

УДК 621.311.001.57

В.Ф. СИВОКОБИЛЕНКО (д-р техн. наук, проф.), **С.В. ВАСИЛЕЦЬ** (канд. техн. наук)

Державний вищий навчальний заклад
«Донецький національний технічний університет»
svf@elf.dgtu.donetsk.ua

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ШАХТИ З ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ЧАСТОТИ

Розроблено математичну модель електротехнічного комплексу шахти за наявності перетворювачів частоти з використанням метода змінних стану у вигляді жорсткого матричного диференційного рівняння, причому комутації напівпровідникових ключів моделюються дискретною зміною опорів останніх, що супроводжується перерахунком матричних коефіцієнтів диференційного рівняння стану системи. Модель реалізована у вигляді прикладної комп'ютерної програми MinePowerNet.

Ключові слова: моделювання, перетворювач частоти, електротехнічний комплекс, шахта, диференційне рівняння, схема заміщення, матриця, чисельне розв'язання, вектор, програма

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. На сьогоднішній день спостерігається тенденція впровадження частотно-керованого асинхронного електропривода шахтних машин та механізмів. Відомо про розробку частотно-керованого електропривода шахтного підйому виробництва НПФ «МІДІЕЛ», вибухозахисного перетворювача частоти (ПЧ) типу ПЧВ-250 У5 для підземних підйомних машин (УкрНДІВЕ), вибухозахисного ПЧ типу ПЧВ-К У5 для підземних стрічкових конвеєрів (УкрНДІВЕ), частотно-керованих електроприводів систем подачі очисних комбайнів типів УКД-300, КДК-500, КДК-700 [1] та ін. Використання ПЧ дозволяє підвищити техніко-економічні показники функціонування гірничого обладнання, збільшити напруження на відмову елементів машин, раціонально використовувати електроенергію. Проте, через особливості експлуатації вугледобувної техніки в підземних умовах, на етапі проектування схеми електропостачання з ПЧ необхідно проаналізувати функціонування останнього у можливих аварійних режимах (заклинювання робочих органів, перекидання двигунів, короткі замикання, замикання на землю і т.і.) для забезпечення виконання вимог Правил безпеки до шахтних електротехнічних комплексів (ЕТК). Це обумовлює актуальність розробки математичної моделі ЕТК шахти з урахуванням наявності перетворювачів частоти та відповідного прикладного програмного забезпечення, яке може бути використано при проектуванні шахтних електромереж.

Відомі дослідження та публікації. Для дослідження системи «ПЧ - асинхронний двигун» може бути використаний метод огинаючих (метод першої гармоніки), який передбачає запис рівнянь в системі ортогональних осей, що обертаються синхронно зі швидкістю результуючого вектора напруги статора [2]. Проте такий метод придатний лише в обмеженій області частот для автономного інвертора напруги. Модель силової частини електропривода змінного струму, що живиться від ПЧ, може бути описана змішаною нелінійною системою рівнянь, що включає диференціальні та алгебраїчні рівняння, яка враховує насичення магнітного кола асинхронного двигуна (АД), дискретність роботи напівпровідникових елементів та інші фактори [3]. Залежність індуктивності намагнічування АД від струму намагнічування може бути описана однією з відомих залежностей: поліноміальном четвертого порядку [4]; поліном десятого порядку за парними степенями; відношенням квадратичних поліномів; зворотньо-експоненціальною залежністю [5] та ін.

Постановка задачі. Удосконалення математичної моделі електротехнічного комплексу шахти шляхом врахування наявності напівпровідникових перетворювачів частоти.

Основний матеріал та результати досліджень. Розглянемо фрагмент ЕТК дільниці шахти, який включає трансформаторну підстанцію УТП1, що живить перетворювач частоти ПП1, виконаний за схемою «керований випрямляч – емнісний фільтр – автономний інвертор напруги», до якого кабелем К1 підключено двигун М1 з короткозамкненим ротором (рис. 1). Схема заміщення УТП1 складається зі схеми заміщення 1 вторинної обмотки трансформатора, опорів R_{QFx} ($x=A, B, C$ – позначення фази) фаз автоматичного вимикача 2 та міжфазних опорів 3 ізоляції. До складу ПП1 входять: опори $R_{V51}-R_{V56}$ пліч трифазного керованого випрямляча 4, активно-емнісний опір фільтра 5, опори R_{1x}, R_{2x} пліч автономного інвертора 6 та міжфазні вихідні опори ізоляції 7. Схема заміщення К1 включає активно-індуктивні опори R_{kx}, L_{kx} жил кабелів 8 та міжфазні опори ізоляції 9. Двигун М1 подається на схемі заміщення трьома джерелами струму I_{yx} (блок 10), для яких враховані внутрішні опори R_{yx} . Дерево графа для схеми заміщення (рис. 1) складається з 24 ребер (гілки b_1-b_{24} , виділені на рис. 1), які з'єднують всі 25 вузлів графа, та 26 хорд ($b_{25}-b_{50}$).

