

УДК 622.012.2:621.311.1

К.М. Маренич, канд. техн. наук, доц.,
С.В. Василець, канд. техн. наук,
Донецький національний технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ДІЛЬНИЦІ ШАХТИ ШЛЯХОМ ПРИПИНЕННЯ ДІЇ ЗВОРОТНОЇ ЕРС ДВИГУНІВ

Шляхом математичного моделювання оцінена ефективність примусового припинення дії зворотної ЕРС асинхронних двигунів споживачів за допомогою закорочення трьох фаз кожного з відгалужень мережі в найкоротший термін після відключення групового силового комутаційного апарата як способу підвищення безпеки експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти.

Ключові слова: математична модель, шахта, дільниця, електротехнічний комплекс, виток струму на землю, кількість електрики, асинхронний двигун, захист.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. Безпека персонала, що працює з електрообладнанням технологічної дільниці шахти, визначається рівнем захисту від ураження електричним струмом. На сьогоднішній день у складі дільничних знижувальних підстанцій експлуатуються апарати захисту від витоків струму на землю, що виконують захисне відключення електромережі при наявності достатньої величини струму витoku на землю [1]. Однак, ця апаратура не виконує повною мірою функції захисту людини від електроураження. Причиною є наявність в електричній мережі (після її відключення) зворотної ЕРС асинхронних двигунів (АД) споживачів дільниці.

Підвищення енергетичних показників гірничих машин призводить до використання кабелів підвищеної довжини та перерізу, електродвигунів підвищеної потужності. Це обумовлює суттєве підвищення активної та ємнісної провідностей ізоляції кабельної мережі дільниці та збільшення часу існування зворотної ЕРС двигунів після їх відключення від джерела живлення. Внаслідок цього збільшується величина струму витoku на землю та тривалість його існування, що може стати причиною смертельного електроураження людини при протіканні струму витoku через її тіло, або запалення метаноповітряної суміші достатнього рівня концентрації при виникненні електричної дуги в місці пошкодження ізоляції. Тому актуальним є питання щодо автоматичного обмеження тривалості існування ЕРС обертання асинхронного двигуна під час вибігу.

Аналіз досліджень та публікацій. З метою поліпшення стану електробезпеки при експлуатації дільничних ЕТК шахти захисне відключення електромережі дільниці груповим автоматичним вимикачем (АВ) в разі виникнення струму витоку на землю може бути доповнене примусовим відключенням усіх відгалужень, які комутуються [2]. Дроблення мережі на окремі відгалуження знижує ємнісну складову струму витоку, яка підтримується ЕРС вибігу двигунів. Однак це не передбачає усунення ЕРС обертання двигунів споживачів, крім того – потребує прокладання додаткових провідників для подавання вказаного сигналу на схеми дистанційного керування пускачів, що ускладнює структуру електромережі дільниці, знижуючи її надійність.

Для гасіння зворотньої ЕРС двигунів та зменшення струмів витоку може бути запропоновано паралельно фазам загальної частини мережі підключати трифазний напівпровідниковий закорочувач [3]. Проте такий спосіб неприйнятний для ЕТК ДШ через самовільне відключення комутаційних апаратів відгалужень при виконанні закорочення у загальній частині мережі, що не дозволить здійснити гасіння зворотньої ЕРС двигунів відгалужень.

Як один із перспективних способів підвищення безпеки експлуатації дільничного ЕТК пропонується виконувати примусове припинення дії (шляхом гасіння) зворотньої ЕРС асинхронних двигунів споживачів шляхом закорочення трьох фаз кожного з відгалужень мережі в найкоротший термін після відключення групового силового комутаційного апарата [4]. Таке закорочення можливе в місці під'єднання гнучкого кабеля до комутаційного апарата відгалуження або до затискачів статора двигуна. Наслідком закорочування є самовільне відключення комутаційних апаратів відгалужень через знеструмлення їх котушок керування. Виток струму на землю може статися в довільній, непередбачуваній точці мережі. До сьогодення не розроблені способи виявлення місця виникнення такого витоку. Тому раціональним є захисне закорочення фаз у всіх відгалуженнях мережі, що має покращити електробезпеку стану кожного відгалуження та загальної частини мережі.

