

Практичне заняття 2

Мета заняття: Засоби отримання періодичних змін магнітного поля в обертових електричних машинах.

Зміст заняття:

1. Циліндрична (барабанна) різноіменнополюсна обмотка і циліндричний магнітопровід.
2. Тороїдальне різноіменнополюсна обмотка і тороїдальний магнітопровід.
3. Кільцеподібна обмотка і кігтеподібний магнітопровід.
4. Уніполярна обмотка і зубчастий магнітопровід.

Основною умовою здійснення електромеханічного перетворення енергії є зміна індуктивності або взаємної індуктивності обмотки при повороті ротора. Для отримання періодичної залежності параметрів індуктивності обмотки від кута повороту ротора γ необхідно, щоб при протіканні струму по обмотці n формувалось магнітне поле, яке періодично змінюється в просторі.

Ця періодична зміна магнітного поля досягається сполученням конструкцій обмоток і магнітопроводів.

Циліндрична (барабанна) різноіменнополюсна обмотка і циліндричний магнітопровід

Провідники обмотки розміщуються в пазах на циліндричній поверхні магнітопроводу, який має форму циліндра.

Періодична зміна напрямку струмів у провідниках на поверхні магнітопроводу, що повернута до зазору, визначає періодичні зміни у просторі магнітного поля.

Число періодів змін поля (число пар полюсів):

$$p \leq \frac{\pi D}{2\tau},$$

де τ – полюсний поділ або довжина напівперіоду обмотки – відстань між зонами, в яких лежать провідники з чергуючими напрямками струмів;

D – діаметр середньої поверхні проміжку.

Обмотка, яка створює поле з одним періодом ($p=1$), називається двополюсна або однопериодна. Обмотка, яка формує поле з декількома періодами, називається багатопольною або багатоперіодною.

Декілька (в загальному випадку m) однакових циліндричних різноіменнополюсних обмоток з одним і тим самим числом пар полюсів p , які живляться від багатофазної електричної мережі, називаються багатофазною обмоткою. Кожна фаза обмотки включає в себе ряд котушок, виконаних з одного або декількох витків. При розташуванні в пазу однієї котушечної сторони обмотка зветься одношаровою, при розташуванні двох – двошаровою або дворядною (залежно від взаємного розташування котушечних сторін).

Фазною зоною одношарової обмотки називається зона провідників фази з однаковим напрямком струмів.

Число пазів на полюс і фазу визначається:

$$q = Z / 2pt,$$

де Z – загальне число пазів магнітопроводу.

Сусідні зони фази зміщені на відстань τ , а зони сусідніх фаз – на відстань τ / m .

Тороїдальна різноіменнополюсна обмотка і тороїдальний магнітопровід

Тороїдальна обмотка відрізняється від циліндричної тим, що з'єднання між її провідниками і струмами одного напрямку охоплюють тороїд магнітопроводу.

З точки зору формування поля у зазорі ця обмотка при однаковій структурі провідників на поверхні, що повернута до зазору, нічим не відрізняється від циліндричної обмотки. Вона так само формує періодично змінююче у просторі поле і має ті ж самі різновиди, що й циліндрична обмотка.

Кільцеподібна обмотка і кігтеподібний магнітопровід

Обмотка виконується у вигляді простої кільцеподібної котушки, яка розміщується співвісно з валом. Періодичність магнітного поля у зазорі досягається за рахунок чергування напрямків, у яких кігтеподібні зубці магнітопроводу охоплюють кільцеподібну обмотку зі струмом.

Кільцеподібна одноіменнополюсна обмотка і зубчастий магнітопровід.

Обмотка виконується у вигляді кільцеподібної котушки і охоплює вал машини. Періодичність одноіменнополюсного (уніполярного) магнітного поля у зазорі отримуємо за рахунок зубчастості поверхні магнітопроводу, повернутого до зазору.

Число періодів зміни поля визначається:

$$p = \pi D / t_2 = Z,$$

де Z – число зубців магнітопроводу.

Для засвоєння матеріалу, пов'язаного із вивченням періодичних змін магнітного поля в обертових електричних машинах, студентам необхідно проаналізувати матеріал відповідних лекцій і вирішити такі задачі.

Задачі:

- 2.1. На рис. 2.1 наведена схема циліндричної різноіменнополюсної однофазної обмотки. Як зміниться число періодів магнітного поля, якщо:
- а) у провідниках 2 і 3 змінити напрям струмів на протилежний, б) в усіх провідниках змінити напрям струму на протилежний?

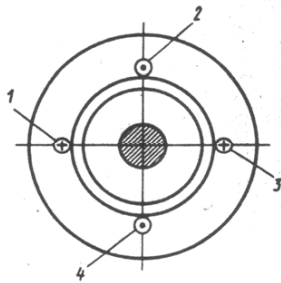


Рис. 2.1

2.2. На рис. 2.2 показаний фрагмент осердя, статора обертової електричної машини, в пазах якого розташовані окремі провідники. Виконати з'єднання між провідниками для отримання циліндричної різноіменнополюсної обмотки і показати напрямок струмів, при якому періодично змінює в просторі магнітне поле має показану на рисунку полярність.

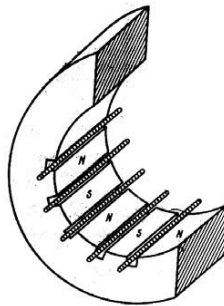


Рис. 2.2

2.3. На рис. 2.3 наведений ескіз поперечного перетину обертової електричної машини із циліндричною різноіменнополюсною однофазною зосередженою обмоткою. Яка з обмоток одношарова, двошарова і дворядна? Для кожного випадку показати характерні силові лінії магнітного поля і полюсний поділ обмотки. Чому дорівнює число полюсів обмотки?

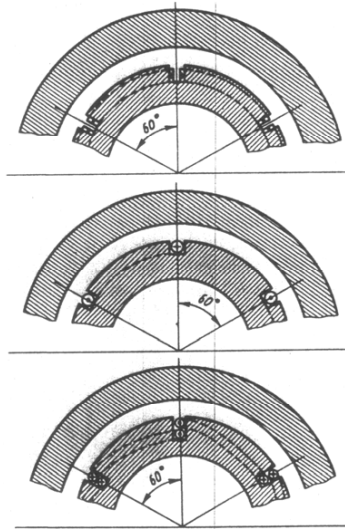


Рис. 2.3

2.4. Визначити число періодів магнітного поля, утвореного струмами циліндричної однофазної різноіменнополюсної обмотки, схема якої показана на рис 2.4.

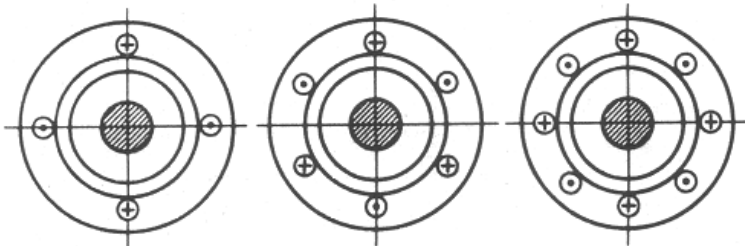


Рис. 2.4

2.5. Визначити число пазів обмотки на полюс q однофазної розподільної різноіменнополюсної циліндричної обмотки (рис 2.5). Визначити число пар полюсів обмотки.

2.6. На рис. 2.6 показані провідники зони А різноіменнополюсної обмотки. Показати зони провідників фази В для двофазної обмотки і зони пазів фаз В і С для трифазної обмотки. Скільки пазів на полюс і фази мають ці обмотки?

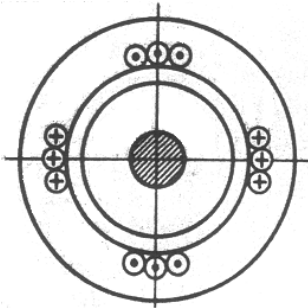


Рис. 2.5

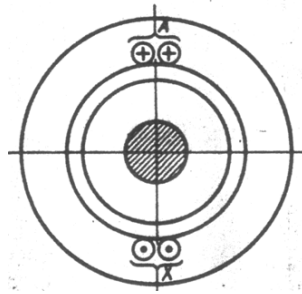


Рис. 2.6

2.7. Визначити напрямок струмів у провідниках циліндричної різноіменнополюсної обмотки, наведеної на рис. 2.7.

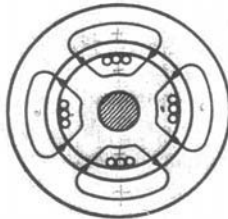


Рис. 2.7

2.8. На рис. 2.8 показаний поперечний перетин зубчастого магнітопроводу із кільцеподібною одноіменнополюсною обмоткою, охоплюючою вал машини. Для вибраного напрямку струму в обмотці показати силові лінії магнітного поля. Яку полярність мають поверхні, повернуті до зазору зовнішнього і внутрішнього магнітопроводів? Визначити число періодів поля.

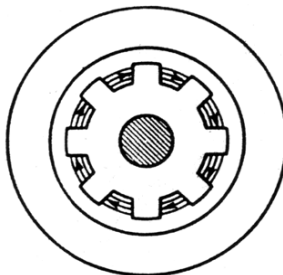


Рис. 2.8

Запитання для самоконтролю

1. Назвати необхідні умови отримання електромеханічного перетворення енергії.
2. Що ми називаємо полюсним поділом?

3. Як визначається число періодів поля?
4. Як знайти число пазів на полюс і фазу?
5. Назвати можливі засоби утворення періодичного магнітного поля в обертових електричних машинах.
6. Які обмотки називають одношаровими, двошаровими і дворядними?
7. Що ми називаємо фазною зоною обмотки?

Практичне заняття 3

Тема заняття: Можливі принципи виконання електричних машин.

Зміст заняття:

1. Модифікації принципів виконань електричних машин.
2. Вивчення роботи машини з однією обмоткою на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора.

На попередньому занятті були розглянуті засоби отримання періодичного магнітного поля в електричних машинах. Тепер розглянемо, яким чином може бути побудована електрична машина, щоб індуктивності або взаємні індуктивності її обмотки залежали від кутового положення ротора і змінювались періодично в часі при обертанні ротора.

Відомі три принципи виконання електричних машин, які дають можливість отримання необхідного ефекта зміни індуктивностей або взаємних індуктивностей:

- 1) машина з однією обмоткою на статорі і однією обмоткою на роторі;
- 2) машина з однією обмоткою на статорі і з зубчастим магнітопроводом ротора;
- 3) машина з двома обмотками на статорі і з зубчастим магнітопроводом ротора.

Кожне з цих виконань має додаткові модифікації.

