

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра електрифікації, автоматизації виробництва та інженерної екології

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Невмержицький Микита Миколайович

УДК 621.359.4

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Оцінка можливості використання асинхронних двигунів AIR в якості
синхронних генераторів

(тема роботи)

141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня бакалавр

кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Невмержицький М. М.

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Соколовський Олег Феліксович

(прізвище, ім'я, по батькові)

к.т.н., доцент кафедри електрифікації,
автоматизації виробництва та інженерної екології

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Невмержицький М. М. Оцінка можливості використання асинхронних двигунів AIR в якості синхронних генераторів . Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Поліський національний університет, Житомир, 2026.

Метою даної роботи є оцінка можливості використання асинхронних двигунів AIR в якості синхронних генераторів

.Ціль роботи – обґрунтування параметрів генераторів для систем відновлюваної енергетики .

Ключові слова: асинхронний двигун, асинхронний генератор, коефіцієнт ковзання, математична модель.

ABSTRACT

Nevmerzhytskyi M. M. Assessment of the possibility of using AIR asynchronous motors as synchronous generators. Qualification work for obtaining a bachelor's degree in specialty 141 - Electric power, electrical engineering and electromechanics - Polissia National University, Zhytomyr, 2026.

The purpose of this work is to assess the possibility of using AIR asynchronous motors as synchronous generators

. The purpose of the work is to justify the parameters of generators for renewable energy systems.

Keywords: asynchronous motor, asynchronous generator, slip coefficient, mathematical model.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І ПАРАМЕТРИ АСИНХРОННИХ МАШИН	6
1.1 Математична модель асинхронного двигуна	6
1.2 Електрична схема заміщення асинхронної машини	14
Висновки по розділу 1	18
РОЗДІЛ 2 ПАРАМЕТРИ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ	19
2.1 Обґрунтування параметрів асинхронних генераторів	19
2.2 Аналіз параметрів генератора на базі асинхронного двигуна	23
Висновки по розділу 2	26
РОЗДІЛ 3 ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ БАЗОВИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ	27
3.1. 3.1 Асинхронний генератор на базі асинхронного двигуна АІР112М2	27
3.2 Асинхронний генератор на базі асинхронного двигуна АІР112L2	28
Висновки по розділу 3	31
ВИСНОВКИ	32
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	33

ВСТУП

Система автономного електропостачання (САЕ), в нашому розумінні, передбачає задачу розробити: генератори (з приводними двигунами внутрішнього згоряння, вітро-, гідро- або комбінованим приводом) для живлення паралельно включених електроприймачів; систему регулювання механічних параметрів приводних двигунів та електричних параметрів генераторів, що забезпечує необхідний рівень, частоту та сталість напруги у електроприймачів; захист елементів системи електропостачання від перевантажень та коротких замикань; прилади обліку та контролю якості електроенергії та технічних параметрів приводних двигунів .

Автономність системи зумовлена порівнянністю потужностей джерел живлення та споживачів і їхньою відокремленістю від інших систем. У цьому одна з особливостей та відмінність САЕ від великих енергетичних систем. Але не тільки в цьому. В результаті взаємного впливу джерела енергії та навантаження порушуються режими роботи САЕ аж до повної непрацездатності системи електрообладнання. Джерело живлення, наприклад, у складі дизеля та синхронного генератора має нестабільну частоту обертання та частоту струму, що погіршують режим роботи системи. Внаслідок нестабільності частоти та спотворень форми кривої напруги стають непрацездатними деякі системи автоматики, безпосередні перетворювачі частоти та інші струмоприймачі. САЕ з економічної точки зору мають бути простими та надійними в експлуатації. Створення для них генераторів, адаптованих до різного роду споживачів, є актуальним завданням сільської електрифікації. Фактори, що стримують широке застосування АГ як перетворювачів енергії, зумовлені необхідністю регулювання струму збудження, і більшою мірою за наявності в струмі навантаження реактивної складової, яка розмагнічує генератор.

За принципом будови АГ не може бути джерелом реактивної потужності, а тому найважливіші характеристики його є крутоспадними, особливо при підключенні активно-індуктивних двигунних навантажень. Такі генератори

потребують стабілізації напруги. Стабілізація напруги здійснюється компенсацією реактивної індуктивної потужності або розробкою спеціальних обмоток статора. Для даних цілей найбільше підходять асинхронні двигуни типу AIR.

Відповідно до вище зазначеного **метою роботи** являється оцінка можливості використання асинхронних двигунів AIR в якості синхронних генераторів

Ціль роботи – обґрунтування параметрів генераторів для систем відновлюваної енергетики .

Методи досліджень. Використання положень теоретичної електротехніки, електричних машин, теорії надійності, засобів об'єктно-орієнтованого програмування та методів комп'ютерного моделювання в пакеті «SimPowerSystems» середовища програмування MATLAB/Simulink.

Перелік публікацій автора за темою дослідження:

Невмержицький М. М. ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА ЗАМІЩЕННЯ АСИНХРОННОЇ МАШИНИ

Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

Поліщук В. Ю., Невмержицький М. М. РЕАЛІЗАЦІЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ МОДЕЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ

Матеріали науково-практичної конференції факультету інженерії та енергетики «НАУКОВІ ЧИТАННЯ за підсумками І-го туру Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузей знань і спеціальностей» 29 квітня 2026 року. Житомир: Поліський національний університет, 2026.- С 195-198.

РОЗДІЛ 1

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І ПАРАМЕТРИ АСИНХРОННИХ МАШИН

1.1 Математична модель асинхронного двигуна

Вплив схемних і конструктивних ознак статорних і роторних обмоток на параметри та експлуатаційні властивості асинхронних машин обумовлений фізичними явищами при перетворенні в них енергії. Вивчення фізичних явищ в електромеханічних перетворювачах енергії, до яких відносять і електричні машини, здійснюють переважно методами математичного моделювання. При моделюванні асинхронної машини попередньо вивчають її ідеалізований варіант, який характеризується електричною та магнітною симетрією, рівномірним повітряним зазором, відсутністю насичення, розподілом магніторушійної сили (МРС) в повітряному зазорі за гармонійним законом. Процеси в багатополісній асинхронній машині ідентичні процесам в двополісній машині, тому моделювання здійснюють для числа пар полюсів $p = 1$ [6,19,20].

При математичному моделюванні електричних машин електромагнітні величини представляють у вигляді узагальнених просторових векторів. Синусоїдальність розподілу дозволяє представити МРС та пропорційні їй струми узагальненим просторовим вектором на площині, перпендикулярній осі ротора. Під узагальненим вектором розуміють вектор, проєкції якого на осі фазних обмоток у будь-який момент часу дорівнюють миттєвим значенням фазних величин, представлених цим вектором. Так, якщо струм у кожній фазній обмотці трифазної асинхронної машини представити вектором $(\underline{i}_a, \underline{i}_b, \underline{i}_c)$, модуль якого дорівнює миттєвому значенню фазного струму (i_a, i_b, i_c) , а напрямок збігається з віссю обмотки, і скласти ці вектори, то отримаємо просторовий вектор струму $(3/2)\underline{i}$. Його модуль буде в 3/2 рази більшим за модуль вектора струму $\underline{i}$, проєкції якого на осі фазних обмоток дорівнюють миттєвим значенням струмів i_a, i_b , (рис. 1.1). Таким чином, для того, щоб вектор, отриманий складанням фазних векторів, відповідав даному вище

визначенню просторового вектора, його необхідно помножити на $2/3$. На комплексній площині узагальнений вектор струму ($a = e^{j2\pi/3}$ – оператор повороту на 120°) [19]

$$\underline{i} = \frac{2}{3}j(i_a + ai_b + a^2i_c).$$

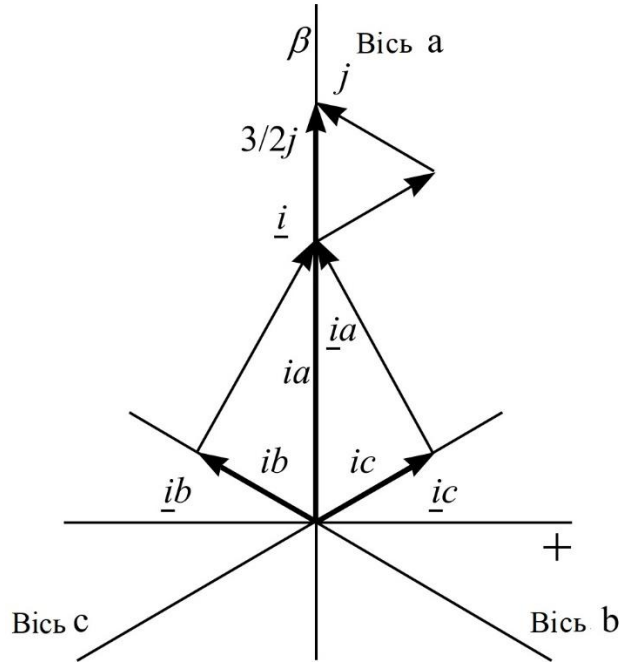


Рисунок 1.1 – До визначення узагальненого вектора струму

Визначимо узагальнений вектор трифазних струмів[19]

$$i_a = I_m \sin \omega t, \quad i_b = I_m \sin(\omega t - 120^\circ), \quad i_c = I_m \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$\begin{aligned} \underline{i} &= j \frac{2I_m}{3} \left[\sin \omega t + \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot a + \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot a^2 \right] = \\ &= j \frac{2I_m}{3} \left[\sin \omega t + \sin \omega t \cos 120^\circ \cdot a + \cos \omega t \sin 120^\circ \cdot a + \sin \omega t \cos 120^\circ \cdot a^2 + \cos \omega t \sin 120^\circ a^2 \right] = \\ &= j \frac{2I_m}{3} \left[\sin \omega t - \frac{1}{2} \sin \omega t a - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \cdot a - \frac{1}{2} \sin \omega t \cdot a^2 + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t \cdot a^2 \right] = \\ &= j \frac{2I_m}{3} \left[\sin \omega t \left(1 - \frac{1}{2} \cdot (a + a^2) \right) \right] - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \omega t (a - a^2) = j \frac{2I_m}{3} \left(\frac{3}{2} \sin \omega t - j \frac{3}{2} \cos \omega t \right) = \\ &= I_m (\sin \omega t - j \cos \omega t) = j I_m \frac{1}{2} \left(\frac{1}{j} e^{j\omega t} - \frac{1}{j} e^{-j\omega t} - j e^{j\omega t} - j e^{-j\omega t} \right) = I_m e^{j\omega t}. \end{aligned}$$

Пропорційні струми фазних обмоток і визначається МРС:

$$F_a = F_{am} \sin \omega t;$$

$$F_b = F_{bm} \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$F_c = F_{cm} \sin(\omega t + 120^\circ),$$

де F_{am} , F_{bm} та F_{cm} – амплітуди МРС на осі фазних обмоток.

