

**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
“ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ”**

ВАСИЛЕЦЬ СВЯТОСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ

УДК 622.012.2:621.311.1

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В
БАГАТОМАШИННИХ ШАХТНИХ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
КОМПЛЕКСАХ**

Спеціальність 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Донецьк – 2010

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Міністерства освіти і науки України, м. Донецьк

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Маренич Костянтин Миколайович,
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,
завідувач кафедри «Гірнична електротехніка і автоматика
ім. Р.М. Лейбова»

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Шкрабець Федір Павлович,
Національний гірничий університет,
завідувач кафедри «Електричні машини»,
м. Дніпропетровськ;

кандидат технічних наук
Савицький Володимир Миколайович,
заступник директора з наукової роботи Українського
науково-дослідного, проектно-конструкторського та
технологічного інституту вибухозахисного та
рудникового електрообладнання з дослідно-
експериментальним виробництвом, м. Донецьк

Захист відбудеться «10» червня 2010 р. о 13¹⁵ годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д11.052.02 в ДВНЗ «Донецький національний
технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58,
VIII навчальний корпус, ауд. 514.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ДВНЗ «Донецький національ-
ний технічний університет» (83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, II навчальний
корпус).

Автореферат розісланий «05» травня 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д11.052.02, к.т.н., доц.

А.М. Ларін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасні тенденції до підвищення вуглевидобутку вимагають збільшення потужності машин та механізмів технологічних дільниць шахт за рахунок підняття рівня живлячої напруги до 1140 В та 3000 В, використання електродвигунів підвищеної потужності, збільшення довжини та перетину жил кабельних ліній. Підвищення енергооснащеності вуглевидобувного обладнання впливає на характер протікання перехідних процесів, що пов'язані з централізованим вимкненням напруги, у багатомашинних електротехнічних комплексах (ЕТК), обумовлюючи збільшення показників якості цих процесів до величин, що не узгоджуються з діючими нормативами на застосування шахтних дільничних ЕТК. Зокрема, це стосується випадку захисного вимкнення електромережі технологічної дільниці шахти в разі наявності небезпечного струму витоку на землю. Збільшення рівнів та інтервалів існування електрорушійної сили (ЕРС) вибігу двигунів (через збільшення потужності останніх) та ємності ізоляції кабельної мережі відносно землі підвищують вплив перехідних складових струму витоку на землю (після захисного вимкнення мережі) на стан кола витоку.

Вагомий внесок в дослідження перехідних процесів у багатомашинних електротехнічних системах, в тому числі й шахтних, внесли В.С. Дзюбан та Я.С. Риман, В.П. Колосюк, Р.М. Лейбов, К.П. Ковач та І. Рац, В.Ф. Сивокобиленко, І.А. Сиромятников, Г.Г. Півняк, Ф.П. Шкрабець та багато інших вчених, а також наукові колективи ІЕД НАН України, УкрНДІВЕ, МакНДІ, НГУ, ІГС ім. О.О. Скочинського, МГІ, ДонВугІ, Донецького національного технічного університету та ін. Відомі математичні залежності дають приблизну оцінку перехідним процесам в шахтному електротехнічному комплексі, зокрема – після вимкнення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, недостатньо враховують конфігурацію системи, режими функціонування елементів та їх параметри.

Таким чином, актуальною є задача аналізу перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах, що мають місце після вимкнення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, методами математичного моделювання з урахуванням особливостей улаштування і функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота відповідає науковому напрямку кафедри “Гірнична електротехніка і автоматика ім. Р.М. Лейбова” ДВНЗ «Донецький національний технічний університет». Автор приймав безпосередню участь у виконанні науково-дослідницьких державних тем № Н 8-04 “Наукове обґрунтування раціональних способів експлуатації низьковольтних електротехнічних комплексів гірничих підприємств”, № Н 4–09 «Наукове обґрунтування технічних рішень підвищення ефективності і безпеки експлуатації електротехнічних комплексів енергоємних виробництв».

Мета і завдання досліджень. Мета роботи – аналіз перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах, що мають місце піс-

ля вимкнення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, методами математичного моделювання з урахуванням особливостей улаштування і функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти.

Задачі досліджень:

- удосконалити математичну модель багатомашинного шахтного електротехнічного комплексу відповідно до особливостей улаштування та експлуатації системи електропостачання технологічної дільниці шахти;

- уточнити залежності сукупної кількості електрики, що пройшла через опір кола однофазного витоку струму на землю, від параметрів затухання ЕРС вибігу асинхронних двигунів споживачів та тривалості знаходження комутаційних апаратів відгалужень у ввімкненому стані після вимкнення напруги живлення мережі;

- проаналізувати залежність стану кола витоку струму на землю від довжини кабеля пошкодженого відгалуження та умов вибігу асинхронних двигунів споживачів.

Об'єктом дослідження є перехідні процеси в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах.

Предмет дослідження – процеси в дільничних електротехнічних комплексах шахт при вимкненні напруги живлення та їх вплив на характер функціонування апаратів захисту.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження базуються на теорії електричних машин змінного струму, теорії перехідних процесів, методі просторового вектора, положеннях теорії імовірності та математичної статистики. Аналіз адекватності результатів теоретичних досліджень експериментальним даним виконано із застосуванням сучасних цифрових засобів вимірювання, реєстрації та обробки даних, а також з використанням апарата математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів:

- дістала подальший розвиток математична модель багатомашинного шахтного електротехнічного комплексу, що базується на використанні диференціальних рівнянь для опису асинхронних двигунів, кабельних ліній, кола витоку струму на землю, яка відрізняється врахуванням стохастичної зміни конфігурації мережі та можливістю визначення впливу асинхронних двигунів на характер зниження напруги на окремих відгалуженнях мережі при вимкненні групового комутаційного апарата;

- уточнено аналітичні залежності для оцінки перехідного процесу в шахтному електротехнічному комплексі при однофазному витоку струму на землю за сукупною кількістю електрики, яка пройшла через опір кола витоку, що відрізняються врахуванням тривалості знаходження комутаційних апаратів відгалужень у ввімкненому стані під час вибігу двигунів споживачів;

- вперше отримані функціональні залежності сукупної кількості електрики, що пройшла через опір кола витоку струму на землю, від довжини кабеля пошкодженого відгалуження та завантаження асинхронних двигунів з урахуванням процесу вибігу останніх.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблена математична модель шахтного електротехнічного комплексу та відповідна комп'ютерна модель дозволяють отримувати параметри вибіга асинхронних двигунів при стохастичному вимкненні комутаційних апаратів силових відгалужень після вимкнення напруги живлення мережі;

- на основі результатів моделювання та з використанням уточнених аналітичних залежностей можна оцінити перехідний процес в шахтному електротехнічному комплексі при наявності витоку струму на землю в одному з силових приєднань за сукупною кількістю електрики через опір кола витоку;

- удосконалено методику розрахунку та вибору параметрів елементів шахтних електротехнічних комплексів (зокрема, довжин та перетинів жил гнучких кабелів) шляхом доповнення її оцінкою перехідного процесу після вимкнення напруги живлення за величиною сукупної кількості електрики через опір кола витоку струму на землю, для здійснення чого застосовується обґрунтована математична модель багатомашинного електротехнічного комплексу шахти та спеціальний алгоритм аналізу результатів моделювання.

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи прийняті Державним Макіївським науково-дослідним інститутом з безпеки робіт у гірничій промисловості (МакНДІ) Міністерства вугільної промисловості України для використання при розробці засобів захисного вимкнення шахтних електричних мереж. Виконані розрахунки та розроблена методика були використані ЗАТ «Донецьксталь»-металургійний завод». Результати досліджень впроваджені в навчальний процес ДВНЗ «Донецький національний технічний університет».

