

Семестр 6 навчальна дисципліна «Електричні машини»  
галузь знань 14 – «Електрична інженерія»  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Підготував: доц. Ярошенко Леонід Вікторович

Лекція № 5б

### Тема: «Синхронний двигун»

#### ПЛАН

1. Основні відомості про синхронний двигун;
2. Принцип дії синхронного двигуна;
3. Пуск синхронних двигунів;
4. Векторна діаграма ЕРС синхронного двигуна;
5. Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного двигуна;
6. Робочі і U-подібні характеристики синхронного двигуна;
7. Синхронні компенсатори.

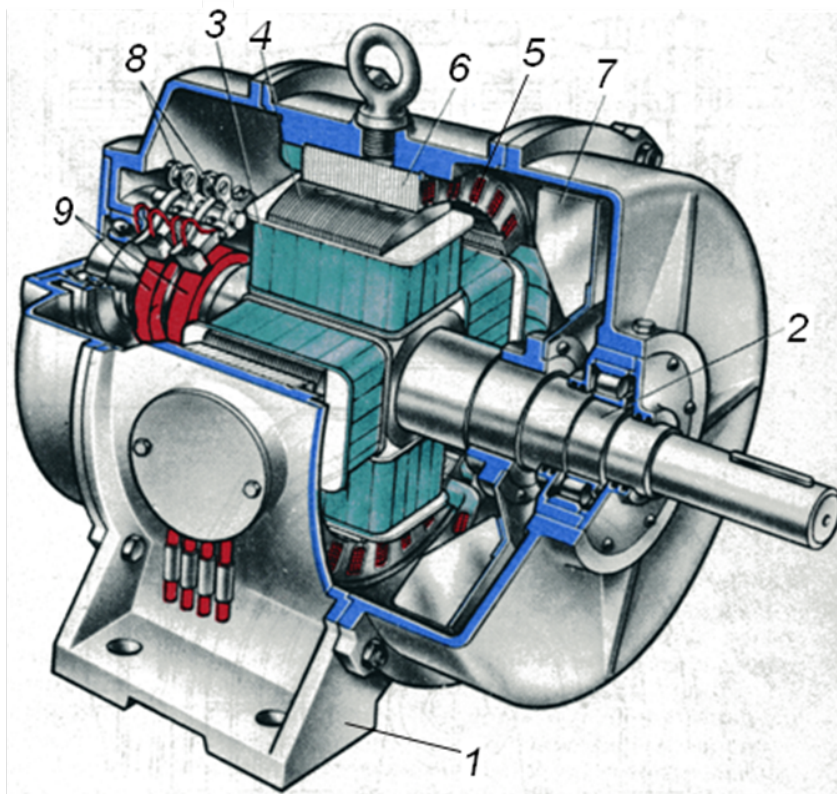
#### 1 Основні відомості про синхронний двигун

До 1914-1915 р. синхронний двигун не мав промислового значення, тому що його пускові характеристики не відповідали поставленим вимогам. Такий стан різко змінився, коли постало питання про коефіцієнт потужності ( $\cos\varphi$ ) як окремих приймачів електроенергії, так і мереж. Встановлення потужних асинхронних двигунів, що визначалася умовами роботи привода, призвело до значного зниження коефіцієнта потужності мереж і електростанцій, тому що асинхронні двигуни працюють з тим нижчим  $\cos\varphi$ , чим менше вони навантажені. Тому перед електромашинобудуванням була поставлена задача використовувати синхронні двигуни, що, як ми довідаємося з подальшого, можуть працювати не тільки при  $\cos\varphi = 1$ , але і з випередженням струму по фазі щодо напруги, з так називаним випереджальним  $\cos\varphi$ . Але для цього потрібно було поліпшити їхні пускові характеристики такою мірою, щоб вони не були на перешкоді для нормальної експлуатації двигуна. Поставлена задача була вирішена з удосконаленням уже раніше відомого асинхронного пуску в хід синхронного двигуна.

