

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АНАЛІЗУ РЕЖИМІВ ГРУПОВОЇ РОБОТИ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ЗАГАЛЬНОГО ДЖЕРЕЛА

У статті здійснено аналіз режимів роботи та перехідних процесів, що виникають при пуску, зупинці та зміні навантаження у електроприводах з асинхронними двигунами. Доведено актуальність необхідності проведення таких досліджень для приводів з потужними асинхронними двигунами, які підключені до одного джерела енергії і запускаються або вимикаються одночасно. Отримана інформація дозволить обслуговуючому персоналу та наявним засобам автоматизації і телекомунікації приймати вірні та своєчасні рішення для ефективного керування роботою електроприводів.

У роботі складено математичну модель для аналізу режимів групової роботи асинхронних двигунів при живленні від загального джерела з метою визначення параметрів такої роботи. При створенні моделі у якості вихідних параметрів були обрані напруга джерела живлення та параметри і конструктивні особливості асинхронних двигунів. Розроблена математична модель містить систему диференціальних рівнянь для аналізу групової роботи асинхронних двигунів і демонструє можливості розвитку теорії групової роботи асинхронних двигунів. У якості допоміжного математичного прийому для запису фізичних властивостей асинхронних двигунів було застосовано поняття зворотної підматриці, а при складанні диференціальних рівнянь була врахована несиметричність напруги у вузлах навантаження.

Розроблена математична модель дозволяє визначити засади діагностування роботи груп асинхронних двигунів, підключених до загального джерела, завдяки реєстрації пульсації струмів, що виникають у живлячій мережі та зміні спожитої потужності і таким чином опосередковано підвищити надійність роботи асинхронних електродвигунів у електроприводах технологічних механізмів при різних режимах навантаження.

Асинхронний двигун, групова робота, джерело енергії, магнітне поле, напруга, струм, симетрія, самозапуск, перехідні процеси, стаціонарні процеси, статорна обмотка, роторна обмотка, електромагнітний обертальний момент.

Асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором досить широко використовуються у приводах технологічного обладнання і часто підключаються до мережі групами.

Групове ввімкнення асинхронних двигунів може викликати стрибки напруги та струму у мережі, що можуть сягати значень короткого замикання. Ці ситуації можуть викликати аварійні або близькі до аварійних стани, порушення технологічних процесів та вихід з ладу технологічного обладнання.

Дослідженням, пов'язаним груповою роботою асинхронних двигунів присвячена робота таких відомих учених: Сивокобиленко В.Ф., Костенко М.П., Дмитрієв В.Н., Письменний В.Я. та інших [1-4].

Пошук ефективних режимів роботи асинхронних двигунів вимагає від дослідників здійснювати аналіз перехідних процесів, що виникають при пуску, зупинці та зміні навантаження у електроприводах з асинхронними двигунами. Це стає ще більш актуальним при дослідженнях режимів роботи приводів з потужними асинхронними двигунами, особливо, коли до одного джерела енергії підключені кілька потужних двигунів, що запускаються (вимикаються) одночасно. Особливим питанням постає необхідність дослідження особливостей при вибігу групи асинхронних двигунів при аварійному відключенні живлення, оскільки цей процес може супроводжуватися обміном виробленою енергією та виникаючим самозапуском [5].

Визначення параметрів роботи групи асинхронних двигунів є досить актуальною задачею, для її правильної постановки та розв'язання необхідно проводити досить глибокі теоретичні дослідження. Проблеми, що можуть постати на шляху вирішення цього містяться у малій кількості інформації відносно діагностичних параметрів роботи. Їх подолання можливо за рахунок створення повноцінного зворотного зв'язку між дослідниками, виробниками та експлуатаційниками.

Гарним методом дослідження у даному випадку може стати математична модель, особливістю якого є те, що результати моделювання отримуємо у вигляді числових значень для конкретних умов роботи та можливості будови та розвитку теорії групової роботи асинхронних двигунів, що живляться від загального джерела енергії. Математична модель представляє собою систему рівнянь, які повністю описують структуру та режимні

параметри досліджуваної схеми і дозволяє узгоджувати нелінійність відповідних елементів системи [5].

Вимоги сьогодення полягають у необхідності розробки математичних моделей та комп'ютерних програм із застосуванням ефективних алгоритмів, що забезпечують задану швидкість та надійну сходимость розрахунків, високу гнучкість та універсальність застосування. Це означає розв'язання задач з розробки нових методів розрахунку режимів групової роботи асинхронних двигунів при живленні від загального джерела енергії – проведення розрахунків перехідних та сталих режимів роботи, як таких, що здійснюються частіше за інші.

Опанування заданих цілей дозволяє отримати обслуговуючому персоналу своєчасну та достовірну інформацію про поточний стан електроприводів з метою контролю їх стану та визначення необхідності регулювання та здійснення різноманітних операцій керування з метою підвищення надійності роботи.

