

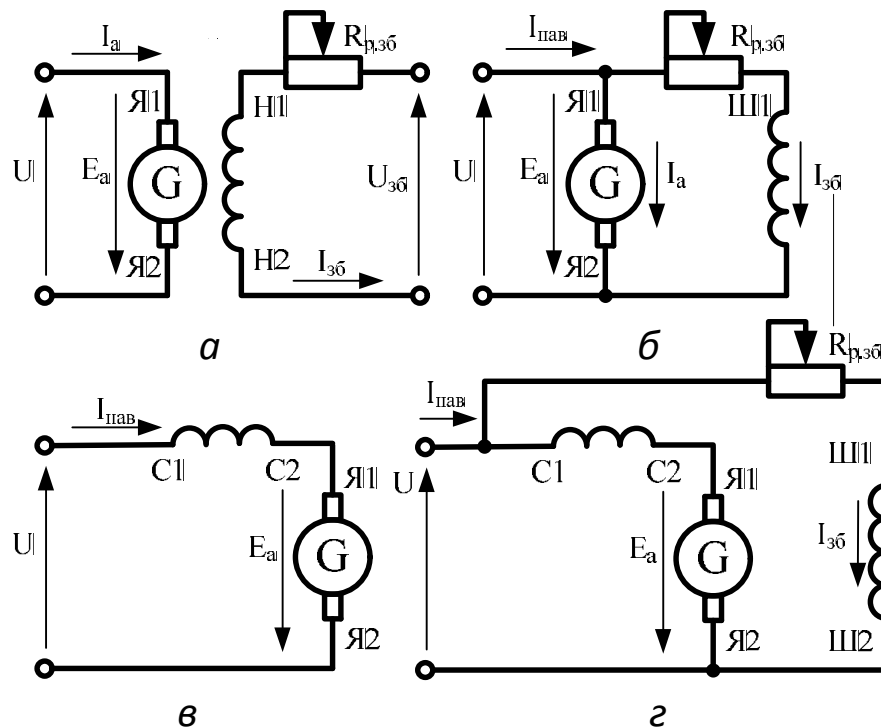
## ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

### План лекції:

1. Системи збудження генераторів постійного струму.
2. Основні поняття та рівняння генераторів постійного струму.
3. Характеристики ГПС.
4. ГПС незалежного збудження.
5. ГПС паралельного збудження.
6. ГПС послідовного збудження.
7. ГПС змішаного збудження.

### 1 Системи збудження генераторів постійного струму

Як і всі електричні машини, ГПС класифікуються за номінальною потужністю, напругою, частотою обертання, тощо. Однак найважливішим є їх поділ за способом збудження (рисунок 4.1), що визначає їх характеристики та властивості.



Я1-Я2 - обмотка якоря; Н1-Н2 - обмотка незалежного збудження; Ш1-Ш2 - обмотка паралельного збудження; С1-С2 – обмотка послідовного збудження.

Рисунок 4.1 – Схема генератора постійного струму незалежного (а), паралельного (б), послідовного (в) і змішаного збудження (г)

**За способом живлення обмотки збудження розрізняють наступні типи генераторів постійного струму:**

- з **незалежним збудженням** - обмотка збудження отримує живлення від стороннього джерела постійного струму (рисунки 4.1, а);
- з **паралельним збудженням** - обмотка збудження (шунтова обмотка) підключена до обмотки якоря паралельно навантаженню (рисунки 4.1, б);
- з **послідовним збудженням** - обмотка збудження (серієсна обмотка) підключена послідовно з обмоткою якоря і навантаженням (рисунки 4.1, в);
- з **зі змішаним збудженням** - використовуються дві обмотки збудження: одна підключається паралельно навантаженню (шунтова обмотка), друга (серієсна обмотка) послідовно з навантаженням (рисунки 4.1, г).

Генератори різних типів збудження (рисунки 4.1) мають однакову будову і відрізняються лише виконанням обмотки збудження.

Обмотки незалежного і паралельного збудження виготовляються з великою кількістю витків з обмотувального проводу відносно малого перерізу, обмотки послідовного збудження виготовляються з невеликої кількості витків з обмотувального проводу відносно великого перерізу.

Генератори малої потужності іноді виготовляються з **постійними магнітами**. Характеристики таких генераторів наближені до характеристик генераторів з **незалежним збудженням**.

ГПС паралельного збудження (рисунки 4.1, б), послідовного збудження (рисунки 4.1, в) та змішаного збудження (рисунки 4.1, г) називають генераторами із самозбудженням.

## **2 Основні поняття та рівняння генераторів постійного струму**

**Рівняння струмів.** У генератора паралельного збудження (рисунки 4.1, б) обмотка збудження виконується з мідного обмотувального проводу, відносно невеликого перерізу, має значну кількість витків, її струм, у порівнянні з номінальним, досить малий і складає (1-6) % від нього. Струм, що виникає в обмотці якоря  $I_a$ , розгалужується на два струми:  $I_{нав}$  – струм навантаження та  $I_z$  – струм обмотки збудження

$$I_a = I_{нав} + I_z, \quad (4.1)$$

У генераторів послідовного збудження (рисунок 4.1, в) обмотка збудження вмикається послідовно з обмоткою якоря і навантаженням, тому їх струми рівні

$$I_a = I_{нав} = I_{зб}, \quad (4.2)$$

а це змушує виконувати обмотку провідниками відносно великого перерізу з невеликою кількістю витків.

Генератор змішаного збудження (рисунок 4.1, г) має на полюсах по дві обмотки. Одна з них, з великою кількістю витків, виконана з провідників незначного перерізу, вмикається паралельно з обмоткою якоря, а друга, з малим числом витків із провідників великого перерізу, послідовно. Струм якоря в такого генератора складає

$$I_a = I_{нав} + I_{зб.пар}, \quad (4.3)$$

де  $I_{зб.пар}$  – струм паралельної обмотки збудження, А.

