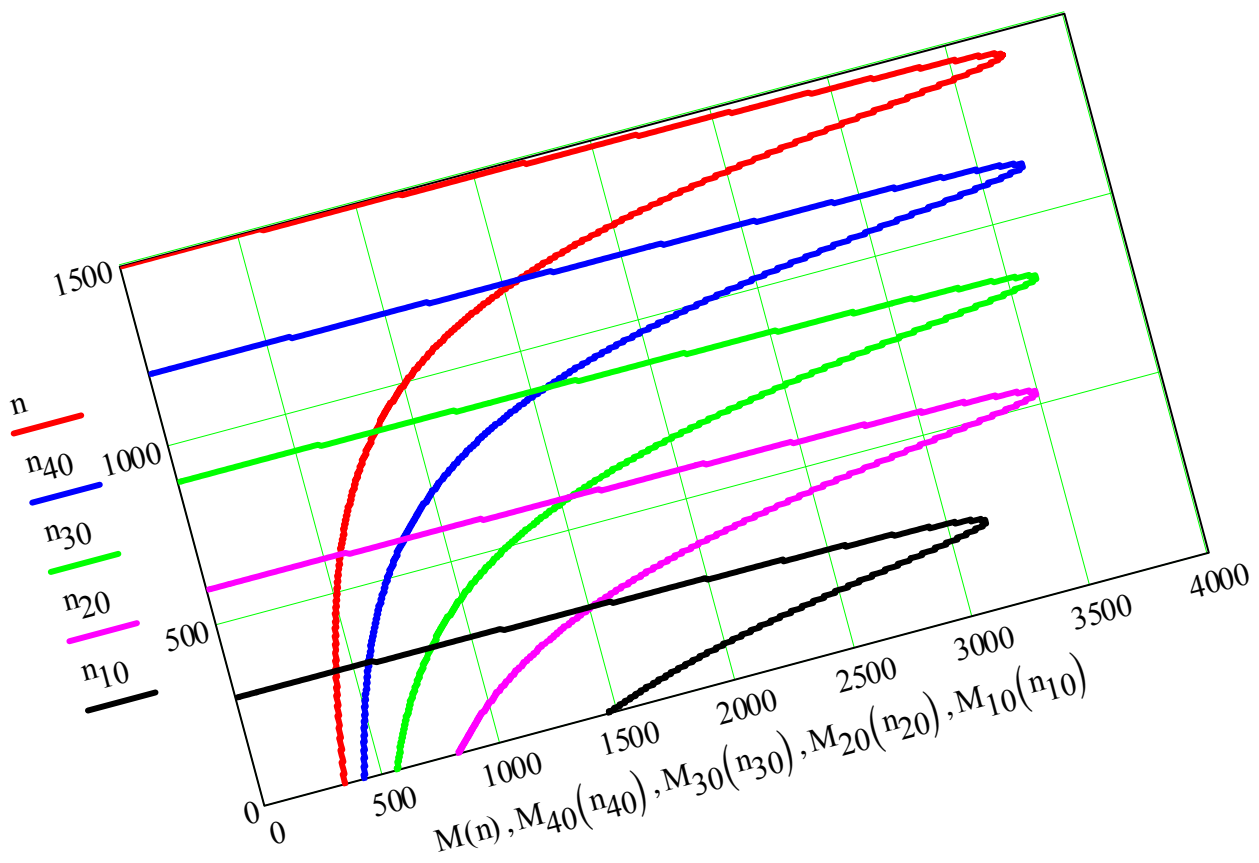


В. В. Грабко, М. П. Розводюк

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Розрахунок експлуатаційних характеристик. Курсове проектування



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

В. В. Грабко, М. П. Розводюк

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

**Розрахунок експлуатаційних
характеристик. Курсове проектування**

Вінниця
ВНТУ
2010

УДК 621.313(075)

ББК 31.261я73

Г75

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол №4 від 16.11.2009 р.)

Рецензенти:

П. Д. Лежнюк, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

А. І. Гладир, кандидат технічних наук, доцент

Грабко, В. В.

Г75 Електричні машини. Розрахунок експлуатаційних характеристик. Курсове проектування : навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 110 с.

В навчальному посібнику викладено підходи до розрахунку експлуатаційних характеристик трансформаторів, асинхронних двигунів та машин постійного струму. Наведено вихідні дані та завдання для курсового проектування, а також приклади розрахунку кожного з видів запропонованих електричних машин в математичному пакеті прикладних програм MathCAD. Навчальний посібник рекомендовано для студентів, що навчаються за напрямками „Електромеханіка” та „Електротехніка”.

УДК 621.313(075)

ББК 31.261я73

© В. Грабко, М. Розводюк, 2010

Зміст

Вступ	5
1 Розрахунок експлуатаційних характеристик трансформатора	6
1.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора, напруги короткого замикання, зміни вторинної напруги та побудова векторної діаграми	6
1.1.1 Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток	6
1.1.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора	7
1.1.3 Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинної напруги	10
1.1.4 Побудова векторної діаграми	11
1.2 Дослідження паралельної роботи трансформаторів	13
1.2.1 Трансформатори з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання	13
1.2.2 Трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання ...	16
1.3 Розрахунок ударних струмів	17
1.4 Розрахунок і вибір силового трансформатора для системи ТП-ДПС	18
2 Розрахунок експлуатаційних характеристик асинхронного двигуна	20
2.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна..	20
2.2 Розрахунок параметрів двигуна при номінальному навантаженні.....	22
2.3 Розрахунок пускового та максимальних моментів.....	25
2.4 Розрахунок та побудова природної механічної й робочих характеристик	25
2.5 Розрахунок та побудова механічних характеристик при заданому способі регулювання частоти обертання вала двигуна..	27
2.5.1 Частотне регулювання швидкості	27
2.5.2 Регулювання частоти обертання зміненням первинної напруги.....	28
2.5.3 Регулювання частоти обертання зміненням опору в колі ротора	29

3 Розрахунок експлуатаційних характеристик машини постійного струму	31
3.1 Режим генератора	31
3.1.1 Розрахунок номінальних величин для генератора незалежного збудження.....	31
3.1.2 Побудова характеристичного трикутника для генератора незалежного збудження.....	32
3.1.3 Розрахунок струму збудження, необхідного для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря.....	34
3.1.4 Розрахунок втрат та ККД для генератора паралельного збудження	35
3.2 Режим двигуна	36
3.2.1 Розрахунок номінальних параметрів двигуна.....	36
3.2.2 Розрахунок і побудова природної механічної характеристики.....	39
3.2.2.1 Двигун паралельного збудження.....	39
3.2.2.2 Двигун послідовного збудження	40
3.2.2.3 Двигун незалежного збудження	40
3.2.3 Розрахунок та побудова механічних характеристик при різних способах регулювання частоти обертання вала двигуна	41
Література	46
Глосарій	48
Додаток А. Завдання на проектування	49
Додаток Б. Вихідні дані для проектування	51
Б.1 Дані трансформаторів	51
Б.2 Дані асинхронних двигунів.....	53
Б.3 Дані машин постійного струму.....	56
Б.4 Дані для розрахунку.....	58
Додаток В. Приклади розрахунків	61
В.1 Розрахунок трансформатора.....	61
В.2 Розрахунок асинхронного двигуна	71
В.3 Розрахунок машини постійного струму	88

ВСТУП

Навчальний посібник призначений для курсового проектування з дисципліни «Електричні машини», зокрема для закріплення теоретичних знань з таких розділів як «Трансформатори», «Асинхронні машини» та «Машини постійного струму».

Кожному студенту запропоновано здійснити розрахунок експлуатаційних характеристик (working characteristics) електричних машин згідно з індивідуальним завданням (додаток А) та заданого варіанта (додаток Б) з використанням наведеної в посібнику методики.

Для полегшення розрахунків в додатку В наведено приклади розрахунків в математичному пакеті прикладних програм (ППП) MathCAD.

Оформлення курсового проекту рекомендується здійснювати відповідно до вказівок [1].

За результатами виконаного курсового проекту передбачається його захист, на якому студент повинен пояснити поведінку електричної машини в тому чи іншому режимі, дати оцінку її експлуатаційним характеристикам, вміти спрогнозувати їх зміни під дією зовнішніх збурень.

Для успішного захисту пропонується переглянути теоретичні відомості з даних розділів електричних машин, наприклад, у матеріалах [2-8].

Навчальний посібник побудований на матеріалах роботи [9].

Вихідні дані електричних машин, які пропонуються для розрахунків, взято з [9-12].

1 РОЗРАХУНОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА

1.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора, напруги короткого замикання, зміни вторинної напруги та побудова векторної діаграми

1.1.1 Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток

Співвідношення номінальних лінійних $U_{\text{лн}}$ та фазних $U_{\text{фн}}$ напруг трифазного трансформатора при з'єднанні його обмоток в

➤ «зірку»:

$$U_{\text{фн}} = \frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}; \quad (1.1)$$

➤ «трикутник»:

$$U_{\text{лн}} = U_{\text{фн}}. \quad (1.2)$$

Визначаються номінальні лінійна $U_{1\text{лн}}$ і фазна $U_{1\text{фн}}$ напруги первинної обмотки та номінальні лінійна $U_{2\text{лн}}$ і фазна $U_{2\text{фн}}$ напруги вторинної обмотки залежно від їх схем з'єднання.

Номінальні лінійні струми (rated linear currents) первинної $I_{1\text{лн}}$ та вторинної $I_{2\text{лн}}$ обмоток трансформатора незалежно від їх схем з'єднання визначаються через номінальну потужність $S_{\text{н}}$:

$$I_{1\text{лн}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{1\text{лн}}}, \quad (1.3)$$

$$I_{2\text{лн}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{2\text{лн}}}. \quad (1.4)$$

Співвідношення номінального фазного струму (rated phase currents) $I_{\text{фн}}$ і номінального лінійного $I_{\text{лн}}$ струму трансформатора при з'єднанні обмоток в

➤ «зірку»:

$$I_{\text{фн}} = I_{\text{лн}}; \quad (1.5)$$

➤ «трикутник»:

$$I_{\text{фн}} = \frac{I_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}. \quad (1.6)$$

Визначаються номінальні фазні струми первинної $I_{1\text{фн}}$ та вторинної $I_{2\text{фн}}$ обмоток залежно від їх схем з'єднання.

1.1.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора

Схема заміщення (replacement scheme) для однієї фази трансформатора подана на рис. 1.1

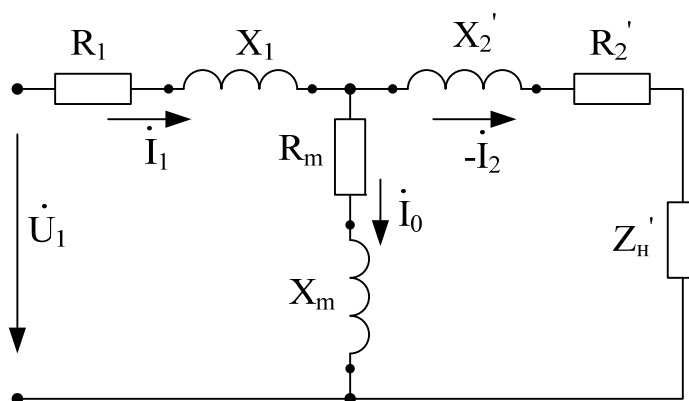


Рисунок 1.1 – Схема заміщення однієї фази трансформатора

Потужність короткого замикання (capacity of short circuit) на одну фазу трифазного трансформатора визначається через втрати короткого замикання $P_{\text{к}}$:

$$P_{\text{кф}} = \frac{P_{\text{к}}}{3}. \quad (1.7)$$

Фазна напруга короткого замикання (voltage of short circuit) визначається через напругу короткого замикання $U_{\text{к}\%}$:

$$U_{1\text{кф}} = \frac{U_{\text{к}\%}}{100} \cdot U_{1\text{фн}}. \quad (1.8)$$

Опори трансформатора при короткому замиканні:

➤ повний

$$Z_k = \frac{U_{1кф}}{I_{1фн}}; \quad (1.9)$$

➤ активний

$$R_k = \frac{P_{кф}}{I_{1фн}^2}; \quad (1.10)$$

➤ реактивний

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (1.11)$$

Коефіцієнт потужності (power factor) при короткому замиканні:

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k}. \quad (1.12)$$

Визначається аргумент φ_k коефіцієнта потужності при короткому замиканні:

$$\varphi_k = \arccos \cos \varphi_k. \quad (1.13)$$

Опори обмоток трансформатора:

➤ повний

$$Z_1 = Z_2 = \frac{Z_k}{2}; \quad (1.14)$$

➤ активний

$$R_1 = R_2 = \frac{R_k}{2}; \quad (1.15)$$

➤ реактивний

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2}. \quad (1.16)$$

Потужність втрат холостого ходу (capacity of idle movement losses) на одну фазу визначається через втрати холостого ходу P_0 :

$$P_{0\phi} = \frac{P_0}{3}. \quad (1.17)$$

Фазний струм холостого ходу $I_{0\phi}$ визначається через струм холостого ходу $I_{0\%}$, взятий у відсотках від номінального струму:

$$I_{0\phi} = \frac{I_{0\%}}{100} \cdot I_{1\phi n}. \quad (1.18)$$

Опори кола намагнічування (magnetize circuit):

➤ повний

$$Z_m = \frac{U_{1\phi n}}{I_{0\phi}} - Z_1; \quad (1.19)$$

➤ активний

$$R_m = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} - R_1; \quad (1.20)$$

➤ реактивний

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (1.21)$$

Кут магнітних втрат:

$$\alpha = \arctg \frac{R_m}{X_m}. \quad (1.22)$$

Коефіцієнт трансформації (transformer factor):

$$k = \frac{U_{1\text{фн}}}{U_{2\text{фн}}}. \quad (1.23)$$

1.1.3 Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинної напруги

Складові напруг короткого замикання:

➤ активна

$$U_{\text{ка}\%} = R_k I_{1\text{фн}} \frac{100}{U_{1\text{фн}}}; \quad (1.24)$$

➤ реактивна

$$U_{\text{кр}\%} = X_k I_{1\text{фн}} \frac{100}{U_{1\text{фн}}}. \quad (1.25)$$

Відсоткова зміна вторинної напруги (change of secondary voltage) при номінальному навантаженні:

$$\Delta U_{\%} = U_{\text{ка}\%} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}\%} \cdot \sin \varphi_2, \quad (1.26)$$

де $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності, для якого аргумент φ_2 визначається як

$$\varphi_2 = \arccos \cos \varphi_2. \quad (1.27)$$

При активно-індуктивному чи індуктивному характері навантаження потрібно прийняти кут φ_2 додатним, а при активно-ємнісному чи ємнісному характері навантаження – від'ємним.

Приведені значення вторинних струму та напруги при номінальному навантаженні:

$$I'_2 = \frac{I_{2\text{фн}}}{k}, \quad (1.28)$$

$$U'_2 = U_{1\text{фн}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right). \quad (1.29)$$

1.1.4 Побудова векторної діаграми

Величини спаду напруг на опорах обмоток:

➤ активні

$$R_1 I_{1\text{фн}} \approx R'_2 I'_{2\text{фн}}; \quad (1.30)$$

➤ реактивні

$$X_1 I_{1\text{фн}} \approx X'_2 I'_{2\text{фн}}. \quad (1.31)$$

Векторна діаграма (vector plot) будується на основі рівнянь напруг і струмів обмоток трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1\text{фн}} = -\dot{E}_{1\text{фн}} + R_1 \dot{I}_{1\text{фн}} + jX_1 \dot{I}_{1\text{фн}}; \\ \dot{E}'_{2\text{фн}} = \dot{U}'_{2\text{фн}} + R'_2 \dot{I}'_{2\text{фн}} + jX'_2 \dot{I}'_{2\text{фн}}; \\ \dot{I}_{1\text{фн}} = \dot{I}_{0\text{ф}} - \dot{I}'_{2\text{фн}}. \end{cases} \quad (1.32)$$

Побудова діаграми здійснюється в такій послідовності:

- 1) вибирається зручний масштаб струмів та напруг;
- 2) відкладаємо напрям вектора магнітного потоку $\dot{\Phi}$ по дійсній осі (рис. 1.2);
- 3) під кутом α , розрахованим за (1.22), від вектора магнітного потоку $\dot{\Phi}$ в масштабі струму відкладається від початку координат (від точки 0) вектор струму холостого ходу $\dot{I}_{0\text{ф}}$;
- 4) в масштабі напруги від початку координат відкладається вектор приведеної вторинної напруги $\dot{U}'_{2\text{фн}}$;
- 5) в масштабі струму під кутом φ_2 до вектора \dot{U}'_2 з початку координат відкладається вектор приведенного струму вторинної обмотки $\dot{I}'_{2\text{фн}}$;
- 6) з кінця вектора \dot{U}'_2 паралельно вектору $\dot{I}'_{2\text{фн}}$ будується в масштабі напруги вектор спаду напруги $R'_2 \dot{I}'_{2\text{фн}}$;

7) з кінця вектора спаду напруги $R_2 \dot{I}'_{2\phi H}$ під кутом 90° в масштабі напруги будується вектор спаду напруги $jX_2 \dot{I}'_{2\phi H}$ (якщо навантаження активне, то вектор $jX_2 \dot{I}'_{2\phi H}$ відкладається за годинниковою стрілкою, а якщо від'ємне, то в протилежному напрямі);

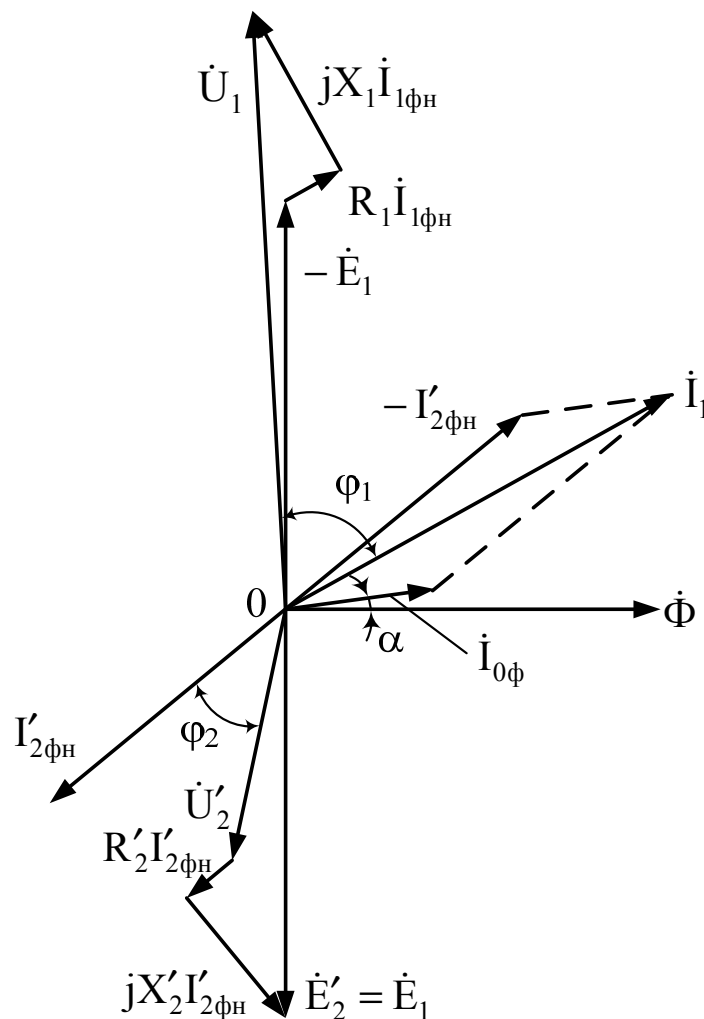


Рисунок 1.2 – Векторна діаграма трансформатора при активно-індуктивному навантаженні

8) згрупувавши вектор струму $\dot{I}'_{2\phi H}$ та вектори напруги $\dot{U}'_{2\phi H}$ й спадів напруг $R'_2 \dot{I}'_{2\phi H}$, $jX'_2 \dot{I}'_{2\phi H}$, потрібно їх розмістити на комплексній площині таким чином, щоб початки векторів $\dot{I}'_{2\phi H}$ та $\dot{U}'_{2\phi H}$ знаходилися в точці 0, а кінець вектора $jX'_2 \dot{I}'_{2\phi H}$ – на уявній осі $-j$;

9) після з'єднання початку координат з кінцем вектора $jX_2' \dot{I}'_{2\text{фн}}$, утвориться вектор приведеної фазної ЕРС вторинної обмотки $\dot{E}'_{2\text{фн}}$, рівний ЕРС первинної обмотки $\dot{E}_{1\text{фн}}$;

10) від початку координат відкладається вектор $-\dot{I}'_{2\text{фн}}$;

11) за правилом паралелограма додаються вектори струмів $-\dot{I}'_{2\text{фн}}$ та $\dot{I}_{0\text{ф}}$. Результатом побудов є вектор струму первинної обмотки $\dot{I}_{1\text{фн}}$;

12) з початку координат відкладається вектор $-\dot{E}_{1\text{фн}}$;

13) з кінця вектора $-\dot{E}_{1\text{фн}}$ в масштабі напруг паралельно вектору $\dot{I}_{1\text{фн}}$ відкладається вектор спаду напруги $R_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$;

14) з кінця вектора спаду напруги $R_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$ під кутом 90° в масштабі напруги в сторону випередження відкладається вектор спаду напруги $jX_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$;

15) після з'єднання початку координат з кінцем вектора $jX_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$, отримується вектор первинної напруги $\dot{U}_{1\text{фн}}$.

1.2 Дослідження паралельної роботи трансформаторів

1.2.1 Трансформатори з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання

Розглядаються два трансформатори з однаковими потужностями $S_{\text{нI}} = S_{\text{нII}} = S_{\text{н}}$, різними коефіцієнтами трансформації $k_I \neq k_{II}$ і однаковими напругами короткого замикання $U_{\text{кI}\%} = U_{\text{кII}\%}$, причому перший трансформатор включений на відпайку $\Delta U_{I\%}$.

Обидва трансформатори живляться від однієї мережі, тому номінальні фазні напруги обох трансформаторів однакові, тобто $U_{1\text{фнI}} = U_{1\text{фнII}} = U_{1\text{фн}}$. Вторинна напруга другого трансформатора $U_{2\text{фнII}} = U_{2\text{фн}}$.

Оскільки перший трансформатор увімкнений на відпайку $\Delta U_{I\%}$, то при цьому збільшується (при $+\Delta U_{I\%}$) або зменшується (при $-\Delta U_{I\%}$) на $\Delta U_{I\%}$ число витків обмотки високої напруги, а вторинна напруга на $\Delta U_{I\%}$ знижується (при $+\Delta U_{I\%}$) або підвищується (при $-\Delta U_{I\%}$), тобто

$$U_{2\text{фнI}} = \left(1 - \frac{\Delta U_{I\%}}{100}\right) \cdot U_{2\text{фнII}}. \quad (1.33)$$

Коефіцієнти трансформації:

$$k_I = \frac{U_{1\text{фнI}}}{U_{2\text{фнI}}}, \quad (1.34)$$

$$k_{II} = \frac{U_{1\text{фнII}}}{U_{2\text{фнII}}}. \quad (1.35)$$

Різниця коефіцієнтів трансформації:

$$\Delta k = |k_I - k_{II}|. \quad (1.36)$$

Середній коефіцієнт трансформації:

$$k_{\text{cp}} = \sqrt{k_I k_{II}}. \quad (1.37)$$

Різниця коефіцієнтів трансформації у відсотках від k_{cp} :

$$\Delta k_{\%} = \frac{\Delta k}{k_{\text{cp}}} \cdot 100. \quad (1.38)$$

Струм зрівноваження (equilibrating current), який протікає по вторинних обмотках:

$$I_{\text{зр2}} = \frac{\Delta k_{\%} \cdot I_{2\text{фн}}}{2U_{\text{к\%}}}. \quad (1.39)$$

При $k_I > k_{II}$, то при номінальному навантаженні другий трансформатор буде перевантаженим за рахунок струму зрівноваження, а при $k_I < k_{II}$ – перевантаженим буде перший трансформатор.

Оскільки перевантажувати трансформатори не можна, то потрібно при визначенні результуючих струмів, які протікають по вторинних обмотках трансформаторів, виходити з того, що результуючий вторинний струм перевантаженого трансформатора не повинен перевищувати його номінального значення, тобто потрібно прийняти при

$$\text{➤ } k_I > k_{II} \quad I_{2II} = I_{2\text{фн}};$$

$$\text{➤ } k_I < k_{II} \quad I_{2I} = I_{2\text{фн}}.$$

Струм $I_{\text{наВ}}$ ($I_{\text{наВІ}}$ при $k_I > k_{II}$ або $I_{\text{наВІІ}}$ при $k_I < k_{II}$), який перевантажений трансформатор віддає в навантаження, визначається з рівняння

$$I_{\text{наВ}} = -I_{\text{вр2}} \cdot \cos(\varphi_k + \varphi_2) \pm \sqrt{[I_{\text{зр2}} \cos(\varphi_k + \varphi_2)]^2 - (I_{\text{зр2}}^2 - I_{2\text{фн}}^2)}. \quad (1.40)$$

Оскільки струм, який віддається в навантаження, повинен бути меншим результуючого струму, то в виразі (1.40) вибирається знак «+» або «-» виходячи з виконання умови:

$$I_{\text{наВ}} \leq I_{2\text{фн}}. \quad (1.41)$$

Напруга на шинах навантаження за рахунок дії струму зрівноваження дорівнює середньому значенню, тобто

$$U_{2\text{ср}} = \frac{U_{1\text{фн}}}{k_{\text{ср}}}. \quad (1.42)$$

Струми, що віддаються обома трансформаторами навантаженню однакові за значенням, тобто $I_{\text{наВІ}} = I_{\text{наВІІ}}$.

Результуючий струм вторинної обмотки недовантаженого трансформатора (I_{2I} при $k_I > k_{II}$ і I_{2II} при $k_I < k_{II}$) становить:

$$I_2 = \sqrt{I_{\text{наВ}}^2 + I_{\text{зр2}}^2 + 2I_{\text{наВ}} \cdot I_{\text{зр2}} \cos(\varphi_k \pm \varphi_2)}. \quad (1.43)$$

У формулі (1.41) знак «+» береться при активно-індуктивному чи індуктивному навантаженні, а знак «-» – при активно-ємнісному чи ємнісному навантаженні.

Ступінь завантаження трансформаторів результуючими струмами:

$$N_I = \frac{I_{2I}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100; \quad (1.44)$$

$$N_{II} = \frac{I_{2II}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100. \quad (1.45)$$

Установлена потужність:

$$S_{\text{уст}} = S_{\text{нІ}} + S_{\text{нІІ}} = 2S_{\text{н}}. \quad (1.46)$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} = 3U_{2cp}(I_{навлI} + I_{навлII}). \quad (1.47)$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S = S_{уст} - S_{\Sigma}, \quad (1.48)$$

а у відсотках –

$$\Delta S_{\%} = \frac{\Delta S}{S_{уст}} \cdot 100. \quad (1.49)$$

1.2.2 Трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання

Розглядаються два трансформатори з однаковими потужностями $S_{нI} = S_{нII} = S_{н}$, однаковими коефіцієнтами трансформації $k_I = k_{II}$ і різними напругами короткого замикання $U_{кII\%} \neq U_{кI\%}$, причому напруга короткого замикання другого трансформатора на $\Delta U_{к3\%}$ більша, ніж першого:

$$U_{кII\%} = \left(1 + \frac{\Delta U_{к3\%}}{100}\right) \cdot U_{кI\%}. \quad (1.50)$$

При паралельній роботі (parallel work) трансформаторів з різними напругами короткого замикання їхні струми навантаження розподіляються обернено пропорційно напругам короткого замикання і прямо пропорційні їх номінальним потужностям.

При $U_{кI\%} < U_{кII\%}$ перший трансформатор віддає в навантаження струм в $1 + (\Delta U_{к3\%}/100)$ разів більший, ніж другий трансформатор. При $U_{кI\%} > U_{кII\%}$ другий трансформатор віддає в навантаження струм в $1 + (\Delta U_{к3\%}/100)$ разів більший, ніж перший трансформатор.

Для запобігання перевантаження потрібно прийняти струм навантаження перевантаженого трансформатора рівним номінальному струму вторинної обмотки:

- при $U_{кI\%} < U_{кII\%}$ $I_I = I_{2фн}$;
- при $U_{кI\%} > U_{кII\%}$ $I_{II} = I_{2фн}$.

Тоді недовантажений трансформатор буде віддавати в навантаження струм $I_{I(II)}$ (I_{II} при $U_{кІ\%} < U_{кІІ\%}$; I_I при $U_{кІ\%} > U_{кІІ\%}$)

$$I_{I(II)} = \frac{I_{2фн}}{1 + \frac{\Delta U_{кз\%}}{100}}. \quad (1.51)$$

Ступінь завантаження трансформаторів:

$$N_I = \frac{I_I}{I_{2фн}} \cdot 100; \quad (1.52)$$

$$N_{II} = \frac{I_{II}}{I_{2фн}} \cdot 100. \quad (1.53)$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} = 3U_{2фн} \cdot (I_I + I_{II}). \quad (1.54)$$

Недовикористана потужність ΔS розраховується за (1.48) та (1.49) з врахуванням усталеної потужності $S_{уст}$, розрахованої за (1.46), та сумарної потужності S_{Σ} , розрахованої за (1.54).

1.3 Розрахунок ударних струмів

Ударний струм короткого замикання (short circuit percussive current):

$$i_{к.уд} = K_{уд} I_{к.м}, \quad (1.55)$$

де $K_{уд}$ – ударний коефіцієнт:

$$K_{уд} = 1 + e^{-\pi \frac{R_K}{X_K}}; \quad (1.56)$$

$I_{к.м}$ – амплітуда усталеного струму короткого замикання:

$$I_{к.м} = \sqrt{2} I_H \frac{100}{U_{к\%}}, \quad (1.57)$$

де I_n – номінальний струм в обмотці.