Як показано у [6], диференційне рівняння стану RLC -кола (рис. 1) може бути подано у матричному виді:

$$d\bar{X}/dt = \bar{A}_1 \cdot \bar{X} + \bar{A}_2 \cdot \bar{X}_{ни} + \bar{A}_3 \cdot \bar{X}_{yu}, \quad (1)$$

де \bar{X} , $\bar{X}_{ни}$, \bar{X}_{yu} – вектори змінних стану, незалежних джерел та керованих джерел відповідно; \bar{A}_1 , \bar{A}_2 , \bar{A}_3 –

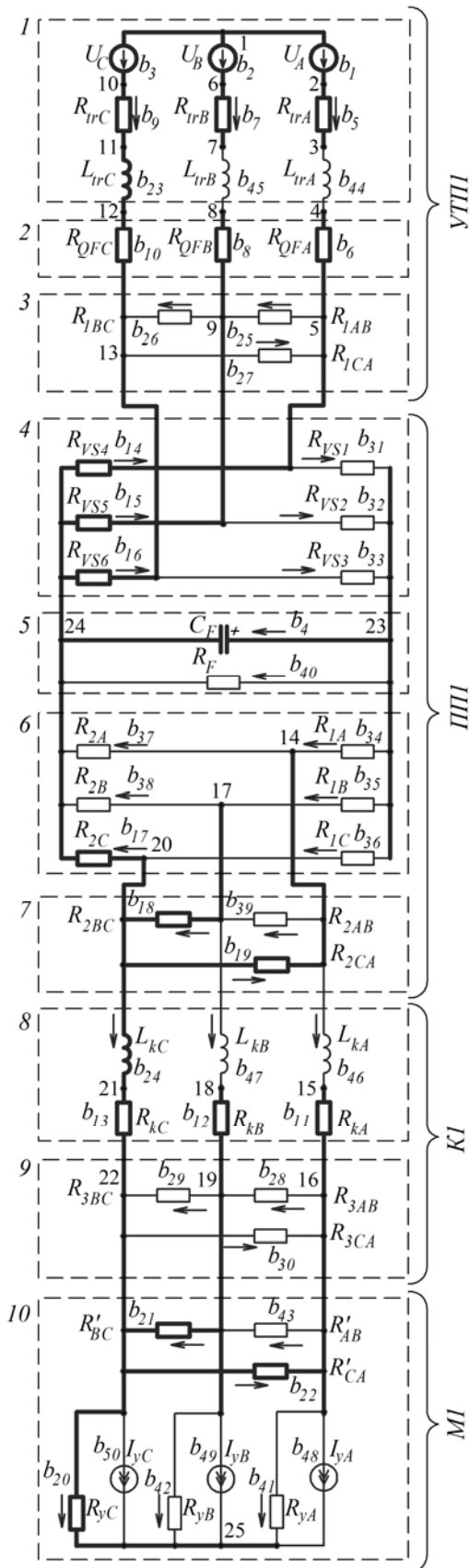


Рисунок 1 - Схема заміщення фрагмента, що розглядається, ЕТК дільниці шахти

матричні коефіцієнти, що залежать від матриць значень параметрів R, L, C – елементів та матриці головних перетинів дерева графа для схема заміщення мережі.

Функціонування силових тиристорних ключів випрямляча 4 моделюється згідно алгоритму, блок-схема якого наведена на рис. 2, де t_{opi} позначає час наступного відкриття i -го тиристора (при $t_{opi}=0$ такий час не вказаний), α – кут відкриття тиристорів. Приймається припущення про миттєве перемикання тиристора з одного стану в інший, що супроводжується дискретною зміною відповідного опору R_{VS_i} (від $R_{off}=1$ МОм у закритому стані до $R_{on}=1$ мОм у відкритому стані) та перерахунком матричних коефіцієнтів рівняння (1). Робота автономного інвертора напруги b (рис. 1) підпорядкована базовому закону комутації [3], який передбачає жорстке чергування станів I-VI ключів інвертора в функції часу: I – відкриті ключі 1A, 2B, 1C; II – 1A, 2B, 2C; III – 1A, 1B, 2C; IV – 2A, 1B, 2C; V – 2A, 1B, 1C; VI – 2A, 2B, 1C. При комутації кожного ключа його опір дискретно змінюється від R_{off} у закритому стані до R_{on} у відкритому стані, що вимагає перерахунку матричних коефіцієнтів $\bar{A}_1 - \bar{A}_3$.

