

УДК 622.012.2:621.311.1

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДІЛЬНИЧНОЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ШАХТИ ЗА НАЯВНОСТІ ВИТОКУ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ ЧЕРЕЗ ОПІР ТІЛА ЛЮДИНИ

С. В. Василюк

Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет»
вул. Артема, 58, м. Донецьк, 83001, Україна. E-mail: svyat.vasilets@gmail.com

Підвищення рівня напруги живлення електромережі дільниці шахти до 3,3 кВ вимагає вдосконалення апаратів автоматичного захисту робітників від ураження електричним струмом. Відомі залежності для оцінки стану кола витоку струму на землю через опір тіла людини не враховують низку факторів, значимість яких з підвищенням рівня напруги живлення збільшується, що не дозволяє використовувати їх для мереж напругою 3,3 кВ. У роботі вдосконалено математичну модель електромережі дільниці вугільної шахти шляхом урахування зниження частоти електрорушійної сили вибігу асинхронних двигунів після захисного відключення напруги живлення мережі; зміни активно-ємнісних опорів ізоляції кабельної мережі, що визначають величину струму витоку при відключенні комутаційних апаратів відгалужень; залежності індуктивності автокомпенсатора ємнісної складової струму витоку від сукупної ємності ізоляції трьох фаз мережі відносно землі. Математичну модель подано у вигляді матричного диференційного рівняння, для формування якого використано матрично-топологічний метод аналізу електричних кіл. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні нових та удосконаленні існуючих апаратів захисту від витоків струму на землю в умовах дільничної мережі.

Ключові слова: шахта, дільниця, електромережа, виток струму, електроураження.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ШАХТЫ ПРИ НАЛИЧИИ УТЕЧКИ ТОКА НА ЗЕМЛЮ ЧЕРЕЗ СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕЛА ЧЕЛОВЕКА

С. В. Василюк

Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет»
ул. Артема, 58, г. Донецк, 83001, Украина. E-mail: svyat.vasilets@gmail.com

Повышение уровня напряжения питания электросети участка шахты до 3,3 кВ требует усовершенствования аппаратов автоматической защиты работников от поражения электрическим током. Известные зависимости для оценки состояния цепи утечки тока на землю через сопротивление тела человека не учитывают ряд факторов, значимость которых с увеличением уровня напряжения питания возрастает, что не позволяет использовать их для сетей напряжением 3,3 кВ. В работе усовершенствована математическая модель электросети участка угольной шахты путем учета снижения частоты электродвижущей силы выбега асинхронных двигателей после защитного отключения напряжения питания сети; изменения активно-емкостных сопротивлений изоляции кабельной сети, которые определяют величину тока утечки при отключении коммутационных аппаратов ответвлений; зависимости индуктивности автокомпенсатора емкостной составляющей тока утечки от совокупной емкости изоляции трех фаз сети относительно земли. Математическая модель представлена в виде матричного дифференциального уравнения, для формирования которого использован матрично-топологический метод анализа электрических цепей. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых и усовершенствовании существующих аппаратов защиты от утечек тока на землю в условиях участковой сети.

Ключевые слова: шахта, участок, электросеть, утечка тока, электропоражение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Згідно з вимогами Правил безпеки у вугільних шахтах, електромережа кожної вугледобувної дільниці має оснащуватись апаратом автоматичного захисту від витоків струму на землю (реле витоку). Такий апарат контролює величину активного опору ізоляції фаз електромережі відносно землі та при його зниженні (зокрема, в разі доторкання людини до струмопровідного елемента) подає сигнал на захисне відключення автоматичного вимикача дільничної трансформаторної підстанції. Для зниження величини струму через опір тіла людини реле витоку може додатково здійснювати компенсацію ємнісної складової струму витоку, виявлення та захисне закорочення пошкодженої фази мережі на землю. На сьогодні у складі дільничних електромереж використовуються реле витоку типів АЗУР.1–АЗУР.4, АЗУР–1М, АЗУР.4ПП, триває вдосконалення АЗУР.5. Спільним недоліком існуючих реле витоку є неможли-

вість ефективного зниження складової струму витоку, яка підтримується електрорушійною силою (ЕРС) вибігу двигунів після захисного відключення мережі, що збільшує ймовірність смертельного електроураження людини. Кількість електрики, яка проходить через опір тіла людини після відключення автоматичного вимикача, збільшується з підвищенням рівня напруги живлення мережі та потужності приводних асинхронних електродвигунів гірничих машин [1]. З урахуванням існуючих тенденцій до збільшення потужності електроприводів вугледобувних машин та механізмів (наприклад, ВАТ «ПЕМЗ ім. К. Маркса» освоєно випуск вибухозахищених електродвигунів серій ЭКВ, ЭДК, ЭДКО потужністю до 400 кВт для вугільних комбайнів; сукупна потужність електроприводів очисних комбайнів КДК–500, КДК–700 досягає 500–710 кВт та ін.), підвищення рівня напруги живлення до 3,3 кВ [2], актуальним є питання вдосконалення засобів захис-

ту від витоків струму на землю в умовах електромережі дільниці шахти для зниження ймовірності смертельного електроураження робітників, що потребує уточнення методики розрахунку перехідного процесу в електромережі дільниці шахти в разі виникнення витoku струму на землю через опір тіла людини.