Амплітуда усталеного струму короткого замикання:

➤ для первинної обмотки

$$I_{к.м1} = \sqrt{2} I_{1фн} \frac{100}{U_{к\%}}; \quad (1.58)$$

➤ для вторинної обмотки

$$I_{к.м2} = \sqrt{2} I_{2фн} \frac{100}{U_{к\%}}. \quad (1.59)$$

Ударні струми короткого замикання:

➤ для первинної обмотки

$$i_{1к.уд} = K_{уд} I_{к.м1}; \quad (1.60)$$

➤ для вторинної обмотки

$$i_{2к.уд} = K_{уд} I_{к.м2}. \quad (1.61)$$

1.4 Розрахунок і вибір силового трансформатора для системи ТП-ДПС

Для розрахунків попередньо приймається, що значення випрямленої напруги U_d дорівнює номінальній напрузі U_n двигуна постійного струму ($U_d = U_n$), значення випрямленого струму I_d – номінальному струму I_n ($I_d = I_n$) двигуна постійного струму, а значення випрямленої потужності P_d –

$$P_d = U_n \cdot I_n. \quad (1.62)$$

Типова (габаритна) потужність трансформатора:

$$S_T = k_S P_d, \quad (1.63)$$

де k_S – коефіцієнт схеми випрямлення за потужністю (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Коефіцієнти схем та їх параметри

Коефіцієнт	Схема випрямлення				
	однофазна		трифазна		
	із середньою точкою трансформатора	мостова	нульова (схема Міткевича)	зигзаг з нулем	мостова (схема Ларіонова)
k_S	1,34	1,11	1,35	1,46	1,045

Трансформатор вибирається за типовою потужністю S_T , первинною U_{1H} та вторинною U_{2H} напругами, орієнтуючись на випрямлену напругу U_d (напругу двигуна U_H). Параметри вибраного трансформатора подаються у вигляді табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Технічні дані вибраного трансформатора

Тип	S_H , кВ·А	U_{1H} , кВ	U_{2H} , кВ	$U_{K\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0 , кВт	P_K , кВт	Схема і група з'єднань

2 РОЗРАХУНОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГУНА

2.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна

Номінальна фазна напруга $U_{1\text{фн}}$ обмотки статора залежить від номінальної лінійної напруги $U_{1\text{лн}}$. Вона визначається при з'єднанні обмотки в

➤ «зірку»:

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}}; \quad (2.1)$$

➤ «трикутник»:

$$U_{1\text{фн}} = U_{1\text{лн}}. \quad (2.2)$$

Номінальний фазний струм $I_{1\text{фн}}$ обмотки статора також залежить від номінального лінійного струму $I_{1\text{лн}}$. Він визначається при її з'єднанні обмотки в

➤ «зірку»:

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}}; \quad (2.3)$$

➤ «трикутник»:

$$I_{1\text{фн}} = \frac{I_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}}. \quad (2.4)$$

Розраховуємо Г-подібну схему заміщення (рис. 2.1).

Активна потужність, що споживається двигуном на холостому ході, визначається через фазний струм холостого ходу $I_{0\text{ф}}$ і коефіцієнт потужності холостого ходу $\cos\varphi_0$:

$$P_0 = 3U_{1\text{фн}} I_{0\text{ф}} \cos\varphi_0. \quad (2.5)$$

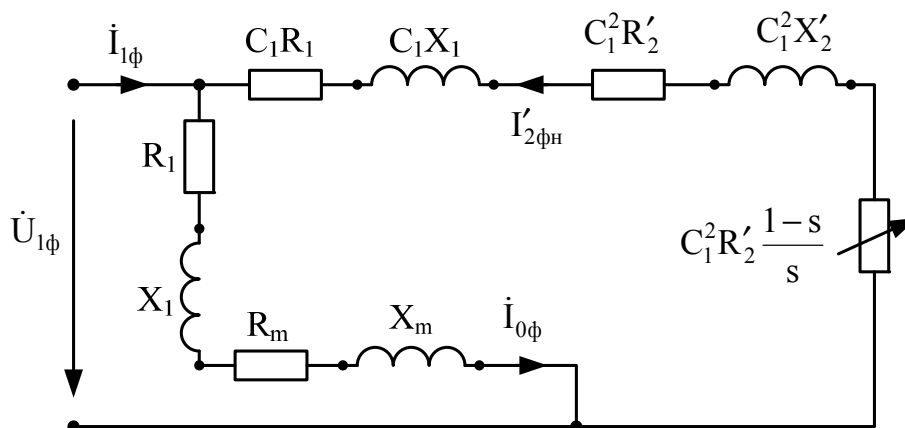


Рисунок 2.1 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Електричні втрати (electrical losses) в обмотці статора на холостому ході:

$$\Delta p_{\text{ел10}} = 3I_{0\phi}^2 R_1, \quad (2.6)$$

де R_1 – активний опір обмотки статора.

Втрати потужності в сталі статора (магнітні втрати):

$$\Delta p_{\text{м1}} = P_0 - \Delta p_{\text{ел10}} - \Delta p_{\text{мех}}, \quad (2.7)$$

де $\Delta p_{\text{мех}}$ – механічні втрати.

Повний опір обмотки статора:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \quad (2.8)$$

де X_1 – реактивний опір обмотки статора.

Повний опір двигуна в режимі холостого ходу:

$$Z_0 = \frac{U_{1\phi\text{н}}}{I_{0\phi}}. \quad (2.9)$$

Опори кола намагнічування схеми заміщення:

➤ повний

$$Z_{\text{м}} = Z_0 - Z_1; \quad (2.10)$$

➤ активний

$$R_m = \frac{\Delta p_{m1}}{3I_{0\phi}^2}; \quad (2.11)$$

➤ реактивний

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (2.12)$$

Коефіцієнт схеми заміщення:

$$C_1 = 1 + \frac{X_1}{X_m}. \quad (2.13)$$

Далі визначаються параметри головної вітки схеми заміщення: C_1R_1 , C_1X_1 , а також $C_1^2R'_2$ і $C_1^2X'_2$ через приведені активний R'_2 та реактивний X'_2 опори обмотки ротора.

2.2 Розрахунок параметрів двигуна при номінальному навантаженні

Номінальне ковзання (rated slipping):

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1}, \quad (2.14)$$

де n_1 – синхронна частота обертання магнітного поля;

n_H – номінальна частота обертання.

Повний опір головної вітки схеми заміщення:

$$Z_\Sigma = \sqrt{\left(C_1R_1 + \frac{C_1^2R'_2}{s_H}\right)^2 + (C_1X_1 + C_1^2X'_2)^2}. \quad (2.15)$$

Приведений струм ротора:

$$I'_{2\phi} = \frac{U_{1\phi H}}{Z_\Sigma}. \quad (2.16)$$

Косинус і синус кута між векторами $\dot{U}_{1\phi H}$ і $I'_{2\phi}$:

$$\cos \varphi'_2 = \frac{C_1 R_1 + \frac{C_1^2 R'_2}{s_H}}{Z_\Sigma}; \quad (2.17)$$

$$\sin \varphi'_2 = \frac{C_1 X_1 + C_1^2 X'_2}{Z_\Sigma}. \quad (2.18)$$

Активна і реактивна складові струму головної вітки:

$$I'_{2a} = I'_{2\phi} \cos \varphi'_2; \quad (2.19)$$

$$I'_{2p} = I'_{2\phi} \sin \varphi'_2. \quad (2.20)$$

Активна і реактивна складові струму холостого ходу:

$$I_{0a} = I_{0\phi} \cos \varphi_0; \quad (2.21)$$

$$I_{0p} = I_{0\phi} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_0}. \quad (2.22)$$

Активна і реактивна складові повного струму статора:

$$I_{1a} = I_{0a} + I'_{2a}; \quad (2.23)$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p}. \quad (2.24)$$

Номінальний фазний струм, що споживається двигуном із мережі:

$$I_{1\phi H} = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}. \quad (2.25)$$

Коефіцієнт потужності двигуна:

$$\cos \varphi_{1H} = \frac{I_{1a}}{I_{1\phi H}}. \quad (2.26)$$

Номінальна активна потужність, що споживається двигуном із мережі:

$$P_{1H} = 3U_{1\phi H} I_{1\phi H} \cos \varphi_{1\phi H}. \quad (2.27)$$

Втрати потужності в двигуні:

➤ в обмотці статора

$$\Delta p_{e1} = 3I_{1\phi}^2 R_1; \quad (2.28)$$

➤ в обмотці ротора

$$\Delta p_{e2} = 3I_{2\phi}'^2 C_1^2 R_2'; \quad (2.28)$$

➤ додаткові

$$\Delta p_d = 0,005P_{1H}. \quad (2.29)$$

Сумарні втрати (total capacity losses) потужності в двигуні:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{e1} + \Delta p_{e2} + \Delta p_d + \Delta p_{m1} + \Delta p_{mex}. \quad (2.30)$$

Корисна потужність (efficient capacity) на валу:

$$P_{2H} = P_{1H} - \Delta p_{\Sigma}. \quad (2.31)$$

Відхилення розрахованої величини P_{2H} корисної потужності від заданої P_H

$$\Delta P_{2H} = \frac{P_{2H} - P_H}{P_H} \cdot 100 \quad (2.31)$$

не повинно перевищувати 5%.

Номінальний ККД:

$$\eta_H = \frac{P_H}{P_{1H}} \cdot 100. \quad (2.32)$$

Кількість пар полюсів обмотки статора:

$$p = \frac{60f_1}{n_1}. \quad (2.33)$$

Номінальний електромагнітний обертовий момент (nominal electromagnetic rotating moment) двигуна:

$$M_{\text{н}} = \frac{3pU_{1\text{фн}}^2 \frac{C_1^2 R'_2}{s_{\text{н}}}}{2\pi f_1 \left[\left(C_1 R_1 + C_1^2 \frac{R'_2}{s_{\text{н}}} \right)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X'_2)^2 \right]}. \quad (2.34)$$

2.3 Розрахунок пускового та максимальних моментів

Пусковий момент (starting moment) двигуна (при ковзанні $s = 1$):

$$M_{\text{п}} = \frac{3pU_{1\text{фн}}^2 C_1^2 R'_2}{2\pi f_1 \left[(C_1 R_1 + C_1^2 R'_2)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X'_2)^2 \right]}. \quad (2.35)$$

Критичне ковзання (critical slidding):

$$s_{\text{кр}} = \frac{C_1^2 R'_2}{\sqrt{(C_1 R_1)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X'_2)^2}}. \quad (2.36)$$

Критична частота обертання (critical frequency of rotation) ротора:

$$n_{\text{кр}} = (1 - s_{\text{кр}}) n_1. \quad (2.37)$$

Максимальний момент (maximal moment):

$$M_{\text{п}} = \frac{3pU_{1\text{фн}}^2}{4\pi f_1 \left[\sqrt{(C_1 R_1)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X'_2)^2} + C_1 R_1 \right]}. \quad (2.38)$$

2.4 Розрахунок та побудова природної механічної й робочих характеристик

Механічна характеристика (mechanical characteristics) $s = f(M)$ будується за формулою (2.34) при зміні ковзання від 0,0001 до 1 (рис. 2.2).

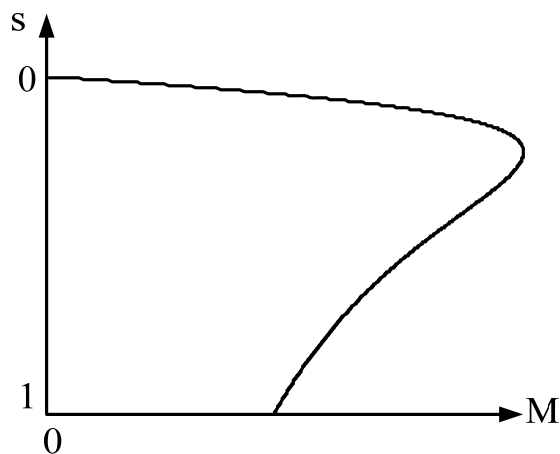


Рисунок 2.2 – Механічна характеристика асинхронного двигуна

Для побудови робочих характеристик (working characteristics) двигуна $(I_1, P_1, \eta, \cos\varphi_1, n, s, M) = f(P_2)$ потрібно задатися змінюю ковзання від близького до нуля (наприклад, 0,0001) до $1,2s_n$ та перевести осі характеристик у відносні одиниці для наочності (рис. 2.3).

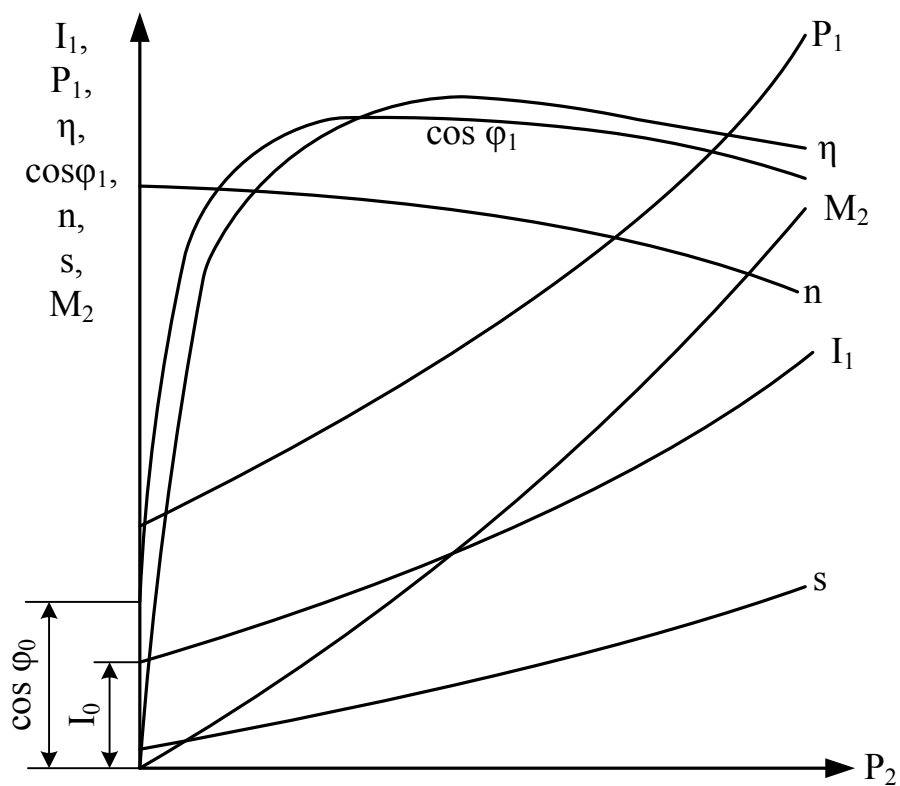


Рисунок 2.3 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

2.5 Розрахунок та побудова механічних характеристик при заданому способі регулювання частоти обертання вала двигуна

2.5.1 Частотне регулювання швидкості

Частотне регулювання швидкості обертання (regulating of rotating speed) асинхронного двигуна розглядається для двох випадків:

1) при сталому моменті $M = \text{const}$ (рис. 2.4):

$$\frac{U_{1\phi}}{f_1} = \text{const.}; \quad (2.39)$$

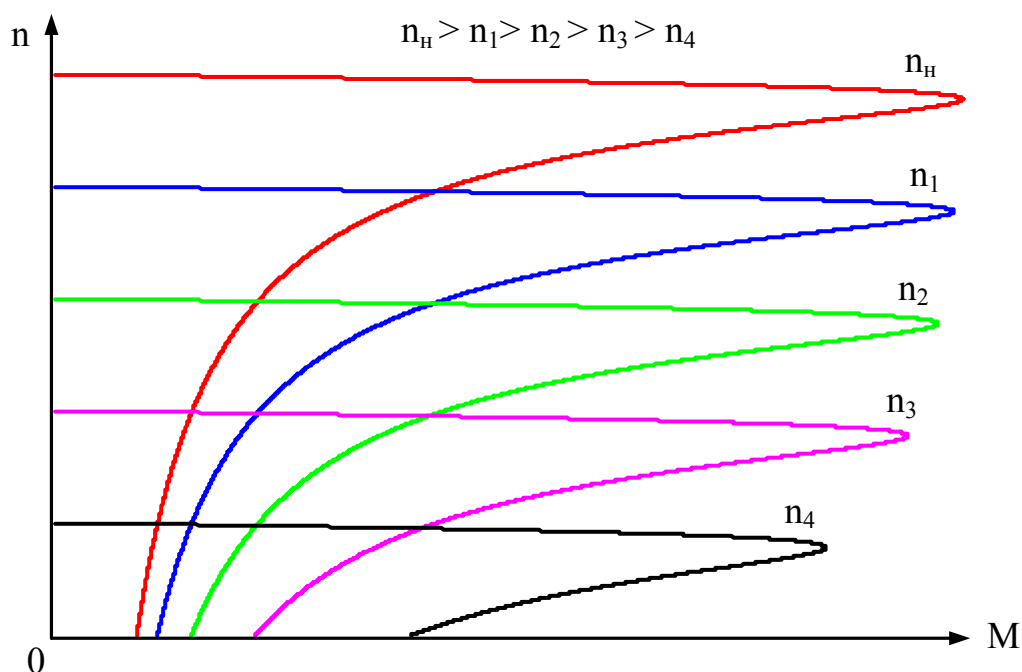


Рисунок 2.4 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при різних f_1 і $M = \text{const}$

2) при необхідності забезпечення режиму сталої потужності двигуна $P_2 = \text{const}$ (рис. 2.5):

$$\frac{U_{1\phi}}{\sqrt{f_1}} = \text{const.} \quad (2.40)$$

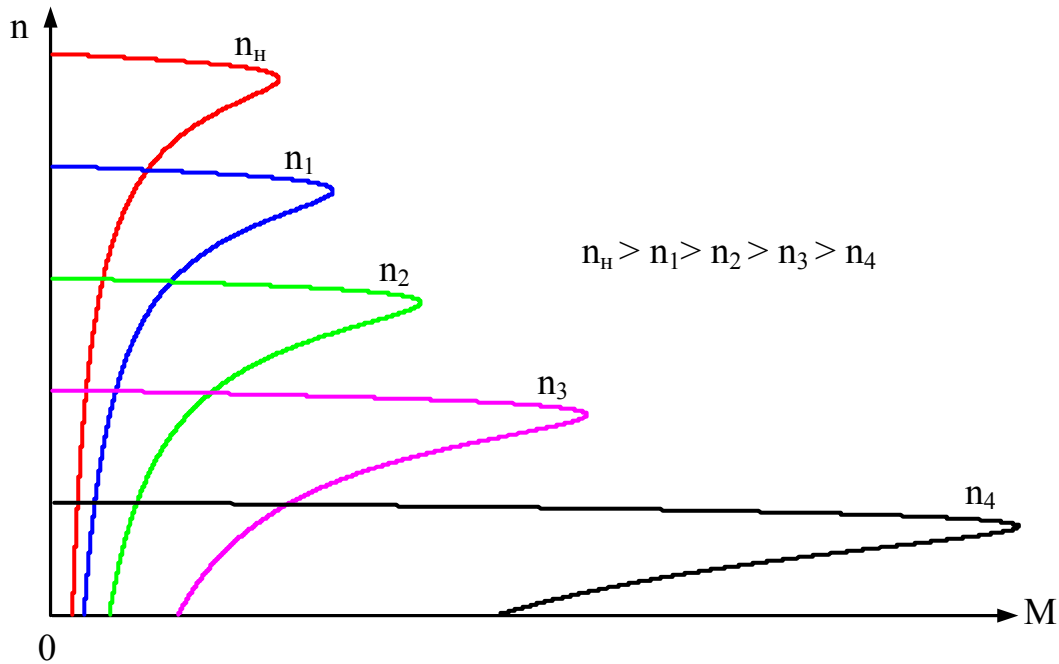


Рисунок 2.5 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при різних f_1 і $P_2 = \text{const}$

Графіки $n(M)$ побудувати для частот $f_1 = (50; 40; 30; 20; 10)$ Гц при $0 \leq n \leq n_1$. При цьому слід пам'ятати, що при зміні частоти f_1 автоматично змінюється і значення синхронної частоти n_1 :

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \quad (2.41)$$

тобто кожній частоті f_1 буде відповідати своє значення n_1 . Крім того, змінюючи частоту f_1 відповідно до значень, вказаних вище, отримують відповідні значення напруги $U_{1\phi}$, які і використовують при розрахунку частотних характеристик.

2.5.2 Регулювання частоти обертання зміненням первинної напруги

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміненням первинної напруги здійснюється при $0 \leq U_{1\phi} \leq U_{1\phi n}$.

Графіки $M(n)$ побудувати при напругах $U_{1\phi} = (1; 0,8; 0,6; 0,4) U_{1\phi n}$ за формулою

$$M(n) = \frac{3pU_{1\phi}^2 \frac{C_1^2 R'_2}{n_1 - n}}{n_1 \left[\left(C_1 R_1 + C_1^2 \frac{R'_2}{\frac{n_1 - n}{n_1}} \right)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X'_2)^2 \right]}. \quad (2.42)$$

Зовнішній вигляд механічних характеристик при $U_{1\phi} = \text{var}$ показаний на рис. 2.6.

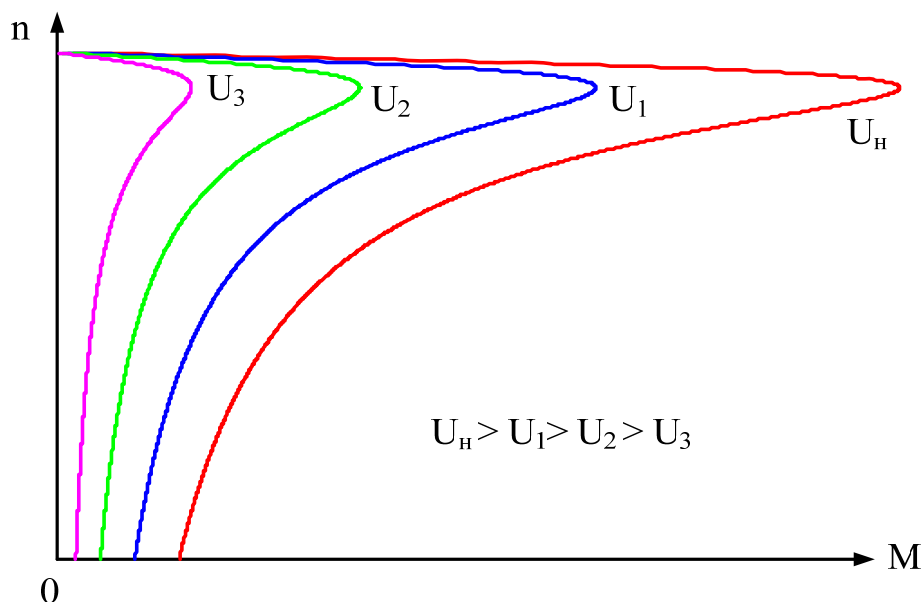


Рисунок 2.6 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при $U_{1\phi} = \text{var}$

2.5.3 Регулювання частоти обертання зміненням опору в колі ротора

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміненням опору в колі ротора здійснюється при зміні сумарного опору в колі ротора за умови, що останній є фазного типу виконання.

Графіки $M(n)$ побудувати з використанням формули (2.43) при значеннях опору $R'_2 = (0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1) R_d$, де R_d – значення додаткового опору, при вмиканні якого в коло ротора при пуску можна отримати максимальний момент:

$$R_d = \sqrt{(C_1 R_1)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X_2')^2} - C_1^2 R_2'. \quad (2.43)$$

Зовнішній вигляд механічних характеристик при $R_2' = \text{var}$ показаний на рис. 2.7.

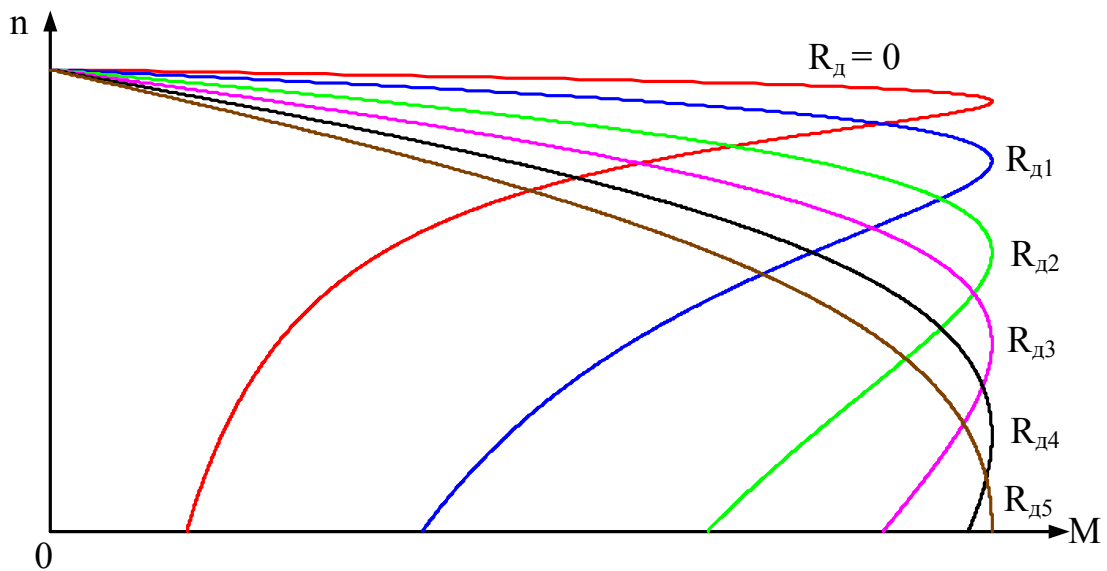


Рисунок 2.7 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при $R_2' = \text{var}$

3 РОЗРАХУНОК ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1 Режим генератора

3.1.1 Розрахунок номінальних величин для генератора незалежного збудження

Схема електрична принципова генератора незалежного збудження подана на рис. 3.1, на якій прийняті такі позначення: $R_{нав}$ – опір навантаження; QF – автоматичний вимикач; PV – вольтметр; PA – амперметр; G – генератор; ОДП – обмотка додаткових полюсів; R_3 – опір реостата кола збудження; НОЗ – незалежна обмотка збудження.

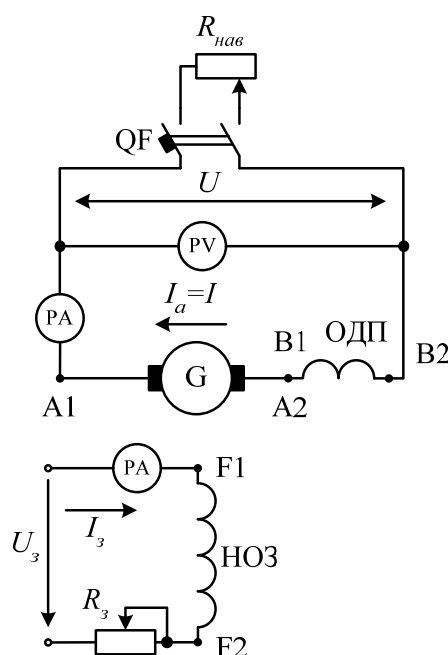


Рисунок 3.1 – Схема електрична принципова генератора незалежного збудження

Номінальний струм навантаження генератора:

$$I_H = \frac{P_H}{U_H}. \quad (3.1)$$

ЕРС генератора незалежного збудження на холостому ході у відносних одиницях:

$$E_{01*} = 1 + \Delta U_{я*} + \Delta E_*, \quad (3.2)$$

де $\Delta U_{я*}$ – спад напруги в колі якоря у відносних одиницях:

$$\Delta U_{я*} = \frac{I_H R_{a75} + \Delta U_{щ}}{U_H}, \quad (3.3)$$

де $\Delta U_{щ}$ – спад напруги на щітках ($\Delta U_{щ} = 2$ В на одну пару полюсів);

ΔE_* – зменшення ЕРС за рахунок розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря:

$$\Delta E_* = 0,3 \Delta U_{я*}, \quad (3.4)$$

R_{a75} – сумарний опір обмоток якоря і додаткових полюсів при робочій температурі 75° С:

$$R_{a75} = 1,215 (R_{a20} + R_{д20}). \quad (3.5)$$

За вихідними даними будується характеристика холостого ходу $E_{0*} = f(I_{3*})$ машини постійного струму (рис. 3.2).

Опір обмотки збудження при робочій температурі:

$$R_{з75} = 1,215 (R_{з20}). \quad (3.6)$$

Номінальний струм збудження:

$$I_{зH} = \frac{U_H}{R_{з75}}. \quad (3.7)$$

3.1.2 Побудова характеристичного трикутника для генератора незалежного збудження

Графічні побудови для отримання характеристичного трикутника та розрахунок номінальних величин генератора здійснюють в такій послідовності:

- 1) будують характеристику холостого ходу генератора у відносних одиницях $E_{0*} = f(I_{3*})$ (рис. 3.2);

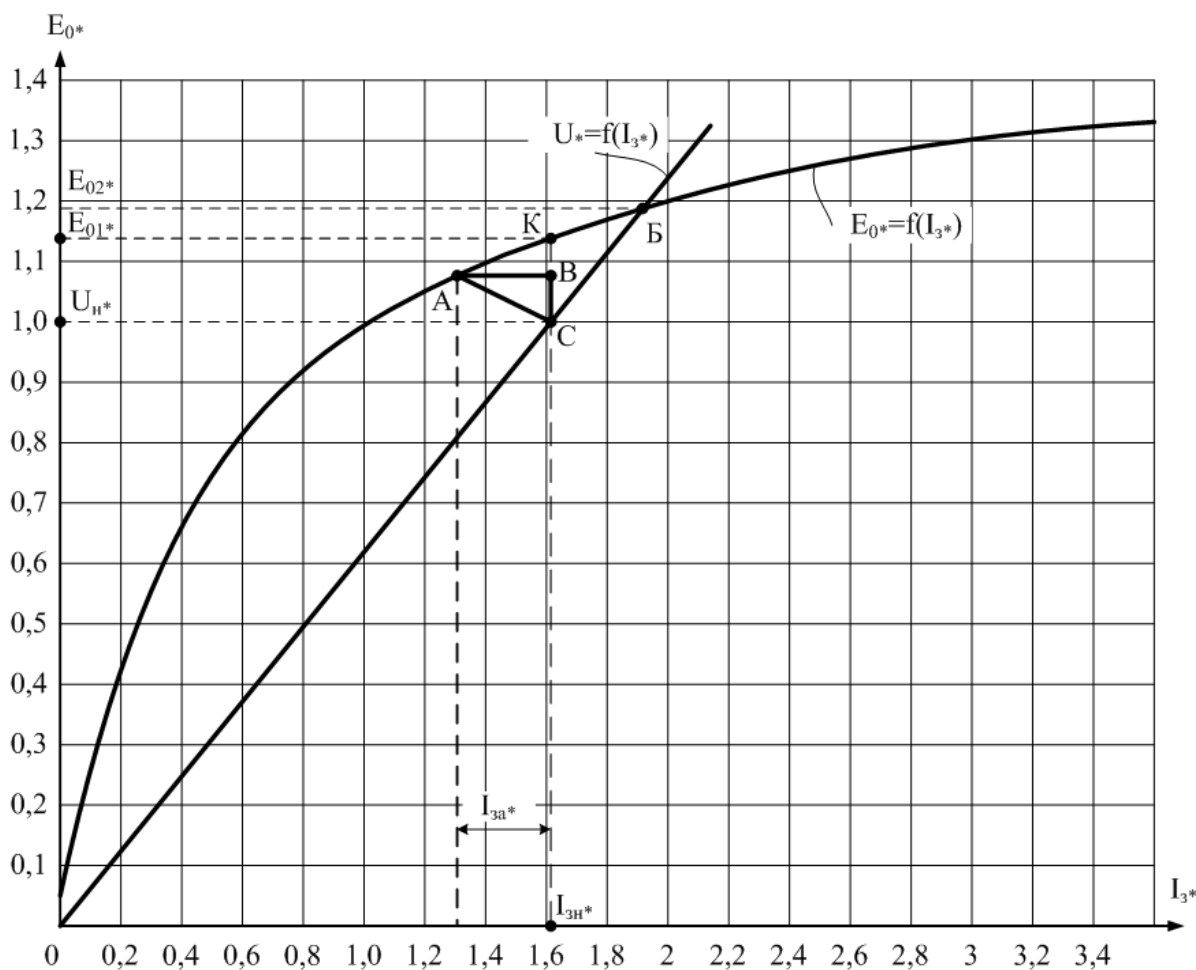


Рисунок 3.2 – Характеристики холостого ходу та кола збудження

- 2) на осі ординат ЕРС відкладають значення E_{01*} , розраховане за (3.2), що відповідає ЕРС генератора незалежного збудження;
- 3) провівши пряму з точки, що відповідає E_{01*} , паралельну осі абсцис I_{3*} до перетину з характеристикою холостого ходу, отримують точку К;
- 4) опустивши перпендикуляр з точки К на вісь I_{3*} , отримують відносне значення відносного номінального струму збудження $I_{3н*}$;
- 5) розраховують базове значення струму збудження генератора:

$$I_{30} = I_{3н} / I_{3н*}; \quad (3.8)$$

- 6) на осі ординат відкладають відносне значення номінальної напруги $U_{н*} = 1$;
- 7) провівши пряму з точки, що відповідає $U_{н*}$, паралельну осі абсцис I_{3*} до перетину з перпендикуляром, що відповідає $I_{3н*}$, отримують точку С;
- 8) з точки С відкладають відрізок $CB = \Delta U_{я*}$, розрахований за (3.3);

- 9) з точки В паралельно осі абсцис проводять відрізок ВА до перетину з характеристикою холостого ходу;
- 10) з'єднавши точки А, В та С, отримують характеристичний трикутник АВС.

