



Сивокобиленко В. Ф.,
Василець С. В.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ШАХТИ МАТРИЧНО-ТОПОЛОГІЧНИМ МЕТОДОМ

Запропоновано математичну модель шахтної електричної мережі як матричне диференційне рівняння у формі Коши, для чисельного розв'язання якого використано метод Гіра-Нордсіка. Математична модель реалізована у вигляді прикладної комп'ютерної програми, використання якої дозволяє підвищити ефективність проектування та експлуатації електромереж шахт.

Ключові слова: модель, мережа, шахта, диференційне рівняння, матриця, граф, дерево, перехідні процеси.

1. Вступ

Енергетичною стратегією України на період до 2030 р. передбачено збільшення обсягів видобутку вугілля шляхом будівництва нових шахт, реконструкції та модернізації діючих вугільних підприємств для підвищення енергетичної та економічної ефективності, оскільки на сьогодні зношеність обладнання перевищує 60 %. Проектування сучасних шахтних електричних мереж з високими техніко-економічними показниками роботи можливо тільки на основі математичного аналізу перехідних процесів в системі [1].

Вагомий внесок у розробку методів аналізу перехідних процесів в електротехнічних комплексах промислових підприємств, в тому числі й шахт, внесли С. І. Випанасенко, С. А. Волотковський, К. С. Демірчан, В. С. Дзюбан, В. П. Колосюк, Р. М. Лейбов, В. С. Перхач, Г. Г. Півняк, Шкрабець, Hermann W. Dommel (США, Канада), Leon O. Chua, Pen-Min Lin (США), Jos Arrillaga (Нова Зеландія), Fabio Saccomanno (Італія), Juan A. Martinez-Velasco (Іспанія), Yonghua Song, Malcolm Irving (Великобританія) та багато інших вчених, а також наукові колективи ІЕД НАН України, УкрНДІВЕ, МакНДІ, НГУ, МЕІ, ДонВугІ, ІЕЕЕ (США), ІЕТ (Великобританія) та ін.

Більшість відомих методів аналізу перехідних процесів розроблялися для електротехнічних комплексів загальнопромислових підприємств та не враховувала особливості побудови та функціонування шахтних електромереж. На сьогоднішній день для оцінки перехідних процесів в електричній мережі шахти використовуються методики, які, через недостатню точність, можуть слугувати тільки для приблизного вибору електрообладнання. Нові тенденції розвитку вугледобувної техніки, необхідність підвищення техніко-економічних показників, енергоефективності, безпеки та надійності функціонування шахт обумовлюють наукову та практичну актуальність удосконалення методів аналізу перехідних процесів в шахтній електричній мережі.

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Найбільш поширеним підходом при проектуванні шахтної електромережі є блочно-ієрархічний підхід [2],

першочерговим завданням при використанні якого є складання повної математичної моделі шахтної електромережі як базового інструмента для виконання досліджень перехідних та ustalених процесів.

Відомо про наявність методик для аналізу перехідних процесів в окремих режимах, які використовуються під час проектування шахтних електромереж, більшість з яких базуються на ідеалізованих спрощеннях та оперують з приблизними коефіцієнтами, що знижує точність розрахунків. Зокрема, при розрахунку струмів короткого замикання вважають, що потужність живлячої мережі є безкінечною, не враховуються струми намагнічування трансформаторів, перехідні процеси в електродвигунах та генераторах, можлива несиметрія системи та ін. [3]. Досвід розрахунків перехідних процесів при короткому замиканні з використанням практичних способів показує, що похибки визначення струмів короткого замикання можуть досягати 15 % [4]. Під час розрахунку електричних навантажень широко використовується метод коефіцієнта попиту, який характеризується суттєвими похибками: для умов шахт Західного Донбасу середня похибка визначення максимуму навантаження для головної знижувальної підстанції становить 55 %, для споживачів центральної підземної підстанції – 89 % [2].

Таким чином, відомі методи аналізу перехідних процесів в шахтних електромережах задовольняли потреби вугільної промисловості на відповідному етапі розвитку електротехнічних комплексів шахт та потребують розвитку.

3. Об'єкт, мета та задачі досліджень

Об'єктом дослідження є перехідні процеси в електротехнічних комплексах шахтної електричної мережі.

Метою дослідження є підвищення ефективності проектування та експлуатації електротехнічних комплексів шахтної електричної мережі на основі аналізу перехідних процесів.