У [6] показано, що диференціальне рівняння стану симетричного АД може бути подано у вигляді:

$$d\bar{I}_{abc}/dt = \bar{F} \cdot \bar{I}_{abc} + \bar{G} \cdot \bar{S} + \bar{H} \cdot \bar{U}_{abc}, \quad (2)$$

де $\bar{I}_{abc} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ | \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc} \ | \ \omega]^T$ – вектор фазних струмів статора і ротора двигуна та частоти обертання ротора;

$\bar{U}_{AD} = [u'_{AB} \ u'_{BC} \ u'_{CA}]^T$ – вектор лінійних напруг на статорі;

$\bar{S} = [s_1 \ s_2 \ s_3]^T$ – вектор-функція від елементів \bar{I}_{abc} , причому: $s_1 = -\omega / \sqrt{3} [L_m(i_{sb} - i_{sc}) + L_r(i_{rb} - i_{rc})]$; $s_2 = \omega(L_m i_{sa} + L_r i_{ra})$; $s_3 = \frac{\sqrt{3} L_m}{2J} [i_{ra}(i_{sb} - i_{sc}) - i_{sa}(i_{rb} - i_{rc})] - \frac{M_c(\omega)}{J}$; \bar{F} ,

\bar{G} , \bar{H} – матричні коефіцієнти, які дорівнюють:

$$\bar{F} = \begin{bmatrix} -2b_1 & 0 & 0 & 2b_2 & 0 & 0 & 0 \\ b_1 & -b_1 & b_1 & -b_2 & b_2 & -b_2 & 0 \\ b_1 & b_1 & -b_1 & -b_2 & -b_2 & b_2 & 0 \\ 2b_3 & 0 & 0 & -2b_4 & 0 & 0 & 0 \\ -b_3 & b_3 & -b_3 & b_4 & -b_4 & b_4 & 0 \\ -b_3 & -b_3 & b_3 & b_4 & b_4 & -b_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\bar{G} = \begin{bmatrix} -2b_6 & 0 & 0 \\ b_6 & -\sqrt{3}b_6 & 0 \\ b_6 & \sqrt{3}b_6 & 0 \\ 2b_7 & 0 & 0 \\ -b_7 & \sqrt{3}b_7 & 0 \\ -b_7 & -\sqrt{3}b_7 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \bar{H} = \begin{bmatrix} \frac{4}{3}b_5 & \frac{2}{3}b_5 & 0 \\ -\frac{2}{3}b_5 & \frac{2}{3}b_5 & 0 \\ -\frac{2}{3}b_5 & -\frac{4}{3}b_5 & 0 \\ -\frac{4}{3}b_6 & -\frac{2}{3}b_6 & 0 \\ \frac{2}{3}b_6 & -\frac{2}{3}b_6 & 0 \\ \frac{2}{3}b_6 & \frac{4}{3}b_6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

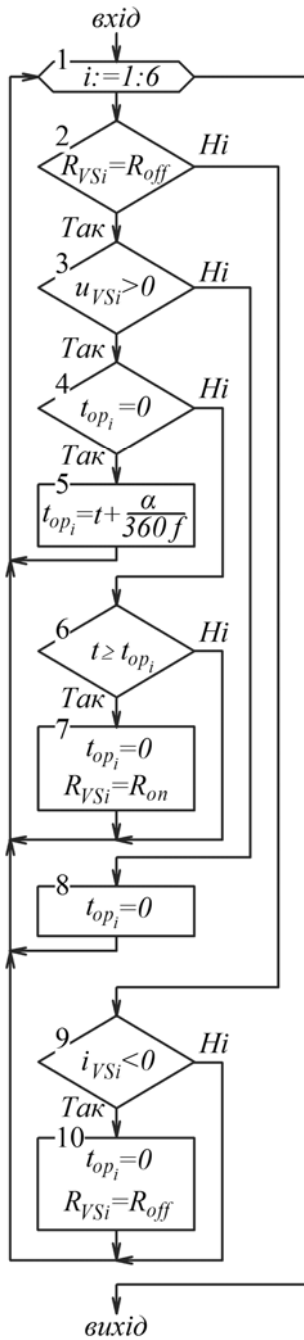


Рисунок 2 - Блок-схема алгоритму функціонування трифазного тиристорного випрямляча

причому $b_1 = R_s L_r k_{sr}$; $b_2 = R_r L_m k_{sr}$; $b_3 = R_s L_m k_{sr}$; $b_4 = R_r L_s k_{sr}$; $b_5 = L_r k_{sr}$; $b_6 = L_m k_{sr}$; $b_7 = L_s k_{sr}$; $k_{sr} = 0,5 / (L_s L_r - L_m^2)$; $L_s = L_{sl} + L_m$; $L_r = L_{rl} + L_m$.

