



Національний університет
водного господарства та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та природокористування
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій

04-03-175

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторної роботи №6 на тему

" Дослідження характеристик синхронного двигуна "

з навчальної дисципліни

"Електричні машини"

студентами спеціальності

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Рекомендовано науково-методичною комісією зі спеціальності
141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
Протокол № 4 від 09. 11. 2016 р.

Рівне – 2017



Національний університет

Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи №6 на тему "Дослідження характеристик синхронного двигуна" з навчальної дисципліни "Електричні машини" студентами спеціальності 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка" / Маланчук Є.З., Христюк А.О. – Рівне : НУВГП, 2017. – 15 с.

Упорядники: Є.З. Маланчук, д.т.н., професор кафедри АЕКІТ;
А.О. Христюк, ст. викладач кафедри АЕКІТ.

Відповідальний за випуск: В.В. Древецький, д.т.н., професор,
завідувач кафедри АЕКІТ.



Національний університет
водного господарства
та природокористування

© Маланчук Є.З.,
Христюк А.О., 2017
© НУВГП, 2017



Робота 6. Дослідження характеристик синхронного двигуна

6.1 Мета роботи

Дослідити схему пуску синхронного двигуна, навчитися знімати механічну і V -подібні характеристики і проводити аналіз енергетичних процесів при різних струмах збудження.

6.2 Короткі теоретичні відомості

Як і усі електричні машини, синхронна машина обернена і може широко використовуватися у промисловості як генератори та двигуни переважно великої потужності. Синхронні машини належать до класу машин змінного струму. Частота обертання ротора синхронної машини дорівнює частоті обертового магнітного поля, тобто $n_1 = n_2$, $S = 0$.

Синхронна машина складається із статора і ротора (рис. 6.1). Конструкція статора принципово не відрізняється від конструкції стартера асинхронного двигуна. Тобто у шихтованому осерді розташована трифазна обмотка статора. Ротор синхронної машини являє собою електромагніт, обмотка якого живиться від джерела постійного струму.

Ротор синхронної машини буває двох типів:

- явнополюсний;
- неявнополюсний.

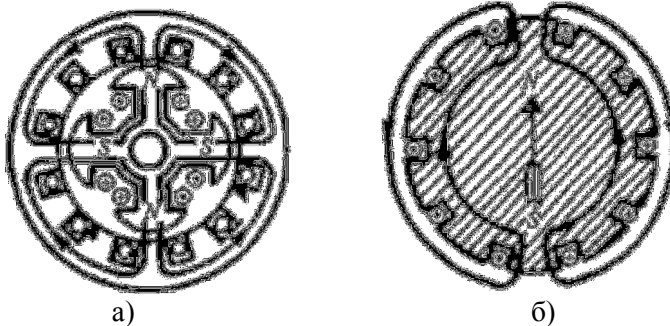


Рис. 6.1

Явнополюсний ротор (рис. 6.1,а) використовується здебільшого у тихохідних синхронних машинах. Обмотка ротора приєднується до контактних кілець і за допомогою щіток на неї подається постійна напруга. У машинах з великою швидкістю обертання (турбогенераторах, газогенераторах) застосовується неявнополюсний ротор.

На рис. 6.1,б наведено схему неявнополюсного ротора з однією парою полюсів. У багатополюсних роторах полюси чергуються по колу. Обмотка ротора збуджує постійний магнітний потік і називається обмоткою збудження.

У генераторному режимі обмотка збудження вмикається на постійну напругу. Магнітне поле ротора обертається разом з ротором і перетинає трифазну обмотку статора. У фазах індукується ЕРС

$$E = 4.44 f w k \Phi_m \quad /6.1/$$

де w — число витків, k — обмотковий коефіцієнт.

Частота індукованої ЕРС

$$f = \frac{pn}{60} \quad /6.2/$$

У режимі двигуна, крім постійної напруги, що подається на обмотку збудження, подається також трифазна синусоїдна напруга на обмотку статора. Обмотка збуджує обертове магнітне поле, яке захоплює у синхронному обертанні поле ротора й сам ротор. Тобто ротор обертається з частотою обертання магнітного поля (синхронною частотою)

$$n = \frac{60f}{p} \quad /6.3/$$

Характеристики синхронних двигунів

Основною перевагою синхронного двигуна перед двигунами інших типів є абсолютно жорстка механічна характеристика (рис. 6.2). Тобто ротор обертається зі швидкістю обертового магнітного поля, що збуджується статором. Швидкість обертання поля не залежить від моменту опору. Якщо опір більший за максимальний, ротор зупиняється.

