

Лекція № 106

Тема: «Генератори постійного струму»

ПЛАН

- 1. Класифікація генераторів постійного струму за способом збудження;*
- 2. Основні рівняння генераторів постійного струму;*
- 3. Робочі характеристики генераторів постійного струму;*
- 4. Умови самозбудження генераторів постійного струму;*
- 5. Втрати і коефіцієнт корисної дії генераторів постійного струму;*
- 6. Паралельна робота генераторів постійного струму.*

1. Класифікація генераторів постійного струму за способом збудження

Генератори постійного струму можуть мати різні способи збудження, у найбільш загальному випадку їх поділяють на:

- 1) генератори зі збудженням від постійних магнітів;
- 2) генератори з електромагнітним збудженням.

Тому що генератори зі збудженням від постійних магнітів мають обмежене використання, тому основний спосіб збудження генераторів постійного струму - це збудження електромагнітним шляхом.

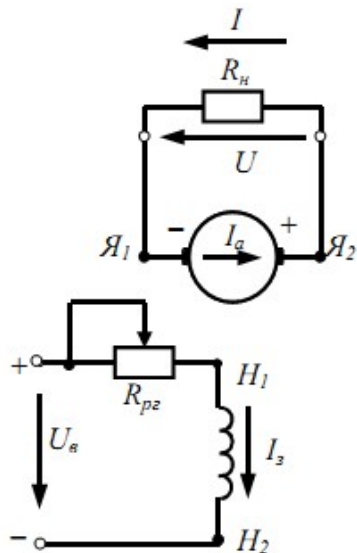
Ці генератори поділяють на:

- генератори незалежного збудження;
- генератори із самозбудженням.

Генератори незалежного збудження. В генераторах незалежного збудження обмотка збудження підключена до незалежного джерела постійного струму. Струм збудження I_z залежить тільки від напруги на затискачах кола збудження U_z й опору цього кола. Потужність, що втрачається на збудження, як правило не перевищує 2-3 % від потужності генератора. Незалежне збудження є зараз дуже розповсюдженим і застосовується в машинах низької напругою (4-12 В), високої напруги (понад 500 В), в машинах великої потужності й у тих випадках, коли потрібно широке регулювання напруги.

Відповідно до схеми, у загальному випадку:

$$U = U_3 \text{ і } I = I_a.$$

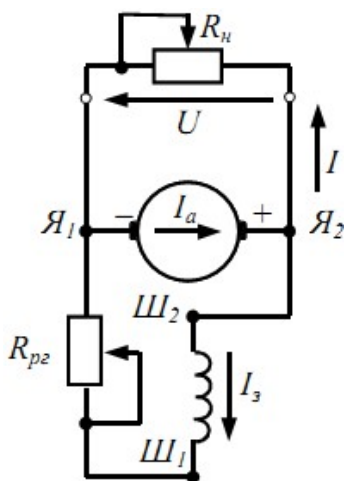


$Я_1 - Я_2$ - коло обмотки якоря; $Н_1 - Н_2$ - коло обмотки збудження; U - напруга в колі якоря; I - струм навантаження; I_a - струм якоря; U_3 - напруга на обмотці збудження; I_3 - струм збудження.

Мал. 1. Принципова схема генератора незалежного збудження.

Генератори постійного струму із самозбудженням поділяють на машини з паралельним, послідовним і змішаним збудженням.

Генератори паралельного збудження (шунтові). В генераторах паралельного збудження обмотка збудження підключена до затискачів обмотки якоря. Зі схеми видно, що струм збудження I_3 залежить від напруги на затискачах якоря і що струм якоря I_a дорівнює сумі струму навантаження I і струму збудження I_3 .



$Ш_1 - Ш_2$ - коло обмотки збудження

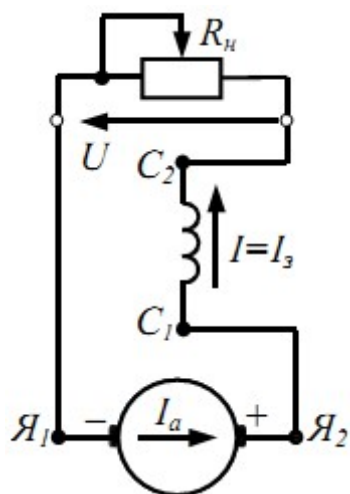
Мал. 2. Принципова схема генератора паралельного збудження.

Відповідно до схеми:

$$U = U_3 \text{ і } I_a = I + I_3.$$

Генератори паралельного збудження є дуже розповсюдженим типом генератора постійного струму, тому що не вимагають окремого джерела струму для збудження і дають в межах нормального навантаження досить стійку напругу.

Генератори послідовного збудження (серієсні). Зі схеми видно, що струм збудження I_z дорівнює струму якоря I_a , тобто цілком залежить від навантаження генератора. Ця обставина негативно впливає на робочі властивості генератора, тому що його напруга змінюється залежно від струму навантаження I , тоді, як правило потрібно, щоб вона залишалася більш-менш постійною. В генераторах таке збудження зараз майже не застосовується. Відповідно до схеми: $I_a = I = I_z$.



$C_1 - C_2$ - коло обмотки збудження.

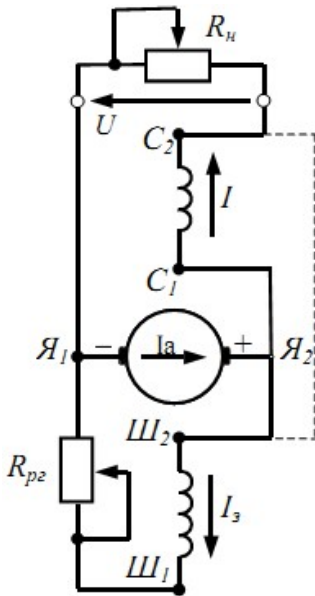
Мал. 3 Принципова схема генератора послідовного збудження.

Генератори змішаного збудження (компаундні). мають дві обмотки збудження паралельну ($Ш_1 - Ш_2$) і послідовну ($C_1 - C_2$). Як правило, головне значення має паралельна обмотка, а послідовна відіграє роль додаткової обмотки. Як побачимо нижче, наявність двох обмоток збудження дозволяє автоматично підтримувати необхідну напругу на затискачах приймача.