Насичення АД врахуємо поліноміальною залежністю статичної індуктивності намагнічування L_m від модуля $|\bar{i}_m|$ вектора струму намагнічування:

$$L_m = L_m(|\bar{i}_m|) = a_4(|\bar{i}_m|)^4 + a_3(|\bar{i}_m|)^3 + a_2(|\bar{i}_m|)^2 + a_1|\bar{i}_m| + a_0, \quad (4)$$

де $a_0 - a_4$ - коефіцієнти полінома.

У загальному випадку за наявності в системі n двигунів рівняння їх стану є лінійною комбінацією диференціальних рівнянь (2):

$$d\bar{I}_{2l}/dt = \bar{F}_{2l} \cdot \bar{I}_{2l} + \bar{G}_{2l} \cdot \bar{S}_{2l} + \bar{H}_{2l} \cdot \bar{U}_{2l}, \quad (5)$$

де $\bar{I}_{2l} = [\bar{I}_{abc_1} \dots \bar{I}_{abc_n}]^T$ - вектор змінних стану n двигунів;

$\bar{S}_{2l} = [\bar{S}_1 \dots \bar{S}_n]^T$; $\bar{U}_{2l} = [\bar{U}_{abc_1} \dots \bar{U}_{abc_n}]^T$; \bar{F}_{2l} , \bar{G}_{2l} , \bar{H}_{2l} - матричні коефіцієнти, які дорівнюють:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{2l} &= \text{diag}\{\bar{F}_1 \dots \bar{F}_n\}; \\ \bar{G}_{2l} &= \text{diag}\{\bar{G}_1 \dots \bar{G}_n\}; \\ \bar{H}_{2l} &= \text{diag}\{\bar{H}_1 \dots \bar{H}_n\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Враховавши матриці підключення АД за струмом \bar{G}_{11} та напругою \bar{G}_{12} [6] з (5) маємо:

$$d\bar{I}_{2l}/dt = \bar{G}_{19} \cdot \bar{X} + \bar{G}_{23} \cdot \bar{I}_{2l} + \bar{G}_{2l} \cdot \bar{S}_{2l} + \bar{G}_{20} \cdot \bar{X}_{nu}, \quad (7)$$

де $\bar{G}_{19} = \bar{H}_{2l} \cdot \bar{G}_{12} \cdot \bar{R} \cdot \bar{B}_1$; $\bar{G}_{23} = \bar{F}_{2l} + \bar{H}_{2l} \cdot \bar{G}_{12} \cdot \bar{R} \cdot \bar{B}_3 \cdot \bar{G}_{11}$; $\bar{G}_{20} = \bar{H}_{2l} \cdot \bar{G}_{12} \times \bar{R} \cdot \bar{B}_2$; $\bar{B}_1 - \bar{B}_3$ - матриці, що визначаються матрицями головних перетинів та опорів активних ребер та хорд [6].

RLC -система та АД описуються матричними диференціальними рівняннями:

$$\begin{cases} d\bar{X}/dt = \bar{A}_1 \cdot \bar{X} + \bar{A}_2 \cdot \bar{X}_{nu} + \bar{G}_{24} \cdot \bar{I}_{2l} = \bar{Y}_1; \\ d\bar{I}_{2l}/dt = \bar{G}_{19} \cdot \bar{X} + \bar{G}_{23} \cdot \bar{I}_{2l} + \bar{G}_{2l} \cdot \bar{S}_{2l} + \bar{G}_{20} \cdot \bar{X}_{nu} = \bar{Y}_2, \end{cases} \quad (8)$$

де $\bar{G}_{24} = \bar{A}_3 \cdot \bar{G}_{11}$.

Об'єднуючи рівняння (8) в єдине рівняння стану системи, маємо:

$$d\bar{X}_{2l}/dt = \bar{L}_1 \cdot \bar{X}_{2l} + \bar{L}_2 \cdot \bar{S}_{2l} + \bar{L}_3 \cdot \bar{X}_{nu} = f(\bar{X}_{2l}, t), \quad (9)$$

де $\bar{X}_{2l} = [\bar{X} \ \bar{I}_{2l}]^T$ - вектор змінних стану RLC -системи та двигунів;

$\bar{L}_1 = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{G}_{24} \\ \bar{G}_{19} & \bar{G}_{23} \end{bmatrix}$, $\bar{L}_2 = \begin{bmatrix} \bar{0} \\ \bar{G}_{2l} \end{bmatrix}$, $\bar{L}_3 = \begin{bmatrix} \bar{A}_2 \\ \bar{G}_{20} \end{bmatrix}$ - матричні коефіцієнти.

Матричне диференціальне рівняння (9) в загальному випадку є жорстким, для його чисельного розв'язання можна скористатися жорстко-стійким багатозначним методом Гіра-Нордсіка [7], що передбачає обчислення на кожному кроці для кожної змінної стану вектора похідних, кількість яких визначається порядком метода. Початкове наближення вектора Нордсіка на наступному кроці для кожної змінної стану визначається канонічним рівнянням прогноза, а подальші - канонічним рівнянням корекції, яке включає визначення скалярна функція корекції, що залежить від матриці Якобі для правої частини рівняння (9). Виразення останньої в аналітичній формі є найбільш складною задачею при чисельному розв'язанні (9).

