

УДК 622.012.2:621.311.1

Василець С. В., к.т.н. (ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», м. Донецьк)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ КОЛА ВИТОКУ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ ЧЕРЕЗ ТІЛО ЛЮДИНИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ

Удосконалено математичну модель електромережі дільниці вугільної шахти шляхом врахування зниження частоти ЕРС вибігу двигунів, яка підтримує струм в колі витоку на землю після захисного відключення мережі, що дозволяє підвищити точність оцінки безпеки експлуатації мережі.

Ключові слова: моделювання, вугільна шахта, електромережа, матриця, напруга, струм витоку, граф, частота, амплітуда.

Електромережа дільниці вугільної шахти включає вибухобезпечну дільничну трансформаторну підстанцію ДТП, до складу якої входять силовий трансформатор TP (потужністю до 1600 кВА, первинна напруга – 6 кВ або 10 кВ, вторинна – 0,66 кВ, 1,14 кВ або 3(3,3) кВ, нейтраль ізольована [1]), автоматичний вимикач KA_0 та апарат захисту від витоків струму на землю $A3$, використання якого є обов'язковим згідно Правил безпеки у вугільних шахтах, магістральний кабель MK , комутаційні апарати KA_1-KA_n (вибухобезпечні пускачі) відгалужень, до яких гнучкими кабелями GK_1-GK_n (довжинами до 200-300 м кожний з перетином жил до 120 мм²) підключені приводні асинхронні двигуни M_1-M_n (одинична потужність яких сягає 500 кВт) вугледобувного обладнання (рис. 1, а). Електрообладнання експлуатується у підземних виробках при високій вологості повітря, вмісті в атмосфері метану, вугільного пилу, впливі агресивної шахтної води, кабелі зазнають ударів при обваленні породи або вугілля, перекручувань, затискань під час переміщення гірничих машин тощо [2]. Це знижує активний опір та спричиняє механічні пошкодження ізоляції кабелів та електрообладнання, що підвищує, порівняно із загальнопромисловими підприємствами, імовірність ураження робітників шахт струмом [3]. Впродовж 2001–2007 рр. електрострумом на шахтах України було смертельно травмовано 46 чоловік. Електрообладнання стало причиною 8 з 14 вибухів газу та вугільного пилу та 16 спалахів метано-повітряної суміші [4]. У 2011 р. 3 чоловіки загинуло внаслідок ураження струмом, а

впродовж 10 місяців 2012 р. – 1 чоловік [5]. Необхідність підвищення безпеки експлуатації електромереж вугільних шахт шляхом удосконалення апаратів захисту обумовлює актуальність дослідження процесів в системі при виникненні витоку струму на землю через опір тіла людини.

При торканні людиною фази дільничної електромережі (наприклад, в точці D рис. 1, a) струм витоку має перехідну складову, що виникає при торканні струмопровідного елемента, усталену складову, яка підтримується ЕРС вторинної обмотки трансформатора ДТП, перехідну складову, що підтримується ЕРС групового вибігу двигунів M_1 - M_n від момента захисного відключення автоматичного вимикача KA_0 за сигналом апарата захисту $A3$ до момента відключення комутаційних апаратів KA_1 - KA_n (через зниження напруги на котушках керування) та перехідну складову, яка підтримується ЕРС вибігу двигуна відгалуження мережі, в якому стався виток струму на землю (двигуна M_n) [2]. Відома залежність, яка описує кількість електрики, що пройшла через опір кола витоку від момента вимкнення мережі до вимкнення комутаційних апаратів відгалужень [6]:

$$Q_3 = \sqrt{\frac{1}{t_3} \int_0^{t_3} I_{\text{вум}}^2 e^{-\frac{2t}{T_e}} dt} t_3 \approx 0,76 I_{\text{вум}} t_3, \quad (1)$$

де $t_3 \approx 0,6T_e$ – час, за який ЕРС вибігу знижується до $0,5U_{\text{ном}}$.

