

**Змістовий модуль 8. Електричні машини постійного струму.
Тема № 8.1. Генератори постійного струму.**

План лекції

1. Електричні машини.
2. Устрій і принцип роботи генератора постійного струму.
3. ЕРС і обертаючий момент генератора постійного струму.
4. Способи збудження генераторів постійного струму.

1. Електричні машини.

Електричні машини, дія яких заснована на електромагнітних явищах і які служать для перетворення механічної енергії в електричну, називають електромашинними *генераторами*, а перетворювачі електричної енергії в механічну - *електродвигунами*. Застосовують також електричні машини для перетворення електричної енергії одних параметрів в інші, які називають *перетворювачами*. Перетворюватися можуть: рід струму, частота, число фаз і інші параметри електроенергії.

Електричні генератори приводяться в обертання паровими й водяними турбінами, двигунами внутрішнього згорання й ін. Електродвигуни служать для приведення в дію верстатів, різних машин, транспортного встаткування й ін.

Електричні машини мають властивість *оборотності*, тобто можуть працювати генератором, якщо їх обертати яким-небудь двигуном, або якщо підводити до них електроенергію, вони можуть використовуватися як електродвигуни. Однак при проектуванні електромашин ураховують вимоги, пропоновані особливостями їх роботи генератором або електродвигуном.

Електричні машини підрозділяються на машини змінного й постійного струму (мал. 1).

Електричні машини змінного струму розділяють на синхронні, асинхронні, колекторні.

Найбільше застосування мають синхронні генератори змінного трифазного струму й трифазні асинхронні електродвигуни. Колекторні електродвигуни змінного струму мають обмежене застосування внаслідок складності устрою, обслуговування й більш високої вартості. Основною їхньою перевагою є можливість регулювання швидкості обертання в широких межах, що важко в асинхронних двигунах.

Електричні машини постійного струму являють собою комбінацію машин змінного струму з механічним випрямлячем - колектором, що є невід'ємною частиною цих машин. За допомогою колектора змінний струм перетворюється в постійний.



Мал. 1. Класифікація електричних машин.

Електричні машини постійного струму мають обмежену область застосування внаслідок більш високої вартості цих машин і складності їх експлуатації, у порівнянні з машинами змінного струму. Генератори постійного струму застосовують у тих областях техніки, у яких для технологічних цілей необхідний постійний струм: електроліз, електричне зварювання, а також для живлення двигунів постійного струму. Двигуни постійного струму застосовують для підйомних пристроїв, в електричній тязі, для приведення у дію прокатних станів та інших різновидах регульованого електроприводу.

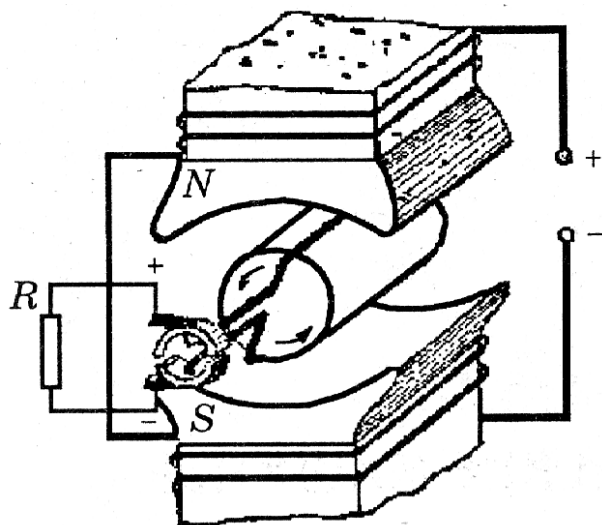
2. Устрій і принцип роботи генератора постійного струму

Принцип роботи генератора постійного струму заснований на виникненні ЕРС у рамці, що обертається в магнітнім полі (мал. 2).