Узагальнений вектор МРС трифазної статорної обмотки дорівнює

$$\underline{F} = F_m e^{j\omega},$$

як і узагальнений вектор струму, обертається з кутовою швидкістю ω .

При зміщенні симетричних фазних обмоток на 120° і враховуючи, що $F_{am} = -(F_{bm} + F_{cm})$, магніторушійна сила (МРС) трифазної обмотки статора буде визначатися як [19]

$$\begin{aligned} F_{1m} &= F_{am} + F_{bm} \cos 120^\circ + F_{cm} \cos 240^\circ = -F_{bm} - F_{cm} + F_{bm} \cos 120^\circ + F_{cm} \cos 240^\circ = \\ &= -F_{bm} (1 - \cos 120^\circ) - F_{cm} (1 - \cos 240^\circ) = -F_{bm} \left(1 + \frac{1}{2}\right) - F_{cm} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{3}{2} F_{am}. \end{aligned}$$

У векторній формі МРС трифазної обмотки

$$\underline{F}_1 = 1,5 F_{1m} e^{j\omega t}$$

Зі статорною фазною обмоткою фази «a» зчіплюються магнітні потоки, що створюються струмом самої обмотки та магнітні потоки, що створюються струмами інших фазних обмоток.

Частина магнітного потоку, що створюється фазною обмоткою і зчіплюється з її витками, називається потоком розсіювання. Індуктивність, що пов'язує потік розсіювання обмотки з протікаючим в ній струмом, називається індуктивністю розсіювання $L_{1\sigma}$.

Інша частина магнітного потоку, окрім витків самої обмотки, охоплює також витки інших обмоток і називається основним магнітним потоком. Індуктивність, що визначає потокозчеплення з основним потоком, називається основною індуктивністю l_m .

За відсутності струмів в обмотках ротора потокозчеплення статорної фазної обмотки «a» [19]

$$\psi_{11a} = L_{1\sigma} i_{1a} + l_m i_{1a} + M_{ab} i_{1b} + M_{ac} i_{1c},$$

де M_{ab} та M_{ac} – взаємні індуктивності фазних статорних обмоток.

При двох однакових фазних обмотках, збігу їх осей та рівності струмів магнітний потік, створюваний струмом другої обмотки і зчіплюваний з витками першої обмотки, буде ідентичний потоку, створюваному першою обмоткою і зчіплюваний з витками другої обмотки. За цих умов картина магнітного поля буде однаковою незалежно від того, по якій з обмоток протікає струм, тобто основна індуктивність l_m буде дорівнювати взаємній індуктивності M_0 .

Зміщення фазних обмоток на кут δ викличе зміну їх взаємної індуктивності $M = M_0 \cos \delta = l_m \cos \delta$. Для симетричних трифазних струмів $i_a + i_b + i_c = 0$ або $i_b + i_c = -i_a$, і враховуючи, що $\delta_b = 2\pi/3$ і $\delta_c = -2\pi/3$, вираз для потокозчеплення фазної статорної обмотки «а» (аналогічно і для потокозчеплень інших фазних обмоток) можна представити у вигляді [13]

$$\begin{aligned}\psi_{11a} &= L_{\sigma 1} i_{1a} + l_m i_{1a} + l_m (\cos \frac{2\pi}{3}) i_{1b} + l_m (\cos \frac{4\pi}{3}) i_{1c} = \\ &= L_{\sigma 1} i_{1a} - l_m i_{1b} - l_m i_{1c} + l_m (\cos \frac{2\pi}{3}) i_{1b} + l_m (\cos \frac{4\pi}{3}) i_{1c} = \\ &= L_{\sigma 1} i_{1a} - l_m i_{1b} (1 + \frac{1}{2}) - l_m i_{1c} (1 + \frac{1}{2}) = L_{\sigma 1} i_{1a} - \frac{3}{2} l_m (i_{1b} + i_{1c}) = \\ &= L_{\sigma 1} i_{1a} + \frac{3}{2} l_m i_{1a} = i_{1a} (L_{\sigma 1} + \frac{3}{2} l_m) = i_{1a} (L_{\sigma 1} + M) = i_{1a} L_1;\end{aligned}$$

$$\Psi_{11b} = i_{1b} L_1;$$

$$\Psi_{11c} = i_{1c} L_1.$$

Індуктивність L_1 включає індуктивність від потоку розсіювання $L_{\sigma 1}$, індуктивність від частини основного потоку, створеного самою обмоткою, l_m , та індуктивність від частини основного потоку, створеного двома іншими обмотками, $l_m/2$. Таким чином, повна взаємна індуктивність M статорної обмотки від основного магнітного потоку в $3/2$ рази більша за її основну індуктивність l_m ($M = 1,5 l_m$). Узагальнений вектор потокозчеплення статора при складанні фазних проєкцій та за відсутності струмів ротора

$$\underline{\psi}_{11} = \frac{2}{3} (\psi_{11a} + \psi_{11b} \mathbf{a} + \psi_{11c} \mathbf{a}^2) = \frac{2}{3} (L_1 i_{1a} + L_1 i_{1b} \mathbf{a} + L_1 i_{1c} \mathbf{a}^2) = L_1 \underline{i}_1.$$

Наявність струмів в обмотках ротора призводить до появи додаткових потокозчеплень. Якщо вісь обмотки ротора фази «а» зміщена на кут γ відносно осі обмотки статора фази «а» (рис. 1.2), то взаємні індуктивності обмоток ротора і фази «а» статора[19]:

$$M_{aa} = M_{0a} \cos \gamma;$$

$$M_{ba} = M_{0b} \cos(\gamma + \cos 120^\circ);$$

$$M_{ca} = M_{0c} \cos(\gamma - 120^\circ),$$

де M_{0a} , M_{0b} , M_{0c} – взаємні індуктивності при $\gamma = 0$.

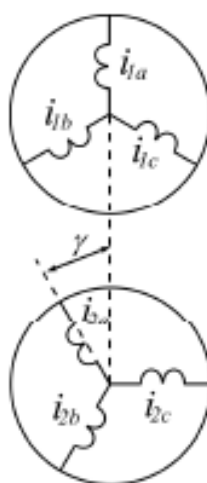


Рисунок 1.2 – Положення осей обмоток статлра і ротора

Взаємна індуктивність обмоток статора і ротора при збігу їх осей дорівнює l_m , і картина магнітного поля буде тією ж, що і при збігу осей обмоток статора. Тому:

$$M_{0a} = M_{0b} = M_{0c} = M_0 = l_m;$$

$$M_{aa} = l_m \cos \gamma, \quad M_{ba} = l_m \cos(\gamma + 2\pi/3);$$

$$M_{ca} = l_m \cos(\gamma - 2\pi/3).$$

Повне потокозчеплення статорної обмотки фази «а» за наявності струмів ротора (і за аналогією для інших фаз) [13]:

$$\psi_{12a} = M_{aa}i_{2a} + M_{ba}i_{2b} + M_{ca}i_{2c} = 3 / 2 l_m i_{2a} \cos \gamma = M i_{2a} \cos \gamma;$$

$$\psi_{12b} = M_{ab}i_{2a} + M_{bb}i_{2b} + M_{cb}i_{2c} = M i_{2b} \cos(\gamma + 2\pi / 3);$$

$$\psi_{12c} = M_{ac}i_{2a} + M_{bc}i_{2b} + M_{cc}i_{2c} = M i_{2c} \cos(\gamma - 2\pi / 3).$$

Вектор потокозчеплення статора з ротором визначається виразом:

$$\begin{aligned}\underline{\psi}_{12} &= \frac{2}{3}(\psi_{12a} + \psi_{12b} \mathbf{a} + \psi_{12c} \mathbf{a}^2) = \\ &= \frac{2}{3} M(i_{2a} \cos \gamma + i_{2b} \cos(\gamma + 120^\circ) \mathbf{a} + i_{2c} \cos(\gamma - 120^\circ) \mathbf{a}^2) = M i_2 e^{j\gamma}.\end{aligned}$$

Загальне потокозчеплення статора та ротора, що відповідає режиму протікання струмів по обмотках статора та ротора:

$$\underline{\Psi}_1 = \underline{\Psi}_{11} = \underline{\Psi} = L_1 \cdot \underline{i}_1 + M \cdot \underline{i}_2 e^{j\gamma}.$$

Аналогічний вираз справедливий і для потокозчеплення ротора. Для ротора кут γ буде від'ємним, оскільки по відношенню до статора цей кут відраховується у зворотному напрямку.

$$\underline{\psi}_2 = \underline{\psi}_{22} + \underline{\psi}_{21} = L_2 \underline{i}_2 + M \underline{i}_1 e^{-j\gamma}.$$

Вектор струму статора записаний у нерухомій системі координат $\alpha\beta$, пов'язаній зі статором, а вектор струму ротора записаний в обертовій (зміщеній на поточний кут γ) системі координат xu , пов'язаній з ротором. У записі з індексами систем координат

$$\underline{\psi}_1^{(a,b)} = L_1 \underline{i}_1^{(a,b)} + L_m \underline{i}_2^{(x,y)} e^{j\gamma} = L_1 \underline{i}_1^{(a,b)} + L_m \underline{i}_2^{(a,b)}$$

або, якщо обидві частини помножити на $e^{-j\gamma}$, то одержимо

$$\underline{\psi}_1^{(a,b)} e^{-j\gamma} = \underline{\psi}_1^{(xy)} = L_1 \underline{i}_1^{(ab)} e^{-j\gamma} + L_m \underline{i}_2^{(xy)} e^{j\gamma} e^{-j\gamma} = L_1 \underline{i}_1^{(xy)} + L_m \underline{i}_2^{(xy)}$$

Таким чином, форма запису рівнянь узагальнених векторів потокозчеплень не залежить від вибору системи координат. В однакових системах координат вирази для потокозчеплення мають однакову форму, і індекси систем у них можна опустити. Потокозчеплення статора і ротора з урахуванням усіх струмів і незалежно від обраної системи координат запишуться у вигляді:

$$\underline{\Psi}_1 = L_1 \underline{i}_1 + M \underline{i}_2 = \underline{\Psi}_{11} + \underline{\Psi}_{12};$$

$$\underline{\Psi}_2 = M \underline{i}_1 + L_2 \underline{i}_2 = \underline{\Psi}_{21} + \underline{\Psi}_{22};$$

Згідно з останніми виразами, потокозчеплення статора і ротора розкладаються на складові, обумовлені власним струмом (ψ_{11} і ψ_{22}) і струмом іншої частини двигуна (ψ_{12} і ψ_{21}).