Синхронні двигуни виконуються, головним чином, як явноплюсні на потужності до 10 тис. кВт і частоту обертання до 1000 об/хв. З огляду на цінну

властивість синхронних двигунів - при перезбудженні працювати з випереджуючим  $\cos\varphi$ , їх виготовляють для номінальної роботи при  $\cos\varphi = 1$  і випереджальному  $\cos\varphi = 0,8$ . Однак в останньому випадку двигун повинен мати велику МРС ротора, і його статор повинен бути розрахований на великий струм. Тому двигуни, виконані для роботи при випереджальному  $\cos\varphi = 0,8$ , трохи важчі і дорожчі двигунів, що працюють при  $\cos\varphi = 1$ .

Статор синхронного двигуна має практично ту ж конструкцію, що і статор синхронного генератора. З точки зору пуску двигуна в хід повітряний зазор синхронного двигуна робиться меншим ніж у синхронному генераторі. При явнополюсному виконанні в полюсні наконечники двигуна закладають спеціально розраховану пускову обмотку. Збудник, як правило насаджується на вал двигуна, а в двигунах великої потужності виконується окремо.



1 – корпус; 2 – вал; 3 – полюсна котушка ротора; 4 – полюсний наконечник;  
5 – обмотка статора; 6 – осердя статора; 7 – вентилятор; 8 – щіткотримачі;  
9 – контактні кільця;

## 2 Принцип дії синхронного двигуна

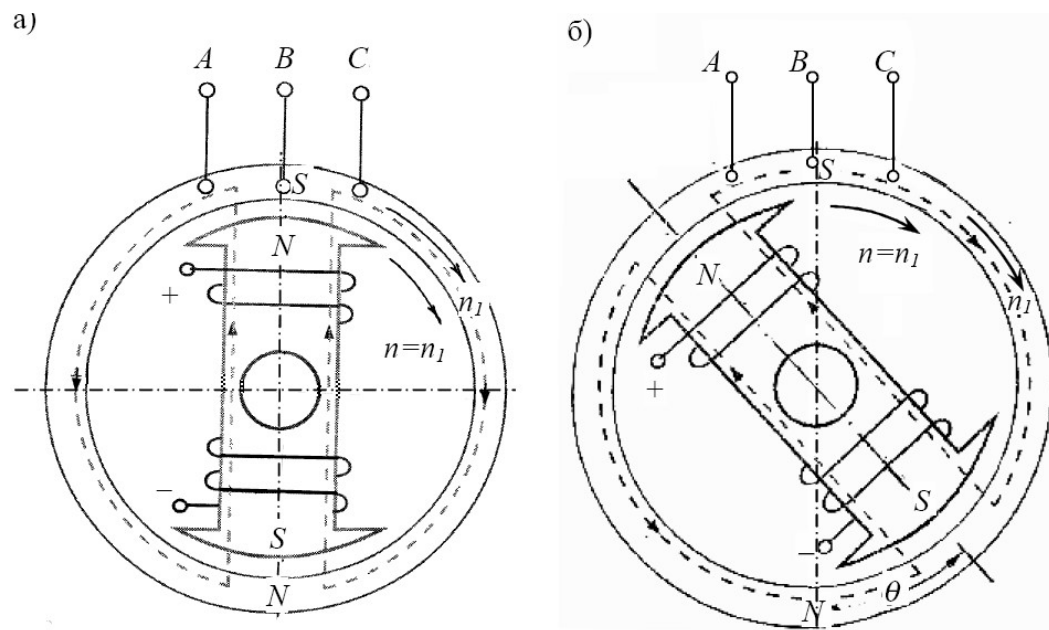
Відповідно до принципу оборотності електричних машин синхронна машина може працювати не тільки в режимі генератора, але й у режимі двигуна, тобто споживати з мережі електричну енергію і перетворювати її в механічну.

Розглянемо принцип дії синхронного двигуна на дво полюсній моделі синхронної машини (мал. 18.1).