Для виконання двох принципово різних полів у зазорі електричних машин, різноіменнополюсних і одноіменнополюсних, використовують два різновиди обмоток, різноіменнополюсні й одноіменнополюсні. Різноіменнополюсні обмотки можуть бути як однофазними, так і багатофазними; одноіменнополюсні – тільки однофазними, при цьому однофазна обмотка може живитися змінним або постійним струмом.

Машина з однією обмоткою на статорі й однією обмоткою на роторі

У цьому виконанні електромеханічне перетворення енергії відбувається головним чином за рахунок змін взаємного розміщення обмоток і змін взаємної індуктивності між ними при обертанні ротора.

Зміни взаємної індуктивності і індуктивності обмоток за рахунок зубчастості магнітопроводів має другорядне значення.

У цьому виконанні використовуються тільки різноіменнополюсні обмотки статора і ротора. Магнітопровід статора також може бути зубчастим або гладким.

Період T , частота f і кутова частота ω зміни взаємної індуктивності складають:

$$T = \frac{2\pi}{p\Omega}; \quad f = \frac{p\Omega}{2\pi}; \quad \omega = 2\pi f = p\Omega, \quad \text{де } \Omega - \text{кутова швидкість.}$$

Машина з однією обмоткою на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора

Електромеханічне перетворення енергії має місце за рахунок зміни індуктивності обмотки, пов'язаної із зубчастістю магнітопроводу.

Період T , частота f і кутова частота ω зміни індуктивності:

$$T = \frac{2\pi}{p_z\Omega}; \quad f = \frac{p_z\Omega}{2\pi}; \quad \omega = p_z\Omega, \quad \text{де } p_z = z - \text{число періодів зубчастості ротора.}$$

Студентам потрібно вивчити лекції й вирішити задачі, які дозволяють більш ґрунтовно зрозуміти навчальний матеріал теми занять.

Задачі:

- 3.1. Показати можливість модифікації принципів виконання електричних машин змінного струму з двома різноіменнополюсними обмотками, одна з яких розташована на статорі, друга – на роторі.
- 3.2. На статорі електричної машини розташовані дві різноіменнополюсні обмотки. Порахувати можливі сполучення цих обмоток із конструкціями магнітопроводів. При яких сполученнях електромеханічне перетворення енергії неможливе?
- 3.3. Машина з однією обмоткою на статорі. Показати можливі сполучення різновидів обмоток і конструкцій магнітопроводів, при яких можливе електромеханічне перетворення енергії.
- 3.4. Двополюсна електрична машина (рис. 3.1) з однофазними різноіменнополюсними обмотками на статорі і роторі має гладкий магнітопровід статора і зубчастий магнітопровід ротора. Як зміниться потокощеплення Ψ обмотки статора з магнітним полем від струму ротора при таких значеннях кута α між осями обмоток: $\frac{\pi}{2}$, π , $\frac{3\pi}{2}$, 2π , якщо при $\alpha = 0$, $\Psi = \Psi_m$?

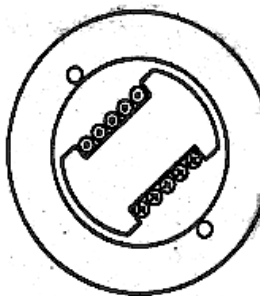


Рис. 3.1

3.5. Побудувати криву зміни взаємної індуктивності двох різноіменнополюсних однофазних обмоток, розташованих на гладких

магнітопроводах статора і ротора, у функції кута α між осями цих обмоток ($0 \leq \alpha \leq 2\pi$). Розглянути випадки дво-, чотири- і шестиполосних обмоток. Визначити період, частоту і кутову частоту змін взаємної індуктивності L_{12} в цих випадках якщо кутова швидкість обертання ротора $\Omega = 314 \text{ рад/с}$? Як має змінюватися кутова швидкість обертання ротора для збереження постійної частоти зміни L_{12} при різних числах полюсів обмоток?

3.6. Електрична машина має одну двополосну різноіменнополюсну однофазну розподілену обмотку, яка розташована на гладкому магнітопроводі статора. При якому числі зубців ротора можна отримати найбільшу зміну індуктивності обмотки L_{11} ? Показати залежність L_{11} від положення зубця ротора відносно осі обмотки (γ). Чому дорівнює період, частота і кутова частота змін індуктивності обмотки при кутовій швидкості обертання ротора $\Omega = 157 \text{ рад/с}$? Розглянути також випадок чотирьополосної обмотки.

Запитання для самоконтролю

1. Якими мають бути електричні машини, щоб забезпечити періодичні зміни індуктивності або взаєміндуктивності при обертанні ротора?

2. Які види обмоток використовують на машинах з однією обмоткою на статорі й однією обмоткою на роторі?

3. Як розрахувати період, частоту і кутову частоту зміни взаєміндуктивності в часі у машини з однією обмоткою на статорі і однією обмоткою на роторі?

4. Чому відповідає період зміни індуктивності у машини з однією обмоткою на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора?

5. Як розрахувати період, частоту і кутову частоту зміни індуктивності в часі у машини з однією обмоткою на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора?

Практичне заняття 4

Тема заняття: Умови отримання однонаправленого перетворення енергії в електричній машині.

Зміст заняття:

1. Машина з однією обмоткою.
2. Машина з двома обмотками.

На цьому занятті з'ясуємо, якими мають бути струми в обмотках машини для того, щоб у ній мав місце один напрям перетворення енергії.

Для виводу цих умов звернемося до рівняння електромагнітного моменту для однообмоточної або двообмоточної машини. У цьому рівнянні індуктивність однієї обмотки L_{11} або взаємна індуктивність між двома обмотками L_{12} є періодичною функцією кута поворота ротора або часу. Для отримання одного

напряму перетворення енергії струми в обмотках повинні змінюватись так, щоб середній електромагнітний момент був відмінний від нуля.

Машина з однією обмоткою

Електромагнітний обертовий момент машини з однією обмоткою є:

$$M = \frac{1}{2} i_1^2 2 \frac{dL_{11}}{d\gamma}.$$

Струм у єдиній обмотці електричної машини обов'язково має бути змінним.

Для отримання однонаправленого перетворення енергії машина з однією обмоткою повинна живитися струмом з кутовою частотою ω , рівною половині кутової частоти змін індуктивності:

$$\omega_1 = \frac{\omega}{2} = \frac{p_z \Omega}{2},$$

де p_z – число періодів зубчастості ротора.

Кутова швидкість машини пропорційна кутовій частоті струму в обмотці:

$$\Omega = 2\omega_1 / p_z.$$

Машина з двома обмотками

Електромагнітний обертовий момент машини з двома обмотками незалежно від їхнього розміщення на магнітопроводі складає:

$$M = i_1 i_2 \frac{dL_{12}}{d\gamma} + \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{11}}{d\gamma} + \frac{1}{2} i_2^2 \frac{dL_{22}}{d\gamma}, \quad (1)$$

Найбільш суттєва частина електромагнітного моменту пов'язана зі змінами взаємної індуктивності між обмотками, а саме: з першим членом співвідношення (1).

Для отримання однонаправленого перетворення енергії в машині з двома обмотками необхідно, щоб сума або різниця кутових частот струмів у обмотках дорівнювала кутовій частоті змін взаємної індуктивності між обмотками.

$$\omega_1 + \omega_2 = \omega \text{ або } \omega_1 - \omega_2 = \omega.$$

У синхронних машинах у загальному випадку обмотки живляться струмами, кутові частоти яких ω_1 і ω_2 жорстко задані. Кутова швидкість ротора синхронної машини:

$$\Omega = (\omega_1 \pm \omega_2) / p = \text{const}$$

звичайно $\omega_2 = 0$.

В асинхронній машині тільки одна з обмоток отримує живлення від електричної мережі, частота якої ω_1 , задана. Друга обмотка замикається накоротко або на опір. Частота струму в другій обмотці $\omega_2 = \omega_1 - \Omega p$.

Для засвоєння матеріалу, пов'язаного з вивченням умов отримання однонаправленого перетворення енергії в електричній машині студентам бажано вирішити такі задачі, попередньо вивчивши відповідні лекції.

Задачі:

4.1. Електрична машина має одну різноіменнополюсну обмотку на статорі і зубчасті (явнополюсні) осердя ротора з числом зубців $Z = 4$. Визначити частоту струму в обмотці, при якій можливе однонаправлене перетворення енергії, якщо кутова швидкість обертання ротора $\Omega = 1257$ рад/с.

4.2. Знайти середній електромагнітний момент M_0 електричної машини з однією обмоткою на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора при живленні обмотки постійним струмом.

4.3. Як зміниться кутова швидкість машини з однією обмоткою на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора при зменшенні кутової частоти струму обмотки удвічі?

4.4. На статорі і роторі електричної машини розміщено по одній різноіменнополюсній обмотці. Число пар полюсів обмоток $p = 2$. Кутова швидкість обертання машини $\Omega = 157$ рад/с. При якій частоті струму у обмотці ротора можливе однонаправлене перетворення енергії в машині, якщо частота струму в статорі $f = 50$ Гц?

4.5. Визначити кутову швидкість Ω і частоту обертання ротора n шестиполюсної машини подвійного живлення при частотах струмів у обмотках статора і ротора; а) $f_1 = 50$ Гц, $f_2 = 0$; б) $f_1 = 50$ Гц, $f_2 = 100$ Гц.

4.6. Знайти частоту струму в обмотці ротора чотириполюсної асинхронної машини, якщо кутова швидкість обертання ротора $\Omega = 155$ рад/с, а обмотка статора отримує живлення від електричної мережі частотою $f = 50$ Гц.

Запитання для самоконтролю

1. Яким має бути струм однообмоточної машини?
2. Які умови потрібно виконати, щоб машина з однією обмоткою перейшла з рухомого режиму в генераторний?
3. Які машини ми називаємо синхронними?
4. За яких умов середній момент машини з двома обмотками досягає найбільшого значення?
5. Які машини називають машинами подвійного живлення?

Практичне заняття 5

Тема заняття: Колекторні машини постійного струму.

Зміст заняття:

1. Принцип дії двигуна постійного струму.
2. Механічні характеристики.

Принцип дії двигуна постійного струму

Робота двигуна заснована на взаємодії провідника із струмом і магнітного поля, в якому він перебуває. На такий провідник діє механічна сила:

$$F_{\text{МЕХ}} = B_{\delta} \cdot l \cdot i,$$

де B_{δ}, l – індукція в зазорі і довжина провідника,
 i – величина струму в провіднику.

У режимі двигуна, щоб якір почав рухатися, треба подати постійну напругу одночасно на обмотки збудження і якоря. Струм в обмотці збудження $I_{\text{зб}}$ створює основний магнітний потік F . Напруга на обмотці якоря викликає в обмотці струм. На провідники обмотки буде діяти сила. Тангенційна складова цієї сили створює момент M , під дією якого якір почне обертатися. Елементарна модель структури колекторної машини постійного струму наведена на рис. 5.1.