Отримані результати рекомендуються до використання проектними та експлуатаційними організаціями для розрахунку та досліджень перехідних процесів в шахтних електротехнічних комплексах, а також при обґрунтуванні експлуатаційних параметрів технічних засобів обмеження величин та тривалості існування зворотніх енергетичних потоків асинхронних двигунів при вимкненні напруги живлення мережі через виникнення небезпечного витоку струму на землю.

Особистий внесок здобувача. Наукові положення, що містяться в дисертації, отримані здобувачем самостійно і полягають у вирішенні науково-практичної задачі аналізу перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах, що мають місце після вимкнення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, методами математичного моделювання з урахуванням особливостей улаштування і функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти. Здобувач розробив математичну та комп'ютерну моделі системи, виготовив дослідницький стенд, виконав теоретичні та експериментальні дослідження, узагальнив та проаналізував отримані результати. Запропонував удосконалити методику розрахунку та вибору параметрів елементів шахтних ЕТК при проектуванні.

Апробація результатів роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали схвалення на V, VI та VII Міжнародних науково-технічних конференціях аспірантів та студентів «Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих» (Донецьк, 2005р.,

2006р., 2007р.), XVIII і XIX Міжнародних науково–технічних конференціях «Математичні методи в техніці та технологіях» (Казань, 2005р.; Воронеж, 2006р.), Міжнародних науково–технічних конференціях «Гірнична енергомеханіка та автоматика» (Донецьк, 2004р., 2005р., 2006р., 2007р.), Міжнародних науково–технічних конференціях «Форум гірників» (Дніпропетровськ, 2005р., 2007р.), VIII Міжнародній науково–технічній конференції «Контроль і управління в складних системах» (Вінниця, 2005р.), IV та VIII Міжнародних молодіжних конференціях «Севергеоэкотех» (Ухта, 2005р., 2007р.), II Міжнародній науково–технічній конференції «Актуальні проблеми водного господарства та природокористування» (Рівне, 2007р.).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 22 друкованих працях, із них 12 – у фахових виданнях ВАК України (3 – у наукових журналах, 9 – у збірниках наукових праць, 9 – у матеріалах конференцій, одержано 1 патент України на винахід).

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, 4 розділів з висновками по кожному розділу, загальних висновків, переліку використаних літературних джерел і додатків. Дисертаційна робота містить 194 сторінки наскрізної нумерації, у тому числі – 68 рисунків, з них 18 рисунків на 14 окремих сторінках, 8 таблиць, список використаних джерел із 84 найменувань на 10 сторінках і 4 додатків на 57 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі «Стан питання. Мета і задачі досліджень» розглянуто принципи побудови та специфіку умов експлуатації електротехнічних комплексів вугільних шахт (рис. 1). Проаналізовано особливості перехідних процесів у електротехнічному комплексі при централізованому вимкненні напруги його живлення за командою апарата захисту від витоків струму на землю. Такі процеси характеризуються переходом асинхронних двигунів (АД) споживачів до режиму групового вибігу з подальшою зміною конфігурації мережі через вимкнення силових комутаційних апаратів (КА) відгалужень в процесі зниження напруги (яка підтримується ЕРС вибігу двигунів) на котушках керування контакторів. Вимкнення силових приєднань змінює характер затухання ЕРС вибігу АД та сукупні параметри ізоляції кабельної мережі відносно землі.

Підвищення енергооснащеності вуглевидобувного обладнання, що передбачає застосування більш високих рівнів напруги живлення - 1140 В та у перспективі - 3000 В, збільшення довжини та перетину жил силових кабелів, використання електродвигунів підвищеної потужності (до 500 кВт), ускладнює підтримання на належних рівнях параметрів системи в перехідних режимах, що пов'язані з централізованим вимкненням напруги живлення. Збільшення рівнів та інтервалів існування ЕРС вибігу двигунів і підвищення ємності ізоляції кабельної мережі відносно землі збільшують вплив перехідних складових струму витоку на землю (після вимкнення мережі) на стан кола витоку. Застосування

існуючих схемотехнічних рішень не дозволяє вирішити в достатній мірі питання обмеження впливу на зазначені перехідні процеси зворотніх енергетичних потоків АД споживачів.

В контексті дослідження процесів у дільничних ЕТК в перехідному режимі після вимкнення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, актуальною визнана задача аналізу перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах, що мають місце після вимкнення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, методами математичного моделювання з урахуванням особливостей улаштування і функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти. Аналіз літературних джерел дозволив встановити, що відомі математичні залежності дають приблизну оцінку перехідним процесам в шахтному дільничному електротехнічному комплексі, зокрема – після вимкнення напруги живлення через наявність небезпечного витоку струму на землю, недостатньо враховують особливості побудови та експлуатації шахтних ЕТК.

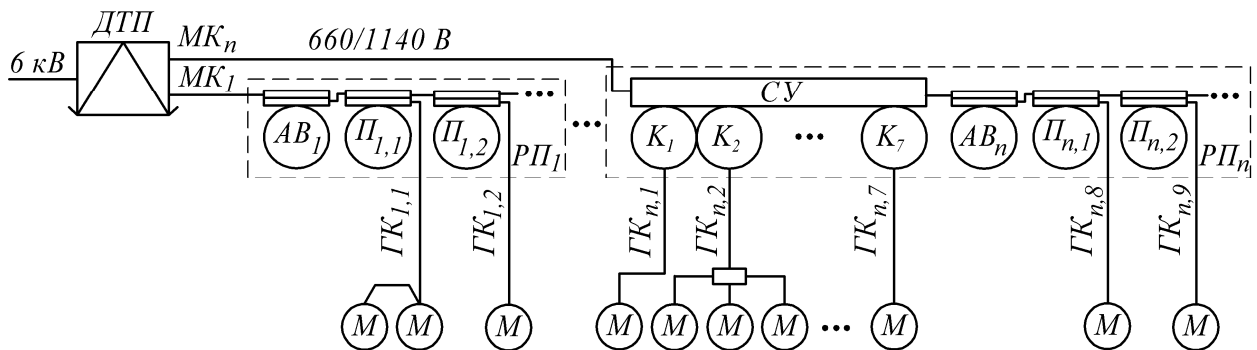


Рис. 1. Структура багатомашинного шахтного електротехнічного комплексу: АВ – автоматичний вимикач; ГК – гнучкий кабель; ДТП – дільнична трансформаторна підстанція К – контактор; М – двигун; МК – магістральний кабель; СУ – станція управління; П – пускач; РП – розподільчий пункт

Другий розділ «Математичне моделювання перехідних процесів в багатомашинних електротехнічних комплексах шахт» присвячено обґрунтуванню математичної моделі багатомашинного шахтного ЕТК та аналізу перехідних процесів при вимкненні мережі. Обґрунтовано диференційні рівняння, які описують загальну частину мережі та відгалуження, що живлять один або декілька асинхронних двигунів споживачів.

Загальна частина мережі описана диференційним рівнянням:

$$\bar{u}_{1e} = \frac{\sqrt{2}U_{\phi}e^{j2pft}}{k_{cx}} - \left(\frac{R_{mp}}{k_{cx}^2} + R_{AB} + R_{МК} \right) \bar{i}_{\Sigma e} - \left(\frac{L_{mp}}{k_{cx}^2} + L_{МК} \right) \bar{a} \frac{d\bar{i}_{\Sigma e}}{dt}, \quad (1)$$

де \bar{u}_{1e} – просторовий вектор напруги на входних клеммах комутаційних апаратів відгалужень; k_{cx} – схемний коефіцієнт (при з'єднанні вторинної обмотки дільничного трансформатора за схемою «зірка» $k_{cx}=1$, при схемі «трикутник» $k_{cx}=\sqrt{3}$); R_{AB} – опір фази автоматичного вимикача, для якого, при вимкненні,

прийнято припущення про стрибкоподібну зміну від перехідного опору у замкненому стані до опору ізоляції між полюсами при розмиканні.

