

Семестр 6 навчальна дисципліна «Електричні машини»
галузь знань 14 – «Електрична інженерія»
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
Підготував: доц. Ярошенко Леонід Вікторович
Лекція № 36

Тема: «Робота синхронного генератора на автономне навантаження»

ПЛАН

1. Робочі характеристики синхронного генератора;
2. Зміна вихідної напруги синхронного генератора і діаграма електромагніто-рушійних сил (ЕМРС);
- 3 Розрахунок реактивних параметрів синхронного генератора;
- 4 Енергетична діаграма, втрати і ККД синхронного генератора;
- 5 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного генератора, кутова характеристика;

1 Робочі характеристики синхронного генератора

Синхронні генератори можуть працювати в режимі автономного навантаження і в режимі паралельної роботи на загальне навантаження.

При роботі синхронного генератора на автономне навантаження, його властивості можна описати такими робочими характеристиками:

1. Навантажувальна характеристика

Залежність $U = f(I_{3\phi})$ при $f = const$; $\cos\varphi = const$; $I = const$.

В окремому випадку, тобто при $I = 0$ залежність $E_0 = f(I_{3\phi})$ є **характеристикою холостого ходу**.

2. Зовнішня характеристика

Залежність $U = f(I)$ при $f = const$; $\cos\varphi = const$; $I_{3\phi} = const$;

3. Регульовальна характеристика

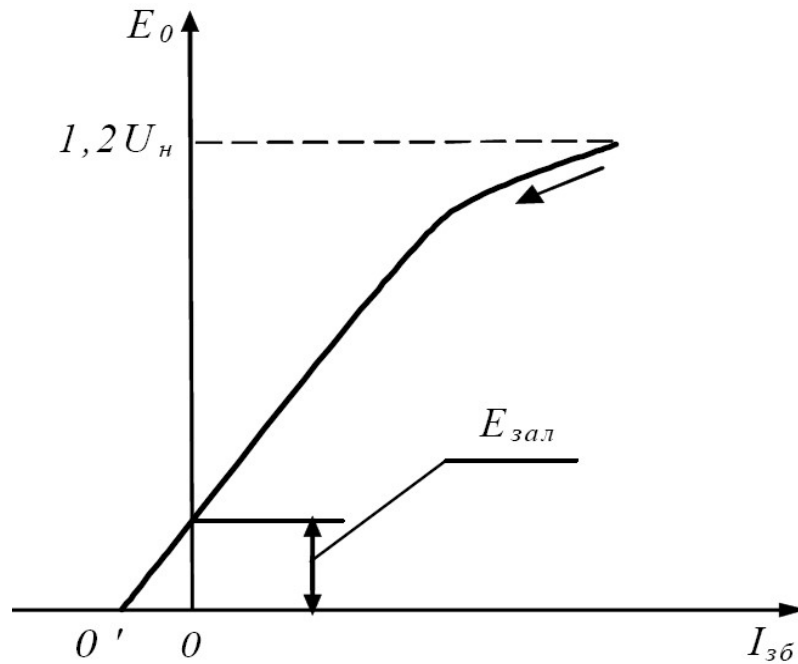
Залежність $I_{3\phi} = f(I)$ при $f = const$; $\cos\varphi = const$; $U = const$;

В окремому випадку, тобто при $U = 0$ залежність $I_k = f(I_{3\phi})$ – є **характеристикою короткого замикання**.

Розглянемо ці характеристики, як отримані експериментально.

Характеристика холостого ходу являє собою залежність напруги на виході генератора в режимі холостого ходу від струму збудження $E_0 = f(I_{зб})$ при $I = 0; f = \text{const}$.

Ця характеристика знімається при розімкнутих затискачах обмотки якоря. Її можна зняти при збільшенні струму збудження $I_{зб}$ (висхідна гілка), а також при зменшенні струму збудження (спадна вітка). За ДСТ знімається спадна гілка характеристики від значення $E_0 = 1,2U_n$.



$E_{зал}$ - ЕРС потоку залишкового намагнічування; $0'$ - початок координат для розрахункової характеристики холостого ходу

Мал. 16. 1 Характеристика холостого ходу синхронного генератора:

Якщо характеристики холостого ходу різних синхронних генераторів зобразити у відносних одиницях $E^* = f(I_{зб}^*)$, то ці характеристики мало відрізняються одна від одної і будуть дуже схожі з нормальною характеристикою холостого ходу, яку використовують при розрахунках синхронних машин:

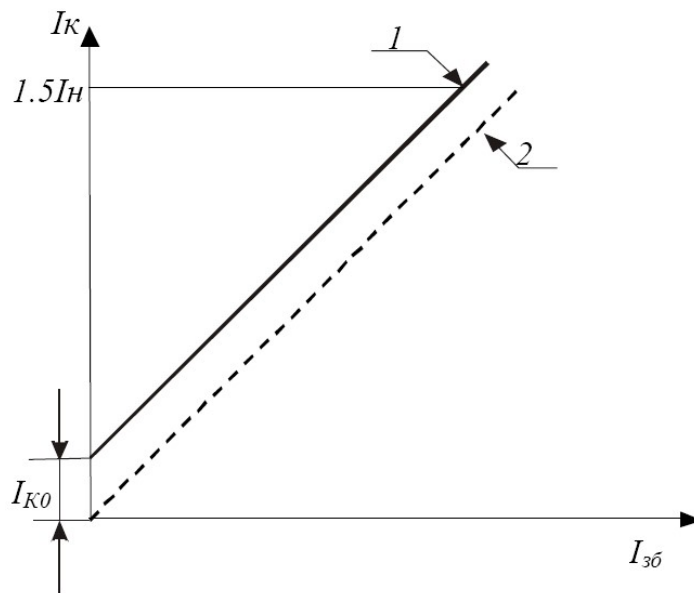
E^*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
$I_{зб}^*$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Тут $E^* = E_0 / U_{1н}$ - відносна ЕРС фази обмотки статора; $I_{зб}^* = I_{зб.0} / I_{зб.н}$ - відносний струм збудження; $I_{зб.0}$ - струм збудження, в режимі холостого ходу, що відповідає ЕРС холостого ходу $E_0 = U_{1н}$.

Характеристика короткого замикання $I_k = f(I_{зб})$ при $U = 0, f = const.$

Для трифазного синхронного генератора ця характеристика може бути знята при одно-, дво- і трифазному короткому замиканні. Але основне значення має характеристика трифазного короткого замикання. Вона знімається при збільшенні струму збудження до значення струму обмотки якоря $I_k = 1,5I_n$.

В цих межах зміни струму збудження магнітне коло машини залишається ненасиченим, тому характеристика короткого замикання носить лінійний характер (мал. 16. 2).



1 - характеристика короткого замикання синхронного генератора; 2 – розрахункова характеристика короткого замикання; $I_{к. об}$ – струм короткого замикання під дією ЕРС залишкового намагнічування

Активний опір обмотки статора невеликий порівняно з її індуктивним опором, тому, приймаючи $r_1 \approx 0$, можна вважати, що при досліді короткого замикання навантаження синхронного генератора (його власні обмотки) є чисто індуктивним. З цього випливає, що при досліді короткого замикання реакція якоря синхронного генератора має поздовжньо-розмагнічуючий характер. Отже, ЕРС E_k , що індукується в обмотці статора, цілком врівноважується ЕРС поздовжньої реакції якоря $E_{ad} = -jI_d x_{ad}$ і ЕРС розсіювання $E_{\sigma a} = -jI x_{\sigma a}$:

$$\dot{E}_k = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma a}$$

При цьому МРС обмотки збудження має ніби дві складові: одна компенсує спад напруги $jI_{\sigma a}$, а інша компенсує розмагнічуючий вплив реакції якоря $jI_d X_{ad}$.