Векторну суму струмів статора і ротора утворює результуючий струм – струм намагнічування $\underline{i}_\mu$, і потокозчеплення статора і ротора можна представити через основний магнітний потік і через потоки розсіювання:

$$\underline{\Psi}_m = M(\underline{i}_1 + \underline{i}_2) = M\underline{i}_\mu;$$

$$\underline{\Psi}_{1\sigma} = L_{1\sigma}\underline{i}_1;$$

$$\underline{\Psi}_{2\sigma} = L_{2\sigma}\underline{i}_2$$

у вигляді[14]:

$$\underline{\Psi}_1 = L_1\underline{i}_1 + M\underline{i}_2 = (L_{1\sigma} + M)\underline{i}_1 + M\underline{i}_2 = L_{1\sigma}\underline{i}_1 + M\underline{i}_\mu = \underline{\Psi}_{1\sigma} + \underline{\Psi}_m;$$

$$\underline{\Psi}_2 = M\underline{i}_1 + L_2\underline{i}_2 = (L_{2\sigma} + M)\underline{i}_2 + M\underline{i}_1 = L_{2\sigma}\underline{i}_2 + M\underline{i}_\mu = \underline{\Psi}_{2\sigma} + \underline{\Psi}_m.$$

Для фазних напруг статорної обмотки справедливі вирази[14]:

$$u_{1a} = i_{1a}R_1 + \frac{d\psi_{1a}}{dt};$$

$$u_{1b} = i_{1b}R_1 + \frac{d\psi_{1b}}{dt};$$

$$u_{1c} = i_{1c}R_1 + \frac{d\psi_{1c}}{dt}.$$

де R_1 - активний опір статорної обмотки.

Помноживши друге рівняння на a , третє рівняння на a^2 , потім складаючи всі три рівняння і множачи їх праву та ліву частини на $2/3$

$$\frac{2}{3}(u_{1a} + u_{1b}a + u_{1c}a^2) = \frac{2}{3}(i_{1a} + i_{1b}a + i_{1c}a^2)R_1 + \frac{2}{3}\frac{d}{dt}(\psi_{1a} + \psi_{1b}a + \psi_{1c}a^2),$$

одержимо в векторній формі

$$\underline{u}_1 = \underline{i}_1R_1 + \frac{d\underline{\psi}_1}{dt}.$$

Аналогічний вираз одержимо для ротора в системі координат xu

$$\underline{u}_2 = \underline{i}_2R_2 + \frac{d\underline{\psi}_2}{dt}.$$

Для перетворення рівняння ротора в нерухому систему координат $\alpha\beta$ помножимо обидві частини рівняння ротора на $e^{j\theta}$ при поточному куті повороту системи координат θ (рис. 1. 3) і представимо похідну вектора потокозчеплення ротора в новій системі координат як

$$\psi_2^{(xy)} = \psi_2^{(\alpha\beta)} e^{-j\theta}.$$

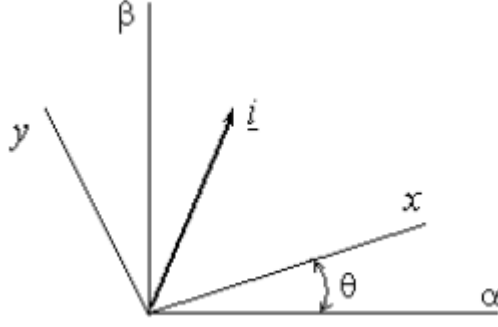


Рисунок 1.3 – Вектор струму в різних сисемах координат

Після перетворення одержимо[19]

$$e^{j\theta} \underline{u}_2^{(xy)} = e^{j\theta} \underline{i}_2^{(xy)} R_2 + e^{j\theta} \frac{d\psi_2^{(xy)}}{dt} = e^{j\theta} \underline{i}_2^{(xy)} R_2 + e^{j\theta} \frac{d(e^{-j\theta} \psi_2^{(ab)})}{dt},$$

опускаючи індекси координатної системи, отримаємо рівняння напруги для ротора в нерухомій системі координат

$$\underline{u}_2 = \underline{i}_2 R_2 + \frac{d\psi_2}{dt} - j \frac{d\theta}{dt} \psi_2 = \underline{i}_2 R_2 + \frac{d\psi_2}{dt} - j \omega_2 \psi_2,$$

де $\omega_2 = d\theta/dt$ – поточна кутова швидкість ротора. Перехід від системи координат xy до системи координат $\alpha\beta$ призвів до розкладання ЕРС в рівнянні ротора на дві складові. Перша складова $d\psi_2/dt$ пов'язана зі зміною потокозчеплення внаслідок зміни у часі струмів і називається ЕРС трансформації. Друга складова $\omega_2 \psi_2$ пов'язана зі зміною потокозчеплення внаслідок обертання ротора і називається ЕРС обертання[19]:

$$\begin{aligned} \underline{u}_1 &= \underline{i}_1 R_1 + \frac{d\psi_1}{dt} = \underline{i}_1 R_1 + L_{\sigma 1} \frac{d\underline{i}_1}{dt} + M \frac{d\underline{i}_\mu}{dt}; \\ \underline{u}_2 &= \underline{i}_2 R_2 + \frac{d\psi_2}{dt} - j \omega_2 \psi_2 = \underline{i}_2 R_2 + L_{\sigma 2} \frac{d\underline{i}_2}{dt} + M \frac{d\underline{i}_\mu}{dt} - j \omega_2 L_{\sigma 2} \underline{i}_2 - j \omega_2 M \underline{i}_\mu. \end{aligned}$$

Дані рівняння в вигляді комплексних амплітуд[19] :

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} e^{j\omega t} &= R_1 \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + L_{\sigma 1} \frac{d}{dt} \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + M \frac{d}{dt} \underline{I}_\mu e^{j\omega t}; \\ \underline{U}_{2m} e^{j\omega t} &= R_2 \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + L_{\sigma 2} \frac{d}{dt} \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + M \frac{d}{dt} \underline{I}_\mu e^{j\omega t} - j \omega_2 \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} - j \omega_2 M \underline{I}_\mu e^{j\omega t}. \end{aligned}$$

Похідна від $e^{j\omega t}$ складає $j\omega e^{j\omega t}$ при заміні оператора дифенціювання d/dt на $j\omega$:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} e^{j\omega t} &= R_1 \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_{1m} e^{j\omega t} + j\omega M \underline{I}_{\mu} e^{j\omega t}; \\ \underline{U}_{2m} e^{j\omega t} &= R_2 \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + j\omega L_{\sigma 2} \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} + j\omega M \underline{I}_{\mu} e^{j\omega t} - j\omega_2 L_{\sigma 2} \underline{I}_{2m} e^{j\omega t} - j\omega_2 M \underline{I}_{\mu} e^{j\omega t}, \end{aligned}$$

або, скоротивши всі частини рівняння на $e^{j\omega t}$:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} &= R_1 \underline{I}_{1m} + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_{1m} + j\omega M \underline{I}_{\mu}; \\ \underline{U}_{2m} &= R_2 \underline{I}_{2m} + j\omega L_{\sigma 2} \underline{I}_{2m} + j\omega M \underline{I}_{\mu} - j\omega_2 L_{\sigma 2} \underline{I}_{2m} - j\omega_2 M \underline{I}_{\mu}. \end{aligned}$$

Позначивши штрихом струм і параметри короткозамкненого ротора, зведених до статора ($U_2 = 0$), отримаємо:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} &= R_1 \underline{I}_{1m} + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_{1m} + j\omega M \underline{I}_{\mu}; \\ 0 &= R_2' \underline{I}_2' + j\omega L_{\sigma 2} \underline{I}_2' + j\omega M \underline{I}_{\mu} - j\omega_2 L_{\sigma 2} \underline{I}_2' - j\omega_2 M \underline{I}_{\mu}. \end{aligned}$$

Для двополусної машини $\omega_1 = \omega = 2\pi f$, отже:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} &= R_1 \underline{I}_{1m} + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_{1m} + j\omega M \underline{I}_{\mu}; \\ 0 &= R_2' \underline{I}_2' + j\omega L_{\sigma 2} \underline{I}_2' + j\omega M \underline{I}_{\mu} - j\omega_2 L_{\sigma 2} \underline{I}_2' \frac{\omega_2}{\omega} - j\omega_2 M \underline{I}_{\mu} \frac{\omega_2}{\omega}, \end{aligned}$$

або

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} &= R_1 \underline{I}_{1m} + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_{1m} + j\omega M \underline{I}_{\mu}; \\ 0 &= R_2' \underline{I}_2' + j\omega L_{\sigma 2} \underline{I}_2' \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega}\right) + j\omega M \underline{I}_{\mu} \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega}\right). \end{aligned}$$

Враховуючи, що $1 - \omega_2/\omega = s$ - ковзання ротора, отримуємо[20]:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} &= R_1 \underline{I}_{1m} + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_{1m} + j\omega M \underline{I}_{\mu}; \\ 0 &= R_2' \underline{I}_2' + j\omega L_{\sigma 2} \underline{I}_2' s + j\omega M \underline{I}_{\mu} s, \end{aligned}$$

і математична модель асинхронного двигуна має вигляд:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{1m} &= R_1 \underline{I}_{1m} + j\omega L_{\sigma 1} \underline{I}_{1m} + j\omega M \underline{I}_{\mu}; \\ 0 &= \underline{I}_2' \frac{R_2'}{s} + jx_2' \underline{I}_2' + jx_{\mu} \underline{I}_{\mu}. \end{aligned}$$

1.2 Електрична схема заміщення асинхронної машини

Математичній моделі відповідає електрична схема заміщення асинхронної машини (рис. 1.4, $U = U_1$). За розташуванням параметрів її називають Т-подібною схемою заміщення.

