

**К.М. Маренич, С.В. Василюк**

Донецький національний технічний університет, м. Донецьк  
кафедра „Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова”  
E-mail: gea@dgtu.donetsk.ua

## **СТРУКТУРА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЦЕСІВ ПРИ ВИНИКНЕННІ ВИТОКУ СТРУМУ НА ЗЕМЛЮ В ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОМУ КОМПЛЕКСІ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ**

### **Анотація**

*Маренич К.М., Василюк С.В. Структура та дослідження математичної моделі процесів при виникненні витоку струму на землю в електротехнічному комплексі дільниці шахти. Обґрунтовано структуру та параметри математичної моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти, яка дозволяє аналізувати процес при виникненні витоку струму на землю з подальшим відключенням мережі.*

***Ключові слова:** електротехнічний комплекс, відключення, електрорушійна сила, асинхронний двигун, опір ізоляції, ураження електричним струмом, математична модель, електричні параметри.*

### **Постановка проблеми та її зв'язок з прикладними задачами.**

Електротехнічний комплекс технологічної дільниці вугільної шахти (ЕТК) являє собою сукупність асинхронних електродвигунів споживачів, кабельних ліній та силової комутаційної апаратури. Важкі умови експлуатації дільничного електротехнічного комплексу негативно впливають на стан його компонентів, збільшуючи вирогідність виникнення, зокрема, витоків струму на землю [1–5]. З підвищенням потужності електроспоживачів дільниці, збільшенням рівня живлячої напруги, довжини та перетину жил гнучких кабелів автоматичне відключення напруги живлення ЕТК [6] стає недостатнім для підтримання необхідного рівня безпеки експлуатації електрообладнання. Причина полягає в наявності електроуражаючого фактору з боку зворотньої ЕРС асинхронних двигунів споживачів. Актуальність дослідження умов формування зворотньої ЕРС двигунів в ЕТК після захисного відключення мережі та характеру впливу цього фактору на ланцюг витоку струму на землю обумовлена необхідністю розробки автоматичного пристрою примусового припинення дії цієї ЕРС.

**Стан питання.** Перехідні процеси в системі декількох асинхронних двигунів розглядаються в монографіях [7], проте розроблені моделі не враховують особливостей побудови та експлуатації дільничного ЕТК шахти. У [3] наводяться вирази для обчислення електромагнітних сталих часу під час вибігу електродвигунів, але наведені залежності не враховують вплив зрівнювальних струмів, що протікають між двигунами. Складові струму витоку на землю, що обумовлені ЕРС електродвигунів після захисного відключення, описані у роботах [2, 4]. Проте, відсутня цілісна математична модель дільничного ЕТК, яка б дозволяла аналізувати процеси в системі при виникненні однофазного витоку струму на землю з подальшим централізованим захисним відключенням мережі. Дана робота присвячена обґрунтуванню структури та параметрів такої математичної моделі.

**Постановка задачі.** Задачею дослідження є обґрунтування структури та параметрів математичної моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти, яка, враховуючи сукупність факторів впливу, дозволить аналізувати та кількісно оцінювати процеси в дільничному ЕТК під час виникнення однофазного витоку струму на землю із урахуванням взаємодії компонентів системи.

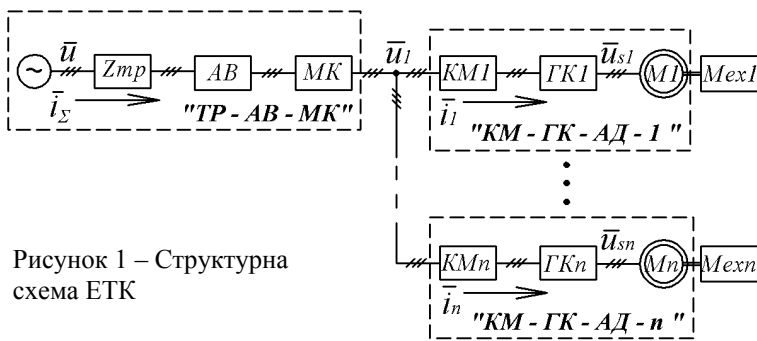


Рисунок 1 – Структурна схема ЕТК

гнучкий кабель; АД – асинхронний двигун; Мех – механізм (машина) очисного вибою;  $\bar{u}$  – просторовий вектор ЕРС, що наводиться у вторинній обмотці дільничного трансформатора основним магнітним потоком;  $\bar{i}_\Sigma$  – просторовий вектор струму у загальній частині мережі;  $\bar{i}_m$  – просторовий вектор струму  $m$ -го відгалуження ( $m = \overline{1, n}$ );  $\bar{u}_{sm}$  – просторовий вектор напруги на затискачах  $m$ -го двигуна. В загальній частині мережі встановлено автоматичний вимикач (АВ).

Розіб'ємо наведену на рис. 1 схему на декілька частин. Позначимо елементи, що являють собою загальну частину мережі, "TP-AB-MK". Ця частина складається з вторинної обмотки дільничного силового трансформатора, автоматичного вимикача та магістрального кабеля. Інші частини, що позначені "KM-GK-AD-m", являють собою відгалуження споживачів дільниці, які, при ідентичній структурі, характеризуються різними параметрами елементів. До складу кожної з таких частин входить контактор, відрізок гнучкого кабелю та асинхронний двигун. Обґрунтуємо математичну модель кожної з наведених частин.