Матриця Якобі від правої частини рівняння (9) дорівнює:

$$\bar{J}_f = \frac{\partial f(\bar{X}_{2l}, t)}{\partial \bar{X}_{2l}} = \begin{bmatrix} \partial \bar{Y}_1 / \partial \bar{X} & \partial \bar{Y}_1 / \partial \bar{I}_{2l} \\ \partial \bar{Y}_2 / \partial \bar{X} & \partial \bar{Y}_2 / \partial \bar{I}_{2l} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{G}_{24} + \bar{G}_{28} \\ \bar{G}_{19} & \bar{G}_{23} + \bar{G}_{25} + \bar{G}_{26} + \bar{G}_{27} \end{bmatrix}, \quad (10)$$

де $\bar{G}_{25} = \bar{G}_{2l} \cdot \partial \bar{S}_{2l} / \partial \bar{I}_{2l}$; $\bar{G}_{26} = \partial \bar{F}_{2l} / \partial \bar{I}_{2l} \cdot \bar{I}_{2l} + \partial \bar{G}_{2l} / \partial \bar{I}_{2l} \cdot \bar{S}_{2l} + \partial \bar{H}_{2l} / \partial \bar{I}_{2l} \cdot \bar{U}_{2l}$; $\bar{G}_{27} = \bar{H}_{2l} \cdot \partial \bar{G}_{12} / \partial \bar{I}_{2l} \times \bar{U}_{pez} + \bar{H}_{2l} \cdot \bar{G}_{12} \cdot \bar{R} \cdot \bar{B}_3 \cdot \partial \bar{G}_{11} / \partial \bar{I}_{2l} \cdot \bar{I}_{2l}$; $\bar{G}_{28} = \bar{A}_3 \cdot \partial \bar{G}_{11} / \partial \bar{I}_{2l} \cdot \bar{I}_{2l}$.

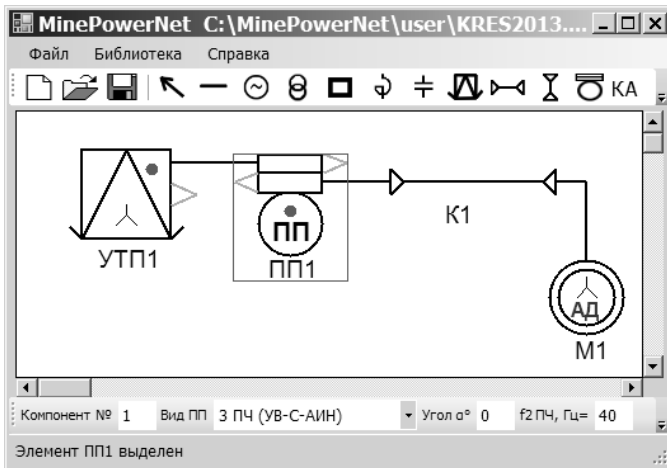


Рисунок 3 - Головне вікно програми MinePowerNet зі структурною схемою фрагмента, що розглядається, ЕТК дільниці шахти

змінними стану іншого двигуна є нульовими, з (11) маємо:

$$\bar{G}_{(j)} = \left[\bar{0} \mid \frac{\partial \bar{F}_k}{\partial i_j} \cdot \bar{I}_{abc_k} + \frac{\partial \bar{G}_k}{\partial i_j} \cdot \bar{S}_k + \frac{\partial \bar{H}_k}{\partial i_j} \cdot \bar{U}_{abc_k} \mid \bar{0} \right]^T, \quad (12)$$

де $k = \bar{1}, \bar{n}$ - номер АД, причому $k = \lceil j/7 \rceil$.

Порівнюючи матрицю Якобі (10) з матричним коефіцієнтом \bar{L}_1 можна відзначити, що для обчислення \bar{J}_f необхідно до \bar{L}_1 додати матриці $\bar{G}_{25} - \bar{G}_{28}$, які розраховуються додатково. Зокрема, розрахуємо матрицю \bar{G}_{26} , для чого позначимо її j -й стовпчик як $\bar{G}_{(j)}$, де $j = \bar{1}, \bar{7n}$, тоді $\bar{G}_{26} = [\bar{G}_{(1)}, \dots, \bar{G}_{(7n)}]$. Позначимо j -й елемент вектора змінних стану двигунів \bar{I}_{2l} як i_j , тобто $\bar{I}_{2l} = [i_1, \dots, i_{7n}]^T$, тоді:

$$\bar{G}_{(j)} = \frac{\partial \bar{F}_{2l}}{\partial i_j} \cdot \bar{I}_{2l} + \frac{\partial \bar{G}_{2l}}{\partial i_j} \cdot \bar{S}_{2l} + \frac{\partial \bar{H}_{2l}}{\partial i_j} \cdot \bar{U}_{2l}. \quad (11)$$