Постановка задачі. Задачею роботи є теоретичне дослідження ефективності виконання захисного закорочення фаз у всіх відгалуженнях дільничної мережі в разі виникнення витоку струму на землю.

Основний матеріал та результати досліджень. Моделювання виконувалося з використанням запропонованої в [5, 6] математичної моделі дільничної електромережі шахти. Зокрема, відгалуження ме-

режі з асинхронним двигуном описане системою диференціальних рівнянь у просторових векторах [7], яке розв'язується чисельними методами у нерухомій системі координат:

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

де $\bar{\psi}_1$ – просторовий вектор потокозчеплення статора двигуна та гнучкого кабеля; $\bar{i} = (L_r\bar{\psi}_1 - L_m\bar{\psi}_r)/(L_1L_r - L_m^2)$, $L_1 = k_{cx}^2L_k + L_{sl} + L_m$ – 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 .

В результаті моделювання закорочення фаз відгалужень ЕТК ДШ напругою 660 В (табл. 1) одночасно з відключенням АВ, при під'єднанні закорочувача до виходу КА кожного відгалуження, встановлено (рис. 1, а–в), що струм короткого замикання від зворотної ЕРС двигуна у колі «статор АД – гнучкий кабель – закорочувач», досягаючи ударної величини в першому періоді (близько 1000 А для першого відгалуження ЕТК вказаної конфігурації), характеризується експоненціальним зниженням амплітудних значень, наближаючись до нуля приблизно за 0,2 с від моменту закорочення. Падіння напруги на активно–індуктивному опорі гнучкого кабеля при протіканні такого струму обумовлює наявність затухаючої напруги незначного рівня (перша амплітуда – до 15% від номіналу) на затискачах статора двигуна \bar{u}_{se} після моменту виконання закорочення, тривалість існування якої відповідає терміну протікання струму статорним колом. Даний фактор відсутній при підключенні закорочувача безпосередньо до двигунового навантаження (рис. 1, д–ж): напруга \bar{u}_{se} на затискачах статора двигуна після моменту закорочення дорівнює нулю.

Таким чином, різниця між двома варіантами примусового припинення дії зворотної ЕРС двигунового навантаження ЕТК (шляхом під'єднання закорочувача до виходу комутаційного апарата або до входу двигуна) полягає у наявності падіння напруги на опорі ГК (у першому випадку) через протікання струму гасіння ЕРС вибігу АД. Порівняльне моделювання має виявити значимість даного фактора.

Таблиця 1

Характеристика елементів ЕТК ДШ напругою 660 В

№ відгалуження	Двигун		Гнучкий кабель		Машина, механізм
	Тип	Потужність, кВт	Тип	Довжина, м	
1	ЭДКОФВ315М4	160	КГЭШ 3х50	210	конвеєр СПЦ–230
2	ЭДКОФВ315М4	160	КГЭШ 3х50	210	
3	ЭДКОФВ315М4	160	КГЭШ 3х50	50	
4	АИУМ225М4	55	КГЭШ 3х35	50	насосна станція СНТ–32
5	АИУМ225М4	55	КГЭШ 3х35	20	насосна станція СНТ–32
6	ЗВ180М4	30	КГЭШ 3х16	50	кріплення «Глінік»
7	ЗВ180М6	18,5	КГЭШ 3х35	50	лебідка ЛКГН