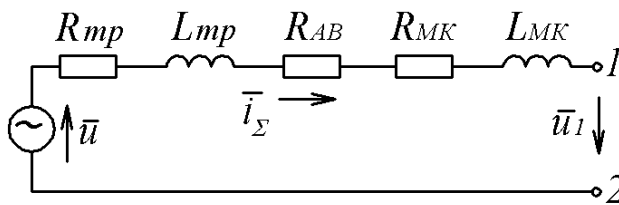


Рисунок 2 – Схема заміщення загальної частини мережі "TP-AB-MK"

за безкінечно малий проміжок часу за відсутності електричної дуги, припустимо, що при замкнених контактах автоматичного вимикача  $R_{AB} = R_{AB \min}$ , а при розімкнених -  $R_{AB} = R_{AB \max}$ , тоді:

$$R_{AB} = \begin{cases} R_{AB \max}, & \text{якщо } \alpha = 1; \\ R_{AB \min}, & \text{якщо } \alpha = 0, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\alpha$  – змінна, що визначає стан автоматичного вимикача: при  $\alpha = 1$  контакти АВ розімкнені, при  $\alpha = 0$  – замкнені:

$$\alpha = \alpha' \vee \alpha'' \vee \alpha''' \quad (2)$$

де  $\alpha'$  – змінна, що визначає наявність команди обслуговуючого персоналу на відключення автоматичного вимикача ( $\alpha'' = 1$  – розімкнуті контакти АВ);  $\alpha''$  – змінна, що приймає значення  $\alpha'' = 1$  при наявності команди від незалежного розчеплювача на відключення АВ;  $\alpha'''$  – змінна, що дорівнює логічній одиниці при наявності інших команд на відключення автоматичного вимикача (наприклад, від максимального струмового розчеплювача, нульового розчеплювача напруги і т.і.); оператор " $\vee$ " позначає логічну операцію "АБО".

### Основний матеріал і результати досліджень.

Розглянемо структурну схему ЕТК, що побудована за радіальним принципом (рис. 1). На схемі прийняті позначення: TP – трансформатор дільничної трансформаторної підстанції;  $Z_{mp}$  – повний опір вторинної обмотки TP; МК – магістральний кабель; KM – контактор магнітний; GK –

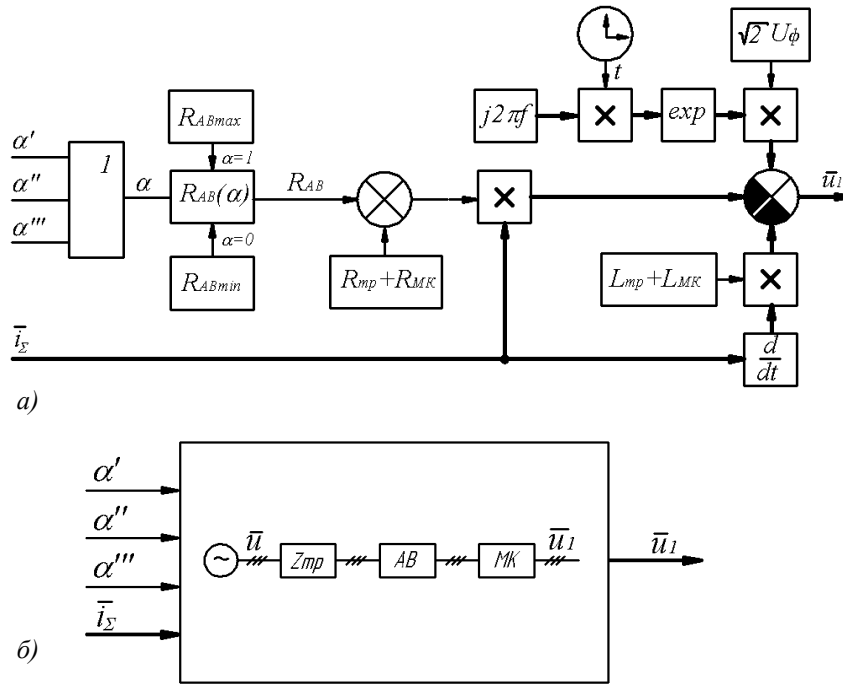


Рисунок 3 – Структурна схема моделі “ТР–АВ–МК”:  
а) розгорнутий вигляд; б) єдиним блоком

За умови симетрії трифазної системи, користуючись методом просторового вектора [9], запишемо диференціальне рівняння, що описує процеси у схемі заміщення, наведеній на рис. 2:

$$\bar{u}_1 = \bar{u} - (R_{mp} + R_{AB} + R_{MK})\bar{i}_\Sigma - (L_{mp} + L_{MK})\frac{d\bar{i}_\Sigma}{dt}. \quad (3)$$

Значення просторового вектора  $\bar{u}$  визначаються у такий спосіб:

$$\bar{u} = \sqrt{2}U_\phi e^{j2\pi ft}, \quad (4)$$

де  $U_\phi$  – ефективне значення фазної ЕРС вторинної обмотки ТР;  $f$  – частота напруги мережі.

Залежності (1)– (4) являють собою математичну модель загальної частини мережі “ТР – АВ – МК”. Структурна схема моделі, що реалізує вказані залежності, наведена на рис. 3.