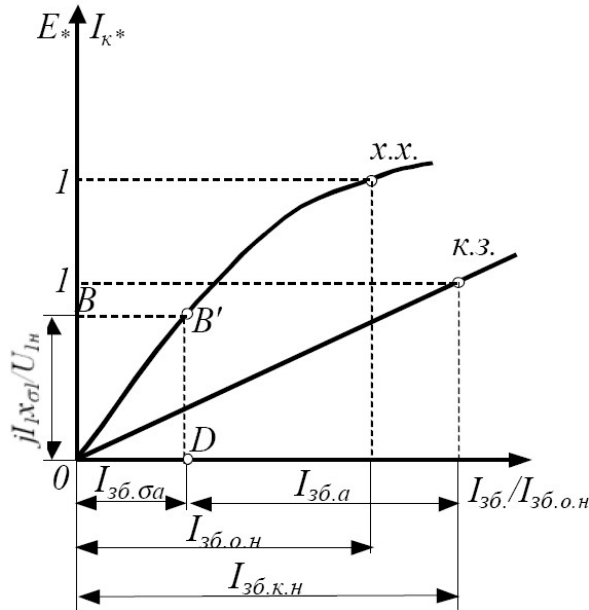
Характеристики холостого ходу і короткого замикання дозволяють визначити значення струмів збудження, що відповідають зазначеним складовим МРС збудження. З цією метою характеристики холостого ходу і короткого замикання будують в одних осях (мал. 16. 3), при цьому на осі ординат відзначають відносні значення напруги холостого ходу $E^*=E_0/U_n$ і струму короткого замикання $I_k^* = I_k/I_n$. На осі ординат відкладають відрізок OB , що виражає в масштабі напруги значення ЕРС розсіювання $E_{\sigma a} = -jI_n X_{\sigma a}$. Потім точку B зносять на характеристику холостого ходу (точка B') і опускають перпендикуляр $B'D$ на вісь абсцис. Отримана у такий спосіб точка D розділила струм збудження $I_{зб.к.н.}$ на дві частини: $I_{зб.с.а}$ - струм збудження, необхідний для компенсації спаду напруги $I_n X_{\sigma.а}$ й $I_{зб.а}$ - струм збудження, що компенсує поздовжньо-розмагнічуючу реакцію якоря.

Один з важливих параметрів синхронної машини - *відношення короткого замикання (ВКЗ)*, що являє собою відношення струму збудження $I_{зб.о.н.}$, який відповідає номінальній напрузі при холостому ході, до струму збудження $I_{зб.к.н.}$, що відповідає номінальному струму обмотки якоря при досліді короткого замикання (мал. 16.3)

$$BKZ = \frac{I_{зб.о.н.}}{I_{зб.к.н.}}$$

Значення ВКЗ у значній мірі визначає експлуатаційні властивості синхронних генераторів. Чим вище ВКЗ, тим стійкіше працює синхронний генератор, тобто зміна його вихідної напруги не є значною при коливаннях навантаження (реакція якоря не робить істотного впливу). Але такі синхронні генератори дорогі і мають низьке використання активних матеріалів, тобто міді і сталі на кіловат потужності.

Чим менше ВКЗ, тим менш стійко працює генератор (вплив реакції якоря є істотним), але такі генератори мають високе використання активних матеріалів на кіловат потужності.



Мал. 16. 3 Визначення складових стуму

короткого замикання

Дослід експлуатації синхронних генераторів електричних станцій показав, що значення ВКЗ для гідрогенераторів і турбогенераторів повинні знаходитися в таких межах: для гідрогенераторів $ВКЗ = 1,0 - 1,4$; для турбогенераторів $ВКЗ = 0,4 - 0,7$.

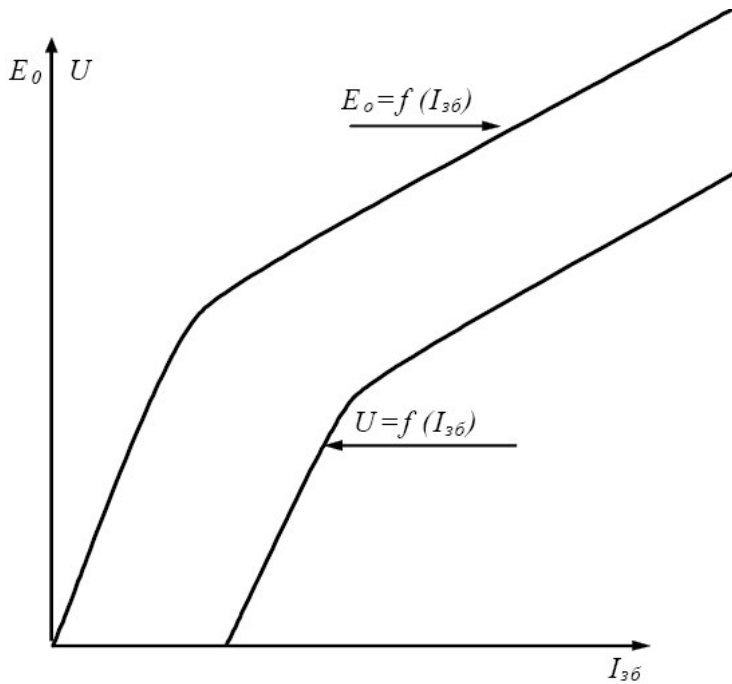
Звідси випливає, що гідрогенератори - це дорогі машини з низьким використанням активних матеріалів, але в енергетичній системі вони несуть основне навантаження, оскільки їхня електрична енергія є дешевою і вони забезпечують стійкість енергетичної системи.

Навпроти, турбогенератори, енергія яких є дорогою, розвантажуються в першу чергу при зменшенні навантаження в енергосистемі.

Навантажувальна характеристика $U = f(I_{зб})$ при $I = I_n, \cos\varphi = const, f = const$.

З огляду на те, що навантаження синхронних генераторів може бути активним, індуктивним, ємнісним і змішаним, тобто значення $\cos\varphi$ можуть змінюватися в межах від нуля до одиниці, можна зняти сімейство кривих, що представляють навантажувальні характеристики. Але найбільше значення має навантажувальна характеристика, що отримана при чисто індуктивному навантаженні (мал. 16. 4), яка використовується при розрахунку реактивних елементів синхронного генератора. Ця характеристика проходить паралельно характеристиці холостого ходу (мал. 16. 4).

При змішаному навантаженні ця характеристика не паралельна характеристиці холостого ходу і, як правило, не розглядається.

