

2.2. Аналіз характеристик та критерії вибору елементів системи пуску

2.2.1. Аналіз пускових характеристик ДВЗ

Момент опору двигуна прокручуванню можна представити як суму моментів від сил тертя в кінематичних парах M_T і моменту від компресії M_K , зумовлений різницею робіт стиску й розширення заряду повітря в циліндрах (може змінювати знак)

$$M_O = M_T \pm M_K. \quad (2.2.1)$$

При зміні моменту опору кутлова частота також періодично змінюється, викликаючи появу динамічного (інерційного) моменту. В процесі електростартерного пуску поршневого двигуна виділяють три стадії (рис. 2.2.4).

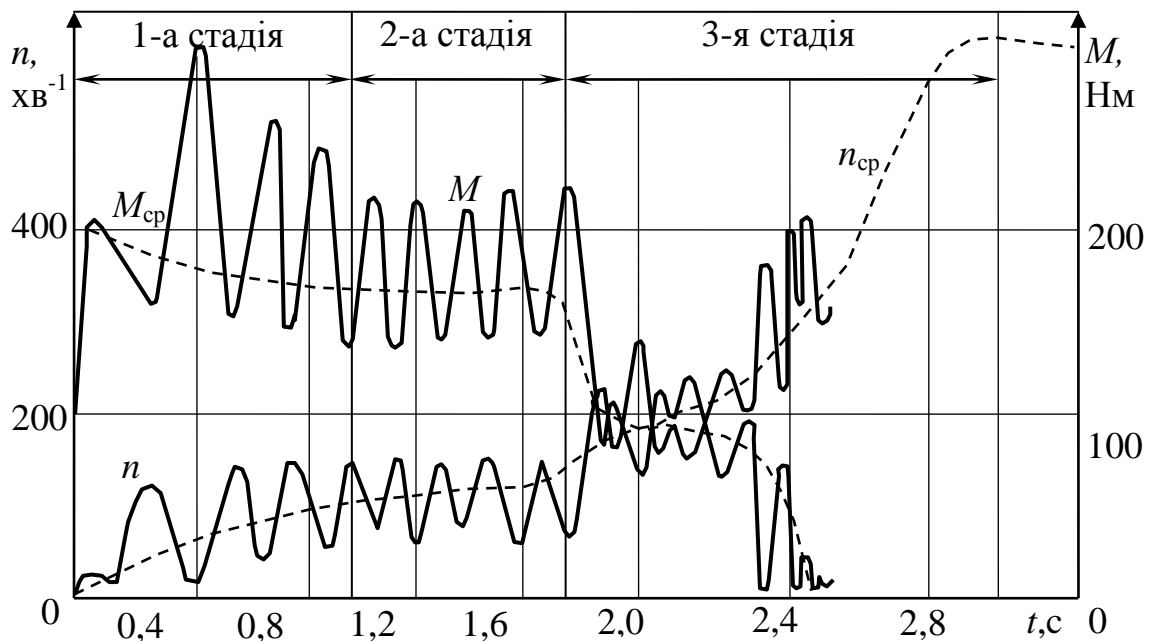


Рис. 2.2.1. Зміна моменту стартера та частоти обертання колінчастого валу у процесі пуску ДВЗ

На першій стадії середнє значення частоти обертання колінчастого валу збільшується від нуля до частоти стабільного прокручування. При цьому, обертаючий момент електродвигуна після перевищення моменту рушення системи стартер – двигун також стабілізується.

На другій стадії спостерігається рівність середніх значень обертаючого моменту електродвигуна і моменту опору при постійній середній частоті обертання колінчатого валу. Після займання палива в циліндрах процес пуску переходить в третю стадію, коли двигун починає розвивати потужність за рахунок теплоти згоряння палива. Цей період часу характеризується безперервним зростанням частоти обертання колінчатого валу завдяки спільній дії обертаючих моментів електростартера та двигуна.

Рівняння рівноваги моментів при пуску двигуна можна надати у диференціальному вигляді [20]

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_C i_{DC} \eta_z - M_O, \quad (2.2.2)$$

де $J = J_D + J_C i_{DC}^2$ – момент інерції обертових мас і мас, що поступально рухаються, приведених до колінчастого валу;

J_D, J_C – приведені моменти інерції відповідно ДВЗ та стартера;

i_{DC} – передаточне число ДВЗ – стартер;

M_C – момент, що розвиває стартер;

η_z – коефіцієнт корисної дії зубчастої передачі;

ω – кутова швидкість обертання колінчастого валу ДВЗ.

Пускові якості ДВЗ оцінюються за такими параметрами [10].

1. *Мінімальна пускова частота обертання n_{min}* , яка визначається пусковими характеристиками ДВЗ (часом пуску $\tau_{п}$ від частоти обертання n) і залежить від температурних умов пуску (рис. 2.2.2).