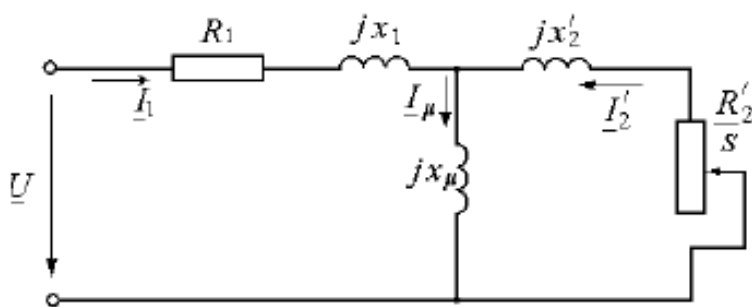


Рисунок 1.4 - Т-подібна схема заміщення асинхронної машини

Без суттєвої похибки гілку намагнічування можна винести на вхід схеми заміщення (рис. 1.5). Цю схему заміщення за розташуванням параметрів називають Г-подібною.

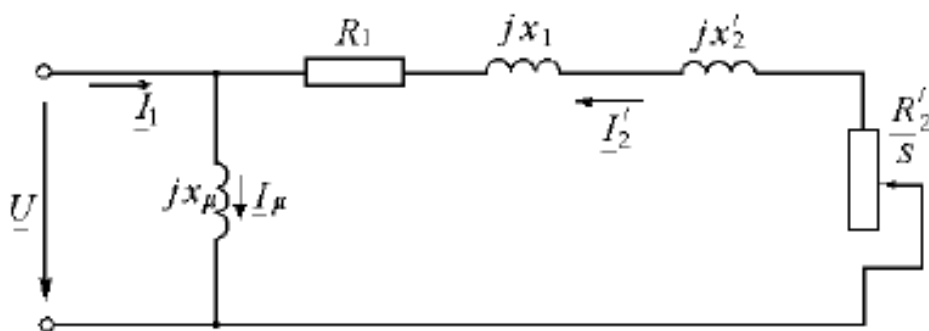


Рисунок 1.5 - Г-подібна схема заміщення асинхронної машини

Для реальної m -фазної асинхронної машини з $wk_{o\delta}$ ефективними витками на фазу статорної обмотки ($k_{o\delta}$ – обмотковий коефіцієнт) та $w_2k_{o\delta 2}$ ефективними витками на фазу $m_2 = Z_2$ фазної роторної обмотки (Z_2 - число пазів ротора, $k_{o\delta 2}$ - обмотковий коефіцієнт), приведені до статора струм та опори ротора[16]:

$$I_2' = I_2/k_i; \quad R_2' = R_2k; \quad x_2' = x_2/k,$$

де $k_i = mwk_{o\delta}/m_2w_2k_{o\delta 2}$ - коефіцієнт приведення струму; $k = mw^2 k_{o\delta}^2 /m^2w_2^2$ - коефіцієнт приведення опорів.

Згідно зі схемами заміщення струм ротора ($x_\kappa = x_1 + x_2'$)

$$I_2' = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_\kappa^2}}.$$

Величина електромагнітної потужності визначається як

$$P_{em} = m(I_2')^2 \frac{R_2'}{s} = \frac{mU^2 \frac{R_2'}{s}}{(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_k^2}$$

Даній потужності відповідає електромагнітний момент (в загальному випадку $\omega_1 = \omega/p$)

$$M = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{mU^2 \frac{R_2'}{s}}{\omega_1 \left[(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_k^2 \right]} = \frac{mU^2 R_2' s}{\omega_1 \left[(sR_1 + R_2')^2 + s^2 x_k^2 \right]}.$$

Прирівнявши до нуля похідну[16]

$$\begin{aligned} \frac{dM}{ds} &= \frac{mU^2 R_2'}{\omega_1} \cdot \frac{s^2 R_1^2 + 2sR_1 R_2' + R_2'^2 + s^2 x_k^2 - 2s^2 R_1^2 - s2R_1 R_2' - 2s^2 x_k^2}{\left[(R_1 + \frac{R_2'}{s})^2 + x_k^2 \right]^2} = \\ &= \frac{mU^2 R_2'}{\omega_1} \cdot \frac{-s^2 R_1^2 + R_2'^2 - s^2 x_k^2}{\left[(sR_1 + R_2')^2 + s^2 x_k^2 \right]^2} = 0, \end{aligned}$$

одержимо критичне ковзання

$$s_k = \pm \frac{R_2'}{\sqrt{R_1^2 + x_k^2}}$$

а по ньому і максимальний електромагнітний момент:

$$M_m = \pm \frac{mU^2 \sqrt{R_1^2 + x_k^2}}{\omega_1 \left[(R_1 + (\pm \sqrt{R_1^2 + x_k^2}))^2 + x_k^2 \right]} = \pm \frac{mU^2}{2\omega_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + x_k^2} \right]},$$

де знак «+» відноситься до рухового режиму роботи асинхронної машини, а знак «-» - до генераторного режиму її роботи (рис. 1.6).

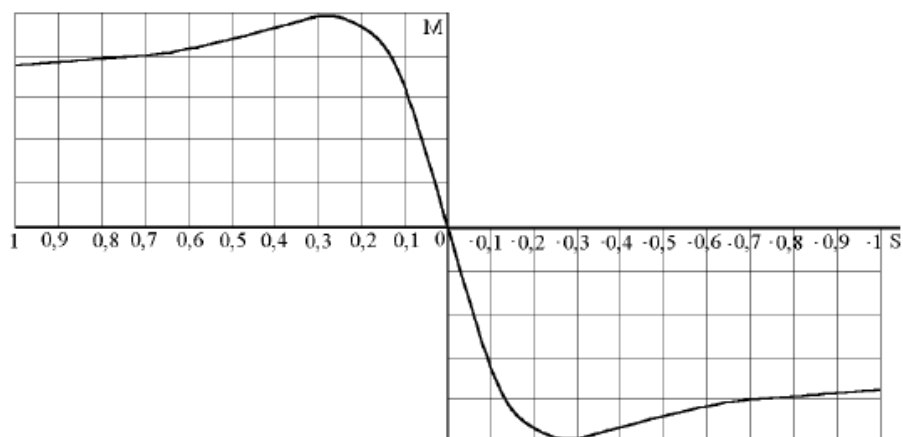


Рисунок 1.6 - Залежність $M_{em} = f(s)$ асинхронної машини

У генераторному режимі роботи асинхронної машини зі ковзанням $s < 0$ активна складова струму ротора змінює знак

$$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2 = I_2 \frac{R_2 / s}{\sqrt{(R_2 / s)^2 + x_2^2}}$$

і гальмівний момент генератора врівноважує момент приводного двигуна.

Реактивна складова струму ротора не залежить від знака ковзання.

$$I_{2p} = I_2 \sin \psi_2 = I_2 \frac{x_2}{\sqrt{(R_2 / s)^2 + x_2^2}},$$

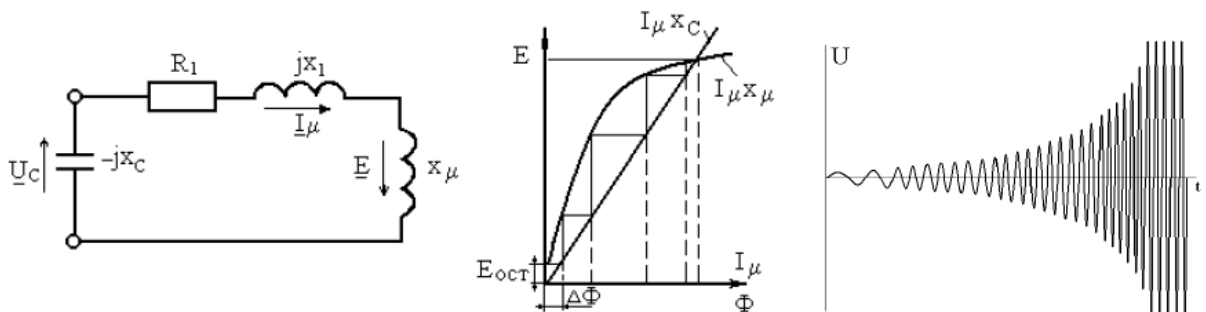
і асинхронний генератор, як і асинхронний двигун, є споживачем реактивної потужності.

В автономних електростанціях джерелом реактивної потужності для асинхронного генератора слугують конденсатори. Процес самозбудження генератора за наявності залишкового магнітного поля подібний до фізичного процесу в послідовному коливальному контурі з індуктивності L , конденсатора C та опору R

$$L \frac{d^2 q_t}{dt^2} + R \frac{dq_t}{dt} + \frac{q_t}{C} = -e_t,$$

де q_t і e_t – заряд на обкладках конденсатора та ЕРС контуру.

Усталене значення ЕРС визначає перетин характеристики намагнічування генератора з вольтамперною характеристикою конденсатора (рис. 1.7). Струм збудження генератора $I_\mu = E/x_\mu$.

Рисунок 1.7 - До процесу самозбудження асинхронного генератора ($s \approx 0$)

В усталеному режимі роботи балансу енергій електричного поля конденсатора і магнітного поля асинхронного генератора відповідає частота електромагнітних коливань

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

Висновки по першому розділу

В усталеному режимі роботи балансу енергій електричного поля конденсатора і магнітного поля асинхронного генератора відповідає певна частота електромагнітних коливань з індуктивністю L , ємністю C та опором R .