Відгалуження мережі з одним двигуном описане системою диференціальних рівнянь (рис. 2):

$$\begin{cases} \frac{d\bar{y}_1}{dt} = \bar{u}_1 - \bar{i}R_1; \\ \frac{d\bar{y}_r}{dt} = jw\bar{y}_r - \bar{i}_rR_r; \\ \frac{dw}{dt} = \frac{1}{J}(M - M_c), \end{cases} \quad (2)$$

де \bar{y}_1 – просторовий вектор потокозчеплення статора двигуна та гнучкого кабеля; $\bar{i} = (L_r\bar{y}_1 - L_m\bar{y}_r)/(L_1L_r - L_m^2)$, $L_1 = k_{cx}^2L_k + L_{sl} + L_m$ – просторовий вектор струму та індуктивність статорного кола двигуна; $R_1 = k_{cx}^2(R_{KA} + R_k) + R_s$ – активний опір статорного кола двигуна, включає опори комутаційного апарата R_{KA} , кабеля R_k та статора двигуна R_s .

Вимкнення контактора пускача відгалуження через зниження напруги в мережі під час вибігу двигунів моделюється стрибкоподібною зміною опору R_{KA} при виконанні умови $U_1 \leq k_z U_{\phi n}$, причому U_1 – діюче значення фазної напруги на вході контактора, $U_{\phi n}$ – номінальний рівень фазної напруги мережі (для еквівалентної «зірки»), k_z – відносне значення напруги вимкнення контактора. Моделювання стохастичного характеру вимкнення комутаційного апарата досягається використанням в якості k_z реалізацій випадкової нормальної величини K_z з наближеними до реальних параметрами розподілення. Аналогічно відгалуженню з одним двигуном складена математична модель відгалуження, що живить декілька двигунів. На основі наведених залежностей побудована математична модель силової частини багатомашинного ЕТК технологічної дільниці шахти.

Для обчислення сукупної ємності ($C_{i3\phi}$) та активного опору ($R_{i3\phi}$) ізоляції фази кабельної мережі, що визначають величину струму витоку на землю при пошкодженні ізоляції кабеля k -го силового приєднання мережі, запропоновано використовувати залежності:

$$C_{i3\phi} = \bar{b}_k \left(C'_{i3\phi} + \sum_{i=1}^n \bar{b}_i C''_{i3\phi i} \right) + b_k C''_{i3\phi k}; \quad (3)$$

$$R_{i3\phi} = \left[\bar{b}_k \left(\frac{1}{R'_{i3\phi}} + \sum_{i=1}^n \frac{\bar{b}_i}{R''_{i3\phi i}} \right) + \frac{b_k}{R''_{i3\phi k}} \right]^{-1}, \quad (4)$$

де \bar{b}_i – інверсна змінна стану i -го контактора b_i ($b_i=1$ – контакти розімкнені, $b_i=0$ – замкнені); $C'_{i3\phi}$, $R'_{i3\phi}$ – ємність та активний опір ізоляції фази магістрального кабеля; $C''_{i3\phi i}$, $R''_{i3\phi i}$ – те ж саме гнучкого кабеля i -го відгалуження.

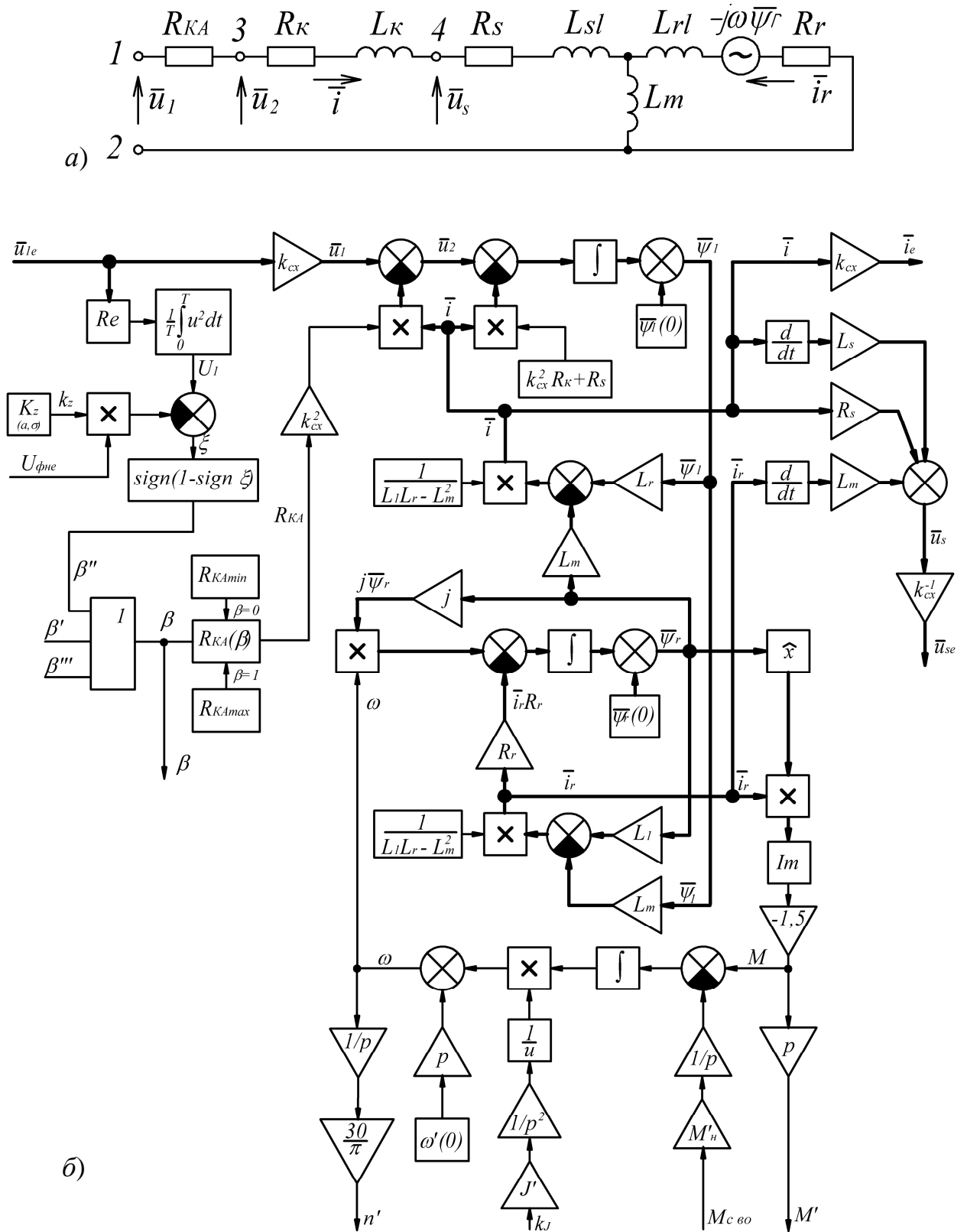


Рис. 2. Схема заміщення відгалуження з одним двигуном електротехнічного комплексу (а) та структура схема відповідної математичної моделі (б)

Струм $i_{\text{л}}$ через опір $R_{\text{в}}$ кола витоку на землю визначається з системи рівнянь (за нульових початкових умов):

$$\begin{cases} i_1 = \frac{1}{R_{i3} C_{i3}} \int i_2 dt ; \\ i_2 = \frac{1}{R_{\text{в}}} (u_{\phi} - i_1 R_{i3}) - i_1 - i_3 ; \\ i_3 = a_{\text{ак}} \bar{b}_k \int i_4 dt ; \\ i_4 = \frac{1}{L_{\text{оп}} C_{i3}} \int i_2 dt ; \\ i_{\text{л}} = i_1 + i_2 + i_3 , \end{cases} \quad (5)$$

де $C_{i3} = 3C_{i3\phi}$; $R_{i3} = R_{i3\phi}/3$ – сукупні ємність та активний опір ізоляції фаз кабелів, що впливають на стан кола витоку; u_{ϕ} – фазна напруга в місці пошкодження ізоляції; $a_{\text{ак}}$ – змінна, що визначає наявність ($a_{\text{ак}} = 1$) або відсутність ($a_{\text{ак}} = 0$) компенсатора ємнісної складової струму витоку з індуктивністю $L_{\text{оп}}$.