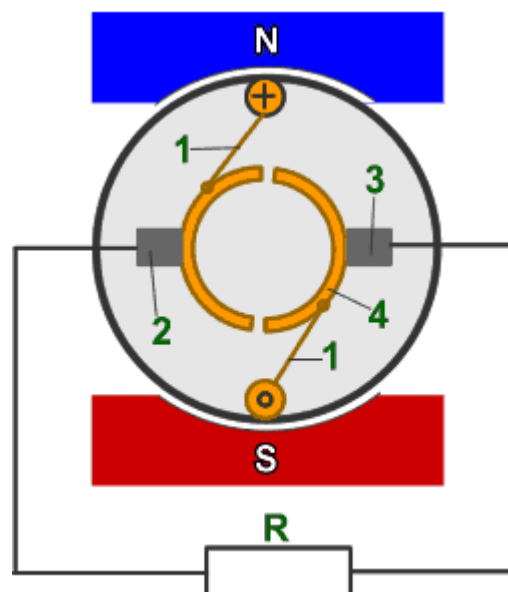
Як відомо, при обертанні рамки індуктована в ній ЕРС буде змінюватися по синусоїді, тобто за один оберт двічі поміняє знак. Щоб струм у зовнішньому ланцюзі мав один напрямок (постійний), застосовують **колектор** (мал. 2) - два півкільця-пластини (4), з'єднаних з кінцями (1) рамки, які через щітки (2, 3) з'єднуються із зовнішнім ланцюгом.

На мал. 2 рамка обертається за стрілкою годинника, і в верхньому проводі струм тече «від нас», в нижньому – «до нас»; тобто знак ЕРС на півкільці верхнього проводу завжди «мінус», на півкільці нижнього – завжди «плюс». На малюнку зображений момент, коли з лівою щіткою 2 контактує півкільце верхнього проводу («мінусове»), а з правою щіткою 3 контактує півкільце

нижнього проводу («плюсове»). Таким чином, на лівій щітці 2 генератора маємо «мінус» ЕРС, а на правій щітці 3 – «плюс» ЕРС.



Мал. 2. Виникнення ЕРС у рамці, що обертається в магнітнім полі



Мал. 3. Устрій колектора

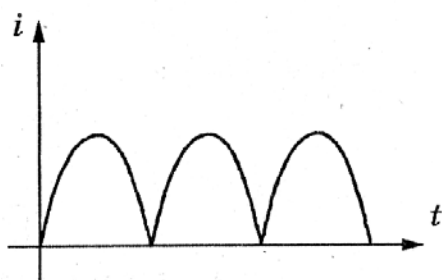
Як тільки рамка повернеться на 180° , проводи рамки поміняються місцями: провід, що був верхнім, стає нижнім і навпаки. Напрями струму в них міняються на протилежні, ЕРС на їх півкільцях міняє знак. Проте разом з проводами рамки, полярністю півкільць міняються місцями і самі півкільця колектора. Таким чином, на нерухомій лівій щітці 2 генератора знову маємо «мінус» ЕРС, а на нерухомій правій щітці 3 – так само «плюс» ЕРС. Отже, напрямок струму в зовнішньому ланцюзі залишиться незмінним, хоча його величина буде змінюватися (пульсувати) (мал. 4).

Якщо помістити на якорі два витки під кутом 90° один до іншого й кінці цих витків з'єднати із чотирма колекторними пластинами, то пульсації ЕРС і струму в зовнішньому ланцюзі значно поменшаться (мал. 5). При збільшенні числа колекторних пластин пульсація швидко зменшується й при великій кількості колекторних пластин ЕРС і струм практично постійні.

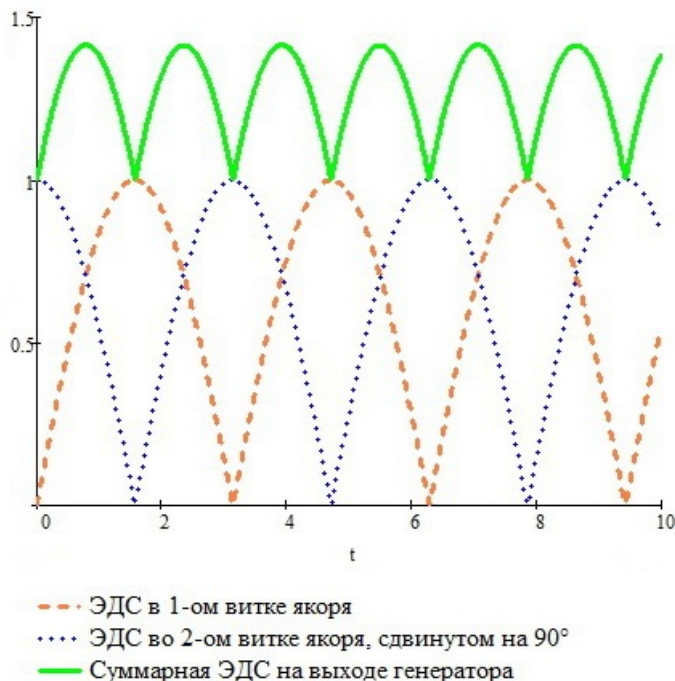
Машина постійного струму складається з нерухливої частини, що служить для збудження головного магнітного поля (*індуктор*), й рухливої, у якій індуктуються ЕРС і струми, що створюють гальмуючий момент у генераторі й обертаючий момент у двигуні (*якір*).