Для досягнення мети мають бути вирішені наступні задачі:

- обґрунтувати математичну модель шахтної електричної мережі для аналізу перехідних процесів в нормальних та аварійних режимах роботи;

- реалізувати математичну модель засобами обчислювальної техніки у вигляді прикладної комп'ютерної програми;
- виявити джерела підвищення ефективності проектування шахтних електротехнічних комплексів при застосуванні запропонованого підходу.

4. Матеріали та методи досліджень перехідних процесів в електромережі шахти

Аналіз перехідних процесів в електромережі шахти пропонується проводити матрично-топологічним методом, що дозволяє розглядати системи довільної структури з будь-якою кількістю елементів [5]. Загальна схема заміщення шахтної електромережі компонується зі схем заміщення окремих елементів. Дерево та доповнення дерева графа для загальної схеми заміщення мережі, а також матриця інцидентів формуються згідно відомих принципів [6]. З матриці інцидентів можна отримати матрицю головних перетинів \bar{F}_1 , кількість рядків якої дорівнює кількості ребер графа (до яких відносяться керовані U_y та незалежні U джерела напруги, ємнісні C_p , активні R_p та індуктивні L_p ребра), а кількість стовпчиків відповідає кількості хорд (останні включають ємнісні C_x , активні R_x , індуктивні L_x хорди, керовані I_y та незалежні I джерела струму):

$$\bar{F}_1 = \begin{matrix} & C_x & R_x & L_x & I & I_y \\ U_y & \bar{F}_2 & \bar{F}_3 & \bar{F}_4 & \bar{F}_5 & \bar{F}_6 \\ U & \bar{F}_7 & \bar{F}_8 & \bar{F}_9 & \bar{F}_{10} & \bar{F}_{11} \\ \bar{F}_1 = C_p & \bar{F}_{12} & \bar{F}_{13} & \bar{F}_{14} & \bar{F}_{15} & \bar{F}_{16} \\ R_p & \bar{F}_{17} & \bar{F}_{18} & \bar{F}_{19} & \bar{F}_{20} & \bar{F}_{21} \\ L_p & \bar{F}_{22} & \bar{F}_{23} & \bar{F}_{24} & \bar{F}_{25} & \bar{F}_{26} \end{matrix}, \quad (1)$$

де $\bar{F}_2 - \bar{F}_{26}$ — компонентні матриці, причому $\bar{F}_2 = \bar{0}$, $\bar{F}_7 = \bar{0}$, $\bar{F}_{17} = \bar{0}$, $\bar{F}_{22} = \bar{0}$, $\bar{F}_{23} = \bar{0}$, $\bar{F}_{25} = \bar{0}$, $\bar{F}_{26} = \bar{0}$ через відсутність відповідних особливостей графа.

Рівняння резистивних елементів згідно закону Ома наступне:

$$\bar{I}_{\text{рез}} = \bar{B}_1 \cdot \bar{X} + \bar{B}_2 \cdot \bar{X}_{\text{ни}} + \bar{B}_3 \cdot \bar{X}_{\text{yn}}, \quad (2)$$

де $\bar{X} = [\bar{U}_{C_p} \ \bar{I}_{L_x}]^T$ — вектор змінних стану RLC -кола; $\bar{X}_{\text{ни}} = [\bar{U} \ \bar{I}]^T$, $\bar{X}_{\text{yn}} = [\bar{U}_{\text{yn}} \ \bar{I}_{\text{yn}}]^T$ — вектора незалежних та керованих джерел живлення відповідно; $\bar{I}_{\text{рез}} = [\bar{I}_{R_p} \ \bar{I}_{R_x}]^T$ — вектор струмів резистивних елементів; $\bar{B}_1 = \bar{A}_{11}^{-1} \cdot \bar{B}_{11}$, $\bar{B}_2 = \bar{A}_{11}^{-1} \cdot \bar{B}_{12}$, $\bar{B}_3 = \bar{A}_{11}^{-1} \cdot \bar{B}_{13}$ — матричні коефіцієнти, причому:

$$\bar{A}_{11} = \begin{bmatrix} \bar{1} & \bar{F}_{18} \\ -\bar{F}_{18}^T \bar{R}_p & \bar{R}_x \end{bmatrix}; \quad \bar{B}_{11} = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{19} \\ \bar{F}_{13}^T & \bar{0} \end{bmatrix};$$

$$\bar{B}_{12} = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{20} \\ \bar{F}_8^T & \bar{0} \end{bmatrix}; \quad \bar{B}_{13} = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{21} \\ \bar{F}_3^T & \bar{0} \end{bmatrix}.$$