По способу приєднання паралельної обмотки до якоря розрізняють:

- 1) короткий шунт;
- 2) довгий шунт.

Перший показаний на мал. 4 суцільною лінією, другий - пунктирною. Практично різниця між обома способами несуттєва.



Мал. 4. Принципова схема генератора змішаного збудження.

2 Основні рівняння генераторів постійного струму

Незалежно від способу збудження для генераторів постійного струму справедливі такі основні рівняння:

Рівняння напруг для кола якоря:

$$U = E_a - I_a R_a, \quad (22.1)$$

де U - вихідна напруга генератора; $E_a = c_e n \Phi$ - ЕРС обмотки якоря, $c_e = pN/(60a)$ постійна машини; p - число пар полюсів; N - число провідників обмотки якоря; a - число паралельних віток обмотки якоря; $I_a R_a$ - спад напруги в колі обмотки якоря і в обмотках, включених послідовно з обмоткою якоря (обмотка додаткових полюсів, компенсаційна обмотка); I_a - струм якоря; R_a - активний опір кола обмотки якоря.

З приведенного рівняння випливає, що вихідна напруга генератора залежить від навантаження, а також від частоти обертання машини n .

Величину цієї напруги можна регулювати, насамперед, зміною магнітного потоку Φ на кожному полюсному поділу, що практично зводиться до регулювання струму збудження.

Баланс потужності генератора:

$$U_a I_a = E_a I_a - I_a^2 R_a$$

Електромагнітний момент генератора визначається за виразом:

$$M_{em} = C_m I_a \Phi$$

де $C_m = pN/(2\pi a)$ - постійна машини.

Електромагнітний момент генератора є гальмівним і в усталеному режимі врівноважується обертовим моментом приводного двигуна:

$$M_1 = M_{em} + M_0, \quad (22.3)$$

де M_1 - обертовий момент приводного двигуна; M_{em} - електромагнітний момент генератора; M_0 - момент холостого ходу генератора, що відповідає механічним втратам генератора і втратам в сталі його якоря.

3 Робочі характеристики генераторів постійного струму

До робочих характеристик, що описують поведінку генераторів в усталеному режимі роботи під навантаженням, відносяться:

1. Навантажувальна характеристика

$$U = f(I_3) \quad \text{при } I = \text{const}, n = \text{const}.$$

В окремому випадку при $I = 0$, залежність $U_0 = f(I_3)$ - є характеристикою холостого ходу генератора.

2. Зовнішня характеристика

$$U = f(I) \quad \text{при } R_3 = \text{const} (I_3 = \text{const}), n = \text{const}.$$

3. Регулювальна характеристика

$$I_3 = f(I) \quad \text{при } U = \text{const}, n = \text{const}.$$

В окремому випадку при $U = 0$ залежність $I_K = f(I_3)$ - є характеристикою короткого замикання генератора.

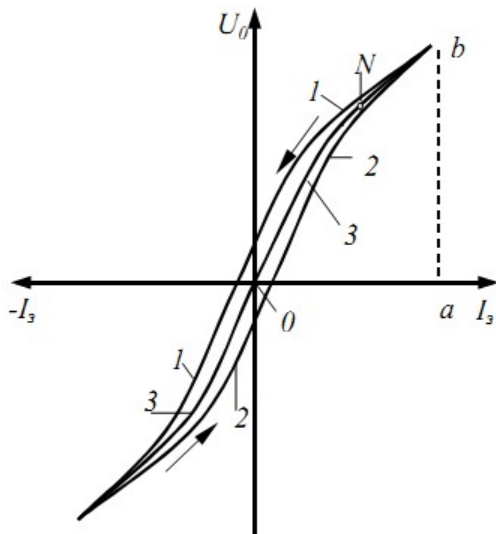
Розглянемо робочі характеристики генераторів постійного струму, як отримані експериментально.

Характеристика холостого ходу

Ця характеристика являє собою залежність напруги на виході генератора в режимі холостого ходу U_0 від струму збудження I_3 при струмі навантаження $I = 0$ і частоті обертання $n = \text{const}$.

Приблизний вигляд характеристики холостого ходу генератора з незалежним збудженням представлений на мал. 22.5. Експеримент зняття характеристики варто починати зі значення $I_3 = "0a"$, при якому напруга $U_0 = "ab"$ перевищує номінальне на 10 - 20 %. Після цього зменшують струм збудження до нуля ($I_3 = 0$), а потім змінюють його напрямком на зворотний ($-I_3$). Це дає нам *спадну гілку 1-1*

характеристики холостого ходу. Щоб одержати її *висхідну гілку 2-2*, досить повернути вітку *1-1* на 180° навколо точки 0 .



Мал. 22.5 Характеристика холостого ходу генератора незалежного збудження

При практичному використанні характеристики холостого ходу користуються не тією чи іншою її гілкою, а кривою 3-3, проведеною саме між кривими 1-1 і 2-2.

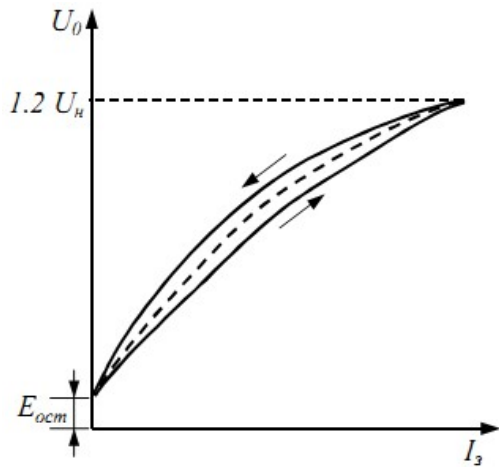
По характеристиці холостого ходу ми можемо судити про властивості магнітного кола машини. Справді, точка характеристики при $I_3 = 0$ свідчить про величину потоку залишкового намагнічування $\Phi_{зал}$. Як правило $\Phi_{зал} = 1-3\%$ від потоку машини Φ , що відповідає номінальному режиму роботи генератора. Далі, гілки 1-1 і 2-2 утворюють гістерезисну петлю, що дає нам уяву про властивості сталі полюсів і ярма.