Магнітна система генератора в режимі холостого ходу (без навантаження) складається з магнітного потоку полюсів, який індукує ЕРС в обмотці якоря. Після включення навантаження в обмотці якоря виникає струм, який, як відомо, створює своє обертове магнітне поле. Швидкість обертання цього поля дорівнює швидкості обертання якоря. Отже, повний магнітний потік машини

при навантаженні складається з магнітних потоків індуктора й якоря. Магнітне поле якоря, накладаючись на магнітне поле індуктора, може або послабляти, або підсилювати його. Результат взаємодії цих полів визначається величиною й характером навантаження. Вплив магнітного поля якоря на магнітне поле, створюване індуктором, називається *реакцією якоря*.



Мал. 4. Пульсації
одновиткового якоря



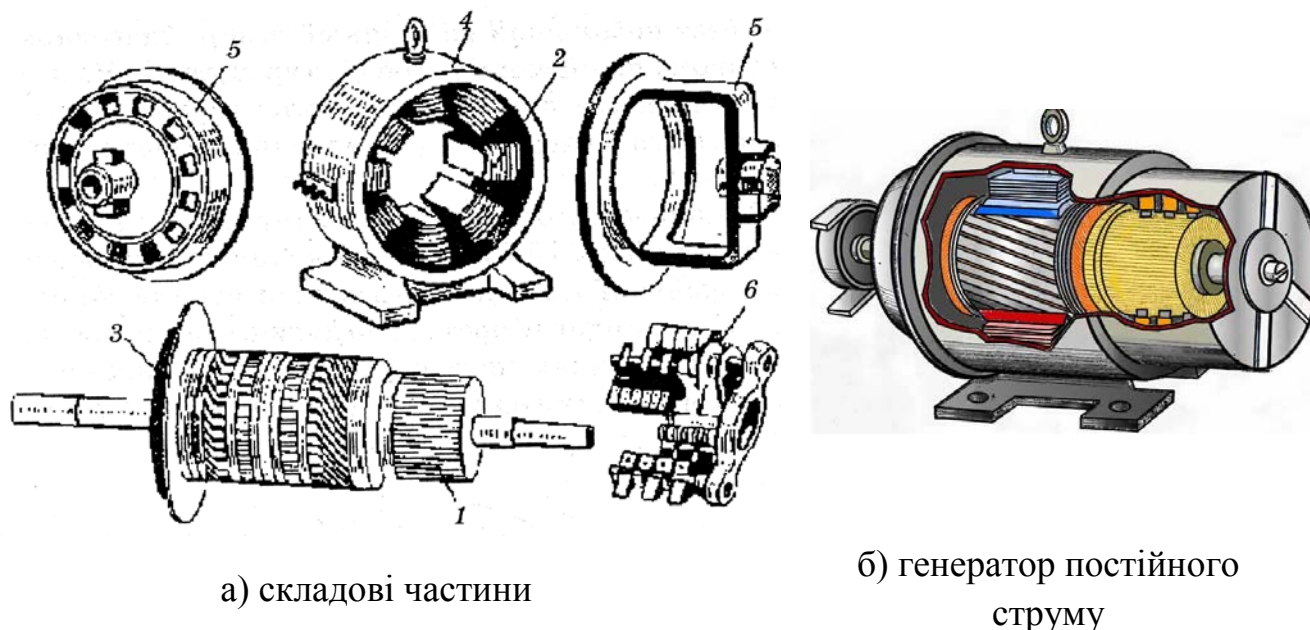
Мал. 5. Пульсації двохвиткового якоря

Явище реакції якоря належить і до двигунів, але оскільки в цих двигунах форма кривої ЕРС несуттєва, то й реакція якоря в них має другорядне значення.