Якщо до затискачів обмотки якоря А, В, С підвести трифазну змінну напругу, то струми, що протікають по обмотках якоря, створять обертове магнітне поле. Це поле можна моделювати системою обертових в просторі полюсів:

$$n_1 = 60f_1/p, \text{ [об/хв.]}$$

Якщо ротор двигуна розігнати до частоти  $n = n_1$  і подати збудження таким чином, щоб на роторі утворилися полюси протилежної полярності стосовно полюсів на статорі, то між полюсами протилежної полярності статора і ротора будуть діяти сили електромагнітного притягання і на валу двигуна буде діяти електромагнітний момент.



а) - режим холостого ходу; б) навантажувальний режим

Мал. 18.1 Двополюсна модель синхронної машини:

У тому випадку, коли синхронний двигун працює в режимі холостого ходу осі полюсів полів статора і ротора збігаються. Коли двигун підключений до навантаження, що створює протидіючий момент, між осями полюсів статора і ротора з'являється кут

неузгодженості  $\theta$ . Незважаючи на наявність кута  $\theta$  ротор буде обертатися з незмінною частотою доти, поки навантаження двигуна не перевищить критичне.

Якщо ж навантаження перевищує критичне, то ротор випадає з синхронізму. Цей режим тим небезпечніший, чим більша потужність і габарити двигуна, тому що на валу з'являються коливання, що можуть привести до руйнування вала.

### 3 Пуск синхронних двигунів

Пуск синхронного двигуна безпосереднім вмиканням в мережу неможливий, тому що ротор через свою значну інерцію не може бути відразу захоплений обертовим полем статора, частота якого встановлюється миттєво. В результаті постійний магнітний зв'язок між статором і ротором не виникає. Були розроблені кілька способів пуску синхронних двигунів.

1. Пуск за допомогою розгінного двигуна - коли синхронний двигун розганявся до синхронної швидкості, потім подавалося збудження і обмотка якоря вмикалася в мережу.

2. Частотний пуск, при якому частота живильної напруги плавно змінюється від  $f = 0$  до  $f = f_n$ . При цьому двигун поступово втягується в синхронізм. Недоліком цього способу пуску є дороге джерело живлення.

3. Асинхронний пуск синхронного двигуна є основним способом пуску. При цьому способі пуску, момент на валу синхронного двигуна створюється за рахунок того, що в полюсних наконечниках ротора вкладена короткозамкнена обмотка, подібна «білячій клітці» асинхронного двигуна. За рахунок асинхронного моменту, створюваного пусковою обмоткою, синхронний двигун розганяється до - 95% синхронної швидкості. Втягування в синхронізм може відбутися за рахунок реактивного моменту  $M_\theta$ , зумовленого явнополюсною конструкцією ротора.

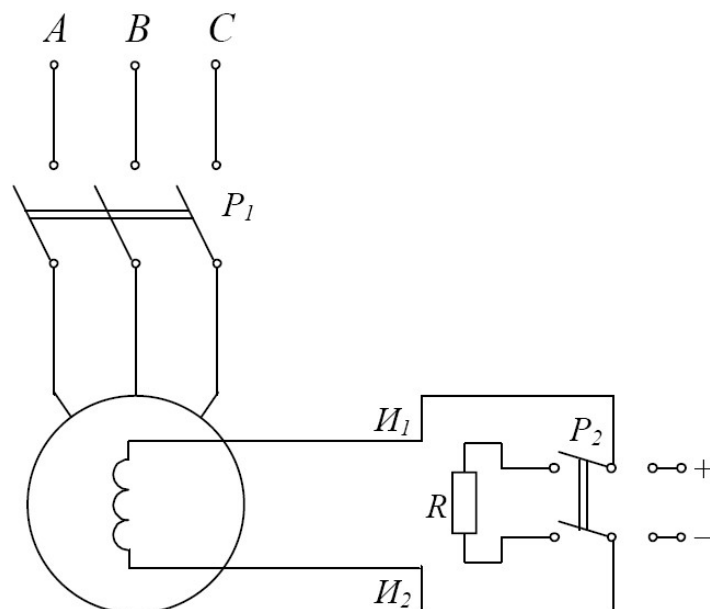
Принципова електрична схема асинхронного пуску представлена на мал. 18.2.