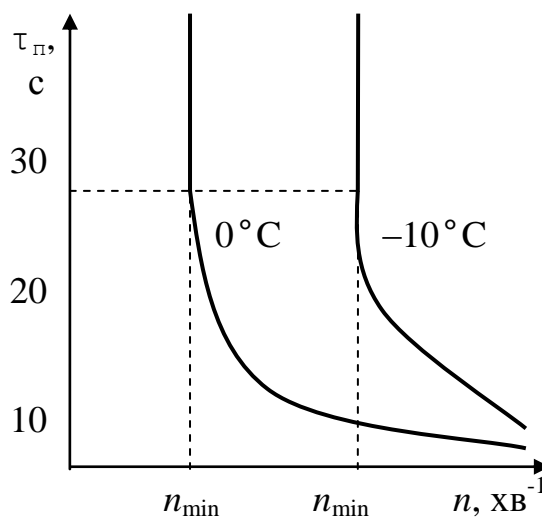


Рис. 2.2.2. Пускові характеристики ДВЗ

2. Середній момент опору M_O при n_{\min} . Величина M_O залежить від багатьох параметрів (факторів) і визначається за емпіричними формулами з різним ступенем наближення [10, 20]

$$M_O = 390V_{\text{ц}} \left[\varepsilon_{\text{ц}} + 6\sqrt{\delta_{\text{н}}} + k_{\text{двз}} \left(1 + \frac{\delta_{\text{н}}^2}{8}\right) \sqrt{v_{\text{м}} n} \right], \quad (2.2.3)$$

де $V_{\text{ц}}$ – робочий об’єм циліндрів;

$\varepsilon_{\text{ц}}$ – ступінь стиску у циліндрах;

$k_{\text{двз}}$ – емпіричний коефіцієнт (для бензинових ДВЗ $k_{\text{двз}}=0,123$ та для дизельних $k_{\text{двз}}=0,09$);

$v_{\text{м}}$ – кінематична в’язкість мастила на початку пуску;

n – частота обертання колінчастого вала;

$\delta_{\text{н}}$ – коефіцієнт нерівномірності обертання колінчастого вала.

Залежність $M_O = f(n)$ для існуючих ДВЗ визначають за результатами випробувань та надають у вигляді пускових характеристик (рис. 2.2.3)

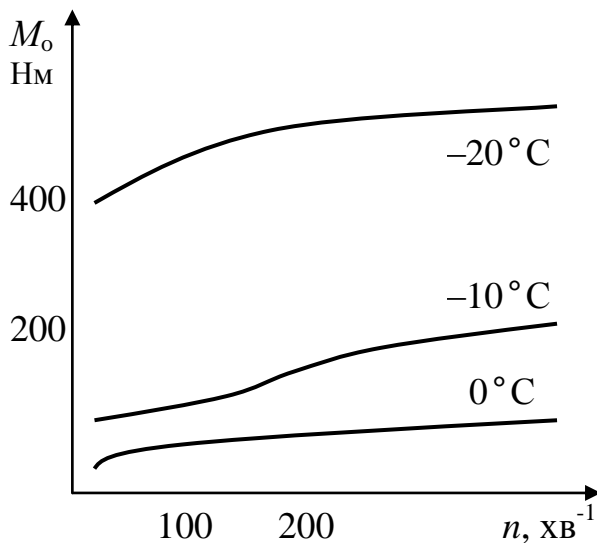


Рис. 2.2.3. Залежність моменту опору від частоти прокручування колінчастого вала

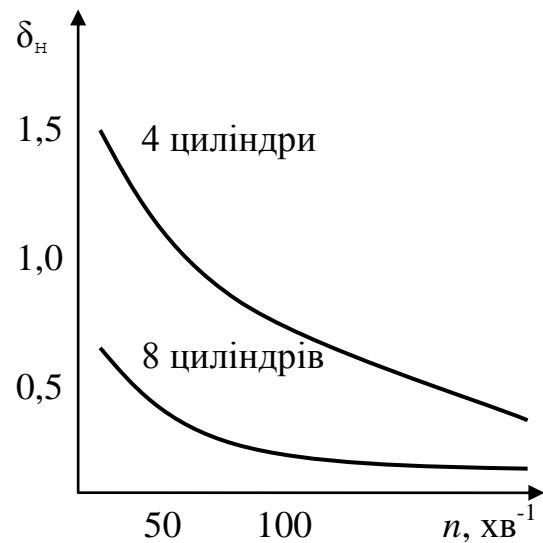


Рис. 2.2.4. Залежність коефіцієнта нерівномірності від частоти обертання ДВЗ

Зі зростанням частоти n відбувається розрідження мастил й, як наслідок, збільшення сил тертя в кінематичних парах ДВЗ. Це викликає тепловиділення, що ще більше розріджує мастило.

3. Коефіцієнт нерівномірності обертання (за оберт) δ_H впливає на величину M_O і залежить від середньої частоти обертання колінчастого вала, типу двигуна, навантаження й числа циліндрів (рис. 2.2.4). Значення коефіцієнта δ_H визначається через миттєві значення кутової швидкості обертання ω

$$\delta_H = \frac{2(\omega_{\max} - \omega_{\min})}{(\omega_{\max} + \omega_{\min})}, \quad (2.2.4)$$

Коефіцієнт нерівномірності обертання знаходиться в межах 0,1...2. У карбюраторних двигунів в порівнянні з дизельними, ступінь стиску і нерівномірність обертання колінчастого вала менше.

4. Середній тиск тертя – питомий параметр опору обертанню, що характеризує відношення сили тертя до площі поршня

$$P_{\text{сп}} = \frac{1,256 \cdot 10^4 M_O}{z_{\text{ц}} V_{\text{ц}}}, \quad (2.2.5)$$

де $z_{\text{ц}}$ – число циліндрів.

5. Пускова потужність необхідна для прокручування колінчастого вала при пускових обертах визначається на підставі наведених пускових характеристик

$$P_{\text{ПД}} = M_O n_{\min} \pi / 30. \quad (2.2.6)$$

Слід зазначити, що значення пускових параметрів змінюються в широких межах залежно від температури ДВЗ на час пуску.

