi} визначається за кривою

намагнічування осердя полюсу відповідно до індукції $B_{oi} = \frac{\Phi_{oi}}{S_{oi}}$, S_{oi}, 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

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

Ланка головних полюсів:

- провідність повітряного зазору та зубцової зони $Y_{\&} = \frac{F_{\delta} + F_z}{\Phi_{\delta}}$ 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 Φ_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 вузлу, -1, якщо дана гілка входить до даного вузлу, 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:

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 Ψ - вектор потенціалів, що потребує знаходження, відносно базового (нульового) вузла, а

$$Y = C * R^{-1} * C^T \text{ - матриця вузлових провідностей}$$

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

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

Вихідними даними для розрахунку мають бути:

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

- \mathbf{C}^T транспонована матриця з'єднань;

- \mathbf{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 $\kappa_{пер}$.

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.

7. ТЕПЛОВИЙ СТАН ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Метод дослідження перегріву 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 багатошарових 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 $R_\lambda = \left(\frac{1}{\lambda_{\text{уч}}} \right) \cdot \frac{\delta_{\text{уч}}}{S_{\text{уч}}}, \frac{\text{град}}{\text{Вт}}$, де $\lambda_{\text{уч}}$ - коефіцієнт теплопровідності 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 α - 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 λ_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, α_t – температурний коефіцієнт опору, для міді $\alpha_t = 0.004 \frac{1}{\text{град}}$.

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", α - коефіцієнт тепловіддачі з поверхні ділянки, Вт/(м² град).

Рівняння розподілу температури по довжині стрижня представляється як

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

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

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

q_0 - втрати в одиниці об'єму провідника, де j – щільність струму на ділянці, а ρ_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 півник 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

$$f_1 = f_3 = u_n s_a$$

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

$$\beta'_{из} = \delta_{\text{бандажа}} + \frac{\delta_{\text{корпусная_лобовая}}}{2}$$

- та у бік обмоткоутримувача

$$\beta''_{из} = \delta_{\text{подбандажа}} + \frac{\delta_{\text{корпусная_лобовая}}}{2}$$

результуючий приведений коефіцієнт тепловіддачі лобових ділянок обчислюється за формулою

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

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).

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

$$F_2 = \pi D_i l,$$

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

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

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

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

де $k_q = 4 \frac{Bm}{m \times \text{град}}$ – 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, α_a – КТО із зовнішньої поверхні якоря у зазор, α_i – КТО із внутрішньої поверхні якоря.

Ділянка колекторного півника і колектора, 4

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

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 $q_4 = \left(\frac{4i_a}{K} \right)^2 \times 0.176 \cdot 10^{-7}$, де K – число колекторних 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 тепловіддачі ділянок α_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:

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

де μ – теплопровідність повітря,

d_z – еквівалентний гідравлічний діаметр вікна, рівний відношенню

$$d_z = \frac{4F_{\text{окна}}}{P_{\text{окна}}},$$

де $F_{\text{окна}}$, $P_{\text{окна}}$ – 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 Λ 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 і 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

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

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

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

C₁	C₂	C₃	C₄	B₂	B₃
$e^{a_1 L_1} + e^{-a_1 L_1}$	-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).

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

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

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.

8. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ СХЕМИ ЗАМІЩЕННЯ ТА ПОБУДОВА КРУГОВОЇ ДІАГРАМИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА"

1. За вихідними даними, які наведені у додатку №1, для асинхронного трифазного двигуна з частотою живлячої напруги 50 Гц розрахувати параметри Т-подібної схеми заміщення та робочу механічну характеристику за формулою Клоса.

2. Вигляд схеми заміщення наведено на рисунку.