Перед вмиканням двигуна в мережу, обмотка збудження замикається на опір  $R$ , що за величиною в 10÷15 разів більший від власного опору обмотки збудження.

Після цього двигун вмикається в мережу і розганяється під дією асинхронного моменту. Коли він досягне сталої частоти обертання, обмотка збудження перемикається з опору  $R$  на джерело постійної напруги. При цьому двигун остаточно втягується в синхронізм.

Чим менше навантаження на валу двигуна, тим легше його входження в синхронізм. Явнополюсні синхронні двигуни малої потужності, що запускаються без навантаження на валу, іноді входять в синхронізм лише за рахунок реактивного моменту, тобто навіть без вмикання обмотки збудження.

В процесі асинхронного пуску обмотку збудження не можна залишати розімкнутою, тому що магнітний потік статора, що перетинає її в початковий період пуску із синхронною швидкістю, наводить у ній ЕРС. Унаслідок великого числа витків обмотки збудження ця ЕРС досягає значень, небезпечних як для цілісності ізоляції самої обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Замикання обмотки збудження накоротко на час пуску двигуна небажано, тому що при частоті обертання, рівній половині синхронній додатковий асинхронний момент обмотки збудження стає гальмуючим і створює "провал" в характеристиці пускового (асинхронного) моменту. Це помітно погіршує пускові властивості синхронного двигуна.



Принципова схема пуску СД

При асинхронному пуску синхронного двигуна виникає значний пусковий струм. Тому пуск синхронних двигунів безпосереднім включенням в мережу на номінальну напругу застосовують при достатній потужності мережі, що здатна витримувати без помітного зниження напруги кидки пускового струму п'яти - чи семиразового значення (порівняно з номінальним струмом). Якщо ж потужність мережі недостатня, то можна застосувати пуск двигуна при зниженій напрузі: автотрансформаторний або реакторний.

#### 4 Векторна діаграма ЕРС синхронного двигуна

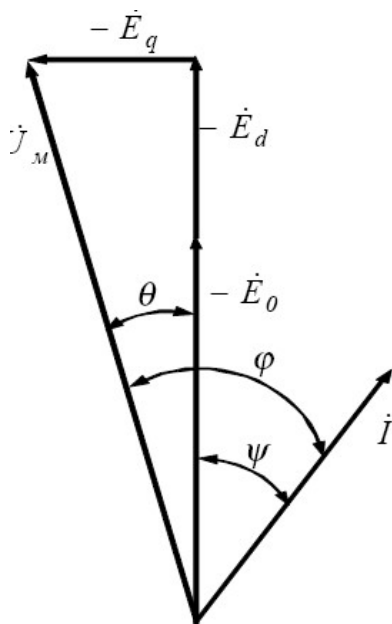
Фізичний процес утворення ЕРС і МРС в синхронному двигуні аналогічний режиму генератора. Однак, у двигуна ЕРС носить характер протидіючих ЕРС стосовно напруги мережі.

Тому, для кола обмотки якоря синхронного двигуна рівняння рівноваги напруг має вигляд:

$$\dot{U}_M = -(\dot{E}_0 + \dot{E}_d + \dot{E}_q) \quad (18.1)$$

Спадом напруги в активному опорі обмотки якоря нехтуємо.

Відповідно до рівняння 18.1 перетворена векторна діаграма ЕРС для випадку активно-індуктивного навантаження буде мати вид (мал. 18.3).



Перетворена векторна діаграма ЕРС для випадку активно-індуктивного навантаження

Зіставляючи цю діаграму з діаграмою для синхронного генератора (мал. 15.13, а) бачимо, що при однаковому в обох випадках відстаючому струмі реакція якоря розмагнічує генератор і підмагнічує двигун. Це пояснюється тим, що струм  $I$ , а отже і створювана їм реакція якоря, орієнтовані протилежно, щодо основної ЕРС  $E_0$  створюваної в генераторі і двигуні основним магнітним потоком  $\Phi_0$ .