У генераторів незалежного збудження (рисунок 4.1, а) та у генераторів із постійними магнітами струм якоря не розгалужується і рівний струму навантаження

$$I_a = I_{нав}, \quad (4.4)$$

а струм обмотки збудження визначається за законом Ома

$$I_{зб} = U_{зб} / R_{зб}, \quad (4.5)$$

де  $U_{зб}$  – напруга незалежного джерела збудження, В.

**Рівняння ЕРС.** Рівняння (4.1) та (4.3) слід розглядати як рівняння струмів, складені за **першим законом (правилом) Кірхгофа** для генераторів різних способів збудження.

Рівняння ЕРС справедливе для всіх генераторів, незалежно від способу збудження. Це рівняння складається на основі **другого закону (правила) Кірхгофа** для контуру генератора, до якого входить обмотка якоря та навантаження.

Як уже відмічалось раніше, в процесі роботи генератора постійного струму в обмотці якоря індукуються ЕРС  $E_a$ . При підключенні до генератора навантаження в колі якоря виникає струм  $I$ .

ЕРС  $E_a$ , що створюється в якорі, урівноважується падінням напруги на опорі елементів, ввімкнених послідовно з обмоткою якоря, та на опорі навантаження

$$E_a = I_a \cdot \Sigma R + I_{нав} \cdot R_{нав} \quad (4.6)$$

Напруга на виводах генератора

$$U = E_a - I_a \Sigma R_i \quad (4.7)$$

Сумарний опір кола якоря генератора включає

$$\Sigma R_i = R_a + R_{дн} + R_{ко} + R_c + R_{щ}, \quad (4.8)$$

де  $R_a$  – опір обмотки якоря;

$R_{дн}$  – опір обмотки додаткових полюсів;

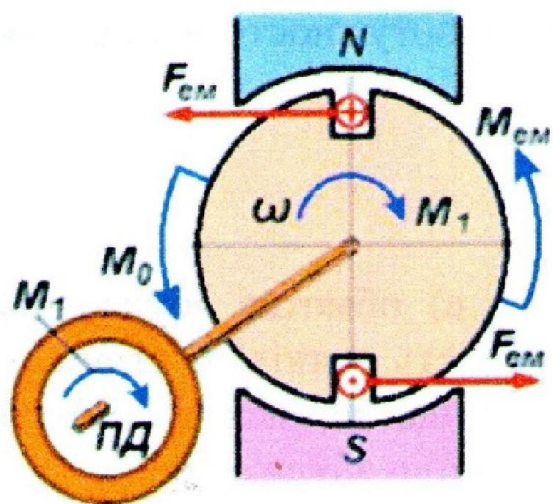
$R_{ко}$  – опір компенсаційної обмотки;

$R_c$  – опір послідовної (серієсної) обмотки збудження;

$R_{щ}$  – опір щіткового контакту.

При відсутності в машині будь-якої із зазначених обмоток до виразу (4.8) не входять відповідні складові.

**Рівняння моментів.** Суттєве значення при вивченні ГПС має рівняння рівноваги моментів, що діють у генераторі (рисунок 4.2).



**Рисунок 4.2** – Моменти, що діють на ротор генератора

Якір генератора обертається приводним двигуном, який створює на валу генератора **обертаючий момент  $M_1$** . Якщо генератор працює в режимі неробочого ходу (н.х.) ( $I_a = 0$ ), то для обертання його якоря потрібний порівняно невеликий **момент неробочого ходу  $M_0$** . Цей момент обумовлений **гальмівними моментами**, що виникають у генераторі при його роботі в режимі н.х. – **моментами від сил тертя і вихрових струмів у якорі**.

При роботі **навантаженого генератора** в проводах обмотки якоря з'являється струм, який, взаємодіючи з магнітним полем збудження, створює на якорі **електромагнітний момент  $M_{ем}$** . У генера-

торі цей момент спрямований зустрічно обертаючому моменту приводного двигуна, тобто він є **навантажувальним (гальмівним)**.

При незмінній частоті обертання ( $n = const$ ) обертаючий момент приводного двигуна  $M_1$  врівноважується сумою протидіючих моментів: **моментом н.х.  $M_0$  і електромагнітним моментом  $M_{em}$** , тобто

$$M_1 = M_0 + M. \quad (4.9)$$

Вираз (4.9) – це рівняння моментів для генератора при  $n = const$ . Помноживши члени рівняння (4.9) на кутову швидкість обертання якоря  $\omega$ , одержимо рівняння рівноваги потужностей

$$P_1 = P_0 + P_{em}, \quad (4.10)$$

де  $P_1 = M_1 \cdot \omega$  – **механічна потужність**, спрямована від приводного двигуна до генератора;

$P_0 = M_0 \cdot \omega$  – **потужність н.х.**, тобто потужність, спрямована до генератора в режимі н.х. (без навантаження);

$P_{em} = M \cdot \omega$  – **електромагнітна потужність** генератора.

Електромагнітна потужність

$$P_{em} = E_a I_a, \quad (4.11)$$

або з урахуванням (4.7)

$$P_{em} = UI_a + I_a^2 \sum R_i = P_2 + P_{e.a}, \quad (4.12)$$

де  $P_2$  – **корисна потужність генератора (електрична)**, тобто потужність, що віддається генератором навантаженню;

$P_{e.a}$  – **потужність втрат на нагрівання обмоток і щіткового контакту в колі якоря**.