3.1.3 Розрахунок струму збудження, необхідного для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря

Катет АВ характеристичного трикутника АВС (рис. 3.2) характеризує струм збудження у відносних одиницях, необхідний для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря:

$$AB = I_{за*} = I_{за} / I_{з0}, \quad (3.9)$$

звідки реальне значення струму збудження, необхідного для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря:

$$I_{за} = I_{за*} I_{з0}. \quad (3.10)$$

Провівши пряму з початку координат через точку С, отримують характеристику кола збудження $U_* = f(I_{з*})$. З точки Б, точки перетину характеристики холостого ходу $E_{0*} = f(I_{з*})$ з характеристикою кола збудження $U_* = f(I_{з*})$, проводять пряму до перетину з віссю ординат, в результаті чого отримують ЕРС генератора паралельного збудження E_{02} , схема електрична принципова якого подана на рис. 3.3, на якому ШОЗ – шунтова обмотка збудження.

Номінальні зміни напруг генераторів незалежного $\Delta U_{н.нез}$ і паралельного $\Delta U_{н.пар}$ збудження:

$$\Delta U_{н.нез} = \frac{E_{01} - U_{н}}{U_{н}} \cdot 100 = (E_{01*} - 1) \cdot 100; \quad (3.11)$$

$$\Delta U_{н.пар} = (E_{02*} - 1) \cdot 100. \quad (3.12)$$

ЕРС генератора при номінальному навантаженні:

$$E_{нг} = (1 + \Delta U_{я*}) U_{н}. \quad (3.13)$$

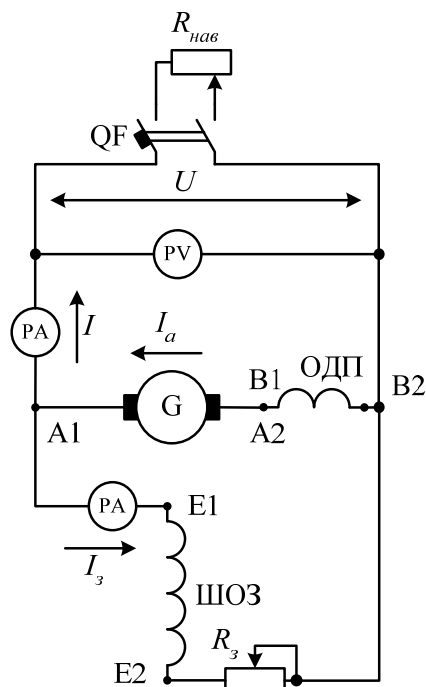


Рисунок 3.3 – Схема електрична принципова генератора паралельного збудження

3.1.4 Розрахунок втрат та ККД для генератора паралельного збудження

Втрати на збудження (excitation losses):

$$\Delta p_{\text{зн}} = I_{\text{зн}} U_{\text{н}}. \quad (3.14)$$

Постійні втрати (constant losses):

$$\Delta p_{\text{постн}} = \Delta p_{\text{мех}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{зн}}, \quad (3.15)$$

де $\Delta p_{\text{мех}}$ – механічні втрати;

$\Delta p_{\text{м}}$ – магнітні втрати.

Номінальний струм якоря:

$$I_{\text{ян}} = I_{\text{н}} + I_{\text{зн}}. \quad (3.15)$$

Втрати в колі якоря в номінальному режимі

$$\Delta p_{\text{ен}} = I_{\text{ян}}^2 R_{\text{а75}} + I_{\text{ян}} \Delta U_{\text{щ}}. \quad (3.17)$$

Додаткові втрати (additional losses) в номінальному режимі:

$$\Delta p_{\text{дн}} = 0,01P_{\text{н}}. \quad (3.18)$$

Змінні втрати (variable losses) в машині в номінальному режимі:

$$\Delta p_{\text{змінн}} = \Delta p_{\text{ен}} + \Delta p_{\text{дн}}. \quad (3.19)$$

Сумарні втрати в машині в номінальному режимі:

$$\Delta p_{\Sigma} = \Delta p_{\text{постн}} + \Delta p_{\text{змінн}}. \quad (3.20)$$

Номінальна підведена до генератора потужність

$$P_{1\text{н}} = P_{\text{н}} + \Delta p_{\Sigma}. \quad (3.21)$$

Номінальний ККД:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{P_{1\text{н}}} \cdot 100. \quad (3.22)$$

Коефіцієнт навантаження (load factor), при якому $\eta = \eta_{\text{max}}$:

$$\beta_{\text{max}} = \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{постн}}}{\Delta p_{\text{змінн}}}}, \quad (3.23)$$

а корисна потужність при цьому

$$P_{2\text{м}} = \beta_{\text{м}} P_{\text{н}}. \quad (3.24)$$

Максимальний ККД:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{P_{2\text{м}} \cdot 100}{P_{2\text{м}} + 2\Delta p_{\text{постн}}}. \quad (3.25)$$

3.2 Режим двигуна

3.2.1 Розрахунок номінальних параметрів двигуна

Схеми електричні двигунів постійного струму різного типу збудження подані на рис. 3.4, на якому СОЗ – серієсна обмотка збудження, М – двигун.

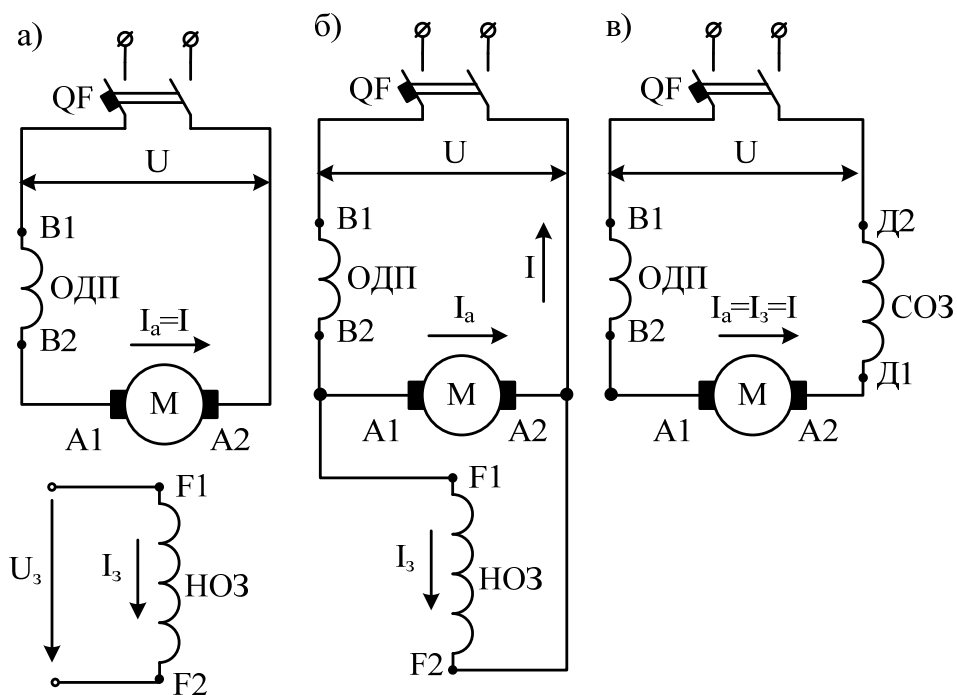


Рисунок 3.4 – Схеми двигунів постійного струму з незалежним (а), паралельним (б), послідовним (в) збудженням

Конструктивні сталі машини:

$$c_e = \frac{pN}{60a}, \quad (3.26)$$

$$c_m = \frac{pN}{2\pi a}, \quad (3.27)$$

де p – кількість пар головних полюсів;

N – кількість активних провідників обмотки якоря;

a – кількість паралельних віток обмотки якоря.

Номінальний струм I_n , що споживається двигуном з мережі:

$$I_n = \frac{P_n}{U_n}; \quad (3.28)$$

Номінальний струм збудження для двигуна:

➤ незалежного збудження

$$I_{zn} = \frac{U_{zn}}{R_{375}}, \quad (3.29)$$

де $U_{\text{зн}}$ – номінальна напруга збудження двигуна незалежного збудження (прийняти рівною $U_{\text{н}}$);

➤ паралельного збудження

$$I_{\text{зн}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{375}}; \quad (3.30)$$

➤ послідовного збудження:

$$I_{\text{зн}} = I_{\text{н}}. \quad (3.31)$$

Номінальний струм якоря для двигуна:

➤ незалежного та послідовного збудження

$$I_{\text{ян}} = I_{\text{н}}; \quad (3.32)$$

➤ паралельного збудження

$$I_{\text{ян}} = I_{\text{н}} - I_{\text{зн}}. \quad (3.33)$$

Повний опір кола якоря при 20°C :

$$R_{\text{а}20} = R_{\text{я}20} + R_{\text{д}20} + R_{\text{щ}20}, \quad (3.34)$$

де $R_{\text{щ}20}$ – перехідний опір щіткових контактів при 20°C :

$$R_{\text{щ}20} = \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{ян}} \cdot 1,215}, \quad (3.35)$$

де $I_{\text{ян}}$ – номінальний струм якоря.

Повний опір якорного кола при робочій температурі 75°C :

$$R_{\text{а}75} = 1,215 R_{\text{а}20}. \quad (3.36)$$

ЕРС двигуна в номінальному режимі:

$$E_{\text{нд}} = U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} \cdot R_{\text{а}75}. \quad (3.37)$$

Номінальна частота обертання двигуна:

$$n_{нд} = \frac{n_n E_{нд}}{E_{нг}}. \quad (3.38)$$

Номінальний магнітний потік:

$$\Phi_n = \frac{E_{нд}}{c_e n_{нд}}. \quad (3.39)$$

Номінальний обертовий момент:

$$M_n = c_m \Phi_n I_{ян}. \quad (3.40)$$

3.2.2 Розрахунок і побудова природної механічної характеристики

3.2.2.1 Двигун паралельного збудження

Природна механічна характеристика двигуна паралельного збудження:

$$n = \frac{U_n}{c_e \Phi_n} - \frac{R_{a75} \cdot M}{c_e c_m \Phi_n^2}. \quad (3.41)$$

Зовнішній вигляд природної механічної характеристики двигуна паралельного збудження подано на рис. 3.5.

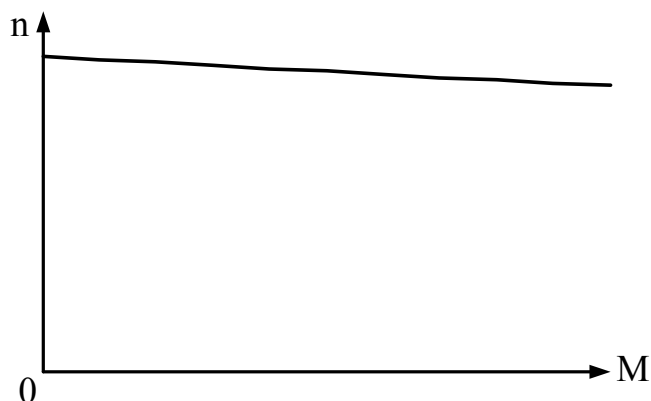


Рисунок 3.5 – Природна механічна характеристика двигуна паралельного збудження

3.2.2.2 Двигун послідовного збудження

Природна механічна характеристика двигуна послідовного збудження:

$$n = \frac{U_n}{c_e k_\phi \sqrt{\frac{M}{c_m k_\phi}}} - \frac{R_{a75}}{c_e k_\phi}, \quad (3.42)$$

де k_ϕ – коефіцієнт пропорційності магнітного потоку:

$$k_\phi = \frac{\Phi_n}{I_{zn}}, \quad (3.43)$$

де для двигуна послідовного збудження $I_{zn} = I_{ян}$.

Зовнішній вигляд природної механічної характеристики двигуна послідовного збудження подано на рис. 3.6.

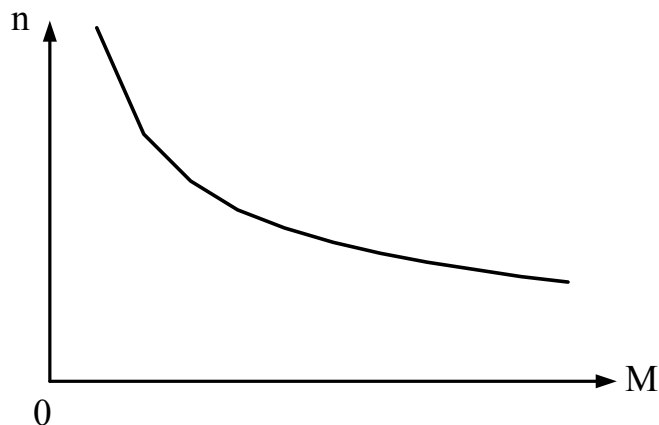


Рисунок 3.6 – Природна механічна характеристика двигуна послідовного збудження

3.2.2.3 Двигун незалежного збудження

Природна механічна характеристика двигуна незалежного збудження:

$$n = \frac{U_n}{c_e k_\phi I_{zn}} - \frac{R_{a75} \cdot M}{c_e c_m k_\phi I_{zn}}. \quad (3.44)$$

У формулі (3.43) підставляється коефіцієнт пропорційності магнітного потоку k_ϕ , розрахований за (3.42), в якій номінальний струм збудження I_{zn} визначається за (3.29).

Зовнішній вигляд природної механічної характеристики двигуна незалежного збудження подано на рис. 3.7.

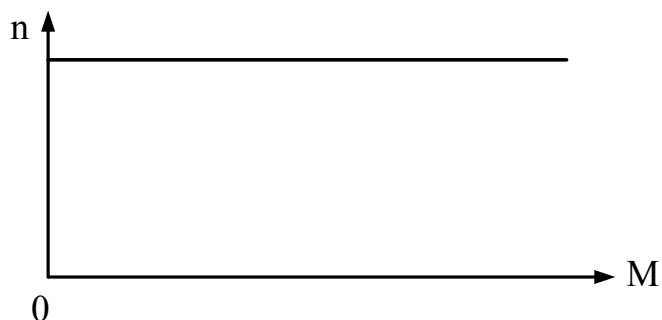


Рисунок 3.7 – Природна механічна характеристика двигуна незалежного збудження

3.2.3 Розрахунок та побудова механічних характеристик при різних способах регулювання частоти обертання вала двигуна

Для розрахунку й побудови механічних характеристик двигуна при:

- регулюванні напруги живлення потрібно у виразі природної механічної характеристики (для двигуна паралельного збудження – (3.40), для двигуна послідовного збудження – (3.41), для двигуна незалежного збудження – (3.43)) замість U_H взяти напруги: $0,2U_H$; $0,4U_H$; $0,6U_H$; $0,8U_H$; U_H . Зовнішній вигляд характеристик показаний на рис. 3.8 – рис. 3.10;

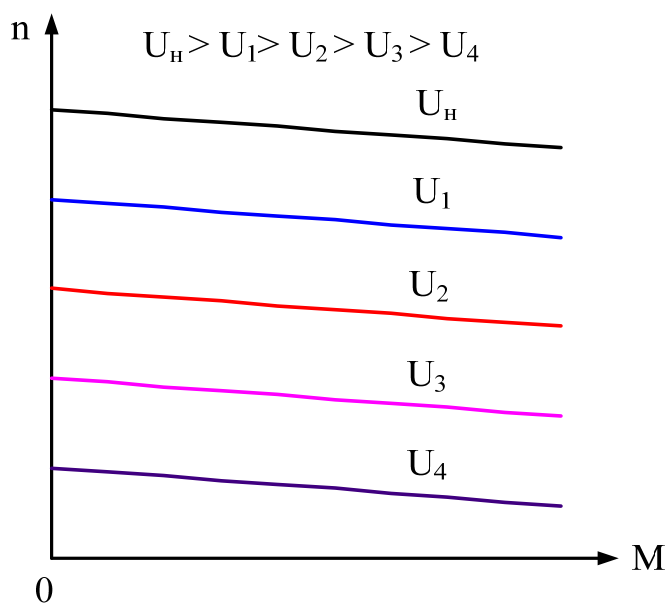


Рисунок 3.8 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при регулюванні напруги живлення

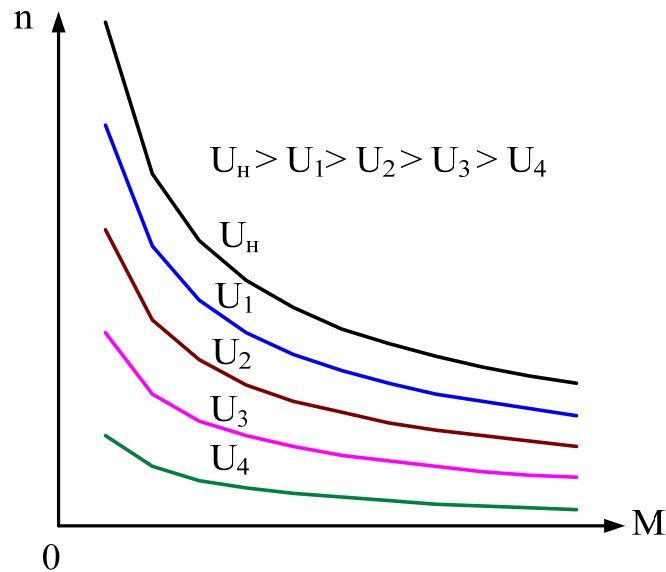


Рисунок 3.9 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при регулюванні напруги живлення

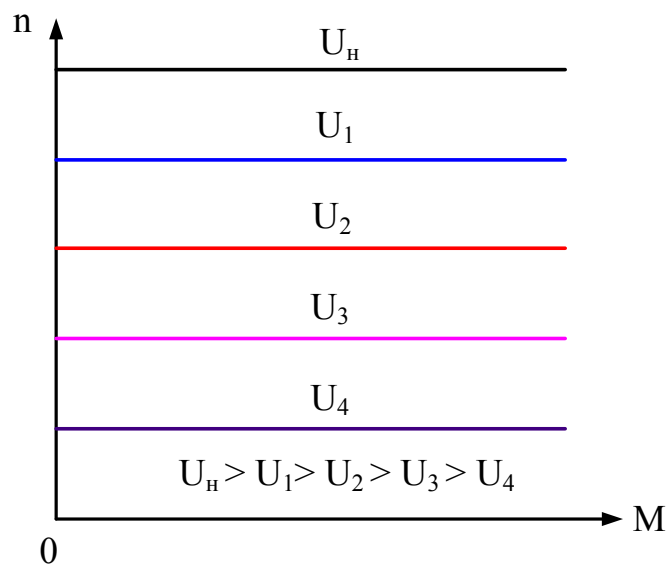


Рисунок 3.10 – Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні напруги живлення

- регулюванні магнітного потоку потрібно у виразі природної механічної характеристики: для
 - двигуна паралельного збудження (3.40) замість Φ_n взяти магнітні потоки Φ_n ; $0,8\Phi_n$; $0,6\Phi_n$; $0,4\Phi_n$;
 - двигуна послідовного збудження (3.41) та двигуна незалежного збудження (3.43) замість k_ϕ взяти коефіцієнти магнітного потоку k_ϕ ;

$0,8k_{\Phi}$; $0,6k_{\Phi}$; $0,4k_{\Phi}$. Зовнішній вигляд характеристик показаний на рис. 3.11 – рис. 3.13;

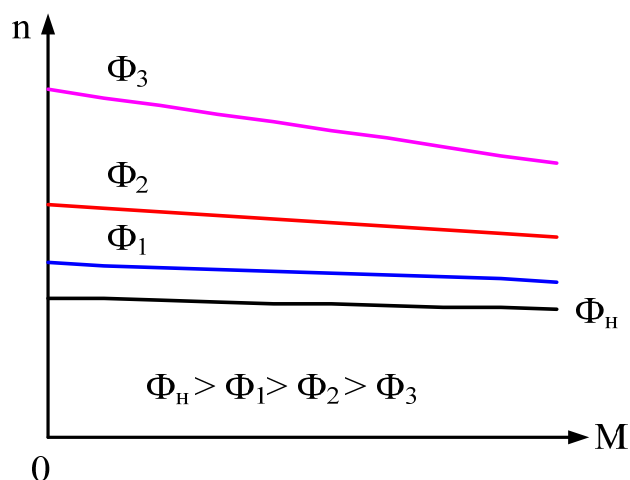


Рисунок 3.11 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при регулюванні магнітного потоку

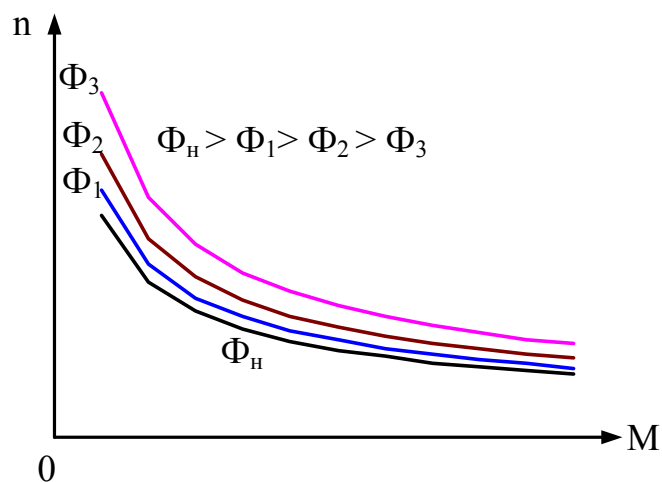


Рисунок 3.12 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при регулюванні магнітного потоку

- регулюванні опору в колі якоря потрібно у виразі природної механічної характеристики для
 - двигуна паралельного збудження (3.40) та двигуна послідовного збудження (3.41) замість R_{a75} взяти опори якорного кола R_{a75} ; $3R_{a75}$; $6R_{a75}$; $9R_{a75}$; $12R_{a75}$; $15R_{a75}$;

– двигуна незалежного збудження (3.43) замість R_{a75} взяти опори якірного кола R_{a75} ; $25R_{a75}$; $50R_{a75}$; $75R_{a75}$; $100R_{a75}$; $125R_{a75}$. Зовнішній вигляд характеристик показаний на рис. 3.14 – рис. 3.16;

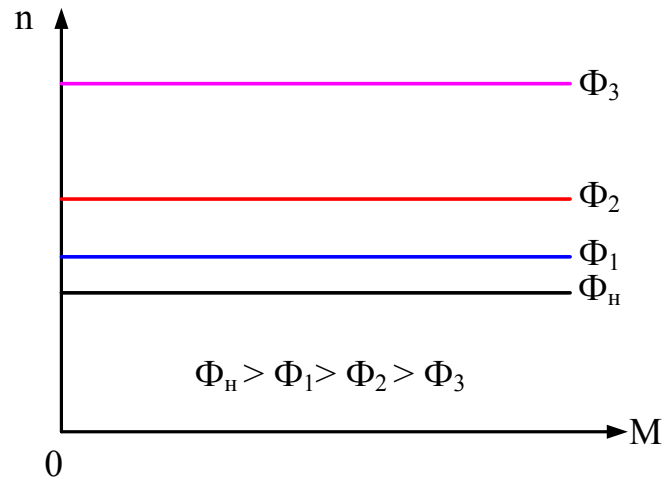


Рисунок 3.13 – Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні магнітного потоку

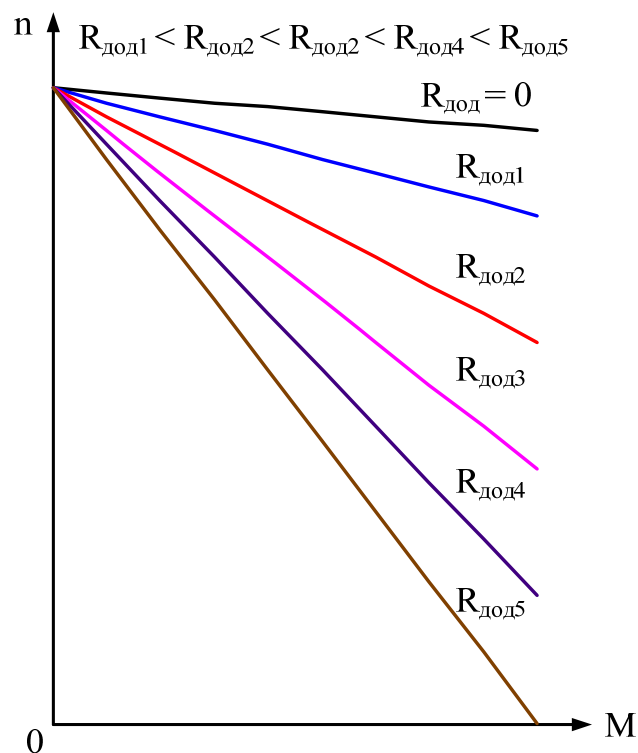


Рисунок 3.14 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при регулюванні опору кола якоря

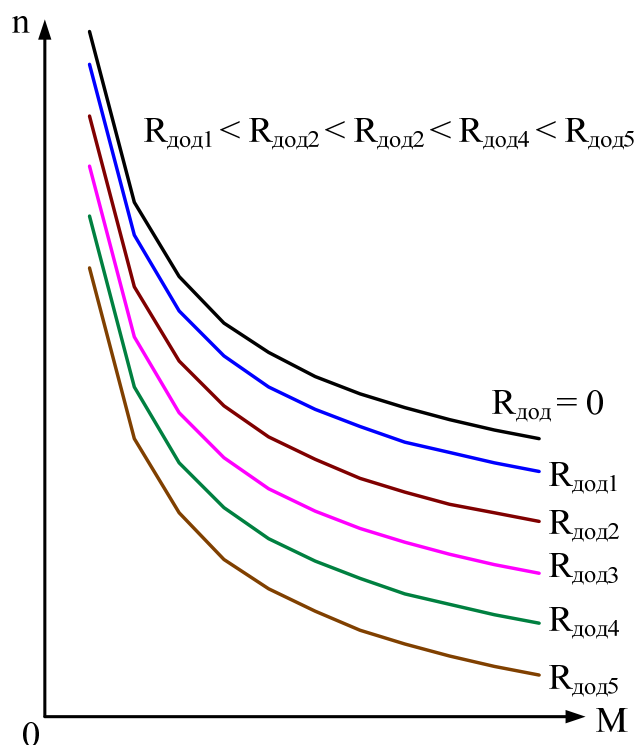


Рисунок 3.15 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при регулюванні опору кола якоря

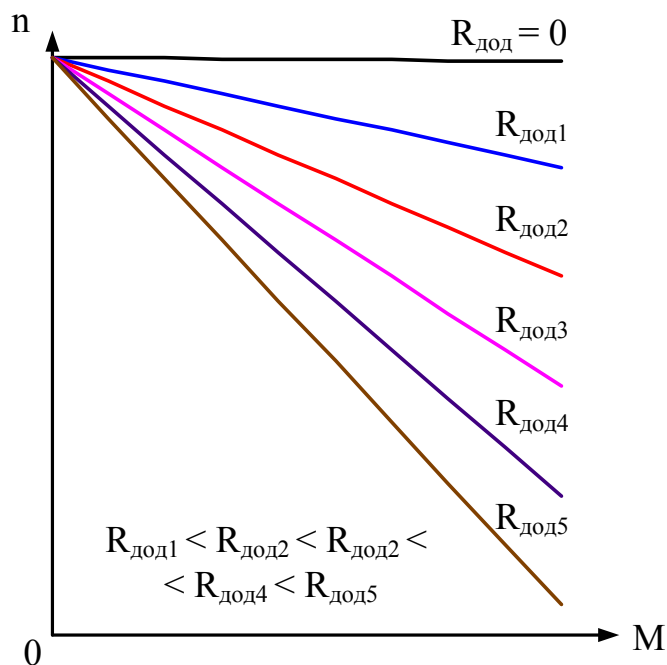


Рисунок 3.16 – Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні опору кола якоря

Література

1. Методичні вказівки до оформлення курсових проектів (робіт) у Вінницькому національному технічному університеті / Уклад. Г. Л. Лисенко, А. Г. Буда, Р. Р. Обертюх. – Вінниця : ВНТУ, 2006. – 60 с.
2. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина I. Машини постійного струму: навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, І. В. Грабенко. – Вінниця : ВНТУ, 2005. – 86 с.
3. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина III. Асинхронні машини: навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький, М. О. Казак. – Вінниця : ВНТУ, 2007. – 197 с.
4. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори: навчальний посібник / В. В. Грабко, М. П. Розводюк, С. М. Левицький. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 219 с.
5. Кацман М. М. Электрические машины: учебник / М. М. Кацман. – 3-е изд., испр. – М. : Высшая школа; Изд. центр "Академия", 2001. – 463 с. – ISBN 5-06-003661-8.
6. Яцун М. А. Электричні машини: навч. посібник / М. А. Яцун. – 2-е вид., стереот. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2004. – 440 с. – ISBN 966-553-403-3.
7. Вольдек А. И. Электрические машины: учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений / А. И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1978. – 832 с.
8. Токарев Б. Ф. Электрические машины: учеб. пособие для вузов / Б. Ф. Токарев. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 624 с. – ISBN 5-283-00595-X.
9. Методические указания к контрольным работам по курсу «Электрические машины» с применением ЭВМ для студентов заочной формы обучения / Сост. В. П. Головин, И. Ф. Павлов. – Винница : ВПИ, 1983. – 60 с.