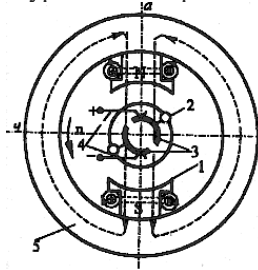


Рис. 5.1

Структура машини має явно виражені полюси (1), обмотку якоря (2), з'єднану з зовнішнім ланцюгом через колектор (3), являючі собою розрізне кільце і струмоз'ємні щітки (4). Ядро статора (5) лите з конфігурацією поперечного перетину у вигляді кільця або правильного багатокутника.

Крім рухового режиму, електрична машина постійного струму може працювати в генераторному режимі та в режимі електромагнітного гальма.

ЕРС машини пропорційна частоті обертання n магнітному потоку Φ головних полюсів і конструктивному коефіцієнту k

$$E = k\Phi n. \quad (1)$$

Електромагнітний момент пропорційний струму якоря, магнітному потоку і конструктивному коефіцієнту k , тобто:

$$M = k\Phi I. \quad (2)$$

У руховому режимі момент навантаження є гальмівним і направлений назустріч обертанню.

Двигун, так само як і генератор, може бути незалежного, паралельного або послідовного збудження.

Механічна характеристика

Механічна характеристика двигуна – це залежність частоти обертання від моменту при постійній напрузі живлення, струму збудження і додаткового опору в ланцюзі якоря.

На рис. 5.2 наведені механічні характеристики двигуна незалежного збудження для різних опорів якірного ланцюга.

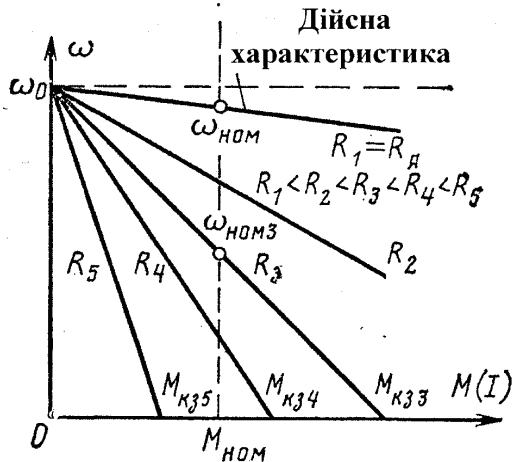


Рис. 5.2.

Як ми бачимо з рис. 5.2, при $M = 0$ усі характеристики проходять через одну точку, що лежить на осі ординат. Кутова швидкість у цій точці має цілком визначене значення, яке не залежить від опору якорного ланцюга. Ця швидкість носить назву швидкості ідеального холостого ходу ω_0 і визначається виразом:

$$\omega_0 = \frac{U}{k\Phi}.$$

Якщо двигун до появи навантаження працював із кутовою швидкістю ω_0 , то при появі на валу моменту опору кутова швидкість буде зменшуватись. Наслідком цього буде зменшення ЕРС обертання E відповідно (1) і збільшення струму якоря відповідно з рівнянням (3) і моменту двигуна по (2).

$$U = IR + E. \quad (3)$$

Кутова швидкість буде зменшуватися поки момент двигуна не зрівняється з моментом опору.

Студенти повинні пояснити фізичні процеси в двигуні постійного струму при перетворенні електричної енергії в механічну.

Навести основне рівняння двигуна і пояснити фізичний зміст його складових; кількісне співвідношення між ними в номінальному режимі роботи. Дати відповідь на запитання, як будується механічні характеристики двигуна незалежного збудження? Чому робочі характеристики двигуна послідовного збудження відрізняються від аналогічних характеристик двигуна паралельного збудження? Студентам потрібно вивчити відповідні лекції і вирішити такі задачі.

Задачі:

5.1. Визначити номінальний момент двигуна паралельного збудження, частоту обертання на холостому ході і ККД двигуна при номінальному навантаженні відповідно до таких даних: напруга живлення $U_{ном} = 220$ В,

номінальна частота обертання $n_{ном} = 1460 \frac{об}{хв}$, номінальний струм двигуна $I_{ном} = 55$ А, номінальна потужність на валу $P_{2ном} = 10$ кВт, номінальний струм збудження $I_{зб.ном} = 2$ А, опір обмотки якоря $r_{я} = 0,504$ Ом, потужність холостого ходу $P_{x_0} = 1100$ Вт.

Рішення:

Номінальний момент

$$M_{ном} = 9550(P_{2ном} / n_{ном}) = 9550(10,0/1460) = 65,4 \text{ Нм.}$$

Струм холостого ходу

$$I_x = P_x / U_{ном} = 1100 / 220 = 5 \text{ А.}$$

Номінальний струм якоря

$$I_{я,ном} - I_{ном} - I_{зб,ном} = 55 - 2 = 53 \text{ А.}$$

Повна потужність, яка споживається з мережі,

$$P_{1ном} = U_{ном} I_{ном} = 220 \cdot 55 = 12100 \text{ Вт.}$$

Коефіцієнт корисної дії

$$\eta_{ном} = P_{2ном} / P_{1ном} = 10,0 / 12,1 = 0,826.$$

струм якоря, на холостому ходу

$$I_{яx} = I_x - I_{зб,ном} = 5 - 2 = 3 \text{ А.}$$

Частота обертання двигуна на холостому ходу

$$n_0 = [n_{ном} (U_{ном} - I_{яx} r_{я})] / (U_{ном} - I_{яn} r_{я}) = [1460(220 - 3 \cdot 0,504)] / (220 - 53 \cdot 0,504) = 1650 \frac{об}{хв}.$$

5.2. Двигун постійного струму паралельного збудження живиться напругою $U = 110$ В; опір обмотки якоря двигуна $r_{я} = 0,07$ Ом. При повному навантаженні частота обертання двигуна $n = 1400 \frac{об}{хв}$, якірний струм $I_{я} = 74$ А. Визначити частоту обертання двигуна, якщо в ланцюг якоря підключений зовнішній опір $r = 0,3$ Ом, а момент навантаження збільшився удвічі. При цьому знехтувати реакцією якоря, а спадання напруги на щітках вважати рівним $\Delta U_k = 2$ В.

5.3. За результатами дослідження навантаження потрібно визначити опір обмотки якоря $r_{я}$, частоту обертання при ідеальному холостому ході n_0 , ЕРС Е, що має місце в обмотці якоря двигуна постійного струму з паралельним збудженням. В одному випадку: а) струм якоря, обумовлений навантаженням, складає 60 А, а частота обертання якоря 980 об/хв, у другому: б) струм 120 А, а частота обертання 960 об/хв. Номінальна напруга двигуна $U_{ном} = 220$ В.

5.4. Визначити частоту обертання двигуна постійного струму з паралельним збудженням при номінальному моменті на валу двигуна в русійному і генераторному (гальмівному) режимах, якщо в ланцюг якоря увімкнений опір $r = 0,08$ Ом. Опір обмотки якоря $r_{я} = 0,02$ Ом; $n_{ном} = 800 \frac{об}{хв}$, $n_0 = 860 \frac{об}{хв}$.

5.5. Визначити опір реостата, який потрібно увімкнути в ланцюг якоря двигуна з паралельним збудженням, щоб він розвинув момент $0,5 M_{ном}$ (при $0,5 I_{ном}$) і працював у режимі гальмування протиключенням із частотою обертання 900 об/хв. Паспортні дані двигуна: $P_{ном} = 65$ кВт; $U_{ном} = 440$ В; $I_{ном} = 168$ А; $n_{ном} = 1480 \frac{об}{хв}$.

Запитання до самоконтролю

1. Засоби створення робочого магнітного поля в машинах постійного струму. Переваги і недоліки машин з електромагнітним і магнітоелектричним збудженням.

2. З якою метою магнітна система машин постійного струму виготовляється з феромагнітних матеріалів.

3. Які фізичні процеси лежать в основі перетворення механічної енергії в електричну в генераторі і зворотного перетворення в двигуні.

4. Чому осердя якоря виготовляється з окремих ізольованих один від одного листів, а корпус статора із суцільної сталі, хоч по них замикається один і той же потік?

5. Основне рівняння двигуна, фізичний зміст його складових, кількісне співвідношення між ними в номінальному режимі роботи.

6. Що є основною причиною відмінності робочих характеристик двигуна послідовного збудження від аналогічних характеристик двигуна паралельного збудження?

Практичне заняття 6

Тема заняття: Втрати і коефіцієнт корисної дії електричних машин постійного струму.

Зміст заняття:

1. Електричні втрати.
2. Магнітні втрати.
3. Механічні втрати.
4. Додаткові втрати.
5. Коефіцієнт корисної дії.

В електричних машинах при основному процесі перетворення енергії (механічної або електричної) в корисну використовувану енергію (електричну або в механічну), частина енергії перетворюється в інші види енергії, які не використовуються, головним чином у теплову. Наявність невикористовуваної енергії зменшує коефіцієнт корисної дії і викликає нагрівання частин електричної машини. Енергія, що не використовується, визначається за одиницю часу і зветься втратами потужності або втратами. Втрати в електричній машині ділять на основні й додаткові. До основних належать:

1) електричні втрати, що викликані струмом у провідниках;

- 2) магнітні втрати, пов'язані з втратами енергії на перенамагнічення стальних ділянок магнітопроводу;
- 3) механічні втрати, обумовлені наявністю тертя між обертовими і нерухомими частинами машини. Додаткові втрати обумовлені такими явищами як перекручення магнітного поля при навантаженні, пульсації магнітного потоку та ін.

1. Електричні втрати

До цієї групи зараховують втрати в обмотках, у контактах, що ковзають, у пускових і регулювальних опорах. Відповідно закону Джоуля – Ленца електричні втрати в провідниках зі струмом I розраховуються за формулою:

$$\Delta P_e = I^2 r.$$

Ці втрати пропорційні квадрату струму в обмотці і сильно залежать від навантаження.

Опір r залежить від температури, тому електричні втрати відповідають визначеному тепловому стану провідника. Якщо відомий опір r_1 при температурі ϑ_1 , то при температурі ϑ_2 опір провідника буде:

$$r_2 = r_1 \frac{235 + \vartheta_2}{235 + \vartheta_1}.$$

2. Магнітні втрати

Магнітні втрати виникають у стальних ділянках магнітопроводу машини при перемагнічуванні. Втрати в сталі складаються з втрат від гістерезису і втрат від вихревих струмів.