Нарешті, по положенню на характеристиці точки N , що відповідає номінальній ЕРС, ми можемо судити про ступінь насичення магнітного кола. Як правило ця точка лежить на перегині кривої, тому що робота на прямолінійній частині кривої викликала б коливання напруги, а робота за перегином, тобто в насиченій частині кривої, обмежувала б можливість регулювання напруги.

Характеристика холостого ходу генераторів паралельного збудження (рис. 22.6) знімається так само, як і при незалежному збудженні, але оскільки самозбудження можливе лише в одному напрямку, характеристику холостого ходу можна зняти теж тільки при одному напрямку струму збудження. На малюнку $E_{зал}$ - ЕРС обмотки якоря від потоку залишкового намагнічування.

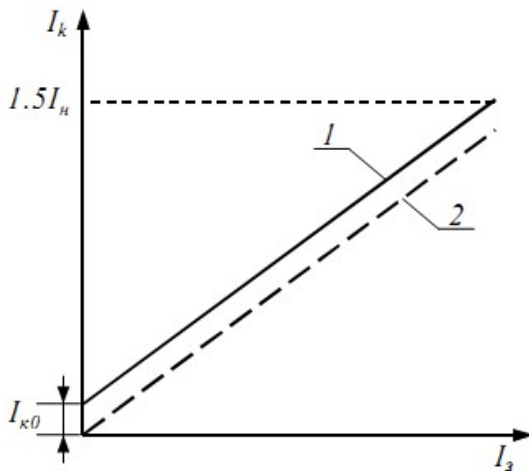
У генератора послідовного збудження характеристика холостого ходу може бути знята тільки при незалежному живленні обмотки збудження. Вона має такий

же вигляд як у генераторів з незалежним збудженням. У генераторів змішаного збудження характеристика холостого ходу має такий же вигляд, як у генераторів паралельного збудження, тому що при розімкнутому колі якоря послідовна обмотка збудження не бере участі у створенні магнітного потоку збудження.



Мал. 6. Характеристика холостого ходу генератора паралельного збудження

Характеристика короткого замикання Ця характеристика являє собою залежність струму якоря при короткому замиканні I_k від струму збудження I_3 при напрузі на виході генератора $U = 0$ і частоті обертання $n = const$ (мал. 22.7).



Мал. 22.7. Характеристика короткого замикання генератора незалежного збудження (1), розрахункова характеристика короткого замикання (2).

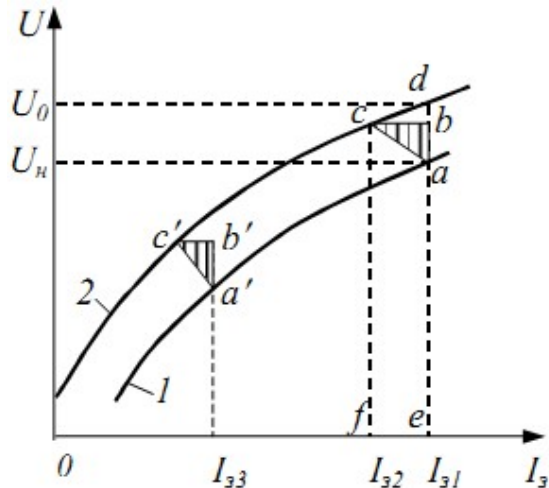
Характеристика короткого замикання знімається при замкнутих накоротко затискачах кола якоря шляхом збільшення струму збудження I_3 до такої межі, щоб струм якоря при короткому замиканні I_k не перевищував $1,5I_H$. Оскільки, магнітне коло при цьому не насичене, то характеристика має прямолінійний характер.

При всіх способах збудження характеристика короткого замикання може бути знята тільки **при незалежному живленні** обмотки збудження.

Навантажувальна характеристика. Ця характеристика виражає залежність напруги U на виводах генератора від струму збудження I_3 при незмінному струмі навантаження $I = const$ і незмінній частоті обертання $n = const$.

При зазначених умовах напруга на виводах генератора менша ЕРС (22.1).

Тому навантажувальна характеристика (крива 1) розташовується нижче характеристики холостого ходу (крива 2) на мал. 22.8.



Мал. 22.8. Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження.

Якщо від точки a , що відповідає номінальній напрузі U_H , відкласти нагору відрізок ab , рівний $I_a r_a$, і провести горизонтально відрізок bc до перетину з характеристикою холостого ходу, а потім з'єднати точки a і c , то одержимо трикутник abc , називаний **реактивним трикутником**.

Так, при роботі генератора в режимі холостого ходу при струмі збудження I_{31} напруга на виводах дорівнює $U_0 = de$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_H = ae$.

Таким чином, відрізок da виражає величину напруги $\Delta U = U_0 - U_H$ при $I_3 = I_{31}$.

Зменшення напруги на виводах генератора в цьому випадку відбулося в результаті двох причин: спаду напруги в колі якоря (22.1) і впливу розмагнічуючої реакції якоря. Вимірявши величину опору кола якоря r_a і підрахувавши спад напруги $I_a r_a$ можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження:

$$E = U + I_a R_a.$$

На мал. 22.8 ця ЕРС представлена відрізком be . ЕРС генератора при навантаженні менше, ніж у режимі холостого ходу ($be < de$), що пояснюється впливом розмагнічуючої реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу з точки b

проводиться відрізок bc паралельно осі абсцис, до перетину з характеристикою холостого ходу. Отриманий у такий спосіб відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; а в режимі холостого ходу для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{32} < I_{31}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів $(I_{31} - I_{32})$, являє собою величину струму збудження, що компенсує розмагнічуючий вплив реакції, якоря.

Сторони реактивного трикутника визначають фактори, що викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: сторона ab - спад напруги в колі якоря, а сторона bc - вплив розмагнічуючої реакції якоря. Реактивний трикутник $a'b'c'$ побудований для іншого значення струму збудження (I_{33}) . Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінно. $(a'b'=ab)$, що визначається незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася $(b'c'<bc)$, тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і зменшилася дія розмагнічуючої реакції якоря.

Навантажувальні характеристики генераторів паралельного збудження мають такий же вигляд і значення, що й у генераторі незалежного збудження.

Навантажувальну характеристику генератора послідовного збудження експериментально можна одержати тільки за схемою з незалежним збудженням.