Відомо залежності, що оцінюють стан кола витoku струму на землю в дільничній електромережі вугільної шахти за кількістю електрики, що пройшла через опір кола витoku [1, 3]. Їх недоліком є неврахування зміни частоти ЕРС вибігу двигунів, яка підтримує струм у колі витoku на землю після захисного відключення мережі. Відомо залежність для обчислення миттєвих значень струму витoku через опір тіла людини [4], яка не враховує складову струму витoku, що підтримується електрорушійною силою вибігу двигунів. Недоліки існуючих залежностей суттєво знижують точність оцінки стану кола витoku струму на землю, що унеможливило їх використання для мереж напругою 3,3 кВ.

Метою роботи є вдосконалення математичної моделі електромережі дільниці вугільної шахти при виникненні витoku струму на землю через опір тіла людини шляхом підвищення точності врахування перехідного процесу після захисного відключення мережі, що дозволить уточнити параметри перспективних апаратів автоматичного захисту.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Розглянемо дільничну електромережу вугільної шахти, яка включає (рис. 1): дільничну трансформаторну підстанцію ДТП, до складу якої входить високовольтний комутаційний апарат KA_0 , силовий трансформатор TP та апарат захисту від витоків струму на землю $A3$; комутаційні апарати (рудникові пускачі) KA_1-KA_n , що під'єднані до виходу ДТП магістральним кабелем MK ; асинхронні електродвигуни споживачів M_1-M_n , які підключені до відповідних пускачів гнучкими кабелями GK_1-GK_n . Припустимо, що електромережа функціонує в нормальному режимі, всі комутаційні апарати ввімкнені. У момент t_{st} людина, стоячи двома ногами на ґрунті виробки, торкається однією рукою фази електромережі в місці приєднання GK_n до M_n , що виявляється апаратом захисту $A3$, який подає команду на захисне знеструмлення мережі шляхом відключення KA_0 в момент t_{sw0} , після чого двигуни M_1-M_n переходять до режиму групового вибігу. Струм витoku визначається параметрами ізоляції всієї кабельної мережі дільниці відносно землі. Напруга в мережі, яка підтримується ЕРС групового вибігу двигунів, знижується за амплітудою та частотою, що призводить до відключення KA_1-KA_n , причому приймається припущення про одночасне відключення всіх комутаційних апаратів у момент t_{sw1} , після чого двигуни переходять до режиму одиночного вибігу, а величина струму витoku обумовлюється ЕРС вибігу M_n та параметрами ізоляції відносно землі GK_n .

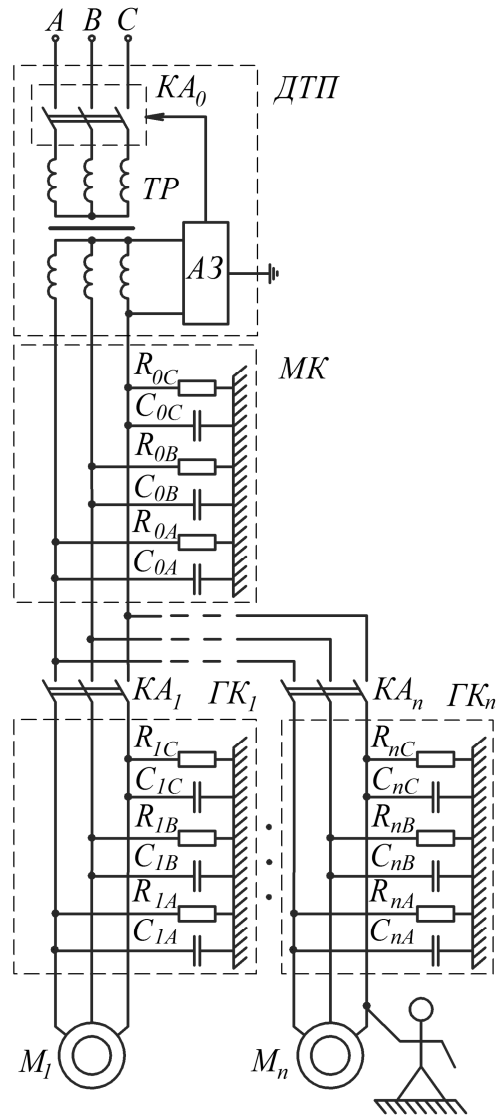


Рисунок 1 – Схема дільничної електромережі вугільної шахти при виникненні витoku струму на землю через опір тіла людини

Відключення KA_0-KA_n протягом захисного знеструмлення мережі унеможливило використання схеми заміщення зі статичною топологією при розрахунку струму витoku, що ускладнює моделювання. Для спрощення розрахунків пропонується використовувати еквівалентну схему заміщення дільничної електромережі (рис. 2), топологія якої при відключенні комутаційних апаратів лишається сталою – змінюються лише значення параметрів елементів. Схема включає трифазне джерело живлення I , фазні напруги u_A, u_B, u_C якого відповідають системі напруг у місці виникнення витoku струму на землю та, при нехтуванні активно-індуктивними опорами жил кабелів, до моменту t_{sw0} дорівнюють системі напруг на виході ДТП, від моменту t_{sw0} до моменту t_{sw1} відповідають системі напруг, які підтримуються ЕРС групового вибігу M_1-M_n , а після t_{sw1} – ЕРС вибігу M_n , що виражається залежністю