За допомогою комп'ютерного моделювання (згідно обґрунтованої математичної моделі) уточнено характер перехідного процесу вибігу асинхронних двигунів споживачів при централізованому вимкненні напруги живлення (рис. 3). Стохастична зміна конфігурації мережі через вимкнення комутаційних апаратів відгалужень визначає перехід відповідних двигунів до режиму індивідуального вибігу, а в разі живлення декількох АД через один гнучкий кабель - відокремлення такої групи. Кожна зміна конфігурації ЕТК супроводжується перерозподілом потужностей між двигунами ввімкнених приєднань. Стохастичний характер вимкнення КА визначає випадкову тривалість енергетичного обміну між АД різних силових відгалужень під час вибігу. Крім того, зазнає змін характер зменшення ЕРС вибігу двигунів, що підтримує струм в колі витоку на землю при пошкодженні ізоляції одного з силових кабелів, і випадковим чином змінюються сукупні параметри ізоляції відносно землі кабельної мережі, які визначають величину струму витоку на землю (рис. 4).

Уточнено аналітичні вирази для оцінки перехідного процесу в ЕТК технологічної ділянки шахти при однофазному витокі струму на землю за сукупною кількістю електрики Q (А·с), яка пройшла через опір кола витоку, для наступних випадків:

– контактори пускачів лишаються ввімкненими протягом вибігу двигунів:

$$Q = \frac{U_{\text{л}} \cdot (\Delta t_{3\text{в}} + T)}{\sqrt{3} \sqrt{R_{\text{в}}^2 + \frac{1}{9w^2 C_{i3}^2 \phi v^2}}}, \quad (6)$$

де $U_{\text{л}}$ – номінальна лінійна напруга, В; $\Delta t_{3\text{в}}$ – тривалість вимкнення мережі, с; T – стала часу затухання ЕРС вибігу двигунів, с; v – коефіцієнт розладу компенсатора ємнісної складової струму витоку;

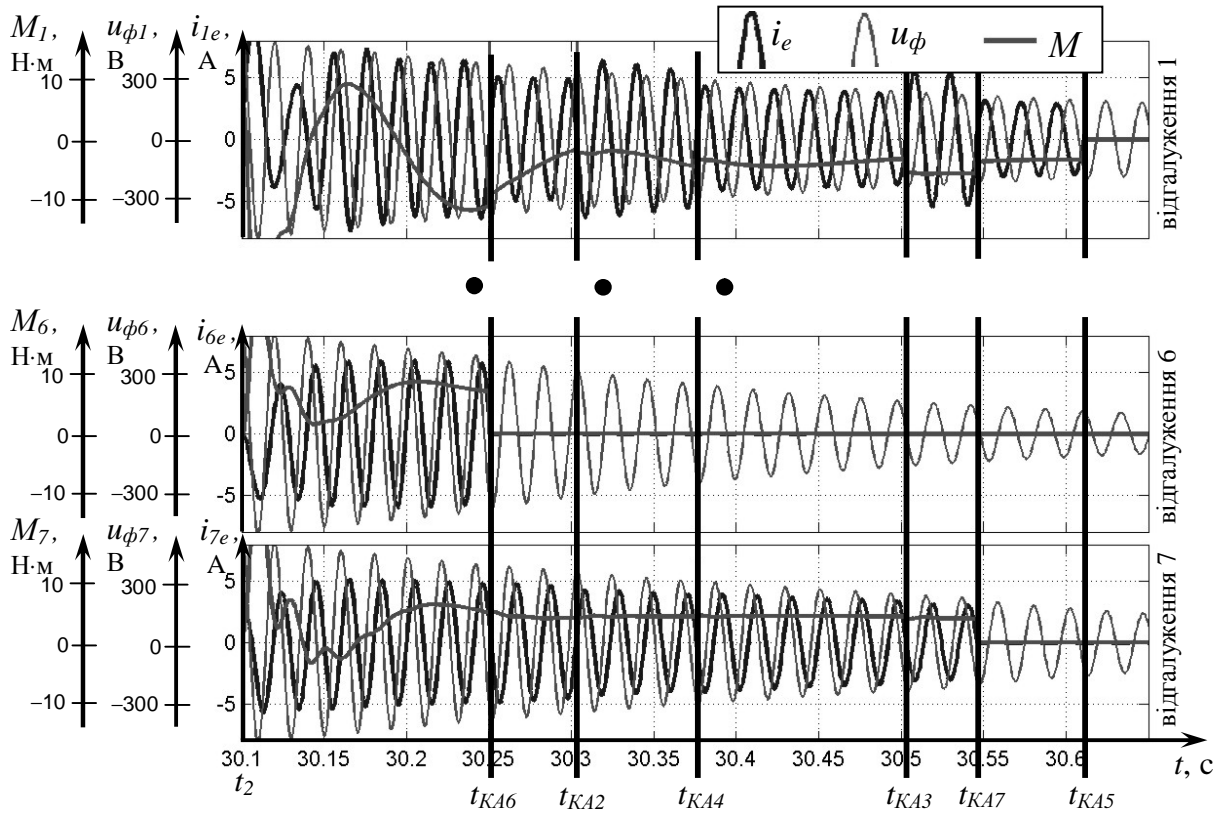


Рис. 3. Діаграми, що відображають характер зміни струмів відгалужень i_e , фазних ЕРС вибігу u_ϕ та електромагнітних моментів M двигунів після вимкнення ЕТК дільниці напругою 660 В у момент t_2

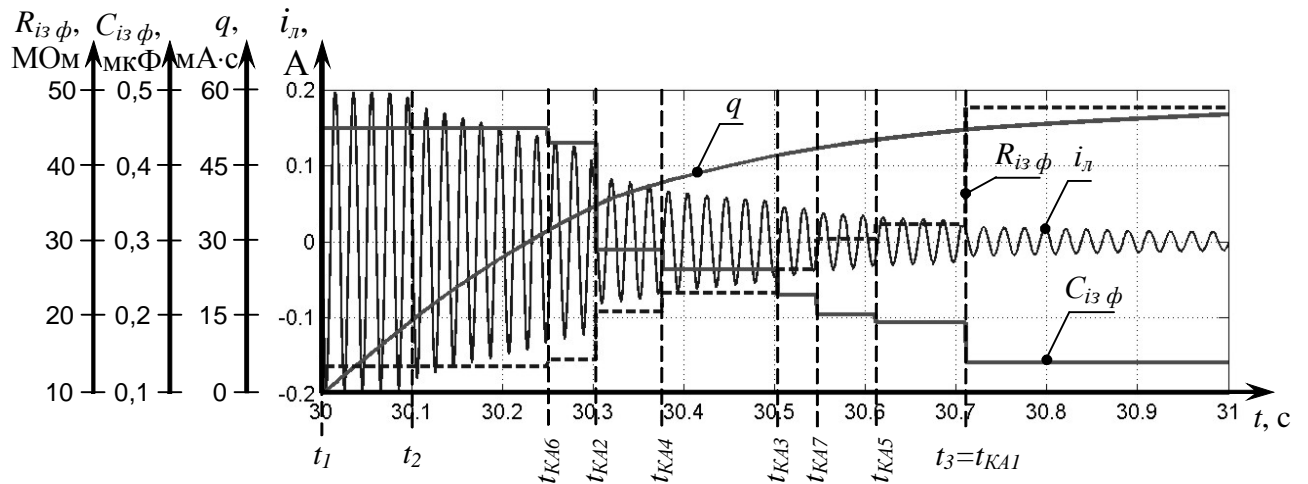


Рис. 4. Діаграми перехідного процесу в ЕТК напругою 660 В: i_l – струму витоку на землю (компенсація ємнісної складової відсутня); q – кількість електрики через опір кола витоку; $C_{iz\phi}$, $R_{iz\phi}$ – сукупні ємність та активний опір ізоляції мережі; t_1 , t_2 – моменти виникнення витоку струму на землю та вимкнення мережі; t_{KAi} , t_3 – моменти вимкнення i -го контактора та КА відгалуження з пошкодженою ізоляцією