РОЗДІЛ 2

ПАРАМЕТРИ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

2.1 Обґрунтування параметрів асинхронних генераторів

Статорні обмотки асинхронних генераторів, як і будь-яких асинхронних машин, складаються з котушкових груп із числом котушок $q = Z/2pt$, а їхню МРС можна представити у вигляді множини гармонік n з амплітудами F_{vm} .

Якість МРС оцінюють за мінімальною величиною коефіцієнта диференціального розсіювання [10]

$$\tau_{\partial} = \frac{\sum_{v=1}^{\infty} F_{vm}^2}{F_m^2} - 1,$$

є F_m - амплітуда основної гармоніки $n = p$.

Розподіл ампер-провідників A_x обмотки по пазах статора цілком визначений, і, приймаючи радіус статора за одиницю, МРС можна представити у вигляді

$$F_x e^{j(\omega t + \varphi_x)} = \int_x A_x e^{j(\omega t + \varphi_x)} dx = e^{j\omega t} \int_x A_x e^{j\varphi_x} dx,$$

де $\varphi(x)$ - фаза $I_{1m} N$ провідників у пазу з координатою x .

Підсумовування векторів $A_x e^{j\omega x}$ на періоді МРС утворює замкнену фігуру – діаграму Гергеса, за якою визначають значення τ_{∂} . Для основної гармоніки МРС обмотки з $N = 2mw/Z$ провідниками в пазу діаграма Гергеса є колом радіусом

$$R_p = F_m = \frac{ZN I_{1m} k_{об}}{2\pi p}.$$

Приймаючи $I_{1m} N = 1$, одержимо

$$R_p = F_m = \frac{Zk_{об}}{2\pi p},$$

і коефіцієнт диференційного розсіювання [9] $\tau_{\partial} = \frac{R_{\partial}^2}{R_p^2} - 1$,

де R_δ^2 - полярний момент інерції пазових точок діаграми Гьоргеса. Результуючій амплітуді основної гармоніки МРС обмоток статора і ротора F_{0m} відповідає індукція в повітряному зазорі

$$B_\delta = \frac{\mu_0}{k_\delta \delta k_\mu} \cdot F_{0m},$$

а індукції – намагнічуючий струм

$$I_\mu = \frac{B_\mu \pi p k_\delta \delta k_\mu}{m \sqrt{2} k_{o\delta} w \mu_0},$$

де k_δ - коефіцієнт повітряного зазору; k_μ - коефіцієнт насичення магнітного кола; μ_0 - магнітна постійна.

Магнітний потік основної гармоніки $\Phi = B_\delta D l / p$, переміщуючись з лінійною швидкістю $2\tau f$ (D і l – внутрішній діаметр і довжина статора; $\tau = pD/2p$ - полюсна поділка статора) відносно $2wk_{o\delta}$ ефективних провідників статорної обмотки наводить у них ЕРС[9]

$$E = \frac{B_\delta}{\sqrt{2}} l 2\tau f 2wk_{o\delta} = \frac{\Phi \pi}{\sqrt{2}} f 2wk_{o\delta} = 4,44 f w k_{o\delta} \Phi.$$

По ЕРС розраховують число витків обмотки на номінальну фазну напругу U_n ,

$$w = \frac{E}{4,44 f k_{o\delta} \Phi} = \frac{k_e U_n}{4,44 f k_{o\delta} \Phi},$$

де $k_e = 1 - 75p^2\delta/ZD$ - емпіричний коефіцієнт, що враховує падіння напруги на обмотці при номінальному навантаженні.

Поряд з основним потоком струми обмоток статора і ротора створюють потоки розсіяння, що визначають індуктивні опори обмоток.

Індуктивний опір одношарової та двошарової статорної обмотки визначається виразами[9]:

$$x_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{p} \left[\frac{l}{q} + (0,67l_n - 0,43 \frac{\pi D}{2p}) \right] + \tau_\delta x_\mu;$$

$$x_1 = 4\pi f \mu_0 \frac{w^2}{p} \left(\frac{l}{q} \cdot \frac{3\beta + 1}{4} + 0,57 \frac{3\beta - 1}{2} \frac{\pi D}{2p} \right) + \tau_\delta x_\mu,$$

де: l_n - довжина лобової частини витка; β - ступінь укорочення кроку;

$$x_{\mu} = \frac{E}{I_{\mu}} = 2f \frac{m\mu_0 D l w^2 k_{ob}^2}{p^2 \delta k_{\delta} k_{\mu}} \text{ - - опір взаємодукції.}$$

Омічний опір статорної обмотки з а паралельними вітками визначає середню довжину витку l_e (м), переріз проводу S (мм²), питомий опір міді ($\rho = 0,0174$ Ом×м/мм² при 20°C) і температурний коефіцієнт опору (для міді $\alpha = 0,0041/^{\circ}\text{C}$).

Активний опір статорної обмотки для розрахункової температури 75°C і частоти струму $f = 50$ Гц $R_1 = 0,0223 l_e w / an S$.

До складу фазної обмотки ротора входять стрижень і два елементи замикаючих кілець (рис. 8, $I_{c1} = I_{c2} = \dots = I_2$ і $I_{12} = I_{23} = \dots = I_{кл}$).

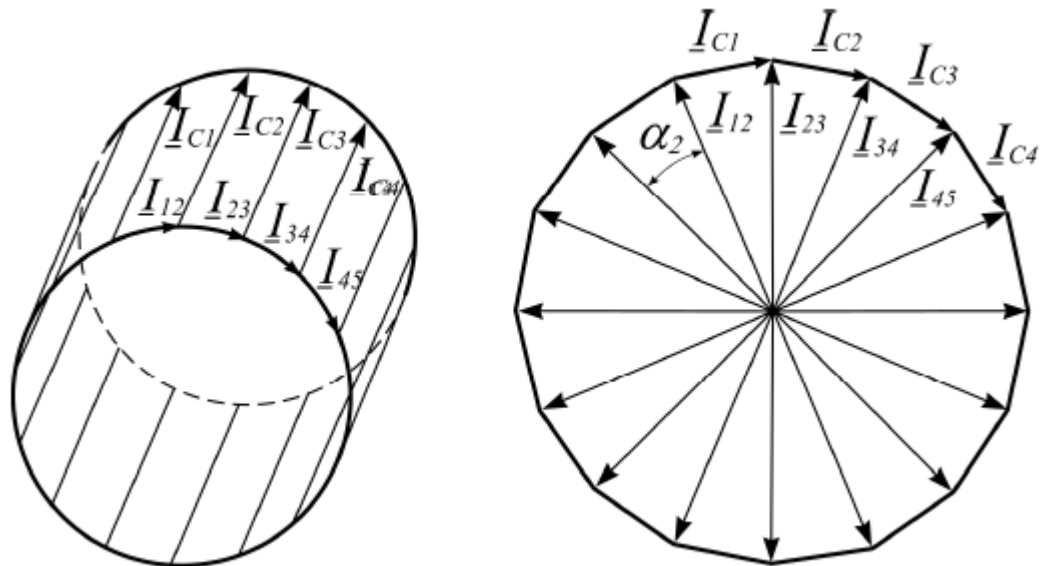


Рисунок 2.1 - Схема струмів у стрижнях і в елементах замикаючих кілець

При розрахунку активного опору роторної обмотки R_2 опір елементів замикаючих кілець $2R_{кл}$ приводять до опору стрижня R_c .

При фазовому зсуві струмів у стрижнях $\varphi_2 = 2\pi p / Z_2$ струм в елементі замикаючого кільця $I_{кл} = I_2 / 2\sin(\pi p / 2)$ та

$$R_2 = R_c + \frac{R_{кл}}{2(\sin \frac{\pi p}{Z_2})^2}.$$

Визначимо індуктивний опір вторинної обмотки[14]:

$$x_2 = 2\pi f \mu_0 (l + 2l_{\pi 2} \frac{2,3D_{\kappa}}{Z_2 l (2 \sin \frac{\pi p}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7D_{\kappa}}{2h_{\kappa} + b_{\kappa}} + \tau_{2\phi} \frac{D l Z_2 k_{\phi 2}^2}{4\pi \delta k_{\delta} k_{\mu} p^2}),$$

де D_{κ} , h_{κ} , b_{κ} і $l_{\pi 2}$ – середній діаметр, висота, ширина та довжина елемента замикаючих кілець;

$$\tau_{2\phi} = \frac{(\pi p)^2}{\left(k_{\phi 2} Z_2 \sin \frac{\pi p}{Z_2}\right)} - 1 \text{ - - коефіцієнт диференційного розсіювання.}$$

Відповідно для гармоніки v :

$$R_{2v} = R_c + \frac{R_{\kappa l}}{2 \left(\sin \frac{\pi v}{Z_2} \right)^2};$$

$$x_{2v} = 2\pi f \mu_0 \left(l + \frac{D l Z^2 k_{\phi 2v}^2}{4\pi v^2 \delta k_{\delta} k_{\mu}} \right);$$

$$\tau_{2\phi v} = \frac{(\pi v)^2}{\left(k_{\phi 2v} Z_2 \sin \frac{\pi v}{Z_2}\right)} - 1.$$

Для вищих гармонік $R_{2v} \approx R_c$.

Дію гармоніки v оцінюють за параметрами, наведеними до роторної обмотки (рис. 2.2).

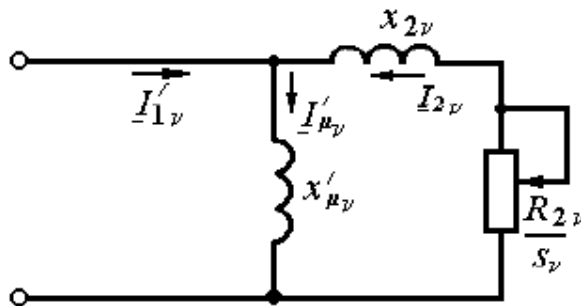


Рисунок 2.2 – Схема заміщення для v -ї гармоніки

Позначення на схемі заміщення описуються формулами[14]:

$$x'_{\mu\nu} = 2\pi f \frac{Z_2 D l k_{o\delta 2\nu}^2}{k_\delta \delta k_\mu \nu^2} \cdot 10^{-7}; \quad I'_{1\nu} = I_1 k_{i\nu}; \quad \underline{I}'_{\mu\nu} = \underline{I}'_{1\nu} + \underline{I}'_{2\nu};$$

$$(R_{2\nu} + j s_\nu x_{2\nu}) \underline{I}_{2\nu} + j s_\nu x'_{\mu\nu} \underline{I}'_{\mu\nu} = 0;$$

$$I_{2\nu} = \frac{k_{i\nu} x'_{\mu\nu} s_\nu}{\sqrt{R_{2\nu}^2 + s_\nu^2 (x'_{\mu\nu} + x_{2\nu})^2}} I_1,$$

де $k_{2\nu} = 2\pi f k_{o\delta\nu} / Z_2 k_{o\delta 2\nu}$ - коефіцієнт приведення струму статора до струму ротора ν -ї гармоніки.