Передаточне число привода стартера визначає раціональне узгодження механічної характеристики пускового пристрою (стартерного електродвигуна) з пусковими характеристиками ДВЗ. Габарити електродвигуна зменшуються з підвищенням його швидкохідності. Передаточне число регулює співвідношення між швидкістю обертання й моментом, що передається. Максимальний діаметр вінця маховика обмежений його розміщенням, а мінімальна кількість зубів шестерні (8 – 11 при евольвентному зачепленні) обмежена з боку міцності конструкції. Передаточне число стартерів, які застосовуються, обирається в межах 9 – 18.

2.2.2. Характеристики АКБ у режимі пуску

АКБ на борту автомобіля працює у двох режимах стартерному і режимі циклування (заряд – розряд). Одночасно АКБ виконує функцію фільтра, що згладжує. Стан АКБ в стартерному режимі описується вольт-амперними (ВАХ) і часовими (розрядними) характеристиками. Похідними від цих характеристик є потужнісні характеристики, які визначають залежність потужності АКБ, що віддається в навантаження, від струму її розряду (рис. 2.2.5).

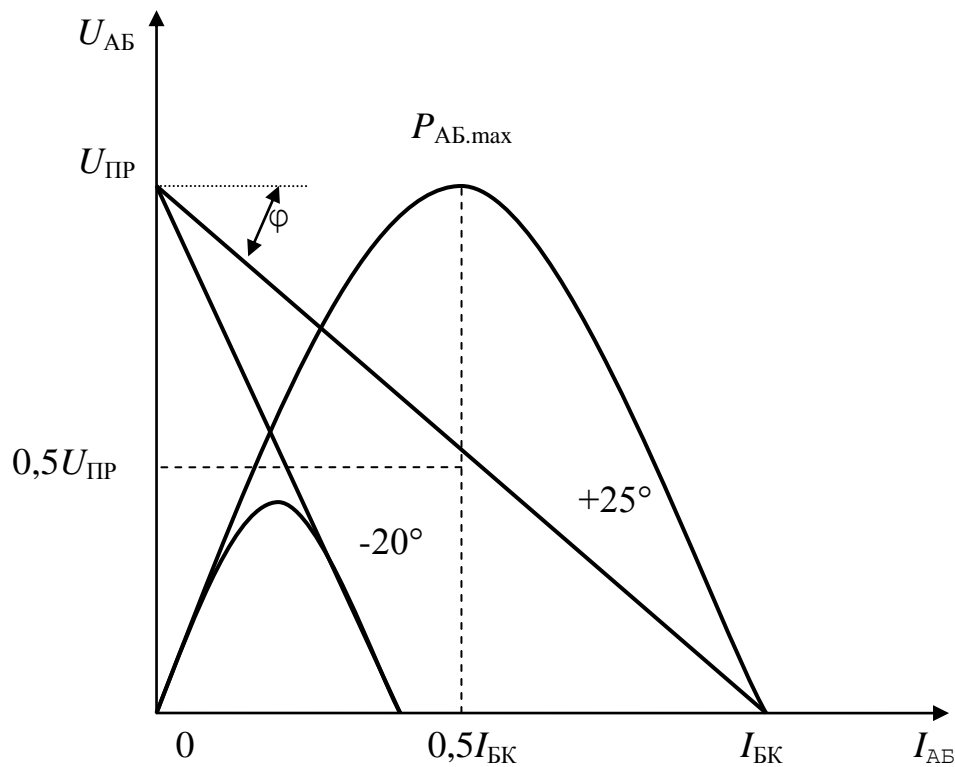


Рис. 2.2.5. Потужнісна характеристика АКБ

При зміні температури змінюється опір АКБ R_{AB} і потужність P_{AB} , що віддається нею. Потужність, яка віддається батареєю в мережу (в навантаження), визначається за відомою формулою (1.4)

$$P_{AB} = U_{AB} I_{AB} = I_{AB}^2 R_H, \quad (2.2.7)$$

Струм в замкненому колі (мережі АКБ) згідно закону Ома визначається через напругу джерела живлення (напругу початку розряду АКБ – $U_{ПР}$) та повний опір кола (мережі)

$$I_{AB} = \frac{U_{\text{ПР}}}{R_{\text{Н}} + R_{\text{АБ}}}, \quad (2.2.8)$$

Підставляючи (2.2.8) в (2.2.7), отримуємо вираз для потужності АКБ, яка повністю визначається через початкові дані для розрахунку

$$P_{\text{АБ}} = \frac{U_{\text{ПР}}^2 R_{\text{Н}}}{(R_{\text{Н}} + R_{\text{АБ}})^2}, \quad (2.2.9)$$

Максимальна потужність, що віддається АКБ в навантаження, досягається за умовою узгодженого режиму, коли $R_{\text{АБ}} = R_{\text{Н}}$

$$P_{\text{АБ.макс}} = \frac{U_{\text{ПР}}^2}{4R_{\text{АБ}}} = \frac{U_{\text{ПР}} I_{\text{БК}}}{4}. \quad (2.2.10)$$

При цьому $I_{\text{АБ}} = 0,5I_{\text{БК}}$, $U_{\text{АБ}} = 0,5U_{\text{ПР}}$, де $I_{\text{БК}}$ - струм короткого замикання АКБ. Умовна початкова напруга розряду АКБ визначається за емпіричною формулою [18, 20]

$$U_{\text{ПР}} = m(2,02 + 0,00136t_{\text{ел}}^{\circ} - 0,001\Delta C_{\text{р}}), \quad (2.2.11)$$

де m – число акумуляторів у батареї;

2,02 – номінальне значення напруги одного акумулятора;

$t_{\text{ел}}^{\circ}$ – температура електроліту, що визначає внутрішній опір АКБ;

$\Delta C_{\text{р}}$ – розрядженість батареї, що визначає її фактичну ємність (%).