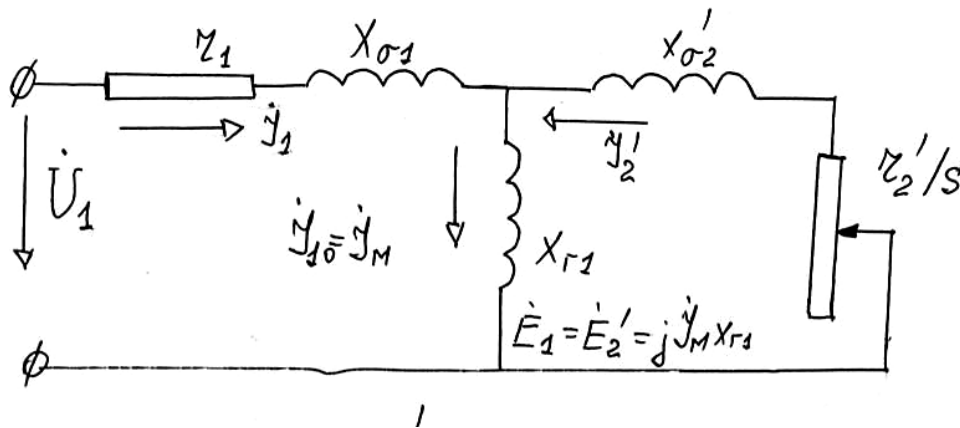


Рис. 3 – Схема заміщення асинхронного двигуна

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

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

$$x_k = x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2}; \quad r_k = r_1 + r'_2. \quad x_{c1} = \frac{U_1}{I_{10}}$$

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

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 ,об/хв.	3000	1500	1000	750	600	500

Ковзання $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$, 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 (природної), 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 приве-

дений опір роторного кола $Z_2' = \frac{r_2'}{s} + jx_2'$ залежить від ковзання, то при

$U_1 = const$, годограф виразу струму статора при зміні величини ковзання s представляє собою коло.

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

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.

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).

$$I_1 = I_{10} + (-I_2'), \quad I_{10} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_m}$$

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.