Вираз для обчислення кількості електрики через опір кола витоку від момента вимкнення контакторів пускачів відгалужень до повного затухання ЕРС двигуна відгалуження, де стався виток, має вигляд [7]:

$$Q_4 = \int_0^{t_4} K_2 I_{\text{вум}} e^{-\frac{t}{T_e}} dt = K_2 I_{\text{вум}} T_e \left(1 - e^{-\frac{t_4}{T_e}} \right) \approx 0,75 I_{\text{вум}} - 37,5, \quad (2)$$

де K_2 – коефіцієнт, що визначається відносним до $U_{\text{ном}}$ значенням вимкнення пускачів; t_4 – часовий інтервал від момента вимкнення пускачів до зниження струму витоку до припустимого значення.

Існуючі залежності, що описують стан кола витоку, не враховують зниження частоти ЕРС вибігу двигунів, яка підтримує струм в колі витоку на землю після захисного відключення мережі, що призводить до суттєвих похибок при розрахунку показників електробезпеки експлуатації дільничних електричних мереж. В умовах підвищення рівня напруги живлення дільничних електромереж до 3(3,3) кВ, збільшення потужностей приводних електродвигунів та ємності ізоляції кабелів, через збільшення довжини останніх, актуальним є питання підвищення

точності оцінки стану кола витoku струму на землю через опір тіла людини шляхом вдосконалення математичного опису перехідного процесу в колі витoku після захисного відключення мережі. Це дозволить підвищити електробезпеку дільничних електромереж шахт шляхом уточнення вимог до апаратів захисту від витоків струму на землю.

Метою роботи є підвищення точності оцінки стану кола витoku струму на землю через тіло людини в електромережі дільниці вугіль-

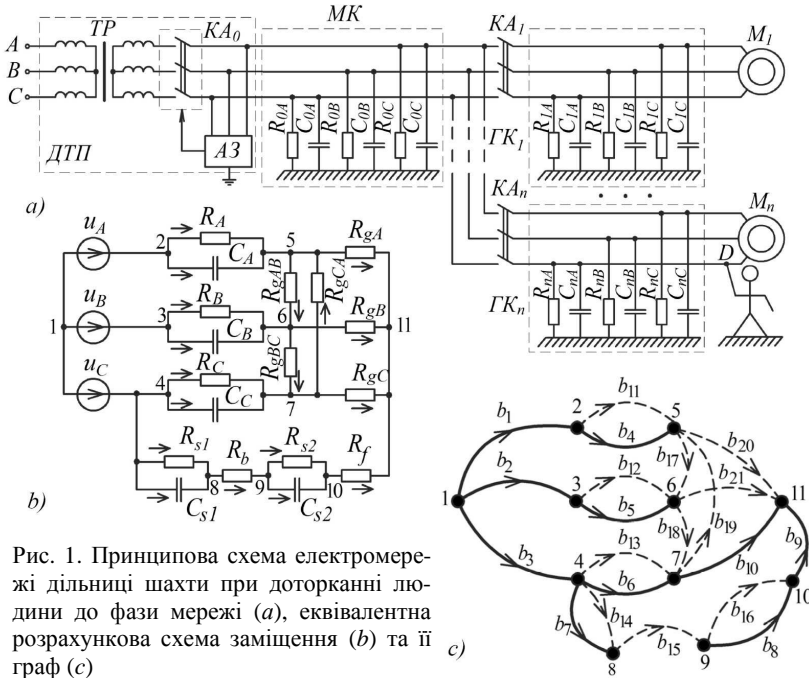


Рис. 1. Принципова схема електромережі дільниці шахти при доторканні людини до фази мережі (а), еквівалентна розрахункова схема заміщення (б) та її граф (с)

ної шахти.