2.2.3. Критерії вибору та аналіз робочих характеристик стартерного електродвигуна

Особливістю роботи стартерного електродвигуна є широкий діапазон зміни обертового моменту та частоти обертання при короткочасному режимі вмикання під напругою джерела енергії обмеженої потужності. З цього приводу до стартерних електродвигунів висувуються певні вимоги з боку електромеханічних характеристик, від яких в основному визначається типом збудження.

За типом збудження розрізняють двигуни постійного струму (ДПС) із паралельним, послідовним, змішаним і незалежним елект-

ромагнітним збудженням, а також зі збудженням від постійних магнітів. Порівнюючи механічні й електромеханічні характеристики двигунів постійного струму (див. рис. 1.2.6), можна відзначити, що пусковий момент при послідовному збудженні вище, ніж при паралельному, а пускові струми менше.

При малих моментах на валу двигуна з послідовним збудженням механічна характеристика «м'яка», тобто струм $I_{\text{я}}$ змінюється в менших межах, чим при «жорстких» характеристиках паралельної машини, де ця залежність лінійна. Однак, оберти на холостому ході (без механічного навантаження) послідовної машини обмежуються тільки механічними втратами в конструкції двигуна та теоретично необмежені $n \rightarrow \infty$ і двигун іде в рознос.

В ДПС зі змішаним збудженням потік Φ створюється спільно двома обмотками і електромеханічні характеристики машини будуються між характеристиками ДПС із паралельним і послідовним збудженням. Змішане збудження має переваги «м'якої» (послідовної) машини – менший діапазон зміни $I_{\text{я}}$ в широкому діапазоні змін M і переваги «жорсткої» (паралельної) машини – обмежувати n при $M \rightarrow 0$, тобто усувати «рознос».

При синтезі конструкції електродвигуна необхідно визначити кількість полюсів машини та відповідно котушок збудження. З точки зору підвищення ефективності використання активних матеріалів та швидкості обертання ротора, кількість пар полюсів треба збільшувати. Однак при великій кількості полюсів збільшується трудомісткість виготовлення електродвигуна, підвищуються частота перемагнічування й магнітні втрати. Як найбільш доцільними у якості стартерних обирають двигуни з електромагнітним збудженням, які мають чотири (дві пари) статорних полюси (чотири котушки збудження) На рис. 2.2.6 показані різні схеми включення обмоток збудження для чотириполюсного двигуна. Можливі й інші варіанти включення обмоток при змішаному збудженні, але в кожному разі паралельно включені обмотки створюють 10 – 40% всієї магніторушійної сили (МРС) збудження.

Короткочасний режим вмикання стартерного електродвигуна зумовлює можливість обирати допустиму щільність струму в обмотках машини, що проектується, значно більшою ніж для машин загального застосування.

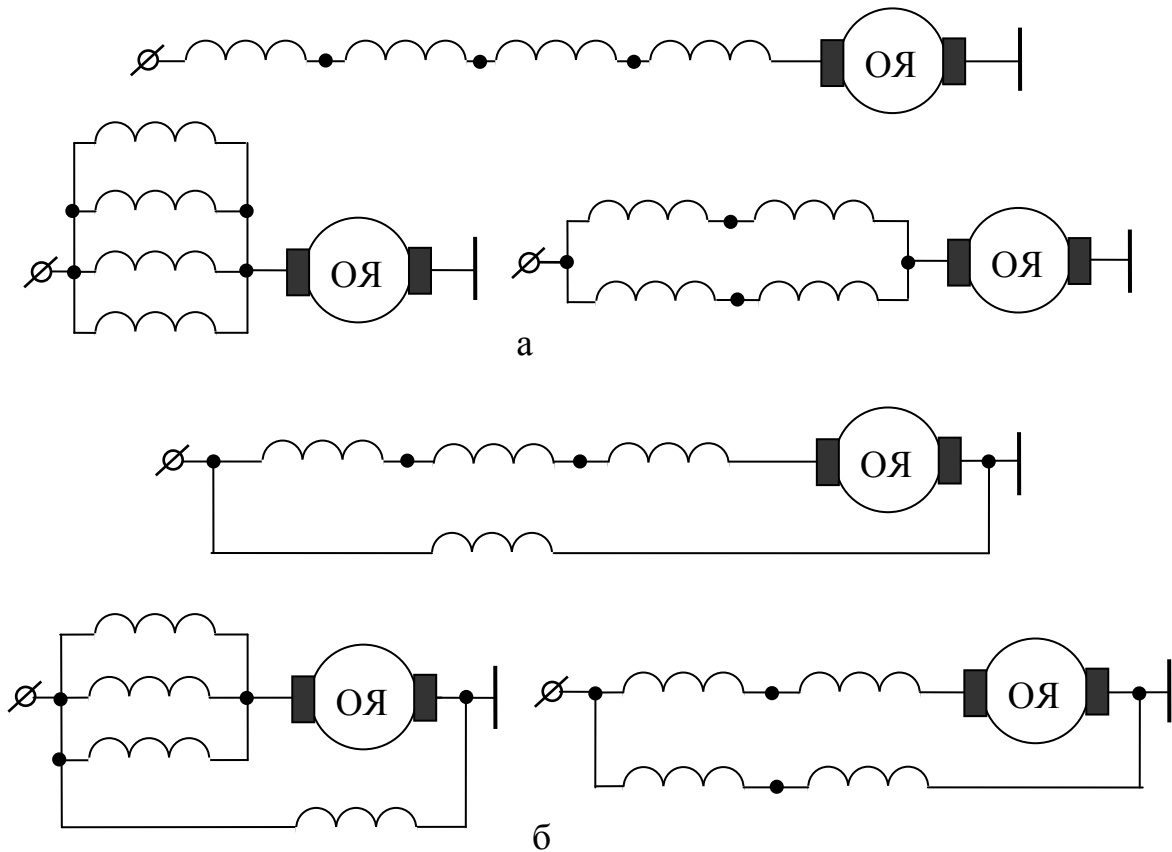


Рис. 2.2.6. Схеми включення обмоток збудження чотирьополусного електростартера: а – послідовне збудження; б – змішане збудження

Завдяки цьому питома потужність стартерних електродвигунів вище (менші габаритні розміри).