Враховуючи (6) та оскільки частинні похідні від матриць \bar{F} , \bar{G} , \bar{H} для одного двигуна за

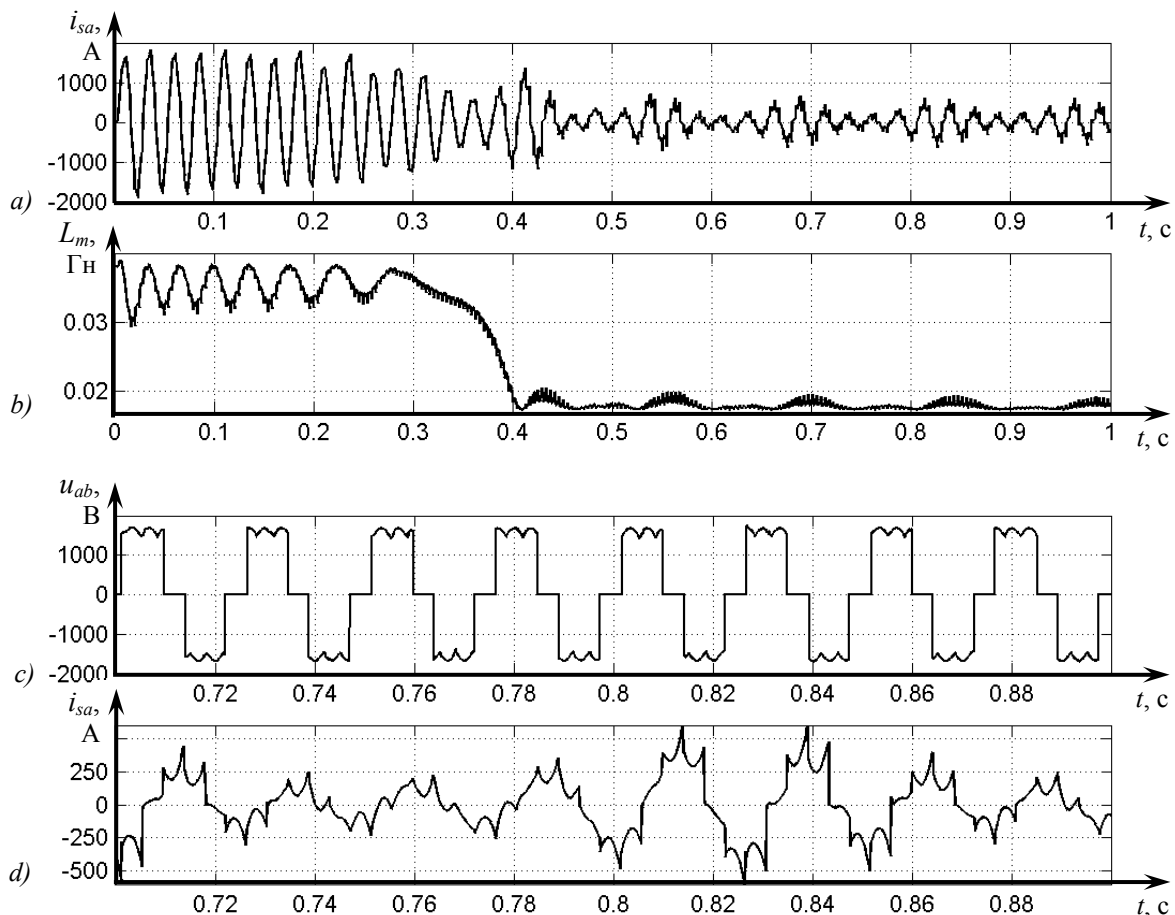


Рисунок 4 - Графіки, отримані в результаті моделювання: а – струм фази А статора двигуна; б – індуктивність намагнічування двигуна; с – фрагмент графіка лінійної напруги на виході перетворювача частоти; д – фрагмент струму фази А статора двигуна