Втрати від гістерезису. Ці втрати виникають унаслідок того, що магнітна індукція під час намагнічення сталі має більше значення, ніж під час розмагнічення при одній і тій самій намагнічуючій силі. Розрізняють:

- а) статичне перенамагнічення, що має місце при повільних змінах намагнічуючого струму в визначених межах;
- б) циклічне – викликане змінним струмом;
- в) обертове, яке виникає при обертанні сталі в магнітному полі.

Втрати від гістерезису в ваттах на кілограм маси при статичному і циклічному перемагніченні визначаються за формулою:

$$\Delta P_r = \sigma_r \cdot f \cdot B^2,$$

де σ_r – коефіцієнт, залежний від марки сталі;

$f = \frac{pn}{60}$ – частота перемагнічення сталі, гц;

B – найбільше значення магнітної індукції в сталі, тл.

Втрати від вихревих струмів.

Унаслідок перемагнічення сталі якоря в ній з'являються вихреві струми, які, замикаючись у сталі якоря, викликають додаткові втрати.

Втрати від вихревих струмів у ватах на кілограм маси визначаються за формулою:

$$\Delta P_{ac} = \sigma_{ac} (fB)^2,$$

де σ_{ac} – коефіцієнт, залежний від товщини листів сталі і її якості.

Магнітні втрати слабо залежать від навантаження, тому що при навантаженні магнітний потік змінюється незначно.

3. Механічні втрати

Механічні втрати викликаються наявністю тертя між обертальними і нерухомими частинами машини: у підшипниках, ковзних контактах ротора і повітря. До цієї групи втрат належать втрати енергії на обертання вентилятора, вбудованого в електричну машину.

$$\Delta P_T = k_T F \cdot V,$$

де K_T – коефіцієнт тертя; F – сила нормального тиску;

V – лінійна швидкість обертання.

$$\Delta P_Q \approx 1,75Q \cdot V^2,$$

де Q – кількість вентиляційного повітря, m^3/c ;

V – лінійна швидкість на зовнішньому діаметрі вентилятора.

Механічні втрати залежать тільки від частоти обертання і не залежать від навантаження. Розглянуті три види втрат називають основними.

4. Додаткові втрати

Внаслідок зубчастості якоря індукція біля поверхні полюсного осердя більша над зубцями і менша над пазами. При обертанні якоря в поверховому шарі полюсних осердів утворюються вихреві струми, які викликають додаткові втрати. Величина цих втрат залежить від розміру зазору, відкриття паза, швидкості обертання якоря, кількості пазів якоря, товщини листів полюсного наконечника і їхньої ізоляції.

При навантаженні машини також виникають додаткові втрати внаслідок викривлення розподілу магнітного поля під впливом поперечної реакції якоря. Унаслідок нерівномірного розподілу магнітної індукції в зазорі збільшуються поверхневі втрати.

Друга частина додаткових втрат пов'язана з утворенням вихревих струмів у осердях обмотки якоря внаслідок зміни потоку розсіювання. Розрахункове визначення додаткових втрат викликає значні труднощі, тому додаткові втрати оцінюють за експериментальними даними дослідження аналогічних машин.

Сумарні втрати можна представити у вигляді двох складових постійної і змінної. Зміна складова визначається як функція коефіцієнта навантаження, постійна складова від навантаження не залежить.

5. Коефіцієнт корисної дії.

Коефіцієнт корисної дії являє собою співвідношення корисної потужності P_2 до підведеної потужності P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

При розрахунку електричних машин і при їх випробуваннях простіше визначається електрична потужність і сума втрат $\Sigma \Delta P$, тому ККД генератора розраховується за формулою:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma \Delta P} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_2 + \Sigma \Delta P}$$

і ККД двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1}.$$

Характеристика ККД $\eta = f(P_2)$ електричної машини швидко росте із збільшенням навантаження в початковій частині. ККД досягає найбільшої величини при навантаженні, близькій до номінальної, при більших навантаженнях зменшується під впливом збільшення електричних і додаткових втрат. Максимального значення ККД досягає при такому навантаженні, коли змінні втрати, залежні від квадрата навантаження, будуть дорівнювати постійним втратам.

На практичному занятті студентам необхідно охарактеризувати кожен із складових втрат потужності при електромеханічному перетворенні енергії. Проаналізувати залежність ККД двигунів постійного струму від навантаження. Виконати розрахунок номінального і максимального значення ККД. Відповісти на запитання, який вигляд повинна мати механічна характеристика двигуна для того, щоб він працював стабільно.

Використовуючи формули для розрахунку втрат потужності, студентам пропонується вирішити відповідні задачі.

Задачі:

6.1. Визначити електричні втрати в ланцюзі якоря, суму механічних, магнітних і додаткових втрат двигуна постійного струму паралельного збудження, якщо обертовий момент двигуна $M = 38,5$ н·м, напруга $U = 220$ В, струм збудження $I_{зб} = 1,3$ А, ККД $\eta = 82,5$ %, частота обертання $n = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$, опір ланцюга якоря $r_a = 0,58$ Ом.

Рішення:

Швидкість обертання ротора:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{6,28 \cdot 1500}{60} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Корисна потужність на валу двигуна:

$$P_2 = M_2 \omega = 157 \cdot 38,5 = 6044,5 \text{ Вт}.$$

Потужність, яка використовується двигуном з мережі

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{6044,5}{0,825} = 7326,7 \text{ Вт}.$$

Потужність втрат у ланцюгу збудження:

$$\Delta P_{зб} = U \cdot I_{зб} = 220 \cdot 1,3 = 286 \text{ Вт}.$$

Потужність, що підводиться до обмотки якоря

$$P_{1я} = P_1 - \Delta P_{зб} = 7326,7 - 286 = 7040,7 \text{ Вт}.$$

Струм у обмотці якоря:

$$I_{я} = \frac{P_{1я}}{U} = \frac{7040,7}{220} = 32 \text{ А}.$$

Електричні втрати в якорному ланцюзі:

$$\Delta P_{e1} = I_{я}^2 r_{я} = 32^2 \cdot 0,58 = 593,92 \text{ Вт.}$$

Сума втрат механічних і додаткових:

$$\Sigma \Delta P = P_{1я} - \Delta P_{em} - P_2 = 7040,7 - 593,92 - 6044,5 = 402,28 \text{ Вт.}$$

6.2. У двигуна паралельного збудження з $P_2 = 25 \text{ кВт}$, $U_n = 110 \text{ В}$, і $\eta = 83 \%$ втрати потужності в ланцюзі збудження $\Delta P_{зб}$ складають 2,25 % від потужності P_1 , яка отримується з мережі, а втрати потужності в ланцюзі якоря $\Delta P_{я}$ складають 4,2 % від P_1 .

Визначити струм живлення I ; струм $I_{зб}$ і опір $r_{зб}$ обмотки збудження; струм $I_{я}$ і опір $r_{я}$ обмотки якоря; ЕРС якоря E .

6.3. Для генератора паралельного збудження визначити при номінальному режимі: електромагнітну потужність P_{em} ; втрати в міді ΔP_e ; втрати холостого ходу ΔP_x ; втрати в сталі ΔP_{st} ; механічні втрати $P_{мех}$; додаткові втрати ΔP_o .

Падіння напруги в контакті щіток прийняти рівним $2\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$. Робоча температура $\theta = 75^\circ \text{C}$. Номінальна потужність $P_n = 25 \text{ кВт}$. Напруга $U_n = 115 \text{ В}$; струм $I_n = 217 \text{ А}$; номінальний струм обмотки збудження $I_{зб,n} = 3 \text{ А}$. Опір обмотки якоря $r_{я}$ при $\theta = 15^\circ \text{C}$ $r_{я} = 0,006 \text{ Ом}$; ККД генератора $\eta = 88,5\%$,

6.4. Відповідно наведених даних: потужність $P_n = 95 \text{ кВт}$; напруга $U_n = 220 \text{ В}$; струм $I_n = 470 \text{ А}$; опір обмотки ланцюга якоря при $\theta = 20^\circ \text{C}$ $r_{я,20^\circ} = 0,0125 \text{ Ом}$; номінальний струм збудження $I_{зб} = 4,25 \text{ А}$; швидкість обертання $n = 500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

Визначити при номінальному режимі роботи двигуна паралельного збудження: ККД двигуна; втрати потужності в міді; постійні втрати потужності; струм холостого ходу. Падінням напруги в контакті щіток нехтувати. Робоча температура $\theta = 75^\circ \text{C}$.

6.5. Генератор постійного струму потужністю $P_n = 25 \text{ кВт}$ має ККД $\eta = 86,7\%$, активний опір ланцюга якоря $r_{я} = 0,13 \text{ Ом}$, сума механічних, магнітних і додаткових втрат складає 4% від номінальної потужності. Визначити струм обмотки якоря, якщо втрати в ланцюзі паралельного збудження $P_{зб} = 400 \text{ Вт}$.

Запитання до самоконтролю

1. Залежність ККД двигунів постійного струму від навантаження. Розрахунок номінального і максимального ККД.
2. Які втрати мають місце в двигунах постійного струму?
3. Яку величину називають коефіцієнтом втрат?
4. Які втрати визначаються як змінні, а які як постійні?

Практичне заняття 7

Тема заняття: Асинхронні машини.

Зміст заняття:

1. *Визначення електрорушійних сил в обмотках статора і ротора.*
2. *Опори обмоток статора і ротора.*
3. *Струми в обмотках статора і ротора.*

Визначення електрорушійних сил в обмотках статора і ротора

Якщо ротор асинхронної машини розімкнутий і нерухомий, а статор підключений до мережі з напругою U , і частотою f_1 , то в такому випадку асинхронна машина являє собою трансформатор при холостому ході. Під дією напруги U_1 по обмотці статора протікає струм холостого ходу I_0 . Утворена цим струмом МРС F_1 створює магнітний потік, одна частина якого (основний потік Φ_m) зчеплена з обмотками статора і ротора, а друга частина (потік розсіювання Φ_{σ_1}) – тільки з обмоткою статора.

Основний потік створює в обмотках статора і ротора ЕРС E_1 і E_2 , які визначаються формулами:

$$E_1 = \sqrt{2\pi} \cdot f_1 w_1 k_{об1} \cdot \Phi_m = 4,44 f_1 w_1 k_{об1} \Phi_m,$$

$$E_2 = \sqrt{2\pi} f_2 w_2 k_{об2} \Phi_m = 4,44 f_2 w_2 k_{об2} \Phi_m,$$

де $k_{об}$ – обмотувальний коефіцієнт.