– вимкнення контакторів відбувається при зниженні відносного значення напруги в мережі, що підтримується ЕРС вибігу двигунів, до рівня a :

$$Q = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \left[\frac{\Delta t_{зв} + T'(1-a)}{\sqrt{R_г^2 + \frac{1}{9w^2(C_{із\phi_{ав}} + C_{із\phi_{м}})^2 v^2}}} + \frac{T'' \cdot a^{T'/T''}}{\sqrt{R_г^2 + \frac{1}{9w^2 C_{із\phi_{ав}}^2}}} \right], \quad (7)$$

де T' , T'' – сталі часу затухання ЕРС вибігу відповідно групи двигунів та двигуна приєднання з пошкодженою ізоляцією, с; $C_{із\phi_{ав}}$ – ємність ізоляції відносно землі фази кабеля, в якому стався виток струму на землю, Ф/фаза; $C_{із\phi_{м}}$ – сукупна фазна ємність ізоляції інших кабелів мережі, Ф/фаза. Вимкнення КА відгалужень одночасно з вимкненням АВ відповідає випадку $a = 1$.

Для випадку функціонування скребкового конвеєра (як одного з найбільш потужних споживачів), обладнаного двома приводними блоками, у складі ЕТК дільниці проведені імітаційні дослідження, що дозволили оцінити перехідний процес при витокі струму на землю, за умови стохастичного вимкнення КА відгалужень, залежно від довжини кабеля приєднання з пошкодженою ізоляцією (рис. 5, *а*) та від ступеня механічного навантаження двигунів (рис. 5, *б*). Статистично обґрунтованими (за рівня значущості 0,05) визнані гіпотези про лінійний вид регресійної залежності величини Q від довжини $l_г$ гнучкого кабеля відгалуження з витокі струму на землю (фактор x_1) та про параболічний вид залежності Q від рівня механічного навантаження двигунів скребкового конвеєра M_c (фактор x_2).

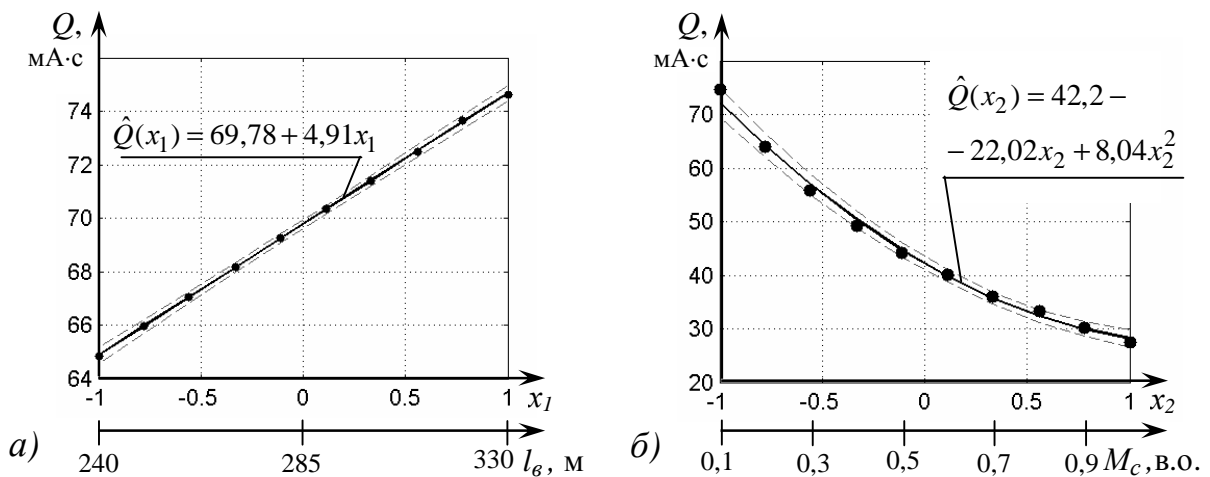


Рис. 5. Лінії регресії, отримані в результаті імітаційних досліджень, що ілюструють залежність загальної кількості електрики через опір кола витокі Q від: *а* – довжини гнучкого кабеля відгалуження з пошкодженою ізоляцією $l_г$ (фактор x_1); *б* – момента механічного навантаження двигунів скребкового конвеєра M_c (фактор x_2)

Третій розділ «Аналіз адекватності результатів теоретичних досліджень експериментальним даним» присвячено обґрунтуванню умов і порядку проведення експериментальних досліджень, обробці результатів та порівнянні їх з даними моделювання. Експерименти характеризувалися представницькими умовами проведення: дослідження перехідних процесів в ЕТК при вимкненні напруги живлення за наявності витоку струму на землю здійснювалося у 14 експериментах за різної конфігурації мережі та режиму роботи комутаційних апаратів відгалужень, при зміні параметрів ізоляції кабеля відгалуження з витком на землю (рис. 6). Експерименти проводилися в лабораторних (трифазна лінійна напруга 380 В) та промислових (1140 В) умовах.

Достовірність експериментального матеріалу забезпечувалася: топологічною ідентичністю дослідницького стенда типовому ЕТК дільниці шахти; вибором параметрів елементів стенда за критерієм подібності; використанням цифрових засобів вимірювання, реєстрації та обробки даних із задовільною швидкістю та роздільною здатністю.

Достатність експериментальних даних забезпечена необхідним, для гарантування точності 25% при статистичній надійності 0,95, об'ємом вибірок значень контрольованих параметрів.

Адекватність обґрунтованих математичних залежностей експериментальним даним підтверджується припустимими значеннями відносних похибок розрахунків, які становили:

- обраховані з використанням обґрунтованої математичної моделі значення сталих часу затухання ЕРС вибігу двигунів покриваються довірчими інтервалами для експериментально оцінених математичних очікувань даного параметра зі статистичною надійністю 0,95;

- відхилення розрахованих за математичною моделлю вибірових середніх значень загальної кількості електрики Q через опір кола витоку струму на землю від емпіричних величин не перевищує 7%;

- похибка оцінки величин Q за запропонованими виразами (6) та (7), порівняно із емпіричними математичними очікуваннями, не перевищує 10%.

Четвертий розділ «Удосконалення методики розрахунку та вибору параметрів елементів шахтних дільничних ЕТК» присвячено обґрунтуванню напрямку практичного використання результатів теоретичних досліджень. Запропоновано існуючу методику доповнити оцінкою кабельної мережі за характером перехідного процесу, обумовленого витком струму на землю, з метою підвищення ефективності існуючих засобів захисту. Для попередньої оцінки інформативного параметра (сукупної кількості електрики Q через опір кола витоку) пропонується користуватися діаграмою, що побудована згідно залежності (6). При більш точному розрахунку використовується обґрунтована математична модель багатомашинного шахтного ЕТК згідно запропонованого алгоритму. Останній передбачає коригування параметрів гнучких кабелів мережі, якщо величина Q не задовольняє висунутим вимогам, або застосування додаткових заходів з корекції перехідного процесу після вимкнення напруги живлення в разі виникнення небезпечного витоку струму на землю.