Віднайдення частинних похідних $\frac{\partial \bar{F}_k}{\partial i_j}$, $\frac{\partial \bar{G}_k}{\partial i_j}$, $\frac{\partial \bar{H}_k}{\partial i_j}$ за змінними стану зводиться до визначення частинних похідних від $b_1 - b_7$:

$$\begin{aligned} \partial b_1 / \partial i_j &= R_s (\partial L_m / \partial i_j \cdot k_{sr} + L_m \partial k_{sr} / \partial i_j); & \partial b_2 / \partial i_j &= R_r (\partial L_m / \partial i_j \cdot k_{sr} + L_m \partial k_{sr} / \partial i_j); \\ \partial b_3 / \partial i_j &= R_s (\partial L_m / \partial i_j \cdot k_{sr} + L_m \partial k_{sr} / \partial i_j); & \partial b_4 / \partial i_j &= R_r [\partial L_m / \partial i_j \cdot k_{sr} + (L_m + L_{sl}) \partial k_{sr} / \partial i_j]; \\ \partial b_5 / \partial i_j &= \partial L_m / \partial i_j \cdot k_{sr} + (L_m + L_{rl}) \partial k_{sr} / \partial i_j; & \partial b_6 / \partial i_j &= \partial L_m / \partial i_j \cdot k_{sr} + L_m \partial k_{sr} / \partial i_j; \\ \partial b_7 / \partial i_j &= \partial L_m / \partial i_j \cdot k_{sr} + (L_m + L_{sl}) \partial k_{sr} / \partial i_j, \end{aligned} \quad (13)$$

причому $\partial k_{sr} / \partial i_j = -2k_{sr}^2 (L_{rl} + L_{sl}) \partial L_m / \partial i_j$; $\partial L_m / \partial i_j = \partial |\bar{i}_m| / \partial i_j [4a_4 (\bar{i}_m)^3 + 3a_3 (\bar{i}_m)^2 + 2a_2 \bar{i}_m + a_1]$.

Залежності (1)-(9) та алгоритми зміни опорів напівпровідникових ключів випрямляча та ПЧ є математичною моделлю електротехнічного комплексу шахти за наявності довільної кількості частотно-керованих асинхронних двигунів. Вказані залежності реалізовані у вигляді прикладної комп'ютерної програми MinePowerNet, в якій при чисельному розв'язанні матричного диференційного рівняння стану системи використовуються залежності (10)-(13). За допомогою програми (рис. 3) проведено розрахунок перехідного процесу пуску двигуна для фрагмента ЕТК дільниці шахти (рис. 1) за наступних параметрів елементів системи: УТП1 - типу КТПВ-1000/6-1,2; К1 - КГЭШ 3х35 довжиною 20 м; М1 - ЭДКОФВ315LA4 (схема Y, 200 кВт); кут відкриття тиристорів керованого випрямляча у складі ПЧ $\alpha = 0^\circ$; ємність фільтра ПЧ $C_F = 0,01$ мкФ; вихідна частота ПЧ 40 Гц. Інтегрування диференційного рівняння (9) здійснювалося методом Гіра-Нордсіка 2-го порядку зі змінним кроком, величина якого не перевищувала $1 \cdot 10^{-5}$ с, припустима похибка метода нерухої точки становила 0,01%. В результаті моделювання отримані, зокрема, графіки струму статора та індуктивності намагнічування двигуна, напруги на виході перетворювача частоти (рис. 4).

Висновки та напрямок подальших досліджень. Удосконалено математичну модель електротехнічного комплексу шахти за рахунок врахування наявності перетворювачів частоти, причому комутації напівпровідникових ключів враховано дискретною зміною активних опорів, що представляють вказані ключі у схемі заміщення мережі. З використанням матрично-топологічного метода складено матричне диференційне рівняння стану мережі, коефіцієнти якого перераховуються при комутаціях напівпровідникових силових ключів. Реалізація математичної моделі у вигляді прикладної комп'ютерної програми дозволила автоматизувати розрахунки та отримати програмний продукт, який може бути використаний при проектуванні шахтних електромереж. В ході подальших досліджень доцільно врахувати динамічне насичення асинхронних двигунів та розглянути режим широтно-імпульсної модуляції вихідної напруги ПЧ.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Новое поколение комплекса взрывозащищенного электрооборудования для систем электроснабжения горных производств / [Шкрабец Ф.П., Вареник Е.А., Савицкий В.Н., Дзюбан В.С.] // Научный вестник НГУ. – 2012. – №6. – С. 101-107.
2. Чорний О.П. Моделювання електромеханічних систем: підручник / [Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й. та ін.]. – Кременчук, 2001. – 410с.
3. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты / Р.Т. Шрейнер. - Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.
4. Okoro O.I. Dynamic and thermal modelling of induction machine with non-linear effects / O.I. Okoro. – Kassel: Kassel university press Gmbh., 2002. – 154p.
5. Ruff M. Identification of the saturated mutual inductance of an asynchronous motor at standstill by recursive least squares algorithm / M. Ruff, H. Grotstollen // Proceedings of EPE, 13-16 Sept. 1993, England. – 1993. – P. 103-108.
6. Сивокобиленко В.Ф. Математичне моделювання перехідних процесів у електромережі дільниці шахти у разі витоку струму на землю / В. Ф. Сивокобиленко, С. В. Василюк // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. - 2012. – №05(81). - С. 76-83.
7. Чуа Л.О. Машинный анализ электронных схем. Алгоритмы и вычислительные методы / Л.О. Чуа, Лин Пен-Мин; пер. с англ. - М.: Энергия, 1980. – 640с.