Якщо ротор замкнений, то на його обмотці протікає струм I_2 . Виникаючий в обмотці ротора струм і обертаюче магнітне поле взаємодіють створюючи момент, який діє в напрямку обертового магнітного поля, і, відповідно, ротор почне обертатись. Частота обертання ротора n_2 без зовнішнього втручання не досягає синхронної, тому що при цьому зникає індуктивний зв'язок між провідниками ротора і магнітним полем. Відносно значення різниці частот обертання магнітного поля і ротора називають ковзанням S ; значення ковзання розраховується відповідно до формули:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Загальний вираз для ЕРС має вигляд:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 \cdot k_{об2} \Phi_m = 4,44 f_1 \cdot s \cdot w_2 k_{об2} \Phi_m = E_2 \cdot s.$$

Використовуючи вищевведені формули і матеріал лекцій студентам пропонується вирішити задачі, пов'язані з визначенням електрорушійних сил в обмотках статора і ротора.

Задачі:

7.1. Трифазний асинхронний двигун напругою $U_1 = 380$ В має магнітний потік на полюс і фазу:

$$\Phi_m = 0,02 \text{ Вб.}$$

Обмотка статора з'єднана зіркою, падіння напруги в статорній обмотці складає 9 %.

Визначити число витків однієї фази статорної обмотки, якщо обмотувальний коефіцієнт її складає $k_{об} = 0,94$.

Рішення:

Фазна напруга обмотки $U_{1\phi} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В}$. Електрорушійна сила при 9 % падінні напруги в статорній обмотці:

$$E_1 = 0,91 \cdot 220 \approx 200 \text{ В}.$$

Число витків фази:

$$w_1 = \frac{E_1}{4,44 k_{\sigma\phi} \cdot f_1 \cdot \Phi_m} = \frac{200}{4,44 \cdot 0,94 \cdot 50 \cdot 0,02} = 48.$$

7.2. Трифазний асинхронний двигун з фазним ротором має потік на полюс і фази $\Phi_m = 2,07 \cdot 10^{-2}$ Вб, число витків і обмоточні коефіцієнти відповідно обмоток статора і ротора дорівнюють $w_1 = 320$; $w_2 = 26$; $k_{\sigma 1} = 0,912$; $k_{\sigma 2} = 0,957$. Частота мережі $f_1 = 50 \text{ Гц}$.

Найти величини ЕРС, які індукуються у фазах статора і ротора двигуна, при нерухомому роторі і при його обертанні з ковзанням $s = 0,04$.

7.3. Асинхронний двигун з числом полюсів $2p=4$ має номінальну частоту обертання $n = 1450 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$. Визначити номінальне ковзання двигуна, частоту ЕРС взаємної індукції у фазах статора і ротора, якщо синхронна частота обертання $n_1 = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

7.4. Частота напруги живлення одного асинхронного двигуна у 8 разів більша, а магнітний потік у 2 рази менше, ніж у іншого. Яке співвідношення між ЕРС, індукованими в роторах цих двигунів, у перший момент після пуску?

Опори обмоток статора і ротора

Активний опір обмоток двигуна при короткому замиканні визначається так:

$$r_k = r_1 + r_2' = Z_k \cos \varphi_k.$$

Аналогічно визначається реактивний опір обмоток двигуна при короткому замиканні:

$$x_k = x_1 + x_2' = Z_k \sin \varphi,$$

де

$$Z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{мык}}}$$

називається повним опором обмоток двигуна при короткому замиканні.

Для кращого засвоєння матеріалу студентам треба повторити матеріал лекцій і вирішити наступні задачі.

Задачі:

7.5. Асинхронний трифазний двигун має наступні дані: $I_{1n} = 150 \text{ А}$; $U_1 = 380 \text{ В}$; $\cos \varphi_k = 0,3$.

Кратність пускового струму $I_n / I_{1n} = 6$. Визначити активний, реактивний і певний опір короткого замикання двигуна.

7.6. Визначити, який додатковий опір r_o потрібно включити в роторний ланцюг чотириполюсного асинхронного двигуна, підключеного до мережі з $f_1 = 50$ Гц, який обертається при номінальному навантаженні зі швидкістю $n_2 = 1455 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$, щоб при тому ж навантаженні понизити його швидкість до $n_2 = 900 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$. Опір обмотки ротора $r_2 = 0,06$ Ом.

Струми в обмотках статора і ротора

Позначимо через I_{2s} струм в одній фазі ротора, Z_{2s} – повний опір однієї фази ротора, який обертається. Тоді для ланцюга ротора, який замкнений накоротко, маємо:

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{Z_{2s}}, \text{ де } Z_{2s} = \sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}$$

і

$$I_{2s} = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}}.$$

Відповідно для нерухомого ротора отримуємо:

$$I_{2s} = \frac{s \cdot E_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}}.$$

З формули видно, що при збільшенні s , тобто при зменшенні швидкості обертання двигуна, струм росте і найбільшого значення досягає при нерухомому роторі. В цьому випадку:

$$I_{2s} = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + x_2^2}}.$$

Зсув фаз між ЕРС, що індукована в роторі E_{2s} і струмом I_{2s} , також залежить від ковзання:

$$\cos \varphi_2 = \frac{r_2}{Z_2} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{r_2}{\sqrt{r_2^2 + (sx_2)^2}}.$$

Залежність між струмами в статорі і роторі асинхронного двигуна визначаємо так само, як у трансформаторі, використовуючи рівняння магніторухійних сил:

$$\bar{I}_1 w_1 m_1 k_{o61} + \bar{I}_{w_2} m_2 k_{o62} = \bar{I}_0 w_1 m_1 k_{o6}.$$

Формулу можна привести до обмотки статора:

$$\bar{I}_1 + \bar{I} \frac{w_2 w_2 k_{o62}}{w_1 m_1 k_{o61}} = \bar{I}_0.$$

7.7. Трифазний асинхронний двигун обертається зі швидкістю $n_2 = 1425 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$, має такі дані:

ЕРС на кільцях ротора $E_2 = 208$ В, активний опір фази обмотки ротора $r_2 = 1$ Ом, індуктивний опір фази обмотки ротора $x_2 = 4$ Ом. Визначити фазний

струм в обмотці ротора при обертанні, при пуску і при зміні напрямку обертання двигуна.

7.8. Швидкість обертання магнітного поля асинхронного двигуна складає $n_1 = 3000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$. Визначити частоту струму статора, частоту струму ротора і швидкість обертання ротора, якщо ковзання $s = 3\%$.

Для активної участі в цьому практичному занятті студенти повинні володіти знаннями теоретичного лекційного матеріалу, а саме:

1. Знати електромагнітні процеси в електричних і магнітних ланцюгах асинхронної машини при холостому ході.
2. Електромагнітні процеси в електричних ланцюгах асинхронної машини при навантаженні.

Заяпитання до самоконтролю

1. Як визначається струм намагнічення в обмотці статора?
2. Що уявляє собою магніторушійна сила F_0 , яка утворює потік Φ_m ?
3. Що ми називаємо характеристикою холостого ходу і характеристикою намагнічення машини?
4. В яких режимах роботи АМ не має місця електромеханічному перетворенню енергії?
5. В яких режимах може працювати АМ і чим визначаються ці режими?

Практичне заняття 8

Тема заняття: Асинхронна машина.

Зміст заняття:

1. Механічні характеристики асинхронного двигуна. Обертовий момент.
2. Електромеханічне перетворення енергії в асинхронній машині. Втрати. Коефіцієнт корисної дії.

Механічні характеристики асинхронного двигуна

Для визначення повного обертового моменту маємо вираз:

$$M = \frac{3U_{\phi}^2 r_2'}{\omega_0 \left[(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right] s},$$

де x_1 і x_2' – первинні і вторинні зведені реактивні опори розсіювання;

r_1 і r_2' – первинні і вторинні зведені активні опори;

$\omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$ – синхронна кутова швидкість двигуна.

Механічна характеристика асинхронного двигуна може бути з достатньою точністю побудована по практичній формулі обертового моменту:

$$M = \frac{2M_{\max}}{s / s_k + s_k / s},$$

де s_k – критичне ковзання, а M_{\max} визначається формулою:

$$M_{\max} = \frac{3U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left[r_1 \pm \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right]}$$

Знак „+” належить до режиму руху, знак „-”, до режиму генератора.

На рис. 8.1. наведена механічна характеристика асинхронного двигуна. Її характерні точки:

1. $s=0, M=0$ – при цьому швидкість двигуна рівна синхронній;
2. $s=s_{\text{ном}}, M=M_{\text{ном}}$ – відповідає номінальній швидкості і номінальному моменту;
3. $s=s_k, M=M_{\text{max},p}$ – максимальний момент в режимі руху.

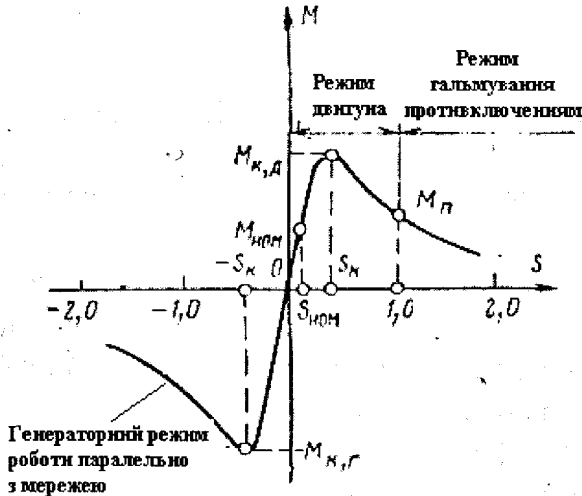


Рис. 8.1

4. $s=1,0; M=M_n = \frac{2M_{\max}(1+as_k)s_k}{1+s_k^2(1+2a)}$ – початковий пусковий момент, де $a=r_1/r_2'$;
5. $s=-s_k, M=M_{\max}$ – максимальний момент в генераторному режимі роботи паралельно з мережею.

При $s > 1$ двигун працює в режимі гальмування протиключенням, при $s < 0$ має місце генераторний режим.

Для кращого засвоєння матеріалу студентам необхідно вивчити лекційний матеріал за схемами заміщення асинхронної машини, приведенні роторних величин до статорної обмотки, просторо-часовій діаграмі асинхронної машини і вирішити такі задачі.

Задачі:

8.1. Визначити при якій швидкості обертання асинхронного двигуна має місце максимальний обертовий момент, якщо двигун при номінальній корисній

потужності $P_2 = 10 \text{ кВт}$ обертається зі швидкістю $n_2 = 1450 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$. Крім того відомо, що $M_{\text{max}} = 2M_n$.