Устрій промислового генератора постійного струму показаний на мал. 6.

Нерухлива частина генератора складається зі станини 4, на якій перебувають головні полюси 2 з обмотками збудження й додаткові полюси з обмотками для компенсації ЕРС самоіндукції й реакції якоря. У більшості випадків електромагніти живляться від самого генератора. У середині станини міститься якір 3, що представляє собою металевий циліндр, набраний зі штапованих, ізолюваних одна від одної пластин електротехнічної сталі. У поздовжніх пазах на поверхні якоря розміщена обмотка, що полягає із з'єднаних між собою секцій. Для згладжування пульсацій ЕРС і струму обмотка якоря рівномірно розподілена по всій поверхні. Виводи секцій приєднані до ізолюваних одна від одної й від корпусу машини мідним пластинам колектора 1, причому кінець однієї секції й початок наступної приєднують до однієї і тієї ж пластини. Колектор жорстко укріплений на валу якоря, де кріпиться й вентилятор 3. Вал якоря розміщується в підшипники підшипникових щитів 5, що укріплюються на бічних сторонах станини. Між якорем і полюсами є

невеликий повітряний зазор, завдяки якому якір може вільно обертатися. На циліндричну поверхню колектора накладаються вугільні щітки, вставлені в щіткотримачі 6.



Мал. 6. Устрій генератора постійного струму.

Як і всі електричні машини, машини постійного струму оборотні. Машина працює в режимі генератора, якщо її обертає той або інший первинний двигун, головне магнітне поле порушене, а ланцюг якоря замкнений через щітки на навантаження. У цьому випадку в обмотці якоря індуктується ЕРС, яка через колектор і щітки подає струм у навантаження. У самій машині взаємодія струму якоря з головним магнітним полем створює гальмуючий момент, який повинен долати первинний двигун. Машина перетворює механічну енергію в електричну.

Якщо ланцюги якоря й збудження машини приєднані до джерела електроенергії, то в них виникають струми, взаємодія яких створює обертаючий момент. Під дією цього моменту якір починає обертатися, і машина працює в режимі двигуна, перетворюючи електричну енергію в механічну. Таким чином, та сама машина може бути використана в якості генератора й двигуна.

3. ЕРС і обертаючий момент генератора постійного струму

З'ясуємо, як залежить ЕРС генератора постійного струму від параметрів машини, швидкості обертання якоря й магнітного потоку.

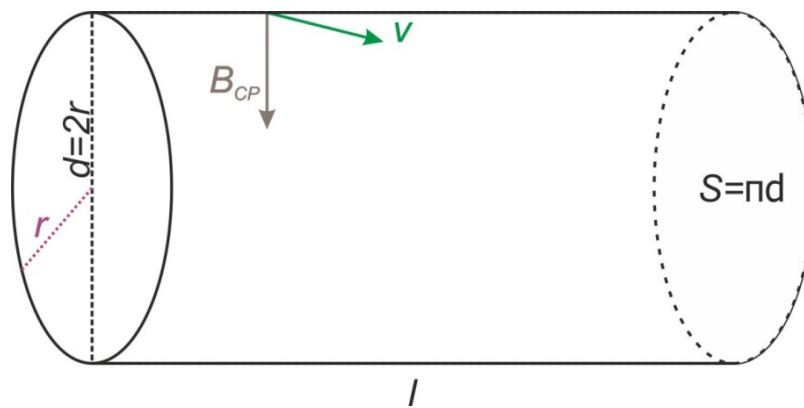
При рівномірній переміщенні провідника довжиною l зі швидкістю v в магнітнім полі з індукцією B (швидкість перпендикулярна вектору індукції), у ньому за законом електромагнітної індукції виникне ЕРС e :

$$E = \left| -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \right| = \left| -\frac{B\Delta S}{\Delta t} \right| = \frac{Bl\Delta x}{\Delta t} = Blv. \quad (1)$$

Розглянемо рух провідника обмотки якоря в магнітнім полі під полюсом. Щоб визначити середнє значення ЕРС у цьому провіднику, уведемо поняття середньої індукції.

Нехай Φ - магнітний потік головного полюса, тоді при $2p$ полюсах загальний магнітний потік дорівнює $2p\Phi$.

Допустимо, що індукція рівномірно розподілена по всьому повітряному зазору обсягом V (мал.6).