Таблиця 2

Характеристика елементів ЕТК ДШ напругою 1140 В,
прийняті для моделювання

№ відгалуження	Двигун			ГК марки КГЭШ		Найменування споживача		
	позначення	Тип	Потужність, кВт	перетин жили, мм ²	довжина, м			
1	М1	ЭДКОФВ315LB4	250	35	390	конвеєр СП330, приводний блок	верхній	
2	М2	ЭДКОФВ315LB4	250	35	55		нижній	
3	М3	ДКВ250КМ	250	50	390	комбайн «Кузбас-500», блок різання	виконавчий орган	
	М4	ДКВ45	45				№1	подача
4	М5	ДКВ250КМ	250	70	390		№2	виконавчий орган
	М6	ДКВ45	45					подача
	М7	ДКВ45	45					гідропривід
5	М8	2ЭДКОФВ250М4	55	10	55		насосна станція СНД200/32, агрегат	перший
	М9	2ЭДКОФВ250М4	55			другий		

Отримані шляхом комп'ютерного моделювання діаграми струму витоку на землю, за умови виконання закорочення фаз (одночасно із захисним відключенням мережі) на виході комутаційних апаратів відгалужень (рис. 2, а) та в місці під'єднання двигунового навантаження (рис. 2, б) при відсутності та наявності компенсації ємнісної