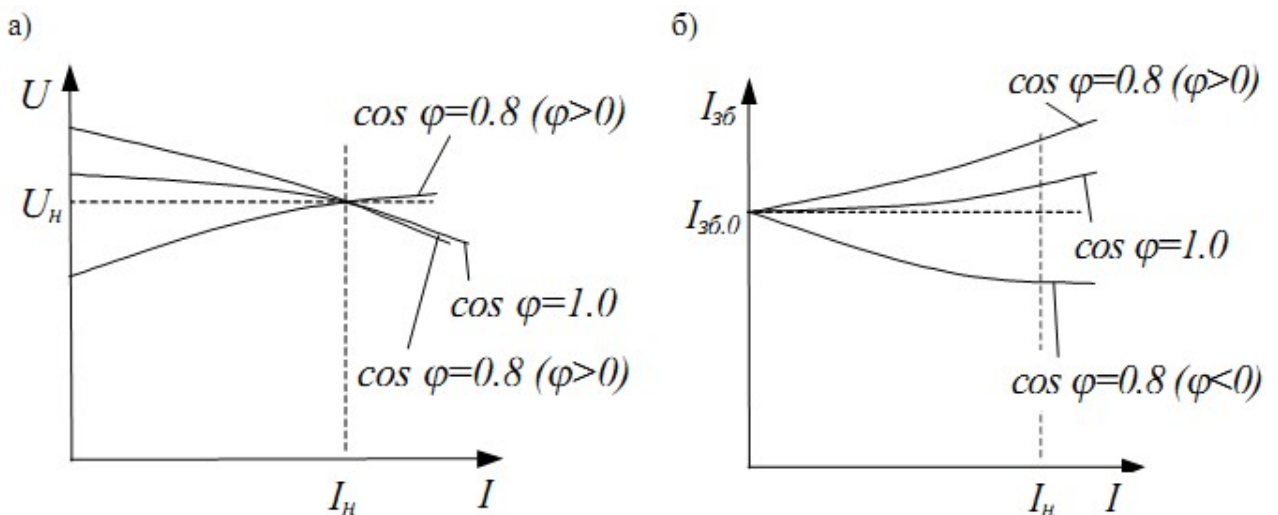


Характеристика холостого ходу і

навантажувальна характеристика синхронного генератора

Зовнішня характеристика $U = f(I)$ при $I_{30} = const, \cos\varphi = const, f = const$.

На мал. 16. 5, а представлені зовнішні характеристики, що відповідають різним за характером навантаженням синхронного генератора.



Мал. 16. 5 Зовнішні (а) і регулювальні (б) характеристики синхронного генератора

Вигляд зовнішніх характеристик пояснює рівняння напруг для кола обмотки якоря синхронного генератора, що працює під навантаженням.

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} - \dot{I}(r_a + jx_{\sigma a}). \quad (16.3)$$

Відповідно до рівняння, вихідна напруга синхронного генератора \dot{U} змінюється при змінах навантаження генератора під дією двох факторів:

1. За рахунок зміни спаду напруги - $\dot{I}(r_a + jx_{\sigma a})$;
2. Через вплив реакції якоря, що виражається через E_{ad} . - Якщо навантаження активно-індуктивне, то напруга зменшується за рахунок E_{ad} , тому що поздовжня реакція якоря при цьому розмагнічуюча.

При активно-ємнісному навантаженні збільшення вихідної напруги відбувається:

1. За рахунок ЕРС E_{ad} , тому що поздовжня реакція намагнічуюча;
2. За рахунок спаду напруги - $jI x_{\sigma a}$ тому, що струм випереджає напругу.

Регульовальна характеристика показує, як варто змінювати струм збудження генератора при змінах навантаження, щоб напруга на затискачах генератора залишалася незмінною і рівною номінальній: $I_{z\delta} = f(I)$ при $U = const$, $\cos\varphi = const$, $f = const$.

З розглянутих вище зовнішніх характеристик випливає, що при збільшенні активного або активно-індуктивного навантаження, вихідна напруга синхронного генератора зменшується.

Щоб підтримувати її на визначеному рівні, необхідно збільшувати струм збудження. Навпроти, при збільшенні активно-ємнісного навантаження, напруга на виході генератора збільшується, отже, щоб підтримати її на визначеному рівні, необхідно зменшити струм збудження (мал. 16. 5, б).

2 Зміна вихідної напруги синхронного генератора і діаграма електромагніторухливих сил (ЕМРС)

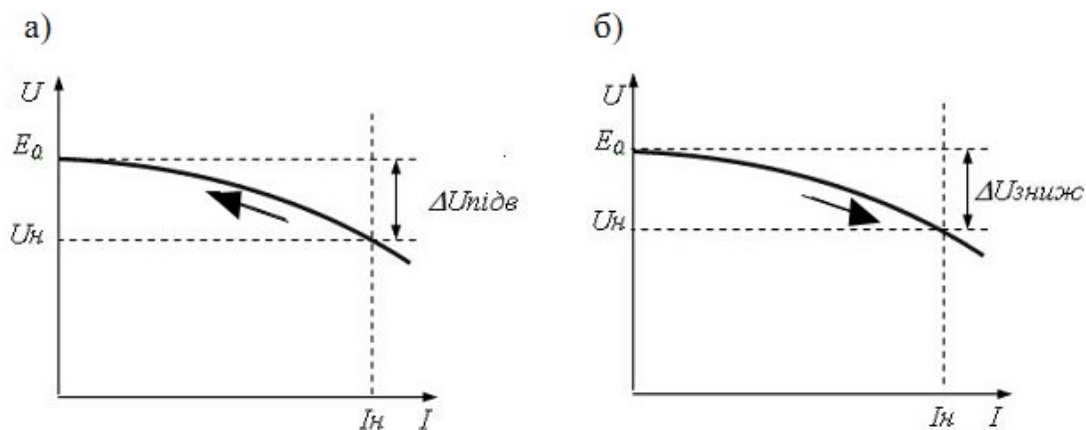
Під зміною напруги синхронного генератора розуміють підвищення або зниження напруги на затискачах обмотки якоря при змінах навантаження.

Під підвищенням напруги розуміють виражену у відсотках від номінальної напруги U_n зміну напруги на затискачах обмотки якоря генератора при переході від номінального навантаження до режиму холостого ходу при незмінному струмі збудження і незмінній частоті обертання.

$$\Delta U_{\text{підв.}} = \frac{E_0 - U_H}{U_H} 100\% .$$

Під зниженням вихідної напруги синхронного генератора розуміють виражену у відсотках від номінальної напруги зміну напруги на затискачах обмотки якоря при переході від режиму холостого ходу зі значенням $E_0 = U_H$ до номінального навантаження, що характеризується номінальним струмом при незмінному збудженні і частоті обертання.

Значення $\Delta U_{\text{підв.}}$ і $\Delta U_{\text{зниж.}}$ легко розрахувати, якщо відомі відповідні зовнішні характеристики. З приведених зовнішніх характеристик випливає, що підвищення напруги генератора відбувається при скиданні навантаження (мал. 16. 6, а), а зниження при накиданні (мал. 16. 6, б).



Мал. 16. 6 Зміна вихідної напруги синхронного генератора при зменшенні і (а) і збільшенні (б) навантаження

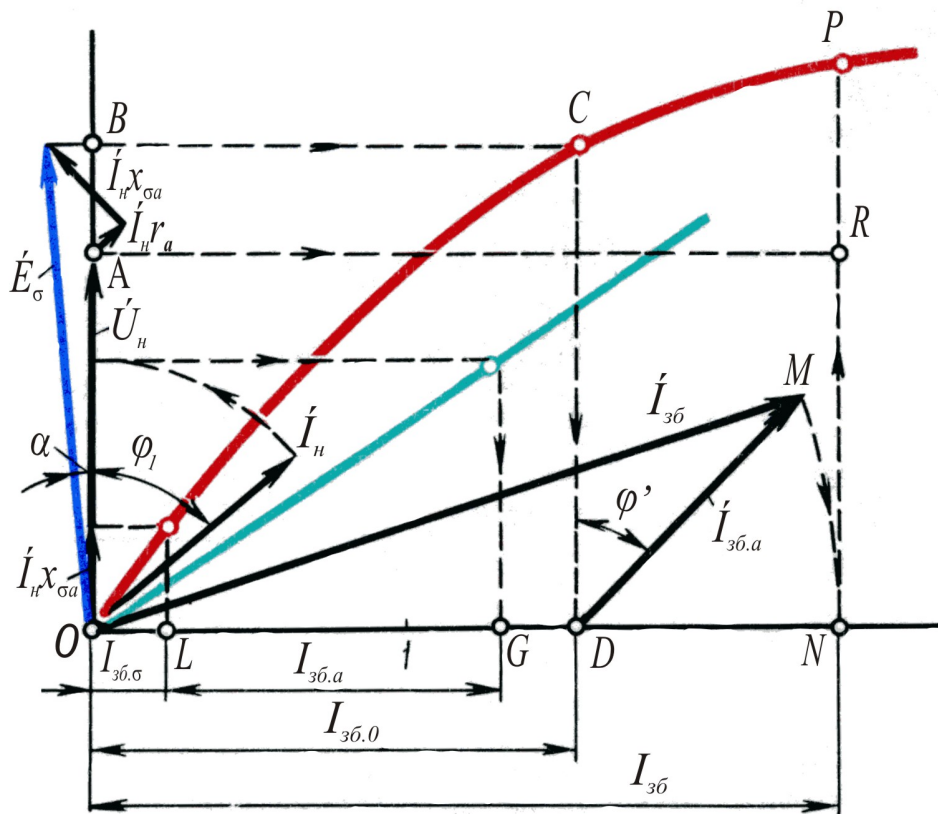
При проектуванні синхронного генератора, зміна вихідної напруги $\Delta U_{\text{ном}}$ при скиданні номінального навантаження оцінюється розрахунковим шляхом. Методика такої оцінки заснована на використанні діаграми ЕМРС. Для побудови цієї діаграми використовують:

- а) характеристику холостого ходу $U_0 = f(I_{3\phi})$;
- б) характеристику короткого замикання $I_K = f(I_{3\phi})$;
- в) індуктивний опір розсіювання обмотки $x_{\sigma a}$.

Як приклад розглянемо розрахунок підвищення напруги ΔU синхронного генератора при r - L навантаженні (мал. 16. 7).

Вважаємо, що спочатку генератор працював в номінальному режимі зі значеннями U_n, I_n, φ_l .

У відповідному масштабі відкладаємо вектори \dot{U}_n (вектор OA) і \dot{I}_n під кутом φ_n до нього. Якби в генераторі, що працює під навантаженням була відсутня реакція якоря, то ЕРС обмотки якоря \dot{E}_σ відрзнялася б від \dot{U}_n на величину спаду напруги $\dot{I}_n x_{\sigma a} + \dot{I}_n r_a$. Додаємо геометрично вектори $\dot{U}_n + \dot{I}_n x_{\sigma a} + \dot{I}_n r_a$. Отримане \dot{E}_σ у вигляді відрізка переносимо на вісь ординат і по характеристиці холостого ходу (через точки B і C) знаходимо струм збудження $I_{z\sigma.0}$ (відрізок OD). Такий струм збудження був би достатній, щоб при відсутності реакції якоря, установити на затискачах синхронного генератора напругу U_n .



Мал. 16. 7 Діаграма електромагніторушійних сил

Але в дійсності в генераторі, що працює під навантаженням, діє реакція якоря. Тому частина МРС збудження йде на компенсацію реакції якоря. Цій МРС збудження відповідає складова струму збудження $I_{z\sigma.a}$, яку знаходимо використовуючи характеристику короткого замикання.

По характеристиці короткого замикання знаходимо струм $I_{зб.к}$ (відрізок OG), що відповідає струму I_n . В струмі збудження $I_{зб.к}$ виділяємо складову струму розсіювання $I_{зб.σ}$ (відрізок OL).

Струм збудження $I_{зб.}$, який потрібно, щоб у СГ при врахуванні дії реакції якоря, була напруга U_n , є геометричною сумою струмів збудження $I_{зб.а}$ і $I_{зб.θ}$ (для цього від точки D під кутом $φ' = φ_1 + α$ відкладаємо вектор LD і отримуємо вектор OM).

З центра O радіусом OM описуємо дугу до перетину із віссю абсцис у точці N . Тоді струм збудження $ON = I_{зб.н}$ за характеристикою холостого ходу відповідає ЕРС $E_0 = NP$. Проводимо з точки A горизонтальну лінію і отримуємо відрізок NR , що відповідає номінальній напрузі U_n .

Тоді відносна зміна напруги генератора при скиданні номінального навантаження буде рівною:

$$\Delta U_{ном} = (NP - NR)/NR \cdot 100 \% = (E'_σ - U_n)/U_n \cdot 100 \%$$

При побудові діаграми ЕМРС реакція якоря не розкладається за двома складовими (повздовжньою і поперечною). Отже ця діаграма справедлива для неявнополюсного синхронного генератора. Але практика розрахунків показала, що похибка розрахунку зміни вихідної напруги синхронного генератора є цілком припустимою, якщо її використовувати і для явнополюсного синхронного генератора.

3. Розрахунок реактивних параметрів синхронного генератора

Найважливішими параметрами синхронного генератора є реактивні опори $x_d, x_q, x_{σa}$, що використовуються при розрахунках усталеного режиму роботи синхронного генератора.

Розглянемо методику розрахунку цих параметрів. При розрахунку цих опорів використовують:

1. характеристику холостого ходу. $U_0 = f(I_{зб})$;
2. навантажувальну характеристику при чисто індуктивному навантаженні $U = f(I_{зб})$ при $I = I_n, \cos φ = 0$.
3. характеристику трифазного короткого замикання $I_k = f(I_{зб})$.

Повздовжній синхронний опір x_d При роботі синхронного генератора під навантаженням для кола обмотки якоря справедливе рівняння рівноваги напруг (16.3)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} - \dot{I}(r_a + jx_{\sigma a}).$$

В окремому випадку, при трифазному короткому замиканні, з огляду на те, що I_k протікає головним чином по колу з індуктивним опором, зазначене вище рівняння набуває такого вигляду:

$$0 = \dot{E}_{0k} + \dot{E}_{ad} - \dot{I}_k x_{\sigma a}. \quad (16.4)$$

В цьому рівнянні враховано, що струм короткого замикання I_k циркулює по замкнутому контуру обмотки якоря, який має, головним чином, індуктивний опір. Тому поперечна реакція якоря відсутня ($\dot{E}_{aq} = 0$), окрім того, нехтуємо спадом напруги $I_k r_a$.

Перетворимо рівняння 16.4 з врахуванням того, що $\dot{E}_{ad} = -jI_k x_{ad}$. Отже,

$$\dot{E}_{0k} = j\dot{I}_k x_{ad} + j\dot{I}_k x_{\sigma a} = j\dot{I}_k (x_{ad} + x_{\sigma a}) = jI_k x_d$$

Використовуючи діючі значення ЕРС і струму, знаходимо значення x_d при відсутності насичення магнітного кола генератора. Оскільки в режимі короткого замикання магнітне коло генератора не насичене:

$$x_{d(\text{ненас})} = \frac{E_{0k}}{I_k} \quad (16.6)$$

З виразу 16.6 випливає, що x_d можна розрахувати, використовуючи характеристики холостого ходу і короткого замикання.

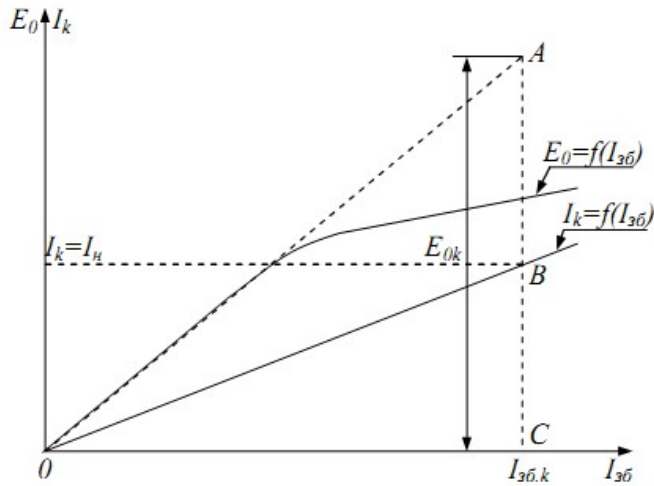
З приведених характеристик знаходимо ненасичене значення $x_{d(\text{ненас})}$

$$x_{d(\text{ненас})} = \frac{A C m_U}{B C m_I},$$

де m_U і m_I - масштаби напруги і струму.