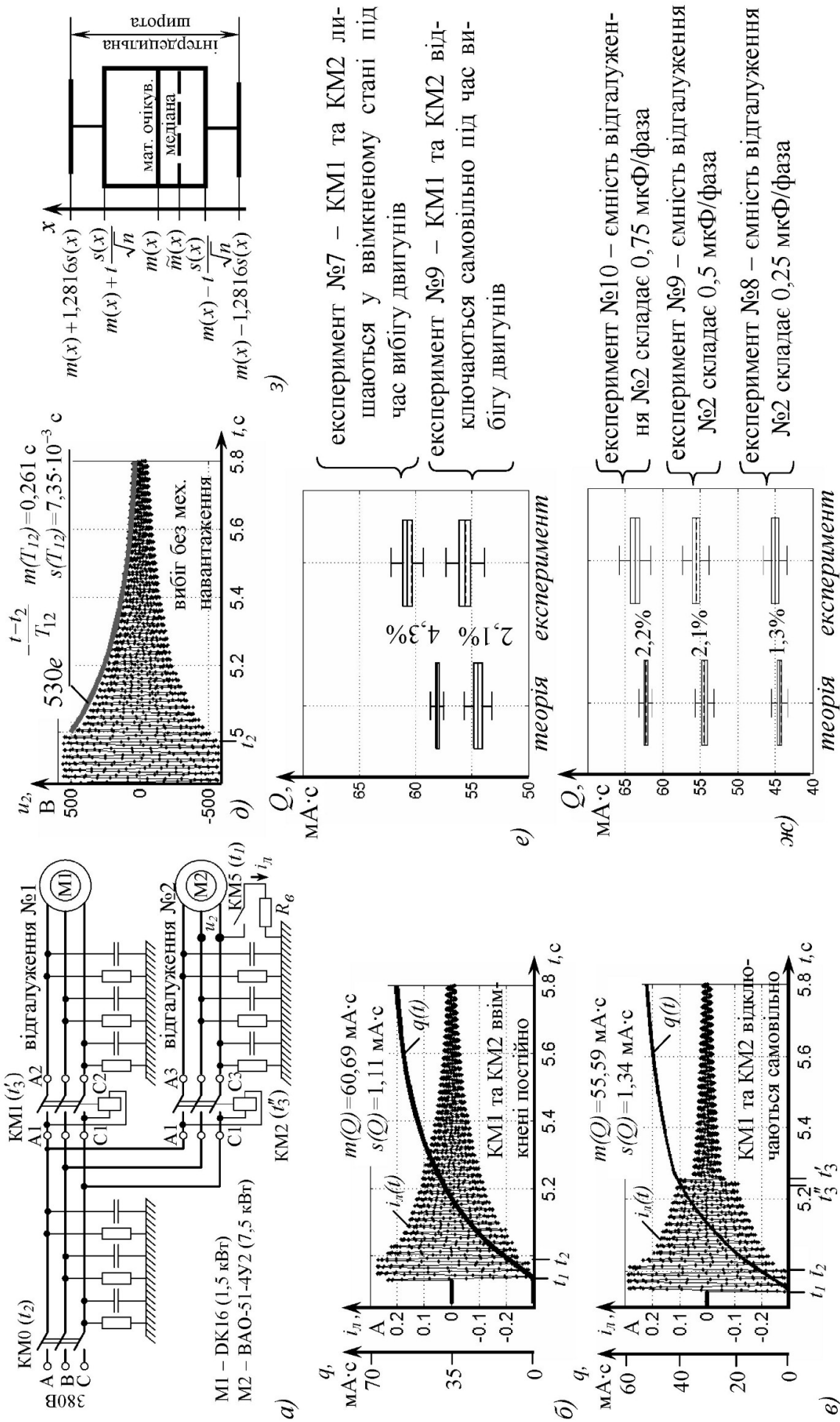


Рис. 6. Умови проведення та результати експериментів №7-10 при функціонуванні двох двигунів: *а* – схема стенда; *б*, *в* – осцилограми $i_{л,н}(t)$ та криві $q(t)$ за умови постійно ввімкненого стану контакторів відгалужень та їх самовільного вимкнення відповідно; *д* – осцилограма напруги на статорі $M2$; *е*, *ж* – порівняння теоретичних та експериментальних вибіркових характеристик розподілення Q з використанням фігури з

Зокрема, запропоновано спосіб примусового обмеження параметрів зворотніх енергетичних потоків АД технологічної дільниці шахти, що передбачає доповнення вимкнення мережі груповим автоматичним вимикачем за струмом витоку додатковим вимкненням відгалужень, що комутуються, та відрізняється тим, що під час захисного вимкнення фази кожного відгалуження з боку виходу відповідного комутаційного апарату з'єднують між собою та під'єднують до кола заземлення через дросель. Цей спосіб захищений патентом України на винахід.

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена актуальна науково–практична задача аналізу перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах, що мають місце після вимкнення напруги живлення за наявності витоку струму на землю, методами математичного моделювання з урахуванням особливостей улаштування і функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають в наступному.

1. В результаті аналізу стану питання встановлено, що відомі математичні залежності дають приблизну оцінку перехідним процесам в шахтному дільничному електротехнічному комплексі, зокрема – після автоматичного захисного вимкнення напруги живлення ЕТК в разі наявності небезпечного витоку струму на землю, недостатньо враховують конфігурацію системи, режими функціонування елементів та їх параметри.

2. Удосконалено математичну модель багатомашинного шахтного електротехнічного комплексу, що базується на використанні диференціальних рівнянь для опису асинхронних двигунів, кабельних ліній, кола витоку струму на землю, яка відрізняється врахуванням стохастичної зміни конфігурації мережі та можливістю визначення впливу асинхронних двигунів на характер зниження напруги на окремих відгалуженнях мережі при вимкненні групового комутаційного апарата.

3. Дослідження, проведені з використанням комп'ютерної моделі, що відповідає обґрунтованій математичній моделі системи, дозволили отримати параметри вибіга асинхронних двигунів споживачів шахтного дільничного електротехнічного комплексу типових конфігурацій напругою 660В та 1140В. Визначено, що перехідний процес вибіга АД може продовжуватися 1-2с після вимкнення мережі та супроводжується енергетичним обміном між двигунами різних відгалужень, тривалість якого є випадковою величиною через стохастичне вимкнення комутаційних апаратів відгалужень. Встановлено, що перехідні процеси в багатомашинному шахтному ЕТК після вимкнення напруги живлення суттєво впливають на стан кола однофазного витоку струму на землю: кількість електрики в колі витоку після вимкнення мережі може в декілька разів перевищувати аналогічний показник за інтервал захисного вимкнення.

4. Уточнено аналітичні залежності для оцінки перехідного процесу в шахтному дільничному ЕТК при однофазному витоку струму на землю, які дозво-

ляють визначити сукупну кількість електрики в колі виток при різних режимах функціонування комутаційних апаратів відгалужень при вимкненні мережі. Вперше отримані функціональні залежності сукупної кількості електрики, що пройшла через опір кола виток струму на землю, від довжини кабеля з пошкодженою ізоляцією та завантаження асинхронних двигунів з урахуванням процесу вибігу останніх.

5. Встановлена достатня відповідність результатів теоретичних досліджень експериментальним даним: аналітично оцінені значення сталої часу зменшення ЕРС вибігу двигунів покриваються довірчими інтервалами для експериментально оцінених математичних очікувань даного параметра зі статистичною надійністю 0,95; відхилення розрахованих середніх значень сукупної кількості електрики через опір кола виток на землю від експериментально оцінених математичних очікувань не перевищує 7%.