Обмежена потужність АКБ зумовлює втрати енергії на ділянках якірного кола стартера. Тому робочі характеристики стартерного електродвигуна $U, n, M, \eta, P = f(I_C)$ будують разом з вольт-амперною характеристикою АКБ.

Під час аналізу функціонування системи пуску в електричному колі стартерної мережі розглядають три ділянки на яких спадає напруга постійного струму: внутрішній опір АКБ R_{AB} ; опір, що спричиняє мережа підключення (стартерного проводу $R_{пр}$ і маси R_M); внутрішній опір стартерного електродвигуна (щіток $R_{щ}$, обмотки збудження R_z , обмотки якоря $R_я$)

Струм I_C у замкненому колі стартерної мережі утворюється під дією результуючої ЕРС (батареї E_{AB} і протидіючої ЕРС якірної обмотки електродвигуна E_C). Величини E_C та відповідно I_C змінюються залежно від швидкісного режиму стартера (рис. 2.2.7).

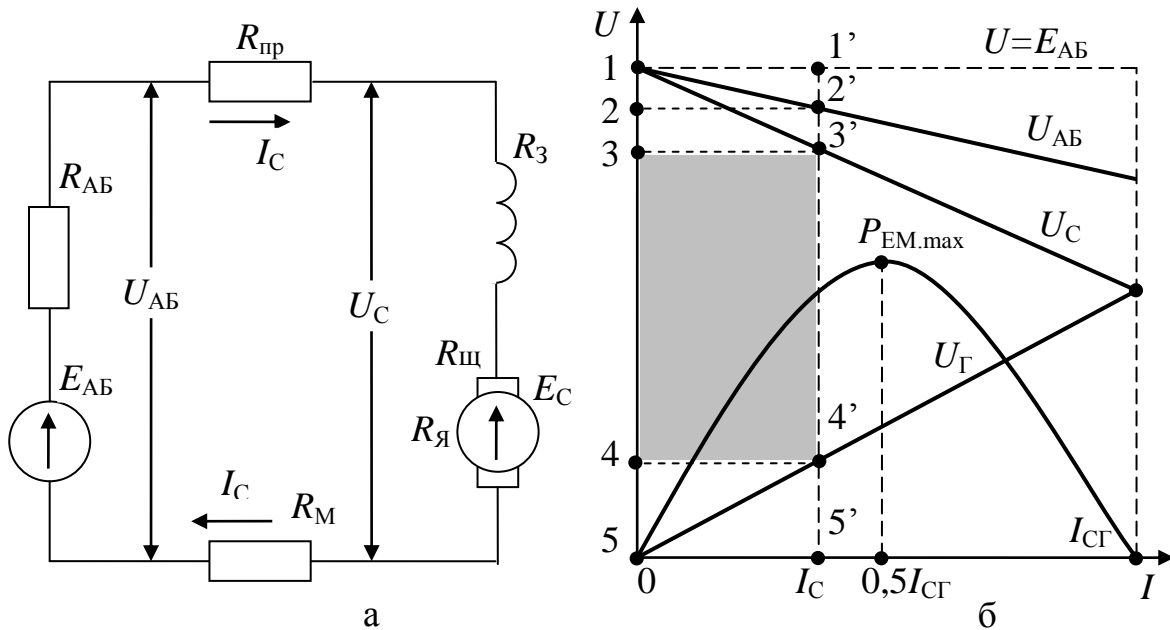


Рис. 2.2.7. Електричне коло стартерної мережі: а – еквівалентна схема; б – розподіл напруги по ділянкам кола

На холостому ході (обертання стартера без навантаження) можна вважати, що $E_C = E_{AB}$, а $I_C = I_{XX} = 0$. На режимі повного гальмування коли $n_C = 0$, протидіюча ЕРС якірної обмотки не утворюється $E_C = 0$, а струм у мережі цілком визначається через еквівалентний опір кола постійного струму та дорівнює $I_C = I_{сг}$. На (рис. 2.2.7, б) проілюстровано розподіл напруги по ділянкам кола для обраного режиму стартерного електродвигуна:

1 – 5 – електрорушійна сила батареї E_{AB} при $I_C = I_{XX} = 0$;

1 – 2 – падіння напруги на внутрішньому опорі АКБ

$$\Delta U_{AB} = I_C R_{AB};$$

2 – 3 – падіння напруги в мережі підключення стартера

$$\Delta U_M = U_{AB} - U_C = R_{пр} + R_M I_C;$$

3 – 4 – протидіюча ЕРС якора стартера $E_C = C_E n_C \Phi$;

4 – 5 – гальмівна напруга (падіння напруги на активному опорі стартерного двигуна) $U_G = I_C R_C$, $R_C = R_з + R_я + 2R_{щ}$.