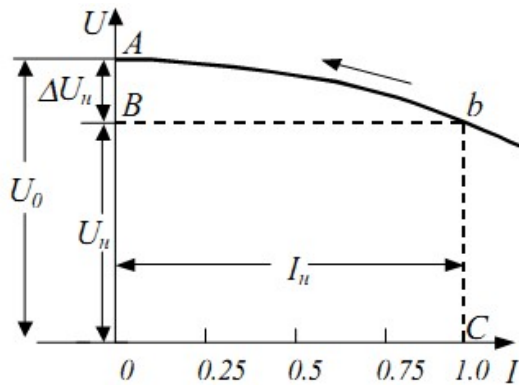
Навантажувальні характеристики генератора змішаного збудження мають такий же вигляд, як і для генераторів паралельного або незалежного збудження, але можуть розташовуватися вище характеристики холостого ходу, тому що при навантаженні позначається вплив обмотки послідовного збудження.

Зовнішня характеристика генератора. Ця характеристика являє собою залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I при постійній частоті обертання $n = const$ і постійному опорі в колі збудження $R_3 = const$ або, що при незалежному збудженні те саме, $I_3 = const$.

Номінальною зміною напруги генератора незалежного збудження називається зміна напруги на його затискачах при зміні навантаження від номінального до нуля при $n = const$ і $I_3 = const$.

Тому для зняття зовнішньої характеристики приводимо генератор в обертання з номінальною частотою обертання і встановлюємо такий струм збудження $I_{3н}$, щоб при $I = I_n$ ми мали на затискачах генератора: $U = U_n$.

Потім підтримуючи $n = n_n = const$, розвантажуюємо генератор аж до холостого ходу. При цьому омичний спад напруги на якорі $I_a r_a$ і реакція якоря зменшуються і відповідно росте напруга на затискачах генератора до значення $U = U_0$ (мал. 22.9).



Мал. 22.9. Зовнішня характеристика генератора незалежного збудження.

Зміна напруги виражається у відсотках від номінальної напруги, тобто

$$\Delta U_n = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\% = \frac{OA - OB}{OB} 100\% . \quad (22.4)$$

Як правило, для генераторів незалежного збудження $\Delta U_n = 5-10\%$.

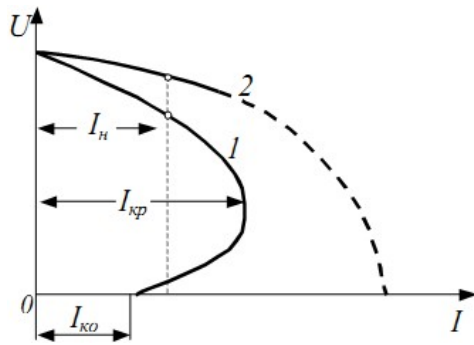
Зовнішня характеристика генератора **паралельного** збудження представлена на мал. 22.10 (крива 1). Там же представлена і зовнішня характеристика генератора незалежного збудження (крива 2).

З мал. 22.10 видно, що в генераторі паралельного збудження спад напруги ΔU більший, ніж у генераторі незалежного збудження. Це пояснюється тим, що в генераторі паралельного збудження, крім омичного спаду напруги в обмотці якоря і реакції якоря, діє ще *третья* причина, а саме: при збільшенні навантаження струм збудження $I_3 = U / (R_a + R_3)$ зменшується пропорційно U (тому що $(R_a + R_3) = const$), тоді як у генераторі незалежного збудження $I_3 = const$.

Цією ж причиною пояснюється і те, що характер кривих 1 і 2 на мал. 22.10. різний. При послідовному зменшенні опору зовнішнього кола навантажувальний струм I генератора незалежного збудження безупинно росте (продовження кривої 2), показано переривчастою лінією) і при короткому замиканні генератора ($U = 0$) досягає неприпустимих значень, що може привести до виникнення колового вогню на колекторі.

Навпаки, в генераторі паралельного збудження струм навантаження буде збільшуватися тільки до визначеного граничного або, інакше, **критичного** значення

$I_{кр}$, що як правило не перевищує номінальний струм більше ніж у 2-2,5 рази, після чого він починає зменшуватися разом із напругою, що продовжує падати.



Мал. 22.10. Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

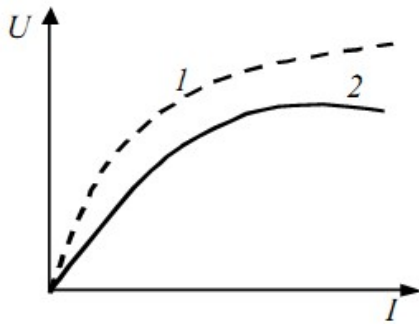
Дійсно, $I = U/R_n$, де R_n - опір зовнішнього, тобто навантажувального, кола якоря. Якщо зменшити R_n то при цьому зменшується напруга на затискачах генератора U . Таким чином, струм I залежить від двох зустрічно діючих факторів - зменшення R_n і зменшення U . Спочатку, поки генератор ще відносно сильно не насичений, напруга U мало змінюється (див., наприклад, верхню частину характеристики холостого ходу на мал. 22.6); тому великий вплив робить зменшення опору R_n , і струм I росте; але в міру збільшення I , напруга U починає падати усе швидше, зрівнюючись, а потім перевищуючи вплив R_n , відповідно до цього струм I , досягши свого критичного значення, починає падати.

При короткому замиканні напруга $U = 0$, струм збудження I_z також дорівнює нулю, і по якорю тече струм короткого замикання $I_{к0}$, зумовлений тільки потоком залишкового намагнічування. Цей струм як правило менший I_n , і, отже, коротке замикання для генератора паралельного збудження є менш небезпечним, ніж для генератора незалежного збудження.

Генератори паралельного збудження широко використовують в установках постійного струму, тому що відсутність збудника вигідно відрізняє їх від генераторів незалежного збудження. Номінальна зміна напруги генератора паралельного збудження складає 10-30%.