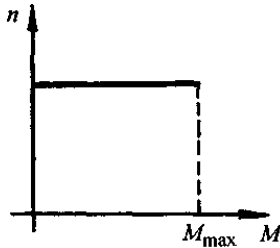


Рис. 6.2

Полюси статора і ротора обертаються з однаковою швидкістю. Але між осями цих полюсів є деяке кутове зміщення. Це зміщення залежить від моменту опору. Залежність електромагнітного моменту від кута між осями полюсів статора і ротора називається кутовою характеристикою двигуна (рис. 3). Момент має позитивні значення у межах $0 < \theta < \pi$, але стійкий режим роботи може бути тільки на ділянці $0 < \theta < \pi/2$. Зазвичай $\theta_{\text{ном}} = (20 \dots 30)^\circ$.

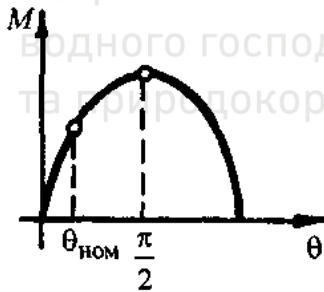


Рис. 6.3

Синхронні двигуни використовують там, де потрібна стабільна швидкість обертання, економічність. Безконтактні мікродвигуни з однофазною та трифазною обмотками статора застосовують у програмних механізмах, електрогодинниках, звуковій апаратурі тощо.

У-подібною характеристикою синхронного двигуна називається залежність струму якоря від струму збудження при сталому гальмуючому моменті. Як і у генератора, мінімальний струм забезпечується при коефіцієнті потужності $\cos\varphi = 1$ (рис. 6.4).

При $\varphi > 0$, струм обмежується областю нестійкої роботи двигуна ($\theta > \pi/2$), а при $\varphi < 0$ — магнітним насиченням осердя.

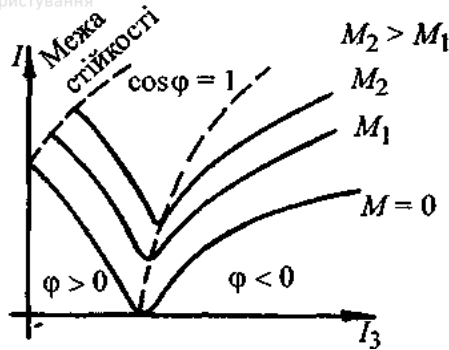


Рис.6.4

Статор синхронного двигуна (СД) конструктивно аналогічний статору трифазного асинхронного двигуна. На роторі СД знаходиться обмотка збудження, яка живиться постійним струмом, рис.6.5.

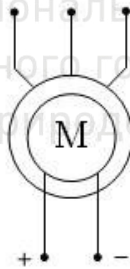
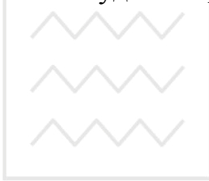


Рис. 6.5

Часто на валу синхронного двигуна встановлюється невеликий генератор постійного струму, який називається збуджувачем й призначений для живлення обмотки збудження. Майже завжди керування струмом збудження здійснюється за допомогою системи автоматичного керування так, як від його величини залежить коефіцієнт потужності та стійка робота двигуна. Додатково ротор має короткозамкнену обмотку, як в асинхронного двигуна, яка призначена для пуску та забезпечення стійкості двигуна. Ротор може виконуватися з явними чи неявними магнітними полюсами.

В першому випадку двигун крім синхронного моменту додатково створює реактивний момент.

Синхронний момент двигуна дорівнює



$$M_{\text{синхр}} = \frac{3U_1 E}{\omega_c x_d} \sin \Theta_{\text{ел}}, \quad /6.4/$$

де x_d – індуктивний електричний опір за повздовжньою віссю; $\Theta_{\text{ел}}$ – електричний кут між векторами напруги та ЕРС.

Реактивний момент двигуна визначається формулою

$$M_{\text{реак}} = \frac{3U_1^2}{2\omega_c} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin \Theta_{\text{ел}}, \quad /6.5/$$

де x_q – індуктивний електричний опір за поперечною віссю.