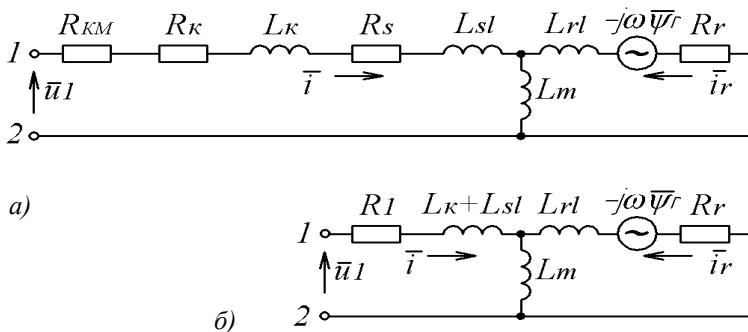


Рисунок 4 – Схема заміщення відгалуження “КМ – ГК – АД”: а) вихідна; б) при прийнятих позначеннях

На рис. 4,а наведена схема заміщення відгалуження  $m$ -го споживача дільниці (з метою спрощення далі індекс  $m$  випускається). На схемі використовуються такі позначення:  $R_{KM}$  – активний опір фази контактора;  $R_K, L_K$  – активний опір та індуктивність відрізка гнучкого кабелю. Позначимо:

$$R_l = R_{KM} + R_K + R_S; \quad (5)$$

$$L_l = L_K + L_{sl} + L_m.$$

Схема заміщення відгалуження “КМ – ГК – АД” за даних позначень наведена на рис. 4, б. Запишемо рівняння електричної рівноваги у нерухомій системі координат. Додаючи до них основне рівняння динаміки двигуна (розрахунок ведеться для еквівалентної двополусної машини), отримуємо систему диференціальних рівнянь, що описує процеси у відгалуженні “КМ – ГК – АД”:

$$\begin{cases} \bar{\psi}_1 = \int (\bar{u}_1 - \bar{i} R_1) dt + \bar{\psi}_1(0); \\ \bar{\psi}_r = \int (j \omega \bar{\psi}_r - \bar{i}_r R_r) dt + \bar{\psi}_r(0); \\ \omega = \frac{1}{J} \int (M - M_c) dt + \omega(0), \end{cases} \quad (6)$$

де  $\bar{\psi}_1$  – сумарне потокозчеплення статора АД та ГК;  $\bar{\psi}_r$  – потокозчеплення ротора АД;  $M = -1,5 \bar{\psi}_r \times \bar{i}_r$  – електромагнітний момент двигуна;  $\bar{i}_r = (L_1 \bar{\psi}_r - L_m \bar{\psi}_1) / (L_1 L_r - L_m^2)$ ;  $\bar{i} = (L_r \bar{\psi}_1 - L_m \bar{\psi}_r) / (L_1 L_r - L_m^2)$ ;  $M = -1,5 \text{Im}[\hat{\psi}_r \bar{i}_r]$ ;  $\omega = p \omega'$ ;  $M = M' / p$ ;  $J = J' / p^2$ ;  $\omega'$ ,  $M'$ ,  $J'$  – величини, що характеризують АД з кількістю пар полюсів  $p$ .

Вважаючи комутації КМ ідеальними, припустимо, що при замкнених контактах  $R_{KM} = R_{KM \text{ min}}$ , а при розімкнених -  $R_{KM} = R_{KM \text{ max}}$ , тоді:

$$R_{KM} = \begin{cases} R_{KM \text{ max}}, & \text{якщо } \beta = 1; \\ R_{KM \text{ min}}, & \text{якщо } \beta = 0, \end{cases} \quad (7)$$

де  $\beta$  – змінна, що визначає стан КМ: при  $\beta = 1$  контакти розімкнені, при  $\beta = 0$  – замкнені.

$$\beta = \beta' \vee \beta'' \vee \beta''' \quad , \quad (8)$$

де  $\beta'$  – змінна, що визначає наявність команди обслуговуючого персоналу на відключення контактору ( $\beta' = 1$  – розімкнуті контакти КМ);  $\beta''$  – змінна, що приймає значення  $\beta'' = 1$  при відключенні КМ захистом мінімальної напруги;  $\beta'''$  – змінна, що дорівнює логічній одиниці при наявності інших команд на відключення КМ:

$$\beta'' = \text{sign}(1 - \text{sign} \xi) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \xi > 0; \\ 1, & \text{якщо } \xi \leq 0. \end{cases} \quad (9)$$

де  $\xi = U_1 - k_z U_{\phi n}$ ;  $U_1$  – ефективне значення фазної напруги на вході контактора;  $U_{\phi n}$  – номінальне значення фазної напруги;  $k_z$  – відносне значення напруги, при якому контактор відключається захистом мінімальної напруги. З метою визначення значень просторового вектора напруги на затискачах статора АД слід скористатися виразом:

$$\bar{u}_s = \bar{i} R_s + L_s \frac{d\bar{i}}{dt} + L_m \frac{d\bar{i}_r}{dt} \quad . \quad (10)$$