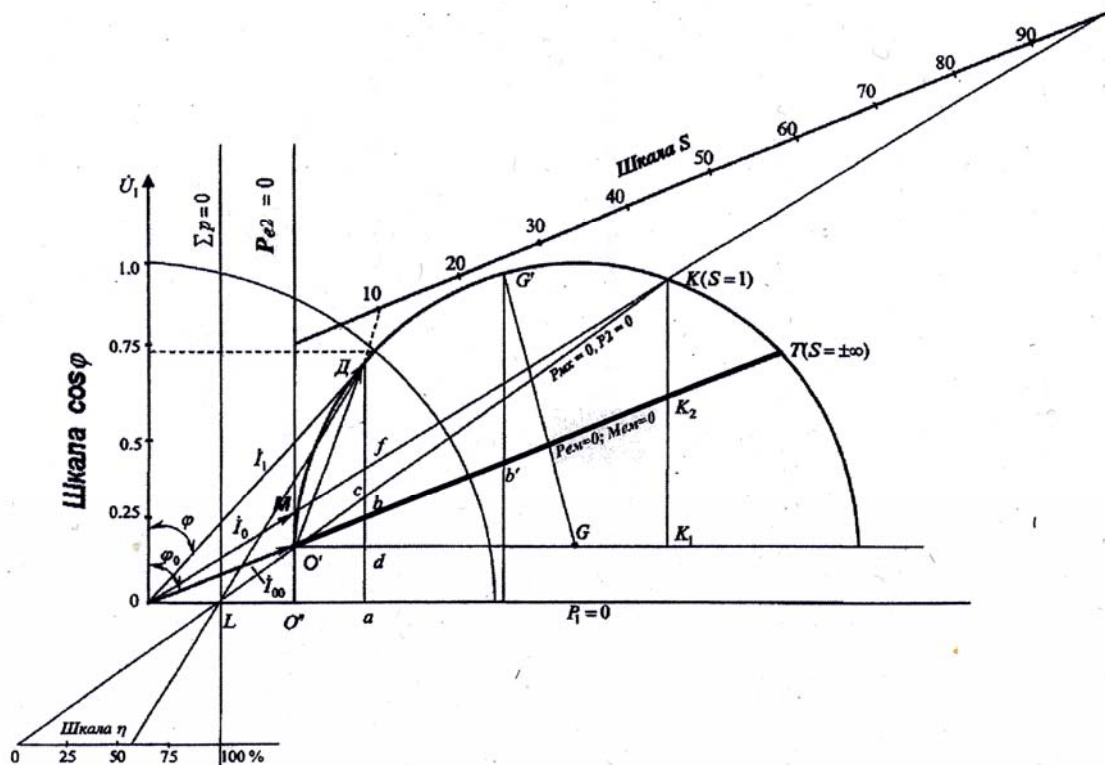


Рис. 4 – Кругова діаграма

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 ви-

значити головні характерні точки. Перша характерна точка на ній співпадає з початком координат О. Друга характерна точка К пускового режиму при ковзанні $s=1$ розташована відносно вектору напруги під кутом $\varphi_K = \arctg \frac{x_1 + x_{21}}{r_1 + r_2'}$.

Третя характерна точка Т відповідає значенням ковзання $s = \pm\infty$ і цей відрізок розташований відносно вектору напруги під кутом $\varphi_T = \arctg \frac{x_1 + x_{21}}{r_1}$.

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}

$$P_{em} = m_1 (I_2')^2 \frac{r_2'}{s}, \text{ оскільки годограф струму } I_2' \text{ є колом, то лінія потужності}$$

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 $M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_0}$.

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

Повна механічна потужність P_{mx}

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

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} .

$$P_{mx} + p_0 = cf \times m_p.$$

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

Ковзання асинхронного двигуна

Безпосередньо $s = \frac{P_{e2}}{P_{em}} = \frac{\omega c}{D\omega}$, 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 $M_n = D\omega \times m_M$.

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

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

При розрахунку робочих характеристик знаходять значення s , $\cos \varphi$, η , 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 $D\omega$ на зазначені співвідношення підготовують розрахунок. Зносячи точки поділу на окружність струмів починають визначення характеристик за вже описаною методикою.

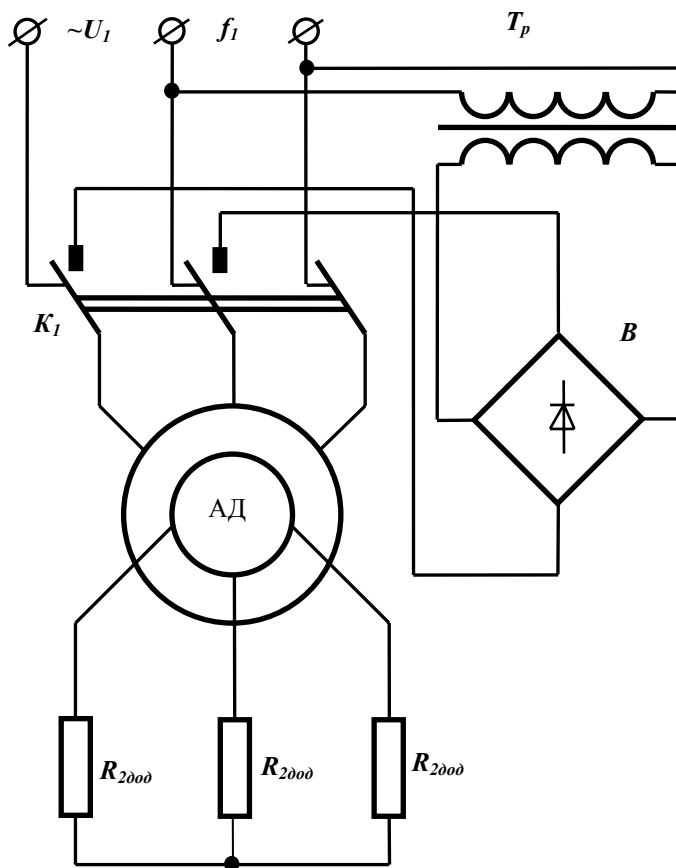
За даною роботою оформлюють звіт.

9. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИНАМІЧНОГО ГАЛЬМУВАННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

З живленням АД від джерела струму тісно зв'язаний режим динамічного гальмування АД. Цей режим обумовлений живленням обмотки статора постійним струмом, при цьому магнітне поле статора нерухоме і ротор гальмується в постійному магнітному полі. Постійний струм статора при цьому не зв'язаний індуктивно з ротором.

Схема включення АД в режимі динамічного гальмування показана на рис. 5а.

а)



б)

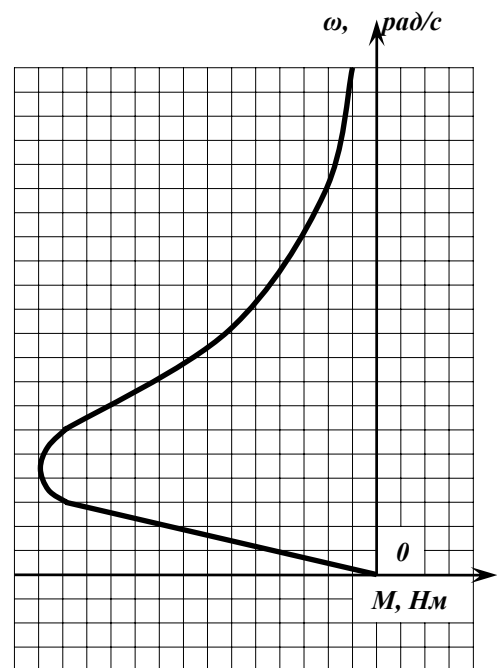


Рис. 5 – Схема динамічного гальмування АД а), механічна характеристика б)

При розрахунку живлення обмотки статора постійним струмом I_n приводиться до еквівалентної схеми живлення від трифазного струму $I_{л\text{екв}}$. Умовою такого еквівалентування є рівність МДС, що здійснюється постійним струмом I_n при обраній схемі з'єднань обмотки статора при гальмуванні й змінному струмі I_l .

Варто мати на увазі, що при динамічному гальмуванні

$$s_a = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_{ном}} = -\frac{\omega}{\omega_{ном}} = -\omega_* \text{ і основні співвідношення } I_2', n, M \text{ мають ви-}$$

гляд:

$$I_2' = \frac{I_1 x_{\varepsilon 1}}{\sqrt{\left(\frac{r_2'}{n_*}\right)^2 + (x_{\varepsilon 1} + x_{\sigma 2}')^2}};$$

$$M = \frac{3(I_2')^2 r_2'}{n_* \cdot n_0} \cdot \frac{30}{\pi};$$

$$n_* = r_2' \sqrt{\frac{\left(\frac{I_1}{I_0}\right)^2 - 1}{(x_{\sigma 2}' + x_{\varepsilon 1})^2 - \left(\frac{I_1}{I_0}\right)^2 \cdot (x_{\sigma 2}')^2}}.$$

Стовпці 1 і 2 таблиці являють собою універсальну криву намагнічування АД в о.е.

Стовпець 3 – реактивний опір кола намагнічування $X_{г1}$

$$x_{\varepsilon 1} = \frac{E_{\phi c}}{I_{10}} = \frac{E_{\phi c^*}}{I_{0^*}} \cdot \frac{E_{\phi c x}}{I_{10}},$$

де I_{10} – номінальний струм намагнічування статора,

$E_{\phi c x}$ – ЕРС фази статора при підведеній номінальній напрузі й при струмі х.х.

$$E_{\phi c x} = \frac{E_{pn}}{\sqrt{3}} K_e \approx 0,95 \cdot \frac{U_1}{\sqrt{3}}$$

Стовпець 5. $I_{1\text{экв}}$ визначають за таблицею еквівалентування для заданої схеми включення на динамічне гальмування.