При роботі синхронного генератора під навантаженням, його магнітне коло трохи насичене. Це приводить до деякого зменшення потоку поздовжньої реакції якоря Φ_{ad} і відповідного зменшення ЕРС E_{ad} і опору x_{ad} , а також x_d , що дорівнює

$$x_d = x_{ad} + x_{\sigma a}.$$



Мал. 16.8. До визначення повздовжнього-реактивного опору обмотки якоря $x_{d(\text{ненас})}$

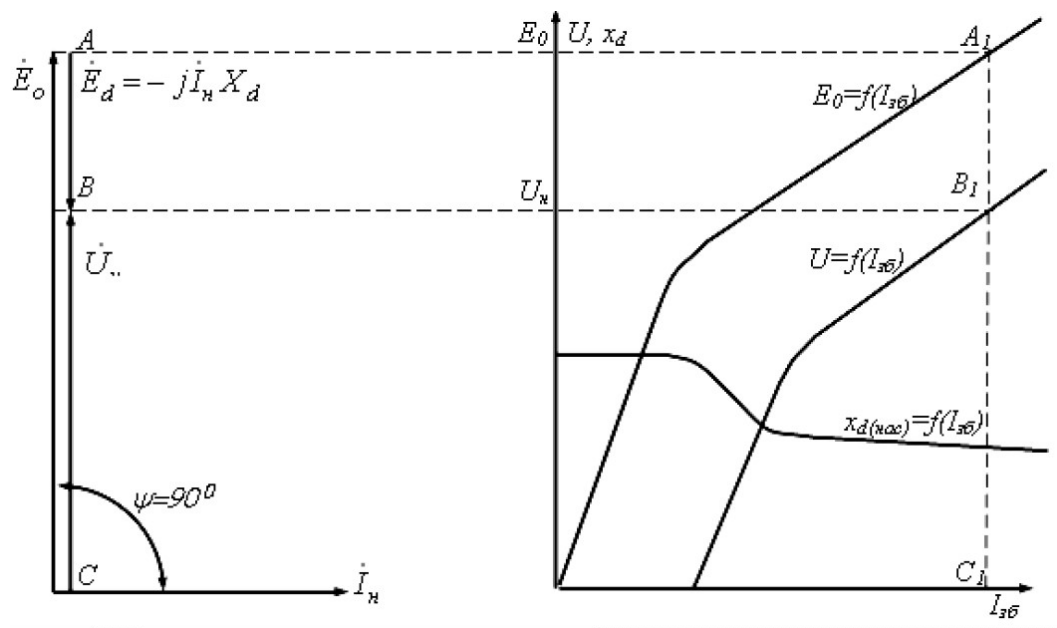
Щоб знайти насичене значення x_d , розглянемо перетворену векторну діаграму ЕРС синхронного генератора при чисто індуктивному навантаженні.

Перейдемо від векторної діаграми (мал. 16.9, а) до характеристик $E_0 = f(I_{зб})$ і $U = f(I_{зб})$ при $I = I_n$ і $\cos\varphi = 0$ ($\varphi = +90^\circ$) (мал. 16.9, б).

На приведеній векторній діаграмі і на характеристиках відрізок $AB = A_1B_1 \sim I_n x_d$.

Звідси випливає, що:

$$x_{d(\text{нас})} = \frac{A_1 B_1 \cdot m_U}{I_n}$$



Мал. 16.9 До визначення повздовжнього синхронного реактивного опору обмотки якоря $x_{d(\text{нас})}$

Якщо взяти ряд значень струму збудження $I_{зб}$ і для кожного з цих значень розрахувати, зазначеним вище методом $x_{d(нас)}$ одержимо залежність:

$$x_{d(нас)} = f(I_{зб}).$$

Характерний вигляд такої залежності приведений на мал. 16.9, б. Таким чином, якщо $x_{d(ненас)}$ величина постійна, то $x_{d(нас)}$ величина змінна, залежна від магнітного стану синхронного генератора, тобто від ступеня насичення.

Поперечний синхронний реактивний опір x_q . В неявнополюсних синхронних генераторах повітряний зазор між статором і ротором практично рівномірний. Отже, магнітна провідність по поздовжній і поперечній осях машини однакова. Тому в цих генераторах $x_{ad} \approx x_{aq}$ і відповідно:

$$x_{d(ненас)} \approx x_q \quad (16.9)$$

В явнополюсного синхронного генератора повітряний зазор між статором і ротором у значній мірі нерівномірний, тобто, магнітний опір потоку поздовжньої реакції якоря менший, ніж поперечній реакції якоря. З цієї причини в явно- полюсного синхронного генератора:

$$\Phi_{ad} > \Phi_{aq}$$

Отже,

$$x_{ad} > x_{aq} \rightarrow x_d > x_q, \quad (16.11)$$

За даними Санкт-Петербурзького заводу “Електросила” для явнополюсних синхронних генераторів нормального виконання, можна прийняти, що:

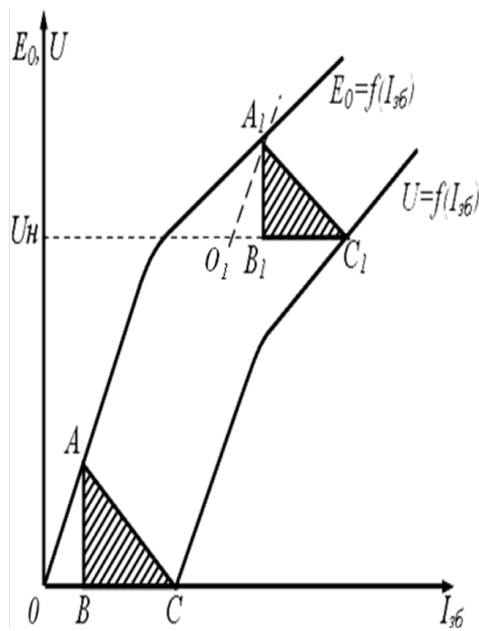
$$x_q = 0,6 x_{d(ненас)}. \quad (16.12)$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки якоря $x_{\sigma a}$. При розрахунку цього параметра використовують характеристики:

1. $E_0 = f(I_{зб})$ - характеристика холостого ходу.
2. $U = f(I_{зб})$ при $I = I_n$ і $\cos\varphi = 0$ ($\varphi = +90^\circ$) - навантажувальна характеристика при чисто індуктивному навантаженні.

Раніше було встановлено, що в реактивному трикутнику ABC катет $AB \sim I_n x_{\sigma a}$. Якщо перемістити цей трикутник паралельно самому собі таким чином, щоб його

вершина A ковзала по характеристиці холостого ходу, тоді вершина C буде ковзати по навантажувальній характеристиці $U = f(I_{3\phi})$ при $I = I_n$ і $\cos\varphi = 0$ (мал. 16. 10).



Мал. 16. 10 До визначення індуктивного опору

розсіювання обмотки якоря $x_{\sigma a}$

Звідси випливає, що розрахунок індуктивного опору $x_{\sigma a}$ зручно робити таким методом.