З урахуванням електричних втрат на збудження генератора  $P_{e.зб}$ , отримуємо рівняння потужностей для генератора постійного струму (4.10) в наступному вигляді

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{e.a} + P_{e.зб}. \quad (4.13)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном  $P_1$ , перетворюється в генераторі на **корисну електричну по-**

тужність  $P_2$ , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на покриття втрат ( $P_0 + P_{e.a} + P_{e.зб}$ ).

Енергетичну діаграму генератора незалежного збудження можна представити у наступному вигляді (рисунок 4.3).

Отримана від первинного двигуна механічна потужність  $P_1$ , за вирахуванням втрат механічних  $P_{мех}$ , магнітних  $P_{маг}$  та додаткових  $P_{дод}$  перетворюється в якорі в електромагнітну потужність  $P_{ем}$ .

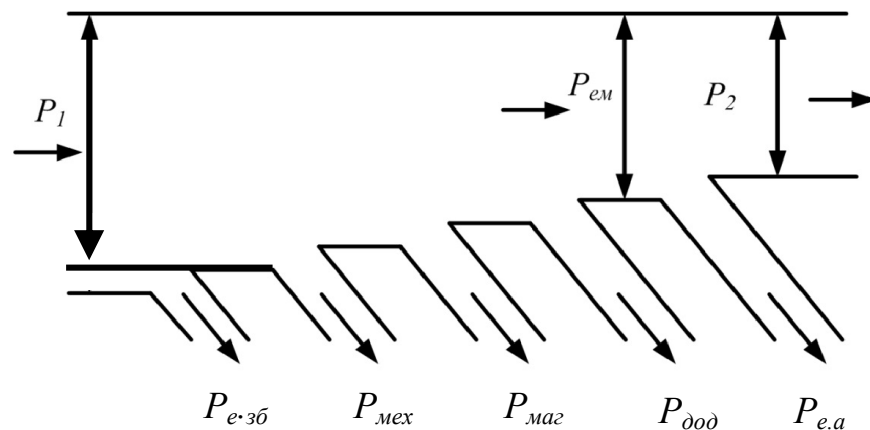


Рисунок 4.3 – Енергетична діаграма ГПС незалежного збудження

Електромагнітна потужність  $P_{ем}$  частково витрачається на електричні втрати в колі якоря  $P_{e.a}$  (в обмотках якоря, додаткових полюсів та в компенсаційній і в перехідному опорі щіткового контакту), а решта цієї потужності є корисна потужність  $P_2$ , яку генератор віддає споживачам. Втрати на збудження в генераторі незалежного збудження покриваються за рахунок стороннього джерела струму.

Рівняння потужностей для генератора постійного струму з незалежним збудженням

$$P_1 = P_2 + P_0 + P_{e.a} \quad P_1 = P_2 + (P_{мех} + P_{маг} + P_{дод}) + P_{e.a}. \quad (4.14)$$

Отже, механічна потужність, що розвивається приводним двигуном  $P_1$ , перетворюється в генераторі в корисну електричну потужність  $P_2$ , що передається навантаженню, і потужність, що витрачається на покриття втрат ( $\Sigma P = P_{мех} + P_{маг} + P_{дод} + P_{e.a}$ ).

Вираз (4.14) можна представити як

$$P_1 = P_2 + \Sigma P. \quad (4.15)$$

Відношення корисної та підведеної до генератора потужності представляє собою коефіцієнт корисної дії (ККД) генератора  $\eta$

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI_a}{UI_a + \Sigma P} = 1 - \frac{\Sigma P}{UI_a + \Sigma P}. \quad (4.16)$$

Зазвичай ККД машин постійного струму складає 0,75-0,90 для машин потужністю від 1 до 100 кВт і 0,90-0,97 для машин потужністю від 100 кВт і більше.

### 3 Характеристики ГПС

Спосіб збудження генераторів визначає їх властивості, які простіше всього виражаються графічним шляхом, тобто у вигляді кривих, так званих, **характеристик генераторів**.

Звичайно розглядається залежність якої-небудь однієї величини, що характеризує роботу генератора, від другої, при незмінних інших величинах.

У зв'язку із тим, що генератори зазвичай працюють при незмінній частоті обертання, то їх характеристики розглядають за умови  $n = const$ .

До основних характеристик ГПС відносяться:

- **характеристика неробочого ходу** – залежність напруги на виході генератора в режимі н.х.  $U_0$  від струму збудження  $I_{зб}$

$$U_0 = f(I_{зб}) \text{ при } I_{нав} = 0 \text{ і } n = const ;$$

- **навантажувальна характеристика** – залежність напруги на виході генератора  $U$  при роботі з навантаженням від струму збудження  $I_{зб}$

$$U = f(I_{зб}) \text{ при } I_{нав} \neq 0 = const \text{ і } n = const ;$$

- **зовнішня характеристика** – залежність напруги на виході генератора  $U$  від струму навантаження  $I_{нав}$

$$U = f(I_{нав}) \text{ при } R_{р.зб} = const \text{ і } n = const ,$$

де  $R_{рзб}$  – регулювальний опір у колі обмотки збудження;

- **регулювальна характеристика** – залежність струму збудження  $I_{зб}$  від струму навантаження  $I_{нав}$  при незмінній напрузі на виході генератора

$$I_{зб} = f(I_{нав}) \text{ при } U = const \text{ і } n = const .$$

Вид перерахованих характеристик визначає робочі властивості і якості генераторів постійного струму.

## 4 ГПС незалежного збудження

Схема включення генератора незалежного збудження наведена на рисунку 4.1, а. Реостат  $R_{p.зб}$ , включений в коло збудження, дає можливість регулювати струм  $I_{зб}$  в обмотці збудження, а отже, і основний магнітний потік машини. Обмотка збудження живиться від джерела енергії постійного струму: акумулятора, випрямляча або ж іншого генератора постійного струму, який в цьому випадку називається збуджувачем.