## 5 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного двигуна

Оскільки, основна діаграма ЕРС синхронного двигуна принципово нічим не відрізняється від такої ж діаграми генератора, то як і раніше нехтуючи активним опором статора  $r_a$ , одержуємо для електромагнітної потужності  $P_{em}$  синхронного двигуна той же вираз, що і для синхронного генератора (формула 16.21), з тією різницею, що в синхронному двигуні кут  $\theta$  варто вважати негативним:

$$P_{em} = \frac{mU_c E_0}{x_d} \sin(-\theta) + \frac{mU_c^2}{2} \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(-2\theta) \quad (18.2)$$

Фізично це означає, що електромагнітний момент двигуна  $M_{em}$ , що відповідає потужності  $P_{em}$ , є обертовим, який врівноважує гальмівний момент на валу. В синхронному генераторі цей момент є гальмівним, що врівноважує обертовий момент первинного двигуна.

Електромагнітний момент синхронного двигуна, з огляду на те, що двигуни виконуються в явнополюсному виконанні, визначається виразом

$$M_{em} = \frac{mU_c E_0}{x_d \omega_1} \left| \sin(-\theta) + \frac{mU_c^2}{2\omega_1} \left( \frac{1}{x_g} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(-2\theta) \right| = M_c + M_d. \quad (18.3)$$

В усталеному режимі роботи електромагнітний момент  $M_{em}$  врівноважується гальмівним моментом навантаження  $M_2$  і моментом, що відповідає втратам холостого ходу,  $M_0$

$$M_{em} = M_2 + M_0.$$

Висновки щодо синхронізуючої потужності  $+ \Delta P_{em}$  і перевантажувальної здатності  $K_p$  цілком поширюється на синхронні двигуни. Але в синхронних двигунах кут  $\theta =$



$20\div 30^\circ$ , тобто він більший, ніж у синхронних генераторів, відповідно чому синхронізуюча потужність і коефіцієнт перевантажувальної здатності в синхронних двигунів менший, ніж у синхронних генераторів. Це пояснюється тим, що робота перших носить, як правило, менш відповідальний характер.

## 6 Робочі і U-подібні характеристики синхронного двигуна

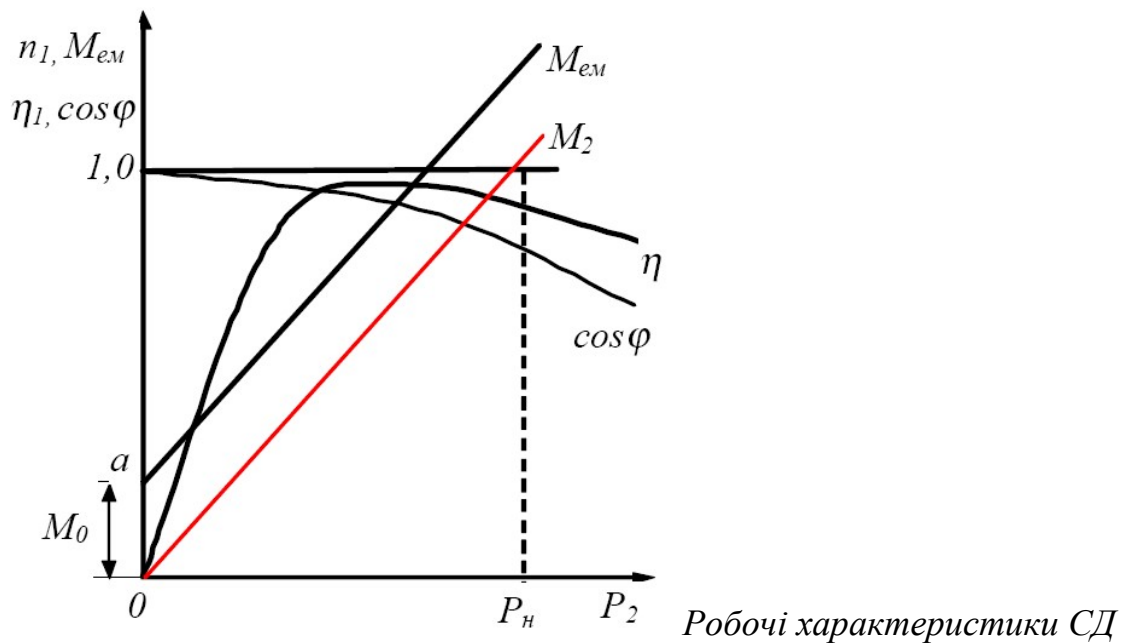
Поведінку двигуна в усталеному режимі роботи описують робочі характеристики, що представляють собою залежності:

$$n, M, \cos\varphi \text{ і } \eta = f(P_2) \text{ при } U_0 = \text{const і } f = \text{const}$$

Частота обертів синхронного двигуна  $n = 60f/p = \text{const}$  і, отже, залишається строго постійною при всіх режимах роботи машини. Відповідна характеристика зображена на мал. 18.4 у вигляді прямої паралельної осі абсцис.

Електромагнітний момент  $M_{em} = M_0 + M_2$ , де  $M_0$  - момент холостого ходу,  $M_2$  - корисний гальмівний момент. В заданих умовах роботи  $M_0$  залишається постійним, а  $M_2$  змінюється прямо пропорційно корисній потужності на валу  $P_2$ .

$$M_2 = \frac{P_2}{2\pi \frac{n}{60}}$$





Тому характеристика  $M_2 = f(P_2)$  зображена в вигляді прямої лінії, що проведена з початку координатної системи, а  $M_{em} = f(P_2)$  у вигляді прямої, що проведена вище першої на величину відрізка  $Oa = M_0$ .

Характер зміни  $\cos\varphi = f(P_2)$  залежить від того, яке збудження машини. Якщо дати нормальне збудження при холостому ході двигуна, тобто встановимо при холостому ході  $\cos\varphi = 1$ , то при навантаженні для одержання  $\cos\varphi = 1$  необхідно підвищити струм збудження. Оскільки, за умовою  $I_{\phi} = const$ , то при навантаженні буде режим недозбудження, при якому з'являться реактивні струми, що відстають від напруги мережі  $\cos(+\varphi)$ .

Якщо ж установити  $\cos\varphi = 1$  при номінальному навантаженні, то при недовантаженні двигун забирає з мережі реактивні випереджальні струми ( $\cos(-\varphi)$ ), а при перевантаженні - відстаючі. Для можливо меншої зміни  $\cos\varphi$  можна встановити збудження на деякому проміжному значенні.

Крива віддачі  $\eta = f(P_2)$  має звичайний для всіх електричних машин характер. Вона швидко росте при збільшенні навантаження від 0 до  $\frac{1}{2} P_n$  а потім мало змінюється в межах зміни значення навантаження від  $\frac{1}{2} P_n$  до  $P_n$ .

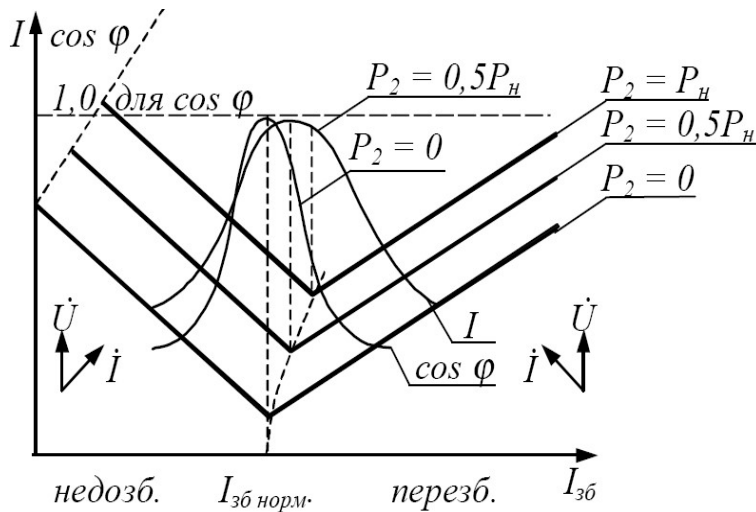
Експлуатаційною характеристикою, що описує поведінку двигуна, є також перевантажувальна здатність по моменту.

$$K_m = \frac{M_{em.max}}{M_n}$$

Для двигунів нормального виконання  $K_m \approx 2 \div 3$ .