На навантажувальній характеристиці $U = f(I_{3\phi})$ знаходимо точку C_1 , що відповідає номінальній напрузі U_n . Від точки C_1 уліво відкладаємо відрізок $0_1 C_1 = 0C$. Через точку 0_1 проводимо пряму паралельну початковій частині характеристики холостого ходу до перетину з характеристикою холостого ходу і у такий спосіб знаходимо точку перетину A_1 . З точки A_1 опускаємо перпендикуляр $A_1 B_1$ на $0_1 C_1$. Отриманий трикутник $A_1 B_1 C_1$ також є реактивним трикутником. З цього трикутника знаходимо:

$$x_{\sigma a} = \frac{A_1 B_1 \cdot m_U}{I_n}, \quad (16.13)$$

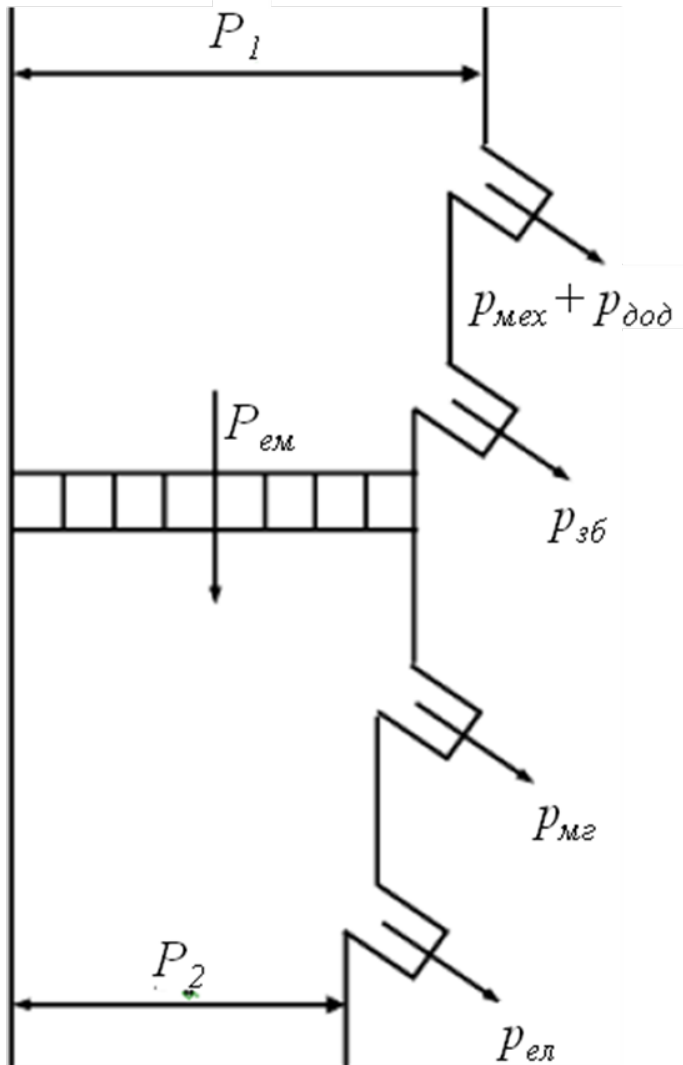
де m_U - масштаб по напрузі.

4 Енергетична діаграма, втрати і ККД синхронного генератора

В синхронних генераторах відбувається перетворення механічної потужності, що підводиться P_1 , в електричну потужність P_2 , що віддається навантаженню.

Розглянемо цей процес на прикладі енергетичної діаграми (мал. 16. 11).

P_1 - механічна потужність, що підводиться з боку ротора, і становить потужність приводного двигуна (турбіни).



Мал. 16. 11 Енергетична діаграма

синхронного генератора

На шляху перетворення цієї потужності в роторі мають місце такі активні втрати:

$p_{мех} + p_{доод} = P_0$ - втрати холостого ходу;

$p_{мех}$ - механічні втрати в підшипниках, втрати на тертя щіток об контактні кільця, вентиляційні втрати;

$p_{доод}$ - додаткові втрати, що становлять втрати в сталі конструктивних деталей від потоків розсіювання;

$p_{зб} = U_{зб} I_{зб}$ - електричні втрати в обмотці збудження (для генераторів із самозбудженням).

Частина потужності, що залишилася, передається електромагнітним шляхом на статор і становить електромагнітну потужність P_{em} :

$$P_{em} = P_1 - (p_{mex} + p_{dod} + p_{зб}). \quad (16.14)$$

В статорі мають місце такі види активних втрат:

$p_{mг}$ - магнітні втрати в пакеті сталі статора, тобто втрати на гістерезис (перемагнічування) і втрати на вихрові струми;

$p_{ел} = m_1 I_1^2 r_1$ - електричні втрати в обмотці якоря.

Частина потужності, що залишилася, становить електричну *потужність* P_2 , яка корисно віддається в навантаження (потужність на затискачах обмотки якоря)

$$P_2 = P_{em} - (p_{mг} + p_{ел}). \quad (16.15)$$

ККД синхронного генератора визначається загальною залежністю:

$$\eta = P_2 / P_1.$$

Однак, при розрахунку ККД, з високим ступенем точності можна виміряти тільки потужність P_2 , а механічну потужність P_1 виражають як:

$$P_1 = P_2 + \Sigma p,$$

де $\Sigma p = p_{mex} + p_{dod} + p_{зб} + p_{mг} + p_{ел}$.

Ці втрати піддаються обліку.

Таким чином, розрахункова залежність для ККД синхронного генератора має такий вигляд:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p}.$$

ККД сучасних синхронних генераторів досягає 90% і більше, тобто, чим більше потужність машини, тим вищий коефіцієнт корисної дії.

5 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного генератора, кутова характеристика

Як впливає з енергетичної діаграми (мал. 16.11)

$$P_{em} = P_2 + p_{mг} + p_{ел}.$$

Якщо знехтувати втратами в статорі ($p_{mг} + p_{ел}$), то

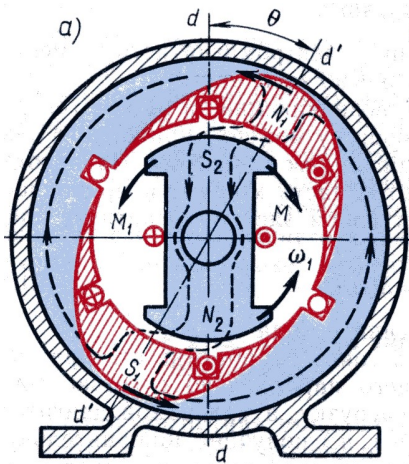
$$P_{em} = P_2 = mUI \cos \varphi, \quad (16.17)$$

де m - число фаз обмотки якоря; U, I - напруга і струм обмотки якоря; $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності, зумовлений навантаженням генератора.

Проаналізуємо цей вираз, використовуючи перетворену векторну діаграму синхронного генератора для випадку ($r - L$) навантаження (рис. 16. 12).

З векторної діаграми випливає: $\varphi = \psi - \theta$.

де θ – кут, на який повздожжня вісь ротора зміщена відносно повздожжньої осі результуючого поля машини.