Диференційне рівняння стану RLC -кола у матричній формі має вигляд:

$$d\bar{X} / dt = \bar{A}_1 \cdot \bar{X} + \bar{A}_2 \cdot \bar{X}_{\text{ни}} + \bar{A}_3 \cdot \bar{X}_{\text{yn}}, \quad (3)$$

де

$$\bar{A}_1 = \bar{A}_{22}^{-1} \cdot (\bar{A}_{21} \cdot \bar{B}_1 + \bar{B}_{21}); \quad \bar{A}_2 = \bar{A}_{22}^{-1} \cdot (\bar{A}_{21} \cdot \bar{B}_2 + \bar{B}_{22});$$

$$\bar{A}_3 = \bar{A}_{22}^{-1} \cdot (\bar{A}_{21} \cdot \bar{B}_3 + \bar{B}_{23});$$

$$\bar{A}_{22} = \text{diag}\{\bar{C}_p + \bar{F}_{12} \cdot \bar{C}_x \cdot \bar{F}_{12}^T \ \bar{L}_x + \bar{F}_{24}^T \cdot \bar{L}_p \cdot \bar{F}_{24}\};$$

$$\bar{A}_{21} = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{13} \\ \bar{F}_{19}^T \bar{R}_p & \bar{0} \end{bmatrix}; \quad \bar{B}_{21} = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{14} \\ \bar{F}_{14}^T & \bar{0} \end{bmatrix};$$

$$\bar{B}_{22} = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{15} \\ \bar{F}_9^T & \bar{0} \end{bmatrix}; \quad \bar{B}_{23} = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{16} \\ \bar{F}_4^T & \bar{0} \end{bmatrix}.$$

Матричне диференційне рівняння, що описує перехідні процеси в симетричному асинхронному двигуні у системі координат $\alpha\beta$, має вигляд [7]:

$$d\bar{\Psi}_{\alpha\beta} / dt = \bar{M}_1 \cdot \bar{\Psi}_{\alpha\beta} + \bar{S}_{\alpha\beta} + \bar{U}_{\alpha\beta}, \quad (4)$$

де $\bar{\Psi}_{\alpha\beta} = [\Psi_{s\alpha} \ \Psi_{s\beta} \ \Psi_{r\alpha} \ \Psi_{r\beta} \ \omega]^T$ — вектор потокозчеплень та частоти обертання двигуна; $\bar{U}_{\alpha\beta} = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta} \ 0 \ 0 \ 0]^T$ — вектор напруг на статорі та роторі; $\bar{S}_{\alpha\beta}$ — вектор-функція спадів напруг від змінних стану, що дорівнює:

$$\bar{S}_{\alpha\beta} = [0 \ 0 \ -\omega\Psi_{r\beta} \ \omega\Psi_{r\alpha} \ [3L_m(i_{r\alpha}i_{s\beta} - i_{r\beta}i_{s\alpha})/2 - M_c(\omega)]/J]^T, \quad (5)$$

\bar{M}_1 — матричний коефіцієнт, який залежить від параметрів T -подібної схеми заміщення асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором.

Переходячи у (4) від потокозчеплень до струмів, маємо:

$$d\bar{I}_{\alpha\beta} / dt = \bar{M}_2 \cdot [\bar{M}_1 \cdot \bar{M}_3 \cdot \bar{I}_{\alpha\beta} + \bar{S}_{\alpha\beta} + \bar{U}_{\alpha\beta}], \quad (6)$$

де $\bar{I}_{\alpha\beta} = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta} \ i_{r\alpha} \ i_{r\beta} \ \omega]^T$ — вектор струмів у системі координат $\alpha\beta$ та частоти обертання двигуна; $\bar{S}_{\alpha\beta} = [0 \ 0 \ s'_3 \ s'_4 \ s'_5]^T$ — вектор-функція спадів напруг від змінних стану, причому $s'_3 = -\omega(L_m i_{s\beta} + L_r i_{r\beta})$, $s'_4 = \omega(L_m i_{s\alpha} + L_r i_{r\alpha})$, $s'_5 = [3L_m(i_{r\alpha}i_{s\beta} - i_{r\beta}i_{s\alpha})/2 - M_c(\omega)]/J$; \bar{M}_2 , \bar{M}_3 — матричні коефіцієнти.