Зовнішня характеристика генератора **послідовного** збудження має вигляд кривої 2 на мал. 22.11. За загальним правилом, вона представляє собою залежність напруги на затискачах генератора U від струму навантаження I при $n = const$. Якби в генераторі послідовного збудження не було ні омичного спаду напруги в якорі, ні

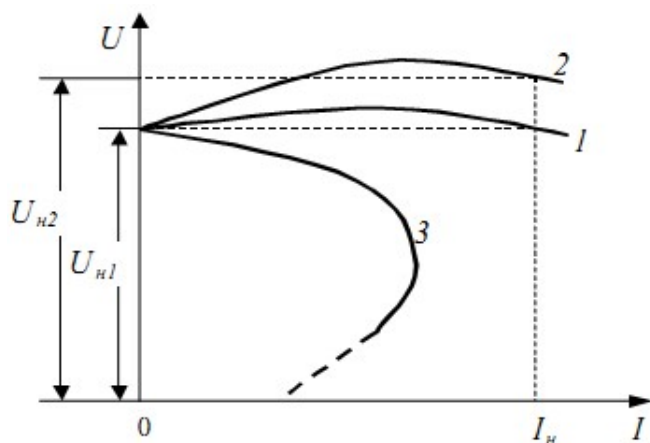
реакції якоря, то його зовнішня характеристика збіглася б з характеристикою холостого ходу I (пунктирна лінія на мал. 22.11).



Мал. 22.11. Зовнішня характеристика генератора послідовного збудження.

В дійсності крива 2 завжди проходить нижче кривої 1, причому спочатку напруга змінюється майже прямо пропорційно до струму навантаження, тому що тут генератор ще не насичений, але потім при подальшому збільшенні струму I , а отже, і струму збудження відбувається насичення сталі, і напруга збільшується вже повільніше. При великому насиченні, коли потік полюсів збільшується дуже мало, а потік реакції якоря і спаду напруги в якорі ростуть пропорційно струму I , напруга при подальшому навантаженні зменшується.

Через те, що напруга генератора послідовного збудження різко змінюється зі зміною навантаження, у практиці він не застосовується як джерело струму, тому що до генераторів майже завжди пред'являється вимога тримати напругу більш-менш постійною.



Мал. 22.12. Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження.

Вибираючи число витків послідовної обмотки збудження так, щоб при номінальному струмі її МРС могла компенсувати дію омичного спаду напруги і реакції якоря генератора, одержана при номінальному навантаженні напруга U , була рівна напрузі холостого ходу. У цьому випадку зовнішня характеристика має вигляд

кривої 1 на мал. 22.12 і генератор змішаного збудження може бути названий **нормально напруженим**.

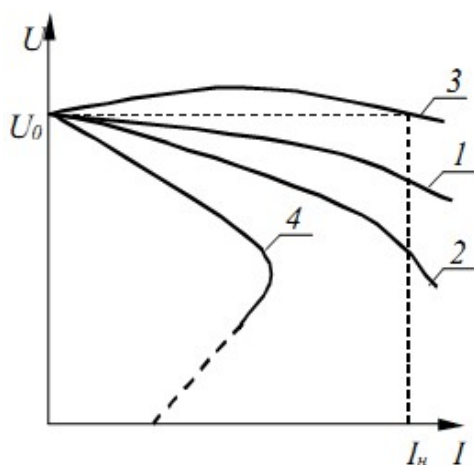
Якщо поставлена умова підтримувати постійну напругу на затискачах приймача, для чого потрібно компенсувати спад напруги в лінії, то необхідно збільшити число витків послідовної обмотки збудження. У цьому випадку зовнішня характеристика здобуває вигляд кривої 2 на мал. 22.12, де генератор може бути названий **перенапруженим**.

При зустрічному включенні обмоток МРС послідовної обмотки спрямована зустрічно відносно МРС паралельної обмотки (крива 3). Зустрічне вмикання застосовується в спеціальних випадках, коли потрібно одержати круто спадаючу зовнішню характеристику, як наприклад, у зварювальних генераторах, прожекторних установках і т.д.

Якщо провести порівняльний аналіз зовнішніх характеристик генераторів постійного струму при різних способах збудження, то їх можна представити таким сімейством кривих (мал. 22.13).

Регульовальна характеристика. Ця характеристика являє собою залежність струму збудження від струму навантаження при постійній частоті обертання $n = const$ і постійній напрузі на виході генератора $U = const$.

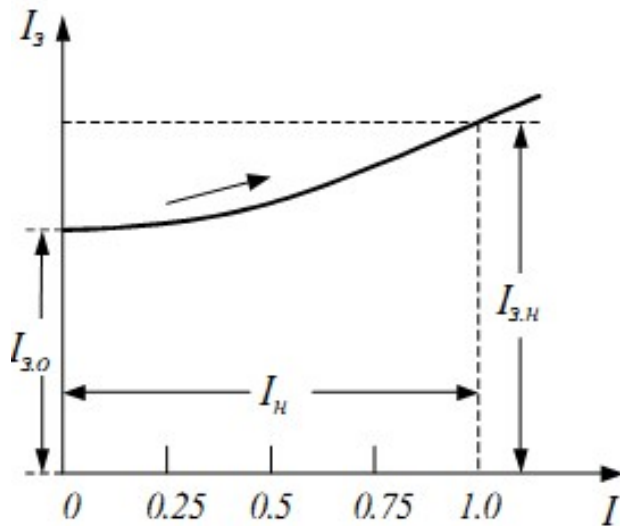
Бажаючи підтримати напругу на затискачах генератора постійною, ми повинні, відповідно до зовнішньої характеристики, зменшувати струм збудження при знятті навантаження і збільшувати його при збільшенні останнього.



Мал. 22.13. Зовнішні характеристики генераторів незалежного (1), паралельного (2), змішаного при узгодженому включенні обмоток (3), змішаного при зустрічному включенні обмоток (4).

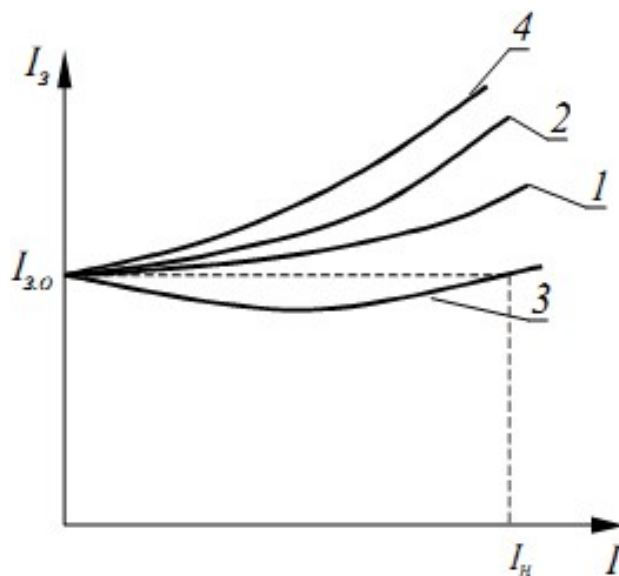
На мал. 22.14 показана регулювальна характеристика генератора незалежного збудження, знята при збільшенні навантаження від нуля до номінального. В цьому випадку зміна струму збудження визначається відношенням:

$$\Delta I_{zn} = (I_{zn} - I_{z0})/I_{z0}.$$



Мал. 22.14. Регулювальна характеристика генератора незалежного збудження.