-
10. Трансформаторы силовые распределительные ТМГ-СЭЩ, ТМ-СЭЩ, ТМГФ-СЭЩ, ТМФ-СЭЩ - 10 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.sidero-electro.ru/tsr102500.html/>
 11. Силовые трансформаторы масляные (мощность: 25-4000 кВА, напряжение: 6-35 кВ) [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.vniir.ru/st/>
 12. Силовые трансформаторы 3, 6, 10, 20 кВ [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.online-electric.ru/>

Глосарій

Експлуатаційні характеристики – working characteristics
Номінальні лінійні струми – rated linear currents
Номінальні фазні струми – rated phase currents
Схема заміщення – replacement scheme
Потужність короткого замикання – capacity of short circuit
Напруга короткого замикання – voltage of short circuit
Коефіцієнт потужності – power factor
Потужність втрат холостого ходу – capacity of idle movement losses
Коло намагнічування – magnetize circuit
Коефіцієнт трансформації – transforming factor
Зміна вторинної напруги – change of secondary voltage
Векторна діаграма – vector plot
Струм зрівноваження – equilibrating current
Паралельна робота – parallel work
Ударний струм короткого замикання – short circuit percussive current
Електричні втрати – electrical losses
Номінальне ковзання – rated slipping
Сумарні втрати потужності – total capacity losses
Корисна потужність – efficient capacity
Номінальний електромагнітний обертовий момент – nominal electromagnetic rotating moment
Пусковий момент – starting moment
Критичне ковзання – critical slidding
Критична частота обертання – critical frequency of ration
Максимальний момент – maximal moment
Механічна характеристика – mechanical characteristics
Робочі характеристики – working characteristics
Регулювання швидкості обертання – regulating of rotating speed
Втрати на збудження – excitation losses
Постійні втрати – constant losses
Додаткові втрати – additional losses
Змінні втрати – variable losses
Коефіцієнт навантаження – loading factor

Додаток А

Завдання на проектування

Міністерство освіти та науки України
Вінницький національний технічний університет
Інститут електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ

Керівник *наук. ступ., вч. звання*П.І.Б.

"___" _____ 20__ р.

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

на курсовий проект з дисципліни «Електричні машини»
студента П.І.Б. факультету _____, групи _____

1 Тема проекту **Розрахунок експлуатаційних характеристик електричних машин**

2 Термін здачі студентом закінченого проекту _____.

3 Вихідні дані до проекту Варіант ___

Таблиця 1 – Дані трансформатора

S_n , кВ·А	$U_{1лн}$, кВ	$U_{2лн}$, кВ	$U_k\%$, %	$I_0\%$, %	P_0 , кВт	P_k , кВт	Схема і група	$\cos\varphi_2$	Тип навантаж.

Таблиця 2 – Величина відпайки, напруги короткого замикання трансформатора (для режиму паралельної роботи) та схема випрямлення

Величина відпайки $\Delta U_{I\%}$, %	Напруга короткого замикання $\Delta U_{кз}$, %	Схема випрямлення

Таблиця 3 – Дані асинхронного двигуна

P_n , кВт	$U_{1н}$, кВ	$I_{1н}$, А	Схема обм. статора	n_n , об/хв	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R'_2 , Ом	X'_2 , Ом	$I_{0ф}$, А	$\cos\varphi_0$	$\Delta p_{мех}$, кВт

Таблиця 4 – Дані машини постійного струму

P_n , кВт	U_n , В	n_n , об/хв	2р	N	2а	$R_я$, Ом	$R_д$, Ом	$R_з$, Ом	$\Delta p_{мех}$, кВт	Δp_m , кВт

Таблиця 5 – Характеристика холостого ходу машини постійного струму

$I_3^* = I_3/I_{30}$, под/од	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E_o^* = E_o/U_n$, под/од	0,05	0,75	1,00	1,12	1,20	1,26	1,30	1,33

Тип збудження двигуна постійного струму – _____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1 Розрахунок експлуатаційних характеристик трансформатора

- 1.1 Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора, напруги короткого замикання, зміни вторинної напруги та побудова векторної діаграми
- 1.2 Дослідження паралельної роботи двох трансформаторів однакової потужності:
 - з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання, причому перший трансформатор включений на відпайку $\Delta U_{1\%}$;
 - з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання, причому напруга КЗ другого трансформатора на $\Delta U_{кз}$ більша, ніж першого
- 1.3 Розрахувати ударні струми короткого замикання обмоток і їх кратності вісноно номінальних
- 1.4 Розрахунок потужності та вибір силового трансформатора для системи ТП-ДПС
- 2 Розрахунок експлуатаційних характеристик асинхронного двигуна
 - 2.1. Розрахунок параметрів схеми заміщення асинхронного двигуна
 - 2.2. Розрахунок параметрів двигуна при номінальному навантаженні
 - 2.3. Розрахунок пускового та максимальних моментів
 - 2.4. Розрахунок та побудова природної механічної й робочих характеристик
 - 2.5. Розрахунок та побудова механічних характеристик при частотному регулюванні, зміні напруги живлення, зміні опору в колі ротора
- 3 Розрахунок експлуатаційних характеристик машини постійного струму
 - 3.1 Режим генератора:
 - розрахунок номінальних величин для генератора незалежного збудження;
 - побудова характеристичного трикутника для генератора незалежного збудження;
 - розрахунок струму збудження, необхідного для компенсації розмагнічувальної дії поперечної реакції якоря;
 - розрахунок втрат та ККД для генератора паралельного збудження
 - 3.2 Режим двигуна (відповідного типу збудження):
 - розрахунок номінальних параметрів двигуна;
 - розрахунок і побудова природної механічної характеристики;
 - розрахунок та побудова механічних характеристик при зміні: напруги живлення, магнітного потоку, опору якірного кола

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

- 5.1 Трансформатор: векторна діаграма
- 5.2 Асинхронний двигун: природна механічна характеристика, робочі характеристики; механічні характеристики при всіх способах регулювання частоти обертання вала двигуна
- 5.3 Машина постійного струму: характеристичний трикутник; схема електрична принципова електродвигуна відповідного типу збудження; природна механічна характеристика; механічні характеристики при всіх способах регулювання частоти обертання вала двигуна.

Всі побудови виконати на одному листі формату А1.

6 Дата видачі завдання _____.

Студент

(підпис)

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

(підпис)

(прізвище, ім'я, по батькові)

“ ____ ” _____ 20__ р.

Додаток Б

Вихідні дані для проектування

Б.1 Дані трансформаторів

Дані трансформаторів наведені в табл. Б.1.

Таблиця Б.1 – Дані трансформаторів

№ вар.	S_n , кВ·А	U_{1n} , кВ	U_{2n} , кВ	$U_k\%$, %	$I_0\%$, %	P_0 , кВт	P_k , кВт	Схема і група	$\cos\varphi_2$	Тип навантаж.
1	25	6	0,4	4,5	2,7	0,11	0,6	Y/Y _n -0	0,45	індуктивне
2	630	27,5	6,3	7,2	1,7	1,6	7,6	Y/Δ-11	0,36	ємнісне
3	400	10	0,4	4,5	1,8	0,83	5,5	Δ/Y _n -11	0,84	індуктивне
4	2500	35	11,0	6,5	1,0	3,9	23,5	Y/Δ-11	0,73	ємнісне
5	630	6	0,4	5,5	1,6	1,05	7,6	Y/Y _n -0	0,0	індуктивне
6	40000	110	27,5	10,5	1,0	36,5	183,5	Y/Δ-11	0,39	ємнісне
7	63	10	0,23	4,5	4,5	0,255	1,45	Y/Y _n -0	0,0	індуктивне
8	2500	27,5	6,3	6,5	1,0	3,9	23,5	Y/Δ-11	0,95	ємнісне
9	25	10	0,4	4,5	2,7	0,11	0,6	Δ/Y _n -11	0,44	індуктивне
10	6300	35	6,3	7,5	0,8	7,6	46,5	Y/Δ-11	0,26	ємнісне
11	100	10	0,4	4,5	2,2	0,29	1,98	Δ/Y _n -11	0,88	індуктивне
12	1600	35	6,3	6,5	1,3	2,9	16,5	Y/Δ-11	0,22	ємнісне
13	40000	110	27,5	10,5	1,0	36,5	183,5	Y/Δ-11	0,52	індуктивне
14	6300	35	10,5	7,5	0,8	7,6	46,5	Y/Δ-11	0,0	ємнісне
15	40	6	0,4	4,5	2,6	0,15	0,88	Y/Y _n -0	0,0	індуктивне
16	630	27,5	10,5	7,2	1,7	1,6	7,6	Y/Δ-11	0,41	ємнісне
17	40	10	0,4	4,5	2,7	0,15	0,88	Δ/Y _n -11	0,96	індуктивне
18	63	6	0,23	4,5	4,5	0,255	1,45	Y/Δ-11	0,74	ємнісне
19	1000	35	11,0	6,5	1,4	2,1	11,6	Y/Δ-11	0,37	індуктивне
20	1000	27,5	6,3	6,5	1,3	2,0	11,6	Y/Δ-11	0,24	ємнісне
21	16000	110	27,5	10,5	1,2	16,7	91	Y/Δ-11	0,0	індуктивне
22	6300	35	6,3	7,5	0,8	8,0	46,5	Y/Δ-11	0,13	ємнісне
23	6300	35	11,0	7,5	0,8	8,0	46,5	Y/Δ-11	0,96	індуктивне
24	160	6	0,4	4,5	2,0	0,41	2,65	Y/Y _n -0	0,0	ємнісне
25	2500	27,5	10,5	6,5	1,0	3,9	23,5	Y/Δ-11	0,85	індуктивне
26	1600	6	0,4	6,0	1,0	1,95	16,5	Y/Y _n -0	0,94	ємнісне
27	20000	110	27,5	10,5	1,2	19,5	112	Y/Δ-11	0,78	індуктивне
28	100	6	0,4	4,5	2,2	0,29	1,98	Y/Y _n -0	0,67	ємнісне
29	1600	35	11,0	6,5	1,3	2,9	16,5	Y/Δ-11	0,54	індуктивне
30	1000	27,5	10,5	6,5	1,3	2,0	11,6	Y/Δ-11	0,36	ємнісне

Продовження таблиці Б.1

№ вар.	S _н , кВ·А	U _{1н} , кВ	U _{2н} , кВ	U _к %, %	I ₀ %, %	P ₀ , кВт	P _к , кВт	Схема і група	cosφ ₂	Тип навантаж.
31	400	10,5	0,4	5,5	3,0	1,3	5,4	Y/Δ-11	0,84	індуктивне
32	6300	20	10,5	7,5	1,2	9,4	47,5	Y _н /Δ-11	0,52	ємнісне
33	25	0,38	0,23	4,0	3,2	0,105	0,6	Y/Δ-11	0,0	індуктивне
34	630	15,75	0,4	8,0	2,0	2,3	8,7	Δ/Y _н -11	0,0	ємнісне
35	1000	35	0,69	6,5	1,5	2,75	12,2	Y/Y _н -0	0,83	індуктивне
36	400	13,8	0,4	8,0	3,5	1,6	6,0	Δ/Y _н -11	0,91	ємнісне
37	2500	20	10,5	6,5	1,1	5,1	23,5	Y/Δ-11	0,45	індуктивне
38	4000	35	3,15	7,5	1,0	6,7	33,5	Y/Δ-11	0,68	ємнісне
39	160	10	0,69	5,5	4,0	0,7	2,7	Δ/Y _н -11	0,72	індуктивне
40	6300	10,5	3,15	6,5	3,0	12,3	46,5	Y/Δ-11	0,77	ємнісне
41	40	6,0	0,69	4,5	3,0	0,15	0,88	Y/Δ-11	0,13	індуктивне
42	250	10	0,4	4,7	3,68	1,05	4,2	Y/Y _н -0	0,28	ємнісне
43	6300	20	6,3	7,5	0,9	9,4	46,5	Y/Δ-11	0,37	індуктивне
44	40	0,38	0,23	4,0	3,0	0,15	0,88	Y/Δ-11	0,0	ємнісне
45	2500	10,5	0,69	5,5	3,5	6,2	25,0	Y/Δ-11	0,0	індуктивне
46	1000	15,75	0,4	8,0	2,0	3,2	12,0	Δ/Y _н -11	0,18	ємнісне
47	4000	10,5	3,15	6,5	3,0	9,9	33,5	Y/Δ-11	0,35	індуктивне
48	250	13,8	0,4	8,0	4,0	1,1	4,4	Δ/Y _н -11	0,25	ємнісне
49	2500	35	10,5	6,5	1,1	5,1	23,5	Y/Δ-11	0,45	індуктивне
50	40	3,15	0,23	4,5	4,5	0,24	0,88	Y/Y _н -0	0,29	ємнісне
51	630	3,0	0,4	5,5	2,0	1,42	7,6	Y/Y _н -0	0,68	індуктивне
52	1000	10,5	6,3	5,5	5,0	3,3	12,2	Y/Δ-11	0,72	ємнісне
53	160	20	0,4	6,5	2,4	0,66	2,65	Y/Y _н -0	0,46	індуктивне
54	16000	38,5	6,3	8,0	0,75	21,0	90,0	Y _н /Δ-11	0,97	ємнісне
55	25	6	0,69	4,5	3,2	0,105	0,6	Y/Δ-11	0,64	індуктивне
56	630	35	3,15	6,5	2,0	2,0	7,6	Y/Δ-11	0,38	ємнісне
57	4000	10	6,3	6,5	0,9	6,3	33,5	Y/Δ-11	0,27	індуктивне
58	630	20	0,23	6,0	2,2	2,2	7,8	Y/Y _н -0	0,41	ємнісне
59	10000	38,5	6,3	7,5	0,8	14,5	65,0	Y _н /Δ-11	0,86	індуктивне
60	2500	35	0,69	6,5	1,1	5,1	25,0	Y/Y _н -0	0,57	ємнісне
61	25	0,66	0,4	4,0	3,2	0,125	0,6	Y/Y _н -0	0,82	індуктивне
62	250	6,0	0,69	4,5	2,3	0,66	3,7	Y/Y _н -0	0,69	ємнісне
63	6300	10,5	6,3	6,5	3,0	13,0	46,5	Y/Δ-11	0,35	індуктивне
64	40	6	0,4	4,5	4,5	0,24	0,88	Y/Y _н -0	0,75	ємнісне
65	2500	10,5	3,15	5,5	3,5	7,4	25,0	Y/Δ-11	0,91	індуктивне
66	100	6	0,23	4,5	2,6	0,31	1,97	Y/Δ-11	0,17	ємнісне
67	400	20	0,69	6,5	2,1	1,15	5,5	Y/Δ-11	0,84	індуктивне
68	1000	35	11,0	6,5	1,5	2,35	11,6	Y/Δ-11	0,39	ємнісне

Продовження таблиці Б.1

№ вар.	S _н , кВт	U _{1н} , кВ	U _{2н} , кВ	U _к %, %	I ₀ %, %	P ₀ , кВт	P _к , кВт	Схема і група	cosφ ₂	Тип навантаж.
69	1600	13,8	0,4	8,0	2,0	4,3	16,0	Δ/Y _н -11	0,0	індуктивне
70	1000	10	0,23	5,5	1,5	3,0	11,2	Y/Y _н -0	0,0	ємнісне
71	4000	20	6,3	7,5	1,0	6,7	33,5	Δ/Y _н -11	0,26	індуктивне
72	160	6,3	0,4	4,5	3,85	0,73	2,65	Y/Y _н -0	0,68	ємнісне
73	400	10	3,15	4,5	2,1	0,92	5,5	Y/Δ-11	0,59	індуктивне
74	63	10	0,69	4,5	2,8	0,265	1,28	Y/Δ-11	0,94	ємнісне
75	10000	38,5	10,5	7,5	0,8	14,5	65,0	Y _н /Δ-11	0,28	індуктивне
76	250	6	0,69	4,5	2,3	0,78	3,7	Y/Δ-11	0,56	ємнісне
77	4000	20	10,5	7,5	1,0	6,7	33,5	Y/Δ-11	0,94	індуктивне
78	250	3	0,23	4,5	2,3	0,78	3,7	Y/Δ-11	0,71	ємнісне
79	6300	35	11,0	7,5	0,9	8,0	46,5	Y/Δ-11	0,85	індуктивне
80	100	20	0,69	6,5	2,6	0,465	1,97	Y/Δ-11	0,35	ємнісне
81	25	3	0,4	4,5	3,2	0,125	0,6	Y/Y _н -0	0,68	індуктивне
82	6300	20	3,15	7,5	0,9	9,4	46,5	Y _н /Δ-11	0,49	ємнісне
83	40	0,66	0,4	4,0	3,0	0,18	0,88	Y/Y _н -0	0,85	індуктивне
84	1600	20	10,5	6,5	1,4	3,65	16,5	Y/Δ-11	0,92	ємнісне
85	25	10	0,4	4,7	5,15	0,17	0,69	Y/Y _н -0	0,81	індуктивне

Б.2 Дані асинхронних двигунів

Дані асинхронних двигунів наведені в табл. Б.2.

Таблиця Б.2 – Дані асинхронних двигунів

№ вар.	P _н , кВт	U _{1н} , кВ	I _{1н} , А	Схема обм. статора	n _н , об/хв	R ₁ , Ом	X ₁ , Ом	R' ₂ , Ом	X' ₂ , Ом	I _{0ф} , А	cosφ ₀	ΔP _{мех} , кВт
1	400	3,0	102	Δ	735	0,68	9,3	1,004	9,1	20	0,035	1,8
2	75	0,38	163	Y	580	0,035	0,27	0,0441	0,281	60	0,04	0,21
3	320	0,5	448	Δ	980	0,0216	0,28	0,0385	0,294	69	0,05	1,35
4	14	0,5	22,3	Y	1400	0,494	1,9	0,0886	1,88	7	0,07	0,028
5	160	3,0	42,5	Y	490	0,76	8,1	0,7973	8,16	16,5	0,04	0,55
6	630	3,0	147	Δ	1480	0,41	5,56	0,4589	5,572	20	0,035	1,7
7	90	0,38	183	Y	720	0,0297	0,208	0,0475	0,2	64	0,04	0,325
8	320	3,0	80	Δ	585	0,93	11,43	1,58	11,4	20	0,045	0,52
9	160	0,66	171	Y	1455	0,0359	0,285	0,068	0,28	45	0,05	0,45
10	110	0,22	372	Δ	975	0,0203	0,17	0,0251	0,169	64	0,05	1,15
11	10	0,38	21	Y	1400	0,454	1,543	0,69	1,537	6	0,075	0,022
12	75	0,22	288	Δ	480	0,0292	0,25	0,0541	0,267	65	0,04	0,21

Продовження таблиці Б.2

№ вар.	P_n , кВт	U_{1n} , кВ	I_{1n} , А	Схема обм. статора	n_n , об/хв	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R'_2 , Ом	X'_2 , Ом	$I_{0ф}$, А	$\cos\varphi_0$	$\Delta P_{мех}$, кВт
13	132	0,66	144	Y	1465	0,043	0,37	0,061	0,393	35	0,04	0,75
14	250	6,0	32	Y	585	2,18	20,8	2,53	20,61	12	0,05	0,6
15	320	0,38	604	Δ	980	0,0125	0,18	0,0213	0,17	90	0,035	1,3
16	20	0,38	44,2	Y	950	0,16	0,789	0,269	0,78	12	0,055	0,12
17	200	0,38	370	Δ	1470	0,0221	0,271	0,0351	0,26	54	0,045	1,35
18	100	0,38	191	Y	1460	0,022	0,167	0,031	0,169	47,5	0,06	0,89
19	110	0,22	419	Δ	580	0,0207	0,18	0,03	0,195	86	0,07	0,57
20	10	0,5	17,7	Y	940	0,837	2,693	1,05	2,674	5,4	0,07	0,026
21	4,5	0,22	17,8	Δ	1375	0,71	3,34	2,0	3,36	3,5	0,09	0,018
22	200	0,66	212	Y	1470	0,0287	0,25	0,0361	0,256	51	0,05	1,3
23	100	0,22	329	Δ	975	0,0206	0,193	0,0282	0,18	50	0,06	0,65
24	160	0,66	183	Y	735	0,0311	0,34	0,0415	0,36	58	0,045	1,25
25	55	0,22	211	Δ	580	0,0505	0,37	0,0591	0,391	46	0,07	0,15
26	160	3,0	38	Y	1470	0,015	6,78	0,8378	6,7	10	0,06	0,92
27	110	0,22	347	Δ	1455	0,0175	0,145	0,032	0,146	52	0,06	0,4
28	40	0,38	83,8	Y	965	0,074	0,416	0,094	0,418	24	0,06	0,27
29	500	3,0	116	Δ	1480	0,56	6,6	0,0558	0,507	28	0,03	1,45
30	4	0,38	10,6	Y	710	1,22	3,9	1,3	3,877	4	0,11	0,04
31	90	0,22	298	Δ	970	0,0314	0,19	0,038	0,202	48	0,05	0,55
32	250	0,38	498	Y	735	0,0061	0,078	0,0088	0,08	160	0,055	1,15
33	75	0,5	110	Y	1460	0,0515	0,388	0,0687	0,386	30	0,05	0,55
34	400	3,0	92	Y	1475	0,229	2,85	0,3054	2,7	22	0,035	1,57
35	500	3,0	115	Δ	980	0,56	6,303	0,868	6,3	18	0,05	1,2
36	320	6,0	37,5	Y	980	1,66	13,16	1,846	13,13	12	0,05	0,78
37	160	0,38	301	Δ	1470	0,0345	0,33	0,0429	0,334	44	0,035	0,85
38	125	3,0	30,6	Y	1470	1,28	8,84	1,0983	8,85	8	0,037	0,73
39	7	0,38	15	Y	940	0,676	2,21	0,8877	2,236	5	0,07	0,02
40	28	0,38	56	Y	1420	0,099	0,556	0,216	0,56	15	0,06	0,16
41	2,8	0,127	20	Δ	1370	0,46	1,79	1,04	1,792	3,5	0,1	0,02
42	75	0,38	143	Y	980	0,0382	0,216	0,0233	0,215	40	0,07	0,34
43	800	3,0	181	Δ	1480	0,26	4,38	0,381	4,384	26	0,025	1,95
44	132	0,66	165	Y	580	0,0488	0,474	0,075	0,46	58	0,055	0,68
45	320	3,0	73,7	Y	1480	0,351	3,45	0,309	3,505	18	0,04	1,5
46	14	0,38	33,3	Y	700	0,278	1,2	0,4635	1,22	10	0,065	0,1
47	4	0,22	16,1	Δ	925	1,42	3,27	1,874	3,28	4	0,085	0,016
48	55	0,5	90	Y	580	0,101	0,6	0,1025	0,624	35	0,06	0,18
49	100	0,22	330	Δ	1460	0,022	0,176	0,03	0,177	50	0,04	0,85
50	125	3,0	31	Y	975	1,105	9,0	1,379	9,05	9	0,04	0,85
51	630	6,0	73	Y	1480	0,53	7,5	0,6188	7,47	18	0,03	1,75
52	13	0,38	26,4	Y	960	0,3	1,33	0,319	1,328	8	0,045	0,06
53	40	0,22	148	Δ	735	0,083	0,415	0,0397	0,416	31	0,07	0,24
54	90	0,38	173	Y	970	0,0314	0,113	0,04	0,112	48	0,07	0,38

Продовження таблиці Б.2

№ вар.	P_n , кВт	U_{1n} , кВ	I_{1n} , А	Схема обм. статора	n_n , об/хв	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R'_2 , Ом	X'_2 , Ом	$I_{0ф}$, А	$\cos\varphi_0$	$\Delta P_{мех}$, кВт
55	125	0,5	179	Δ	1470	0,089	0,6	0,0962	0,8	26	0,04	0,7
56	100	0,5	144	Y	975	0,0357	0,317	0,0495	0,31	38	0,055	0,6
57	7	0,22	26	Δ	1375	0,708	2,16	1,2072	2,161	4,5	0,08	0,085
58	200	3,0	47,8	Y	1475	0,734	5,55	0,59	5,54	12	0,06	1,4
59	110	0,38	210	Y	970	0,0255	0,18	0,0303	0,14	60	0,065	0,67
60	250	0,38	474	Y	1470	0,01	0,07	0,009	0,072	112	0,035	1,4
61	37	0,22	145	Δ	580	0,0599	0,52	0,088	0,534	33	0,05	0,08
62	500	6,0	57,5	Y	1480	0,72	9,3	0,7724	9,45	15	0,03	1,6
63	110	0,22	363	Δ	970	0,0255	0,145	0,0303	0,146	60	0,04	0,37
64	40	0,5	60,5	Y	1440	0,121	0,717	0,204	0,715	16	0,05	0,3
65	400	3,0	95,5	Y	980	0,286	3,0	0,353	3,14	24	0,045	1,0
66	200	0,5	282	Y	1470	0,0131	0,14	0,0211	0,16	70	0,05	1,3
67	160	0,38	303	Δ	975	0,0354	0,34	0,0535	0,355	47,5	0,045	0,95
68	55	0,5	80	Y	1440	0,0725	0,55	0,1414	0,543	20	0,045	0,33
69	10	0,22	42,4	Δ	700	0,366	1,69	0,6275	1,71	8,6	0,07	0,021
70	75	0,5	110	Y	970	0,054	0,387	0,0795	0,385	32	0,055	0,35
71	200	6,0	24,1	Y	1480	2,75	21,6	1,897	21,85	6	0,04	1,42
72	132	0,66	146	Y	980	0,0343	0,4	0,0515	0,405	42	0,04	0,68
73	132	0,38	246	Δ	1485	0,051	0,37	0,0258	0,39	38	0,065	0,45
74	55	0,38	112	Y	725	0,05	0,325	0,066	0,382	34	0,06	0,25
75	100	3,0	25	Y	1470	1,89	10,23	1,3828	10,3	8	0,07	0,37
76	55	0,22	225	Δ	475	0,0517	0,36	0,0839	0,378	52	0,065	0,2
77	320	3,0	75,5	Y	980	0,364	3,288	0,47	3,3	21	0,065	0,9
78	14	0,5	22	Y	950	0,447	1,92	0,66	1,94	7	0,065	0,88
79	400	0,5	624	Δ	1480	0,0154	0,22	0,02	0,243	80	0,03	1,6
80	45	0,38	98,8	Y	580	0,0536	0,423	0,0764	0,42	39	0,045	0,09
81	250	6,0	29,5	Y	1480	2,13	17,3	1,561	17,45	7	0,045	1,38
82	250	0,5	350	Δ	1475	0,0326	0,36	0,0414	0,38	52	0,055	1,35
83	125	0,38	235	Y	1460	0,0167	0,141	0,0246	0,141	65	0,005	0,4
84	75	0,22	270	Δ	720	0,0367	0,24	0,0557	0,25	55	0,05	0,28
85	250	3,0	58,3	Y	1480	0,51	4,4	0,387	4,51	15	0,05	1,4

Б.3 Дані машин постійного струму

Дані машин постійного струму наведені в табл. Б.3.

Таблиця Б.3 – Дані машин постійного струму

№ вар.	P_n , кВт	U_n , В	n_n , об/хв	$2p$	N	$2a$	$R_{я}$, Ом	$R_{д}$, Ом	$R_{з}$, Ом	$\Delta P_{мех}$, кВт	$\Delta P_{м}$, кВт
1	6,5	115	1420	4	756	2	0,1	0,05	36	0,06	0,022
2	110	460	1470	8	287	2	0,00453	0,0023	32,5	1,31	2,0
3	130	460	1000	8	324	2	0,028	0,012	113	1,25	1,5
4	27	230	1500	6	686	6	0,16	0,09	92	0,45	0,48
5	63	115	980	4	300	4	0,007	0,028	15	0,7	0,76
6	32	460	1000	8	840	8	0,343	0,14	129,2	0,44	1,6
7	3,8	230	2880	4	720	4	0,54	0,16	390	0,016	0,025
8	21	115	1450	4	420	2	0,033	0,011	12,5	0,4	0,35
9	150	230	1440	4	252	4	0,00655	0,0028	28	1,62	1,87
10	6	230	1480	4	816	2	0,3	0,1	220	0,09	0,06
11	43	115	1000	8	240	8	0,019	0,0075	11	0,6	0,75
12	25	460	980	8	570	8	0,51	0,18	36	0,32	0,65
13	105	115	1000	8	464	8	0,03	0,0014	10	1,0	1,1
14	7,2	230	2810	4	1080	2	0,266	0,125	180	0,042	0,05
15	30	230	1500	4	192	4	0,027	0,016	40,4	0,52	0,6
16	70	115	1450	4	252	4	0,0051	0,002	12	0,8	0,75
17	11	230	2850	4	992	4	0,182	0,084	160	0,08	0,12
18	32	230	1450	4	301	2	0,075	0,03	36	0,75	1,12
19	11	460	1450	4	1240	2	1,0	0,304	372	0,069	0,28
20	25	115	980	6	210	6	0,0263	0,01	6	0,38	0,45
21	63	230	980	6	302	6	0,025	0,01	56	0,55	1,15
22	55	460	1460	8	328	2	0,25	0,1	115,6	1,4	1,7
23	3,3	230	1440	4	1044	2	0,166	0,11	298	0,005	0,03
24	42	115	980	4	176	2	0,01	0,0048	8	0,57	0,72
25	50	230	1450	4	290	2	0,0336	0,0145	35,8	0,8	1,0
26	6,2	230	2840	4	702	2	0,384	0,172	154	0,03	0,045
27	9	115	1450	4	1488	2	0,072	0,0334	35	0,032	0,04
28	80	230	960	4	296	2	0,0215	0,0075	34	0,95	1,2
29	63	460	1500	4	264	2	0,11	0,033	231,2	0,99	1,95
30	5	115	1450	4	868	4	0,14	0,052	32	0,015	0,021
31	19	230	980	4	580	4	0,18	0,063	51,5	0,23	0,37
32	110	230	1450	8	264	8	0,0045	0,0024	32,5	1,3	1,65
33	85	460	1470	4	410	2	0,059	0,022	177	1,45	1,7
34	4,8	230	1500	4	864	2	0,115	0,067	188	0,02	0,05
35	19	115	1000	4	290	2	0,045	0,016	13	0,23	0,28
36	65	460	1450	6	414	2	0,0835	0,03	162,2	1,0	2,0
37	5,2	230	2860	4	1392	4	0,25	0,101	374	0,03	0,05
38	85	115	1400	6	240	6	0,00525	0,0021	10	1,2	1,0

Продовження таблиці Б.3

№ вар.	P _н , кВт	U _н , В	n _н , об/хв	2р	N	2а	R _я , Ом	R _д , Ом	R _з , Ом	ΔP _{мех} , кВт	ΔP _м , кВт
39	27	460	1450	4	580	2	0,462	0,1548	208,4	0,42	1,1
40	14	230	2830	6	744	2	0,1	0,05	134	0,2	0,28
41	100	230	1000	6	252	6	0,0136	0,0054	49	1,0	1,25
42	90	460	1450	4	470	2	0,0526	0,024	46	1,3	1,85
43	130	230	975	8	648	8	0,00894	0,0031	17,5	1,2	1,25
44	3,2	115	1450	4	1080	4	0,266	0,124	50	0,006	0,015
45	25	230	2850	4	992	2	0,044	0,018	76	0,45	0,55
46	100	460	950	8	490	2	0,0563	0,0212	154,6	0,96	1,4
47	35	115	1450	8	162	2	0,0143	0,006	10,1	0,42	0,47
48	90	230	1450	6	172	2	0,013	0,006	38	1,3	1,23
49	42	460	950	6	330	6	0,231	0,0815	162,2	0,55	1,1
50	55	115	1450	4	368	4	0,0096	0,0035	13,5	0,85	0,97
51	9	230	1440	4	1488	4	0,25	0,1	120	0,032	0,09
52	27	115	1450	4	210	4	0,024	0,008	12,85	0,42	0,4
53	85	230	1000	6	200	2	0,0127	0,005	38	1,2	1,2
54	50	460	1420	6	580	2	0,134	0,544	129,2	0,8	1,3
55	7,8	230	950	4	810	4	0,414	0,132	43	0,06	0,08
56	50	115	1450	4	162	4	0,0087	0,0047	11	0,8	0,95
57	25	230	1100	4	420	2	0,105	0,0383	23,4	0,3	0,4
58	43	460	2850	4	936	2	0,245	0,13	170	1,5	2,0
59	70	230	1450	6	294	2	0,021	0,0075	48,4	0,8	1,3
60	32	115	980	4	410	4	0,029	0,0075	9	0,42	0,6
61	80	460	1050	8	490	8	0,081	0,033	198	1,0	1,6
62	70	230	980	4	280	2	0,0055	0,0016	16,5	0,6	1,2
63	80	115	970	4	360	4	0,006	0,0019	8,5	0,96	0,95
64	190	460	1430	6	300	2	0,017	0,0092	63	1,67	1,9
65	43	230	1500	6	504	6	0,075	0,03	44	0,9	1,3
66	55	460	975	4	564	4	0,146	0,051	130	0,7	1,4
67	10	230	970	4	748	4	0,45	0,02	76	0,1	0,15
68	27	230	1430	4	420	4	0,0957	0,032	51,5	0,42	0,047
69	42	230	960	4	368	2	0,058	0,0183	48,4	0,56	0,85
70	7,2	115	2850	4	800	4	0,065	0,038	50	0,11	0,03
71	55	230	950	6	360	6	0,0385	0,0143	53,5	0,55	1,1
72	40	230	1450	4	544	2	0,0121	0,005	59	0,45	0,54
73	16	115	1430	4	578	4	0,0535	0,036	11	0,11	0,12
74	190	230	980	4	200	4	0,0043	0,0028	19	1,5	1,55
75	33	230	1470	4	1056	2	0,084	0,033	86,1	0,42	0,51
76	11,5	115	1500	6	992	6	0,044	0,018	25	0,05	0,047
77	18	230	2870	4	1080	4	0,078	0,0334	120	0,25	0,35
78	5	230	1450	4	868	4	0,56	0,23	126	0,015	0,05
79	10,5	230	1460	4	560	4	0,44	0,05	136	0,02	0,06
80	6,2	115	2860	6	648	6	0,089	0,0352	30	0,03	0,02
81	16	230	1400	4	576	2	0,224	0,076	10,7	0,12	0,25
82	3,8	115	2850	4	720	2	0,135	0,04	88,6	0,015	0,017

Продовження таблиці Б.3

№ вар.	P_n , кВт	U_n , В	n_n , об/хв	2р	N	2а	$R_{я}$, Ом	$R_{д}$, Ом	$R_{з}$, Ом	$\Delta P_{мех}$, кВт	$\Delta P_{м}$, кВт
83	35	230	1450	6	290	6	0,05	0,019	40,4	0,45	0,52
84	14,5	230	1430	4	630	2	0,276	0,106	65,2	0,07	0,07
85	24,5	230	1000	6	432	6	0,105	0,039	40,5	0,31	0,4

Б.4 Дані для розрахунку

Дані для розрахунків наведені в табл. Б.4.