Залежності (5) – (10) являють собою математичну модель відгалуження “КМ–ГК–АД”, що враховує вплив захисту мінімальної напруги контактора на перехідні процеси у системі, а також дозволяє обчислювати напругу на затискачах статора двигуна. Структурна схема, що відповідає розробленій математичній моделі, наведена на рис. 5. Слід мати на увазі, що згідно першому закону Кірхгофа алгебраїчна сума струмів у відгалуженнях дорівнює струмові у загальній частині мережі:

$$\bar{i}_\Sigma = \sum_{j=1}^n \bar{i}_j \quad . \quad (11)$$

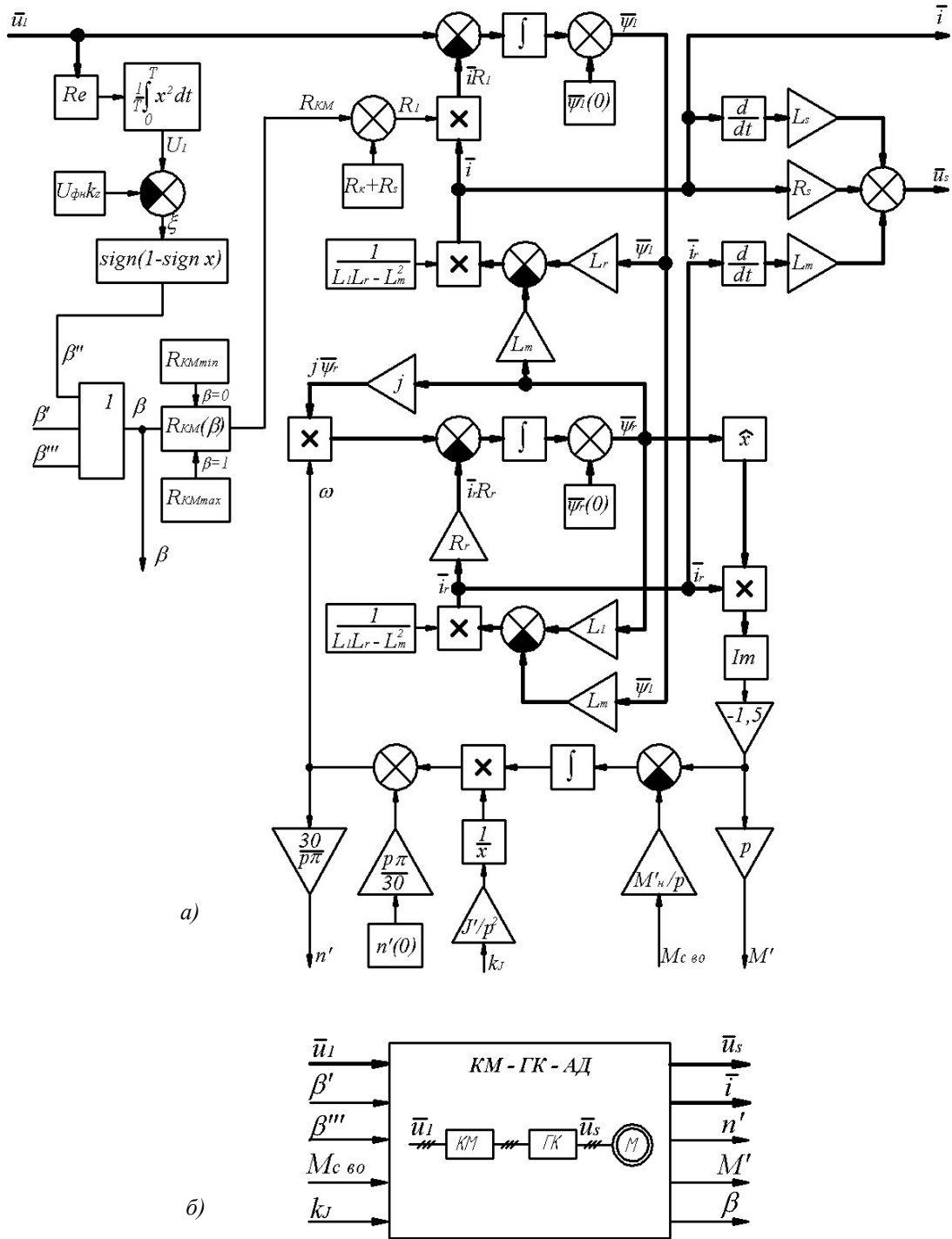


Рисунок 5 – Структурна схема відгалуження “КМ – ГК – АД”: а) розгорнутий вигляд; б) єдиним блоком

Отримані моделі загальної частини мережі “ТР-АВ-МК” та відгалужень “КМ-ГК-АД”, а також співвідношення (11) дозволяють скласти структурну схему моделі ЕТК, яка наведена на рис. 6.