Необхідно відзначити, що $R_{щ}$ залежить від частоти обертання ротора стартера, величини струму через щітки й конструкції щіткового пристрою $R_{щ} = k_{щ} \cdot f(n_C, I_C)$. Згідно з рис. 2.2.7, б площі прямокутників на діаграмі відповідають таким потужностям:

33'4'4 – електромагнітна потужність, що підведена до якоря стартера $P_{EM} = E_C I_C = E_{AB} I_C - (R_{AB} + R_{пр} + R_M + R_C) I_C^2$;

11'2'2 – втрати потужності на внутрішньому опорі АКБ

$$\Delta P_{AB} = I_C (E_{AB} - U_C) - I_C^2 (R_{пр} + R_M), \Delta P_{AB} = I_C^2 R_{AB};$$

22'3'3 – втрати потужності у мережі підключення стартера

$$\Delta P_0 = I_C^2 (R_{пр} + R_M);$$

445'5 – втрати потужності на внутрішньому опорі стартера

$$\Delta P_C = I_C^2 R_C.$$

Корисна потужність на валу СЕД визначається через електромагнітну потужність, що підведена до якоря стартера, за винятком механічних втрат на тертя в підшипниках і магнітних втрат на переміщення ΔP_M

$$P_C = \frac{M_C n_C}{9,55} = E_C I_C - \Delta P_M. \quad (2.2.12)$$

Електрична потужність, що споживається стартером з мережі

$$P = I_C U_C. \quad (2.2.13)$$

Коефіцієнт корисної дії стартерного електродвигуна

$$\eta_C = \frac{P_C}{P}. \quad (2.2.14)$$

Максимальні значення ККД стартерів традиційної конструкції становлять $\eta_C = 0,5 - 0,7$.

За результатами розрахунків згідно з наведеними залежностями, будуються робочі характеристики СЕД (рис. 2.2.8).

Відповідно до електричного навантаження на робочих характеристиках СЕД розрізняють такі характерні навантажувальні режими:

I_{XX} – холостий хід, який характеризується обертами n_{XX} і потужністю P_{XX} , що витрачається на обертання ротора без зовнішнього механічного навантаження на валу $M_C = 0$. Ця потужність витрачається на подолання сил тертя та аеродинамічного опору конструкції СЕД. Значення параметрів I_{XX} та n_{XX} розглядаються як нормовані при діагностуванні стартера на випробувальному стенді;

I_{η} – режим при якому забезпечується максимальний коефіцієнт корисної дії – η_{\max} ;

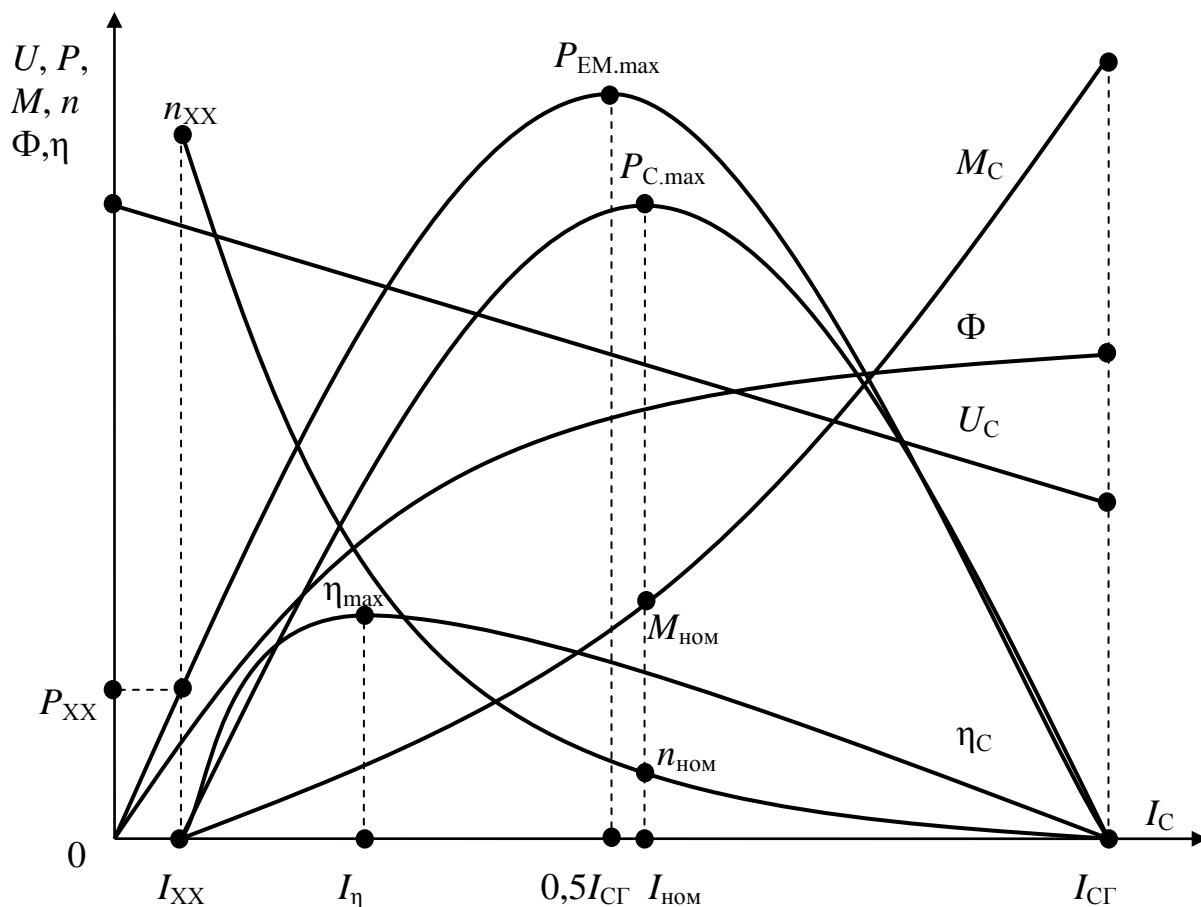


Рис. 2.2.8. Робочі характеристики стартерного електродвигуна

$I_{\text{НОМ}}$ – номінальний режим при якому двигун розвиває максимальну потужність на валу ротора $P_{\text{С.маx}}$ та характеризується певними значеннями обертів $n_{\text{НОМ}}$ і обертового моменту $M_{\text{НОМ}}$. Ці номінали вказуються на бирці стартера при визначеному передаточному відношенні механізму приводу. Слід зазначити, що режим I_{η} не збігається із режимом $I_{\text{НОМ}}$ і робочий діапазон щодо навантаження двигуна обирають в інтервалі $I_{\eta} - I_{\text{НОМ}}$;