Формули /6.4/ та /6.5/ називаються кутовими характеристиками і є важливими залежностями синхронного двигуна. При збільшенні навантаження двигуна електричний кут між векторами напруги та ЕРС збільшується. При цьому вісь ротора відстає від осі магнітного поля статора на фактичний кут



$$\Theta = \frac{\Theta_{\text{ел}}}{p}. \quad /6.6/$$

Якщо до двигуна прикладено зовнішній рушійний момент, то вісь ротора випередить магнітне коло на кут Θ і двигун перейде в режим синхронного генератора. Сумарна кутова характеристика двигуна з явними полюсами показана на рис.6.6.

При проектуванні двигуна номінальний електричний кут, якому відповідає номінальний момент, задається в межах $\Theta_{\text{елн}} = (25 - 30)^\circ$, що забезпечує перевантажувальну здатність двигуна рівну

$$\lambda_M = \frac{M_{\text{max}}}{M_H} = 2 - 3. \quad /6.7/$$

Синхронні двигуни спеціального виконання можуть мати перевантажувальну здатність у межах 3,5–4.

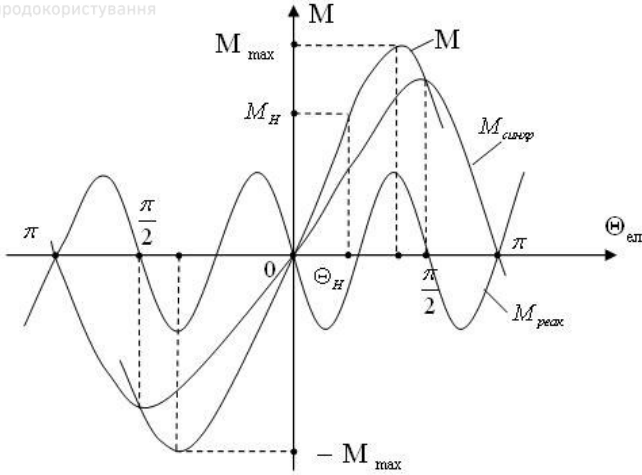


Рис.6.6



При роботі в усталеному режимі ротор двигуна обертається зі швидкістю магнітного поля

$$\omega = \omega_c = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad /6.8/$$

тому механічна характеристика СД є абсолютно жорсткою, рис.6.7.

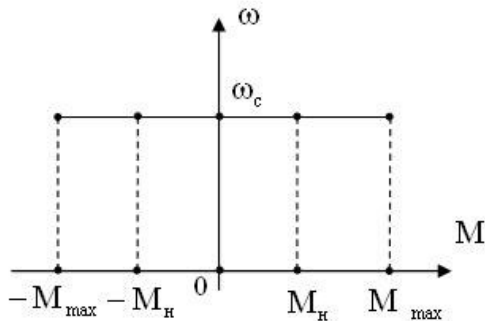


Рис.6.7



Проте вона має місце, якщо момент двигуна не перевищує максимального M_{\max} , інакше настає аварійний режим – випадання із синхронізму, який характеризується великими струмами.

Для керування швидкістю синхронного двигуна згідно до /6.8/ є практично один спосіб – зміна частоти напруги живлення f_1 . Двигун забезпечує двозонне керування швидкістю. В першій зоні керування здійснюється при постійному моменті за рахунок пропорційної зміни напруги й частоти відповідно до закону

$$\frac{U_1}{f_1} = \frac{U_{1H}}{f_{1H}} = const.$$

Діапазон керування в середньому складає 50-100. У другій зоні при керуванні з постійною потужністю підвищується тільки частота, а напруга залишається незмінною та номінальною. Максимальна швидкість обмежується при цьому механічною міцністю ротора.

Синхронний двигун підтримує всі режими гальмування. Проте найчастіше використовується динамічне гальмування. Для його організації обмотка статора відключається від мережі і замикається на трифазний реостат. Механічні характеристики мають вигляд, як в асинхронного двигуна. Гальмування противмиканням практично не застосовується, так як супроводжується великими стрибками струму при складній схемі керування.

Динамічні властивості двигуна визначаються на основі лінеаризації кутової характеристики на робочій ділянці, де синусоїду можна замінити прямою, проведеною через початок координат та номінальною точкою. Момент двигуна визначається на основі відношення з номінальною точкою

$$M = \frac{M_H}{\Theta_{eIH}} \Theta_{eI} = \frac{M_H P}{\Theta_{eIH}} \Theta = c_{em} \Theta = c_{em} (\varphi_c - \varphi), \quad /6.9/$$

де $c_{em} = \frac{M_H P}{\Theta_{eIH}}$ – коефіцієнт жорсткості пружного електромагнітного зв'язку між ротором та статором; φ_c – кут повороту вектора магнітного поля статора; φ – кут повороту ротора.