Для схеми заміщення (рис. 1, а) можна скласти еквівалентну розрахункову схему заміщення (рис. 1, б) при наступних припущеннях: а) людина торкається рукою до однієї фази мережі; б) KM_0 відключається за командою $A3$ за визначений Правилами безпеки час; с) KA_1 - KA_n нумеруються в порядку відключення під час вибігу двигунів; д) комутаційний апарат відгалуження, в якому стався виток струму, відключається останнім (має номер n); е) активно-індуктивні опори жил кабелів не враховуються; ф) електромережа, за виключенням тіла лю-

дини, ємностей та активних опорів ізоляції кабелів відносно землі, подається у вигляді трифазного симетричного джерела напруги u_A, u_B, u_C , система напруг на виході якого до моменту захисного відключення мережі відповідає ЕРС вторинної обмотки TP , після вказаного моменту – ЕРС групового вибігу M_1-M_n , при відключенні KA_1-KA_n (внаслідок зниження напруги на обмотках керування) – ЕРС вибігу двигунів, які лишаються електрично з'єднаними з колом витoku струму на землю, а після відключення KA_n – ЕРС вибігу двигуна M_n ; *g*) активні опори та ємності ізоляції MK та GK_1-GK_n відносно землі представляються еквівалентними паралельними активно-ємнісними вітками R_x, C_x ($x=A, B, C$ – позначення фази), параметри яких змінюються при відключенні KA_1-KA_n ; *h*) для тіла людини враховуються активно-ємнісні опори шкіри руки в місці дотику до фази мережі (R_{s1}, C_{s1}) та опори шкіри ніг в місці торкання до взуття (R_{s2}, C_{s2}), активний опір тіла R_b , та опір взуття R_f ; *i*) враховуються взаємні активні опори ґрунту виробки $R_{gAB}, R_{gBC}, R_{gCA}$ між еквівалентними опорами ізоляції фаз мережі; *j*) враховуються активні опори ґрунту R_{gA}, R_{gB}, R_{gC} між еквівалентними опорами ізоляції фаз кабелів та місцем стояння людини; *k*) механічне навантаження електродвигунів – типу «різання». Для розрахункової схеми заміщення (рис. 1, *b*) складено граф (рис. 1, *c*), який складається з 11 вузлів, що з'єднані 21 віткою, причому вітки b_1-b_{10} утворюють дерево (3 незалежних джерела напруги, 5 ємнісних та 2 резистивних ребра), а вітки $b_{11}-b_{21}$ – доповнення дерева (11 резистивних хорд) [8]. З матриці інцидентій графа можна отримати матрицю головних перетинів:

$$\bar{F} = \begin{matrix} U \\ C_p \\ R_p \end{matrix} \begin{matrix} R_x \\ \left[\begin{matrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \\ \bar{F}_3 \end{matrix} \right] \end{matrix}, \quad (3)$$

де U, C_p, R_p – рядки незалежних джерел напруги, ємнісних ребер та хорд; R_x – стовпчики резистивних хорд; $\bar{F}_1, \bar{F}_2, \bar{F}_3$ – компонентні матриці.

Відповідно до матриці головних перетинів, рівняння стану резистивних елементів є наступними:

$$\begin{cases} \bar{I}_{R_p} = -\bar{F}_3 \cdot \bar{I}_{R_x}; \\ \bar{U}_{R_x} = \bar{F}_1^T \cdot \bar{U} + \bar{F}_2^T \cdot \bar{U}_{C_p} + \bar{F}_3^T \cdot \bar{U}_{R_p}; \end{cases} \quad (4)$$

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

Враховуючи закон Ома та об'єднуючи рівняння системи (4), можна виразити вектор струмів резистивних хорд:

$$\bar{I}_{R_x} = (\bar{R}_x + \bar{F}_3^T \cdot \bar{R}_p \cdot \bar{F}_3)^{-1} \cdot (\bar{F}_1^T \cdot \bar{U} + \bar{F}_2^T \cdot \bar{U}_{C_p}), \quad (5)$$

де \bar{R}_p , \bar{R}_x – діагональні матриці опорів резистивних ребер та хорд, які для схеми заміщення (рис. 1, *b*) мають вигляд:

$$\bar{R}_p = \text{diag}\{R_f \quad R_{gC}\}, \quad (6)$$

$$\bar{R}_x = \text{diag}\{R_A \quad R_B \quad R_C \quad R_{s1} \quad R_b \quad R_{s2} \quad R_{gAB} \quad R_{gBC} \quad R_{gCA} \quad R_{gA} \quad R_{gB}\}. \quad (7)$$