Рішення:

Номінальний обертовий момент:

$$M_n = \frac{P_2}{\omega_2}; \quad \omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}; \quad M = \frac{10 \cdot 10^3 \cdot 60}{6,28 \cdot 1450} = 6,28 \text{ Нм}.$$

Максимальний обертовий момент

$$M_{\text{max}} = 2M_n = 2 \cdot 6,28 = 12,56 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номінальне ковзання:

$$s_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,033.$$

Ковзання, при якому має місце перекидання двигуна, визначаємо з рівняння:

$$M_n = \frac{2M_{\text{max}}}{\frac{s_n}{s_k} + \frac{s_k}{s_n}}$$

шляхом вирішення квадратного рівняння:

$$M_n s_k^2 - 2s_n M_{\text{max}} s_k + M_n s_n^2 = 0.$$

$$6,28 s_k^2 - 2 \cdot 0,033 \cdot 12,56 s_k + 6,28 \cdot 0,033^2 = 0$$

$$s_k = 0,1.$$

Швидкість обертання

$$n_2 = (1 - s_k) \cdot n_1 = 1350 \frac{\text{об}}{\text{хв}}.$$

8.2. Асинхронний трифазний двигун має такі дані: $U_1 = 380 \text{ В}$; $P_2 = 75 \text{ кВт}$; $n = 970 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$; $\eta = 0,9$; $\cos \varphi_1 = 0,85$.

Знайти номінальне ковзання, номінальний момент двигуна, номінальний струм статора.

8.3. Трифазний восьмиполюсний асинхронний двигун має: $U_{\text{ном}} = 380 \text{ В}$; $I_{\text{ном}} = 51 \text{ А}$; $n_{\text{ном}} = 725 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$. Співвідношення максимального і номінального моментів $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 3,3$. Опір роторного ланцюга $r_2 = 0,07 \text{ Ом}$; активним опором статорного ланцюга можемо нехтувати. Визначити: а) критичне ковзання; б) робоче ковзання, якщо напруга зменшиться до 350 В при незмінному навантаженні двигуна.

8.4. Трифазний асинхронний двигун з короткозамкненим ротором має: $U_n = 380 \text{ В}$; $P_{\text{ем}} = 10650 \text{ Вт}$; $n_1 = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$; $r_1 = 1,135 \text{ Ом}$; $r_2' = 1,28 \text{ Ом}$; $x_1 = 2,7 \text{ Ом}$; $x_2' = 3,8 \text{ Ом}$. Визначити номінальний, пусковий і максимальний моменти.

Електромеханічне перетворення енергії в асинхронній машині. Втрати. Коефіцієнт корисної дії

Розглянемо детальніше електромеханічне перетворення енергії в асинхронній машині.

У режимі двигуна кутова швидкість ротора не перевищує кутової швидкості поля ($0 < \Omega_2 < \Omega_1$); з мережі споживається активна потужність

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1,$$

де φ_1 – кут між напругою і струмом обмотки статора. Кут φ_1 рахуємо позитивним при відстаючому струмі. У режимі двигуна він перебуває в діапазоні $\pi/2 > \varphi_0 > \varphi_1 > 0$ і потужність P_1 позитивна.

Частина потужності P_1 відповідає електричним втратам $\Delta P_{e1} = m_1 r_1 I_1^2$ і виділяється у вигляді тепла в обмотці статора. Друга частина потужності P_1 , а саме $\Delta P_m = m_1 F_1 I_0 \cos \beta'_0$; де β'_0 – кут між струмом I_0 і ЕРС, \dot{E}_1 відповідає магнітним втратам, які у вигляді тепла виділяються в магнітопроводі статора. Потужність, що залишилась $P_{em} = P_1 - \Delta P_{e1} - \Delta P_m = m_1 E_1 I_2' \cos \beta_2$, передається електромагнітним шляхом через зазор від статора до ротора. Потужність P_{em} називається електромагнітною. Кут β_2 є кутом між ЕРС, \dot{E}_1 і струмом I_2' . Можемо записати електромагнітну потужність через величини ротора:

$$P_{em} = m_2 E_2 I_2 \cos \beta_2 = M \Omega_1 = M \Omega_s + M \Omega.$$

Потужність $M \Omega_s = M \Omega_1 \cdot s$ являє собою електричні втрати в обмотці ротора ΔP_{e2} .

Відповідно потужність $M \Omega = M \Omega_1 (1-s)$ – являє собою механічну потужність, яка розвивається електромагнітним моментом M при обертанні ротора з кутовою швидкістю Ω :

$$\begin{aligned} \Delta P_{e2} &= s P_{em}, \\ P_{мех} &= P_2' = (1-s) P_{em}. \end{aligned}$$

Корисна механічна потужність P_2 , яка передається через вал виконавчій машині, менша механічної потужності P_2' , яка поступає на ротор, на механічні втрати ΔP_T (на тертя в підшипниках, тертя ротора і повітря та ін.), а також додаткові втрати в обмотках і магнітопроводах, пов'язані з вищими гармонічними струмів і магнітних полів.

$$P_2 = P_2' - \Delta P_T - \Delta P_o.$$

Коефіцієнт корисної дії машини в режимі двигуна визначається як співвідношення корисної механічної потужності до активної потужності P_1 , що споживається з мережі.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P_1},$$

де $\Sigma \Delta P = \Delta P_m + \Delta P_{e1} + \Delta P_{e2} + \Delta P_T + \Delta P_o$ – сума втрат у машині.

Студентам побудувати енергетичну діаграму асинхронного двигуна і дати пояснення фізичної суті процесів перетворення енергії в машині. Для глибокого розуміння електромеханічного перетворення енергії в машині розв'язати такі задачі.

Задачі:

8.5. Асинхронний двигун із фазним ротором і включеним у ланцюг ротора опором обертається з частотою $750 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ і споживає з мережі 55 кВт. Визначити електромагнітну потужність $P_{\text{ем}}$, потужність P_2 , що передається користувачу, втрати в ланцюзі ротора (в обмотці і реостаті) ΔP_{e2} і момент M на валу двигуна, якщо втрати в обмотці і осерді статора складають 5кВт. Втратами в осерді ротора і механічними знехтувати. Частота обертання магнітного потоку двигуна $n_1 = 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

Рішення:

Електромагнітна потужність двигуна складає:

$$P_{\text{ем}} = P_1 - \Delta P_{e1} - \Delta P_{\text{м}} = 55 - 5 = 50 \text{ кВт.}$$

Електромагнітний момент на валу складає:

$$M = M_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{\omega_1} = \frac{P_{\text{ем}} \cdot 30}{\pi \cdot n_1} = \frac{50 \cdot 10^3 \cdot 30}{3,14 \cdot 1500} = 318 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Потужність на валу складає:

$$P_2 = P_{\text{ем}}(1-s); s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}; s = \frac{1500 - 750}{1500} = 0,5; P_2 = 50 \cdot 0,5 = 25 \text{ кВт.}$$

Втрати в ланцюзі ротора:

$$\Delta P_{e2} = P_{\text{ем}} \cdot s = 50 \cdot 0,5 = 25 \text{ кВт.}$$

8.6. Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором перебуває в нерухомому стані і споживає з мережі 15 кВт. Визначити електромагнітну потужність $P_{\text{ем}}$, якщо в обмотці і осерді статора втрати складають 6кВт. Втратами в осерді ротора знехтувати. Частота обертання магнітного потоку двигуна $n_1 = 1000 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$.

8.7. Потужність, що споживається асинхронним двигуном складає 16,7 кВт, напруга мережі 380 В, коефіцієнт потужності 0,88. Активний опір обмотки статора, виміряний між її лінійними виводами – 0,56 Ом. Ковзання – 0,033. Магнітні втрати в осерді статора складають половину електричних втрат в обмотці статора, механічні і додаткові втрати складають 5 % від сумарних. Визначити корисну потужність і коефіцієнт корисної дії двигуна.

8.8. Асинхронний двигун має потужність на валу $P_2 = 12$ кВт. Визначити потужність, що споживається з мережі, струм, що споживається, коефіцієнт корисної дії, якщо робоча напруга мережі 380 В, а втрати потужності складають у сталі $\Delta P_{\text{м}} = 240$ Вт, у міді статора $\Delta P_{e1} = 745$ Вт, у міді ротора $\Delta P_{e2} = 490$ Вт, на тертя $\Delta P_{\text{мех}} = 238$ Вт, ($\cos \phi_1 = 0,88$).

Запитання для самоконтролю

1. Які гальмівні режими притаманні АМ?
2. Який вплив на механічну характеристику АМ має зміна напруга мережі?

3. Від чого залежить критичне ковзання АМ?
4. Намалювати епергетичну діаграму АМ, пояснити фізичний зміст втрат при електромеханічному перетворенні енергії.

Практичне заняття 9

Тема заняття: Електромагнітні процеси в синхронній машині при холостому ході.

У режимі холостого ходу струм в обмотці якоря дорівнює нулю. Обмотка збудження, яка розташована на роторі, що обертається із кутовою швидкістю Ω , при її живленні постійним струмом I_f утворює обертове магнітне поле збудження, яка індукує в обмотці якоря ЕРС E_f .

Обмотка збудження має два різновиди виконання: розподільна обмотка збудження (застосовується при неявнополюсній конструкції ротора), скупчена обмотка збудження (застосовується при явнополюсній конструкції ротора).

МРС розподільної обмотки збудження протягом полюсного інтервалу має ступінчасту форму з максимальним значенням на осі ненамотаної частини полюса.

$$F_{jm} = I_f \cdot w_f,$$

де $w_f = w_k q / 2$ – число витків на полюс обмотки збудження; q – число обмотаних пазів на полюс; w_k – число витків котушки в пази; I_f – струм збудження.

Амплітуда основної гармонічної МРС

$$F_{f1m} = \frac{4 \sin(\rho \pi/2)}{\pi \rho \pi/2} F_{jm},$$

де $\rho = b/\tau$ – відносна довжина намотаної частини полюса; b – довжина намотаної частини полюсного розподілку.

МРС скупченої обмотки збудження, на інтервалі полюсного розподілку має постійну величину, що дорівнює:

$$F_{jm} = I_f w_f,$$

де w_f – число витків на полюс обмотки збудження; I_f – струм збудження.

Форма поля збудження при холостому ході характеризується системою коефіцієнтів: k_f , k_ψ , α_δ і k_σ .

Коефіцієнт форми поля збудження:

$$k_f = B_{\delta 1m} / B_\delta,$$

де $B_{\delta 1m}$ – амплітуда основної гармонічної індукції у зазорі; B_δ – радіальна складова індукції на осі полюса.

Для неявнополюсної машини без урахування насичення:

$$k_f = 8 \sin(\rho \pi/2) / (\pi^2 \rho).$$

Коефіцієнт потоку збудження:

$$k_{\phi} = \Phi_{fm} / \Phi_{f1m},$$

де $\Phi_{fm} = \tau^{\ell}_{\delta} B_{\delta xp}$ – повний (реальний) потік взаємоіндукції; $\Phi_{f1m} = (\frac{2}{\pi}) \tau^{\ell}_{\delta} B_{\delta 1m}$ – потік основної гармонічної індукції; $B_{\delta xp}$ – середня індукція у зазорі.