Для синхронного двигуна можна отримати U-подібні характеристики аналогічно характеристикам синхронного генератора (мал. 18.5).

Як впливає з U-подібної характеристики, переведення двигуна в режим недозбудження означає, що він стає активно-індуктивним навантаженням для мережі, а переведення в режим перезбудження означає, що він стає активно-ємнісним навантаженням для мережі.



*U-подібні характеристики СД*

## 7 Синхронні компенсатори

Це спеціальний клас синхронних машин, що призначені для генерування реактивної потужності та *регулювання коефіцієнта потужності* в мережі ( $\cos\varphi$ ), а також для підтримки на визначеному рівні напруги на ділянці ЛЕП.

Суть явищ, які відбуваються при цьому полягає в тому, що необхідну для роботи деяких споживачів реактивну потужність виробляє не синхронний генератор, встановлений на електростанції, а синхронний компенсатор, встановлений в безпосередній близькості до споживача. До числа споживачів змінного струму, що вимагають значної реактивної потужності, в першу чергу відносяться асинхронні двигуни.

Синхронний компенсатор, включений в мережу, працює як синхронний двигун без навантаження ( $P_2 = 0$ ), в режимі х. х., і при цьому виробляє реактивну потужність  $Q_{ск}$ , необхідну для роботи споживача Z, наприклад групи асинхронних двигунів. Завдяки цьому реактивна потужність в СГ і ЛЕП доведена до деякого мінімального значення  $Q_{min}$ . Це сприяє підвищенню техніко-економічних показників всієї електричної системи.

Відомо, що при низькому коефіцієнті потужності навантаження ( $\cos\varphi$ ) в мережі, використовується тільки частина потужності, що виробляються електричними станціями, тому що  $P = S \cos\varphi$ , де  $P$ - потужність, споживана навантаженням (кВт);  $S$  - потужність, що виробляються електричною станцією (кВА).

Як правило в мережі переважає навантаження індуктивного характеру. Для підвищення  $\cos\varphi$  можуть бути встановлені статичні конденсатори. Однак доцільніше до такої мережі підключити синхронний компенсатор, що працює в режимі перезбудження і грає роль ємності, підключеної до мережі.

При підключенні споживача  $Z$  до мережі з напругою  $U_m$  (рис. 22.8, а) у мережі виникає струм  $I_z$ , що відстає по фазі від напруги  $U_m$  на кут  $\varphi_z$ , зумовлений значною індуктивною складовою струму  $I_z$ . При підключенні СК паралельно споживачеві  $Z$  і створенні в СК режиму перезбудження (рис. 22.8, б) в мережі з'явиться струм  $I_{СК}$ , що випереджає по фазі напругу  $U_m$  на кут  $90^\circ$ . Результуючий струм в мережі

$$I_m = I_z + I_{СК}. \quad (22.1)$$

Фазовий зсув цього струму щодо напруги мережі  $U_m$  (кут  $\varphi_m$ ) набагато менший кута фазового зсуву до включення СК (кут  $\varphi_z$ ). Крім того, струм  $I_m$  стане меншим ( $I_m < I_z$ ).