**Характеристика неробочого (холостого) ходу (н.х.).** При знятті характеристики  $U_0 = f(I_{зб})$  генератор працює в режимі н.х. ( $I_a = 0$ ). Установивши номінальну частоту обертання і підтримуючи її незмінної, поступово збільшують струм в обмотці збудження  $I_{зб}$  від нульового значення до  $+I_{зб}$ , при якому напруга н.х. складає  $U_0 = 1,15 \dots 1,25U_{ном}$ . Одержують дані для побудови кривої 1 (рисунок 4.4).

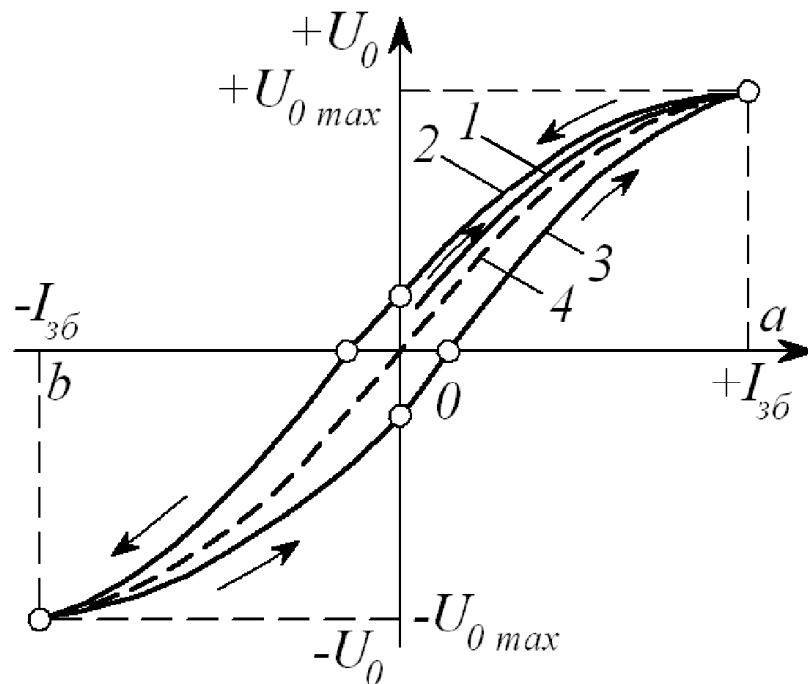


Рисунок 4.4 – Характеристики холостого ходу генератора постійного струму незалежного збудження

Початкова ордината **кривої 1** ( $U_0$ ) не дорівнює нулю, що пояснюється дією невеликого магнітного потоку залишкового магнетизму, що зберігся від попереднього намагнічування машини. Зменшивши струм збудження до нуля, і змінивши його напрямок, поступово доводять струм у колі збудження до  $-I_{зб}$ . Отримана в такий спосіб **крива 2** називається



спадною гілкою характеристики. У першому квадранті **крива 2** розташовується вище **кривої 1**. Пояснюється це тим, що в процесі зняття **кривої 1** відбулося збільшення магнітного потоку залишкового магнетизму. Далі дослід проводять у зворотному напрямку, тобто змінюють струм збудження від  $-I_{зб}$  до  $I_{зб} = 0$ , а потім збільшують його до значення  $+I_{зб}$ . В результаті одержують **криву 3**, яка називається висхідною гілкою характеристики н.х. Спадна і висхідна гілки характеристики н.х. утворять петлю намагнічування (гистерезису). Провівши між **кривими 2 і 3** середню лінію **4**, отримаємо **розрахункову характеристику н.х.**

Прямолінійна частина характеристики н.х. відповідає ненасиченій магнітній системі машини. При подальшому збільшенні струму магнітна система машини насичується і характеристика приймає криволінійний характер.

**Практичне значення** характеристики н.х. полягає в тому, що по ній можна робити висновки про ступінь насиченості магнітного кола машини. Крім цього вона використовується також при побудові інших характеристик.

**Навантажувальна характеристика генератора.** Ця характеристика виражає залежність напруги  $U$  на виході генератора від струму збудження  $I_{зб}$  при незмінному струмі навантаження  $I_{нав}$ , наприклад номінальному, і при незмінній частоті обертання.

При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС, тому навантажувальна характеристика **1** розташовується нижче характеристики холостого ходу **2** (рисунок 4.5).

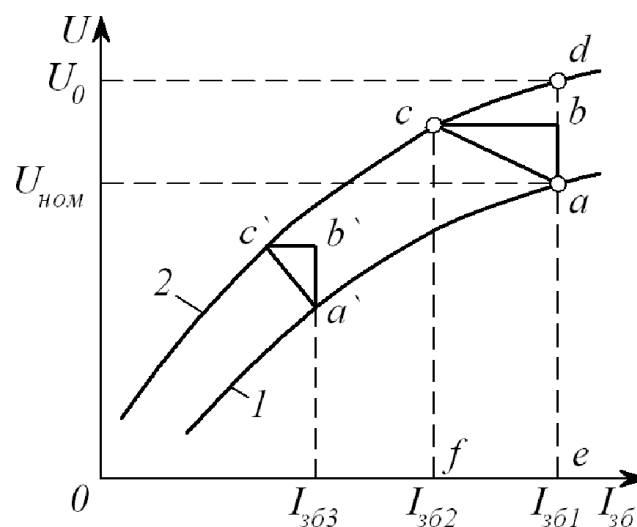


Рисунок 4.5 – Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження

Якщо із точки  $a$ , що відповідає номінальній напрузі  $U_{ном}$ , відкласти вгору відрізок  $ab$ , який дорівнює  $I_a \sum R$ , і провести горизонтально відрізок  $bc$  до перетинання з характеристикою н.х., а потім з'єднати точки  $a$  і  $c$ , то одержимо  $abc$  – трикутник реактивний (характеристичний).