$I_{\text{СГ}}$ – режим повного гальмування при $n_{\text{С}}=0$, розглядається при аналізі електричних і магнітних кіл стартерного електродвигуна та системи пуску в цілому. Значення параметрів $I_{\text{СГ}}$ та $M_{\text{СГ}}$ розглядаються як нормовані при діагностуванні стартера на випробувальному стенді.

2.2.4. Характеристики стартерного електродвигуна при нерівномірному обертанні

При змінах навантаження на валу двигуна змінюється ступінь нерівномірності обертання $\delta_H = 0,1 \dots 2,0$ й функції $\omega_{\text{я}}(t)$, $P_{\text{с}}(t)$, $M_{\text{с}}(t)$ близькі до синусоїдального вигляду (рис. 2.2.9).

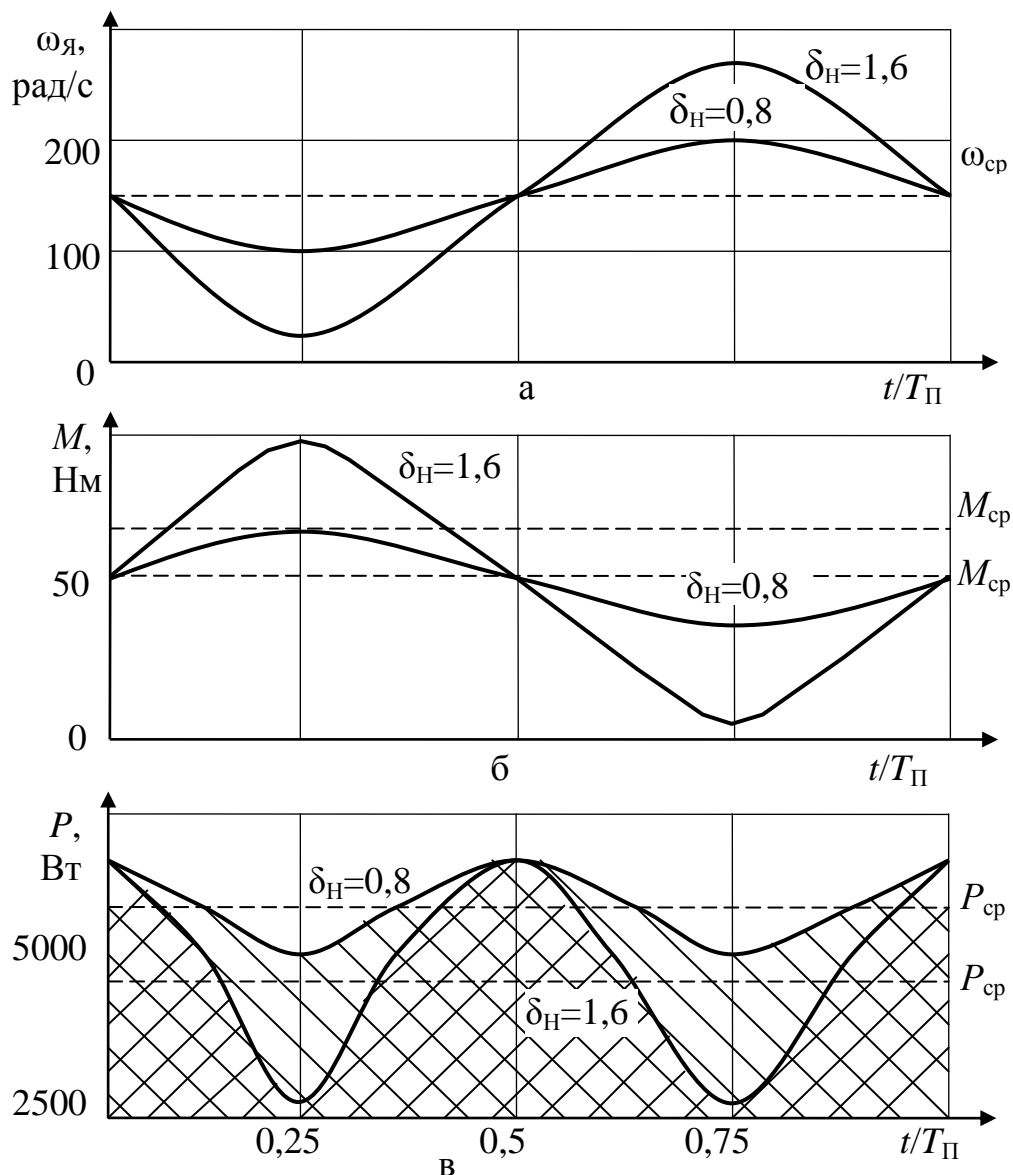


Рис. 2.2.9 Функції зміни параметрів при нерівномірному обертанні стартера:
 а – кутова швидкість обертання; б – потужність, що витрачається;
 в – обертовий момент, що розвивається