$$u_x(t) = U_m(t) \sin[\omega(t)t + \psi_x], \quad (1)$$

причому

$$U_m(t) = \begin{cases} U_{ms}, & \text{нпу } t_{st} \leq t < t_{sw0}; \\ U_{ms} e^{-(t-t_{sw0})/T_{c1}}, & \text{нпу } t_{sw0} \leq t < t_{sw1}; \\ U_{ms} e^{-(t_{sw1}-t_{sw0})/T_{c1}} e^{-(t-t_{sw1})/T_{c2}}, & \text{нпу } t_{sw1} \leq t < t_{end}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_s, & \text{нпу } t_{st} \leq t < t_{sw0}; \\ \omega_s - k_1(t-t_{sw0}), & \text{нпу } t_{sw0} \leq t < t_{sw1}; \\ \omega_s - k_1(t_{sw1}-t_{sw0}) - k_2(t-t_{sw1}), & \text{нпу } t_{sw1} \leq t < t_{end}, \end{cases} \quad (3)$$

де $x=A,B,C$ – позначення фази; $\psi_A=0$, $\psi_B=-2\pi/3$, $\psi_C=2\pi/3$; U_{ms} – амплітуда фазної вихідної напруги ДТП; t_{end} – момент зниження ЕРС вибігу двигуна відгалуження з витоком до безпечного рівня; T_{c1} , T_{c2} – сталі часу затухання ЕРС вибігу групи двигунів та двигуна відгалуження з витоком відповідно; ω_s – колова частота напруги мережі живлення; k_1 , k_2 – коефіцієнти, що характеризують зниження частоти ЕРС вибігу групи двигунів та двигуна відгалуження з витоком відповідно.

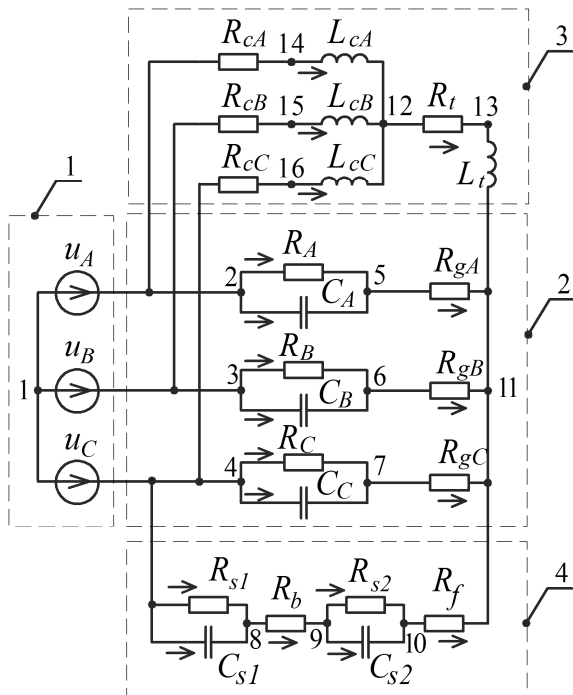


Рисунок 2 – Еквівалентна схема заміщення дільничної електромережі шахти при виникненні витоку струму на землю

Активні опори та ємності ізоляції МК та ГК_l–ГК_n відносно землі, які визначають величину струму витоку, враховуються в еквівалентній схемі заміщення паралельними активно-ємнісними вітками R_x , C_x (рис. 2, позиція 2), параметри яких змінюються при відключенні комутаційних апаратів відгалужень мережі наступним чином:

$$R_x = \begin{cases} \left[R_{0x}^{-1} + \sum_{i=1}^n R_{ix}^{-1} \right]^{-1}, & \text{нпу } t_{st} \leq t < t_{sw1}; \\ R_{nx}, & \text{нпу } t_{sw1} \leq t < t_{end}; \end{cases} \quad (4)$$

$$C_x = \begin{cases} C_{0x} + \sum_{i=1}^n C_{ix}, & \text{нпу } t_{st} \leq t < t_{sw1}; \\ C_{nx}, & \text{нпу } t_{sw1} \leq t < t_{end}, \end{cases} \quad (5)$$

де R_{0x} , C_{0x} – активний опір та ємність ізоляції МК відносно землі; R_{ix} , C_{ix} – те саме для ГК_i.

Опори ґрунту виробки між еквівалентними опорами ізоляції фаз кабелів та місцем стояння людини враховано активними опорами R_{gx} . Враховано наявність автокомпенсатора з ємнісної складової струму витоку на землю, схема заміщення якого включає активно-індуктивні опори фільтра приєднання (R_{cx} , L_{cx}) та компенсуючого дроселя (R_s , L_s), причому індуктивність останнього залежить від ємності ізоляції трьох фаз мережі відносно землі ($C_A + C_B + C_C$) та коефіцієнта розладу ν :

$$L_s = [\omega^2(t)(C_A + C_B + C_C)(1-\nu)]^{-1}. \quad (6)$$

Схема заміщення тіла людини (рис. 2, позиція 4) враховує активно-ємнісні опори шкіри руки в місці торкання до фази мережі (R_{s1} , C_{s1}) та опори шкіри ніг у місці торкання до взуття (R_{s2} , C_{s2}), активний опір тіла R_b та опір взуття R_f [5].