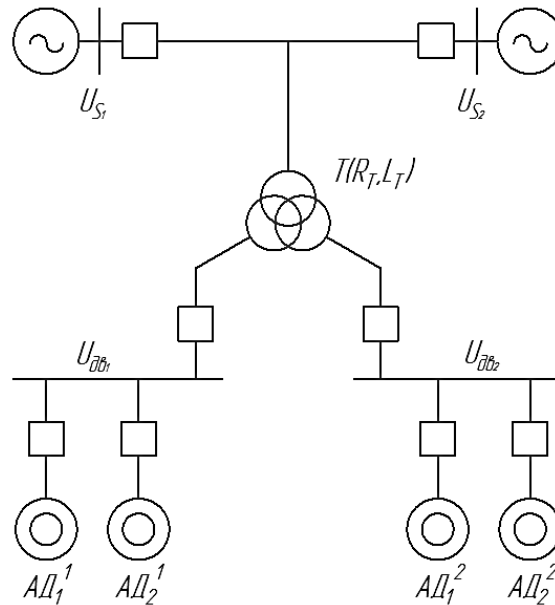


Рисунок 1 – Схема живлення груп асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором

Напруги джерела живлення у разі симетричної системи мають вигляд [4]:

$$\begin{cases} U_a = U_m \cos(\omega t + 0) \\ U_b = U_m \cos(\omega t - 120^\circ) \\ U_c = U_m \cos(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

Напруги у вузлах навантаження будемо вважати несиметричними та такими, що складаються з напруг прямої та зворотної послідовності:

$$\begin{cases} U_{\Delta a} = U_{\Delta m a} \cos(\omega t + \varphi_a) \\ U_{\Delta b} = U_{\Delta m b} \cos(\omega t + \varphi_b) \\ U_{\Delta c} = U_{\Delta m c} \cos(\omega t + \varphi_c) \end{cases} \quad (2)$$

де $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ – початкові фази відповідної напруги.

при цьому вважаємо, що

$$U_{\Delta a} \neq U_{\Delta b} \neq U_{\Delta c}, U_{\Delta a} + U_{\Delta b} + U_{\Delta c} = 0 \quad (3)$$

З огляду на це, напруги на шинах живлячого трансформатора складуть:

$$\begin{cases} U_{\Delta a} = U_a - L_{\text{тр.}a} \sum_{j=1}^n p i_{\Delta a}^j - R_{\text{тр.}a} \sum_{j=1}^n i_{\Delta a}^j \\ U_{\Delta b} = U_b - L_{\text{тр.}b} \sum_{j=1}^n p i_{\Delta b}^j - R_{\text{тр.}b} \sum_{j=1}^n i_{\Delta b}^j \\ U_{\Delta c} = U_c - L_{\text{тр.}c} \sum_{j=1}^n p i_{\Delta c}^j - R_{\text{тр.}c} \sum_{j=1}^n i_{\Delta c}^j \end{cases} \quad (4)$$

де $L_{\text{тр.}i}$ – індуктивний опір лінії електропередачі та живлячого трансформатора,

$R_{\text{тр.}i}$ – активний опір лінії електропередачі та живлячого трансформатора,

n – кількість електродвигунів, що підключено до живлячої мережі.

p – число пар полюсів,

$i_{\Delta i}^j$ – струм у відповідній фазі живлячої мережі,

Якщо прийняти, що до мережі підключено асинхронні двигуни одного типорозміру, ротор кожного з яких має m короткозамкнених стрижнів у роторі, то диференціальні рівняння фаз для статорних і роторних обмоток цих двигунів набудуть вигляду:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} p i_{sa} \\ p i_{sb} \\ p i_{sc} \\ p i_{r1}^m \\ p i_{r2}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s^{-1} & L_{s-r1}^{-1} & L_{s-r2}^{-1} \\ L_{r1-s}^{-1} & L_{r1}^{-1} & L_{r1-r2}^{-1} \\ L_{r2-s}^{-1} & L_{r2-r1}^{-1} & L_{r2}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\Delta a} \\ U_{\Delta b} \\ U_{\Delta c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_s^{-1} & L_{s-r1}^{-1} & L_{s-r2}^{-1} \\ L_{r1-s}^{-1} & L_{r1}^{-1} & L_{r1-r2}^{-1} \\ L_{r2-s}^{-1} & L_{r2-r1}^{-1} & L_{r2}^{-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_{sa} \\ R_{sb} \\ R_{sc} \\ R_{r1}^m \\ R_{r2}^m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{r1}^m \\ i_{r2}^m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega \\ \omega \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \\ i_{r1}^m \\ i_{r2}^m \end{bmatrix} \\ p\omega = \frac{1}{J} (M_e - M_o) \end{cases} \quad (5)$$