Після диференціювання залежності /6.9/ отримується рівняння, яке описує електромеханічне перетворення в синхронному двигуні без врахування додаткової короткозамкненої обмотки ротора

$$\frac{dM}{dt} = c_{em} \left(\frac{d\varphi_c}{dt} - \frac{d\varphi}{dt} \right) = c_{em} (\omega_c - \omega). \quad /6.10/$$

На основі цього рівняння будується структурна схема електромеханічного перетворювача, рис.6.8.

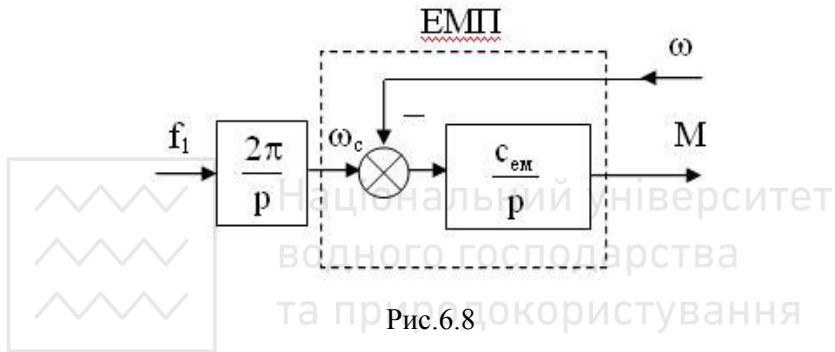


Рис.6.8

Для врахування додаткової короткозамкненої обмотки ротора рівняння синхронного моменту /6.9/ доповнюється відомим рівнянням моменту асинхронного двигуна на робочій ділянці механічної характеристики

$$M = c_{em} (\varphi_c - \varphi) + \beta (\omega_c - \omega), \quad /6.11/$$

яке в операторній формі приймає вигляд

$$M = \left(\frac{c_{em}}{p} + \beta \right) (\omega_c - \omega). \quad /6.12/$$

Після доповнення моделі /6.12/ відомою передаточною функцією механічної частини у вигляді одномасової схеми отримується структурна схема синхронного двигуна, рис.6.9.

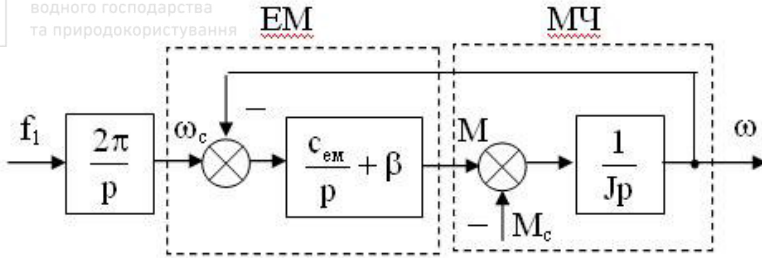


Рис.6.9

Як видно з рис.6.9, додаткова обмотка виконує функцію демпфера з коефіцієнтом β , який гасить коливання моменту, що обумовлені пружним електромагнітним зв'язком з коефіцієнтом c_{em} .

Перевагою синхронного двигуна в порівнянні з асинхронним двигуном є більш високий коефіцієнт корисної дії, можливість рекуперації реактивної енергії, менша залежність від падіння напруги мережі, абсолютно жорсткі механічні характеристики, більша надійність, обумовлена великим повітряним зазором. Ще однією важливою особливістю синхронного двигуна є можливість фіксації положення ротора без механічного гальма, якщо на обмотку статора подати постійний струм. Крім того, в явноплюсних двигунах можна організувати кроковий рух ротора шляхом послідовного перемикання обмоток фаз статора на постійний струм.

Пуск синхронного двигуна

При вмиканні двигуна механічна інерція ротора велика і обертаючий момент на валу практично дорівнює нулю. Тому для пуску треба розкрутити вал двигуна до швидкості, близької до синхронної. Складний пуск значною мірою обмежує використання синхронного двигуна.