Розрахунковий коефіцієнт полюсного перекриття:

$$\alpha_{\delta} = B_{\delta xp} / B_{\delta},$$

для неявнополюсної машини без урахування насичення:

$$\alpha_{\delta} = 1 - 0,5p.$$

Коефіцієнт форми ЕРС без урахування насичення:

$$k_B = B_{\delta 11} / B_{\delta xp} = \frac{\pi}{2} \sqrt{2} k_{\phi},$$

де $B_{\delta 11} = B_{\delta 1m} / \sqrt{2}$ – діюче значення основної гармонічної індукції.

Розрахунок магнітного ланцюга при холостому ході здійснюється для визначення струму збудження I_f або МРС збудження F_{fm} , які утворюють магнітне поле взаємоіндукції із потоком $\Phi_{fm} = \Phi_m$, що індукується в обмотці статора ЕРС E_f .

Повний потік взаємоіндукції:

$$\Phi_m = \Phi_{fm} = k_{\phi} \Phi_{f1m} = E_f / (4k_B f, f, w, k_{\sigma 1}),$$

де $E_f = E_{f1}$ – діюче значення першої гармонічної ЕРС; f_1 – частота зміни потоку; w_1 і $k_{\sigma 1}$ – число витків і обмоточний коефіцієнт статора.

МРС збудження:

$$F_{fm} = F_1 + F_2,$$

де $F_1 = F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1}$ – магнітна напруга повітряного зазору і магнітопроводу статора (зубці і ярмо), розраховується так само, як і в асинхронній машині; при цьому розрахункові коефіцієнти поля збудження визначаються з урахуванням конструктивних особливостей ротора; F_2 – магнітна напруга ротора.

Магнітні напруги в області ротора розраховуються для повного магнітного потоку Φ_2 в основі зубців (полюсів) ротора, які складаються з потоку Φ_m і потоку розсіювання, зчепленого з обмоткою збудження $\Phi_{f\sigma}$:

$$\Phi_2 = \Phi_m + \Phi_{f\sigma} + \delta_f \Phi_m.$$

Характеристики холостого ходу і намагнічення синхронної машини такі:

- характеристика холостого ходу:

$$E_f = f(I_f) \text{ або } E_f = f(F_{fm});$$

- основна характеристика намагнічення:

$$\Phi_m = f(F_{fm});$$

- перехідна характеристика намагнічення:

$$\Phi_m = f(F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1}) = f(F_1);$$

- характеристика намагнічення зазору:

$$\Phi_m = f(F_{\delta});$$

- характеристика намагнічення для потоку розсіювання:

$$\Phi_{j\sigma} = f(F_{\delta} + F_{z1} + F_{a1}) = f(F_1);$$

- характеристика намагнічення магнітопроводу ротора:

$$\Phi_2 = f(F_2).$$

Для повноцінного засвоєння матеріалу студентам необхідно вивчити лекційний курс, а саме: розглянути форму напруги і магнітного струму при холостому ході; магнітне поле взаємодукції і ЕРС від струмів у обмотці якоря; параметри обмотки якоря для струмів прямої послідовності і вирішити наступні задачі.

Задачі:

9.1. Визначити потік основної гармоніки поля збудження для шестиполусної синхронної машини з такими конструктивними даними: полюсний розподіл $\tau = 16,5$ см, розрахункова довжина $\ell_{\delta} = 13,7$ см, число витків обмотки збудження на полюс $w_f = 77$, повітряний зазор $\delta = 1$ мм, коефіцієнт форми поля збудження $k_f = 1,1$, струм збудження $I_f = 7,1$ А.

Знаходимо МРС обмотки збудження на осі полюса:

$$F_{jm} = I_f \cdot w_f = 7,1 \cdot 77 = 546,7 \text{ А.}$$

Визначасмо індукцію на осі полюса:

$$B_{\delta} = \frac{\mu_0 F_f}{\delta} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 546,7}{10^{-3}} = 0,69 \text{ Тл.}$$

Розрахуємо магнітний потік по першій гармонічній індукції, для чого нам необхідно визначити амплітуду основної гармонічної індукції у зазорі

$$\Phi_{f1m} = \frac{2}{\pi} \tau \cdot \ell_{\delta} \cdot B_{\delta 1m},$$

де $B_{\delta 1m} = k_f \cdot B_{\delta}$.

$$B_{\delta 1m} = 1,1 \cdot 0,69 = 0,759.$$

$$\Phi_{f1m} = 0,64 \cdot 0,165 \cdot 0,137 \cdot 0,759 = 1,08 \cdot 10^{-2} \text{ Вб.}$$

9.2. Коефіцієнт форми поля збудження явнополусної синхронної машини $k_f = 1,05$. Знайти амплітуду основної гармонічної індукції поля збудження в зазорі $B_{\delta 1m}$, якщо радіальна складова індукції на осі полюса $B_{\delta} = 0,75$ Тл. Чому дорівнює основна гармонічна індукції в точці зазору, зміщеної відносно осі обмотки на кут $\gamma = \pi/6$?

9.3. Індукція на осі полюса неявно полюсної синхронної машини $B_{\delta} = 0,85$ Тл.

Визначити середню індукцію в зазорі, якщо довжина обмотаної частини полюсного розподілу ротора $b = 110$, внутрішній діаметр статора $D_1 = 98$ см. Число полюсів машини $2p = 2$.

9.4. Струм збудження чотириполусної синхронної машини складає $I_f = 8$ А. Цей струм при проходженні по обмотці збудження з числом витків на полюс $w_f = 100$, створює поле збудження, потік основної гармоніки якого складає $\Phi_{f1m} = 1,08 \cdot 10^{-2}$ Вб. Визначити повітряний зазор машини, якщо відомі полюсний

розподіл машини $\tau = 17,7$ см, її розрахункова довжина $\ell_s = 11,6$ см, коефіцієнт форми збудження $k_f = 1,05$.

Запитання для самоконтролю

1. Який вигляд має форма напруги і магнітного поля при холостому ході?
2. Електромагнітні процеси в явнополісній машині (без урахування насичення).
3. Електромагнітні процеси в неявно полісній синхронній машині (без урахування насичення).
4. Намалювати векторну діаграму синхронної машини.
5. Визначити параметри обмотки якоря (для струмів прямої послідовності).
6. МРС якоря і її складові по поздовжній і поперечній осях.

Практичне заняття 10

Тема заняття: Синхронні машини.

Зміст заняття:

1. Електромагнітні процеси в синхронній машині при навантаженні.
2. Електромеханічне перетворення енергії в синхронній машині.

Електромеханічні процеси в синхронній машині при навантаженні.

Неявнополісна синхрона машина.

Рівняння напруги для фази якоря

$$\dot{E}_f + \dot{E}_\sigma + \dot{E}_a = \dot{U} + RI,$$

де $\dot{E}_f = f(F_\delta)$ – ЕРС збудження, індукована полем взаємоіндукції від МРС збудження F_{fm} , яка визначається за допомогою випрямленої характеристики холостого ходу; $\dot{E}_\sigma = -jx_\sigma \dot{I}$ – ЕРС розсіювання, яка індукована полем розсіювання струмів якоря, що визначається за допомогою індуктивного опору розсіювання обмотки якоря X_σ ; $E_a = -jx_a I$ – ЕРС взаємоіндукції якоря, яка індукована полем взаємоіндукції від системи струмів I якоря; \dot{U} – фазна напруга на виводах обмотки якоря; R – активний опір фази обмотки якоря.

Режим 2, в якому працює синхронна машина, характеризується чотирма основними величинами; напругою якоря U_1 струмом якоря I_1 кутом між ними φ і струмом збудження I_f . Якщо задані U , I , φ , то ЕРС, яку ми шукаємо, визначається:

$$E_f = \sqrt{(U \cos \varphi + RI)^2 + (U \sin \varphi + X_1 I)^2},$$

де $X_1 = X_\sigma + X_a$ – повний індуктивний опір обмотки якоря.

Задані $I, \varphi, E_f(I_f)$. Струм визначається:

$$I = -\frac{2U(x_1 \sin \varphi + R \cos \varphi)}{2(x_1^2 + R^2)} \pm \frac{\sqrt{4U^2(x_1 \sin \varphi + R \cos \varphi)^2 + 4(x_1^2 + R^2)(E_f^2 - U^2)}}{2(x_1^2 + R^2)}.$$

Задані I , φ , $E_f(I_f)$ Напряга визначається:

$$U = -(X_1 \sin \varphi + R \cos \varphi) \pm \sqrt{I^2 (X_1 \sin \varphi + R \cos \varphi)^2 + E_f^2 - (x_1^2 + R^2) I^2}.$$

Задані U , I , $E_f(I_f)$. Кут визначається:

$$\varphi = \arcsin \frac{x_1}{Z_1} \pm \arccos \frac{E_f^2 - U^2 - (x_1^2 + R^2) I^2}{2UIZ_2},$$

де $Z_1 = R + jx_1$.

Явнополюсна синхронна машина

Рівняння напруг для фази обмотки якоря.

$$E_f + E_\sigma + E_{ad} + E_{aq} = U + RI,$$

де E_{ad} і E_{aq} – ЕРС взаємоіндукція якоря, які індуквані полем взаємоіндукції від системи струмів I_d I_q обмотки якоря, що визначається за допомогою головних індуктивних опорів X_{ad} і X_{aq} :

$$E_{ad} = -jX_{ad} I_d, \quad E_{dq} = -jX_{aq} I_q.$$

Розраховуємо ЕРС збудження E_f при заданих U , I і φ

$$E_f = \frac{u^2 + IU(X_d + X_q) \sin \varphi + 2UIR \cos \varphi + I^2(R^2 + X_d X_q)}{\sqrt{u^2 + 2UI(X_q \sin \varphi + R \cos \varphi) + I^2(R^2 + X_q^2)}}.$$

При заданих $Z_u = R_u + jx_u$, I і φ маємо:

$$E_f = I \frac{Z_u^2 + X_u(X_d + X_q) + 2RR_u + X_d X_q + R^2}{\sqrt{Z_u^2 + 2(X_u X_q + R_u R)X_q^2 + R^2}}, U = Z_u I,$$

де $X_d = X_\sigma + X_{ad}$, $X_q = X_\sigma + X_{aq}$ – повний індуктивний опір обмотки якоря по поздовжніх і поперечних осях.

Для засвоєння матеріалу студентам треба вивчити відповідний лекційний курс і вирішити такі задачі.

Задачі:

10.1. Розрахувати величину ЕРС збудження турбогенератора в режимі номінального навантаження, при номінальній напрузі $U_{н,\phi} = 230$ В, номінальний струм $I_n = 1800$ А і коефіцієнт потужності $\cos \varphi = 0,8$. Активний опір фази обмотки якоря $R = 0,00162$ Ом.