6. Удосконалено методику розрахунку та вибору параметрів елементів шахтних ЕТК (зокрема, довжин та перетинів жил гнучких кабелів) шляхом доповнення її оцінкою перехідного процесу після вимкнення напруги живлення за величиною сукупної кількості електрики через опір кола виток струму на землю, для здійснення чого застосовується обґрунтована математична модель багатомашинного електротехнічного комплексу шахти та спеціальний алгоритм аналізу результатів моделювання. Запропоновано спосіб щодо корекції перехідних процесів в багатомашинних шахтних ЕТК після вимкнення напруги живлення.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Маренич К.Н. Исследование влияния ЭДС вращения группы двигателей в режиме выбега на величину тока утечки в электросети участка шахты / К.Н. Маренич, С.В. Василец // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – Вип. 83. – С. 303-308.

2. Маренич К.Н. Исследование процессов в участковой электросети при групповом выбеге асинхронных двигателей / К.Н. Маренич, С.В. Василец // Гірнична електромеханіка та автоматика. – 2005. – Вип. 74. – С. 30-36.

3. Сивокобиленко В.Ф. Математичне моделювання групового вибігу електродвигунів споживачів технологічної дільниці шахти / В.Ф. Сивокобиленко, К.М. Маренич, С.В. Василец // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2005. – Вип. 101. – С.103-110.

4. Маренич К.М. Аналіз параметрів системи «тиристорний регулятор напруги – асинхронний генератор» як елемента навантаження приводного блоку під час випробувань / К.М. Маренич, О.М. Бурлака, С.В. Василец // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – Вінниця: ВНТУ, 2005. – №6 (63). – С. 110–116.

5. Маренич К.М. Математична модель електротехнічного комплексу дільниці шахти після захисного відключення напруги / К.М. Маренич, С.В. Василець // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 104. – С.121-128.

6. Маренич К.М. Математичне моделювання струму витоку в умовах дільниці шахти після захисного відключення напруги / К. М. Маренич, С. В. Василець // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 12 (113). – С.171–178.

7. Маренич К.М. Математичне моделювання асинхронного електродвигуна як об'єкта електротехнічного комплексу дільниці шахти / К.М. Маренич, С.В. Василець // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – Рівне: НУВГП, 2007. – Вип. 4(40), част. 3. – С. 132-139.

8. Маренич К.М. Аналіз енергетичних співвідношень у електротехнічному комплексі дільниці шахти під час групового вибігу електродвигунів споживачів / К.М. Маренич, С.В. Василець // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. трудов УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «Юго-Восток, Лтд», 2007. – С. 137–142.

9. Василець С.В. Обґрунтування схеми стенду для фізичного моделювання процесів в електротехнічному комплексі дільниці шахти // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – Вип. 13(123). – С.34–39.

10. Маренич К. М. Уточнення стану ланцюга однофазного витоку струму на землю в умовах електротехнічного комплексу дільниці шахти після захисного відключення мережі / К. М. Маренич, С. В. Василець // Праці Луганського відділення Міжнародної академії інфоматизації. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2008. – №2 (17). – С. 71-74.

11. Василець С. В. Особливості впливу асинхронних двигунів споживачів електротехнічного комплексу на параметри безпеки в контексті результатів експериментальних досліджень / С.В. Василець // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2008. – Вип. 8., Т. 10. – С. 161–166.

12. Маренич К.М. Обґрунтування ефективності нейтралізації зворотної ЕРС двигунів як способу підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти / К. М. Маренич, С. В. Василець // Технічна електродинаміка. – 2009. – №2. – С. 42–47.

13. Маренич К. Н. Математическое моделирование процессов в шахтной низковольтной сети при дуговом замыкании / К. Н. Маренич, С. В. Василець // Математические методы в технике и технологиях: XVIII междунар. науч. конф., 31 мая – 2 июня 2005г.: сб. трудов, Казань. Т. 5 / под ред. В. С. Балакирева. – Казань: изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. – С. 212-215.

14. Маренич К.М. Проблематика спільної роботи групи двигунів в електричній мережі технологічної дільниці гірничого підприємства / К. М. Маренич, С. В. Василець // «Форум гірників – 2005»: міжнар. конф., 12–14 жовтня 2005р.: матеріали конф. – Д.: Нац. гірничий ун-т, 2005. – Т. 3. – С.123-131.

15. Компьютерное моделирование процессов в испытательном стенде для обкатки приводных блоков скребковых конвейеров / С.В. Василец, К.Н. Маренич, А.Н. Бурлака // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: V міжнар. наук.-техн. конф., 16-19 травня 2005р.: зб. наук. праць. – Донецьк, ДонНТУ, 2005. – С.11-15.

16. Василец С. В. Математическое моделирование электрической дуги при замыкании в гибком кабеле участка шахты / С. В. Василец // Севергеоэко-тех-2005: VI междунар. молодеж. науч. конф., 23–25 марта 2005 г.: материалы конф. – Ухта: УГТУ, 2006. – Ч.1 – С. 10-13.

17. Василец С.В. Обґрунтування математичної моделі електротехнічного комплексу дільниці шахти в режимі вибігу двигунів споживачів / С.В. Василец, К.М. Маренич // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: VI міжнар. наук.-техн. конф., 24-27 квітня 2006р.: зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – С.33–36.

18. Определение параметров перспективного стенда для обкатки приводных блоков скребковых конвейеров / К.Н. Маренич, А.Н. Бурлака, С.В. Василец // Математические методы в технике и технологиях: материалы XIX междунар. науч. конф. (Воронеж, 30 мая – 2 июня 2006г.). – Воронеж: ВГТА, 2006. – С.186–189.

19. Василец С.В. Моделирование процессов в электротехническом комплексе участка шахты после защитного отключения напряжения / С.В. Василец // Севергеоэко-тех-2007: VIII междунар. молодежная науч. конф., 21-23 марта 2007г.: материалы конф. – Ухта: УГТУ, 2007. – Ч. 1. – С.9-13.

20. Маренич К.М. Математичне моделювання електротехнічного комплексу дільниці шахти при виникненні витоку струму на землю / К.М. Маренич, С.В. Василець // «Форум гірників – 2007»: міжнар. конф., 11–13 жовтня 2007р.: матеріали конф. – Д.: Нац. гірничий ун-т, 2007. – С.222-231.

21. Василець С.В., Маренич К.М. Стенд для моделювання електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти / С.В. Василець, К.М. Маренич // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих: VII міжнар. наук.-техн. конф., 26–28 квітня 2007 р.: зб. наук. праць. – Донецьк, ДонНТУ, 2007. – С.43–46.

22. Патент на винахід 82111 (UA), МПК (2006) H02H 3/16 Спосіб захисту людини від ураження електричним струмом в мережі з ізольованою нейтраллю / К.М. Маренич, С.В. Василець. – а 2006 00387. Заявл. 16.01.2006. Опубл 11.03.2008. Бюл. №5.