Перейдемо в (6) до фазних величин струмів та лінійних напруг статора:

$$d\bar{I}_{abc} / dt = \bar{F} \cdot \bar{I}_{abc} + \bar{G} \cdot \bar{S} + \bar{H} \cdot \bar{U}_{abc}, \quad (7)$$

де $\bar{I}_{abc} = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc} \ i_{ra} \ i_{rb} \ i_{rc} \ \omega]^T$ — вектор змінних стану; $\bar{U}_{abc} = [u'_{aB} \ u'_{bC}]^T$ — вектор лінійних напруг статора;

$$\bar{G} = \bar{M}_4 \cdot \bar{M}_2, \quad \bar{F} = \bar{G} \cdot \bar{M}_1 \cdot \bar{M}_3 \cdot \bar{M}_5, \quad \bar{H} = \bar{G} \cdot M_6;$$

$$\bar{S} = [0 \ 0 \ s_3 \ s_4 \ s_5]^T,$$

причому:

$$s_3 = -\omega[L_m(i_{sb} - i_{sc}) + L_r(i_{rb} - i_{rc})]/\sqrt{3},$$

$$s_4 = \omega(L_m i_{sa} + L_r i_{ra}),$$

$$s_5 = \{\sqrt{3}L_m[i_{ra}(i_{sb} - i_{sc}) - i_{sa}(i_{rb} - i_{rc})]/2 - M_c(\omega)\} / J.$$

За наявності в системі n асинхронних двигунів узгаляльне рівняння їх стану являє собою лінійну комбінацію диференційних рівнянь типу (7):

$$d\bar{I}_{\text{гл}} / dt = \bar{F}_{\text{гл}} \cdot \bar{I}_{\text{гл}} + \bar{G}_{\text{гл}} \cdot \bar{S}_{\text{гл}} + \bar{H}_{\text{гл}} \cdot \bar{U}_{\text{гл}}, \quad (8)$$

де $\bar{I}_{\text{гл}} = [\bar{I}_{abc_1} \dots \bar{I}_{abc_n}]^T$ – вектор струмів та частот обертання n двигунів; $\bar{S}_{\text{гл}} = [\bar{S}_1 \dots \bar{S}_n]^T$ – вектор-функція спадів напруг від змінних стану з вектора $\bar{I}_{\text{гл}}$; $\bar{U}_{\text{гл}} = [\bar{U}_{abc_1} \dots \bar{U}_{abc_n}]^T$ – вектор лінійних напруг на статорах двигунів; $\bar{F}_{\text{гл}} = \text{diag}\{\bar{F}_1 \dots \bar{F}_n\}$; $\bar{G}_{\text{гл}} = \text{diag}\{\bar{G}_1 \dots \bar{G}_n\}$; $\bar{H}_{\text{гл}} = \text{diag}\{\bar{H}_1 \dots \bar{H}_n\}$.

Асинхронні двигуни подаються на схемі заміщення (рис. 1) керованими джерелами струму ($I_{yA} = i_{sa}$, $I_{yB} = i_{sb}$, $I_{yC} = i_{sc}$) [8], причому лінійна напруга, яка прикладається до обмоток статора, знімається з високоомних резисторів (u'_{AB} знімається з R'_{AB} , u'_{BC} – з R'_{BC}), що дозволяє встановити залежність між векторами лінійних напруг на статорах двигунів $\bar{U}_{\text{гл}}$ та на резистивних елементах $\bar{U}_{\text{рез}}$:

$$\bar{U}_{\text{гл}} = \bar{G}_{12} \cdot \bar{U}_{\text{рез}}, \quad (9)$$

де \bar{G}_{12} – матриця підключення двигунів за напругою, елементи якої, що знаходяться на перетині рядка, який відповідає шуканій лінійній напрузі статора i -го двигуна (u'_{AB} або u'_{BC}), та стовпчика, який кореспондується з напругою на відповідному резисторі схеми заміщення (R'_{AB} або R'_{BC} відповідно), дорівнюють 1, інші елементи є нульовими.