Мал. 6. Циліндр, утворений якорем при обертанні

Тоді її середнє значення

$$B_{CP} = \frac{2p\Phi}{V} = \frac{2p\Phi}{Sl} = \frac{2p\Phi}{\pi dl}, \quad (2)$$

де S - площа поверхні якоря;
 d - діаметр якоря;
 l - довжина утворюючої циліндра якоря.

Припускаючи, що вектор середньої магнітної індукції скрізь спрямований по радіусу якоря, тобто перпендикулярно швидкості, ми одержимо для середньої ЕДС в одному провіднику обмотки якоря

$$E_{CP} = B_{CP}lv \quad (3)$$

де v — лінійна швидкість обертання провідника обмотки якоря.

Враховуючи, що швидкість обертання провідника обмотки якоря $v = \omega r = 2\pi \frac{n}{60} \frac{d}{2} = \pi \frac{n}{60} d$ (ω і n - кутова швидкість (рад/с) і частота обертання (об/хв) якоря відповідно), і підставляючи в (3) значення середньої індукції (2), одержимо

$$E_{CP} = \frac{2p\Phi}{\pi dl} lv = \frac{2p\Phi}{\pi dl} l\pi \frac{n}{60} d = 2p \frac{n}{60} \Phi. \quad (4)$$

Обмотка якоря складається з N активних провідників. Щітки ділять цю обмотку на $2a$ паралельних гілок. Таким чином, у межах кожної паралельної гілки послідовно з'єднуються $\frac{N}{2a}$ активних провідників. Оскільки ЕРС генератора E дорівнює ЕРС паралельних гілок, то для неї можна записати наступне вираження:

$$E = E_{CP} \frac{N}{2a}. \quad (5)$$

Підставляючи в (5) вираження для середньої ЕРС (4), одержимо

$$E = 2p \frac{n}{60} \Phi \frac{N}{2a} = \frac{pN}{60a} n\Phi = c_E n\Phi. \quad (6)$$

де $c_E = \frac{pN}{60a}$ - постійна, що залежить тільки від параметрів машини.

Таким чином, ми бачимо, що ЕРС генератора постійного струму пропорційна значенню магнітного потоку машини Φ й швидкості обертання якоря n . Отже, для підтримки постійної напруги на затискачах генератора можна змінювати або магнітний потік, або швидкість обертання якоря (або й те й інше). Звичайно якір генератора приводять в обертання двигуном, що працює при певній швидкості обертання, а магнітний потік змінюють шляхом зміни струму в обмотці збудження.

Обчислимо потужність генератора постійного струму:

$$P = \frac{A}{t} \quad (7)$$

причому роботою A слід уважати механічну роботу, затрачувану на подолання гальмового моменту, що розвивається якорем. У формулі (7) потужність можна виразити через лінійну швидкість обертання якоря:

$$P = \frac{FS}{t} = Fv, \quad (8)$$

де F - сила, що діє на якір;

v - лінійна швидкість точки на поверхні якоря.

Як ми вже бачили, лінійна швидкість провідника на поверхні якоря

$$v = \pi \frac{n}{60} d,$$

де n - частота обертання якоря; d - діаметр якоря.

Підставляючи вираження для швидкості в (8), одержимо

$$P = F\pi \frac{n}{60} d. \quad (9)$$

На кожний провідник обмотки якоря зі струмом I_1 діє за законом Ампера сила $F_1 = I_1 B_{cp} l$, а на N провідників обмотки з урахуванням формули (2) буде діяти сила

$$F = NI_1 B_{cp} l = N \frac{I}{2a} \frac{2p\Phi}{\pi dl} l = \frac{pN}{\pi da} \Phi I \quad (10)$$

Підставляючи співвідношення (10) в (9) і враховуючи формулу (6), одержимо:

$$P = F\pi \frac{n}{60} d = \frac{pN}{\pi da} \Phi I \pi \frac{n}{60} d = \frac{pN}{60a} n \Phi I = EI. \quad (11)$$

Обертаючий момент машини можна записати у вигляді

$$M = Fr = F \frac{d}{2} = \frac{pN}{\pi da} \Phi I \frac{d}{2} = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I = c_M \Phi I, \quad (12)$$