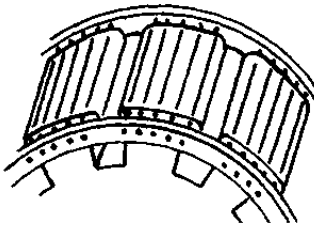


Рис. 6.10

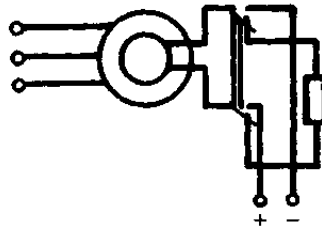


Рис.6.11



Для пуску синхронного двигуна вкладають короткозамкнену обмотку («біляче колесо») у полюсах ротора (рис. 6.10). Стержні обмотки з'єднуються кільцями. При пуску обмотка збудження замикається на пусковий опір, як наведено на рис.6.11.

Після вмикання обмотки статора в мережу створюється обертове магнітне поле, що індукуює струм у «білячому колесі» й утворює асинхронний пусковий момент. Щоб збільшити пусковий момент, іноді використовують клітку з глибоким пазом або подвійну «білячу клітку». Це підвищує пусковий момент до $0,8... 1,0 M_n$. Коли ковзання сягне приблизно 5%, обмотка збудження відмикається від опору та вмикається на джерело постійного струму. Якщо обмотку збудження на час пуску залишити розімкненою, то велика ЕРС, що індукуюється у ній, призведе до пробивання ізоляції. Після асинхронного розгону ротора та вмикання обмотки збудження виникає синхронний обертаючий момент.

Для цього моменту переводить двигун у режим синхронної роботи. Потужні синхронні двигуни пускають при зниженій напрузі на статорній обмотці.

Недолік полягає в наявності пружного електромагнітного зв'язку, що обумовлює коливання моменту, достатньо висока складність керування швидкістю, невисокий пусковий момент

6.3 Програма роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою і зібрати електричну схему пуску синхронного двигуна.
2. Дослідити впливи під синхронної швидкості і моменту сил опору на процес втягування двигуна в синхронізм.
3. Зняти механічну характеристику двигуна.
4. Зняти залежності струму статора і коефіцієнта потужності від струму збудження при $P = \text{const}$.
5. Визначити величину реактивної потужності, яку генерує двигун при $\cos \varphi = -0,9$ і $I = 0,7 I_n$.
6. Зробити висновки про економічний режим роботи двигуна і економію електричної енергії.



6.4 Опис лабораторної установки

Лабораторна установка для дослідження синхронного двигуна складається із двигуна (СД), генератора постійного струму з незалежним збудженням (Г), тахогенератора (Т), рідинного реостата (R_n) і стенда, на якому розташовані вимірювальні прилади, органи керування реостатом і резисторами в колах обмоток збудження двигуна і генератора, а також засоби комутації (рис.6.12).

На стенді відтворені умовні позначення електричних машин, обмоток збудження, реостатів, резисторів, вимірювальних приладів і комутуючих пристроїв, що полегшує складання схем досліджень.

Навантаженням двигуна є генератор постійного струму, потужність якого регулюють грубо за допомогою рідинного реостата R_n , а тонко – резистором R_1 , в колі обмотки збудження. Схема підключення генератора є зібраною.

Контроль за величиною навантаження здійснюють за допомогою амперметрів, вольтметра і фазометра (прилада для вимірювання $\cos\phi$).

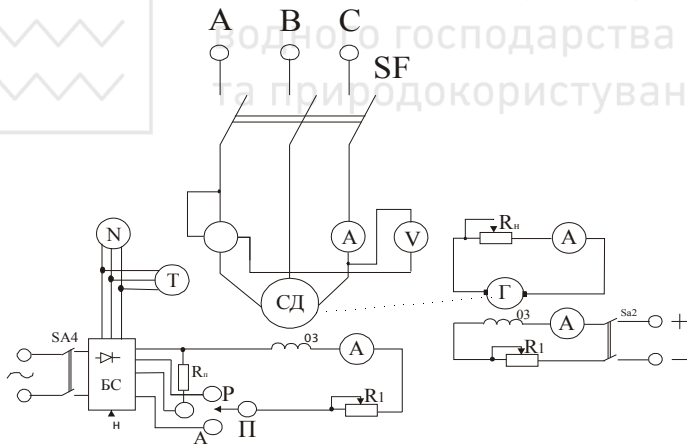
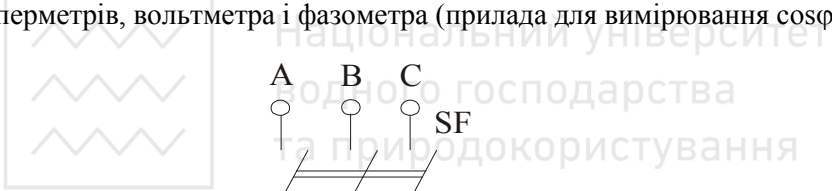


Рис.6.12

6.5 Порядок виконання роботи

1. До складання схеми пуску синхронного двигуна необхідно ознайомитись зі стендом, на якому розташовані вимірювальні прилади, засоби комутації і клеми з відповідними підписами. Склавши схему, необхідно запросити викладача, щоб її перевірити.