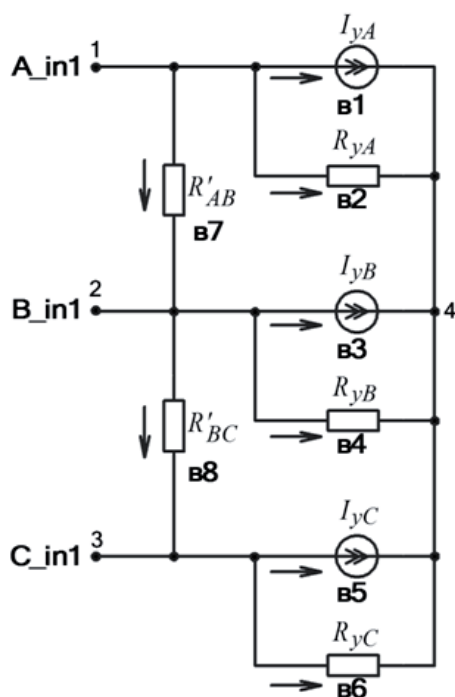


Рис. 1. Схема заміщення асинхронного двигуна при з'єднанні обмотки за схемою «зірка»

Для зіставлення векторів струмів двигунів $\bar{I}_{\text{гл}}$ та струмів керованих джерел $\bar{I}_{\text{ун}}$ скористаємося залежністю:

$$\bar{I}_{\text{ун}} = \bar{G}_{11} \cdot \bar{I}_{\text{гл}}, \quad (10)$$

де \bar{G}_{11} – матриця підключення двигунів за струмом, кількість рядків якої відповідає кількості джерел струму, а кількість стовпчиків дорівнює семикратній кількості двигунів $7n$, оскільки розмір кожного вектора \bar{I}_{abc_i} становить 7; на перетині рядка, що відповідає джерелу струму I_{yA_i} , I_{yB_i} або I_{yC_i} i -го двигуна та стовпчика, що визначає струм відповідної фази статора цього ж двигуна (i_{sa_i} , i_{sb_i} , i_{sc_i}) проставляється 1, інші елементи дорівнюють нулю.

Використання залежностей (9) та (10) дає змогу об'єднати диференційні рівняння стану RLC-кола (3) та асинхронних двигунів (8) в єдине диференційне рівняння стану дільничної електромережі. Для цього запишемо залежність (9) з використанням рівняння (2):

$$\bar{U}_{\text{гл}} = \bar{G}_{15} \cdot \bar{X} + \bar{G}_{16} \cdot \bar{X}_{\text{ни}} + \bar{G}_{17} \cdot \bar{X}_{\text{ун}}, \quad (11)$$

де $\bar{G}_{15} = \bar{G}_{14} \cdot \bar{B}_1$, $\bar{G}_{16} = \bar{G}_{14} \cdot \bar{B}_2$, $\bar{G}_{17} = \bar{G}_{14} \cdot \bar{B}_3$, $\bar{G}_{14} = \bar{G}_{12} \cdot \bar{R}$ – матричні коефіцієнти; $\bar{R} = \text{diag}\{\bar{R}_p \bar{R}_x\}$ – матриця активних опорів схеми заміщення мережі.

Прийемо припущення про відсутність у RLC-колі керованих джерел напруги, тоді виконується залежність:

$$\bar{X}_{\text{ун}} = \bar{I}_{\text{ун}} = \bar{G}_{11} \cdot \bar{I}_{\text{гл}}. \quad (12)$$

Враховавши у рівнянні (8) залежності (11) та (12), маємо:

$$d\bar{I}_{\text{гл}} / dt = \bar{G}_{19} \cdot \bar{X} + \bar{G}_{23} \cdot \bar{I}_{\text{гл}} + \bar{G}_{\text{гл}} \cdot \bar{S}_{\text{гл}} + \bar{G}_{20} \cdot \bar{X}_{\text{ни}}, \quad (13)$$

де $\bar{G}_{19} = \bar{H}_{\text{гл}} \cdot \bar{G}_{15}$; $\bar{G}_{23} = \bar{F}_{\text{гл}} + \bar{H}_{\text{гл}} \cdot \bar{G}_{17} \cdot \bar{G}_{11}$; $\bar{G}_{20} = \bar{H}_{\text{гл}} \cdot \bar{G}_{16}$.