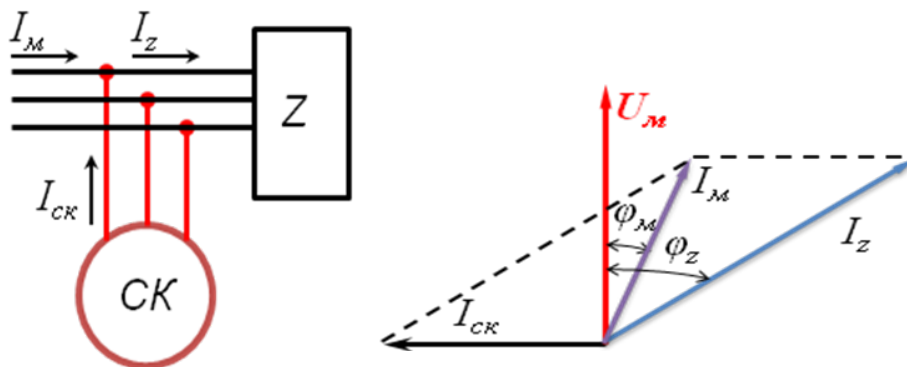


Рис. 22.7. Схема включення синхронного компенсатора (СК) в електричну систему

У деяких випадках СК працюють з недозбудженням. Необхідність у цьому виникає, якщо струм в системі містить значну ємнісну складову, яка не компенсується індуктивною складовою струму споживачів. Зазвичай ступінь збудження СК регулюють за допомогою автоматичних пристроїв.

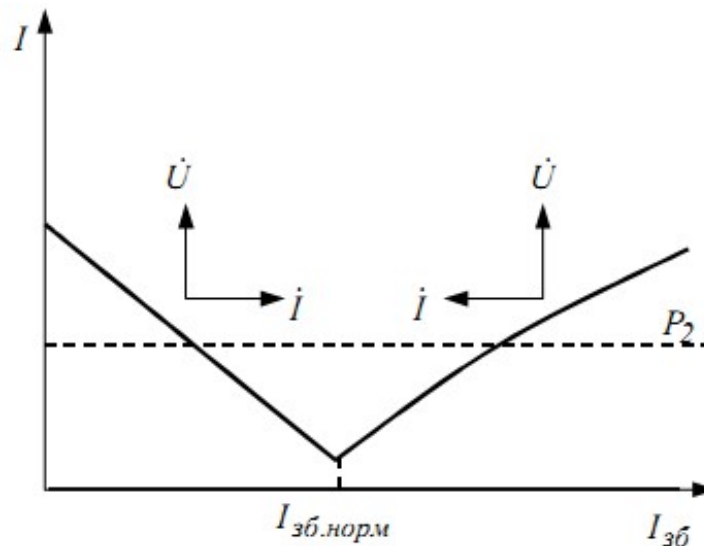
Синхронні компенсатори застосовують також для стабілізації напруги в мережі при передачі енергії по лініях великої протяжності. При великих індуктивних навантаженнях напруга в кінці лінії (у споживачів) виявляється набагато меншою, ніж на початку; при малих навантаженнях, навпаки, під впливом ємнісних опорів лінії

напруга в кінці лінії може навіть підвищуватися порівняно з напругою на початку. Якщо ж в кінці лінії (у споживачів) включити СК, що працює при великих навантаженнях з перезбудженням і при малих навантаженнях з недозбудженням, то це дозволить підтримувати напругу в кінці лінії практично незмінною.

Умови нагрівання СК при випереджаючому струмі (при перезбудженні) важчі, ніж при відстаючому (при недозбудженні), тому номінальною потужністю компенсатора вважають потужність при перезбудженні.

Промисловість випускає серійно синхронні компенсатори на потужності до 50 тис. квар. Ці синхронні компенсатори конструктивно майже не відрізняються від синхронних двигунів, однак, необхідно врахувати, що їх вал не розрахований на механічне навантаження, тому вони не мають вихідного кінця вала.

Основною характеристикою синхронного компенсатора є U-подібна характеристика (мал. 18.6).



Запускаються в хід синхронні компенсатори асинхронним способом.

### Контрольні запитання

1. Який принцип дії синхронного двигуна?
2. Поясніть процес пуску синхронного двигуна.
3. Як регулюється коефіцієнт потужності синхронного двигуна?
4. Яке призначення синхронного компенсатора?
5. Які переваги і недоліки синхронних двигунів порівняно з асинхронними?

*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.