Вектор струмів ємнісних ребер, згідно (3), становить

$$\bar{I}_{C_p} = -\bar{F}_2 \cdot \bar{I}_{R_x}. \quad (8)$$

Напряга на ємнісних ребрах може бути обрахована згідно залежності

$$\bar{U}_{C_p} = \int (\bar{C}_p^{-1} \cdot \bar{I}_{C_p}) dt + \bar{U}_{C_p}(0), \quad (9)$$

де \bar{C}_p – матриця ємностей ребер, яка для рис. 1, *b* дорівнює

$$\bar{C}_p = \text{diag}\{C_A \quad C_B \quad C_C \quad C_{s1} \quad C_{s2}\}. \quad (10)$$

Напряги на виході джерел u_A , u_B , u_C мають відповідати напругам мережі в місці виникнення витоку струму на землю (припущення *f*), для чого їх амплітуди $U_m(t)$ та колові частоти $\omega(t)$ мають бути функціями часу

$$u_x(t) = U_m(t) \cdot \sin[\omega(t) \cdot t + \psi_x], \quad (11)$$

де $x=A, B, C$ – позначення фази; $\psi_A=0$, $\psi_B = -2\pi/3$, $\psi_C = 2\pi/3$.

Залежність амплітуд від часу $U_m(t)$ подамо в наступній формі:

$$U_m(t) = \begin{cases} U_{ms}, & \text{npu } t_{st} \leq t < t_{sw0}; \\ U_0(t), & \text{npu } t_{sw0} \leq t < t_{sw1}; \\ \dots & \\ U_{n-1}(t), & \text{npu } t_{swn-1} \leq t < t_{swn}; \\ U_n(t), & \text{npu } t_{swn} \leq t < t_{end}, \end{cases} \quad (12)$$

де t_{st} – момент доторкання людини до фази мережі; t_{swi} – момент відключення i -го комутаційного апарата KA_i , $i=0, \dots, n$; t_{end} – момент зниження ЕРС вибігу двигуна відгалуження з витоком до безпечного рівня; U_{ms} – амплітуда фазної напруги на виході трансформатора дільничної підстанції; $U_i(t)$ – амплітуда напруг в місці виникнення витоку струму на землю після відключення KA_i , що знижується експоненціально, причому:

$$U_0(t) = U_{ms} \cdot e^{-(t-t_{sw0})/T_{c0}}; \quad U_j(t) = U_{j-1}(t_{swj}) \cdot e^{-(t-t_{swj})/T_{cj}}, \quad (13)$$

де T_{ci} – стала часу зниження напруги у мережі, що підтримується ЕРС вибігу, після відключення KA_i ; $i=0, \dots, n$; $j=1, \dots, n$.

Залежність $\omega(t)$ можна представити наступним чином:

$$\omega(t) = \begin{cases} \omega_s, & \text{npu } t_{st} \leq t < t_{sw0}; \\ \omega_0(t), & \text{npu } t_{sw0} \leq t < t_{sw1}; \\ \dots & \\ \omega_{n-1}(t), & \text{npu } t_{swn-1} \leq t < t_{swn}; \\ \omega_n(t), & \text{npu } t_{swn} \leq t < t_{end}, \end{cases} \quad (14)$$

де ω_s – колова частота напруги на виході трансформаторної підстанції; ω_i – колова частота напруги в місці виникнення витоку струму на землю при відключенні KA_i , яка, при виконанні припущення k , знижується лінійно відповідно до гальмування роторів двигунів, що представляється наступним чином:

$$\omega_0(t) = \omega_s - k_0(t - t_{sw0}); \quad \omega_j(t) = \omega_{j-1}(t_{swj}) - k_j(t - t_{swj}), \quad (15)$$

де k_i – коефіцієнт, що характеризує лінійне зниження частоти ЕРС вибігу групи двигунів після відключення KA_i ; $i=0, \dots, n$; $j=1, \dots, n$.

Еквівалентні активні опори R_x та ємності C_x на розрахунковій схемі