Враховуючи у (3) залежність (12) та позначивши $\bar{G}_{24} = \bar{A}_3 \cdot \bar{G}_{11}$, маємо:

$$d\bar{X} / dt = \bar{A}_1 \cdot \bar{X} + \bar{A}_2 \cdot \bar{X}_{\text{ни}} + \bar{G}_{24} \cdot \bar{I}_{\text{гл}}. \quad (14)$$

Об'єднаємо диференційні рівняння стану RLC-кола (14) та асинхронних двигунів (13) в єдине диференційне рівняння стану дільничної електромережі:

$$d\bar{X}_{\text{гл}} / dt = \bar{L}_1 \cdot \bar{X}_{\text{гл}} + \bar{L}_2 \cdot \bar{S}_{\text{гл}} + \bar{L}_3 \cdot \bar{X}_{\text{ни}} = f(\bar{X}_{\text{гл}}, t), \quad (15)$$

де $\bar{X}_{\text{гл}} = [\bar{X} \ \bar{I}_{\text{гл}}]^T$ – вектор змінних стану RLC-кола та асинхронних двигунів; $\bar{L}_1 = \begin{bmatrix} \bar{A}_1 & \bar{G}_{24} \\ \bar{G}_{19} & \bar{G}_{23} \end{bmatrix}$, $\bar{L}_2 = [\bar{0} \ \bar{G}_{\text{гл}}]^T$,

$\bar{L}_3 = [\bar{A}_2 \ \bar{G}_{20}]^T$ – матричні коефіцієнти.

Матричне диференційне рівняння (15) є математичною моделлю електротехнічного комплексу шахти. Оскільки стали часу електричних та механічних перехідних процесів суттєво відрізняються, вказане рівняння можна вважати жорстким [9]. Для його чисельного

розв'язання пропонується використовувати жорстко-стійкий метод Гіра із застосуванням вектора Нордсіка, для чого авторами розроблена прикладна комп'ютерна програма «MinePowerNet» [10].

5. Аналіз перехідних процесів в електромережі шахти

Розглянемо фрагмент дільничної електромережі шахти (рис. 2), що складається з підстанції УТП1 (типу КТПВ-1000/6-1,2), кабеля К1 (КГЭШ 3х25, довжиною 50 м) та двигуна М1 (ЭДКОФВ315LA4, потужністю 200 кВт). Граф схеми заміщення такого фрагмента електромережі, яка складається зі схем заміщення окремих компонентів, нараховує 45 гілок, що з'єднуються у 28 вузлах, дерево графа містить 27 ребер.

Рівняння стану (15) інтегрувалося в програмі MinePowerNet методом Гіра-Нордсіка 3-го порядку при змінному кроці, величина якого не перевищувала $1 \cdot 10^{-4}$ с за наступних умов: в момент 0 с моделювався пуск двигуна при випадковому нормально розподіленому моменті навантаження на валу, причому математичне очікування коефіцієнта завантаження становило $m[K_3^*] = 0,1$ в. о. при $s[K_3^*] = 0,03$ в. о.; в момент $t_1 = 1$ с — зміна завантаження до $m[K_3^*] = 0,95$ в. о. при $s[K_3^*] = 0,05$ в. о.; від моменту $t_2 = 1,5$ с до $t_3 = 1,57$ с — короткочасна перерва живлення; в момент $t_4 = 2,2$ с — обрив фази А. Отримані графіки (рис. 3) ілюструють пуск двигуна, що супроводжується протіканням пускових струмів, збільшення струму та зниження частоти обертання при збільшенні рівня завантаження в момент t_1 , перехід двигуна до режиму вибігу в момент t_2 зникнення напруги, удар струму при повторному ввімкненні у момент t_3 , зниження до нуля струму фази А при її обриві в момент t_4 .

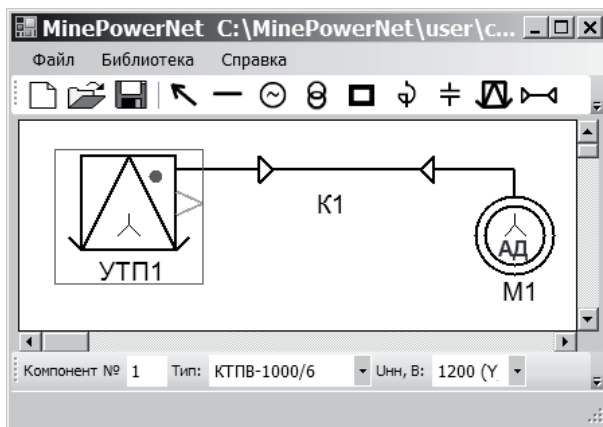


Рис. 2. Структурна схема фрагмента електромережі дільниці шахти у вікні програми MinePowerNet