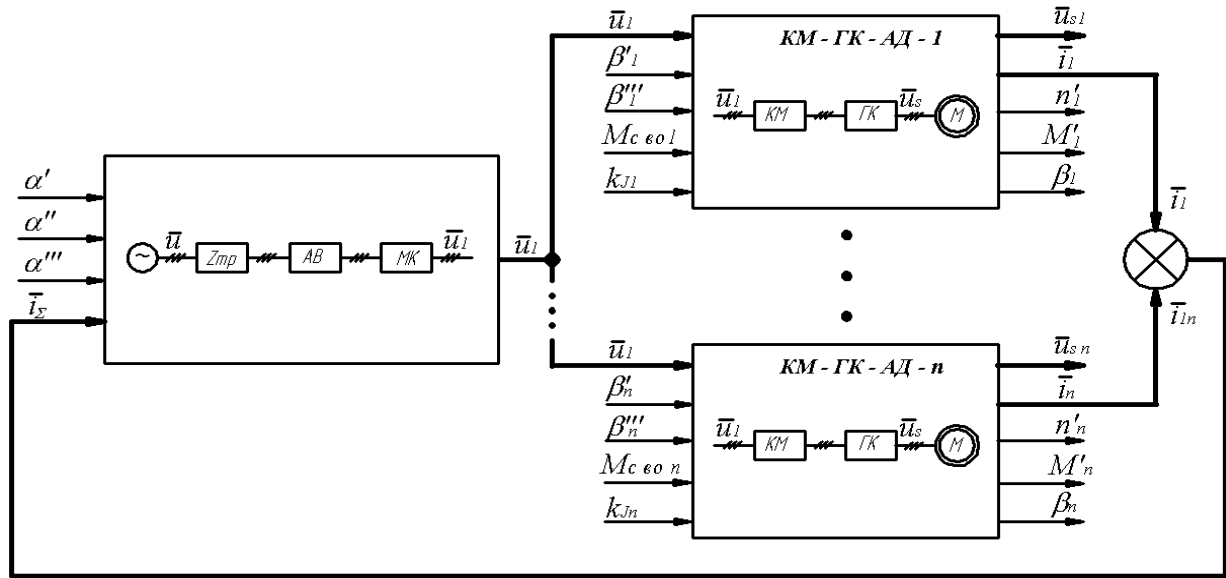


Рисунок 6 – Структурна схема моделі ЕТК

Припустимо, що ємності та активні опори ізоляції фаз кабельної мережі ділянки відносно землі є симетричними та зосередженими в місці виникнення витoku. Подамо сукупність елементів ЕТК, що мають електричний зв'язок із аварійною точкою, у вигляді трифазного симетричного джерела напруги, до якого під'єднано модель ізоляції кабельної мережі та опір ланцюга витoku, як це ілюструє рис. 7, а. У [3] обґрунтовано правомірність переходу від вказаної схеми до однофазної схеми заміщення, що приведена на рис. 7, б, причому виконуються наступні співвідношення:

$$C_{i3\phi} = 3C_{i3\phi}; \quad R_{i3\phi} = R_{i3\phi}/3, \tag{12}$$

де  $C_{i3\phi}$ ,  $R_{i3\phi}$  – відповідно сукупна ємність та активний опір ізоляції фази кабелів, що мають електричний зв'язок із місцем виникнення витoku струму на землю.

Враховуючи зміну конфігурації системи, що розглядається, під час вибігу двигунів через відключення контакторів захистом мінімальної напруги, значення  $C_{i3\phi}$  та  $R_{i3\phi}$  не лишатимуться сталими. Обчислити вказані величини у довільний момент можна за допомогою виразів:

$$C_{i3\phi} = \bar{\beta}_k \left( C'_{i3\phi} + \sum_{i=1}^n \bar{\beta}_i C''_{i3\phi i} \right) + \beta_k C''_{i3\phi k} = f(C'_{i3\phi}, \{C''_{i3\phi i}\}, \{\beta_i\}, k); \tag{13}$$

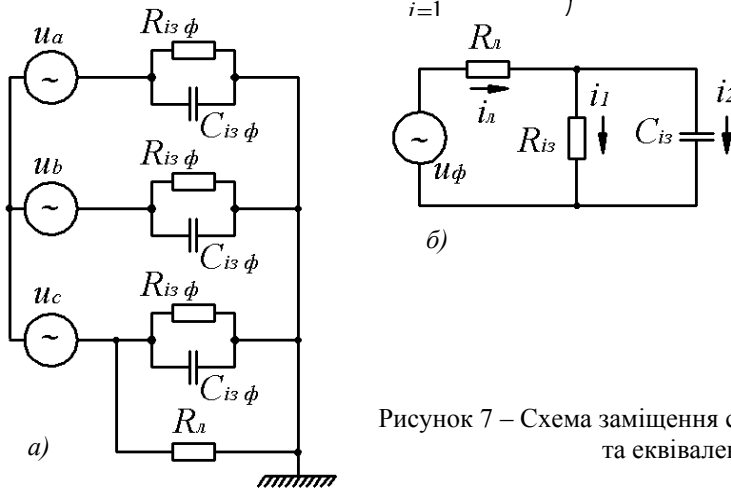


Рисунок 7 – Схема заміщення системи за наявності однофазного витoku (а) та еквівалентна схема заміщення (б)

$$R_{i3 \phi} = \left[ \bar{\beta}_k \left( \frac{1}{R'_{i3 \phi}} + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\beta}_i}{R''_{i3 \phi i}} \right) + \frac{\beta_k}{R''_{i3 \phi k}} \right]^{-1} = f(R'_{i3 \phi}, \{R''_{i3 \phi i}\}, \{\beta_i\}, k) \quad (14)$$

де символ  $\bar{\beta}$  позначає значення змінної  $\beta$ , до яких застосована логічна функція “НП”;  $k$  – номер відгалуження, де стався виток струму;  $C'_{i3 \phi}$ ,  $R'_{i3 \phi}$  – ємність та активний опір ізоляції фази МК, відповідно;  $C''_{i3 \phi i}$ ,  $R''_{i3 \phi i}$  – аналогічні параметри ГК  $i$ -го відгалуження.