Таблиця Б.4 – Дані для розрахунків

№ вар.	Величина відпайки ΔU_I , %	Напруга короткого замикання $\Delta U_{кз}$, %	Схема випрямлення	Тип ДПС
1	-5	10	ОС	серієсний
2	-2,5	15	ОН	шунтовий
3	+2,5	36	ТН	незалежн. збудж.
4	+5	64	ТЗ	серієсний
5	+5	25	ТМ	шунтовий
6	+2,5	8	ОС	незалежн. збудж.
7	-2,5	54	ОН	серієсний
8	-5	67	ТН	шунтовий
9	-5	33	ТЗ	незалежн. збудж.
10	-2,5	21	ТМ	серієсний
11	+2,5	18	ОС	шунтовий
12	+5	37	ОН	незалежн. збудж.
13	+5	65	ТН	серієсний
14	+2,5	54	ТЗ	шунтовий
15	-2,5	39	ТМ	незалежн. збудж.
16	-5	41	ОС	серієсний
17	-5	38	ОН	шунтовий
18	-2,5	26	ТН	незалежн. збудж.
19	+2,5	13	ТЗ	серієсний
20	+5	64	ТМ	шунтовий
21	+5	33	ОС	незалежн. збудж.
22	+2,5	11	ОН	серієсний
23	-2,5	18	ТН	шунтовий
24	-5	25	ТЗ	незалежн. збудж.
25	-5	39	ТМ	серієсний
26	-2,5	66	ОС	шунтовий

Продовження таблиці Б.4

№ вар.	Величина відпайки ΔU_I , %	Напруга короткого замикання $\Delta U_{кз}$, %	Схема випрямлення	Тип ДПС
27	+2,5	44	ОН	незалежн. збудж.
28	+5	77	ТН	серієсний
29	+5	31	ТЗ	шунтовий
30	+2,5	67	ТМ	незалежн. збудж.
31	-2,5	43	ОС	серієсний
32	-5	38	ОН	шунтовий
33	-5	14	ТН	незалежн. збудж.
34	-2,5	7	ТЗ	серієсний
35	+2,5	17	ТМ	шунтовий
36	+5	27	ОС	незалежн. збудж.
37	+5	34	ОН	серієсний
38	+2,5	37	ТН	шунтовий
39	-2,5	13	ТЗ	незалежн. збудж.
40	-5	31	ТМ	серієсний
41	-5	42	ОС	шунтовий
42	-2,5	27	ОН	незалежн. збудж.
43	+2,5	62	ТН	серієсний
44	+5	26	ТЗ	шунтовий
45	+5	25	ТМ	незалежн. збудж.
46	+2,5	8	ОС	серієсний
47	-2,5	54	ОН	шунтовий
48	-5	67	ТН	незалежн. збудж.
49	-5	33	ТЗ	серієсний
50	-2,5	21	ТМ	шунтовий
51	+2,5	18	ОС	незалежн. збудж.
52	+5	37	ОН	серієсний
53	+5	65	ТН	шунтовий
54	+2,5	54	ТЗ	незалежн. збудж.
55	-2,5	39	ТМ	серієсний
56	-5	41	ОС	шунтовий
57	-5	38	ОН	незалежн. збудж.
58	-2,5	26	ТН	серієсний
59	+2,5	13	ТЗ	шунтовий
60	+5	64	ТМ	незалежн. збудж.
61	+5	33	ОС	серієсний
62	+2,5	11	ОН	шунтовий
63	-2,5	18	ТН	незалежн. збудж.
64	-5	25	ТЗ	серієсний

Продовження таблиці Б.4

№ вар.	Величина відпайки ΔU_I , %	Напруга короткого замикання $\Delta U_{кз}$, %	Схема випрямлення	Тип ДПС
65	-5	39	ТМ	шунтовий
66	-2,5	66	ОС	незалежн. збудж.
67	+2,5	44	ОН	серієсний
68	+5	77	ТН	шунтовий
69	+5	31	ТЗ	незалежн. збудж.
70	+2,5	67	ТМ	серієсний
71	-2,5	43	ОС	шунтовий
72	-5	38	ОН	незалежн. збудж.
73	-5	14	ТН	серієсний
74	-2,5	7	ТЗ	шунтовий
75	+2,5	17	ТМ	незалежн. збудж.
76	+5	27	ОС	серієсний
77	+5	34	ОН	шунтовий
78	+2,5	37	ТН	незалежн. збудж.
79	-2,5	13	ТЗ	серієсний
80	-5	31	ТМ	шунтовий
81	-5	42	ОС	незалежн. збудж.
82	-2,5	27	ОН	серієсний
83	+2,5	62	ТН	шунтовий
84	+5	26	ТЗ	незалежн. збудж.
85	-5	43	ТМ	серієсний

Скорочення в схемах випрямлення:

- ОС – однофазна із середньою точкою;
- ОН – однофазна нульова;
- ТН – трифазна нульова (схема Міткевича);
- ТЗ – трифазна із зигзагом з нулем;
- ТМ – трифазна мостова (схема Ларіонова).

Додаток В

Приклади розрахунків

Розрахунок здійснюватимемо в математичному ППП MathCAD.

В.1 Розрахунок трансформатора

Розглядається трансформатор з параметрами, вказаними в табл. В.1 та табл. В.2.

Таблиця В.1 – Дані трансформатора

S_n , кВ·А	$U_{1лн}$, кВ	$U_{2лн}$, кВ	$U_{к\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0 , кВт	P_k , кВт	Схема і група	$\cos\phi_2$	Тип навантаж.
100	3	0,4	4,5	2,6	0,365	1,97	Y/Y _n -0	0,72	ємнісний

Таблиця В.2 – Величина відпайки, напруги короткого замикання трансформатора (для режиму паралельної роботи) та схема випрямлення

Величина відпайки $\Delta U_{I\%}$, %	Напруга короткого замикання $\Delta U_{кз}$, %	Схема випрямлення
-5	43	ТМ

Вибір трансформатора для системи ТП-ДПС здійснюється для двигуна постійного струму, параметри якого наведені в табл. В.5.

В ППП MathCAD розрахунок трансформатора можна здійснити у такій послідовності.

$$S_n := 100 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{А}; \quad U_{1лн} := 3 \cdot 10^3 \text{ В}; \quad U_{2лн} := 0.4 \cdot 10^3 \text{ В};$$

$$U_{к\%} := 4.5 \text{ \%}; \quad I_{0\%} := 2.6 \text{ \%};$$

$$P_0 := 0.365 \cdot 10^3 \text{ Вт}; \quad P_k := 1.97 \cdot 10^3 \text{ Вт}; \quad \cos\phi_2 := 0.72.$$

Схема випрямлення - Y/Y_n-0

Навантаження – ємнісне

Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток

обмотка ВН:

$$U_{1\phi H} := \frac{U_{1\text{ЛН}}}{\sqrt{3}}, \quad U_{1\phi H} = 1.732 \times 10^3 \text{ В};$$

$$I_{1\text{ЛН}} := \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{ЛН}}}, \quad I_{1\text{ЛН}} = 19.245 \text{ А};$$

$$I_{1\phi H} := I_{1\text{ЛН}}, \quad I_{1\phi H} = 19.245 \text{ А};$$

обмотка НН:

$$U_{2\phi H} := \frac{U_{2\text{ЛН}}}{\sqrt{3}}, \quad U_{2\phi H} = 230.94 \text{ В};$$

$$I_{2\text{ЛН}} := \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{ЛН}}}, \quad I_{2\text{ЛН}} = 144.338 \text{ А};$$

$$I_{2\phi H} := I_{2\text{ЛН}}, \quad I_{2\phi H} = 144.338 \text{ А}.$$

Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора

Потужність КЗ на фазу:

$$P_{\text{К}\phi} := \frac{P_{\text{К}}}{3}, \quad P_{\text{К}\phi} = 656.667 \text{ Вт}.$$

Напруга КЗ:

$$U_{1\text{К}\phi} := \frac{U_{\text{К}\%}}{100} \cdot U_{1\phi H}, \quad U_{1\text{К}\phi} = 77.942 \text{ В}.$$

Опір трансформатора при КЗ:
повний -

$$Z_{\text{К}} := \frac{U_{1\text{К}\phi}}{I_{1\phi H}}, \quad Z_{\text{К}} = 4.05 \text{ Ом};$$

активний -

$$R_K := \frac{P_{K\phi}}{I_{1\phi H}^2}, \quad R_K = 1.773 \text{ Ом};$$

реактивний -

$$X_K := \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \quad X_K = 3.641 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт потужності при КЗ:

$$\cos\phi_K := \frac{R_K}{Z_K}, \quad \cos\phi_K = 0.438;$$

$$\phi_K := \arccos(\cos\phi_K) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad \phi_K = 64.038 \text{ град}.$$

Опори обмоток трансформатора:

повні -

$$Z_1 := \frac{Z_K}{2}, \quad Z_1 = 2.02 \text{ Ом};$$

$$Z_{2'} := Z_1;$$

активні -

$$R_1 := \frac{R_K}{2}, \quad R_1 = 0.887 \text{ Ом};$$

$$R_{2'} := R_1;$$

реактивні -

$$X_1 := \frac{X_K}{2}, \quad X_1 = 1.821 \text{ Ом};$$

$$X_{2'} := X_1.$$

Потужність втрат ХХ на фазу:

$$P_{0\phi} := \frac{P_0}{3}, \quad P_{0\phi} = 121.667 \text{ Вт}.$$

Фазний струм $I_{0\phi}$:

$$I_{0\phi} := I_{0\%} \cdot \frac{I_{1\phi H}}{100}, \quad I_{0\phi} = 0.5 \text{ A.}$$

Опори кола намагнічування:

повний -

$$Z_m := \frac{U_{1\phi H}}{I_{0\phi}} - Z_1, \quad Z_m = 3.46 \times 10^3 \text{ Ом};$$

активний -

$$R_m := \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} - R_1, \quad R_m = 485.06 \text{ Ом};$$

реактивний -

$$X_m := \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}, \quad X_m = 3.425 \times 10^3 \text{ Ом}.$$

Кут магнітних втрат:

$$\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{R_m}{X_m}\right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad \alpha = 8.06 \text{ град}.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k := \frac{U_{1\phi H}}{U_{2\phi H}}, \quad k = 7.5.$$

Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинної напруги

Складові напруг КЗ:

активна -

$$U_{ка\%} := R_k \cdot I_{1\phi H} \cdot \frac{100}{U_{1\phi H}}, \quad U_{ка\%} = 1.97 \text{ \%};$$

реактивна -

$$U_{\text{кр}\%} := X_{\text{к}} \cdot I_{1\text{фн}} \cdot \frac{100}{U_{1\text{фн}}}, \quad U_{\text{кр}\%} = 4.046 \% ;$$

$$\phi_{2.} := \arccos(\cos\phi_2) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad \phi_{2.} = 43.946 \text{ град.}$$

Відсоткова зміна вторинної напруги при номінальному навантаженні:

$$\Delta U_{\%} := U_{\text{ка}\%} \cdot \cos\phi_2 + U_{\text{кр}\%} \cdot \sin\left(\phi_{2.} \cdot \frac{\pi}{180}\right),$$

$$\Delta U_{\%} = 4.226 \% .$$

Аргумент коефіцієнта потужності (при ємнісному навантаженні):

$$\phi_2 := -\arccos(\cos\phi_2) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad \phi_2 = -43.946 \text{ град.}$$

Приведене значення вторинної напруги при номінальному навантаженні:

$$U_{2'} := U_{1\text{фн}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right), \quad U_{2'} = 1.659 \times 10^3 \text{ В.}$$

Приведений струм вторинної обмотки:

$$I_{2\text{фн}'} := \frac{I_{2\text{фн}}}{k}, \quad I_{2\text{фн}'} = 19.245 \text{ А.}$$

Побудова векторної діаграми

Величини спаду напруги на опорах обмоток:

активні -

$$R_1 \cdot I_{1\text{фн}} = 17.061 \text{ В}, \quad R_2 \cdot I_{2\text{фн}'} = 17.061 \text{ В};$$

реактивні -

$$X_1 \cdot I_{1\text{фн}} = 35.038 \text{ В}, \quad X_2 \cdot I_{2\text{фн}'} = 35.038 \text{ В.}$$

Векторна діаграма трансформатора за результатами розрахунків показана на рис. В.1.

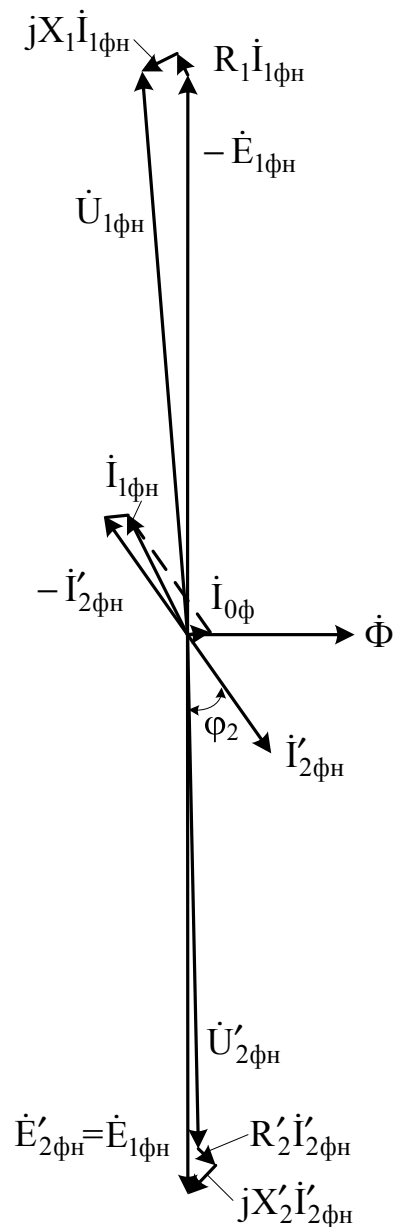


Рисунок В.1 – Векторна діаграма трансформатора

Дослідження паралельної роботи двох трансформаторів

Трансформатори з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання

$$k_I \neq k_{II} , \quad U_{кI\%} = U_{кII\%} .$$

$$U_{1\phi HI} := U_{1\phi H} , \quad U_{1\phi HII} := U_{1\phi HI} , \quad U_{2\phi HII} := U_{2\phi H} .$$

Перший трансформатор увімкнений на відпайку $\Delta U_{I\%} := -5\%$.

Вторинна напруга першого трансформатора:

$$U_{2\phi I} := \left(1 - \frac{\Delta U_{I\%}}{100}\right) \cdot U_{2\phi н II} , \quad U_{2\phi I} = 242.487 \text{ В} .$$

Коефіцієнти трансформації:

$$k_I := \frac{U_{1\phi н I}}{U_{2\phi I}} , \quad k_I = 7.143 ;$$

$$k_{II} := \frac{U_{1\phi н II}}{U_{2\phi н II}} , \quad k_{II} = 7.5 .$$

Оскільки $k_I < k_{II}$, то перевантажений перший трансформатор.

Різниця коефіцієнтів трансформації:

$$\Delta k := |k_I - k_{II}| , \quad \Delta k = 0.357 .$$

Середній коефіцієнт трансформації:

$$k_{ср} := \sqrt{k_I \cdot k_{II}} , \quad k_{ср} = 7.319 .$$

Різниця коефіцієнтів трансформації у відсотках від $k_{ср}$:

$$\Delta k_{\%} := \frac{\Delta k}{k_{ср}} \cdot 100 , \quad \Delta k_{\%} = 4.88\% .$$

Зрівноважувальний струм:

$$I_{зр2} := \Delta k_{\%} \cdot \frac{I_{2\phi н}}{2 \cdot U_{к\%}} , \quad I_{зр2} = 78.255 \text{ А} .$$

Оскільки результуючий вторинний струм перевантаженого першого трансформатора не повинен перевищувати його номінального значення, то приймаємо

$$I_{2I} := I_{2\phi н} , \quad I_{2I} = 144.338 \text{ А} .$$

Струм, який перевантажений трансформатор віддає навантаженню:

$$I_{\text{наві}} := -I_{3p2} \cdot \cos\left[\left(\phi_k + \phi_2\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right] + \sqrt{\left[I_{3p2} \cdot \cos\left[\left(\phi_k + \phi_2\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right]\right]^2 - \left(I_{3p2}^2 - I_{2\text{фн}}^2\right)}$$

$$I_{\text{наві}} := |I_{\text{наві}}|, \quad I_{\text{наві}} = 68.319 \text{ А.}$$

Умова $I_{\text{наві}} < I_{2\text{фн}}$ виконується.

Напруга на шинах навантаження:

$$U_{2\text{ср}} := \frac{U_{1\text{фн}}}{k_{\text{ср}}}, \quad U_{2\text{ср}} = 236.643 \text{ В.}$$

Струми, що віддаються обома трансформаторами навантаженню:

$$I_{\text{навіІ}} := I_{\text{наві}}, \quad I_{\text{навіІ}} = 68.319 \text{ А.}$$

Результуючий струм вторинної обмотки недовантаженого трансформатора:

$$I_{2\text{ІІ}} := \sqrt{I_{\text{навіІ}}^2 + I_{3p2}^2 + 2 \cdot I_{\text{навіІ}} \cdot I_{3p2} \cdot \cos\left[\left(\phi_k - \phi_2\right) \cdot \frac{\pi}{180}\right]},$$

$$I_{2\text{ІІ}} = 86.546 \text{ А.}$$

Ступінь завантаження трансформаторів результуючими струмами:

$$N_{\text{І}} := \frac{I_{2\text{І}}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100, \quad N_{\text{І}} = 100 \text{ \%};$$

$$N_{\text{ІІ}} := \frac{I_{2\text{ІІ}}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100, \quad N_{\text{ІІ}} = 59.961 \text{ \%}.$$

Усталена потужність:

$$S_{\text{уст}} := 2 \cdot S_{\text{н}}, \quad S_{\text{уст}} = 2 \times 10^5 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} := 3 \cdot U_{2\text{ср}} \cdot (I_{\text{навіІ}} + I_{\text{навіІІ}}), \quad S_{\Sigma} = 9.7004 \times 10^4 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S := S_{\text{yct}} - S_{\Sigma}, \quad \Delta S = 1.03 \times 10^5 \text{ кВ}\cdot\text{А} ;$$

$$\Delta S_{0\%} := 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_{\text{yct}}}, \quad \Delta S_{0\%} = 51.498\% .$$

Трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання

$$k_{\text{I}} = k_{\text{II}}, \quad U_{\text{kI}\%} \neq U_{\text{kII}\%}, \quad \Delta U_{\text{k3}\%} := 43\% .$$

$$U_{\text{kII}\%} := \left(1 + \frac{\Delta U_{\text{k3}\%}}{100} \right) \cdot U_{\text{k}\%}, \quad U_{\text{kII}\%} = 6.435\% .$$

Прийmemo струм навантаження першого перевантаженого трансформатора

$$I_{\text{I}} := I_{2\text{фн}}, \quad I_{\text{I}} = 144.338 \text{ А} .$$

Струм, що віддається недовантаженим другим трансформатором навантаженню:

$$I_{\text{II}} := \frac{I_{2\text{фн}}}{1 + \frac{\Delta U_{\text{k3}\%}}{100}}, \quad I_{\text{II}} = 100.935 \text{ А} .$$

Ступінь навантаження трансформаторів:

$$N_{\text{I}} := \frac{I_{\text{I}}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100, \quad N_{\text{I}} = 100\% ;$$

$$N_{\text{II}} := \frac{I_{\text{II}}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100, \quad N_{\text{II}} = 69.93\% .$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} := 3 \cdot U_{2\text{фн}} \cdot (I_{\text{I}} + I_{\text{II}}), \quad S_{\Sigma} = 1.6993 \times 10^5 \text{ кВ}\cdot\text{А} .$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S := S_{\text{уст}} - S_{\Sigma} , \quad \Delta S = 3.007 \times 10^4 \text{ кВ}\cdot\text{А} ;$$

$$\Delta S_{\%} := 100 \cdot \frac{\Delta S}{S_{\text{уст}}} , \quad \Delta S_{\%} = 51.498 \% .$$

Визначення ударних струмів КЗ

Ударний коефіцієнт для заданого трансформатора:

$$K_{\text{yd}} := 1 + e^{-\pi \cdot \frac{R_{\text{к}}}{X_{\text{к}}}} , \quad K_{\text{yd}} = 1.217 .$$

Амплітуда усталеного струму КЗ:

для первинної обмотки -

$$I_{\text{km1}} := \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \frac{I_{1\text{фн}}}{U_{\text{к}\%}} , \quad I_{\text{km1}} = 604.812 \text{ А} ;$$

для вторинної обмотки -

$$I_{\text{km2}} := \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \frac{I_{2\text{фн}}}{U_{\text{к}\%}} , \quad I_{\text{km2}} = 4.536 \times 10^3 \text{ А} .$$

Ударні струми КЗ:

$$i_{\text{kyd1}} := K_{\text{yd}} \cdot I_{\text{km1}} , \quad i_{\text{kyd1}} = 735.816 \text{ А} ;$$

$$i_{\text{kyd2}} := K_{\text{yd}} \cdot I_{\text{km2}} , \quad i_{\text{kyd2}} = 5.519 \times 10^3 \text{ А} .$$

Розрахунок і вибір потужності силового трансформатора для системи ТП-ДПС

$$k_{\text{с}} := 1.045 , \quad P_{\text{д}} := 21 \text{ кВт} .$$

Типова потужність трансформатора:

$$S_{\text{Т}} := k_{\text{с}} \cdot P_{\text{д}} , \quad S_{\text{Т}} = 21.945 \text{ кВ}\cdot\text{А} .$$

З [12] вибираємо трансформатор з параметрами, вказаними в табл. В.3.

Таблиця В.3 – Технічні дані вибраного трансформатора

Тип	S_n , кВ·А	U_{1n} , кВ	U_{2n} , кВ	$U_{k\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0 , кВт	P_k , кВт	Схема і група з'єднань
ТМ-25/10	25	6	0,23	2,8	4,5	0,115	0,6	Y/Y _n -0

В.2 Розрахунок асинхронного двигуна

Розглядається асинхронний двигун з параметрами, вказаними в табл. В.4 при частоті напруги мережі $f_1 = 50$ Гц.

Таблиця В.4 – Дані асинхронного двигуна

P_n , кВт	U_{1n} , кВ	I_{1n} , А	Схема обм. статора	n_n , об/хв	R_1 , Ом	X_1 , Ом	R'_2 , Ом	X'_2 , Ом	$I_{0\phi}$, А	$\cos\phi_0$	$\Delta P_{\text{мех}}$, кВт
320	6	37	Y	1480	1,17	13,85	1,2264	13,98	10	0,045	1,45

В ППП MathCAD розрахунок асинхронного двигуна можна здійснити у такій послідовності.

$$\begin{aligned}
 P_n &:= 320 \cdot 10^3 \text{ Вт}; & n_1 &:= 1500 \text{ хв}^{-1}; & f_1 &:= 50 \text{ Гц}; \\
 U_{1\text{ЛН}} &:= 6 \cdot 10^3 \text{ В}; & I_{1\text{ЛН}} &:= 37 \text{ А}; & n_n &:= 1480 \text{ хв}^{-1}; \\
 R_1 &:= 1.17 \text{ Ом}; & X_1 &:= 13.85 \text{ Ом}; & R_2' &:= 1.2264 \text{ Ом}; \\
 X_2' &:= 13.98 \text{ Ом}; & I_{0\phi} &:= 10 \text{ А}; & \cos\phi_0 &:= 0.045; \\
 \Delta P_{\text{мех}} &:= 1.45 \cdot 10^3 \text{ Вт}; & & & & & \text{схема обмотки статора - Y}
 \end{aligned}$$

Розрахунок параметрів схеми заміщення АД

Фазні напруги й струми обмотки статора:

$$U_{1\phi H} := \frac{U_{1\text{ЛН}}}{\sqrt{3}}, \quad U_{1\phi H} = 3.464 \times 10^3 \text{ В};$$

$$I_{1\phi H} := I_{1\text{ЛН}}, \quad I_{1\phi H} = 37 \text{ А}.$$

Активна потужність, що споживається двигуном на ХХ:

$$P_0 := 3 \cdot U_{1\phi H} \cdot I_{0\phi} \cdot \cos\phi_0, \quad P_0 = 4.677 \times 10^3 \text{ Вт}.$$

Електричні втрати в обмотці статора на ХХ:

$$\Delta p_{e10} := 3 \cdot I_{0\phi}^2 \cdot R_1, \quad \Delta p_{e10} = 351 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності в сталі статора (магнітні втрати):

$$\Delta p_{M1} := P_0 - \Delta p_{e10} - \Delta p_{\text{мех}}, \quad \Delta p_{M1} = 2.876 \times 10^3 \text{ Вт}.$$

Повний опір обмотки статора:

$$Z_1 := \sqrt{R_1^2 + X_1^2}, \quad Z_1 = 13.899 \text{ Ом}.$$

Повний опір двигуна:

$$Z_0 := \frac{U_{1\phi H}}{I_{0\phi}}, \quad Z_0 = 346.4 \text{ Ом}.$$

Опори кола намагнічування схеми заміщення:

повний -

$$Z_M := Z_0 - Z_1, \quad Z_M = 332.5 \text{ Ом};$$

активний -

$$R_M := \frac{\Delta p_{M1}}{3 \cdot I_{0\phi}^2}, \quad R_M = 9.585 \text{ Ом};$$

реактивний -

$$X_M := \sqrt{Z_M^2 - R_M^2}, \quad X_M = 332.373 \text{ Ом}.$$

Поправковий коефіцієнт:

$$C_1 := 1 + \frac{X_1}{X_M}, \quad C_1 = 1.042.$$

Параметри головної вітки схеми заміщення:

$$\begin{aligned} C_1 \cdot R_1 &= 1.219 \text{ Ом}; & C_1 \cdot X_1 &= 14.427 \text{ Ом}; \\ C_1^2 \cdot R_2' &= 1.331 \text{ Ом}; & C_1^2 \cdot X_2' &= 15.169 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Розрахунок параметрів АД при номінальному режимі

Ковзання:

$$s_H := \frac{n_1 - n_H}{n_1}, \quad s_H = 0.013.$$

Повний опір головної вітки схеми заміщення:

$$Z_\Sigma := \sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2},$$

$$Z_\Sigma = 105.27 \text{ Ом}.$$

Приведений струм ротора:

$$I_{2\phi'} := \frac{U_{1\phi_H}}{Z_\Sigma}, \quad I_{2\phi'} = 32.907 \text{ А}.$$

Косинус і синус кута:

$$\cos\phi_{2'} := \frac{C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s_H}}{Z_\Sigma}, \quad \cos\phi_{2'} = 0.96;$$

$$\sin\phi_{2'} := \frac{C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2'}{Z_\Sigma}, \quad \sin\phi_{2'} = 0.281.$$

Активна і реактивна складові струму головної вітки:

$$I_{2a'} := I_{2\phi'} \cdot \cos\phi_{2'} , \quad I_{2a'} = 31.579 \text{ A};$$

$$I_{2p'} := I_{2\phi'} \cdot \sin\phi_{2'} , \quad I_{2p'} = 9.252 \text{ A}.$$

Активна і реактивна складові струму ХХ:

$$I_{0a} := I_{0\phi} \cdot \cos\phi_0 , \quad I_{0a} = 0.45 \text{ A};$$

$$\sin\phi_0 := \sqrt{1 - \cos\phi_0^2} , \quad \sin\phi_0 = 0.999 ;$$

$$I_{0p} := I_{0\phi} \cdot \sin\phi_0 , \quad I_{0p} = 9.99 \text{ A}.$$

Активна і реактивна складові повного струму статора:

$$I_{1a} := I_{0a} + I_{2a'} , \quad I_{1a} = 32.029 \text{ A};$$

$$I_{1p} := I_{0p} + I_{2p'} , \quad I_{1p} = 19.242 \text{ A}.$$

Номінальний фазний струм, що споживається двигуном із мережі:

$$I_{1\text{фн.}} := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} , \quad I_{1\text{фн.}} = 37.365 \text{ A}.$$

Коефіцієнт потужності двигуна:

$$\cos\phi_{1\text{н.}} := \frac{I_{1a}}{I_{1\text{фн.}}} , \quad \cos\phi_{1\text{н.}} = 0.857.$$

Номінальна активна потужність, що споживається двигуном із мережі:

$$P_{1\text{н.}} := 3 \cdot U_{1\text{фн.}} \cdot I_{1\text{фн.}} \cdot \cos\phi_{1\text{н.}} , \quad P_{1\text{н.}} = 3.2961 \times 10^5 \text{ Вт}.$$

Втрати потужності в двигуні:

в обмотці статора -

$$\Delta p_{e1} := 3 \cdot I_{1\text{фн.}}^2 \cdot R_1 , \quad \Delta p_{e1} = 4.805 \times 10^3 \text{ Вт};$$

в обмотці ротора -

$$\Delta p_{e2} := 3 \cdot I_{2\phi'}^2 \cdot C_1^2 \cdot R_2' , \quad \Delta p_{e2} = 4.323 \times 10^3 \text{ Вт};$$

додаткові -

$$\Delta p_{\text{д}} := 0.005 \cdot P_{1\text{н}}, \quad \Delta p_{\text{д}} = 1.648 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати потужності в двигуні:

$$\Delta p_{\Sigma} := \Delta p_{\text{e1}} + \Delta p_{\text{e2}} + \Delta p_{\text{д}} + \Delta p_{\text{м1}} + \Delta p_{\text{мех}},$$

$$\Delta p_{\Sigma} = 1.5102 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

Корисна потужність на валу:

$$P_{2\text{н}} := P_{1\text{н}} - \Delta p_{\Sigma}, \quad P_{2\text{н}} = 3.1451 \times 10^5 \text{ Вт.}$$

Відхилення розрахованої величини корисної потужності від заданої:

$$\Delta P_{2\text{н}} := \frac{P_{2\text{н}} - P_{\text{н}}}{P_{\text{н}}} \cdot 100, \quad \Delta P_{2\text{н}} = -1.716 \% .$$

Номінальний ККД:

$$\eta_{\text{н}} := \frac{P_{2\text{н}}}{P_{1\text{н}}}, \quad \eta_{\text{н}} = 0.954 .$$

Кількість пар полюсів обмотки статора:

$$p := \frac{60 \cdot f_1}{n_1}, \quad p = 2 .$$

Електромагнітний обертовий момент двигуна:

$$M_{\text{н}} := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{s_{\text{н}}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2 \right]},$$

$$M_{\text{н}} = 2.064 \times 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Розрахунок пускового та максимального моментів

Пусковий момент двигуна при $s := 1$

$$M_{\Pi} := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]}$$

$$M_{\Pi} = 345.608 \cdot \text{Н} \cdot \text{м} .$$

Критичне ковзання:

$$s_{\text{кр}} := \frac{C_1^2 \cdot R_2'}{\sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2}}, \quad s_{\text{кр}} = 0.045 .$$

Максимальний момент:

$$M_{\text{max}} := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн}}^2}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2} + C_1 \cdot R_1 \right]}$$

$$M_{\text{max}} = 3.716 \times 10^3 \text{Н} \cdot \text{м} .$$

Розрахунок та побудова природної механічної та робочих характеристик

Механічна характеристика $s=f(M)$ будується за співвідношенням:

$$s := 0.00001, 0.001 \dots 1$$

$$M(s) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]}$$

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна показана на рис. В.2.