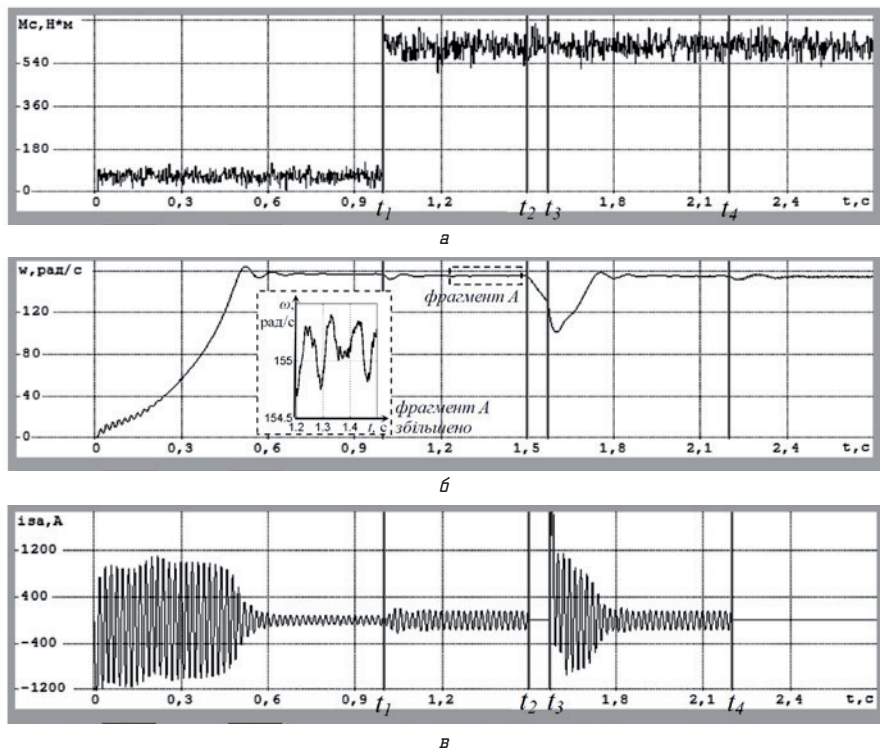


Рис. 3. Графіки (в функції часу t , с): а — механічного моменту M_c , Н·м, двигуна; б — частоти обертання ω , рад/с, двигуна; в — струму i_a , А, фази А; t_1 — момент зміни рівня механічного завантаження двигуна; t_2 , t_3 — відключення та повторне ввімкнення, відповідно, напруги живлення; t_4 — обрив фази А кабеля

6. Обговорення результатів аналізу перехідних процесів в електромережі шахти

Застосування запропонованої математичної моделі електротехнічних комплексів шахтних електричних мереж для досліджень перехідних та усталених процесів в штатних та аварійних режимах роботи під час проектування та вибору електрообладнання дозволить: підвищити точність розрахунків завдяки використанню диференціальних рівнянь для описання кожного елемента системи; підвищити стійкість розв'язання диференціальних рівнянь, які описують елементи системи; зменшити тривалість проектування за рахунок реалізації математичної моделі у вигляді прикладної комп'ютерної програми та наявності бібліотек типового рудникового електрообладнання; знизити вимоги до рівня підготовки проектувальників, оскільки всі обчислення виконуються комп'ютерною програмою в автоматичному режимі; підвищити точність налаштування захисних апаратів завдяки більш точному обрахуванню параметрів перехідних процесів в аварійних режимах; знизити матеріальні витрати на виробництві через встановлення невірно обраного обладнання; знизити витрати на виготовлення натурних зразків нового захисного обладнання завдяки можливості моделювання функціонування засобів захисту у складі електротехнічних комплексів; розширити можливості проектувальника за рахунок оперативного порівняння різних варіантів комплектації електрообладнання; на основі аналізу перехідних процесів розробити нові способи та засоби захисту від аварійних режимів.

7. Висновки

У результаті проведених досліджень:

1. Розроблено методику обчислення матричних коефіцієнтів диференційного рівняння стану шахтної електромережі на основі аналізу схеми заміщення останньої матрично-топологічним методом, причому рівняння відрізняється врахуванням взаємного впливу компонентів електромережі.

2. Запропоновано прикладну комп'ютерну програму «MinePowerNet», яка дозволяє розв'язувати матричне диференційне рівняння стану шахтної електромережі жорстко-стійким методом Гіра-Нордсіка.