Так, при роботі генератора в режимі н.х. при струмі збудження  $I_{зб1} = I_{зб.ном}$  напруга на його виводах  $U_0 = de$ ; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення  $U_{ном} = ae$ . Таким чином, відрізок  $da$  виражає значення напруги  $\Delta U = U_0 - U_{ном}$  при  $I_{зб1} = I_{збном}$ .

Напруга на виводах генератора в цьому випадку зменшилася в результаті дії двох причин: **падіння напруги в колі якоря і впливу реакції якоря**. Вимірявши значення опору кола якоря і підрахувавши падіння напруги  $I_a \sum R$ , можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження:  $E_a = U + I_a \sum R$ . На рисунку 4.5 ця ЕРС представлена відрізком  $be$ . Електрорушійна сила генератора при навантаженні менше, ніж в режимі н.х. ( $be \leq de$ ), що пояснюється впливом реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу із точки  $c$  опускаємо перпендикуляр на вісь абсцис. Отриманий відрізок  $cf$  являє собою ЕРС генератора при навантаженні; у режимі н.х. для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження  $I_{зб2} \leq I_{зб1}$ . Отже, відрізок  $fe$ , рівний різниці струмів збудження ( $I_{зб1} - I_{зб2}$ ), представляє собою струм збудження, що компенсує вплив реакції якоря.

Катети реактивного трикутника  $abc$  **кількісно визначають** причини, які викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні:

**падіння напруги** в колі якоря визначає катет  $ab$

$$ab = I_a \sum R; \quad (4.17)$$

**струм збудження** ( $I_{зб1} - I_{зб2}$ ), що компенсує дію реакції якоря, визначає катет  $bc$

$$bc = I_{зб1} - I_{зб2} = \frac{2F_{qd} + F_{ad}}{2w_{зб}}, \quad (4.18)$$

де  $F_{qd}$  і  $F_{ad}$  – поперечна і поздовжня складові реакції якоря;  
 $w_{зб}$  – число витків у полюсній котушці обмотки збудження.

Реактивний трикутник  $a'b'c'$ , побудований для іншого значення струму збудження  $I_{зб3}$ . Сторона  $a'b'$  трикутника залишилася незмінною ( $a'b' = ab$ ), що пояснюється незмінністю струму навантаження, але сторона  $b'c'$  зменшилася ( $b'c' \leq bc$ ), тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магнітного кола генератора, а отже, і зменшиться дія реакції якоря.

**Практичне значення** такої характеристики полягає в тому, що вона дозволяє кількісно визначити розмагнічувальну дію реакції якоря і дослідити її залежність від насичення магнітного кола і струму якоря.

**Зовнішня характеристика генератора.** Ця характеристика представляє собою залежність напруги  $U$  на виводах генератора від струму навантаження  $I_{нав}$ . При знятті даних для побудови зовнішньої характеристики, генератор приводять в обертання з номінальною швидкістю і навантажують його до номінального струму при номінальній нарузі. Потім, поступово зменшуючи навантаження до н.х. ( $I_{нав} = 0$ ), знімають показання приладів. Опір кола збудження  $R_{зб}$  і частоту обертання генератора протягом дослідів підтримують незмінними ( $R_{р.зб} = const$  і  $n = const$ ).

На рисунку 4.6 представлена зовнішня характеристика ГПС незалежного збудження, з якої видно, що при збільшенні струму навантаження  $I_{нав}$  напруга на виводах генератора знижується; це пояснюється впливом реакції якоря і падінням напруги в колі якоря. Нахил зовнішньої характеристики до осі абсцис (жорсткість зовнішньої характеристики) оцінюється номінальною зміною напруги генератора при зниженні навантаження

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\% . \quad (4.19)$$

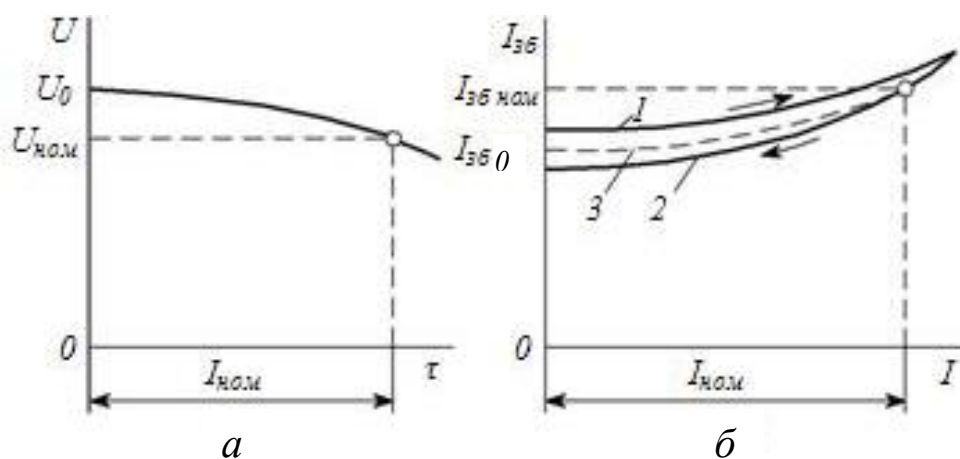


Рисунок 4.6 – Зовнішня (а) і регулювальна (б) характеристики генератора незалежного збудження

Зазвичай для генератора незалежного збудження  $\Delta U_{ном} = 5 \div 10\%$ .

**Регулювальна характеристика генератора.** Характеристика  $I_{зб} = f(I_{нав})$  показує, як необхідно змінювати струм у колі збудження, щоб при зміні навантаження генератора напруга на його виводах залишалася незмінною – рівною номінальній. При цьому частота обертання зберігається постійної ( $n = const$ ).