Останній (13) стовпець. Перерахування реостатної (штучної) характеристики просте:

$$n_{*u} = n_{*reost} = n_* \cdot \frac{r_2' + R_{2доб}}{r_2'}.$$

Динаміку асинхронного приводу (без обліку електричної постійної часу) визначають відповідно до основного рівняння приводу як:

$$\frac{2M_k(1+qs_k)}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k} + 2qs_k} = J \frac{d\omega}{dt} = -J\omega_0 \frac{ds}{dt},$$

Звідки визначають закон зміни швидкості при перехідному процесі:

$$\frac{t}{T_m} = \frac{s_k}{2(1+qs_k)} \left[\frac{s_{noch}^2 - s_{кін}^2}{2s_k} + \ln \frac{s_{noch}}{s_{кін}} + 2q(s_{noch} - s_{кін}) \right]$$

Механічну постійну часу T_m визначають:

$$T_m = \frac{J\omega_0}{M_k \cdot s_k}$$

Час протікання перехідного процесу (гальмування та ін.) виявляється відповідно до функції критичної величини ковзання S_k , тобто параметрів АД. Це чудова властивість АД знаходить своє пояснення в самому виді механічної характеристики АД, що має екстремум у критичній точці. Існує мінімум часу протікання перехідного процесу при варіації параметрів роторного кола.

У режимі динамічного гальмування ($s_{i\div} = 1,0$, $s_{\hat{e}i} = 0,05$), час гальмування визначається як

$$\frac{t_{\partial m}}{T_m} = 1,5s_{km} + \frac{1}{4s_{km}},$$

де мінімальний час $t_{\partial m} = 1,22T_m$ при $s_{km} = 0.407$;

$$R_{2_{оптум}} = 0,407 \sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2}.$$

10. ПИТАННЯ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЮ

1. В яких одиницях вимірюють радіус приведення системи ?
2. В яких одиницях вимірюють момент на валу електродвигуна?
3. В яких одиницях вимірюють кутову швидкість на валу електродвигуна?
4. Чому дорівнює радіус приведення системи?
5. Чому дорівнює момент на валу електродвигуна?
6. Чому дорівнює кутова швидкість на валу електродвигуна?
7. Чому дорівнює потужність на валу електродвигуна?
8. Привести основне рівняння руху електропривода?
9. Привести основне рівняння руху електропривода з прискоренням?
10. Привести основне рівняння поступального руху електропривода?
11. Привести основне рівняння руху електропривода з уповільненням ?
12. Навести природну характеристику ДПС НЗ.
13. Що таке штучні характеристики ДПС НЗ? Навести приклади їх отримання.
14. В яких енергетичних режимах може працювати ДПС НЗ ?
15. Привести діаграми реостатного пуску ДПС НЗ.
16. Пояснити режим електродинамічного гальмування ДПС НЗ на графічному матеріалі.
17. Пояснити режим гальмування противключенням ДПС НЗ на графічному матеріалі ?
18. Пояснить призначення пускових резисторів.
19. Яким чином вибирають секції пускових резисторів ?
20. Чому при динамічному гальмуванні характеристика проходить через початок координат ?
21. Чому в режимі проти включення характеристика не проходить через початок координат ?
22. В яких квадрантах можливо реалізувати пускові режими ДПС НЗ ?
23. В яких квадрантах можливо реалізувати гальмівні режими ДПС НЗ ?
24. Що таке номінальні параметри двигуна ?
25. Де використовуються двигуни постійного струму з послідовною схемою збудження ?
26. Що таке природний опір якірного кола ?
27. Чому при збільшенні послідовного опору знижується його швидкість ?
28. Чому в схемі з послідовним включенням резисторів в ланку якоря ДПС ПЗ збільшується його жорсткість механічних характеристик при зменшенні опору ?
29. Пояснить, чому штучні реостатні характеристики перетинають вісь моменту, а штучні характеристики при зниженні напруги ні ?
30. Чому зниження напруги на ДПС ПЗ приводить до зниження механічної характеристики електродвигуна ?
31. Що таке універсальна характеристика електродвигуна ?
32. Як перейти з приданої характеристики електродвигуна до універсальної ?
33. Які параметри електродвигуна приймаються за базові ?
34. Що називається перехідним процесом ?
35. Навести приклади перехідних процесів.
36. Пояснить, що таке сталий режим роботи електропривода ?