Електромагнітний момент від гармоніки ν буде визначатися виразом[19]:

$$M_\nu = \frac{Z_2 R_{2\nu} \nu (k_{i\nu} x'_{\mu\nu})^2 s_\nu}{\omega R_{2\nu}^2 + \omega s_\nu^2 (x'_{\mu\nu} + x_{2\nu})^2} I_1^2.$$

Електромагнітний момент від основної гармоніки

$$M = \frac{Z_2 I_1^2 R_2 p}{s \omega} = \frac{Z_2 R_2 p (k_i x'_\mu)^2 s}{\omega R_2^2 + \omega s^2 (x'_\mu + x_2)^2} I_1^2,$$

$$\text{де } x'_\mu = 2\pi f \frac{Z_2 D l k_{o\delta 2}^2}{k_\delta \delta k_\mu p^2} \cdot 10^{-7}$$

- зведений до ротора опір взаємоіндукції.

2.2 Аналіз параметрів генератора на базі асинхронного двигуна

Оцінимо дію вираженої вищої зворотно-обертової гармоніки $\nu = 5$ для генератора на базі асинхронного двигуна АІР112М2[19]. Дані АІР112М2: $D = 108$ мм; $l = 125$ мм; $I_{1H} = 14,7$ А; $\cos\varphi_H = 0,88$; $w = 108$; $R_1 = 0,70$ Ом; $B_d = 0,71$ Тл; $k_m = 1,75$; $\delta = 0,6$ мм; $k_d = 1,2$; $Z_2 = 28$; $b_{CK} = 9,4$ мм; $\beta = 100$; $D_K = 0,097$ м; $h_K = 0,022$ м; $b_K = 0,019$ м; $l_{L2} = 0,011$ м; $P_{ел1} = 402$ Вт – втрати в статорній обмотці; $P_{ел2} = 208$ Вт – втрати в роторній обмотці; $P_c = 274$ Вт – втрати в сталі; $P_m = 121$ Вт – втрати механічні.

Амплітуди гармонік у частках малих сходинок МРС (рис. 2.3, сторони котушок фази А позначені квадратами, фази В – трикутниками і фази С – колами).

$$F_{vm} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} F_x \cos \nu x dx = \frac{4}{\pi \nu} (\sin \nu 5^\circ + \sin \nu 15^\circ + \sin \nu 25^\circ + \sin \nu 35^\circ + \sin \nu 45^\circ + \sin \nu 55^\circ + 2 \sin \nu 65^\circ + 2 \sin \nu 75^\circ + 2 \sin \nu 85^\circ).$$

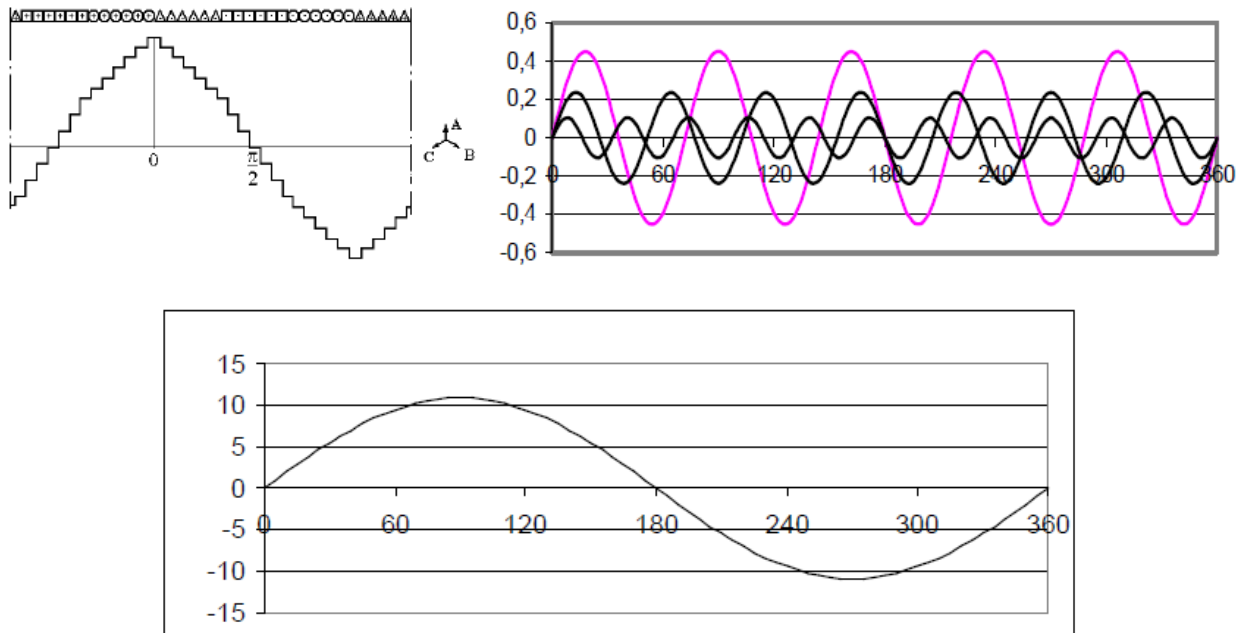


Рисунок 2.3 - Основна гармоніка та перші вищі гармоніки ЕРС

Втрати холостого ходу та активна складова струму холостого ходу базового двигуна ($U_H = 220$ В):

$$P_0 \approx m I_\mu^2 R_1 + P_c + P_m = 3 \cdot 5,1^2 \cdot 0,70 + 274 + 121 = 450 \text{ Вт};$$

$$I_{0a} = P_0 / m U_H = 450 / (3 \cdot 220) = 0,68 \text{ А}$$

Приведений активний опір і активний опір роторної обмотки:

$$I_0 \approx \sqrt{I_\mu^2 + I_{0a}^2} = \sqrt{5,1^2 + 0,68^2} = 5,15 \text{ А}.$$

Наведене активне опору та активне опору роторної обмотки:

$$R'_2 = \frac{P_{e2}}{m(I_{1a} - I_{0a})^2} = \frac{208}{3(12,94 - 0,68)^2} = 0,47 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R'_2 / k = 0,47 / 4578 = 1,02 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

$$\text{де } k = m w^2 k_{o\phi}^2 / m_2 w_2^2 k_{o\phi 2}^2 = 3 \cdot 108^2 \cdot 0,956^2 / (28 \cdot 0,5^2 \cdot 0,999^2) = 4578.$$

Куту скосу пазів ротора $\beta = 10^\circ$ відповідають значення коефіцієнтів роторної обмотки та індуктивних опорів:

$$k_{o\delta 2} = \frac{\sin \frac{p\beta}{2}}{\frac{p\beta}{2}} = \frac{\sin \frac{1 \cdot 10}{2}}{\frac{1 \cdot 0,1744}{2}} = 0,999;$$

$$\tau_{2\delta} = -k_{o\delta 2} = -\frac{\sin \frac{p\beta}{2}}{\frac{p\beta}{2}} = -\frac{\sin \frac{1 \cdot 10}{2}}{\frac{1 \cdot 0,1744}{2}} = 0,999;$$

$$x'_{\mu} = 2\pi f \frac{Z_2 D l k_{o\delta 2}^2}{\delta k_{\delta} k_{\mu} p^2} = 314 \frac{28 \cdot 0,108 \cdot 0,125 \cdot 0,999^2}{0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 1,75 \cdot 1^2} 10^{-7} = 94,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$\begin{aligned} x_2 &= 2\pi f \mu_0 (l + 2l_{\gamma 2}) \frac{2,3 D_k}{Z_2 l (2 \sin \frac{\pi p}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7 D_k}{2 h_k + b_k} + \tau_{2\delta} \frac{D l Z_2 k_{o\delta 2}^2}{4\pi \delta k_{\delta} k_{\mu} p^2} = \\ &= 3,94 \cdot 10^{-4} (0,125 + 2 \cdot 0,011 \frac{2,3 \cdot 0,097}{28 \cdot 0,125 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{28})^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,097}{0,044 + 0,019} + \\ &+ 0,0063 \frac{0,108 \cdot 0,125 \cdot 28 \cdot 0,999^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 1,75 \cdot 1^2}) = 1,18 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Значення параметрів і коефіцієнтів для гармоніки $n = 5$:

$$R_{2v} \approx R_c = 0,9 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$k_{o\delta 2v} = 0,969;$$

$$\tau_{2v} = 0,184;$$

$$x_{2v} = 1,15 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$x'_{\mu v} = 3,55 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

При роботі асинхронної машини в режимі генератора з тим самим номінальним ковзанням $s_n = 0,0365$, що й у базового двигуна, ковзання ротора генератора відносно гармоніки $n = 5$

$$|S_v| = 1 + (1 + s) \frac{v}{p} = 1 + (1 + 0,035) \frac{5}{1} = 6,175$$

Моменти від основної гармоніки та від гармоніки $n = 5$:

$$\begin{aligned} M &= \frac{Z_2 R_2 p (k_i x'_{\mu})^2 s}{\omega R_2^2 + \omega s^2 (x'_{\mu} + x_2)^2} I_{1n}^2 = \\ &= \frac{28 \cdot 1,02 \cdot 10^{-4} \cdot 1 (22,15 \cdot 94,3 \cdot 10^{-4})^2 \cdot 0,0365}{314 (1,02 \cdot 10^{-4})^2 + 314 \cdot 0,0365^2 (94,3 \cdot 10^{-4} + 1,18 \cdot 10^{-4})^2} 14,7^2 = 24 \text{ Нм}; \end{aligned}$$

$$M_v = \frac{Z_2 R_{2v} \nu \left(k_{iv} x'_{\mu v} \right)^2 s_v}{\omega R_{2v}^2 + \omega s_v^2 \left(x'_{\mu v} + x_{2v} \right)^2} I_{1H}^2 =$$

$$= \frac{28 \cdot 0,9 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \left(4,7 \cdot 3,55 \cdot 10^{-4} \right)^2 \cdot 6,175}{314 \cdot 0,81 \cdot 10^{-8} + 314 \cdot 6,175^2 \left(3,55 \cdot 10^{-4} + 1,15 \cdot 10^{-4} \right)^2} 14,7^2 =$$

$$= 0,021 \text{ Нм.}$$

де $k_i = 2m\omega k_{об} / Z_2 k_{об2} = 2 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0,956 / (28 \cdot 0,999) = 22,15$;

$k_{iv} = 2m\omega k_{обv} / Z_2 k_{обv} = 2 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0,197 / (28 \cdot 0,969) = 4,7$.