Граф еквівалентної схеми заміщення мережі (рис. 3) включає 16 вузлів (1–16), які з'єднані 26-ма гілками (b_1 – b_{26}).

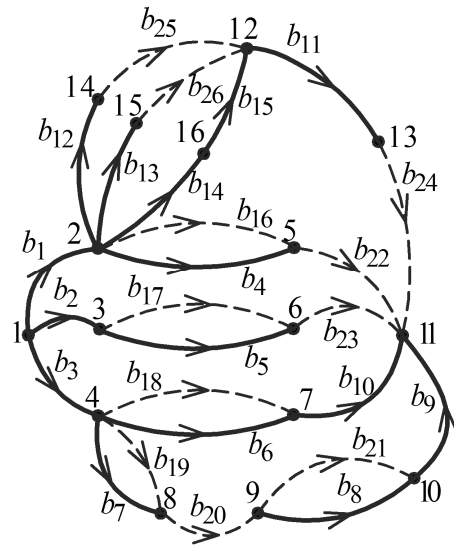


Рисунок 3 – Граф еквівалентної схеми заміщення дільничної електромережі шахти при виникненні витоку струму на землю

Дерево графа має задовільняти наступним вимогам [6, 7]: а) дерево має охоплювати всі вузли; б) дерево не повинно мати замкнених контурів; в) усі ребра мають з'єднуватися між собою безперервно; г) дерево має включати всі вітки з керованими та незалежними джерелами напруги; е) до дерева мають бути віднесені вітки з ємнісними елементами, якщо це не порушує вимог а-г; ф) до дерева мають

бути віднесені тільки ті вітки з індуктивними елементами, віднесення яких до доповнення дерева викликає порушення вимог *a-c*. Таким вимогам задовольняє дерево, утворене гілками b_1-b_{15} , причому гілки $b_{16}-b_{26}$ складають доповнення дерева. Топологічний опис схеми заміщення, для якої складено граф, дає матриця інциденцій, кількість рядків якої відповідає кількості вузлів (N'), а кількість стовпчиків – кількості віток графа (N''). Кожний елемент a_{ij} ($i = \overline{1, N'}$, $j = \overline{1, N''}$) матриці інциденцій дорівнює «0», якщо j -я вітка графа не підключена до i -го вузла, дорівнює «+1» або «-1», якщо j -я вітка графа підключена до i -го вузла та спрямована, відповідно,

від цього вузла або до нього.

Повна система топологічних рівнянь, що описують електричну схему згідно із законами Кірхгофа, визначається на основі матриці головних перетинів, чисельне значення якої може бути отримано з матриці інциденцій шляхом перетворень останньої таким чином, щоб у лівій частині утворилася одинична підматриця, тоді права частина є шуканою матрицею головних перетинів. У ході перетворень допускаються перестановки рядків та стовпчиків, додавання або віднімання рядків матриці [8]. Матриця головних перетинів \bar{F} для графа (рис. 3), отримана з використанням матриці інциденцій, має вигляд:

гілки	хорди	b_{16}	b_{17}	b_{18}	b_{19}	b_{20}	b_{21}	b_{22}	b_{23}	b_{24}	b_{25}	b_{26}
ребра	ел-ти	R_A	R_B	R_C	R_{s1}	R_b	R_{s2}	R_{gA}	R_{gB}	L_t	L_{cA}	L_{cB}
b_1	u_A	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1	0
b_2	u_B	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	-1
b_3	u_C	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
b_4	C_A	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0
b_5	C_B	0	1	0	0	0	0	0	-1	0	0	0
b_6	C_C	0	0	1	0	0	0	1	1	1	0	0
b_7	C_{s1}	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
b_8	C_{s2}	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
b_9	R_f	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0
b_{10}	R_{gC}	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0
b_{11}	R_t	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
b_{12}	R_{cA}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
b_{13}	R_{cB}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
b_{14}	R_{cC}	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1
b_{15}	L_{cC}	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1

Матрицю (7) можна подати у загальному вигляді наступним чином:

$$\bar{F} = C_p \begin{bmatrix} R_x & L_x \\ \bar{F}_{UR_x} & \bar{F}_{UL_x} \\ \bar{F}_{C_p R_x} & \bar{F}_{C_p L_x} \\ \bar{F}_{R_p R_x} & \bar{F}_{R_p L_x} \\ \bar{F}_{L_p R_x} & \bar{F}_{L_p L_x} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

причому компонентна матриця $\bar{F}_{L_p R_x} = \bar{0}$, оскільки струми індуктивних ребер можуть виражатися лише через струми індуктивних хорд [8].

Вектори струмів резистивних ребер \bar{I}_{R_p} та напруг резистивних хорд \bar{U}_{R_x} визначаються згідно з матрицею головних перетинів наступним чином [9]:

$$\begin{cases} \bar{I}_{R_p} = -\bar{F}_{R_p R_x} \bar{I}_{R_x} - \bar{F}_{R_p L_x} \bar{I}_{L_x}; \\ \bar{U}_{R_x} = \bar{F}_{UR_x}^T \bar{U} + \bar{F}_{C_p R_x}^T \bar{U}_{C_p} + \bar{F}_{R_p R_x}^T \bar{U}_{R_p}, \end{cases} \quad (9)$$

де \bar{I}_{R_x} , \bar{I}_{L_x} – вектори струмів резистивних та індуктивних хорд; \bar{U}_{R_p} , \bar{U}_{C_p} – вектори напруг резистивних та ємнісних ребер; $\bar{U} = [u_A \ u_B \ u_C]^T$ – вектор незалежних джерел напруг.