Згідно приведених на мал. 22.13. характеристик, у генераторів незалежного, паралельного і змішаного збудження при зустрічному включенні обмоток збудження, вихідна напруга зменшується при збільшенні навантаження. Тому, щоб підтримати його на визначеному рівні, у цих генераторів необхідно з ростом навантаження збільшувати струм збудження (мал. 22.15.).



Мал. 22.15. Регулювальні характеристики генераторів: незалежного (1), паралельного (2), змішаного при узгодженому включенні обмоток (3), змішаного при зустрічному включенні обмоток (4).

4 Умови самозбудження генераторів постійного струму

У генераторів паралельного, послідовного і змішаного збудження вихідна напруга утворюється в процесі самозбудження. Процес самозбудження заснований на тому, що в машині практично завжди існує невеликий - порядку 1-3 % від нормального - потік залишкового намагнічування $\Phi_{зал}$. Якщо ми приведемо якір в обертання з якою-небудь, наприклад номінальною, частотою обертання, то під дією цього потоку в обмотці якоря виникає невелика ЕРС і по колу збудження потече невеликий струм, що створить додатковий потік намагнічування Φ_{∂} . Залежно від напрямку струму в обмотці збудження потік Φ_{∂} може бути спрямований зустрічно щодо потоку $\Phi_{зал}$ або узгоджено з ним. Генератор може самозбуджуватися тільки при узгодженому напрямку обох потоків, іншими словами, процес самозбудження генератора може йти тільки в одну сторону, зумовлену напрямком потоку $\Phi_{зал}$.

При узгодженому напрямку потоків результуючий потік машини збільшується, це приводить до збільшення ЕРС, що наводиться в якорі і у свою чергу викликає подальше збільшення струму збудження і потоку машини.

Таким чином, щоб виник процес самозбудження необхідні такі умови:

1. В магнітному колі генератора повинен існувати потік залишкового намагнічування.

2. Обмотка збудження повинна бути включена таким чином, щоб створюваний нею магнітний потік був спрямований узгоджено з потоком залишкового намагнічування.

3. Опір кола збудження повинний бути менше деякого критичного значення

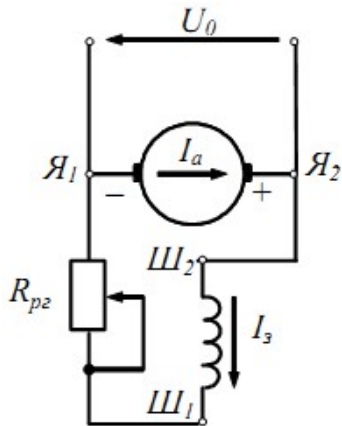
$$R_3 < R_{зкр}.$$

Необхідність виконання останньої умови розглянемо на прикладі генератора паралельного збудження, що працює в режимі холостого ходу (мал. 22.16.).

Коли генератор приводиться в обертання приводним двигуном, починається процес самозбудження. У цьому перехідному процесі для кола збудження справедливе таке рівняння напруг:

$$u_3 = i_3 R_3 + \frac{d(L_3 i_3)}{dt}, \quad (22.5)$$

де u_3 - миттєве значення напруги в колі збудження; i_3 - миттєве значення струму в колі збудження; $R_3 = R_{03} + R_{p2}$ - опір кола збудження; R_{03} - активний опір обмотки збудження; R_{p2} - опір регулювального реостата в колі збудження; L_3 - індуктивність обмотки збудження.



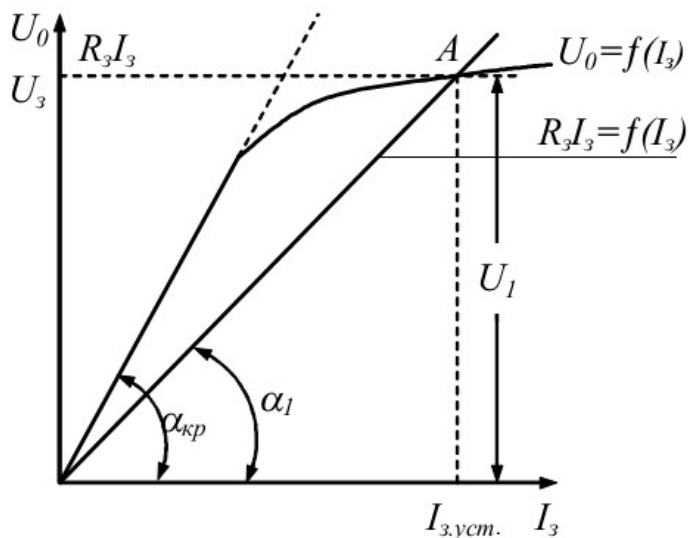
Мал. 22.16. Схема генератора паралельного збудження

Коли процес самозбудження закінчиться, то в усталеному режимі: $u_3 = U_3$, $i_3 = I_3$ - усталене значення напруги і струму в колі збудження.

З огляду на, те що для генератора паралельного збудження $U_3 = U_0$, то усталене значення напруги і струму в колі збудження можна визначити по точці перетину характеристик $U_0 = f(I_3)$ і $I_3 R_3 = f(I_3)$.

Щоб в'яснити до якої межі йде процес самозбудження, припустимо, що коло якоря розімкнуте, тобто $I = 0$, і опір кола збудження, що зумовлений сумою ($R_{03} + R_{p2}$) залишається постійним.

Припустимо далі, що генератор збудився до напруги U_1 , що відповідає на характеристиці холостого ходу точці A (мал. 22.17).