На основі законів Кірхгофа складемо рівняння, що описують процеси у схемі (рис. 7б):

$$\begin{cases} i_l = i_1 + i_2 ; \\ i_2 = \frac{1}{R_l} [u_\phi - i_1(R_l + R_{i3})]; \\ i_1 = \frac{1}{R_l} \left( u_\phi - i_2 R_l - \frac{1}{C_{i3}} \int i_2 dt \right). \end{cases} \quad (15)$$

Наведені вирази (12) – (15) являють собою математичну модель однофазного витoku струму на землю при прийнятих припущеннях, яка дозволяє обчислювати значення струму витoku від моменту його виникнення  $t_1$  до моменту  $t_{mk}$  згасання зворотньої ЕРС двигуна, в ланцюзі якого стався виток (рис. 8).

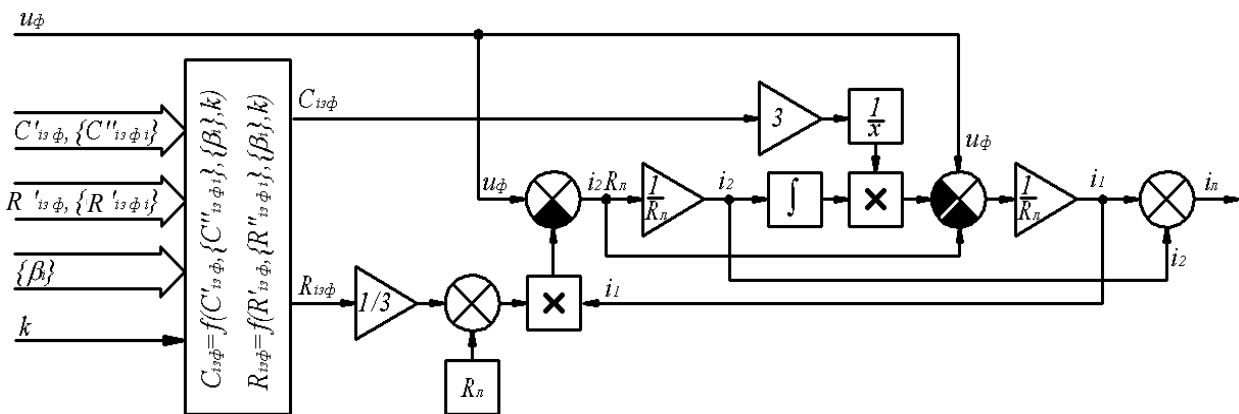


Рисунок 8 – Структура реалізації математичної моделі за сукупністю виразів (12)-(15)

Кількість електрики, що пройшла через опір ланцюга однофазного витoku струму з моменту  $t_1$  до моменту  $t_{mk}$  обчислюється згідно залежності:

$$q = \int_{t_1}^{t_{mk}} I_l dt, \quad (16)$$

де  $I_l = I_l(t)$  – ефективне значення струму витoku через опір тіла людини, що змінюється з перебігом аварійної ситуації.

З метою проведення моделювання згідно розробленої математичної моделі обґрунтуємо вибір конкретних параметрів системи. Прийнемо, що на дільниці працює механізований комплекс 1МКД90, до складу якого входить комбайн КА-80 та скребокний конвеєр СПЦ-163-13.

Комбайн КА-80 обладнано двигуном 2ЭКВ3,5-180 потужністю 180 кВт, конвеєр має два приводних блоки, кожен з яких обладнано асинхронним двигуном 2ЭДКОФВ250LB4 потужністю 110 кВт.

В подальшому будемо моделювати роботу комбайнового двигуна (М1) та АД верхнього приводного блоку конвеєра (М2) у складі ЕТК. Номінальна напруга живлення - 660 В. З'єднання статорних обмоток АД - за схемою "трикутник". З метою обчислення параметрів схем заміщення двигунів за їх паспортними даними (останні наведені у [6]) використовується методика з роботи [8].

Моменти на валах двигунів приймаються сталими величинами, що дорівнюють 20% від номінального значення. Типи та довжини гнучких кабелів наступні: комбайновий ГК – КГЭШ 3x70 довжиною 300м; ГК верхнього приводного блоку конвеєра – КГЭШ 3x25 довжиною 300м. Приймемо, що дільничний ЕТК живиться від трансформаторної підстанції ТСВП-630 за допомогою магістрального кабеля ЭВТ 3x95 довжиною 200м.

Параметри кабелів наведено у [6]. Напруга, за якої відбувається відключення контакторів захистом мінімальної напруги, складає 0,5 від номінальної. Вважатимемо, що в разі виникнення витоку струму апарат захисту подасть команду на відключення АВ за 0,2 с.

Згідно розробленої математичної моделі побудована комп'ютерна модель для випадку спільної роботи двох двигунів ( $n = 2$ ).

В комп'ютерну модель введені вказані вище параметри елементів ЕТК. Моделювання проводилося у наступній послідовності. До моменту модельного часу  $t_1 = 1,8$ с двигуни працювали у штатному режимі. У момент  $t_1$  на статорних затискачах одного з двигунів виникає однофазний виток струму через опір тіла людини ( $R_{л} = 1$ кОм). У момент  $t_2 = 2$ с АВ відключається командою від реле витоку. У момент модельного часу  $t_3 = 2,14$ с напруга на контакторах знизилася до 0,5 від номінальної, що призводить до відключення контакторів захистом мінімальної напруги. Проведене моделювання дозволило отримати діаграми, наведені на рис. 9.