Пробний пуск двигуна виконує викладач і перевіряє роботу генератора постійного струму, який створює гальмівний момент.

2. Номінальне втягування двигуна в синхронізм при асинхронному пуску відбувається при холостому ході і швидкості $\omega_b = 0,95\omega_0$, якщо коло обмотки збудження під'єднати до номінальної напруги джерела постійного струму. Номінальний струм збудження $I_{3,н}$ встановлюють за показом амперметра.

Спочатку пуск здійснюють вручну, подавши живлення на обмотку статора вимикачем SF, попередньо перевівши перемикач П в положення "Руч.". Напругу на обмотку збудження вмикають вимикачем SA4 при швидкості $\omega_b = 0,95\omega_0$, яку визначають за тахометром. Після генератором створюють навантаження, яке відповідає струму статора $I_1 = 0,25I_{н}$, зупиняють двигун і знову проводять пуск, включивши струм збудження при усталеній швидкості (вона буде меншою від ω_0). Спостерігаючи за показом амперметра (струм статора) і роботою двигуна, описують у звіті цей процес і роблять відповідний висновок.

Далі досліджують пуск двигуна за автоматичною схемою синхронізації. Для цього перемикач П переводять в положення "Авт.". При цьому реле PV, яке контролює швидкість двигуна, бо живиться напругою тахогенератора, при спрацюванні своїми контактами відімкне резистор R_n і подасть живлення на обмотку збудження. Включивши вимикач SF, спостерігають за пуском двигуна.

Змінюючи напругу, при якій спрацьовує реле PV, вивчають вплив швидкості двигуна на процес втягування двигуна в синхронізм при холостому ході. Якщо втягування не відбувається (різні коливання швидкості), то необхідно негайно виключити живлення обмотки статора.

3. Для зняття механічної характеристики $\omega = f(M)$ пускають двигун в автоматичному режимі при $I_3 = I_{3*н}$. Змінюючи навантаження генератора опором R_n і струмом збудження, знімають з точки характеристики і дані заносять до табл. 1

Таблиця 1

U	
I	
cos φ	
N	
M	



За експериментальними даними обчислюють потужність і електромагнітний момент $M=P/\omega$.

4. Для зняття V-подібних характеристик запускають двигун, встановлюють струм збудження, який відповідає $\cos \varphi=1$ при навантаженні $I=0,5I_n$. Потім збільшують струм збудження до тих пір, поки струм статора не збільшиться до $1,2I_n$ за умови $P=\cos t$. Ця умова буде виконуватись, якщо струм генератора буде сталим ($I_f=\text{const.}$) в процесі експерименту і сталим буде його струм збудження, бо гальмівний момент $M_r=k\Phi I_f$. Покази вимірювальних приладів заносять до табл..2.

Таблиця 2

I_3	
I	
\cos	
φ	
I_f	

Далі зменшують струм збудження знову доти, доки струм статора не досягне значення $1,2 I_n$, і дані експерименту заносять до табл..2. На підставі одержаних даних будують характеристики $\cos \varphi = f(I)$ та $\cos \varphi = f(I_{зб})$.

5. Встановлюють режим роботи двигуна, при якому $\cos \varphi = -0,9$ $I=0,6 I_n$, записують покази вольтметра і амперметра і визначають величину реактивної потужності. Дослід повторюють при $\cos \varphi = 0,9$.

6. Необхідно зробити висновки про те, як потрібно регулювати струм збудження, щоб економити електричну енергію при різних навантаженнях двигуна.

6.6 Контрольні запитання

1. Що відбувається в синхронному двигуні при зміні моменту сил опору?
2. Що показує кутова характеристика двигуна $M=f(\theta)$?
3. Чи виникає реактивний момент в явно полюсних двигунах?
4. У чому суть асинхронного пуску синхронного двигуна?
5. За якої умови синхронний двигун втягується в синхронізм?
6. Як впливає момент сил опору на процес втягування двигуна в синхронізм?



Національний університет
та природокористування

7. Чому при асинхронному пуску обмотку збудження не замикають на резистор?



Національний університет
водного господарства
та природокористування