37. Що таке точка статичного режиму ?
38. Поясніть, що таке статична стійкість електропривода ?
39. Як ви розумієте фразу – «оптимальні перехідні процеси» ?
40. Яким чином оцінюються динамічні властивості електропривода ?
41. Що нам дає знання динамічних властивостей розімкнутої електромеханічної системи ?
42. Як дослідити динаміку електропривода, якщо неможливо лінеаризувати механічну характеристику двигуна ?
43. Чому в задачі інтегрування замінюється сумою ?
44. Що таке схема заміщення АД ?
45. В яких енергетичних режимах може працювати АД ?
46. Що таке режим рекуперативного гальмування ?
47. Якими способами можуть бути отримані штучні механічні характеристики АД ?
48. Які переваги та недоліки має спосіб регулювання координат АД за допомогою резисторів ?
49. Поясніть як будується пускова діаграма АД з фазним ротором при реостатному пуску ?
50. Поясніть принцип дії схеми динамічного гальмування АД ?
51. Які можливості за керуванням АД має спосіб регулювання напруги на його статорі ?
52. Поясніть що таке частотний спосіб регулювання координат АД ?

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560 с
2. Чиликин М.Г., Сандлер А.С. Общий курс электропривода : Учебник для вузов. – 6-е изд. доп. и перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 576 с.
3. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Изд. 6-е, исправленное. М., “Энергия“, 1977. – 432 с.
4. Попович М. Т. Теорія електроприводу. Київ, “ Вища школа”, 1996, 460с.
5. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод: Учебник для вузов. - М.: Энергоатомиздат; 1986. - 416 с.: ил.
6. Москаленко В.В. Электрический привод: Учеб. для электротехн. спец. – М: Высш. Шк., 1991. – 430 с.
7. Моделювання електроприводів: Навч. посібник / Л.Д. Костинюк, В.І. Мороз, Я.С. Паранчук. - Львів: Видавництво Національного Університету «Львівська політехніка», 2004.- 404 с.
8. Автоматизированный электропривод: [Сб. ст.] / Под общ. ред. Н.Ф. Ильинского, М.Г. Юнькова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 542 с.
9. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. посібник / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков та ін.; за ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. – К.: Либідь, 2005. – 680 с.

Таблиця 1 – Вихідні данні для асинхронного трифазного двигуна

N вар	P_H , кВт	n_H , об/мин	Mmax/MH	статор						ротор				J,кг*м2	Схема д. торм.
				$\cos\phi$	$I_{\text{ном}},$ А	$I_{10},$ А	$r_1,$ Ом	$X_{S1},$ Ом	$E_{p_{\text{ном}}},$ В	$I_{2\text{ном}},$ А	$r_2,$ Ом	$X_{S2},$ 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

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання практичних та самостійних робіт
з дисципліни

"ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА"

*(для студентів 3, 4 курсів усіх форм навчання
напрямку підготовки 6.050702 «Електромеханіка» та слухачів другої вищої
освіти спеціальності 7.05070203 «Електричний транспорт»)*

Укладачі **ДОНЕЦЬ** Олександр Вадимович
ПУШКОВ Павло Максимович
ШПІКА Миколай Іванович

Відповідальний за випуск *В. І. Коваленко*

Редактор *З. І. Зайцева*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2010, поз. 167М, 168М

Підп. до друку 13.05.2011р.
Друк на ризографі.
Зам. №

Формат 60 x 84/16
Ум. друк. арк. 2,3
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:
Харківська національна академія міського господарства,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@ksame.kharkov.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4064 від 12.05.2011 р.