При роботі генератора без навантаження в колі збудження встановлюють струм  $I_{зб0}$ , при якому напруга на виводах генератора стає рівною номінальній. Потім поступово збільшують навантаження генератора, одночасно підвищують струм збудження таким чином, щоб напруга генератора у всьому діапазоні навантажень залишалася рівною номінальній. Так одержують висхідну гілку характеристики (рисунок 4.6, б, **крива 1**). Поступово зменшуючи навантаження генератора до н.х. і регулюючи відповідним чином струм навантаження, одержують спадну гілку характеристики (рисунок 4.6, б, **крива 2**). Спадна гілка регулювальної характеристики розташована нижче висхідної, що пояснюється впливом збільшеного залишкового намагнічування магнітного кола машини в процесі зняття висхідної гілки. Середню **криву 3**, проведену між висхідною й спадною гілками, називають **практичною регулювальною характеристикою генератора**.

Основний недолік генераторів незалежного збудження – це необхідність застосування стороннього джерела енергії постійного струму. Однак можливість регулювання напруги в широких межах, а також порівняно жорстка зовнішня характеристика цього генератора є його перевагами.

## 5 ГПС паралельного збудження

Принцип **самозбудження** генератора постійного струму заснований на тому, що магнітна система машини, будучи збудженою, зберігає тривалий час невеликий магнітний потік залишкового магнетизму осердя полюсів і станини  $\Phi_{зал}$  (порядку 2-3% від повного потоку  $\Phi$ ). При обертанні якоря потік  $\Phi_{зал}$  індукуює у якірній обмотці ЕРС  $E_{зал}$ , під дією якої в обмотці збудження виникає невеликий струм  $I_{зб.зал}$ . Якщо МРС обмотки збудження  $I_{зб.зал} W_{зб}$  має такий же напрямок, як і потік

$\Phi_{зал}$ , то вона збільшує потік головних полюсів. Це, у свою чергу, викликає збільшення ЕРС генератора, від чого струм збудження знову збільшиться. Так буде тривати до тих пір, поки напруга генератора не буде врівноважена падінням напруги в колі збудження, тобто

$$I_{зб} R_{зб} = U_0. \quad (4.20)$$

На рисунку 4.7 наведена характеристика н.х. генератора (**крива 1**) і залежність падіння напруги від струму збудження  $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$  (**пряма 2**). Точка перетину А відповідає закінченню процесу самозбудження генератора, тому що саме в ній  $U_0 = I_{зб} R_{зб}$ .

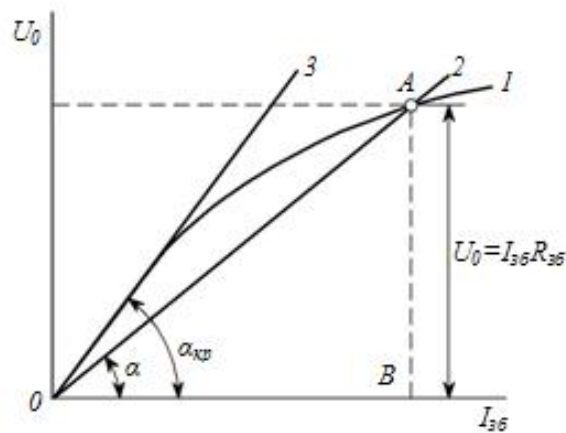


Рисунок 4.7 – Характеристика н.х. ГПС паралельного збудження

Кут нахилу прямої ОА до осі абсцис визначається із трикутника ОАВ

$$\frac{m_u}{m_i} \operatorname{tg} \alpha = \frac{U_0}{I_{зб}} = R_{зб}, \quad (4.21)$$

де  $m_i$  – масштаб струму (по осі абсцис), А/мм;  
 $m_u$  – масштаб напруги (по осі ординат), В/мм.

З (4.20) слідує, що необхідно, щоб кут нахилу прямої  $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$  до осі абсцис був прямо пропорційний опорі кола збудження. Однак, при деякому значенні опору реостата  $R_{p.зб}$  опір  $R_{зб}$ , досягає значення, при якому залежність  $I_{зб} R_{зб} = f(I_{зб})$  стає дотичною до прямолінійної частини характеристики н.х. (**пряма 3**). При виникненні цієї ситуації генератор не самозбуджується. Опір кола збудження, при якому припиняється самозбудження генератора, називають критичним опором  $R_{зб.крит}$ .

Слід зазначити, що самозбудження генератора можливо лише при частоті обертання, що перевищує критичну  $n_{кр}$ . Ця умова витікає з характеристики самозбудження генератора (рисунок 4.8), що представляє собою залежність напруги генератора в режимі н.х. від частоти обертання при незмінному опорі кола збудження, тобто  $U_0 = f(n)$  при  $R_{зб} = const$ .

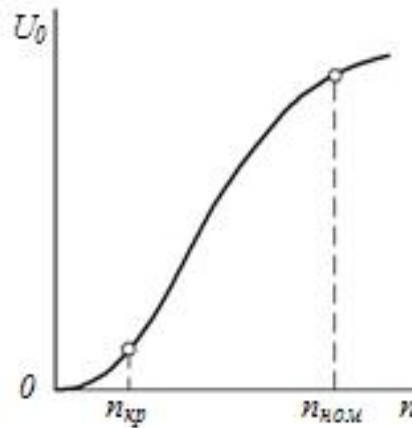


Рисунок 4.8 – Характеристика самозбудження

Аналіз характеристики самозбудження показує, що при  $n < n_{кр}$  збільшення частоти обертання якоря генератора супроводжується незначним збільшенням напруги, тому що процес самозбудження не відбувається і поява напруги на виході генератора обумовлена лише залишковим намагнічуванням магнітного кола генератора. Процес самозбудження починається при  $n > n_{кр}$ . У цьому випадку збільшення частоти обертання супроводжується різким ростом напруги  $U_0$ . Однак при частоті обертання, близькій до номінальної, ріст напруги вповільнюється, що пояснюється магнітним насиченням генератора. Критична частота обертання залежить від опору кола збудження і з ростом останнього збільшується.