В публікаціях, що написані у співавторстві, особистий внесок Васильця С.В. полягає в наступному: [1] – дослідження факторів впливу на стан кола витоку струму на землю; [2, 17] – математичне моделювання режиму вибігу двигунів споживачів електротехнічного комплексу дільниці шахти; [3, 5] – моде-

лювання перехідних процесів в системі електропостачання дільниці вугільної шахти при вимкненні напруги живлення; [4, 15, 18] – визначення особливостей взаємного впливу електродвигунів шахтних споживачів; [6] – математичне моделювання кола витoku струму на землю в умовах шахтного електротехнічного комплексу; [7] – обґрунтування математичної моделі шахтного електротехнічного комплексу при індивідуальному вибігу двигуна; [8] – дослідження особливостей енергетичного обміну між двигунами дільничної електромережі під час групового вибігу; [10] – оцінка перехідного процесу в електротехнічному комплексі шахти при витoku струму на землю; [12, 20] – обґрунтування математичної моделі багатомашинного шахтного електротехнічного комплексу на основі диференційних рівнянь елементів системи; [13] – дослідження особливостей улаштування та функціонування системи електропостачання технологічної дільниці шахти; [14] – встановлення характеру зміни параметрів елементів електротехнічного комплексу шахти при експлуатації; [21] – обґрунтування схеми та виготовлення експериментального стенду, постановка експерименту; [22] – запропоновано виконувати гасіння зворотної ЕРС обертання двигунів у відгалуженнях ЕТК дільниці, що не задовільняють висунутим вимогам.

АНОТАЦІЇ

Василець С.В. Математичне моделювання перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2010.

В дисертаційній роботі дістала подальший розвиток математична модель багатомашинного шахтного електротехнічного комплексу, що базується на використанні диференційних рівнянь для опису асинхронних двигунів, кабельних ліній, кола витoku струму на землю, яка відрізняється врахуванням стохастичної зміни конфігурації мережі та можливістю визначення впливу асинхронних двигунів на характер зниження напруги на окремих відгалуженнях мережі при вимкненні групового комутаційного апарата. Уточнено аналітичні залежності для оцінки перехідного процесу в шахтному електротехнічному комплексі при однофазному витoku струму на землю за сукупною кількістю електрики, яка пройшла через опір кола витoku. Вперше отримані функціональні залежності сукупної кількості електрики, що пройшла через опір кола витoku струму на землю, від довжини кабеля пошкодженого відгалуження та завантаження асинхронних двигунів з урахуванням процесу вибігу останніх. Удосконалено методу розрахунку та вибору параметрів елементів шахтних ЕТК шляхом доповнення її оцінкою перехідного процесу після вимкнення напруги живлення за величиною сукупної кількості електрики через опір кола витoku струму на землю.

Ключові слова: перехідні процеси, математичне моделювання, електротехнічний комплекс, вугільна шахта, диференційні рівняння, асинхронні двигуни, заступна схема, вибіг.

Василец С.В. Математическое моделирование переходных процессов в многомашинных шахтных электротехнических комплексах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы. – ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2010.

В диссертационной работе решена актуальная научно-практическая задача анализа переходных процессов в многомашинных шахтных электротехнических комплексах, имеющих место после отключения напряжения питания при наличии утечки тока на землю, методами математического моделирования с учетом особенностей устройства и функционирования системы электроснабжения технологического участка шахты. Усовершенствованная математическая модель, базирующаяся на использовании дифференциальных уравнений для описания асинхронных двигателей, кабельных линий, цепи утечки тока на землю, отличается учетом стохастического изменения конфигурации сети и возможностью определения влияния асинхронных двигателей на характер снижения напряжения на отдельных ответвлениях сети при отключении группового коммутационного аппарата.

Для анализа переходных процессов в участковом электротехническом комплексе при отключении напряжения питания согласно обоснованной математической модели составлена компьютерная модель и осуществлено моделирование с учетом параметров типовых систем напряжением 660 В и 1140 В. Рассмотрены особенности режима выбега асинхронных двигателей после централизованного отключения напряжения питания в условиях шахтного электротехнического комплекса, которые связаны со стохастическим изменением конфигурации сети из-за отключения коммутационных аппаратов ответвлений, что определяет переход соответствующих двигателей в режим индивидуального выбега, а при питании нескольких двигателей через один гибкий кабель - отделение такой группы.

Проанализированы особенности энергетического обмена между двигателями силовых присоединений и состояние цепи однофазной утечки тока на землю после отключения группового силового коммутационного аппарата во время выбега двигателей при стохастическом отключении коммутационных аппаратов ответвлений. Установлено изменение характера снижения ЭДС выбега двигателей, которая поддерживает ток в цепи утечки тока на землю при повреждении изоляции одного из силовых кабелей. Также случайным образом изменяются совокупные параметры изоляции относительно земли кабельной сети, которые определяют величину тока утечки.

Уточнены аналитические зависимости для оценки переходного процесса в шахтном электротехническом комплексе при однофазной утечке тока на землю по совокупной величине количества электричества, прошедшего через сопротивление цепи утечки, которые отличаются учетом длительности нахождения коммутационных аппаратов ответвлений во включенном состоянии во время выбега двигателей потребителей. В случае сохранения включенного состояния коммутационных аппаратов ответвлений во время выбега двигателей уста-

новлена линейная зависимость контролируемого параметра от постоянной времени затухания ЭДС вращения двигателей.

Впервые получены функциональные зависимости совокупного количества электричества, которое прошло через сопротивление цепи утечки тока на землю, от длины кабеля поврежденного ответвления и загрузки асинхронных двигателей с учетом процесса выбега последних. В первом случае для описания зависимости предложена линейная функция, во втором – полином второго порядка.

Проверка достоверности полученных теоретических данных осуществлялась путем проведения экспериментальных исследований, в ходе которых поставлено 14 видов экспериментов при функционировании одного, двух и трех двигателей при различных режимах функционирования коммутационных аппаратов ответвлений, а также при изменении параметров изоляции кабеля ответвления с утечкой тока на землю. Эксперименты проводились в лабораторных (при напряжении 380 В) и промышленных (при напряжении 1140 В) условиях. Достоверность экспериментального материала обеспечивалась: топологической идентичностью исследовательского стенда типовому электротехническому комплексу участка; выбором параметров элементов стенда по критерию подобия; использованием цифровых средств измерения, регистрации и обработки данных с удовлетворительными параметрами быстродействия и разрешающей способностью. В результате обработки экспериментальных данных установлено достаточное соответствие теоретических исследований экспериментальным данным: аналитически оцененные значения постоянной времени затухания ЭДС выбега двигателей покрываются доверительными интервалами для экспериментально оцененных математических ожиданий данного параметра со статистической надежностью 0,95; отклонение рассчитанных средних значений общего количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю от экспериментально оцененных математических ожиданий не превышает 7%.

Усовершенствована методика расчета и выбора параметров элементов шахтных ЭТК (длин и сечений жил силовых кабелей) путем дополнения ее оценкой переходного процесса после отключения напряжения питания по величине совокупного количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю.

Ключевые слова: переходные процессы, математическое моделирование, электротехнический комплекс, угольная шахта, дифференциальные уравнения, асинхронные двигатели, схема замещения, выбег.

Vasylets S.V. Mathematical modelling of transients at multiple engine electrotechnical complexes of mines. – Manuscript.

Thesis for a Candidate of technical science on speciality 05.09.03 - Electro-technical complexes and systems. - Donetsk National Technical University, Donetsk, 2010.

In this thesis the mathematical model of multiple engine electrotechnical complex of mine is improved, which based on differential equations for providing a

description of induction motors, cable lines, leakage circuit, that differs from known models in taking into account stochastic reconfiguration of power net and in allowing to determine an influence of induction motors upon the character of voltage decreasing on individual branches of the power net after circuit breaker tripping. The analytical dependences for evaluation of transients in mining electrotechnical complex in case of current leakage by quantity of electricity through leakage circuit is defined more accurately. The functional dependences of quantity of electricity through leakage circuit on length of cable with defective isolation and on motors load moment, taking into account running-down of induction motors, are developed for the first time. The procedure of parameters calculation and selection of electrotechnical complex of mine is improved by adding an estimation of transients after centralized tripping, using quantity of electricity through leakage circuit.

Key words: transients, mathematical modelling, electrotechnical complex, coal mine, differential equations, induction motors, equivalent circuit, running-down.