3. Встановлено, що застосування проектними організаціями запропонованої комп'ютерної програми, яка реалізує розроблену математичну модель, для аналізу перехідних процесів в штатних та аварійних режимах роботи дозволить підвищення ефективності проектування та експлуатації електромереж шахт.

Література

1. Saccomanno, F. Electric power systems: Analysis and Control [Text] / Fabio Saccomanno. — Piscataway, NJ, USA: IEEE PRESS, 2003. — 744 p. doi:10.1002/0471722901
2. Півняк, Г. Г. Електрифікація гірничих робіт [Текст]: підручник / Г. Г. Півняк, М. М. Бєлий, Л. П. Ворохов та ін.; за ред. Г. Г. Півняка. — Вид. 2-е. — Д.: НГУ, 2005. — 615 с.
3. Ванєєв, Б. Н. Справочник енергетика угольної шахти [Текст]: в 2 т. / В. С. Дзюбан, И. Г. Ширнин, Б. Н. Ванєєв, В. М. Гостищев; под ред. Б. Н. Ванєєва. — 2-е изд., перераб. и доп. — Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. — Т. 1. — 447 с.
4. Півняк, Г. Г. Перехідні процеси в системах електропостачання [Текст] / Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко та ін.; за ред. Г. Г. Півняка. — Д.: НГУ, 2002. — 597 с.
5. Wang, X.-F. Modern Power Systems Analysis [Text] / Xi-Fan Wang, Yonghua Song, Malcolm Irving. — New York, NY, USA: Springer Science+Business Media, 2008. — 559 p. doi:10.1007/978-0-387-72853-7
6. Murthy, P. S. R. Power system analysis [Text] / P. S. R. Murthy. — Hyderabad: BSP, 2007. — 321 p.
7. Krause, P. C. Analysis of electric machinery and drive systems [Text] / P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff. — Ed. 2. — New York: John Wiley & Sons, 2002. — 613 p. doi:10.1109/9780470544167
8. Watson, N. Power systems electromagnetic transients simulation [Text] / N. Watson, J. Arrillaga. — London: Institution of Engineering and Technology, 2007. — 449 p. doi:10.1049/pbpo039e

9. Hairer, E. Solving ordinary differential equations [Text] / E. Hairer, G. Wanner // Part II — Stiff and differential-algebraic problems — 2010. — Ed. 2. — London — New York: Springer, 2010. — 631 p.
10. Сивокобилєнко, В. Ф. Комп'ютерна програма «MinePowerNet» аналізу перехідних процесів в електротехнічних комплексах шахтної електричної мережі [Текст] / В. Ф. Сивокобилєнко, С. В. Василюк // Свідчення про реєстрацію авторського права на службовий твір № 54148 від 19.03.2014 р.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОСЕТИ ШАХТЫ МАТРИЧНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Предложена математическая модель шахтной электрической сети как матричное дифференциальное уравнение в форме Коши, для численного решения которого использован метод Гира-Нордсика. Математическая модель реализована в виде прикладной компьютерной программы, использование которой позволит повысить эффективность проектирования и эксплуатации электросетей шахт.

Ключевые слова: модель, сеть, шахта, дифференциальное уравнение, матрица, граф, дерево, переходные процессы.

Сивокобилєнко Віталій Федорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій, систем та електропостачання, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Красноармійськ, Україна, e-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua.

Василюк Святослав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, кафедра гірничої електротехніки і автоматики ім. Р. М. Лейбова, ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Красноармійськ, Україна, e-mail: svyat.vasilets@gmail.com.

Сивокобилєнко Віталій Федорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій, систем та електропостачання, ГосВУЗ «Донецький національний технічний університет», Красноармійськ, Україна.

Василюк Святослав Володимирович, кандидат технічних наук, доцент, докторант, кафедра горної електротехніки і автоматики ім. Р. М. Лейбова, ГосВУЗ «Донецький національний технічний університет», Красноармійськ, Україна.

Sivokobylenko Vitalii, State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University», Krasnoarmeysk, Donetsk region, Ukraine, e-mail: svf@elf.dgtu.donetsk.ua.

Vasylets Sviatoslav, State Institution of Higher Education «Donetsk National Technical University», Krasnoarmeysk, Donetsk region, Ukraine, e-mail: svyat.vasilets@gmail.com