Аналіз діаграм дозволяє встановити наступне. До моменту  $t_1$  виникнення витоку режим роботи двигунів системи визначається характером навантаження та параметрами гнучких кабелів (рис. 9 а-в). З моменту  $t_1$  виникнення витоку у відгалуженні одного з двигунів і до моменту  $t_2$  відключення АВ (пристроєм захисту від витоків струму) через опір тіла людини тече струм витоку (рис. 9 г), що обумовлений напругою живлячої мережі та параметрами ізоляції кабелів, які мають електричний зв'язок із аварійною точкою.

Кількість електрики, що пройшла через опір тіла людини, збільшується за лінійним законом в функції часу (рис. 9 д).

У момент  $t_2$  модельного часу відбувається відключення АВ, двигуни споживачів переходять до режиму групового вибігу, який характеризується наявністю у системі ЕРС групового вибігу.

Її амплітуда знижується за експонентою (рис. 9 а).

Оскільки параметри двигунів не є однаковими, у відгалуженнях протікають зрівнювальні струми (рис. 9 б).

Вказані струми та ЕРС групового вибігу обумовлюють наявність електромагнітних моментів двигунів (рис. 9 б).

Під час групового вибігу зниження частот обертання роторів АД (рис. 9 в) визначається як характером навантаження, так і наявністю вказаних електромагнітних моментів від зрівнювальних струмів.



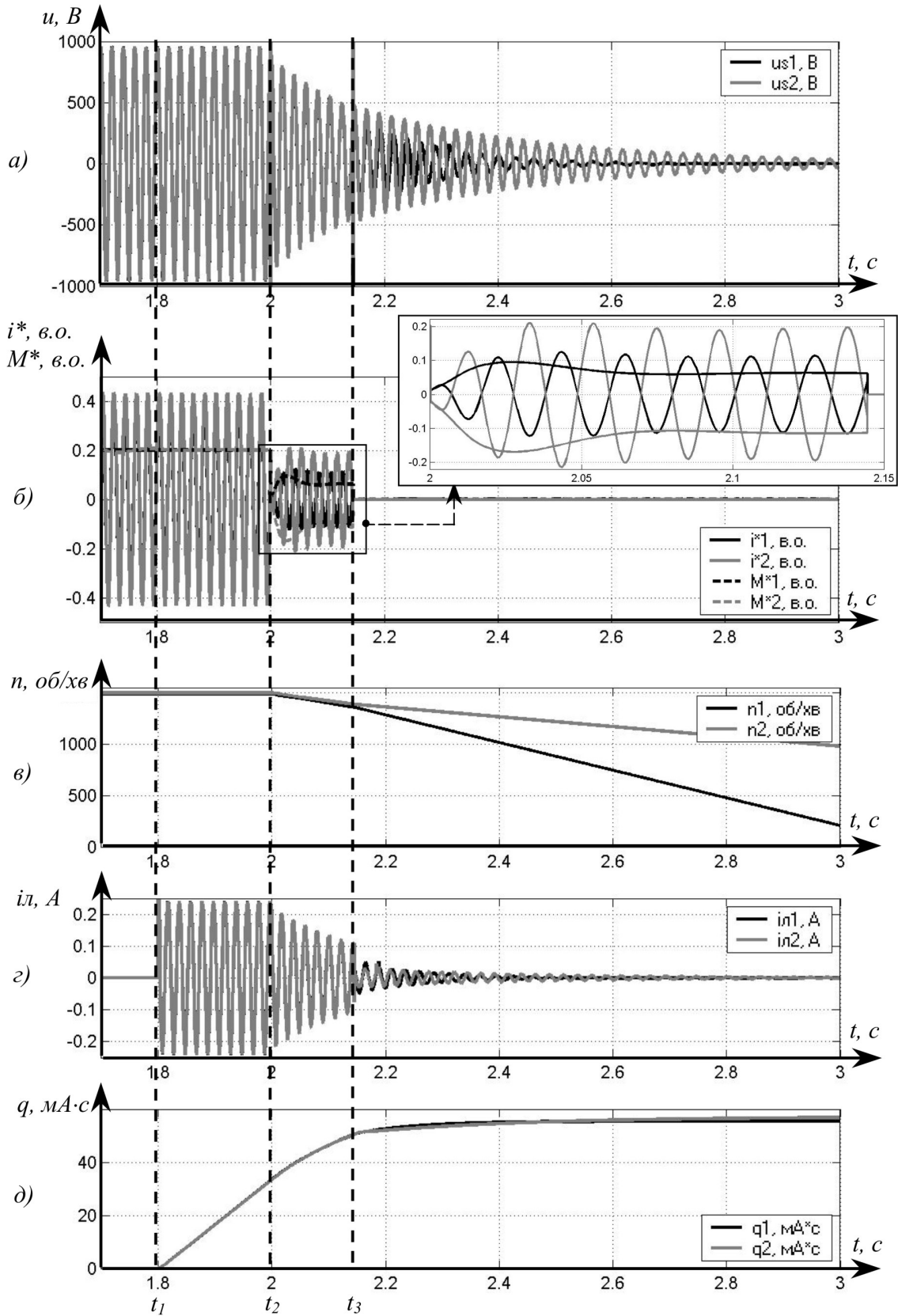


Рисунок 9 – Діаграми, отримані в результаті моделювання: а) миттєві значення напруг (фаза А) на затискачах статорів двигунів; б) миттєві значення фазних струмів (фаза А) та електромагнітних моментів двигунів; в) частоти обертання роторів двигунів; г) струм витоку через опір тіла людини при виникненні витоку в ланцюзі першого ( $i_{л1}$ ) та другого ( $i_{л2}$ ) двигунів; д) кількість електрики, що пройшла через опір тіла людини ( $R_T=1\text{кОм}$ ), за умови виникнення витоку в ланцюзі першого ( $q_1$ ) та другого ( $q_2$ ) АД