Миттєва кутова швидкість обертання (рис. 2.2.9, а) й кут повороту якоря визначаються з виразів

$$\omega_{\text{я}} = \omega_{\text{я.ср}} \left(1 - \frac{\delta_{\text{H}}}{2} \sin 2\pi \frac{t}{T_{\text{П}}} \right), \quad (2.2.15)$$

$$\varphi_{\text{я}} = \int \omega_{\text{я}} dt = \omega_{\text{я.ср}} t - \frac{\delta_{\text{H}} T_{\text{П}}}{4\pi} \omega_{\text{я.ср}} \left(1 - \cos 2\pi \frac{t}{T_{\text{П}}} \right),$$

де $\omega_{\text{я.ср}} = \frac{\theta_{\text{я}}}{T_{\text{П}}}$ – середня за період кутова швидкість обертання якоря;

$T_{\text{П}}$ – період зміни функції $\omega_{\text{я}} t$;

$\theta_{\text{я}}$ – кут повороту якоря за період $T_{\text{П}}$.

Механічна характеристика насиченої машини являє лінійну залежність, а потужність на валу цілком визначається через кутову швидкість

$$M_{\text{C}} = a - b\omega_{\text{я}}, \quad P_{\text{C}} = M_{\text{C}}\omega_{\text{я}} = \omega_{\text{я}} (a - b\omega_{\text{я}}), \quad (2.2.16)$$

де a, b – коефіцієнти, що визначають нахил механічної характеристики.

Робота, яка виконується за період $T_{\text{П}}$, визначається потужністю за цей період

$$W_T = \int_0^{T_{\text{П}}} P_{\text{C}} dt = \omega_{\text{я.ср}} T_{\text{П}} \left[a - b\omega_{\text{я.ср}} \left(1 + \frac{\delta_{\text{H}}}{8} \right) \right]. \quad (2.2.17)$$

Площі, що охоплені функціями $P_{\text{C}}(t)$ (заштриховані зони на рис. 2.2.9, в), відповідають роботі, яка зменшується зі збільшенням δ_{H} . Як наслідок при цьому знижуються середні значення $M_{\text{ср}}$ і $P_{\text{ср}}$, які зумовлені виконаною роботою

$$P_{\text{ср}} = \frac{W_T}{T_{\text{П}}} = \omega_{\text{я.ср}} \left[a - b\omega_{\text{я.ср}} \left(1 + \frac{\delta_{\text{H}}^2}{8} \right) \right], \quad (2.2.18)$$

$$M_{\text{ср}} = \frac{W_T}{\theta_{\text{я}}} = a - b\omega_{\text{я.ср}} \left(1 + \frac{\delta_{\text{H}}^2}{8} \right). \quad (2.2.19)$$

Нерівномірність обертання істотно змінює робочі характеристики СЕД (рис. 2.2.10) і її вплив необхідно враховувати при визначенні розрахункових параметрів системи пуску [10].

З підвищенням нерівномірності обертання знижуються потужність P_C і момент M_C , що розвиває стартер.

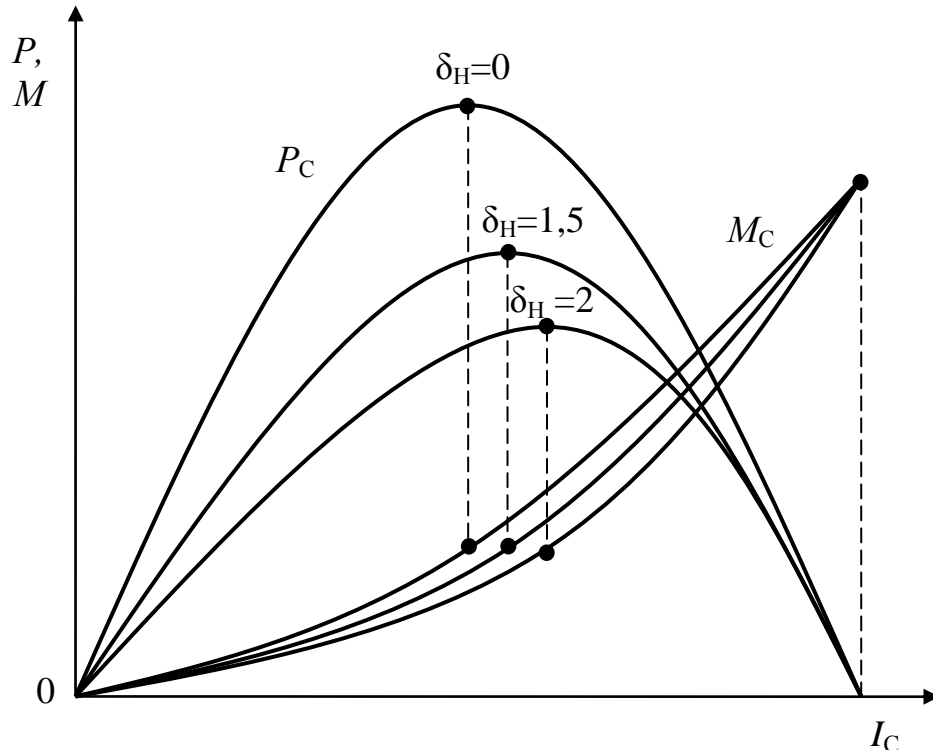


Рис. 2.2.10. Вплив нерівномірності обертання на робочі характеристики стартера

Ступінь зниження діючих значень $P_{сер}$ і моменту $M_{сер}$ при однакових значеннях δ_H залежить від типу збудження та режиму роботи електродвигуна.