де i_{si} – струми обмоток статора,

$i_{ri}^{(m)}$ – струми у контурах обмоток ротора,

L_s^{-1} – зворотна підматриця власної індуктивності обмотки статора:

$$L_s^{-1} = \begin{bmatrix} k_s & l_s & l_s \\ l_s & k_s & l_s \\ l_s & l_s & k_s \end{bmatrix} \quad (6)$$

L_{ri}^{-1} – зворотна підматриця власної індуктивності обмоток контурів ротора,

L_{s-ri}^{-1} – зворотна підматриця взаємної індуктивності між обмотками статора і обмотками контурів ротора,

$L_{r(i\pm 1)-r(i\mp 1)}^{-1}$ – зворотна підматриця взаємної індуктивності між обмотками контурів ротора,

R_{si} – активні складові опорів фаз статора,

$R_{ri}^{(m)}$ – активні складові опорів фаз контурів ротора,

ω – кутова швидкість обертання ротора,

M_e – електромагнітний обертальний момент [4]:

$$M_e = \frac{3}{2} \bar{\psi}_s \times \bar{i}_s \quad (6)$$

M_o – момент опору на роторі двигуна,

J – сумарний момент інерції приводу,

$\bar{\psi}_s$ – потокозчеплення,

$\bar{i}_s$ – вектор струму обмотки статора.

На основі отриманих диференціальних рівнянь (5) можна досліджувати режими роботи груп асинхронних двигунів, підключених до загального джерела, у електроприводах технологічних механізмів при різноманітних режимах навантаження.

Крім того, розроблена математична модель дозволяє розробити засади діагностування роботи груп асинхронних двигунів, підключених до загального джерела, завдяки реєстрації пульсацій струмів, що виникають у живлячій мережі та зміні спожитої потужності.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.
2. Соколов М.М. Электромагнитные переходные процессы в асинхронном электроприводе. – М.: Энергия, 1977 г.
3. Сивокобыленко В.Ф., Нехме Х.А. Модифицированный метод численного интегрирования уравнений Парка-Горева. Известия АН СССР. Энергетика и транспорт, 1981 г. №6, с. 53–60.
4. Сивокобыленко В.Ф., Гармаш В.С. Математическая модель глубоководной асинхронной машины для исследования переходных процессов. – Донецк, 1980 г. – 48 с.
5. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, 1980. – 256 с.

REFERENCES

1. Syromyatnikov I.A. Operating modes of asynchronous and synchronous motors. - M.: Energoatomizdat, 1984. – 240 p.
2. Sokolov M.M. Electromagnetic transients in an asynchronous electric drive. – M.: Energy, 1977.
3. Sivokobylenko V.F., Nekhme H.A. Modified method for the numerical integration of Park-Gorev equations. Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Energy and Transport, 1981, No. 6, p. 53-60.
4. Sivokobylenko V.F., Garmash V.S. A mathematical model of a deep-groove asynchronous machine for the study of transients. - Donetsk, 1980 - 48 p.
5. Vazhnov A. I. Transient processes in AC machines. - L.: Energy, 1980. – 256 p.

Надійшла до редколегії 16.01.2020

Рецензент: д.т.н. Нікіфоров А.П

E. NIEMTSEV

State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University»

Mathematical model for the analysis of group modes of induction motors when fed from a common source. The article analyzes the operating modes and transients that occur when starting, stopping and changing the load in electric drives with induction motors. The relevance of the need for such studies for drives with powerful asynchronous motors that are connected to the same energy source and start or stop at the same time is proved. The information obtained will allow maintenance personnel and the available automation and telecommunications facilities to make the right and timely decisions for the effective management of electric drives.

A mathematical model has been compiled for analyzing the modes of group operation of asynchronous motors powered by a common source in order to determine the parameters of such work. When creating the model, the voltage of the power source, as well as the parameters and design features of induction motors, were chosen as the initial parameters. The developed mathematical model contains a system of differential equations for the analysis of group operation of induction motors and demonstrates the possibilities of developing the theory of group operation of asynchronous motors. As an auxiliary mathematical technique for recording the physical properties of asynchronous motors, the concept of the inverse submatrix was used, and when composing differential equations, the asymmetry of the voltage at the load nodes was taken into account.

The developed mathematical model makes it possible to determine the principles for diagnosing the operation of groups of induction motors connected to a common source by registering current ripples arising in the supply network and changing the consumed power and thus indirectly increase the reliability of asynchronous motors in electric drives of technological mechanisms under various load conditions.

Keywords: *Asynchronous motor, group work, energy source, magnetic field, voltage, current, symmetry, self-start, transients, stationary processes, stator winding, rotor winding, electromagnetic torque.*