Мал. 22.17 Самозбудження генератора паралельного збудження

Але U_1 буде і напругою на затискачах кола збудження U_3 , тобто:

$$U_1 = U_3 = I_3 R_{o3} + R_{p2}$$

Відповідно до умови маємо:

$$R_{o3} + R_{p2} = \frac{U_3}{I_3} = \operatorname{tg} \alpha_1 = \operatorname{const},$$

тобто опір кола збудження визначається тангенсом кута, утвореного віссю абсцис із прямою, що проходить через початок координат і точку напруги, до якої машина збудилася при холостому ході.

Кут нахилу α характеристики обмотки збудження залежить від опору кола збудження, тобто $\operatorname{tg} \alpha \sim R_3$. Якщо збільшити опір кола збудження, кут α росте, а точка А переміщається до початку координат.

При якомусь $\alpha = \alpha_{кр}$, якому відповідає $R_3 = R_{зкр}$ характеристика обмотки збудження стане дотичною до початкової частини характеристики холостого ходу.

При цьому значенні опору кола збудження процес самозбудження стане неможливим.

Опір кола збудження, при якому машина вже не самозбуджується, називається **критичним опором**.

Так само здійснюється самозбудження і генераторів змішаного збудження, тому що в них головну роль відіграє паралельна обмотка збудження.

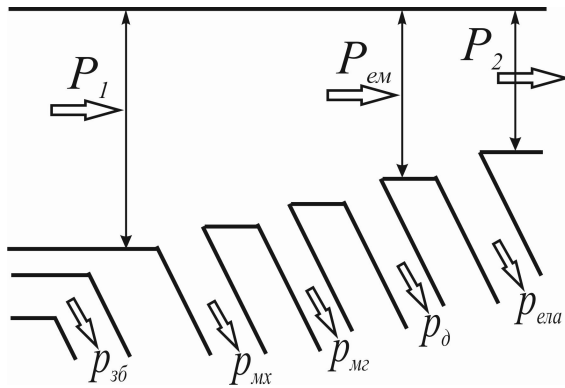
При самозбудженні генератора послідовного збудження зовнішнє коло повинне бути обов'язково замкнутим, тому що в протилежному випадку навантажувальний струм, а отже, і струм збудження будуть дорівнювати нулю.

5. Втрати і коефіцієнт корисної дії генератора постійного струму

У машинах постійного струму, як і в інших електричних машинах, мають місце магнітні, електричні та механічні втрати (що складають групу основних втрат) і додаткові втрати.

Енергетична діаграма генератора незалежного збудження представлена на мал. 9.2. Отримана від первинного двигуна механічна потужність P_1 за вирахуванням втрат механічних $p_{мх}$, магнітних $p_{мг}$ і додаткових p_d перетворюється в якорі в електромагнітну потужність $P_{ем}$. Потужність $P_{ем}$ частково витрачається на

електричні втрати $p_{ела}$ у колі якоря (в обмотках якоря, додаткових полюсів і в компенсаційній і в перехідному опорі щіткового контакту), а інша частина цієї потужності являє собою корисну потужність P_2 , що віддається споживачам. Втрати на збудження $p_{зб}$ в генераторі незалежного збудження покриваються за рахунок стороннього джерела струму.



Енергетична діаграма генератора незалежного збудження

На підставі викладеного для генератора незалежного збудження маємо рівняння потужностей:

$$P_2 = P_1 - p_{мх} - p_{ме} - p_{д} - p_{ела} = P_{ем} - p_{ела}. \quad (9.1)$$

Можна написати також таке рівняння потужностей:

$$P_1 = p_{мх} + p_{ме} + p_{д} + P_{ем}. \quad (9.2)$$

Аналогічні енергетичні діаграми можна побудувати і для інших типів генераторів.

Магнітні втрати $p_{ме}$ відбуваються тільки в осерді якоря, оскільки тільки цей елемент магнітопроводу машини постійного струму піддається перемагнічуванням. Величина магнітних втрат, що складаються із втрат від гістерезису і втрат від вихрових струмів, залежить від частоти перемагнічування $f = pn/60$, значень магнітної індукції в зубцях і спинці якоря, товщини листів електротехнічної сталі, її магнітних властивостей та якості ізоляції цих листів у пакеті якоря. Магнітні втрати від гістерезису прямо пропорційні частоті перемагнічування, а магнітні втрати від вихрових струмів пропорційні квадрату цієї частоти: $\Delta p_{\epsilon} \equiv f$; $\Delta p_{вс} \equiv f^2$.

Електричні втрати в колекторної машині постійного струму зумовлені нагріванням обмоток і щіткового контакту.

Втрати в обмотках кола якоря:

$$p_{елая} = I_a^2 \Sigma r. \quad (29.19)$$

де Σr - опір обмоток в колі якоря.

Електричні втрати також мають місце і в контакті щіток:

$$p_{\text{елашц}} = \Delta U_{\text{щ}} I_a.$$

де $\Delta U_{\text{щ}}$ - перехідне падіння напруги, В, на щітках обох полярностей.

Електричні втрати в колі якоря і в щітковому контакті $p_{\text{ела}} = p_{\text{елая}} + p_{\text{елашц}}$ залежать від навантаження машини, тому ці втрати називають змінними.

Втрати у колі збудження визначаються втратами в обмотці збудження і в реостаті, включеному у коло збудження:

$$p_{\text{зб}} = U_{\text{з}} I_{\text{з}}. \quad (29.18)$$

Тут $U_{\text{з}}$ - напруга на затискачах кола збудження.

Механічні втрати. У машині постійного струму механічні втрати складаються з втрат від тертя щіток об колектор $p_{\text{к}}$, тертя в підшипниках $p_{\text{п}}$ і на вентиляцію $p_{\text{вен}}$

$$p_{\text{мх}} = p_{\text{к}} + p_{\text{п}} + p_{\text{вен}}. \quad (29.22)$$

Механічні та магнітні втрати при усталеній частоті обертання ($n = \text{const}$) можна вважати постійними.

Сума магнітних і механічних втрат становлять втрати ХХ:

$$p_0 = p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}} \quad (29.24)$$

Втрати ХХ, (магнітні і механічні) можуть бути визначені експериментально.