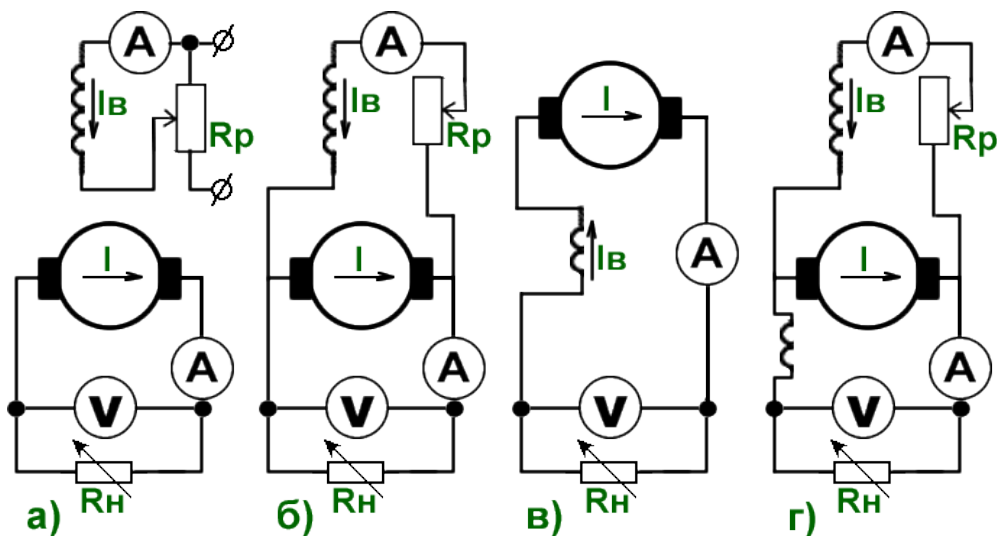
де $c_M = \frac{pN}{2\pi a}$ - постійний коефіцієнт, що враховує особливості конструкції машини.

4. Способи збудження генераторів постійного струму

Збудженням генератора називається створення головного магнітного потоку, завдяки якому в обертовому якорі створюється ЕРС. Найважливішою відмінною ознакою машин постійного струму є спосіб збудження головного магнітного поля. Практично у всіх сучасних машинах головне магнітне поле збуджується електромагнітним шляхом, для чого по обмотці збудження, розміщеній на сердечниках полюсів машини, пропускається струм. Усі робочі характеристики машини постійного струму при роботі як у режимі генератора, так і двигуна залежать від способу включення ланцюгу збудження стосовно ланцюга якоря. З'єднання цих ланцюгів може бути паралельним, послідовним, змішаним і, нарешті, ланцюги можуть бути незалежні один від одного. При будь-якому способі включення потужність, споживана ланцюгом збудження, невелика й становить кілька відсотків від номінальної потужності машини.

Таблиця 1. Умовні графічні позначення машин постійного струму

Машина постійного струму з послідовним збудженням		Машина постійного струму з паралельним збудженням	
Машина постійного струму з незалежним збудженням		Машина постійного струму зі змішаним збудженням	

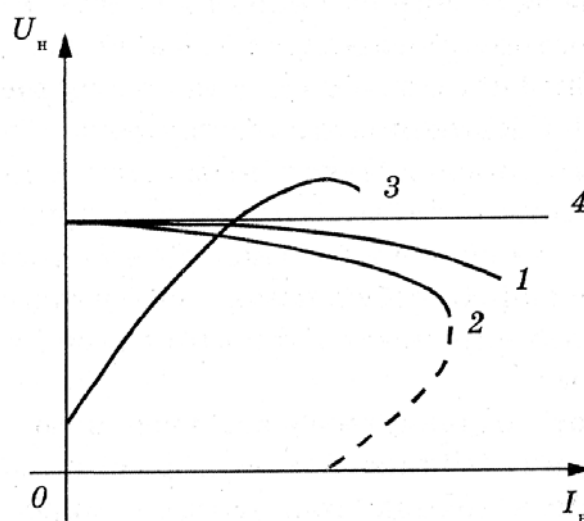


Мал. 7. Способи збудження генераторів постійного струму

Генератор з незалежним збудженням. Обмотка збудження такого генератора підключена до стороннього джерела струму через регулювальний реостат (мал. 7, а).