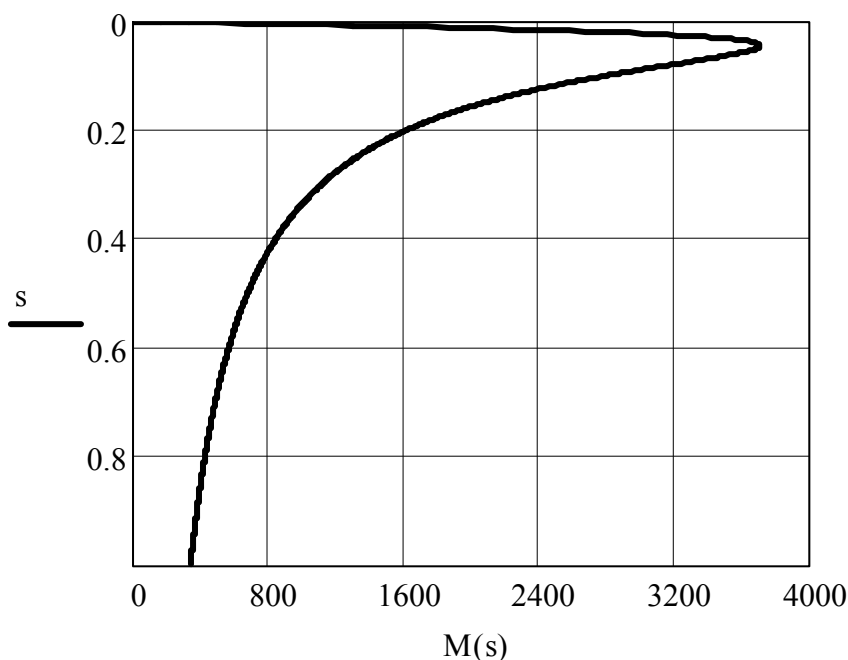


Рисунок В.2 – Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

Для побудови робочих характеристик двигуна переходимо до відносних одиниць:

$$s := 0.00001, 0.0002 \dots 1.2 \cdot s_H ;$$

$$Z_{\Sigma}(s) := \sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2'\right)^2} ;$$

$$I_{2\phi'}(s) := \frac{U_{1\phi_H}}{Z_{\Sigma}(s)} ;$$

$$\cos\phi_{2'}(s) := \frac{C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{s}}{Z_{\Sigma}(s)} ; \quad \sin\phi_{2'}(s) := \frac{C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2'}{Z_{\Sigma}(s)} ;$$

$$I_{2a'}(s) := I_{2\phi'}(s) \cdot \cos\phi_{2'}(s) ; \quad I_{2p'}(s) := I_{2\phi'}(s) \cdot \sin\phi_{2'}(s) ;$$

$$I_{1a}(s) := I_{0a} + I_{2a'}(s) ; \quad I_{1p}(s) := I_{0p} + I_{2p'}(s) ;$$

$$\begin{aligned}
 I_{1\phi}(s) &:= \sqrt{I_{1a.}(s)^2 + I_{1p.}(s)^2}, & I_{1\phi\text{vidn}}(s) &:= \frac{I_{1\phi}(s)}{I_{1\phi\text{H}}}; \\
 \cos\phi_1(s) &:= \frac{I_{1a.}(s)}{I_{1\phi}(s)}, & \cos\phi_{1\text{vidn}}(s) &:= \frac{\cos\phi_1(s)}{\cos\phi_{1\text{H}}}; \\
 P_1(s) &:= 3 \cdot U_{1\phi\text{H}} \cdot I_{1\phi}(s) \cdot \cos\phi_1(s), & P_{1\text{vidn}}(s) &:= \frac{P_1(s)}{P_{1\text{H}}}; \\
 \Delta p_{e1.}(s) &:= 3 \cdot I_{1\phi}(s)^2 \cdot R_1; & \Delta p_{e2.}(s) &:= 3 \cdot I_{2\phi'}(s)^2 \cdot C_1^2 \cdot R_{2'}; \\
 \Delta p_{\text{д.}}(s) &:= 0.005 \cdot P_1(s); \\
 \Delta p_{\Sigma.}(s) &:= \Delta p_{e1.}(s) + \Delta p_{e2.}(s) + \Delta p_{\text{д.}}(s) + \Delta p_{\text{M1}} + \Delta p_{\text{Mex}}; \\
 P_2(s) &:= P_1(s) - \Delta p_{\Sigma.}(s); & P_{2\text{vidn}}(s) &:= \frac{P_2(s)}{P_{2\text{H}}}; \\
 M(s) &:= \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi\text{H}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{s} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{s} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2 \right]}, \\
 M_{\text{vidn}}(s) &:= \frac{M(s)}{M_{\text{H}}}; & \eta(s) &:= \frac{P_2(s)}{P_1(s)}; \\
 s_{\text{H.}} &:= \frac{n_1 - n_{\text{H}}}{n_1}; & n(s) &:= n_1 \cdot (1 - s); \\
 s_{\text{vidn}}(s) &:= \frac{n_1 - n(s)}{n_1}; & n_{\text{vidn}}(s) &:= \frac{n(s)}{n_1}.
 \end{aligned}$$

Робочі характеристики подані на рис. В.3.

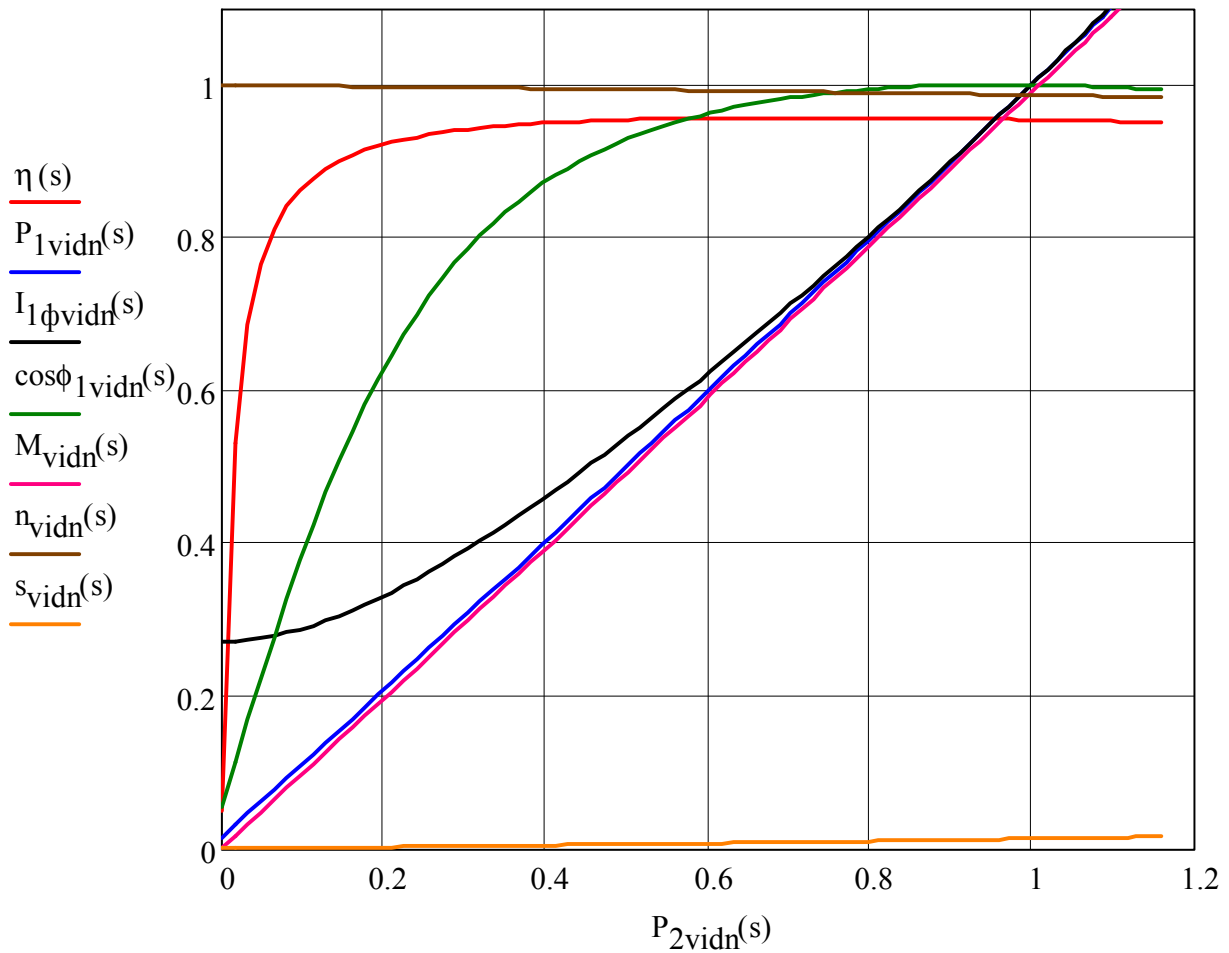


Рисунок В.3 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

*Розрахунок та побудова механічних характеристик
при заданому способі регулювання частоти обертання*

Частотне регулювання

$$n := 0,0.1 \dots n_1$$

$$1) \text{ при } M = \text{const}: \quad \frac{U_{1\phi}}{f_1} = \text{const}$$

$$U_f := \frac{U_{1\phi\text{H}}}{f_1}, \quad U_f = 69.282 \text{ В.}$$

$$\begin{aligned}
 f_{1.40} &:= 40 \text{ Гц}, & n_{1.40} &:= \frac{60 \cdot f_{1.40}}{p}, & n_{1.40} &= 1.2 \times 10^3 \frac{\text{об}}{\text{хв}}, \\
 n_{40} &:= 0,0.1 \dots n_{1.40}, & U_{1\Phi_{\text{H.40}}} &:= U_f f_{1.40}, & U_{1\Phi_{\text{H.40}}} &= 2.771 \times 10^3 \text{ В}; \\
 f_{1.30} &:= 30 \text{ Гц}, & n_{1.30} &:= \frac{60 \cdot f_{1.30}}{p}, & n_{1.30} &= 900 \frac{\text{об}}{\text{хв}}, \\
 n_{30} &:= 0,0.1 \dots n_{1.30}, & U_{1\Phi_{\text{H.30}}} &:= U_f f_{1.30}, & U_{1\Phi_{\text{H.30}}} &= 2.078 \times 10^3 \text{ В}; \\
 f_{1.20} &:= 20 \text{ Гц}, & n_{1.20} &:= \frac{60 \cdot f_{1.20}}{p}, & n_{1.20} &= 600 \frac{\text{об}}{\text{хв}}, \\
 n_{20} &:= 0,0.1 \dots n_{1.20}, & U_{1\Phi_{\text{H.20}}} &:= U_f f_{1.20}, & U_{1\Phi_{\text{H.20}}} &= 1.386 \times 10^3 \text{ В}; \\
 f_{1.10} &:= 10 \text{ Гц}, & n_{1.10} &:= \frac{60 \cdot f_{1.10}}{p}, & n_{1.10} &= 300 \frac{\text{об}}{\text{хв}}, \\
 n_{10} &:= 0,0.1 \dots n_{1.10}, & U_{1\Phi_{\text{H.10}}} &:= U_f f_{1.10}, & U_{1\Phi_{\text{H.10}}} &= 692.82 \text{ В}
 \end{aligned}$$

$$M(n) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\Phi_{\text{H}}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_1 - n}{n_1}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_1 - n}{n_1}} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2 \right]}$$

$$M_{40}(n_{40}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\Phi_{\text{H.40}}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.40} - n_{40}}{n_{1.40}}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1.40} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.40} - n_{40}}{n_{1.40}}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1.40}}{f_1} \right)^2 \cdot \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2 \right]}$$

$$M_{30}(n_{30}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\Phi_{H.30}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.30} - n_{30}}{n_{1.30}}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1.30} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.30} - n_{30}}{n_{1.30}}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1.30}}{f_1} \right)^2 \cdot (C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'})^2 \right]}$$

$$M_{20}(n_{20}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\Phi_{H.20}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.20} - n_{20}}{n_{1.20}}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1.20} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.20} - n_{20}}{n_{1.20}}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1.20}}{f_1} \right)^2 \cdot (C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'})^2 \right]}$$

$$M_{10}(n_{10}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\Phi_{H.10}}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.10} - n_{10}}{n_{1.10}}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1.10} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{\frac{n_{1.10} - n_{10}}{n_{1.10}}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1.10}}{f_1} \right)^2 \cdot (C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'})^2 \right]}$$

Механічні характеристики при зміні частоти напруги живлення і $M = \text{const}$ подані на рис. В.4.

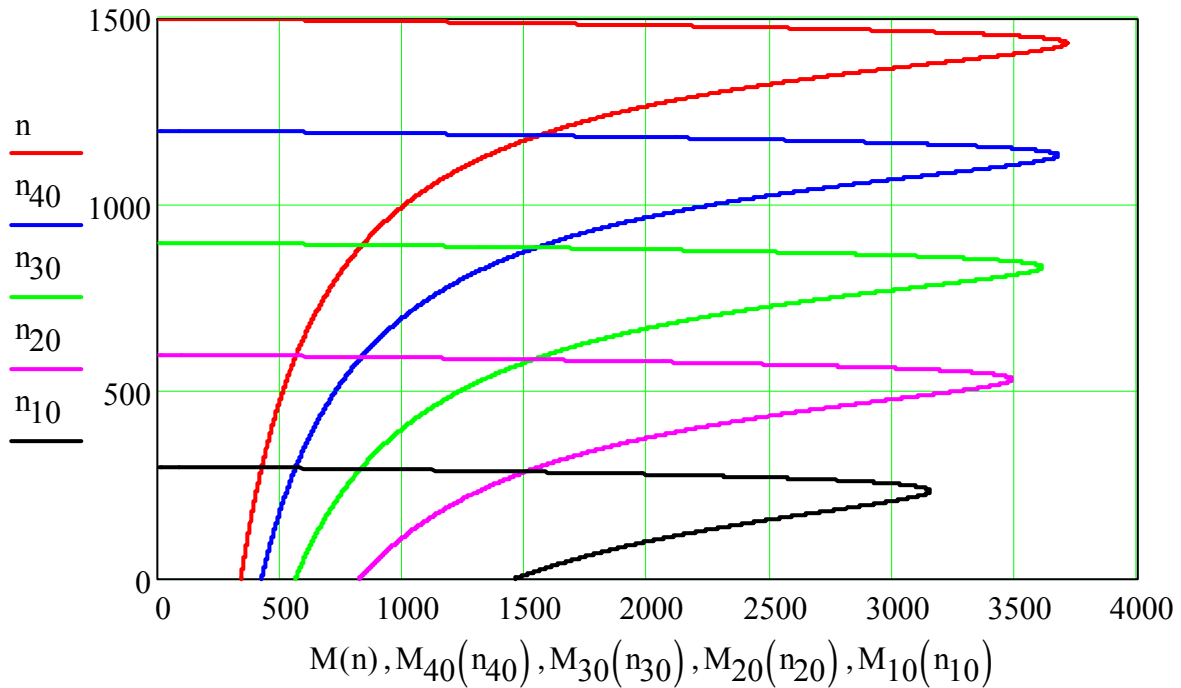


Рисунок В.4 – Механічні характеристики при зміні частоти напруги живлення і $M = \text{const}$

$$2) \text{ при } P_2 = \text{const}: \frac{U_1 \Phi}{\sqrt{f_1}} = \text{const}$$

$$U_f := \frac{U_1 \Phi_H}{\sqrt{f_1}}, \quad U_f = 489.898 \text{ В.}$$

$$f_{1_40} := \left(\frac{U_1 \Phi_{H.40}}{U_f} \right)^2, \quad f_{1_40} = 32 \text{ Гц};$$

$$f_{1_30} := \left(\frac{U_1 \Phi_{H.30}}{U_f} \right)^2, \quad f_{1_30} = 18 \text{ Гц};$$

$$f_{1_20} := \left(\frac{U_1 \Phi_{H.20}}{U_f} \right)^2, \quad f_{1_20} = 8 \text{ Гц};$$

$$f_{1_10} := \left(\frac{U_1 \Phi_{H.10}}{U_f} \right)^2, \quad f_{1_10} = 2 \text{ Гц}$$

$$M'_{40}(n_{40}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi_{н.40}} \cdot 2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.40} - n_{40}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1_40} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.40} - n_{40}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1_40}}{f_1} \right)^1 \cdot (C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2')^2 \right]}$$

$$M'_{30}(n_{30}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi_{н.30}} \cdot 2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.30} - n_{30}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1_30} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.30} - n_{30}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1_30}}{f_1} \right)^1 \cdot (C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2')^2 \right]}$$

$$M'_{20}(n_{20}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi_{н.20}} \cdot 2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.20} - n_{20}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1_20} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.20} - n_{20}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1_20}}{f_1} \right)^1 \cdot (C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2')^2 \right]}$$

$$M'_{10}(n_{10}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi_{н.10}} \cdot 2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.10} - n_{10}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_{1_10} \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{n_{1.10} - n_{10}} \right)^2 + \left(\frac{f_{1_10}}{f_1} \right)^1 \cdot (C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2')^2 \right]}$$

Механічні характеристики при зміні частоти напруги живлення за умови $P_2 = \text{const}$ подані на рис. В.5.

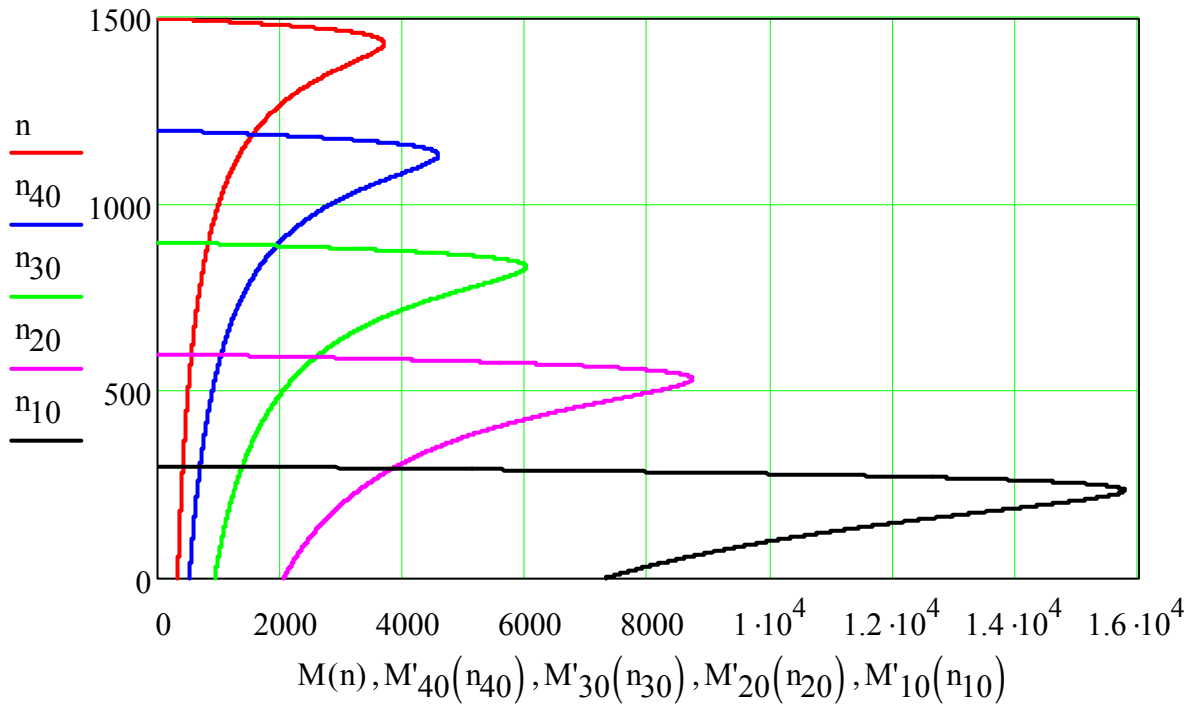


Рисунок В.5 – Механічні характеристики при зміні частоти напруги живлення за умови $P_2 = \text{const}$

Зміна напруги живлення

$$U_{1\text{фн}.0.8} := 0.8 \cdot U_{1\text{фн}}, \quad U_{1\text{фн}.0.8} = 2.771 \times 10^3 \text{ В};$$

$$U_{1\text{фн}.0.6} := 0.6 \cdot U_{1\text{фн}}, \quad U_{1\text{фн}.0.6} = 2.078 \times 10^3 \text{ В};$$

$$U_{1\text{фн}.0.4} := 0.4 \cdot U_{1\text{фн}}, \quad U_{1\text{фн}.0.4} = 1.386 \times 10^3 \text{ В};$$

$$U_{1\text{фн}.0.2} := 0.2 \cdot U_{1\text{фн}}, \quad U_{1\text{фн}.0.2} = 692.82 \text{ В};$$

$$n_{0.6} := 0..n_1, \quad n_{0.8} := 0..n_1, \quad n_{0.4} := 0..n_1, \quad n_{0.2} := 0..n_1$$

$$M_{0.6}(n_{0.6}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн}.0.6}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{\frac{n_1 - n_{0.6}}{n_1}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_2'}{\frac{n_1 - n_{0.6}}{n_1}} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]};$$

$$M_{0.8}(n_{0.8}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн.}0.8}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{n_1} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{n_1} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2 \right]};$$

$$M_{0.4}(n_{0.4}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн.}0.4}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{n_1} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{n_1} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2 \right]};$$

$$M_{0.2}(n_{0.2}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\text{фн.}0.2}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{n_1} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_{2'}}{n_1} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2 \right]}$$

Зовнішній вигляд механічних характеристик при $U_{1\phi} = \text{var}$ показаний на рис. В.6.

Зміна опору в колі ротора

Значення додаткового опору, при вмиканні якого в коло ротора при пуску можна отримати максимальний момент:

$$R_d := \sqrt{\left(C_1 \cdot R_1 \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_{2'} \right)^2} - C_1^2 \cdot R_{2'} ,$$

$$R_d = 28.291 \text{ Ом} .$$

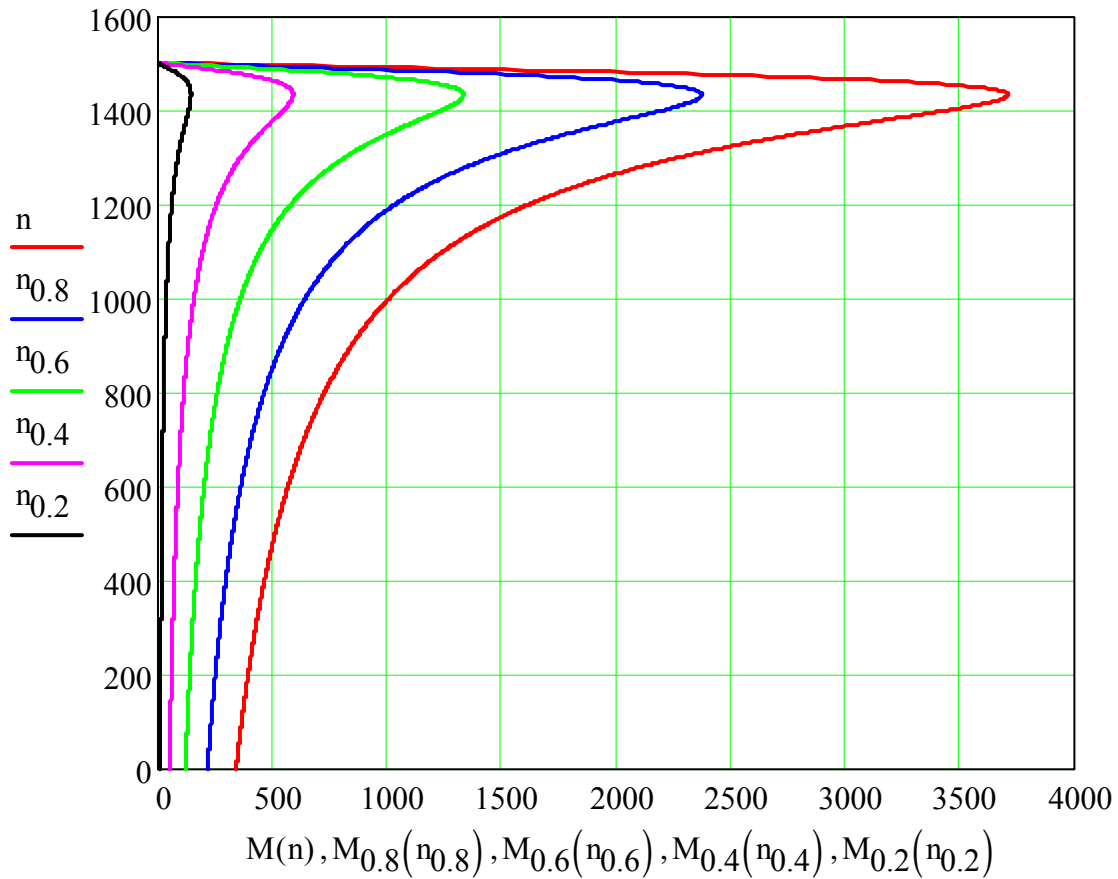


Рисунок В.6 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при $U_{1\phi} = \text{var}$

$$n_R := 0..n_1, \quad n_{0.8R} := 0..n_1, \quad n_{0.6R} := 0..n_1,$$

$$n_{0.4R} := 0..n_1, \quad n_{0.2R} := 0..n_1$$

$$M_R(n_R) := \frac{3 \cdot p \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{R_d}{n_1 - n_R} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{R_d}{n_1} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]};$$

$$M_{0.8R}(n_{0.8R}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_1 \phi_H^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{0.8R_d}{\frac{n_1 - n_{0.8R}}{n_1}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{0.8R_d}{\frac{n_1 - n_{0.8R}}{n_1}} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]};$$

$$M_{0.6R}(n_{0.6R}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_1 \phi_H^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{0.6R_d}{\frac{n_1 - n_{0.6R}}{n_1}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{0.6R_d}{\frac{n_1 - n_{0.6R}}{n_1}} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]};$$

$$M_{0.4R}(n_{0.4R}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_1 \phi_H^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{0.4 \cdot R_d}{\frac{n_1 - n_{0.4R}}{n_1}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{0.4 \cdot R_d}{\frac{n_1 - n_{0.4R}}{n_1}} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]};$$

$$M_{0.2R}(n_{0.2R}) := \frac{3 \cdot p \cdot U_1 \phi_H^2 \cdot \left(C_1^2 \cdot \frac{0.2R_d}{\frac{n_1 - n_{0.2R}}{n_1}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left[\left(C_1 \cdot R_1 + C_1^2 \cdot \frac{0.2R_d}{\frac{n_1 - n_{0.2R}}{n_1}} \right)^2 + \left(C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \right)^2 \right]}$$

Зовнішній вигляд механічних характеристик при $R'_2 = \text{var}$ показаний на рис. В.7.