Струм витоку (рис. 9 з) та кількість електрики (рис. 9 д), що пройшла через опір тіла людини під час групового вибігу двигунів, визначаються ЕРС групового вибігу та параметрами ізоляції кабелів, що мають електричний зв'язок із місцем виникнення витоку.

Під час групового вибігу двох двигунів один з них (в даному випадку – М1) працює у руховому режимі, споживаючи активну потужність, а інший (М2) переходить до генераторного режиму. Про це свідчать знаки електромагнітних моментів АД (рис. 9 б): момент першого двигуна є додатним, другого – від'ємним.

В момент  $t_3$  напруга на КМ знижується до критичного рівня, що призводить до відключення контакторів захистом мінімальної напруги. Починаючи з даного моменту двигуни переходять до режиму одиночного вибігу, генеруючи відмінні зворотні ЕРС, які визначаються параметрами та умовами вибігу кожного з двигунів (рис. 9 а).

При наявності витоку в ланцюзі  $k$ -го двигуна струм витоку та кількість електрики, що пройшла через опір тіла людини за час одиночного вибігу двигунів, визначаються параметрами ізоляції  $k$ -го ГК та зворотною ЕРС одиночного вибігу  $k$ -го АД (рис. 9 з, д).

Аналіз залежності кількості електрики, що пройшла через опір тіла людини, від часу (рис. 9 д) дозволяє встановити, що при вказаних параметрах системи від моменту виникнення витоку до моменту відключення АВ,  $q$  складає 33 мА·с. На інтервалі групового вибігу через опір тіла людини пройшло 17 мА·с. На інтервалі одиночного вибігу при виникненні витоку в ланцюзі першого з двигунів через опір тіла людини пройшло 5 мА·с, другого з двигунів – 7 мА·с.

Загальна кількість електрики, що пройшла через опір тіла людини при виникненні витоку в ланцюзі М1 складає 55 мА·с, а при виникненні витоку в ланцюзі М2 – 57 мА·с.

#### **Висновки та напрямок подальших досліджень.**

Таким чином, обґрунтовано структуру та параметри математичної моделі ЕТК, яка при прийнятих припущеннях, враховуючи сукупність факторів впливу, дозволяє аналізувати та кількісно оцінювати процеси в системі при виникненні однофазного витоку струму на землю з подальшим централізованим захисним відключенням мережі.

Модель дозволяє встановити реальні фактори електроураження людини при контакті її з елементами дільничного електротехнічного комплексу в залежності від параметрів і конфігурації останнього.

Отримані результати обґрунтовують доцільність розробки технічних рішень щодо примусового припинення дії зворотніх ЕРС асинхронних двигунів споживачів після захисного відключення мережі.

#### **Література**

1. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С., Шидловська Н.А., Шкрабець Ф.П.]; за ред. Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. – 334 с.
2. Анализ параметров и процессов в шахтных электрических сетях / [Шкрабець Ф.П., Шидловская Н.А., Дзюбан В.С., Вареник Е.А.]. – Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2003. – 151 с.
3. Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях / Дзюбан В.С. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
4. Ягудаев Б.М. Защита от электропоражения в горной промышленности / Ягудаев Б.М., Шишкин Н.Ф., Назаров В.В. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
5. Колосюк В.П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок / Колосюк В.П. – М.: Недра, 1987. – 407 с.

6. Справочник энергетика угольной шахты / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – [2-е изд.] – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001 – Т1, - 447 с.
7. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац.– М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963.- 744 с.
8. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / [Сыромятников И.А.]; под ред. Л.Г.Мамиконянца. – [4-е изд., перераб и доп.]. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.

#### **Abstract**

**Marenych K.N., Vasylets S.V.** *Structure and analysis of mathematic model of processes which constrained with leakages of electrical current to the earth in divisional electrotechnical complex of mine. The structure and parameters of mathematic model of mining divisional electrotechnical complex which is conductive to make an analysis processes which constrained with leakages of electrical current to the earth and subsequent disconnection of electrical grid.*

**Keywords:** *electrotechnical complex, disconnection, electromotive force, asynchronous motor, resistance of isolation, electric-shock, mathematic model, electrical parameters*

#### **Аннотация**

**Маренич К.Н., Василец С.В.** *Структура и исследование математической модели процессов при возникновении утечки тока на землю в электротехническом комплексе участка шахты. Обоснована структура и параметры математической модели электротехнического комплекса участка шахты, которая позволяет анализировать процессы при возникновении утечки тока на землю с последующим отключением сети*

**Ключевые слова:** *электротехнический комплекс, отключение, электродвижущая сила, асинхронный двигатель, сопротивление изоляции, поражение электрическим током, математическая модель, электрические параметры.*

Здано в редакцію:  
03.03.2010 р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Ковальов Є.Б.