При збільшенні струму навантаження напруга на затискачах цього генератора трохи зменшується через спадання напруги на обмотці якоря й у результаті дії реакції якоря, яка зменшує магнітний потік машини. Для підтримки постійної напруги на затискачах генератора змінюють струм збудження за допомогою регулювального реостата. Зовнішня характеристика цього генератора (залежність напруги на затискачах від струму навантаження $U_H = f(I_H)$) показана на мал. 8 (крива 1).

Генератор з паралельним збудженням - генератор із *самозбудженням*: обмотку збудження такого генератора підключають через регулювальний реостат паралельно обмотці якоря (мал. 7, б). При збільшенні струму навантаження напруга на затискачах генератора з паралельним збудженням зменшується через спадання напруги на обмотці якоря, що, у свою чергу викликає зменшення струму збудження й ЕДС у якорі. Тому при збільшенні струму навантаження напруга на затискачах генератора з паралельним збудженням зменшується швидше, чим у генератора з незалежним збудженням. Подальше збільшення струму навантаження приводить до такого сильного зменшення струму збудження, що при короткій замиканні ланцюга навантаження напруга генератора падає до нуля. *Тому коротке замикання генератора з паралельним збудженням не є небезпечним.* Зовнішня характеристика цього генератора показана на мал. 8 (крива 2).



Мал. 8. Зовнішні характеристики ГПТ.

Генератор з послідовним збудженням - генератор із самозбудженням, але його обмотка збудження ОВ включена послідовно з якорем (мал. 7, в) і по обом обмоткам протікає однаковий струм. При відсутності навантаження (зовнішній ланцюг розімкнутий) у якорі все-таки збуджується невелика ЕРС внаслідок залишкової індукції сталевого сердечника статора. При збільшенні струму навантаження напруга на затискачах генератора спочатку росте доти, поки не настане насичення магнітної системи машини, після чого починає швидко зменшуватися через спадання напруги на опорі якоря й внаслідок дії, що розмагнічує, реакції якоря (крива 3 на мал. 8). *Через сильну залежність напруги на затискачах генератора від навантаження генератори з послідовним збудженням застосовуються дуже рідко.*

Генератор зі змішаним збудженням ставиться до генераторів із **самозбудженням**, але має дві обмотки збудження: перша включається паралельно якорю, і друга послідовно з якорем (мал. 7, г). Обмотки включають так, щоб вони створювали магнітні потоки одного напрямку, а число витків в обмотках вибирають таким, щоб спадання напруги на внутрішньому опорі генератора й ЕРС реакції якоря були б скомпенсовані ЕРС від потоку паралельної обмотки. Завдяки цьому напруга на затискачах генератора зі змішаним збудженням залишається практично постійною при змінах навантаження в певних межах (крива 4 на мал. 8).

Незалежно від способу збудження для генератора постійного струму:

- напруга на виводах генератора $U = E - I_{\text{я}}R_{\text{я}}$;
- корисна (що віддається) потужність $P_2 = UI$;
- електромагнітна потужність $P_{\text{EM}} = EI_{\text{я}}$.

Питання для самоконтролю

1. Наведіть класифікацію електричних машин то сферу їх застосування.
2. Що таке оборотність машин постійного струму?
3. Викладіть принцип роботи генератора постійного струму.
4. Опишіть устрій промислового генератора постійного струму.
5. Від чого залежить ЕРС генератора постійного струму? Наведіть формулу.
6. Від чого залежить потужність генератора постійного струму? Наведіть формулу.
7. Від чого обертаючий момент генератора постійного струму? Наведіть формулу.
8. Перелічіть способи збудження генераторів постійного струму й зобразите відповідні схеми їх включення.

9. Чому коротке замикання генератора з паралельним збудженням не є небезпечним?
10. Чому генератори з послідовним збудженням застосовуються дуже рідко?

Список літератури

1. Данилов И.А., Иванов П.М. Общая электротехника с основами электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. техникумов. – М.: Высш. шк., 2005. – §§ 9.1 – 9.8 (с. 239 – 269).
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника с основами электроники: учеб. пособие. – 15-е изд., стереотипное – Ростов н/Д: Феникс, 2013. – §§10.1 – 10.4 (с. 240 – 251).
3. Славинский А.К., Туревский И.С. Электротехника с основами электроники: учебное пособие. – М.: ИД «ФОРУМ»: ИНФРА-М, 2009. – глава 9, §§ 9.1 – 9.2 (с. 232 – 244).