REFERENCES

1. Shkrabets F.P., Varenik Ye.A., Savitsky V.N., Dziuban V.S. New generation of explosion-proof electrical equipment complex for mining industry power supply systems. *Naukovyi visnyk NGU*. 2012; 6: 101-107.
2. Chorny O.P., Lugovoi A.V., Rodkin D.Y., Sysiuk G.Yu., Sadovoy O.V. *Modeliuvannia elektromekhanichnykh system* [Electromechanical system modelling]. Kremenchuk, 2001. 410 p.
3. Shreyner R.T. *Matematicheskoe modelirovanie elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateliami chastoty* [Mathematical modelling of AC electric drive with semi-conductor frequency converters]. Ekaterinburg: URO RAN, 2000. 654 p.
4. Okoro O.I. Dynamic and thermal modelling of induction machine with non-linear effects. Kassel: Kassel university press Gmbh, 2002. 154p.

5. Ruff M., Grotstollen H. Identification of the saturated mutual inductance of an asynchronous motor at standstill by recursive least squares algorithm. *Proceedings of EPE, 13-16 Sept. 1993, England*. 1993: 103-108.

6. Sivokobylenko V.F., Vasylets S.V. Mathematical modelling of transients in mine section power network in case of ground current leakage. *Electrotekhnichni ta kompiuterni systemy*. 2012; 05(81): 76-83.

7. Chua L.O., Lin Pen-Min *Mashinnij analiz elektronnikh skhem. Algoritmi i vychislitelnie metodi* [Computer-aided analysis of electronic circuits. Algorithms and computational approaches]. Moskva: Energiia, 1980. 640 p.

Надійшла до редакції 10.02.2013

Рецензент: С.Б. Ковальов

В.Ф. СИВОКОБЫЛЕНКО, С.В. ВАСИЛЕЦ

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»

Математическая модель электротехнического комплекса шахты с преобразователями частоты. Разработана математическая модель электротехнического комплекса шахты при наличии преобразователей частоты с использованием метода переменных состояния в виде жесткого матричного дифференциального уравнения, причем коммутации полупроводниковых ключей моделируется дискретным изменением сопротивлений последних, что сопровождается пересчетом матричных коэффициентов дифференциального уравнения состояния системы. Модель реализована в виде прикладной компьютерной программы MinePowerNet.

Ключевые слова: моделирование, преобразователь частоты, электротехнический комплекс, шахта, дифференциальное уравнение, схема замещения, матрица, численное решение, вектор, программа.

V. SIVOKOBYLENKO, S. VASYLETS

State Institution of Higher Education "Donetsk National Technical University"

Mathematical Model of Mine Electrotechnical Complex with Frequency Converters. The tendency of frequency converter implementation in induction electric drive for mines is widely spread nowadays. Usage of frequency converters allows raising technical, economic and reliability indices of mine equipment, to use electricity efficiently. But, because of the peculiarities of equipment operation in mine, when designing power supply systems equipped with frequency converters, it is essential to analyse their operation under fault conditions. This defines urgency of mathematical model elaboration, which describes the transients in mine electrotechnical complex with frequency converters, and corresponding software development, that can be used during mine power networks designing. The purpose of the work is elaboration of mathematical model of mine electrotechnical complex by taking into account semiconductor frequency converters. Technique of researches includes formulation of power network topological description using graph theory that allows formulating matrix differential equation of state for *RLC*-elements of equivalent circuit for mine electrotechnical complex. The frequency converter with direct-current circuit, which includes controlled thyristor rectifier, capacitor filter and self-excited voltage inverter, is analyzed. Running of inverter obeys the basic law of commutation. Semiconductor key commutation is simulated by instantaneous discrete changing of it resistance. Each commutation calls for coefficients recalculation of matrix differential equation of state. The symmetrical induction motor is described by matrix differential equation relative to stator and rotor phase currents and rotor speed. Motor saturation is taken into account by static polynomial dependence between magnetizing inductance and magnitude of exciting current vector. Matrix differential equation of several induction motors is a linear combination of differential equations for individual motors. The use of motors connection matrices by currents and voltages, due to representation of induction motors in electrical equivalent circuit by voltage-controlled current sources, allows to integrate the equations of motors state and the *RLC*-electric system into a single system state matrix differential equation, for numerical solving of which expediency of using a stiff-stable Gear-Nordsieck method with variable step of integration was substantiated. Practical value of the work consists in development of the application program with graphical interface «MinePowerNet», using of which allows to explore the steady states and transients in mine electrotechnical complexes of particular configuration equipped with frequency converters.

Key words: modelling, frequency converter, electrotechnical complex, mine, differential equation, equivalent circuit, matrix, numerical solution, vector, software.