Враховуючи, що згідно із законом Ома

$$\bar{U}_{R_x} = \bar{R}_x \bar{I}_{R_x}; \quad \bar{U}_{R_p} = \bar{R}_p \bar{I}_{R_p}, \quad (10)$$

причому для схеми (рис. 2) матриці опорів резистивних ребер та хорд становлять:

$$\begin{aligned} \bar{R}_p &= \text{diag}\{R_f \ R_{gC} \ R_t \ R_{cA} \ R_{cB} \ R_{cC}\}; \\ \bar{R}_x &= \text{diag}\{R_A \ R_B \ R_C \ R_{s1} \ R_b \ R_{s2} \ R_{gA} \ R_{gB}\}, \end{aligned} \quad (11)$$

із системи (9) маємо:

$$\begin{cases} \bar{1} \cdot \bar{I}_{R_p} + \bar{F}_{R_p R_x} \bar{I}_{R_x} = \\ = \bar{0} \cdot \bar{U}_{C_p} - \bar{F}_{R_p L_x} \bar{I}_{L_x} + \bar{0} \cdot \bar{U}; \\ -\bar{F}_{R_p R_x}^T \bar{R}_p \bar{I}_{R_p} + \bar{R}_x \bar{I}_{R_x} = \\ = \bar{F}_{C_p R_x}^T \bar{U}_{C_p} + \bar{0} \cdot \bar{I}_{L_x} + \bar{F}_{UR_x}^T \bar{U}. \end{cases} \quad (12)$$

Останню систему матричних рівнянь можна привести до вигляду:

$$\bar{I}_R = \bar{A}_1^{-1} (\bar{A}_2 \bar{X} + \bar{A}_3 \bar{U}), \quad (13)$$

де $\bar{X} = [\bar{U}_{C_p} \ \bar{I}_{L_x}]^T$ – вектор змінних стану схеми

заміщення; $\bar{I}_R = [\bar{I}_{R_p} \ \bar{I}_{R_x}]^T$;

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} \bar{1} & \bar{F}_{R_p R_x} \\ -\bar{F}_{R_p R_x}^T \cdot \bar{R}_p & \bar{R}_x \end{bmatrix};$$

$$\bar{A}_2 = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{R_p L_x} \\ \bar{F}_{C_p R_x}^T & \bar{0} \end{bmatrix}; \quad \bar{A}_3 = \begin{bmatrix} \bar{0} \\ \bar{F}_{UR_x}^T \end{bmatrix}.$$

Для реактивних елементів схеми заміщення виконуються співвідношення:

$$\begin{cases} \bar{I}_{C_p} = -\bar{F}_{C_p R_x} \bar{I}_{R_x} - \bar{F}_{C_p L_x} \bar{I}_{L_x}; \\ \bar{U}_{L_x} = \bar{F}_{UL_x}^T \bar{U} + \bar{F}_{C_p L_x}^T \bar{U}_{C_p} + \\ \quad + \bar{F}_{R_p L_x}^T \bar{U}_{R_p} + \bar{F}_{L_p L_x}^T \bar{U}_{L_p}, \end{cases} \quad (14)$$

де \bar{I}_{C_p} – вектор струмів ємнісних ребер графа; \bar{U}_{L_p} , \bar{U}_{L_x} – вектори напруг індуктивних ребер та хорд, які визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{C_p} &= \bar{C}_p \frac{d}{dt} \bar{U}_{C_p}; \quad \bar{U}_{L_p} = \bar{L}_p \frac{d}{dt} \bar{I}_{L_p}; \\ \bar{U}_{L_x} &= \bar{L}_x \frac{d}{dt} \bar{I}_{L_x}, \end{aligned} \quad (15)$$

причому \bar{C}_p – діагональна матриця ємностей ємнісних ребер, яка для схеми заміщення (рис. 2) становить $\bar{C}_p = \text{diag}\{C_A C_B C_C C_{s1} C_{s2}\}$; \bar{L}_p , \bar{L}_x – діагональні матриці індуктивностей індуктивних ребер та хорд, які (рис. 2) дорівнюють $\bar{L}_p = L_{cC}$; $\bar{L}_x = \text{diag}\{L_t L_{cA} L_{cB}\}$.