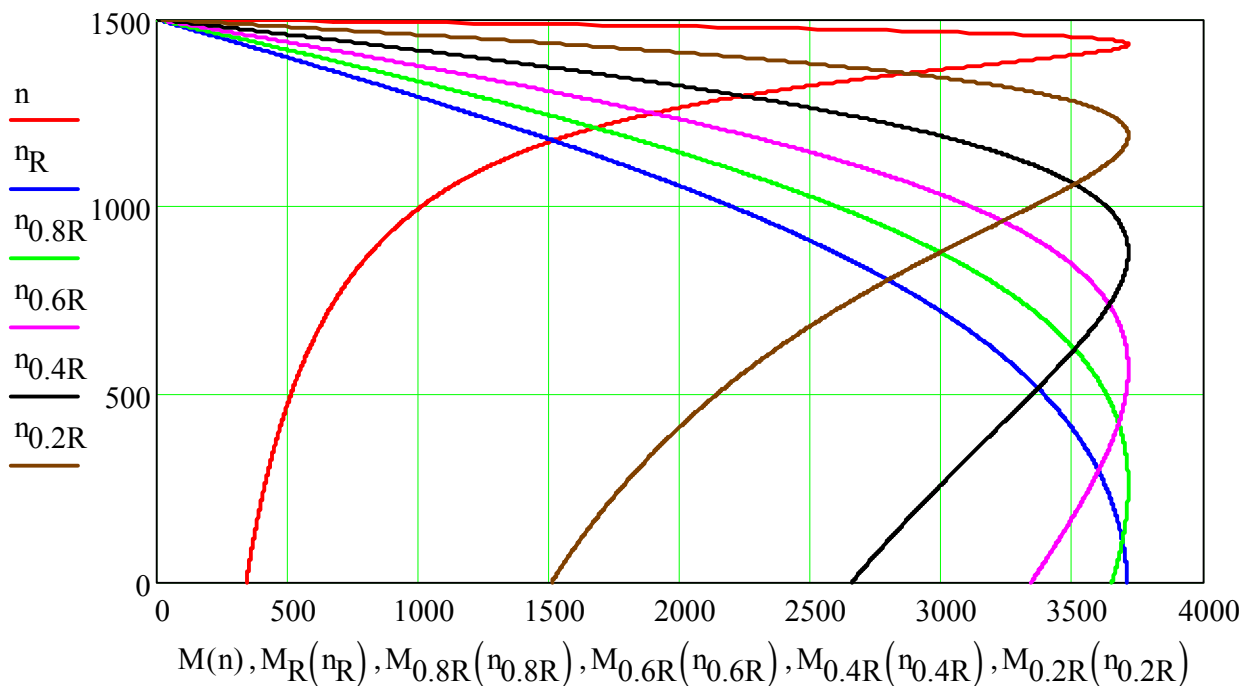


Рисунок В.7 – Механічні характеристики асинхронного двигуна при $R'_2 = var$

В.3 Розрахунок машини постійного струму

Розглядається машина постійного струму з параметрами, вказаними в табл. В.5, і характеристикою холостого ходу, дані якої зведені до табл. В.6.

Таблиця В.5 – Дані машини постійного струму

P_n , кВт	U_n , В	n_n , об/хв	$2p$	N	$2a$	$R_{я}$, Ом	$R_{д}$, Ом	R_z , Ом	$\Delta P_{мех}$, кВт	ΔP_m , кВт
21	230	1500	4	516	4	0,132	0,0425	50	0,45	0,65

Таблиця В.6 – Характеристика холостого ходу

$I_3^* = I_3 / I_{30}$, под/од	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$E_o^* = E_o / U_n$, под/од	0,05	0,75	1,00	1,12	1,20	1,26	1,30	1,33

В ППП MathCAD розрахунок машини постійного струму можна виконати в такій послідовності.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{H}} &:= 21 \cdot 10^3 \text{ Вт}; & U_{\text{H}} &:= 230 \text{ В}; & n_{\text{H}} &:= 1500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}; \\
 p &:= 2; & a &:= 2; & N &:= 516; \\
 R_{\text{я}} &:= 0.132 \text{ Ом}; & R_{\text{д}} &:= 0.0425 \text{ Ом}; & R_3 &:= 50 \text{ Ом}; \\
 \Delta p_{\text{мех}} &:= 0.45 \cdot 10^3 \text{ Вт}; & & & \Delta p_{\text{М}} &:= 0.65 \cdot 10^3 \text{ Вт}
 \end{aligned}$$

Режим генератора

Номінальний струм навантаження:

$$I_{\text{H}} := \frac{P_{\text{H}}}{U_{\text{H}}}, \quad I_{\text{H}} = 91.304 \text{ А.}$$

Сумарний опір обмоток якоря і додаткових полюсів при температурі 75 °С:

$$R_{\text{а75}} := 1.215 \cdot (R_{\text{я}} + R_{\text{д}}), \quad R_{\text{а75}} = 0.212 \text{ Ом}.$$

Спад напруги на щітках:

$$\Delta U_{\text{щ}} := 2 \cdot p, \quad \Delta U_{\text{щ}} = 4 \text{ В}.$$

Спад напруги в колі якоря у відносних одиницях:

$$\Delta U_{\text{я_відн}} := \frac{I_{\text{H}} \cdot R_{\text{а75}} + \Delta U_{\text{щ}}}{U_{\text{H}}}, \quad \Delta U_{\text{я_відн}} = 0.102.$$

Зменшення ЕРС за рахунок розмагнічувальної дії реакції якоря:

$$\Delta E_{\text{відн}} := 0.3 \cdot \Delta U_{\text{я_відн}}, \quad \Delta E_{\text{відн}} = 0.03.$$

ЕРС генератора на холостому ході у відносних одиницях:

$$E_{01_відн} := 1 + \Delta U_{\text{я_відн}} + \Delta E_{\text{відн}},$$

$$E_{01_відн} = 1.132.$$

Опір обмотки збудження при температурі 75 °С:

$$R_{375} := 1.215 \cdot R_3, \quad R_{375} = 60.75 \text{ Ом}.$$

Номінальний струм збудження:

$$I_{3H} := \frac{U_H}{R_{375}}, \quad I_{3H} = 3.786 \text{ A.}$$

Характеристика холостого ходу:

$$j := 0..7 \quad I_{3j} := \quad E_{0j} :=$$

0	0.05
0.5	0.75
1.0	1
1.5	1.12
2.0	1.2
2.5	1.26
3.0	1.3
3.5	1.33

За вихідними даними будуюмо характеристику холостого ходу $E_{0*} = f(I_{3*})$, а за розрахованими – характеристичний трикутник (рис. В.8). Побудови виконані в ППП Microsoft Visio на базі характеристики холостого ходу, перенесеної з ППП MathCAD.

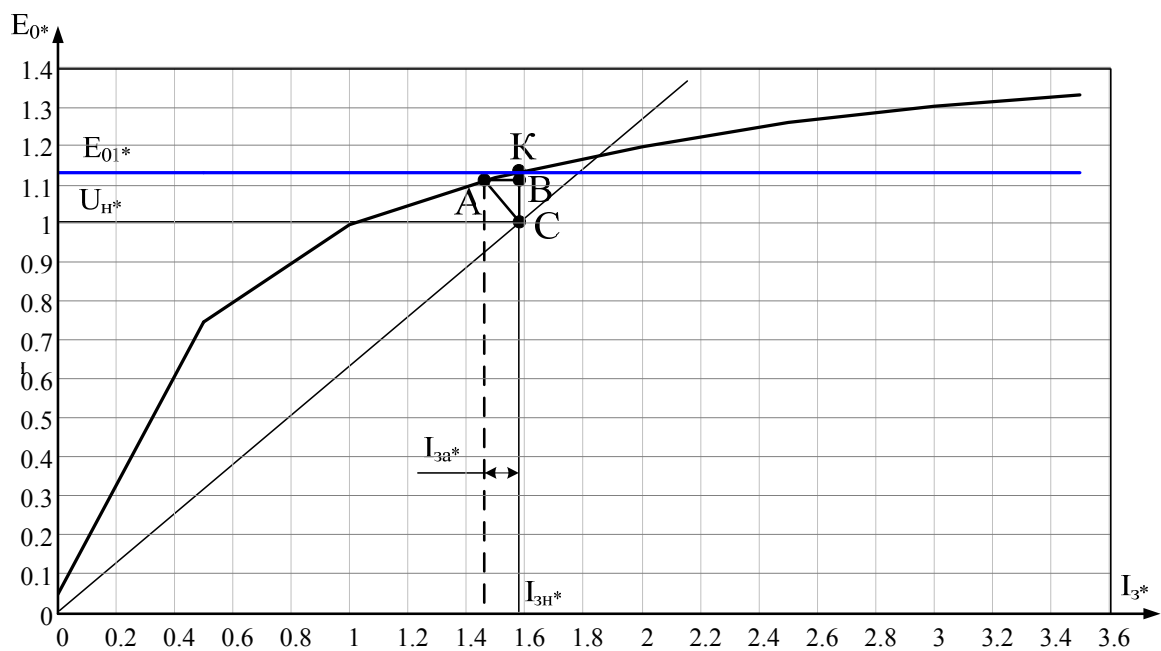


Рисунок В.8 – Побудова характеристичного трикутника

З графіка знаходимо:

$$I_{3Н_відн} := 1.58, \quad I_{3а_відн} := 0.13, \quad E_{02_відн} := 1.10.$$

Базове значення струму збудження:

$$I_{30} := \frac{I_{3Н}}{I_{3Н_відн}}, \quad I_{30} = 2.396 \text{ А.}$$

Струм збудження, необхідний для компенсації реакції якоря:

$$I_{3а} := I_{3а_відн} \cdot I_{30}, \quad I_{3а} = 0.312 \text{ А.}$$

Номінальні зміни напруг:

$$\Delta U_{Н_нез} := (E_{01_відн} - 1) \cdot 100, \quad \Delta U_{Н_нез} = 13.202 \% ;$$

$$\Delta U_{Н_пар} := (E_{02_відн} - 1) \cdot 100, \quad \Delta U_{Н_пар} = 10 \% .$$

ЕРС генератора при номінальному навантаженні:

$$E_{нг} := (1 + \Delta U_{я_відн}) \cdot U_{Н}, \quad E_{нг} = 253.358 \text{ В.}$$

Втрати на збудження:

$$\Delta p_{з_н} := I_{3Н} \cdot U_{Н}, \quad \Delta p_{з_н} = 870.782 \text{ Вт.}$$

Постійні втрати:

$$\Delta p_{пост_н} := \Delta p_{мех} + \Delta p_{м} + \Delta p_{з_н}, \quad \Delta p_{пост_н} = 1.971 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Номінальний струм якоря:

$$I_{я_н} := I_{Н} + I_{3Н}, \quad I_{я_н} = 95.09 \text{ А.}$$

Втрати в колі якоря:

$$\Delta p_{е_н} := I_{я_н}^2 \cdot R_{а75} + I_{я_н} \cdot \Delta U_{щ}, \quad \Delta p_{е_н} = 2.297 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Додаткові втрати:

$$\Delta p_{д_н} := 0.01 \cdot P_{Н}, \quad \Delta p_{д_н} = 210 \text{ Вт.}$$

Змінні втрати:

$$\Delta p_{\text{змін}_H} := \Delta p_{e_H} + \Delta p_{d_H}, \quad \Delta p_{\text{змін}_H} = 2.507 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Сумарні втрати:

$$\Delta p_{\text{сум}} := \Delta p_{\text{пост}_H} + \Delta p_{\text{змін}_H}, \quad \Delta p_{\text{сум}} = 4.478 \times 10^3 \text{ Вт.}$$

Номінальна первинна потужність:

$$P_{1H} := P_H + \Delta p_{\text{сум}}, \quad P_{1H} = 2.5478 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

Номінальний ККД:

$$\eta_H := 100 \cdot \frac{P_H}{P_{1H}}, \quad \eta_H = 82.423 \text{ \%}.$$

Коефіцієнт навантаження:

$$\beta_m := \sqrt{\frac{\Delta p_{\text{пост}_H}}{\Delta p_{\text{змін}_H}}}, \quad \beta_m = 0.887.$$

Корисна потужність при максимальному ККД:

$$P_{2m} := \beta_m \cdot P_H, \quad P_{2m} = 1.8618 \times 10^4 \text{ Вт.}$$

Максимальний ККД:

$$\eta_{\text{max}} := \frac{P_{2m} \cdot 100}{P_{2m} + 2 \cdot \Delta p_{\text{пост}_H}}, \quad \eta_{\text{max}} = 82.528 \text{ \%}.$$

Режим двигуна

Сталі машини:

$$c_e := p \cdot \frac{N}{60 \cdot a}, \quad c_e = 8.6 ;$$

$$c_M := p \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi \cdot a}, \quad c_M = 82.124.$$

Номінальний струм, що буде спожито з мережі:

$$I_H := \frac{P_H}{U_H}, \quad I_H = 91.304 \text{ A.}$$

Номінальний струм збудження двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$I_{\text{зн_нез}} := \frac{U_H}{R_{375}}, \quad I_{\text{зн_нез}} = 3.786 \text{ A};$$

$$I_{\text{зн_пар}} := \frac{U_H}{R_{375}}, \quad I_{\text{зн_пар}} = 3.786 \text{ A};$$

$$I_{\text{зн_посл}} := I_H, \quad I_{\text{зн_посл}} = 91.304 \text{ A.}$$

Номінальний струм якоря двигуна незалежного та послідовного збудження, відповідно:

$$I_{\text{ян_нез}} := I_H, \quad I_{\text{ян_нез}} = 91.304 \text{ A};$$

$$I_{\text{ян_посл}} := I_H, \quad I_{\text{ян_посл}} = 91.304 \text{ A.}$$

Номінальний струм якоря двигуна паралельного збудження:

$$I_{\text{ян_пар}} := I_H - I_{\text{зн_пар}}, \quad I_{\text{ян_пар}} = 87.518 \text{ A.}$$

Перехідний опір щіткових контактів при 20 °С двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$R_{\text{щ20_нез}} := \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{ян_нез}} \cdot 1.215}, \quad R_{\text{щ20_нез}} = 0.036 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{щ20_пар}} := \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{ян_пар}} \cdot 1.215}, \quad R_{\text{щ20_пар}} = 0.038 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{щ20_посл}} := \frac{\Delta U_{\text{щ}}}{I_{\text{ян_посл}} \cdot 1.215}, \quad R_{\text{щ20_посл}} = 0.036 \text{ Ом.}$$

Опір кола якоря при 20 °С двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$R_{a20_нез} := R_{я} + R_{д} + R_{щ20_нез}, \quad R_{a20_нез} = 0.211 \text{ Ом};$$

$$R_{a20_пар} := R_{я} + R_{д} + R_{щ20_пар}, \quad R_{a20_пар} = 0.212 \text{ Ом};$$

$$R_{a20_посл} := R_{я} + R_{д} + R_{щ20_посл}, \quad R_{a20_посл} = 0.211 \text{ Ом}.$$

Повний опір якрірного кола при 20 °С двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$R_{a75_нез} := 1.215 \cdot R_{a20_нез}, \quad R_{a75_нез} = 0.256 \text{ Ом};$$

$$R_{a75_пар} := 1.215 \cdot R_{a20_пар}, \quad R_{a75_пар} = 0.258 \text{ Ом};$$

$$R_{a75_посл} := 1.215 \cdot R_{a20_посл}, \quad R_{a75_посл} = 0.256 \text{ Ом}.$$

Номінальна ЕРС двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$E_{нд_нез} := U_{н} - I_{ян_нез} \cdot R_{a75_нез}, \quad E_{нд_нез} = 206.642 \text{ В};$$

$$E_{нд_пар} := U_{н} - I_{ян_пар} \cdot R_{a75_пар}, \quad E_{нд_пар} = 207.445 \text{ В};$$

$$E_{нд_посл} := U_{н} - I_{ян_посл} \cdot R_{a75_посл}, \quad E_{нд_посл} = 206.642 \text{ В}.$$

Номінальна частота обертання двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$n_{нд_нез} := n_{н} \cdot \frac{E_{нд_нез}}{E_{нг}}, \quad n_{нд_нез} = 1.223 \times 10^3 \text{ об/хв};$$

$$n_{нд_пар} := n_{н} \cdot \frac{E_{нд_пар}}{E_{нг}}, \quad n_{нд_пар} = 1.228 \times 10^3 \text{ об/хв};$$

$$n_{нд_посл} := n_{н} \cdot \frac{E_{нд_посл}}{E_{нг}}, \quad n_{нд_посл} = 1.223 \times 10^3 \text{ об/хв}.$$

Номінальний магнітний потік двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$\Phi_{н_нез} := \frac{E_{нд_нез}}{c_e \cdot n_{нд_нез}}, \quad \Phi_{н_нез} = 0.02 \text{ Вб};$$

$$\Phi_{\text{н_пар}} := \frac{E_{\text{нд_пар}}}{c_e \cdot n_{\text{нд_пар}}}, \quad \Phi_{\text{н_пар}} = 0.02 \text{ Вб};$$

$$\Phi_{\text{н_посл}} := \frac{E_{\text{нд_посл}}}{c_e \cdot n_{\text{нд_посл}}}, \quad \Phi_{\text{н_посл}} = 0.02 \text{ Вб}.$$

Номинальний момент двигуна незалежного, паралельного та послідовного збудження, відповідно:

$$M_{\text{н_нез}} := c_M \cdot \Phi_{\text{н_нез}} \cdot I_{\text{ян_нез}}, \quad M_{\text{н_нез}} = 147.267 \text{ Нм};$$

$$M_{\text{н_пар}} := c_M \cdot \Phi_{\text{н_пар}} \cdot I_{\text{ян_пар}}, \quad M_{\text{н_пар}} = 141.161 \text{ Нм};$$

$$M_{\text{н_посл}} := c_M \cdot \Phi_{\text{н_посл}} \cdot I_{\text{ян_посл}}, \quad M_{\text{н_посл}} = 147.267 \text{ Нм}.$$

Побудова природної механічної характеристики двигуна паралельного збудження:

$$M_{\text{н_пар.}} := 0..1.2 \cdot M_{\text{н_пар}},$$

$$n_{\text{д_пар}M_{\text{н_пар.}}} := \frac{U_{\text{н}}}{c_e \cdot \Phi_{\text{н_пар}}} - \frac{R_{\text{а75_нез}} \cdot M_{\text{н_пар.}}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{\text{н_пар}}^2}$$

Зовнішній вигляд природної механічної характеристики двигуна паралельного збудження подано на рис. В.9.

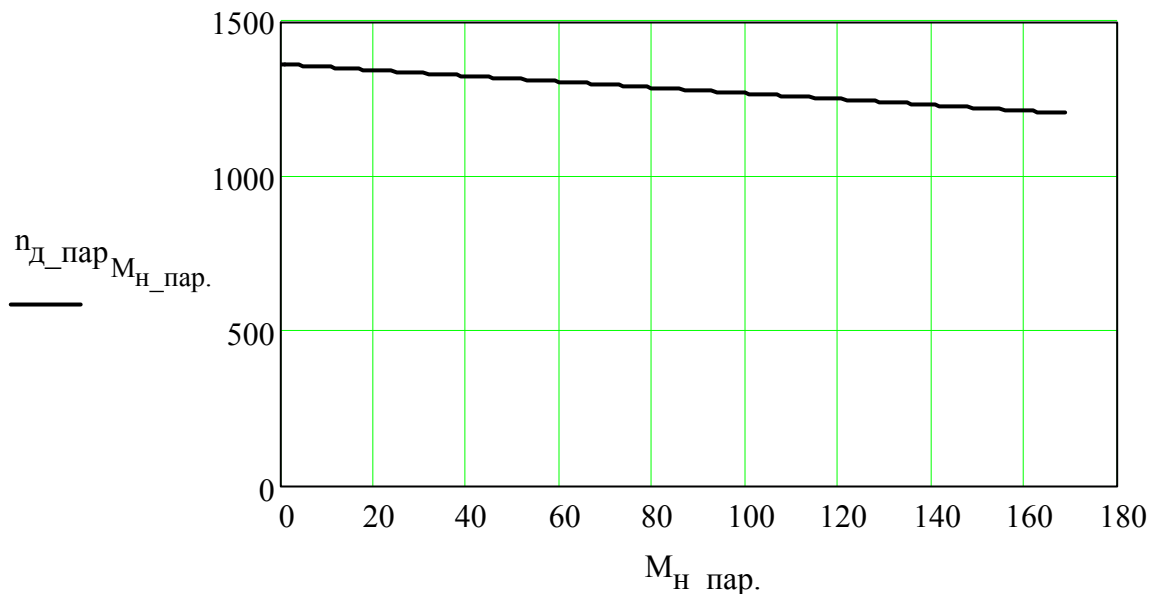


Рисунок В.9 – Природна механічна характеристика двигуна паралельного збудження

послідовного збудження:

$$k_{\phi_посл} := \frac{\Phi_{Н_посл}}{I_{зН_посл}}, \quad k_{\phi_посл} = 2.151 \times 10^{-4};$$

$$M_{Н_посл.} := 1..1.2 \cdot M_{Н_посл},$$

$$n_{д_посл} M_{Н_посл.} := \frac{U_{Н}}{c_e \cdot k_{\phi_посл} \cdot \sqrt{\frac{M_{Н_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл}}}} - \frac{R_{a75_посл}}{c_e \cdot k_{\phi_посл}}$$

Зовнішній вигляд природної механічної характеристики двигуна послідовного збудження подано на рис. В.10.

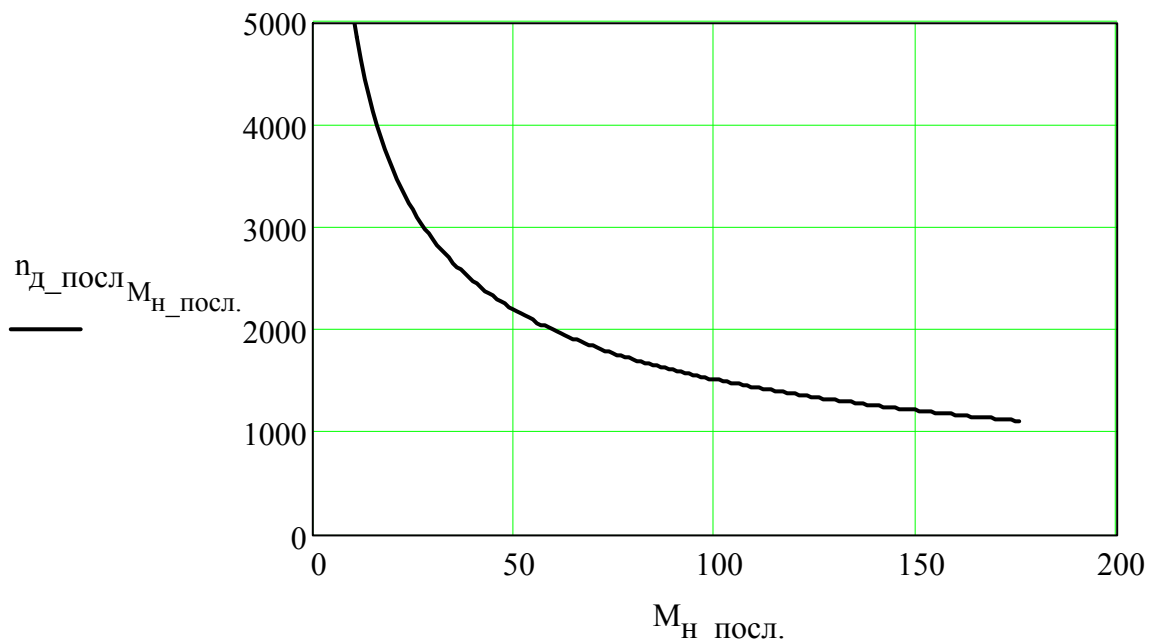


Рисунок В.10 – Природна механічна характеристика двигуна послідовного збудження

незалежного збудження:

$$k_{\phi_нез} := \frac{\Phi_{Н_нез}}{I_{зН_нез}}, \quad k_{\phi_нез} = 5.188 \times 10^{-3};$$

$$M_{Н_нез.} := 0..1.2 \cdot M_{Н_нез},$$

$$n_{д_нез} \cdot M_{н_нез.} := \frac{U_{н}}{c_e \cdot k_{ф_нез} \cdot I_{зн_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{н_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{ф_нез} \cdot I_{зн_нез}}$$

Зовнішній вигляд природної механічної характеристики двигуна незалежного збудження подано на рис. В.11.

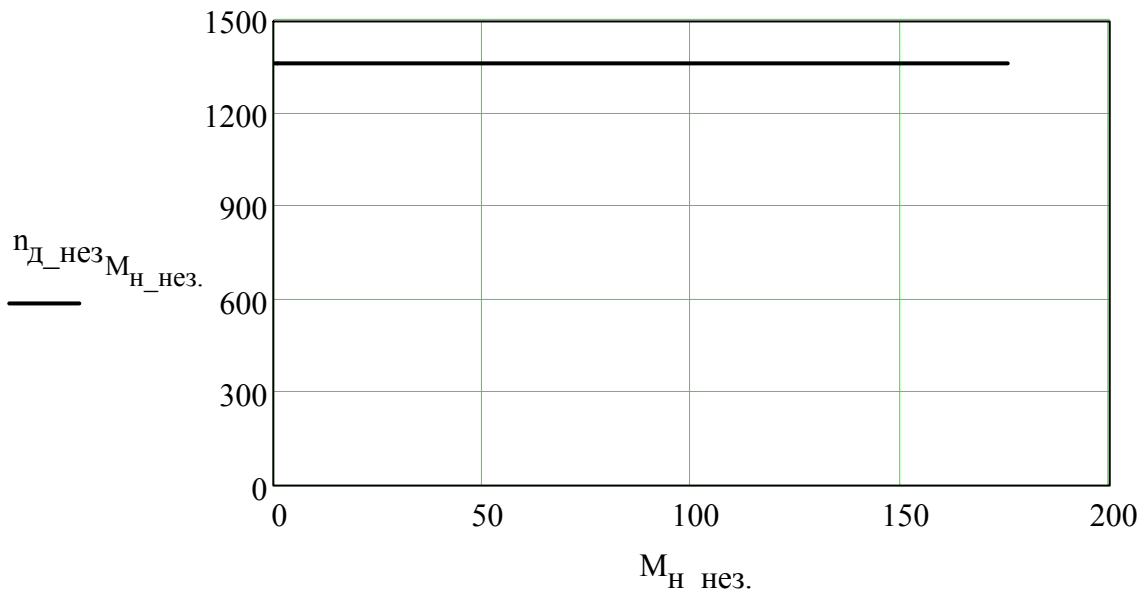


Рисунок В.11 – Природна механічна характеристика двигуна незалежного збудження

Регулювання швидкості двигуна

- паралельного збудження:

1) зміною напруги:

$$n_{д_пар.} \cdot U_{н} \cdot M_{н_пар.} := \frac{U_{н}}{c_e \cdot \Phi_{н_пар}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{н_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{н_пар}^2};$$

$$n_{д_пар.} \cdot 0.8 U_{н} \cdot M_{н_пар.} := \frac{0.8 \cdot U_{н}}{c_e \cdot \Phi_{н_пар}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{н_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{н_пар}^2};$$

$$n_{д_пар.} \cdot 0.6 U_{н} \cdot M_{н_пар.} := \frac{0.6 \cdot U_{н}}{c_e \cdot \Phi_{н_пар}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{н_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{н_пар}^2};$$

$$n_{д_пар.0.4U_H M_{H_пар.}} := \frac{0.4 \cdot U_H}{c_e \cdot \Phi_{H_пар.}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{H_пар.}^2};$$

$$n_{д_пар.0.2U_H M_{H_пар.}} := \frac{0.2 \cdot U_H}{c_e \cdot \Phi_{H_пар.}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{H_пар.}^2}$$

Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при регулюванні напруги живлення показані на рис. В.12.

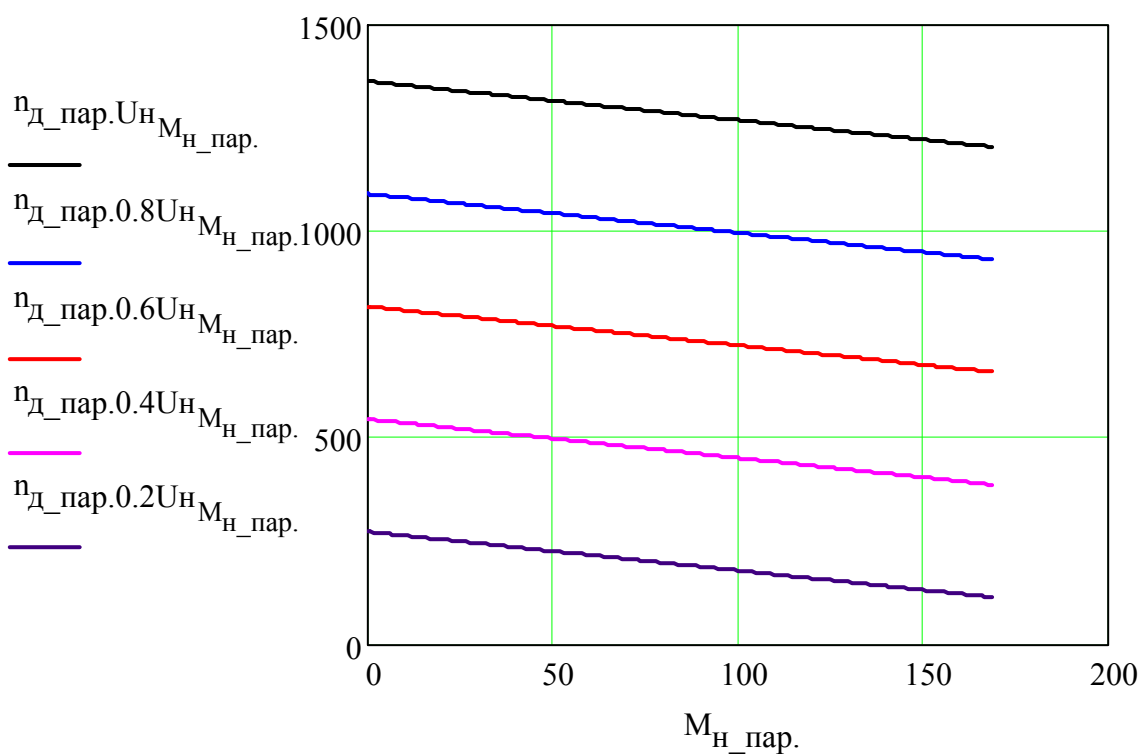


Рисунок В.12 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при $U = var$

2) зміною струму збудження (магнітного потоку):

$$n_{д_пар. \Phi_{H_пар.} M_{H_пар.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot \Phi_{H_пар.}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{H_пар.}^2};$$

$$n_{д_пар. 0.8 \Phi_{H_пар.} M_{H_пар.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot 0.8 \Phi_{H_пар.}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot (0.8 \Phi_{H_пар.})^2};$$

$$n_{д_пар.0.6\Phi_{Н_пар.}} := \frac{U_{Н}}{c_e \cdot 0.6\Phi_{Н_пар.}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{Н_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot (0.6\Phi_{Н_пар.})^2};$$

$$n_{д_пар.0.4\Phi_{Н_пар.}} := \frac{U_{Н}}{c_e \cdot 0.4\Phi_{Н_пар.}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{Н_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot (0.4\Phi_{Н_пар.})^2}$$

Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при регулюванні магнітного потоку показані на рис. В.13.