Отже, використовуючи приведені залежності, можна записати:

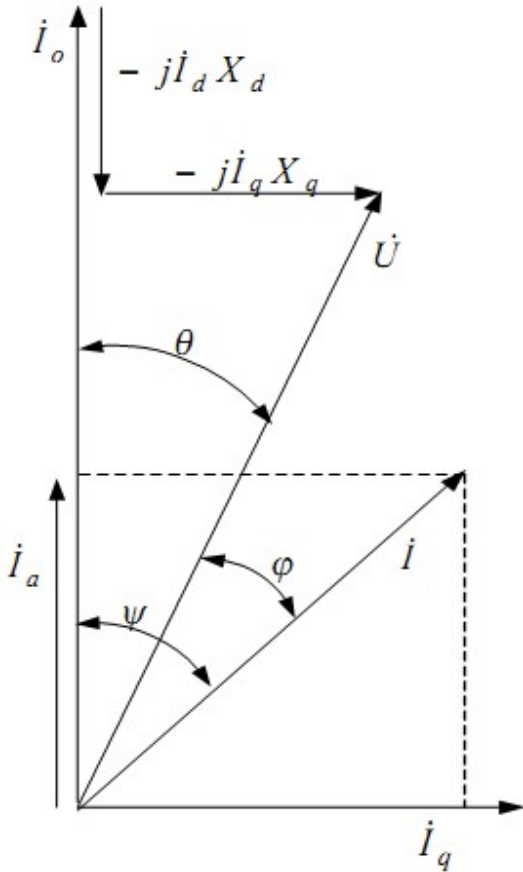
$$P_{em} = mUI \cos(\psi - \theta) = mUI \cos \psi \cos \theta + mUI \sin \psi \sin \theta = mUI_q \cos \psi + mUI_d \sin \theta.$$

$$\begin{aligned} P_{em} &= mUI \cos(\psi - \theta) = mUI \underbrace{\cos \psi}_{I_q} \cos \theta + mUI \underbrace{\sin \psi}_{I_d} \sin \theta = \\ &= mUI_q \cos \theta + mUI_d \sin \theta. \end{aligned}$$

Виразимо, використовуючи векторну діаграму, складові струмів обмотки якоря I_d і I_q у такий спосіб:

$$I_q x_q = U \sin \theta \Rightarrow I_q = \frac{U \sin \theta}{x_q}$$

$$I_d x_d = E_0 - U \cos \theta \Rightarrow I_d = \frac{E_0 - U \cos \theta}{x_d}$$



Мал. 16. 12 Перетворена векторна діаграма

синхронного генератора для випадку $(r - L)$ навантаження

Підставляючи отримані вирази для I_d і I_q у вираз 16.18 для електромагнітної потужності, і провівши відповідні перетворення, одержимо:

$$P_{em} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin\theta + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta = P_c + P_\delta,$$

де: $P_c = (mUE_0 \sin\theta)/x_d$ - основна складова електромагнітної потужності, що залежить як від значення вихідної напруги U , так і від струму збудження (через E_0).

$P_\delta = (mU^2(1/x_q - 1/x_d) \sin 2\theta)/2$ - додаткова складова електромагнітної потужності генератора, що не залежить від струму збудження, тобто цю потужність генератор розвиває і при відсутності збудження.

Фізично пояснити наявність потужності P_δ можна у такий спосіб. Якщо ротор явнопольсний, то він завжди прагне зайняти таке положення щодо обертового магнітного поля статора, щоб магнітний опір на шляху проходження силових ліній цього поля був найменшим.

Якщо ротор генератора неявнополосний, то при будь-якому положенні цього ротора магнітний опір на шляху проходження силових ліній поля статора однаковий. Окрім того, з огляду на те, що в неявнополосного синхронного генератора $x_d \approx x_q \rightarrow P_o = 0$, отже вираз для електромагнітної потужності буде мати вигляд:

$$P_{em} = (mUE_o \sin\theta) / x_d \quad (16.22)$$

У тому випадку, коли генератор працює при незмінному збудженні $E_o = const$ на мережу нескінченної потужності, тобто $U = const$, одержуємо залежність $P_{em} = f(\theta)$, що називається кутовою характеристикою синхронного генератора.

Графічне представлення кутової характеристики знаходимо за складовими електромагнітної потужності (мал. 16. 13).

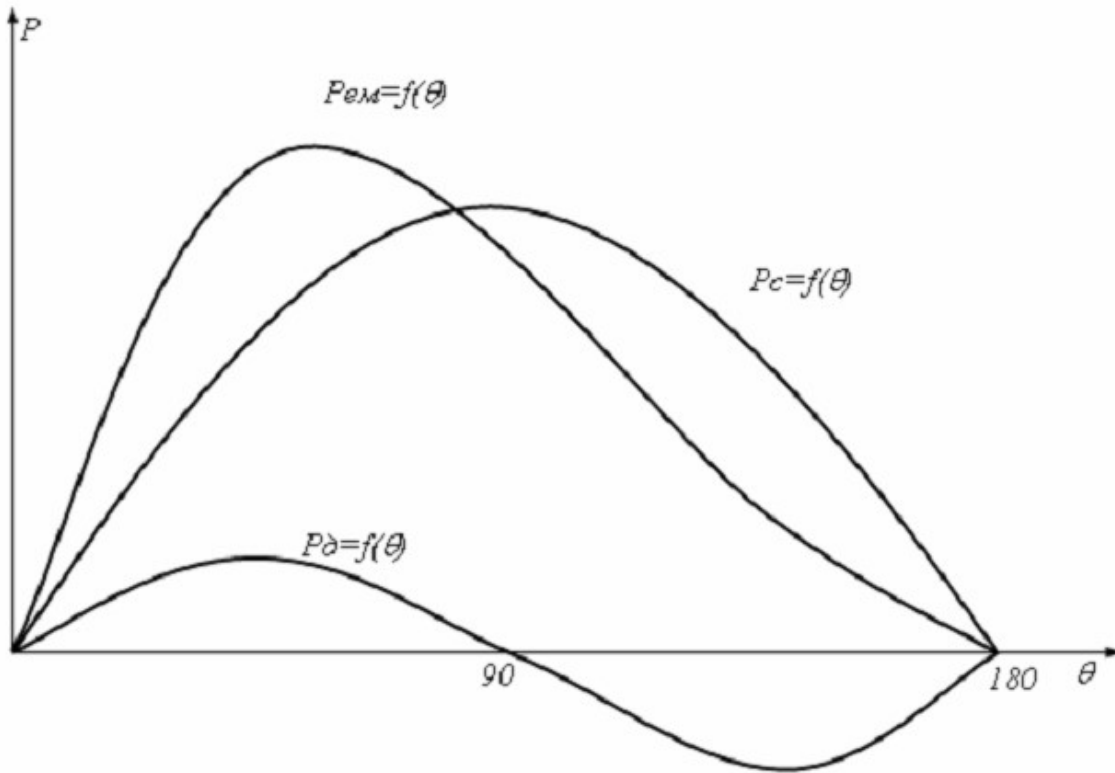
При роботі синхронного генератора в усталеному режимі під навантаженням обертовий момент приводного двигуна M_I урівноважений протидіючим електромагнітним моментом генератора M_{em} і моментом M_o , що відповідає втратам холостого ходу. Отже, в цьому режимі справедливе таке рівняння рівноваги моментів:

$$M_I = M_{em} + M_o. \quad (16.23)$$

Електромагнітний момент для неявнополосного синхронного генератора визначається виразом:

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_I} = \frac{mUE_o}{\omega_I x_c} \sin\theta, \quad (16.24)$$

де $\omega_I = 2\pi n_I$ - кутова частота обертання ротора, [рад/с].



Мал. 16. 13

Кутова характеристика синхронного генератора

Оскільки P_{em} явноплюсного генератора має дві складові P_c і P_d , очевидно, що електромагнітний момент цього генератора:

$$M_{em} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (16.25)$$

також має дві складові, що змінюються за законом $\sin \theta$ і $\sin 2\theta$, а саме основну складову електромагнітного моменту:

$$M_{осн} = P_c / \omega_1 = (mUE_0 \sin \theta) / (\omega_1 x_d)$$

та реактивну складову моменту:

$$M_d = P_d / \omega_1 = (mU^2 (1/x_q - 1/x_d) \sin 2\theta) / (2\omega_1)$$

Як видно з виразів (16.21) і (16.25) електромагнітна потужність і електромагнітний момент в явноплюсній синхронній машині залежить не тільки від струму збудження, але і від її параметрів по поздовжній і поперечній осях.