Оскільки вектори струмів індуктивних ребер та хорд зв'язані співвідношенням

$$\bar{I}_{L_p} = -\bar{F}_{L_p L_x} \bar{I}_{L_x}, \quad (16)$$

то вектор напруг на індуктивних ребрах дорівнює:

$$\bar{U}_{L_p} = -\bar{L}_p \bar{F}_{L_p L_x} \frac{d}{dt} \bar{I}_{L_x} \quad (17)$$

і система рівнянь (14), з урахуванням (15) та (17), має вигляд:

$$\begin{cases} \bar{C}_p \frac{d}{dt} \bar{U}_{C_p} + \bar{0} \frac{d}{dt} \bar{I}_{L_x} = \bar{0} \bar{I}_{R_p} - \bar{F}_{C_p R_x} \bar{I}_{R_x} + \\ \quad + \bar{0} \bar{U}_{C_p} - \bar{F}_{C_p L_x} \bar{I}_{L_x} + \bar{0} \bar{U}; \\ \bar{0} \frac{d}{dt} \bar{U}_{C_p} + (\bar{L}_x + \bar{F}_{L_p L_x}^T \bar{L}_p \bar{F}_{L_p L_x}) \frac{d}{dt} \bar{I}_{L_x} = \\ \quad = \bar{F}_{R_p L_x}^T \bar{R}_p \bar{I}_{R_p} + \bar{0} \bar{I}_{R_x} + \bar{F}_{C_p L_x}^T \bar{U}_{C_p} + \\ \quad + \bar{0} \bar{I}_{L_x} + \bar{F}_{UL_x}^T \bar{U}. \end{cases} \quad (18)$$

Об'єднуючи рівняння системи (18) у матричне диференціальне рівняння, маємо:

$$\frac{d}{dt} \bar{X} = \bar{A}_4^{-1} (\bar{A}_5 \bar{I}_R + \bar{A}_6 \bar{X} + \bar{A}_7 \bar{U}), \quad (19)$$

де $\bar{A}_4 - \bar{A}_7$ – матричні коефіцієнти, які дорівнюють:

$$\bar{A}_7 = \begin{bmatrix} \bar{0} \\ \bar{F}_{UL_x}^T \end{bmatrix}; \quad \bar{A}_4 = \begin{bmatrix} \bar{C}_p & \bar{0} \\ \bar{0} & \bar{L}_x + \bar{F}_{L_p L_x}^T \bar{L}_p \bar{F}_{L_p L_x} \end{bmatrix};$$

$$\bar{A}_5 = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{C_p R_x} \\ \bar{F}_{R_p L_x}^T \bar{R}_p & \bar{0} \end{bmatrix}; \quad \bar{A}_6 = \begin{bmatrix} \bar{0} & -\bar{F}_{C_p L_x} \\ \bar{F}_{C_p L_x}^T & \bar{0} \end{bmatrix}.$$

Рівняння (1)–(6), (13), (19) є математичною моделлю дільничної електромережі шахти, яка дозволяє обчислювати значення струму i_{R_b} через опір R_b тіла людини (резистивну хорду b_{20}). Математичну модель пропонується подати у вигляді структурної схеми (рис. 4), яка містить наступні елементи: 1 – блок задавання матриці (8) головних перетинів, на виходах якого наявні значення компонентних матриць; 2 – блоки задавання значень вектора незалежних джерел напруги, причому значення фазних напруг u_A, u_B, u_C обчислюються згідно з (1)–(3); 3 – блок задавання опорів резистивних ребер; 4 – блок опору тіла людини; 5, 6 – блоки обчислення згідно з (4) та (5) відповідно до активних опорів та ємностей ізоляції фаз кабельної мережі; 7 – блок задавання коефіцієнта розладу v автокомпенсатора; 8 – блок обчислення за (6) індуктивності компенсуючого дроселя; 9–11 – блоки формування матриць опорів R -хорд, ємностей C -ребер та індуктивностей L -хорд відповідно; 12 – блок задавання матриці \bar{L}_p ; 13 – підсистема, що обраховує вектор струмів резистивних гілок графа \bar{I}_R згідно з (13); 14 – підсистема розв'язання (19); 15 – блок виділення значень струму i_{R_b} через опір тіла людини з \bar{I}_R .

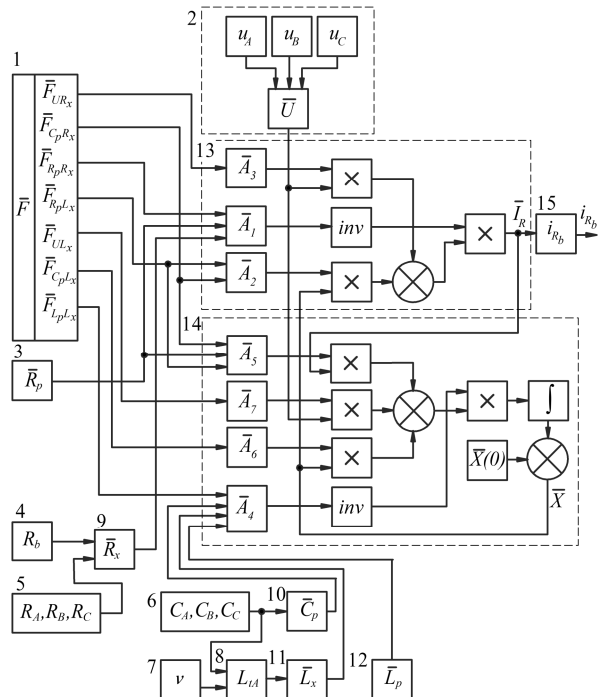


Рисунок 4 – Структурна схема математичної моделі дільничної електромережі шахти за наявності витoku струму на землю

З використанням наведеної математичної моделі у Simulink проведено розрахунок струму витoku через опір тіла людини для умов електромережі вугледобувної дільниці шахти (рис. 1) наступної конфігурації. До дільничної трансформаторної підстанції типу ВСТП-КРУ-1000/6-3(3,3) [2] (амплітуда фаз-