Повний індуктивний опір обмотки якоря $X_1 = 0,211$ Ом.

Впливом насичення знехтувати.

Рішення:

$$E_f = \sqrt{(U_n \cos \varphi + RI_n)^2 + (U_n \sin \varphi + X_1 I_n)^2} =$$

$$\sqrt{(230 \cdot 0,8 + 0,00162 \cdot 1800)^2 + (230 \cdot 0,5995 + 0,211 \cdot 1800)^2} = 550 \text{ В}$$

10.2. Визначити струм навантаження турбогенератора при лінійній напрузі $U_{\text{н.л}} = 6,3$ кВ, і коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 0,8$, якщо відомі ЕРС збудження генератора $E_f = 7,5$ кВ, активний і повний індуктивний опір обмотки якоря $R = 0,235$ Ом, $X_1 = 32,9$ Ом. Обмотка з'єднана в зірку. Впливом насичення, знехтувати.

10.3. Активний і повний опір обмотки якоря неявнополюсної синхронної машини $R = 0,00136$ Ом, $x_1 = 1,64$ Ом. Визначити, нехтуючи насиченням, коефіцієнт потужності генератора, якщо при струмі $I = 17$ кА фазна напруга на затискачах генератора $U_\phi = 11,55$ кВ, а ЕРС збудження $E_f = 25$ кВ.

Електромеханічне перетворення енергії в синхронній машині

Механічна потужність, що підводиться до генератора від первинного двигуна, з урахуванням потужності збудження.

$$P_1 = M\Omega,$$

де M_1 – обертовий момент двигуна; Ω - кутова швидкість.

Механічна потужність, яка отримується ротором генератора.

$$P_\beta = P_1 - P_f / \eta_f = M_\beta \Omega,$$

де P_f / η_f – механічна потужність, що витрачається в збуднику; η_f – ККД збудника; M_β – момент, що діє на ротор машини.

Механічна потужність $P_{\text{мех}}$, яка перетворюється електромагнітним шляхом в електромагнітну потужність $P_{\text{ем}}$:

$$P_{\text{мех}} = P_\beta - \Delta P_T - \Delta P_{\text{м.д}} = M\Omega = P_{\text{ем}},$$

де ΔP_T механічні втрати; $\Delta P_{\text{м.д}}$ - додаткові втрати в магнітопроводах; M – електромагнітний момент.

Електрична потужність $P_{\text{ел}}$, яка передається в обмотку якоря

$$P_{\text{ел}} = P_{\text{ем}} - \Delta P_{\text{м}},$$

де $\Delta P_{\text{м}}$ – магнітні втрати в магнітопроводі статора.

Активна потужність P , що передається генератором навантаженню

$$P = m_1 UI \cos\varphi = P_{\text{ел}} - \Delta P_{\text{ел}},$$

де $\Delta P_{\text{ел}} = mR I^2$ – електричні втрати в обмотці якоря;

R – активний опір обмотки якоря.

Коефіцієнт корисної дії синхронного генератора:

$$\eta = \frac{P}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma \Delta P}{P + \Sigma \Delta P},$$

де $\Sigma \Delta P = \Delta P_f / \eta_f + \Delta P_T + \Delta P_{\text{м.д}} + \Delta P_M + \Delta P_{\text{ел}}$ – сума втрат у машині.

Для вирішення наступних задач студентам треба ознайомитися з матеріалом лекції і розібратись із вище наведеними формулами.

10.4. Потужність, що використовується навантаженням трифазного синхронного генератора, $P_n = 26$ МВт. Визначити активний опір обмотки якоря,

якщо електромагнітна потужність генератора $P_{em} = 26,2$ МВт, магнітні втрати в магнітопроводі статора $P_m = 150$ кВт, фазний струм генератора $I = 1790$ А.

Рішення:

Визначаємо електричну потужність P_{e1} , яка передається в обмотку якоря:

$$P_{e1} = P_{em} - \Delta P_m = 26,2 \text{ МВт} - 150 \text{ кВт} = 26050 \text{ кВт.}$$

3. Визначаємо величину електричних втрат в обмотці якоря:

$$\Delta P_{e1} = P_{e1} - P_n = 26050 - 26000 = 50 \text{ кВт.}$$

4. Активний опір обмотки якоря:

$$R = \frac{\Delta P_{e1}}{mI^2} = \frac{50000}{3 \cdot 3204100} = 0,0052 \text{ Ом.}$$

10.5. Струм збудження синхронного генератора в номінальному режимі ($S_n = 26 \text{ МВ} \cdot \text{А}$; $\cos \varphi_n = 0,8$) $I_{fn} = 860$ А, опір обмотки збудження $R_f = 0,232$ Ом, ККД збуджувача $\eta_f = 0,85$. Визначити обертовий момент турбіни, якщо сума повних магнітних і електричних втрат складає 324кВт, а механічні втрати дорівнюють половині втрат в обмотці збудження. Кутова швидкість обертання ротора $\Omega = 13,08 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

10.6. Обертовий момент турбіни, яка забезпечує обертання двополюсного турбогенератора, $M = 81910$ Н·м, активна потужність, що віддає генератор, $P_n = 25 \text{ МВт}$. Визначити механічну потужність, що використовується для обертання збудника, якщо механічні втрати в машині $\Delta P_T = 400$ кВт, повні магнітні втрати $\Delta P_m + \Delta P_{m.0} = 150$ кВт, певні електричні втрати $\Delta P_{e1} = 45$ кВт. Частота струму $f = 50$ Гц.

10.7. Номінальна потужність гідрогенератора $S_n = 26 \text{ МВ} \cdot \text{А}$, номінальний коефіцієнт потужності $\cos \varphi_n = 0,8$. Розрахувати повні втрати і ККД генератора, якщо механічні втрати $\Delta P_T = 88$ кВт, електричні втрати в обмотці якоря з врахуванням додаткових втрат $\Delta P_{e1} = 185$ кВт, магнітні втрати з врахуванням додаткових втрат в магнітопроводі $\Delta P_m + \Delta P_{m.0} = 138,5$ кВт, а потужність, яка розходується на обертання збудника, $-\Delta P_f / \eta_f = 167$ кВт.

Запитання для самоконтролю

1. Який вигляд має діаграма напруг і схема заміщення неявнополюсної синхронної машини (без урахування насичення)?
2. Реакція якоря в неявнополюсній машині за різних умов навантаження.
3. Намалювати діаграму і схему заміщення насиченої синхронної машини (з урахуванням магнітних втрат).
4. Що називається кутовою характеристикою синхронної машини?

Запитання для повторення

1. Основоположні закони електромеханічного перетворення (ЕМП) енергії в індуктивних машинах.
2. Структура ЕМП і основні фізичні процеси в його конструктивних елементах.
3. Різновиди електричних машин за характером переміщення і формою рухомих частин.
4. Лінійні синхронні двигуни.
5. Математичний опис електромеханічних процесів перетворення енергії в електричних машинах.
6. Необхідні умови отримання електромеханічного перетворення енергії.
7. Циліндричне різноіменнополосна обмотка.
8. Тороїдальна різноіменнополосна обмотка.
9. Кільцеподібна обмотка та кігтеподібний магнітопровід.
10. Модифікації принципів виконання електричних машин.
11. Машина з однією обмоткою на статорі й однією обмоткою на роторі.
12. Машина з однією обмоткою на статорі і зубчастим магнітопроводом ротора (індукторна машина)
13. Умови отримання однонаправленого перетворення енергії в електричній машині. Машина з однією обмоткою.
14. Машина з двома обмотками.
15. Принцип дії двигуна постійного струму.
16. Режими роботи машини постійного струму.
17. Енергетична діаграма двигуна постійного струму.
18. Втрати енергії і ККД ЕМП.
19. Асинхронні машини (АМ). Принцип дії.
20. Електромагнітний момент АМ. Механічна характеристика.
21. Електромагнітні процеси в електричних і магнітних ланцюгах електричної машини при холостому ході. Режим ідеального холостого ходу.
22. Електромагнітні процеси в електричних ланцюгах АМ при навантаженні.
23. Діаграма напруги і струмів АМ.
24. ЕМП в АМ. Втрати і ККД.
25. Загальні відомості про синхронні машини (СМ). Призначення і область використання.
26. Принцип дії синхронного генератора.
27. Електромагнітні процеси в синхронній машині при холостому ході.
28. Електромагнітні процеси в синхронній машині при навантаженні.
29. ЕМП і СМ. Втрати і ККД.

Література з навчальної дисципліни

Основна

1. *Попов В. В.* Введение в электромеханику. – СПб: Из-во СПбГТУ, 2000.
2. *Иванов-Смоленский А. В.* Электрические машины. – М.: Энергия, 1980.
3. *Чиликин М. Г., Сандлер А.С.* Общий курс электропривода. – М.: Энергоиздат, 1981.
4. *Бут Д.А.* Электромеханические преобразователи энергии. – М.: МЭИ, 1976.
5. *Брейтер Б. З.* Машины постоянного тока. – М.: Энергоиздат, 2000.
6. *Читегян В. И.* Электрические машины. – М.: Энергия, 1988.
7. *Кислицын А. Л.* Синхронные машины. – Ульяновск: УаГТУ, 2000.
8. *Брейтер Б. З.* Электромеханика. Машины переменного тока. – М.: РГОТУПС, 2000.

Допоміжна

1. *Попов М. Б.* Основы электромеханики. – К.: НАУ, 2003.
2. *Столяров И. М.* Электрические машины. Основы теории электромеханических преобразователей. – Ленинград.: Энергия, 1975.
3. *Ткачук В. І.* Електромеханотроніка. – Львів.: ЛПУ, 2001.
4. *Данку А. и др.* Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1984.

Навчально-методичне видання

Валентин Григорович Гришко

**Спеціальні методи розрахунку
електромеханічних систем**

Методичні вказівки
щодо підготовки та виконання практичних занять
з дисципліни «Спеціальні методи розрахунку електромеханічних систем»
для студентів спеціальності 7.092202 «Електричний транспорт»,
спеціалізація «Електровози та електропоїзди»
усіх форм навчання

Відповідальний за випуск Гришко В. Г.
Редактор Щербак Н. В.
Макет і верстка В. О. Андрієнка

Підписано до друку 12.05.2011. Формат 60x84/16.
Друк – на ризографі. Папір офсетний.
Зам. № 53-2/11 Наклад 60 прим.

Надруковано в Редакційно-видавничому відділі ДЕТУТ.
Свідоцтво про реєстрацію Серія ДК № 3079 від 27.12.2007.
03049, №. Київ-49, вул. Миколи Лукашевича, 19