Таким чином, самозбудження генераторів постійного струму можливо при дотриманні наступних умов:

- магнітна система машини повинна мати залишковий магнетизм;
- приєднання обмотки збудження повинне бути таким, щоб МРС обмотки збігалася за напрямком з потоком залишкового магнетизму  $\Phi_{зал}$ ;
- опір кола збудження повинний бути менше критичного;
- частота обертання якоря повинна бути більше критичної.

Оскільки генератор паралельного збудження самозбуджується лише в одному напрямку, то характеристика н.х. цього генератора може бути знята тільки для одного квадранта вісі координат.

Навантажувальна і регулювальна характеристики генератора паралельного збудження практично не відрізняються від відповідних характеристик генератора незалежного збудження (рисунок 4.5 та 4.6, б).

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (рисунок 4.9, **крива 1**) менш жорстка, ніж у генератора незалежного збудження. Пояснюється це тим, що в генераторі паралельного збудження, крім причин, що викликають зменшення напруги в генераторі незалежного збудження (реакція якоря і падіння напруги в колі якоря), діє третя причина – зменшення струму збудження, викликане зниженням напруги від дії перших двох причин.

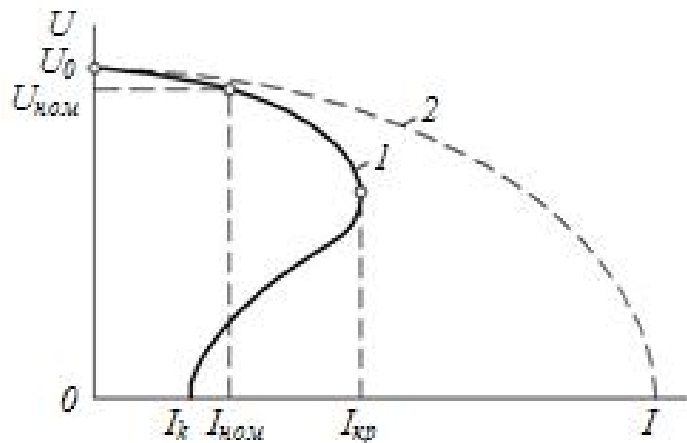


Рисунок 4.9 – Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

Цією особливістю пояснюється і те, що при поступовому зменшенні опору навантаження  $R_{нав}$  струм збільшується лише до критичного значення  $I_{кр}$ , а потім при подальшому зменшенні опору навантаження струм починає зменшуватися. Струм навантаження досягає мінімального значення при короткому замиканні, коли  $I_{нав} < I_{кр}$ . Справа в тому, що зі збільшенням струму підсилюється розмагнічування генератора (посилення реакції якоря і зменшення струму збудження), машина переходить у ненасичений стан, при якому навіть невелике зменшення опору навантаження викликає різке зменшення ЕРС машини. У зв'язку із тим, що струм визначається напругою на виводах генератора  $U$  і опором наван-

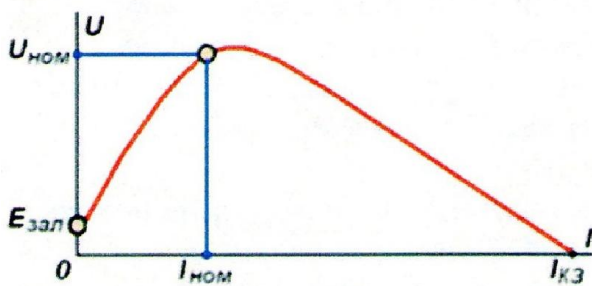
таження  $R_{нав}$ , тобто  $I = U / R_{нав}$ , то при струмах навантаження  $I_{нав} < I_{кр}$ , коли напруга генератора зменшується повільніше, ніж зменшується опір навантаження, відбувається зростання струму навантаження. Після того як  $I_{нав} = I_{кр}$ , подальше зменшення  $R_{нав}$  супроводжується зменшенням струму навантаження, тому що в цьому випадку напруга  $U$  зменшується швидше, ніж зменшується опір навантаження  $R_{нав}$ .

Таким чином, коротке замикання, викликане повільним зменшенням опору навантаження, не є небезпечним для генератора паралельного збудження. Але при раптовому к.з. магнітна система генератора не встигає розмагнітитися і струм досягає небезпечних для машини значень  $I_{к} = (8 \div 12)I_{ном}$  (рисунок 4.9, крива 2). При такому різкому зростанні струму навантаження на валу генератора виникає значний гальмівний момент, а на колекторі з'являється сильне іскріння, що переходить у коловий вогонь. Тому необхідно захищати генератор від перевантаження і к.з.

Генератори паралельного збудження широко застосовують в установках постійного струму, тому що відсутність збуджувача вигідно відрізняє ці генератори від генераторів незалежного збудження. Номінальна зміна напруги генератора паралельного збудження становить 10-30%.

## 6 ГПС послідовного збудження

Обмотки якоря і збудження та навантаження цього генератора ввімкнені послідовно, ними протікає стум  $I_a = I_{нав} + I_{зб}$ . Звідси впливає, що характеристики н.х. та навантажувальні можна отримати тільки за схемою **незалежного** збудження, а отже вони будуть мати і відповідний вигляд (див. пункт 4).