- коефіцієнти приведення струму для основної та для n -ї гармоніки.

Таким чином, додаткова гальмівна дія моментів від вищих гармонік у генераторах практично не проявляється.

Додаткові втрати в роторній обмотці від гармоніки $n = 5$

$$\Delta P_v = M_v \cdot (\omega \nu) \cdot s_v = 0,0211 \cdot (314/5) \cdot 6,175 = 8,2 \text{ Вт.}$$

Висновки по другому розділу

Визначено, що при роботі асинхронної машини в режимі генератора з самим номінальним ковзанням $s_H = 0,0365$, що й у базового двигуна, ковзання ротора генератора відносно гармоніки $n = 5$ буде дорівнювати 6,175. При цьому додаткові втрати в роторній обмотці від цієї ж гармоніки будуть складати 8,2 Вт.

РОЗДІЛ 3

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ БАЗОВИХ АССИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ АССИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

Орієнтиром для вибору бази асинхронного генератора служить індуктивний опір роторної обмотки, що чинить розмагнічувальну дію на генератор при навантаженні. Порівняємо цей параметр для стандартних асинхронних двигунів AIP100L2 і AIP112M2 [19].

3.1 Асинхронний генератор на базі асинхронного двигуна AIP112M2

Із довідника [19] маємо дані AIP112M2 та беремо із попереднього розділу розрахункові значення його роторної обмотки $R_2 = 1,02 \cdot 10^{-4}$ Ом, $\tau_{2v} = 0,0063$, $k_{o\delta 2} = 0,999$

Розрахуємо номінальний струм ротора базового двигуна

$$I_{2н} = \sqrt{\frac{P_{ex2}}{Z_2 R_2'}} = \sqrt{\frac{208}{28 \cdot 1,02 \cdot 10^{-4}}} = 270 \text{ А.}$$

Розрахунковим величинам ЕРС $E = 233$ В та індукції $B_\delta = 0,80$ Тл відповідають потік і кількість витків на фазу статорної обмотки:

$$\Phi = B_\delta D l / p = 0,8 \cdot 108 \cdot 125 \cdot 10^{-6} / 1 = 10,8 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$w = E / (222 k_{o\delta} \Phi) = 233 / (222 \cdot 0,956 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}) = 102.$$

При практично квадратичній залежності коефіцієнта насичення магнітного кола дво полюсної машини від індукції приймаємо для генератора $k_\mu \approx 2,3$. Індуктивний опір роторної обмотки і намагнічувальний струм генератора [12]:

$$\begin{aligned} x_2 &= 2\pi f \mu_0 (l + 2l_{\sigma 2}) \frac{2,3 D_\kappa}{Z_2 l (2 \sin \frac{\pi p}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7 D_\kappa}{2 h_\kappa + b_\kappa} + \tau_{2\sigma} \frac{D l Z_2 k_{o\delta 2}^2}{4\pi \delta k_\delta k_\mu p^2} = \\ &= 3,94 \cdot 10^{-4} (0,125 + 2 \cdot 0,011 \frac{2,3 \cdot 0,097}{28 \cdot 0,125 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{28})^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,097}{0,044 + 0,019} + \\ &+ 0,0063 \frac{0,108 \cdot 0,125 \cdot 28 \cdot 0,999^2}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2,3 \cdot 1^2}) = 1,04 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$I_\mu = \frac{B_\delta \pi p \delta k_\delta k_\mu}{\sqrt{2} m w k_{o\delta} \mu_0} = \frac{0,8 \cdot 3,1416 \cdot 1 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 1,3}{1,414 \cdot 3 \cdot w k_{o\delta} \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = \frac{780,8}{w k_{o\delta}} = \frac{1565}{k_e} = \frac{1565}{195,2} \approx 8 \text{ А.}$$

$$\text{де } k_e = w k_{o\delta v} / w_2 k_{o\delta 2} = 102 \cdot 0,956 / (0,5 \cdot 0,999) = 195,2.$$

Із виразу

$$I_{2н} \approx \frac{s_n \cdot E}{k_e \cdot R_2} = 270 \text{ А}$$

находимо мінімальне ковзання ($E=222k_{об}\Phi$ та $f = 50$ Гц)

$$\begin{aligned} s_n &= \frac{285,5 \cdot 10^{-4} k_e}{E} = \frac{285,5 w k_{об}}{E \cdot w_2 k_{об2} \cdot 10^4} = \frac{285,5 w k_{об}}{E \cdot 0,5 \cdot 0,998 \cdot 10^4} = \frac{0,0572 w k_{об}}{222 w k_{об} \Phi} = \\ &= \frac{0,0572}{222 \cdot \Phi} = \frac{0,0572}{222 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}} = \frac{57,2}{222 \cdot 10,8} = 0,0239. \end{aligned}$$

Із наступних виразів:

$$\begin{aligned} I_{2p} &= \frac{(E/k_e) \cdot x_2 \cdot s_n^2}{R_2^2 + x_2^2 s_n^2} \approx \frac{E \cdot x_2 \cdot s_n^2}{k_e \cdot R_2^2} = \frac{E \cdot 1,76 \cdot 10^{-4} \cdot s_n^2}{813,5 \cdot (0,78 \cdot 10^{-4})^2} \cdot I_\mu = \\ &= 35,6 E \cdot I_\mu \cdot s_n^2 = 35,6 E \cdot I_\mu \cdot 0,0239^2 = 0,0203 E \cdot I_\mu; \end{aligned}$$

$$\frac{I_{2p}}{I_\mu} = 0,00338 E; \quad \frac{I_{2p} \cdot w k_{об}}{780,8} = 0,00338 E;$$

$$I_{2p} \cdot w k_{об} = 2,64 E = 2,64 \cdot 222 \cdot w k_{об} \cdot \Phi = 2,64 \cdot 222 \cdot w k_{об} \cdot 10,8 \cdot 10^{-3},$$

находимо реактивний струм ротора та його приведені значення:

$$I_{2p} = 2,64 \cdot 222 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} = 6,33 \text{ А};$$

$$I'_{2p} = \frac{I_{2p}}{k_i} = \frac{6,33}{20,91} = 0,3 \text{ А},$$

де $k_i = m w k_{об} / m_2 w_2 k_{об2} = 3 \cdot 102 \cdot 0,956 / (28 \cdot 0,5 \cdot 0,999) = 20,91$.

Ступінь розмагнічування струму ротора

$$I'_{2p} / (I_\mu + I'_{2p}) = 0,3 / 8,3 = 0,365.$$

3.2 Асинхронний генератор на базі асинхронного двигуна AIP112L2

Із довідника маємо дані AIP112M2[19]: $I_{1н} = 10,7$ А; $\cos \varphi_n = 0,89$; $D = 89$ мм; $l = 136$ мм; $w = 120$; $k_{об} = 0,956$; $R_1 = 0,91$ Ом; $B_d = 0,71$ Тл; $k_\mu = 1,53$; $\delta = 0,35$ мм; $k_\delta = 1,23$; $Z/Z_2 = 24/17$; $b_{ск} = 9,9$ мм; $k_{об2} = 0,998$; $\tau_{\partial 2} = 0,0155$; $D_k = 0,08$ м, $h_k = 0,023$ м, $b_k = 0,022$ м, $l_{л2} = 0,014$ м; $P_{ел1} = 300$ Вт; $P_{ел2} = 178$ Вт; $P_c = 180$ Вт; $P_m = 79$ Вт.

Втрати холостого ходу та активна складова струму холостого ходу базового двигуна ($U_H = 220$ В):

$$P_0 = mI_0^2 R_1 + P_c + P_m = 3(I_{1H} \sin \varphi_H)^2 R_1 + P_c + P_m = 3(10,7 \cdot 0,456)^2 0,91 + 180 + 79 = 324 \text{ Вт};$$

$$I_{0a} = P_0 / (mU_H) = 324 / (3 \cdot 220) = 0,49 \text{ А.}$$

Приведений активний опір та активний опір роторної обмотки:

$$R'_2 = \frac{P_{el2}}{m(I_{1a} - I_{0a})^2} = \frac{178}{3(9,52 - 0,49)^2} = 0,73 \text{ Ом};$$

$$R_2 = R'_2 / k = \frac{0,73}{9327} = 0,78 \cdot 10^{-4} \text{ Ом};$$

$$\text{де } k = mw^2 k_{o\phi}^2 / m_2 w_2^2 k_{o\phi 2}^2 = 3 \cdot 102^2 \cdot 0,956^2 / (17 \cdot 0,5^2 \cdot 0,998^2) = 9327.$$

Номинальний струм ротора

$$I_{2H} = \sqrt{\frac{P_{el2}}{Z_2 R'_2}} = \sqrt{\frac{178 \cdot 10^4}{17 \cdot 0,78}} = 366 \text{ А.}$$