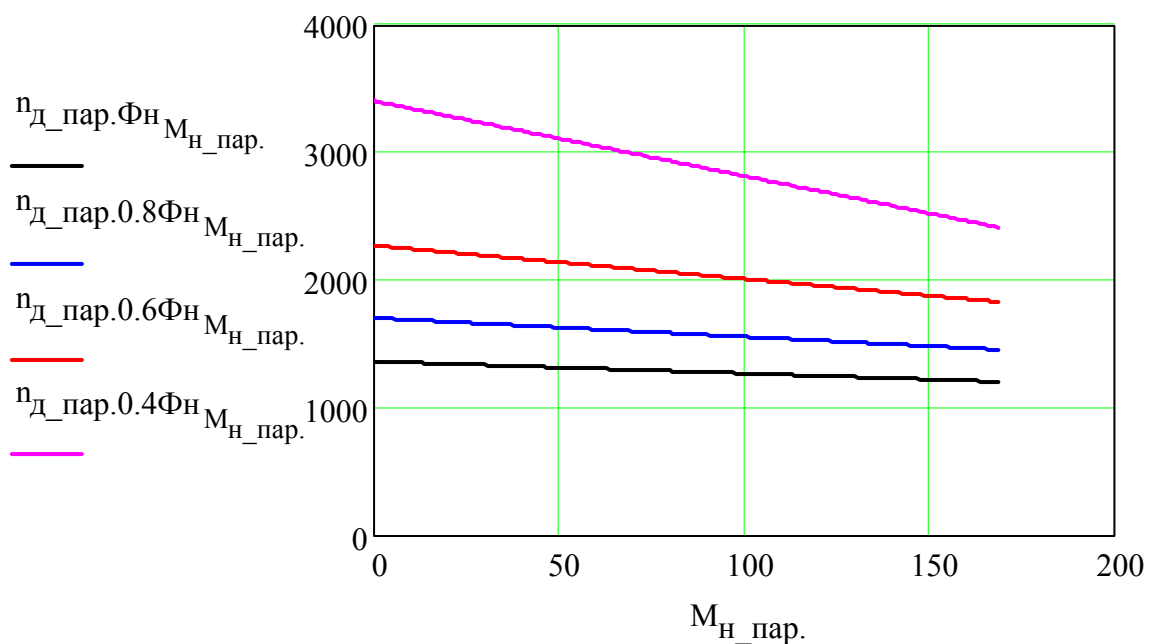


Рисунок В.13 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при $\Phi = var$

3) зміною опору в колі якоря:

$$n_{д_пар.Rя_{M_{Н_пар.}}} := \frac{U_{Н}}{c_e \cdot \Phi_{Н_пар.}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{Н_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{Н_пар.}^2};$$

$$n_{д_пар.3Rя_{M_{Н_пар.}}} := \frac{U_{Н}}{c_e \cdot \Phi_{Н_пар.}} - \frac{3R_{a75_нез} \cdot M_{Н_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{Н_пар.}^2};$$

$$n_{д_пар.6Rя_{M_{H_пар.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot \Phi_{H_пар}} - \frac{6R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{H_пар}^2};$$

$$n_{д_пар.9Rя_{M_{H_пар.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot \Phi_{H_пар}} - \frac{9R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{H_пар}^2};$$

$$n_{д_пар.12Rя_{M_{H_пар.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot \Phi_{H_пар}} - \frac{12R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{H_пар}^2};$$

$$n_{д_пар.15Rя_{M_{H_пар.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot \Phi_{H_пар}} - \frac{15R_{a75_нез} \cdot M_{H_пар.}}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi_{H_пар}^2};$$

Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при регулюванні опору в колі якоря показані на рис. В.14.

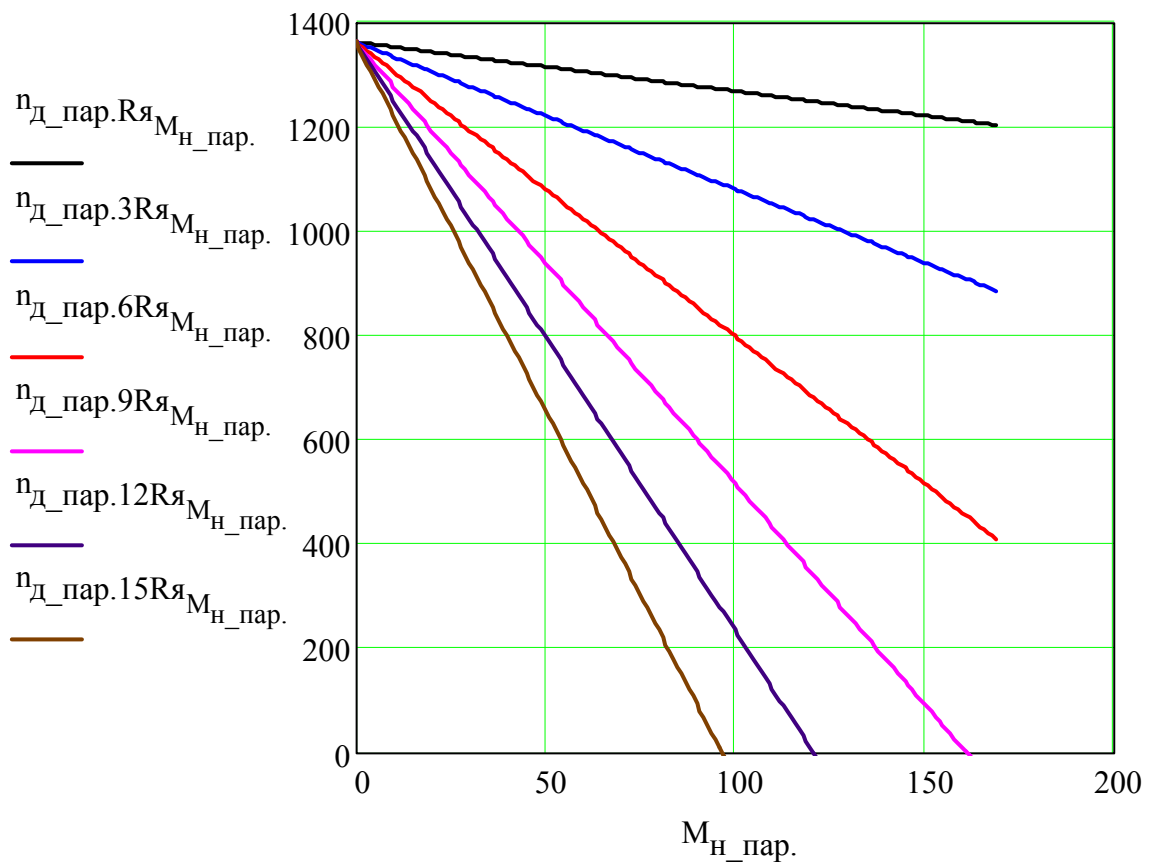


Рисунок В.14 – Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при $R_я = var$

- послідовного збудження:

1) зміною напруги:

$$n_{д_посл.U_H M_{H_посл.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{д_посл.0.8U_H M_{H_посл.}} := \frac{0.8U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{д_посл.0.6U_H M_{H_посл.}} := \frac{0.6U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{д_посл.0.4U_H M_{H_посл.}} := \frac{0.4U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{д_посл.0.2U_H M_{H_посл.}} := \frac{0.2U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}}$$

Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при регулюванні напруги живлення показані на рис. В.15.

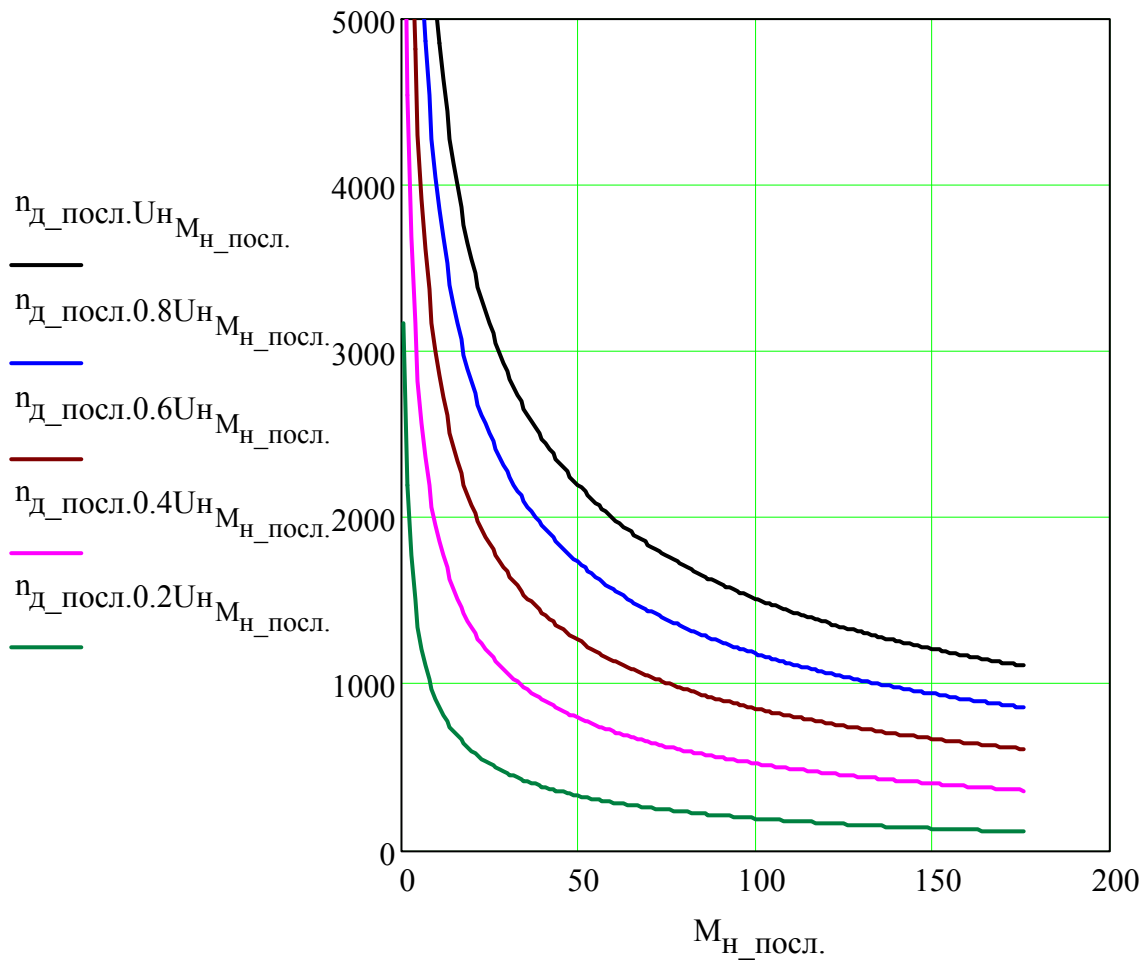


Рисунок В.15 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при $U = var$

2) зміною струму збудження (магнітного потоку):

$$n_{д_посл.} k_{\phi} M_{H_посл.} := \frac{U_N}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл.}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{д_посл.} 0.8 k_{\phi} M_{H_посл.} := \frac{U_N}{c_e \cdot 0.8 k_{\phi_посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot 0.8 k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл.}}{c_e \cdot 0.8 k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{д_посл.0.6k\phi_{M_{H_посл.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot 0.6k\phi_{посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot 0.6k\phi_{посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл.}}{c_e \cdot 0.6k\phi_{посл.}};$$

$$n_{д_посл.0.4k\phi_{M_{H_посл.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot 0.4k\phi_{посл.} \sqrt{\frac{M_{H_посл.}}{c_M \cdot 0.4k\phi_{посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл.}}{c_e \cdot 0.4k\phi_{посл.}};$$

Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при регулюванні магнітного потоку показані на рис. В.16.

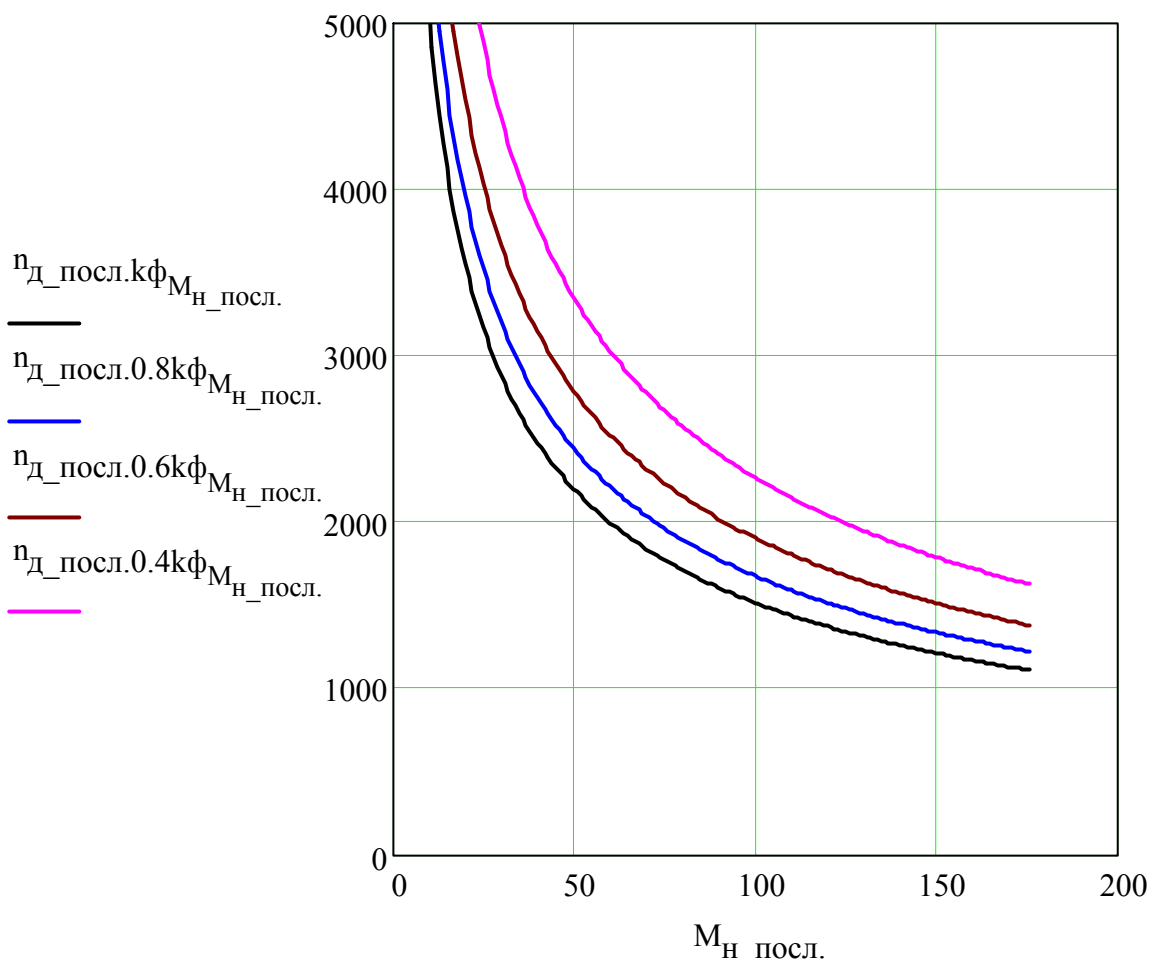


Рисунок В.16 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при $\Phi = var$

3) зміною опору в колі якоря:

$$n_{Д_посл. Rя M_{Н_посл.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \cdot \sqrt{\frac{M_{Н_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{R_{a75_посл.}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{Д_посл. 3Rя M_{Н_посл.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \cdot \sqrt{\frac{M_{Н_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{3R_{a75_посл.}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{Д_посл. 6Rя M_{Н_посл.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \cdot \sqrt{\frac{M_{Н_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{6R_{a75_посл.}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{Д_посл. 9Rя M_{Н_посл.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \cdot \sqrt{\frac{M_{Н_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{9R_{a75_посл.}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{Д_посл. 12Rя M_{Н_посл.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \cdot \sqrt{\frac{M_{Н_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{12R_{a75_посл.}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}};$$

$$n_{Д_посл. 15Rя M_{Н_посл.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_посл.} \cdot \sqrt{\frac{M_{Н_посл.}}{c_M \cdot k_{\phi_посл.}}}} - \frac{15R_{a75_посл.}}{c_e \cdot k_{\phi_посл.}}$$

Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при регулюванні опору в колі якоря показані на рис. В.17.

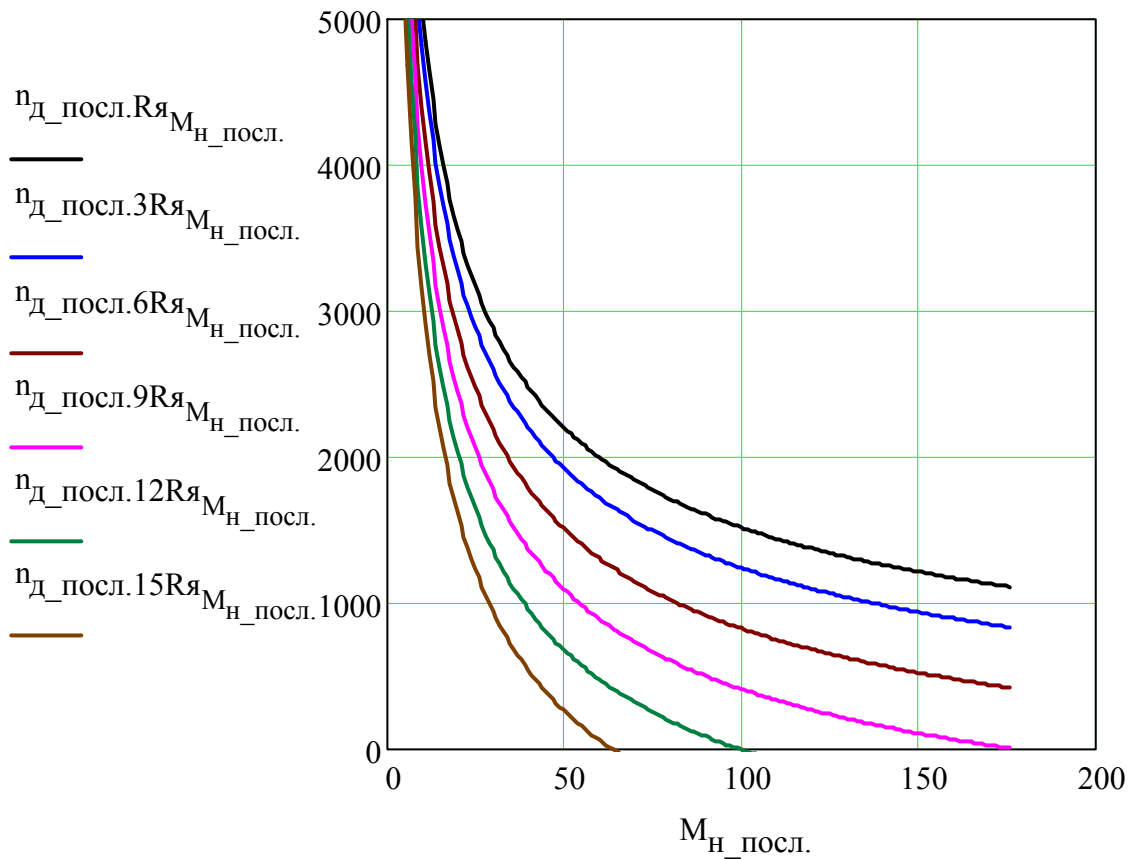


Рисунок В.17 – Механічні характеристики двигуна послідовного збудження при $R_я = var$

- незалежного збудження:

1) зміною напруги:

$$n_{д_нез. U_H M_{H_нез.}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез.} \cdot I_{3H_нез.}} - \frac{R_{a75_нез.} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез.} \cdot I_{3H_нез.}};$$

$$n_{д_нез. 0.8U_H M_{H_нез.}} := \frac{0.8U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез.} \cdot I_{3H_нез.}} - \frac{R_{a75_нез.} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез.} \cdot I_{3H_нез.}};$$

$$n_{д_нез. 0.6U_H M_{H_нез.}} := \frac{0.6U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез.} \cdot I_{3H_нез.}} - \frac{R_{a75_нез.} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез.} \cdot I_{3H_нез.}};$$

$$n_{д_нез.0.4U_H M_{H_нез.}} := \frac{0.4U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}};$$

$$n_{д_нез.0.2U_H M_{H_нез.}} := \frac{0.2U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}}$$

Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні напруги живлення показані на рис. В.18.

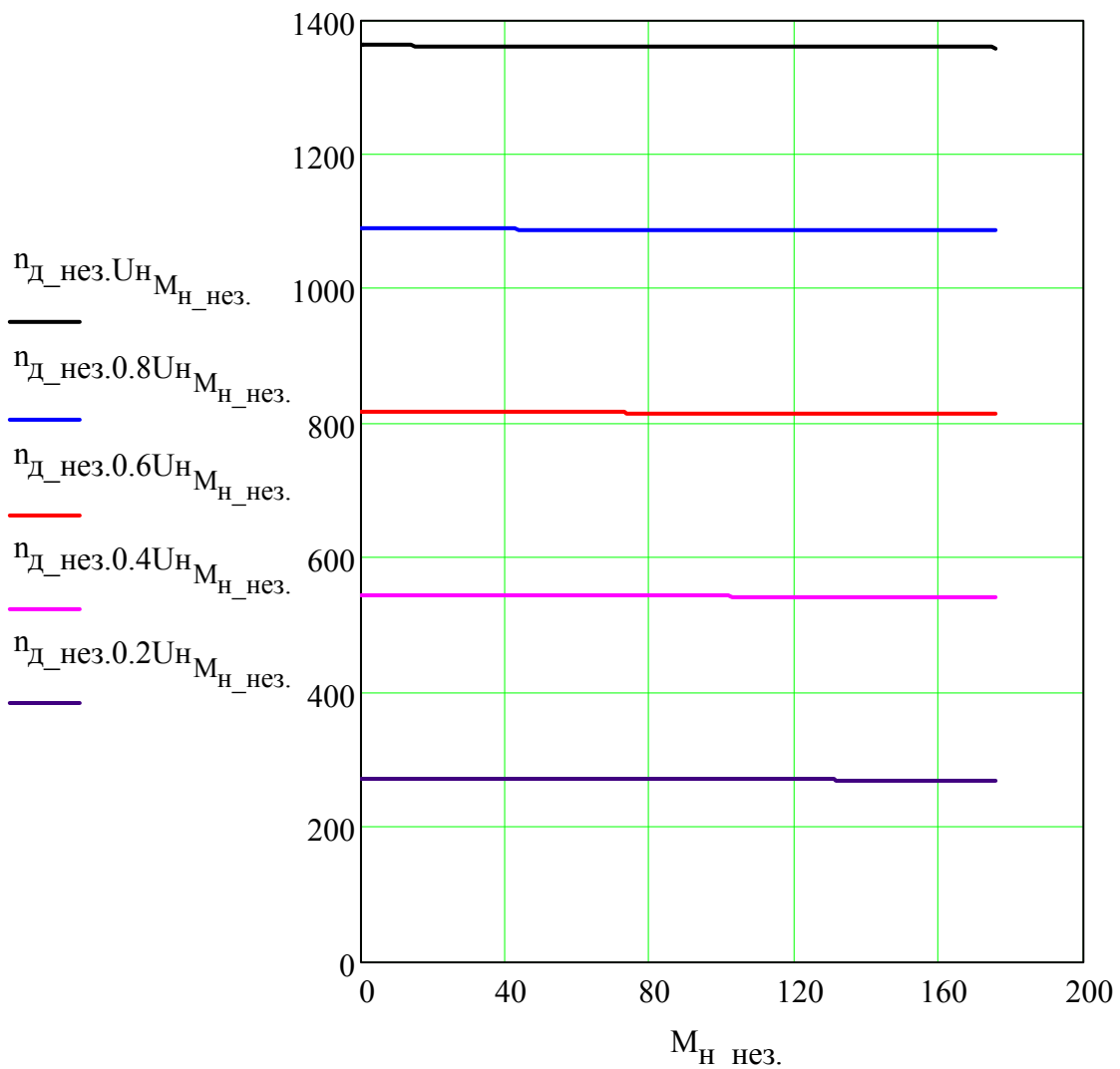


Рисунок В.18 – Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при $U = \text{var}$

2) зміною струму збудження (магнітного потоку):

$$n_{Д_нез.k\phi_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}};$$

$$n_{Д_нез.0.8k\phi_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot 0.8k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot 0.8k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}};$$

$$n_{Д_нез.0.6k\phi_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot 0.6k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot 0.6k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}};$$

$$n_{Д_нез.0.4k\phi_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot 0.4k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot 0.4k_{\phi_нез} \cdot I_{зH_нез}}$$

Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні магнітного потоку показані на рис. В.19.

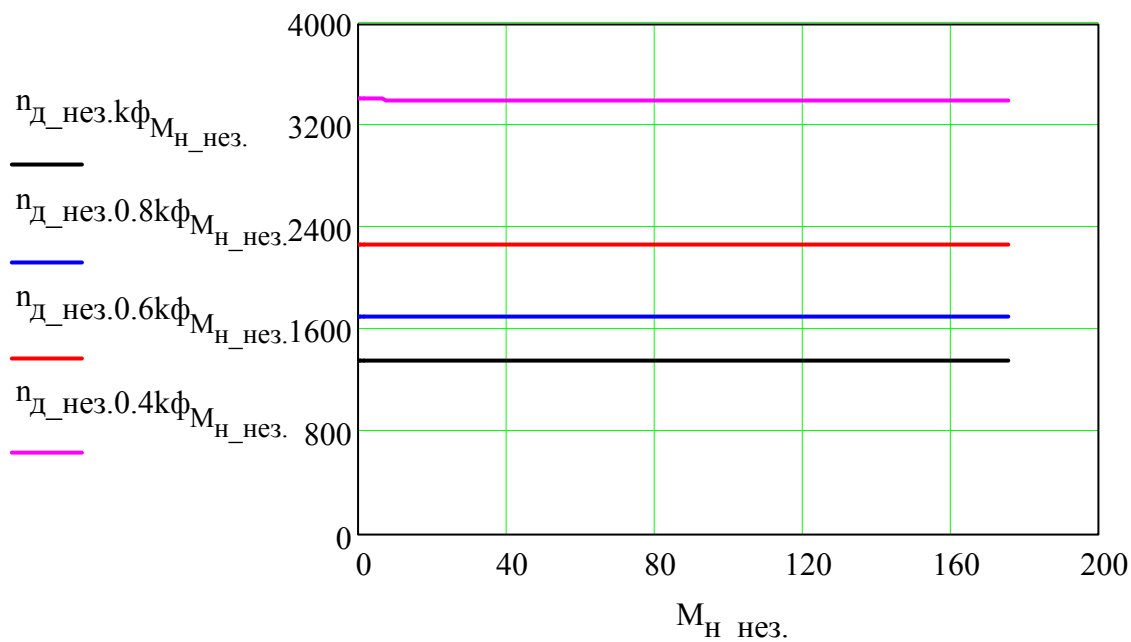


Рисунок В.19 – Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при $\Phi = \text{var}$

3) зміною опору в колі якоря:

$$n_{Д_нез.Rя_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}};$$

$$n_{Д_нез.25Rя_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{25R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}};$$

$$n_{Д_нез.50Rя_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{50R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}};$$

$$n_{Д_нез.75Rя_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{75R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}};$$

$$n_{Д_нез.100Rя_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{100R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}};$$

$$n_{Д_нез.125Rя_{M_{H_нез.}}} := \frac{U_H}{c_e \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}} - \frac{125R_{a75_нез} \cdot M_{H_нез.}}{c_e \cdot c_M \cdot k_{\phi_нез} \cdot I_{3H_нез}}$$

Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при регулюванні опору в колі якоря показані на рис. В.20.

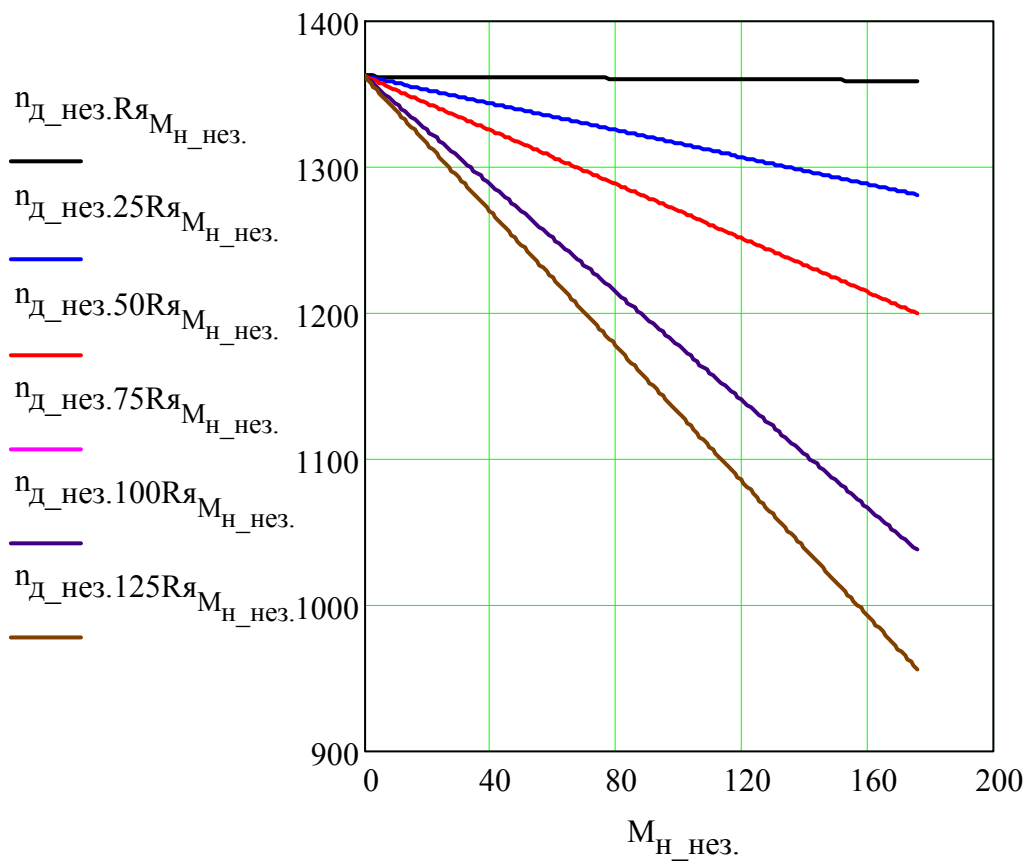


Рисунок В.20 – Механічні характеристики двигуна незалежного збудження при $R_я = var$

Навчальне видання

**Володимир Віталійович Грабко
Михайло Петрович Розводюк**

**ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
Розрахунок експлуатаційних
характеристик. Курсове проектування**

Навчальний посібник

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет підготовлено М. Розводюком

Підписано до друку
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк.
Наклад прим. Зам. №

Вінницький національний технічний університет,
науково-методичний відділ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, к. 2201.
Тел. (0432) 59-87-36.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі.
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-81-59.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК №3516 від 01.07.2009 р.