Основна складова електромагнітного моменту $M_{осн}$ явноплюсної синхронної машини залежить не тільки від напруги мережі ($M_{осн} \equiv U$), але і від ЕРС E_0 , що наведена магнітним потоком обертового ротора Φ в обмотці статора.

Це свідчить про те, що основна складова електромагнітного моменту $M_{осн}$ залежить від магнітного потоку ротора: $M_{осн} \equiv \Phi$. Звідси випливає, що в машині з не збудженим ротором ($\Phi = 0$) основна складова моменту $M_{осн} = 0$.

Реактивна складова електромагнітного моменту M_{δ} не залежить від магнітного потоку полюсів ротора. Для виникнення цієї складової достатньо двох умов: по-перше, щоб ротор машини мав явно виражені полюси ($x_q \neq x_d$) і, по-друге, щоб до обмотки статора була підведена напруга мережі ($M_{\delta} \equiv U$). Детальніше фізична сутність реактивного моменту буде викладена в § 23.2.

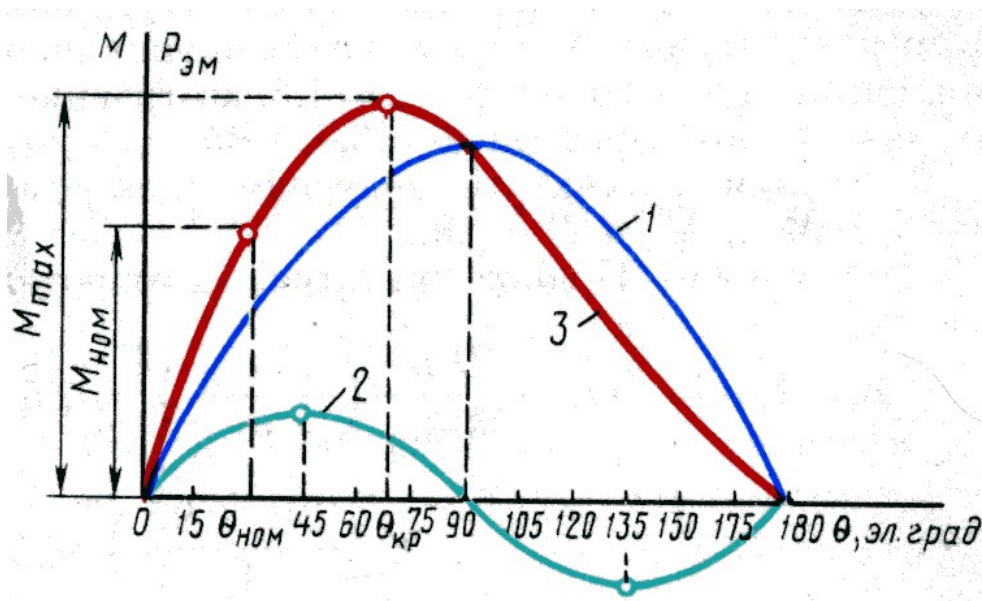
При збільшенні навантаження синхронного генератора, отже зі зростанням струму I_l , відбувається збільшення кута θ , що веде до зміни електромагнітної потужності генератора і його електромагнітного моменту. Залежності $P_{ем} = f(\theta)$ і $M = f(\theta)$, представлені графічно, називаються кутовими характеристиками синхронної машини.

Розглянемо кутові характеристики електромагнітної потужності $P_{ем} = f(\theta)$ і електромагнітного моменту $M = f(\theta)$ явнополюсного синхронного генератора (рис. 16.13). Ці характеристики побудовані за умови сталості напруги мережі ($U_m = const$) і магнітного потоку збудження, отже $E_0 = const$. З виразів (21.9) і (21.11) бачимо, що основна складова електромагнітного моменту $M_{осн}$ і відповідна їй складова електромагнітної потужності змінюються пропорційно синусу кута θ (графік 1), а реактивна складова моменту M_{δ} і відповідна їй складова електромагнітної потужності змінюється пропорційно синусу кута 2θ (графік 2). Залежність результуючого моменту $M = M_{осн} + M_{\delta}$ та електромагнітної потужності $P_{ем}$ від кута θ визначається графіком 3, отриманим складанням значень моментів і відповідних їм потужностей за ординатам.

Максимальне значення електромагнітного моменту M_{max} відповідає критичному значенню кута $\theta_{кр}$.

Як видно з результуючої кутової характеристики (графік 3), при збільшенні навантаження синхронної машини до значень, що відповідають куту $\theta < \theta_{кр}$, синхронна машина працює стійко. Пояснюється це тим, що при $\theta < \theta_{кр}$ зростання навантаження генератора (збільшення θ) супроводжується збільшенням електромагнітного моменту.

У цьому випадку будь-кому усталеному навантаженню відповідає рівність обертового моменту первинного двигуна M_1 сумі протидіючих моментів: $M_1 = M_{em} + M_0$.



В результаті частота обертання ротора залишається незмінною, рівною синхронній частоті обертання.

При навантаженні, що відповідає куту $\theta > \theta_{кр}$, електромагнітний момент M_{em} зменшується, що веде до порушення рівності обертового і протидіючих моментів. При цьому надлишкова (неврівноважена) частину обертового моменту первинного двигуна $\Delta M = M_1 - (M_{em} + M_0)$ викликає збільшення частоти обертання ротора, що веде до порушення умов синхронізації (машина виходить з синхронізму).

Електромагнітний момент, що відповідає критичному значенню кута ($\theta_{кр}$), є максимальним M_{max} .

Для явнополюсних синхронних машин $\theta_{кр} = 60 \div 80$ ел. град.

У неявнополюсних синхронних машин $M_d = 0$, а тому кутлова характеристика являє собою синусоїду і кут $\theta_{кр} = 90^\circ$.

Відношення максимального електромагнітного моменту M_{max} до номінального $M_{ном}$ називається перевантажувальною здатністю синхронної машини або коефіцієнтом статичної перевантажувальності:

$$\lambda = M_{max} / M_{ном} = 1,4 \div 3.$$

Нехтуючи реактивної складової моменту, можна записати:

$$\lambda \approx 1 / \sin \theta_{ном} \quad (21.17)$$

Отже, чим менший кут $\theta_{ном}$, що відповідає номінальному навантаженню синхронної машини, тим більше її перевантажувальна здатність. Наприклад, у турбогенератора $\theta_{ном} = 25 \div 30^\circ$, що відповідає $\lambda = 2,35 \div 2,0$.

Контрольні запитання

1. Як знімаються характеристики холостого ходу, короткого замикання, зовнішня і регульовальна характеристики?
2. Чому характеристика короткого замикання синхронної машини є прямою лінією?
3. Що таке ВКЗ і як впливає цей параметр на властивості синхронного генератора?
4. Що таке номінальна зміна напруги при скиданні навантаження і чому при емісному навантаженні його величина негативна?
5. Для чого призначена діаграма електромагніторушійних сил?
6. Як розрахувати реактивні параметри синхронного генератора?
7. Які види втрат мають місце в синхронному генераторі?

Література:

1. Грабко В.В., Розводюк М.П., Левицький С.М., Казак М.О. Г75 Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Синхронні машини. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2007. – 197 с.
2. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.П. Довгань. – Дніпропетровськ: Видавництво Національного гірничого університету, 2003, - 328 с.