Розрахунковим величинам ЕРС $E = 233$ В та $B_\delta = 0,80$ Тл відповідає $k_\mu \approx 2,0$, потік та число витків на фазу обмотки генератора:

$$\Phi = B_\delta D l / p = 0,8 \cdot 89 \cdot 136 \cdot 10^{-6} / 1 = 9,68 \cdot 10^{-3} \text{ Вб};$$

$$w = E / (222 k_{o\phi} \Phi) = 233 / (222 \cdot 0,956 \cdot 9,68 \cdot 10^{-3}) = 112.$$

Індуктивний опір роторної обмотки генератора

$$\begin{aligned} x_2 &= 2\pi f \mu_0 (l + 2l_{\pi 2}) \frac{2,3 D_\kappa}{Z_2 l (2 \sin \frac{\pi p}{Z_2})^2} \lg \frac{4,7 D_\kappa}{2 h_\kappa + b_\kappa} + \tau_{2\phi} \frac{D l Z_2 k_{o\phi 2}^2}{4\pi \delta k_\delta k_\mu p^2} = \\ &= 3,94 \cdot 10^{-4} \cdot (0,136 + 2 \cdot 0,014 \cdot \frac{2,3 \cdot 0,08}{17 \cdot 0,136 (2 \sin \frac{180 \cdot 1}{17})^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,08}{0,046 + 0,022} + \\ &+ 0,0155 \cdot \frac{17 \cdot 0,089 \cdot 0,136 \cdot 0,998^2}{4 \cdot 3,1416 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,23 \cdot 2 \cdot 1^2} = (0,536 + 0,056 + 1,163) \cdot 10^{-4} = \\ &= 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Струм намагнічування генератора

$$I_{\mu} = \frac{B_{\delta} \pi p \delta k_{\delta} k_{\mu}}{\sqrt{2} m w k_{o\delta} \mu_0} = \frac{0,8 \cdot 3,1416 \cdot 1 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,23 \cdot 2}{1,414 \cdot 3 \cdot w k_{o\delta} \cdot 4 \cdot 3,1416 \cdot 10^{-7}} = \frac{406}{w k_{o\delta}} = \frac{813,6}{k_e} =$$

$$= \frac{813,6}{214,6} \approx 3,8 \text{ A},$$

де $k_e = w k_{o\delta} / w_2 k_{o\delta 2} = 112 \cdot 0,956 / (0,5 \cdot 0,998) = 214,6$.

Із виразу

$$I_{2H} \approx \frac{s_H \cdot E}{k_e \cdot R_2} = 366 \text{ A}$$

находимо номінальне ковзання ротора генератора

$$s_H = \frac{285,5 \cdot 10^{-4} k_e}{E} = \frac{285,5 w k_{o\delta}}{E \cdot w_2 k_{o\delta 2} \cdot 10^4} = \frac{285,5 w k_{o\delta}}{E \cdot 0,5 \cdot 0,998 \cdot 10^4} = \frac{0,0572 w k_{o\delta}}{222 w k_{o\delta} \Phi} =$$

$$= \frac{0,0572}{222 \cdot \Phi} = \frac{0,0572}{222 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3}} = \frac{57,2}{222 \cdot 10,8} = 0,0239.$$

Із наступних виразів маємо:

$$I_{2p} = \frac{(E/k_e) \cdot x_2 \cdot s_H^2}{R_2^2 + x_2^2 \cdot s_H^2} \approx \frac{E \cdot x_2 \cdot s_H^2}{k_e \cdot R_2^2} = \frac{E \cdot 1,76 \cdot 10^{-4} \cdot s_H^2}{813,5 \cdot (0,78 \cdot 10^{-4})^2} \cdot I_{\mu} = 35,6 E \cdot I_{\mu} \cdot s_H^2 =$$

$$= 35,6 E \cdot I_{\mu} \cdot 0,0239^2 = 0,0203 E \cdot I_{\mu};$$

$$\frac{I_{2p}}{I_{\mu}} = 0,0203 E; \quad \frac{I_{2p} \cdot w k_{o\delta}}{780,8} = 0,0203 E;$$

$$I_{2p} \cdot w k_{o\delta} = 8,46 E = 8,46 \cdot 222 \cdot w k_{o\delta} \cdot \Phi = 8,46 \cdot 222 \cdot w k_{o\delta} \cdot 9,7 \cdot 10^{-3},$$

находимо реактивний струм ротора та його приведені значення:

$$I_{2p} = 8,46 \cdot 222 \cdot 10,8 \cdot 10^{-3} = 18,2 \text{ A};$$

$$I'_{2p} = \frac{I_{2p}}{k_i} = \frac{18,2}{35,75} = 0,51 \text{ A},$$

де $k_i = m w k_{o\delta} / m_2 w_2 k_{o\delta 2} = 3 \cdot 112 \cdot 0,956 / (17 \cdot 0,5 \cdot 0,998) = 35,75$.

Ступінь розмагнічування струму ротора

$$I'_{2p} / (I_{\mu} + I'_{2p}) = 0,51 / 4,31 = 0,118.$$

Висновки по третьому розділу

Таким чином, ступінь розмагнічування струму ротора генератора на базі AIP112M2 у 3,24 раза менший, ніж на базі AIP100L2. Практично на таку величину буде змінюватися і падіння напруги при завантаженні асинхронного генератора.

ВИСНОВКИ

За принципом будови асинхронний генератор не може бути джерелом реактивної потужності, а тому найважливіші характеристики його є крутоспадними, особливо при підключенні активно-індуктивних двигунних навантажень. Такі генератори потребують стабілізації напруги. Стабілізація напруги здійснюється компенсацією реактивної індуктивної потужності або розробкою спеціальних обмоток статора.

Таким чином, ступінь розмагнічування струму ротора генератора на базі AIP112M2 у 3,24 раза менший, ніж на базі AIP100L2. Практично на таку величину буде змінюватися і падіння напруги при завантаженні асинхронного генератора.

Великий вплив на параметри асинхронних генераторів мають конструктивні особливості обмоток статора.

Розробці раціональних схем статорних обмоток асинхронних генераторів з новими внутрішньофазними та міжфазними з'єднаннями сприяють сучасні методи їх формування, які будуть розглянуті в наступній публікації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення (EN 50160:2022, IDT)»
2. ДСТУ ІЕС 61000-2-12:2013 Електромагнітна сумісність. Частина Електромагнітна обстановка. Рівні сумісності для низькочастотних кондуктивних збурень та сигналів у системах електропостачання середньої напруги загальної призначеності (ІЕС 61000-2-12:2003, IDT)
3. Про затвердження Технічного регламенту щодо вимог до екодизайну для електродвигунів/ Постанова Кабінету Міністрів України від 27 лютого 2019 р. № 157
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Горпинич А.В., Швецова И.А. Надёжность работы электрооборудования при пониженном качестве электроэнергии // Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наук. праць. – Маріуполь: Изд-во ПДТУ, 2005, Вып. 15, Ч. 2, С. 25 – 29.
6. Пінчук О.Г. Енергетичні показники асинхронного двигуна при різних параметрах несимметрии питающего напряжения / О.Г. Пинчук // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Електротехніка і енергетика». – Донецьк: Изд-во ДонНТУ, 2008, Вып.8 (140), С. 201 – 205.
7. Schemmel F., Bauer K., Kaufhold M. Reliability and statistical lifetimeprognosis of motor winding insulation in low-voltage power drive systems. IEEE Electrical Insulation Magazine. 2009, Vol. 25, №. 4, pp. 6 – 13. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2009.5191411>.
8. Romanova V.V. Multi-factor analysis of external effects influencing the operational reliability of asynchronous electric motors / V.V. Romanova, K.V. Suslov, S.V. Khromov // E3S Web of Conferences, 2020, Vol. 216 (01084), p.4. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601084>.
9. Sayenko Yu. L. Identification and assessment of the influence of unbalance voltage sources in three-phase three-wire electric networks / Yu. L. Sayenko, D. N. Kalyuzhniy, V. A. Bolgov // Technical Electrodynamics, 2019, № 6, pp. 65 – 73.

10. В.М.Рибалко; Н.В.Матухно; І.М.Сівак; І.В.Дудченко. Проектування приводів сільськогосподарських машин//Національний університет біоресурсів і природокористування України. – Київ, 105с.

11. Овчаров В.В., Рижков А.О. Діагностування експлуатаційних режимів роботи і захист асинхронного двигуна за температурою сталі та кратністю сили струму // Наукові доповіді НАУ. – 2006. – № 3.– С. 21–28.

12.https://xn80addceesnhi0axzh6mb.com.ua/ua/faq/?srsltid=AfmBOorx_MTb_XTXjfZyMPDpNZ4i9toABAJZARrXcmo-Qc24mULKQ2Mq

13. Кінаш А.Т. К 41 Електротехніка. Електричні машини: Навчальний посібник. // Миколаїв: УДМТУ, 2003. 152 с

14. Електричні машини. Курс лекцій [Електронний ресурс] : навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність» спеціальності 141 Електроенергетика електротехніка та електромеханіка / Ю. А. Гайденок ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,47 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 211 с.

15, ДСТУ EN 50160:2014 Характеристики напряжения в системах электроснабжения общего назначения (EN 50160:2010, IDT)/ Приказ от 20.05.2014 № 573 О принятии национальных стандартов Украины, гармонизированных с международными и европейскими стандартами, утверждении национальных стандартов Украины, отмене национальных стандартов Украины и межгосударственных стандартов в Украине.

16. 13. Nagata E., Ferreira D., Bollen M., et al. Real-Time Voltage Sag Detection and Classification for Power Quality Diagnostics. Measurement, 2020, Vol.164 (4), p.15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108097>.

17. Enrique C. Quispe, Ivan D. Lopez, Fernando J. T. E. Ferreira, Vladimir Sousa.Unbalanced Voltages Impacts on the Energy Performance of Induction Motors,International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2018, Vol. 8, № 3, pp. 1412 – 1422.

18. Копилов І. П. Математичне моделювання електричних машин. –Х: Наука, 2001. – 327 с.
19. Електричні машини. Навчальний посібник / Г.Г.Півняк, Ф.П.Шкрабець, В.П.Довгань. –Дніпропетровськ,Видавництво Національного гірничого університету, 2003,
20. Ковальов О.В.Електричні машини: курс лекцій / О.В. Ковальов. – Мелітополь: ТДАТУ, 2020. – 175 с.