ної напруги на виході якої становить $U_{ms}=1900\sqrt{2}$ В, а частота $\omega_s=314$ рад/с) магістральним кабелем типу УНКGYFtлпн-3,6кV (з активним опором $R_{0x}=50$ кОм та ємністю $C_{0x}=0,5$ мкФ ізоляції відносно землі) під'єднано розподільчий пункт лави, до складу якого входять комутаційні апарати KA_1-KA_n , що живлять приводні електродвигуни вугледобувного комбайна, конвеєра, маслостанції та ін. Припустимо, що в момент $t_{st}=0$ с виникнення витоку через опір тіла людини був увімкнений тільки електродвигун M_1 привода скребкового конвеєра, тобто в схемі (рис. 1) можна прийняти $n=1$, причому вказаний двигун (потужністю 250 кВт, зі сталою часу затухання ЕРС вибігу $T_{c1}=0,9$ с та коефіцієнтом $k_1=120$ рад/с²) під'єднано до розподільчого пункту гнучким кабелем К1 типу КGE-HL 3x50+1x16+1x10 (з активним опором $R_{1x}=50$ кОм та ємністю $C_{1x}=0,2$ мкФ ізоляції відносно землі). Опори ґрунту виробки прийняті на рівні $R_{gx}=1$ Ом. Параметри схеми заміщення тіла людини ($R_{s1}=R_{s2}=200$ Ом; $R_b=1$ кОм; $R_f=10$ Ом; $C_{s1}=C_{s2}=0,22$ мкФ) прийняті відповідно до вимог [5]. Захисне відключення мережі здійснено в момент $t_{sw0}=0,1$ с, а комутаційний апарат KA_1 приєднання відключився в момент $t_{sw1}=0,4$ с. Автокомпенсатор ємнісної складової струму витоку на землю характеризується наступними значеннями параметрів (аналогічно до АЗУР-4): $R_{cx}=200$ Ом, $L_{cx}=22$ Гн, $\nu=0,05$ в.о., $R_t=114$ Ом.

Аналіз отриманих у результаті моделювання графіків (рис. 5) дозволяє встановити, що до моменту t_{sw0} захисного відключення автоматичного вимикача амплітуда та частота струму витоку через опір тіла людини лишаються незмінними, а після вказаного моменту – знижуються відповідно до затухання ЕРС вибігу двигуна, причому суттєве зниження амплітуди струму витоку має місце в момент t_{sw1} , що обумовлено зміною активно-ємнісних параметрів ізоляції мережі, які визначають величину струму витоку.

ВИСНОВКИ. Підвищення точності розрахунку перехідного процесу після захисного відключення мережі дільниці шахти досягнуто за рахунок урахування зниження з часом амплітуди та частоти ЕРС вибігу двигунів та зміни активно-ємнісних опорів ізоляції кабельної мережі, які визначають величину струму витоку на землю, що дало змогу вдосконалити математичну модель дільничної електромережі шахти. Надання електромережі дільниці шахти еквівалентною схемою заміщення, особливістю якої є наявність трифазного джерела, напруга якого до моменту захисного відключення мережі відповідає напрузі вторинної обмотки трансформаторної підстанції, після вказаного моменту – ЕРС групового вибігу двигунів електромережі, а після відключення комутаційних апаратів відгалужень – ЕРС вибігу двигуна аварійного відгалуження, дозволило засто-

сувати матрично-топологічний метод аналізу для формування матричного диференційного рівняння стану еквівалентної схеми заміщення, розв'язуючи яке чисельними методами, отримано діаграму струму через опір тіла людини.

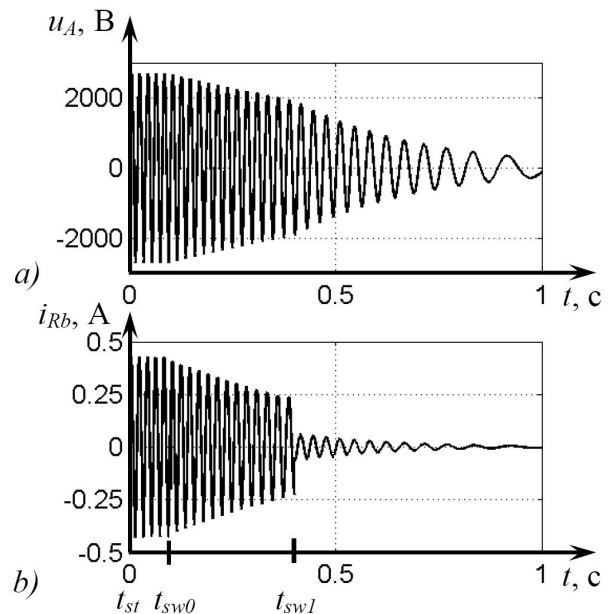


Рисунок 5 – Графіки, отримані при моделюванні: а – фазна напруга u_A джерела еквівалентної схеми заміщення мережі; б – струм через опір R_b тіла людини