**Рисунок 4.10** – Зовнішня характеристика ГПС

Крива зовнішньої характеристики генератора послідовного збудження (рисунок 4.10), як і генератора із самозбудженням (паралельним збудженням), розпочинається з точки залишкової ЕРС  $E_{зал}$ . Початкове зростання струму навантаження



$I_{нав} = I_{зб}$  намагнічує генератор (прямолінійна ділянка кривої) до насичення і напруга  $U$  зростає. Після насичення магнітного кола, зростання навантаження супроводжується значною розмагнічувальною дією реакції якоря та падінням напруги в електричному колі генератора, а отже різким зниженням напруги до нуля в точці к.з. ( $I_{к.з.}$ ). На практиці такі генератори, в якості джерела постійного струму, не використовують, тому що до генераторів завжди ставиться вимога підтримки незмінності напруги, чого не може забезпечити генератор послідовного збудження через відсутність на характеристиці значної ділянки з незмінною напругою.

## 7 ГПС змішаного збудження

Генератор змішаного збудження має паралельну і послідовну обмотки збудження. Потік збудження створюється в основному паралельною обмоткою (60-80% від загального потоку).

При змішаному збудженні ГПС обмотки збудження можуть бути ввімкнені як **узгоджено**, так і **зустрічно**. Узгоджене ввімкнення передбачає однаковий напрям магнітних потоків обох обмоток, зустрічне – навпаки.

Послідовна обмотка зазвичай включається із паралельною так, щоб МРС обмоток склалися (узгоджено), що забезпечує одержання жорсткої зовнішньої характеристики генератора.

В режимі н.х. генератор має тільки паралельне збудження, тому що  $I_{нав} = 0$ . З появою навантаження виникає МРС послідовної обмотки збудження, що, підмагнічуючи машину, компенсує дію реакції якоря і спадання напруги в якорі.

Зовнішня характеристика в цьому випадку стає найбільш жорсткою (рисунок 4.11, **крива 2**), тобто напруга на затискачах генератора при збільшенні струму залишається майже незмінною. Якщо ж потрібно, щоб напруга на затискачах споживача (наприкінці лінії) залишалася практично незмінною, то число витків послідовної обмотки збільшують таким чином, щоб МРС цієї обмотки компенсувала ще і падіння напруги в проводах лінії (рисунок 4.11, **крива 1**).

При зустрічному включенні обмоток збудження напруга генератора із збільшенням струму навантаження різко зменшується (рису-

нок 4.11, **крива 3**), що пояснюється дією розмагнічення магнітного кола послідовною обмоткою збудження, МРС якої спрямована проти МРС паралельної обмотки.

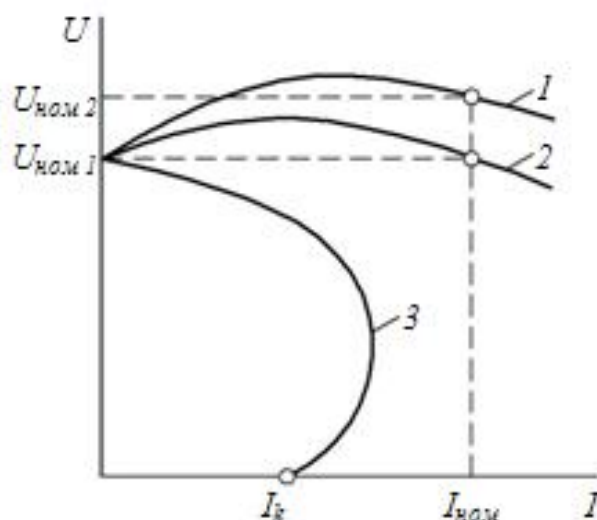


Рисунок 4.11 – Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження

При зустрічному включенні обмоток збудження отримують досить м'яку зовнішню характеристику. Зустрічне включення обмоток застосовують лише в генераторах спеціального призначення, наприклад у зварювальних, де необхідно одержати круто падаючу зовнішню характеристику.

Генератори змішаного збудження із узгодженим включенням обмоток збудження застосовують для живлення силового навантаження у випадках, коли потрібна сталість напруги в лінії.

### Контрольні запитання

1. Як класифікуються ГПС за способом збудження?
2. Наведіть електричні схеми генераторів різних способів збудження.
3. З яких складових складається сумарний опір якірного кола?
4. Як визначається потужність, необхідна для приводу генератора постійного струму? Які складові входять до рівняння механічної потужності?
5. Якими основними характеристиками визначаються режими роботи генераторів постійного струму?

6. Поясніть можливість отримання навантажувальної характеристики за допомогою реактивного трикутника.
7. Як розподіляються втрати електричної потужності в генераторах постійного струму?
8. Які складові потужності визначають енергетичні показники генераторів?
9. При дотриманні яких умов можливе самозбудження генераторів постійного струму?
10. Зобразити і пояснити характеристику н.х. генератора незалежного збудження.
11. Зобразити і пояснити навантажувальну характеристику генератора незалежного збудження.
12. Зобразити і пояснити зовнішню характеристику генератора незалежного збудження.
13. Зобразити і пояснити регулювальну характеристику генератора незалежного збудження.
14. Зобразити і пояснити характеристику н.х. генератора паралельного збудження.
15. Зобразити і пояснити зовнішню характеристику генератора паралельного збудження.
16. Чим відрізняються зовнішні характеристики генераторів незалежного та паралельного збудження?
17. Чому навантажувальна та регулювальна характеристики генератора при паралельному збудженні такі ж, як у цього ж генератора при незалежному збудженні?
18. Чому генератор послідовного збудження не використовується як джерело постійного струму?
19. Які характеристики можна зняти для генератора послідовного збудження?
20. В яких випадках обмотки збудження генератора змішаного збудження вмикаються так, щоб їх МРС віднімались?