У машинах постійного струму є ряд важко прогнозованих втрат додаткових. Ці втрати складаються із втрат від вихрових струмів в міді обмоток, втрат в зрівняльних з'єднаннях, в сталі якоря через нерівномірний розподіл індукції при навантаженні у полюсних наконечниках, зумовлених пульсацією основного потоку внаслідок зубчатого якоря та ін. Додаткові втрати складають хоча і невелику, але величину що не піддається обліку. Тому відповідно до стандартів, у машинах без компенсаційної обмотки значення додаткових втрат p_0 приймають 1 % від корисної потужності для генератора чи 1 % від потужності, що підводиться до двигуна. У машинах з компенсаційною обмоткою значення p_0 приймають рівним відповідно 0,5%.

Потужність на вході машини постійного струму (підведена потужність):

- для генератора (механічна потужність)

$$P_{1\text{ген}} = M_1 \omega.$$

де M_1 – обертовий момент приводного двигуна.

Потужність на виході машини (корисна потужність):

- для генератора (електрична потужність)

$$P_{2\text{ген}} = UI.$$

Коефіцієнт корисної дії електричної машини являє собою відношення корисної потужності P_2 до підведеної P_1 :

$$\eta = P_2/P_1.$$

Сумарна втрата потужності:

$$\Sigma p = p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{д}} + p_{\text{ела}} + p_{\text{елз}} + p_{\text{елц}}.$$

К. к. д. можна вирахувати:

- для генератора

$$\eta = P_2/P_1 = UI/(UI + \Sigma p).$$

- для двигуна

$$\eta = P_2/P_1 = (UI - \Sigma p)/(UI).$$

Звичайно к. к. д. МПС становить 0,75-0,90 для машин потужністю від 1 до 100 кВт та 0,90-0,97 для машин потужністю понад 100 кВт. К. к. д. набагато менший для МПС малої потужності. Наприклад для машин потужністю від 5 до 50 Вт - 0,15-0,50. Вказані значення к. к. д. відповідають номінальному навантаженню машин. Залежність к. к. д. МПС від навантаження виражається графіком $\eta = f(P_2)$ форма якого характерна для електричних машин.

Рівняння обертових моментів ГПС. Якщо всі члени рівняння:

$$P_1 = p_{\text{мх}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{д}} + P_{\text{ем}}. \quad (9.2)$$

розділити на кутову швидкість обертання:

$$\omega = \pi n/30.$$

то одержимо рівняння обертових моментів для усталеного режиму роботи:

$$M_1 = M_0 + M_{\text{ем}}.$$

Тут:

$$M_1 = P_1/\omega.$$

являє собою прикладений до валу обертовий момент первинного двигуна,

$$M_{\text{ем}} = P_{\text{ем}}/\omega.$$

- електромагнітний момент, що розвиває якір, та

$$M_0 = M_{\text{тр}} + M_{\text{с.д}} = p_{\text{мх}}/\omega + (p_{\text{мг}} + p_{\text{д}})/\omega.$$

- обертовий момент, що відповідає втратам на тертя ($M_{тр}$) і магнітним додатковим втратам ($M_{с.д}$), які долаються за рахунок механічної потужності.

У неусталеному режимі, коли швидкість обертання змінюється, виникає також так динамічний момент обертання:

$$M_{дин} = Jd\omega/dt,$$

де J - момент інерції обертових частин генератора.

Динамічний момент відповідає зміні кінетичної енергії обертових мас. При збільшенні швидкості обертання момент $M_{дин} > 0$ та, як і момент $M_0 + M_{ем}$ є гальмівним. У даному разі кінетична енергія обертових мас збільшується за рахунок роботи первинного двигуна. Якщо момент $M_{дин} < 0$, він діє в напрямку обертання і є рушійним, підтримуючи обертання за рахунок зменшення кінетичної енергії обертових мас.

Таким чином, у загальному випадку, при $n \neq const$,

$$M_I = M_0 + M_{ем} + M_{дин}.$$

Момент:

$$M_{ст} = M_0 + M_{ем},$$

Відповідає статичним силам, називають статичним моментом, тому:

$$M_I = M_{ст} + M_{дин}.$$

6. Паралельна робота генераторів постійного струму

У ряді випадків доцільно жити певну групу споживачів від двох або декількох генераторів постійного струму, які при цьому працюють спільно на загальну мережу. У цьому випадку в періоди малих навантажень можна частину генераторів відключити, чим досягається економія на експлуатаційних витратах. Якщо має бути забезпечене безперебійне живлення споживачів за всіх умов, то потрібно мати резервний генератор. Необхідна потужність резервного генератора при спільній роботі декількох генераторів буде меншою. Можливо також виведення генераторів в плановий або аварійний ремонт без якого-небудь або без серйозного порушення безперебійного забезпечення споживачів електроенергією.

Для спільної роботи використовуються генератори незалежного, паралельного або змішаного збудження. При цьому вони підключаються до мережі паралельно. Послідовне включення генераторів застосовується в рідкісних випадках.

При паралельній роботі генераторів необхідно дотримати такі умови:

1) при включенні генератора на паралельну роботу з іншими не повинно виникати значних поштовхів струму, здатних викликати порушення в роботі генераторів і споживачів;

2) генератори повинні навантажуватися по можливості рівномірно, пропорційно до їх номінальної потужності.

При порушенні останньої умови повне використання потужності всіх генераторів неможливе: коли один генератор навантажується повністю, інші недовантажені, а подальше збільшення загального навантаження неможливе, оскільки окремі генератори будуть перевантажуватися. Окрім того, при нерівномірному навантаженні генераторів сумарні втрати всіх генераторів можуть бути більшими, а загальний к. к. д. - меншим, ніж при рівномірному навантаженні.

Контрольні запитання:

1. Які характеристики визначають властивості генераторів постійного струму?
2. Чому у генератора паралельного збудження зміна напруги при скиданні навантаження більша, ніж у генератора незалежного збудження?
3. Які умови самозбудження генераторів постійного струму?
4. При якому включенні обмоток збудження генератора змішаного збудження зовнішня характеристика виходить більш жорсткою?

Література:

1. Електричні машини. Навчальний посібник/ Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець, В.П. Довгань. - Дніпропетровськ, Видавництво Національного гірничого університету, 2003, - с.
2. Грабко В.В., Розводюк М.П., Грабенко І.В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина І. Машини постійного струму. Навчальний посібник. - Вінниця: ВНТУ, 2005. - 86 с.