Запропонована математична модель електромережі дільниці вугільної шахти при виникненні витоку струму на землю через опір тіла людини може бути використана для розрахунку параметрів перспективних апаратів автоматичного захисту. В ході подальших досліджень доцільно проаналізувати залежність ступеня електроураження людини від характеру механічного навантаження електродвигунів дільничної електромережі для виявлення найбільш небезпечних станів останньої.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шкрабец Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях. – Днепропетровск: НГУ, 2003. – 151 с.
2. Басов Н.М., Дзюбан В.С., Кардаш В.В. и др. Новое направление в создании рудничных взрывозащищенных трансформаторных подстанций на низшее напряжение до 3300 В // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2010. – С. 61–71.
3. Маренич К.М., Василець С.В. Обґрунтування ефективності гасіння електрорушійної сили вибігу двигунів як способу підвищення безпеки дільничного електротехнічного комплексу // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вип. 4/2012 (20). – С. 54–56.
4. Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гос-

тищев В.М. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / Под ред. Б.Н. Ванеева. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2001. – Т. 1.: (Гл. 1–21). – 447 с.; Т. 2.: (Гл. 22–44). – 440 с.

5. IEC 60990:1999 Methods of measurement of touch current and protective conductor current. – Режим доступу: <http://bbs.dianyuan.com/bbs/u/36/1133773449.pdf>.

6. Murthy P.S.R. Power system analysis. – Hyderabad: BS Publications, 2007. – 321 p.

7. Перхач В.С. Математичні задачі електроенергетики. – Львів: Вища школа, 1989. – 464 с.

8. Калабеков Б.А., Лapidус В.Ю., Малафеев В.М. Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.

9. Сивокобыленко В.Ф., Василець С.В. Математична модель електромережі дільниці шахти у змінних стану // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 6. – С. 61–67.

MATHEMATICAL MODEL OF MINE SECTION POWER NETWORK IN CASE OF CURRENT LEAKAGE ON THE GROUND THROUGH HUMAN BODY RESISTANCE

S. Vasylets

State Higher Educational Institution «Donetsk National Technical University»
vul. Artema, 58, Donetsk, 83001, Ukraine. E-mail: svyat.vasilets@gmail.com

Rising of the supply voltage level for mine section power network to 3.3 kV requires improvement of the automatic device for workers protection against electrical shock. Known dependences for state estimation of current leakage circuit through human body resistance ignore several factors, importance of which increases with supply voltage level rising, that does not allow using them to 3.3 kV networks. In this work the mathematical model of coal mine section power network was improved by taking into account: decreasing of frequency of induction motor back electromotive force after network supply voltage safety tripping; changing of resistance and capacitance of cable system insulation, which defining value of current leakage, when switching units of branches are tripping; dependence of inductance of self-balancing compensator for capacitive component of leakage current on total capacity of three phases insulation towards the ground. The mathematical model is presented as matrix differential equation, which was formed by using matrix-topological analysis method of electrical circuits. The results can be used during the design of new and improvement of existing protection devices against leakage current on the ground in the section network.

Key words: mine, section, power network, current leakage, electrical shock.

REFERENCES

1. Shkrabets, F.P., Shydlovskaya, N.A., Dziuban, V.S. and Varenik, Y.A. (2003), *Analiz parametrov i protsesov v shakhtnikh elektricheskikh setiakh* [Parameters and processes analysis in mine power network], National Mining University, Dnepropetrovsk, Ukraine. (in Russian)

2. Basov, N.M., Dziuban, V.S., Kardash, V.V., Koshkin, V.E. and Shvetsova, T.V. (2010), “New trend in creation of mine explosion-proof transformer substation with low voltage up to 3300 V”, *Vzryvozashchishchyennoe elektrooborudovanie: sbornik nauchnykh trudov*, pp. 61–71. (in Russian)

3. Marenich, K.M. and Vasylets, S.V. (2012), “Rationale for efficiency of motors stopway emf suppression as safety of section electrotechnical complex increasing method”, *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy*, Vol. 4, no. 20, pp. 54–56. (in Ukrainian)

4. Dzyuban, V.S., Shirmin, I.G., Vaneev, B.N. and Gostishchev, V.M. (2001), *Spravochnik energetika ugolnoy shakhty* [Mine power engineering reference book], 2nd revised ed., ООО «Yugo-Vostok, Ltd», Donetsk, Ukraine. (in Russian)

5. “IEC 60990:1999 Methods of measurement of touch current and protective conductor current”, available at: <http://bbs.dianyuan.com/bbs/u/36/1133773449.pdf> (accessed January 30, 2013).

6. Murthy, P.S.R. (2007), *Power system analysis*, BS Publications, Hyderabad, India,

7. Perkhatch, V.S. (1989), *Matematychni zadachi elektroenergetyki* [Mathematical tasks of power industry], Vyshcha shkola, Lviv, Ukraine. (in Ukrainian)

8. Kalabekov, B.A., Lapidus, V.Yu. and Malafeev, V.M. (1990), *Metodi avtomatizirovannogo rascheta elektronnykh skhem v tekhnike svyazi* [Methods of electronic circuit automated calculation in communication engineering], Radio i svyaz, Moscow, Russia. (in Russian)

9. Syvokobylenko, V.F. and Vasylets, S.V. (2012), “Mathematical model of mine section power network in state variables”, *Tekhnichna elektrodinamika*, no. 6, pp. 61–67. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 30.01.2013.