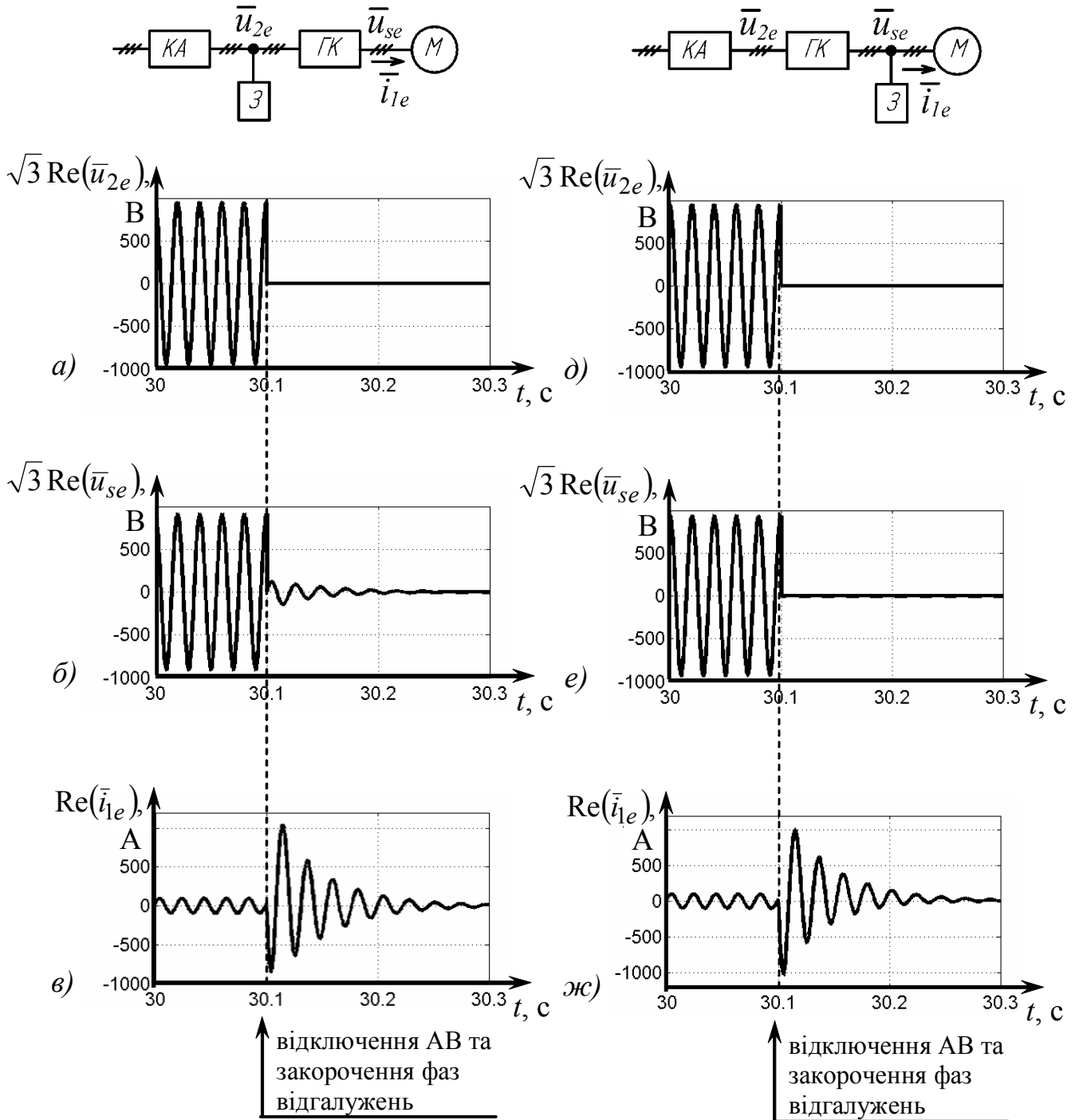


Рис. 1. Діаграми лінійних напруг на виході КА відгалуження (а), двигуновому навантаженні (б) та струм статора (в) першого двигуна моделі ЕТК ДШ напругою 660 В за умови закорочення фаз на виході комутаційного апарата відгалуження; випадок підключення закорочувача до затискачів двигуна висвітлюють відповідні діаграми д, е, ж

складової струму витоку на землю, підтверджують принципову можливість припинення впливу зворотньої ЕРС двигунів на стан аварійної точки після захисного відключення напруги живлення мережі (момент t_2).

В момент замикання контактів закорочувачів відбувається вирівнювання зарядів ємностей ізоляції кабелів ЕТК відносно землі (які визначалися фазами напруги мережі) до величини U_C з подальшим перехідним процесом розряду. Складова струму витоку, обумовлена розрядженням фазних ємностей ізоляції кабелів мережі ЕТК після моменту t_2 закорочення фаз відгалужень, носить аперіодичний характер в разі відсутності компенсуючого дроселя. Наявність останнього обумовлює коливальний характер перехідного процесу.

Оцінку ефективності застосування конкретного засобу захисту від витоків струму на землю доцільно проводити за загальною кількістю електрики Q , що пройшла через опір тіла людини (1 кОм) за час аварійного процесу. Найбільш ефективним вважатиметься засіб, при якому величина Q приймає найменше значення з максимальною імовірністю. Про рівнозначність засобів захисту з точки зору підтримання електробезпеки свідчитиме тотожність (в межах припустимої похибки) даних величин, або, в разі проведення паралельних дослідів, однорідність вибірок Q за прийнятого рівня значущості.

З використанням моделі ЕТК напругою 660 В (табл. 1) проведено 50 актів моделювання стану системи (в разі виникнення однофазного витоку струму на землю) при виконанні захисного відключення мережі за відсутності та наявності автокомпенсації ємнісної складової струму витоку. У другому випадку модель враховує наступні фактори, що змінюються випадковим чином: коефіцієнт розладу автокомпенсатора, відносне значення напруги самовільного відключення контакторів відгалужень. Аналогічні розрахунки проведені для умов ЕТК ДШ напругою 1140 В (табл. 2). Гіпотеза про нормальність розподілення вибірових значень Q не була відкинута за рівня значущості 0,05 згідно критерія Колмогорова–Смирнова.

Для умов ЕТК напругою 660 В оцінені значення загальної кількості електрики через опір тіла людини за час аварійного процесу в разі виконання гасіння зворотньої ЕРС двигунів споживачів при відсутності компенсації ємнісної складової струму витоку становлять: при розміщенні закорочувачів на виході комутаційних апаратів відгалужень – 17,3 мА·с, при виконанні закорочення затискачів статорів

двигунів – 17,5 мА·с. Різниця становить менше 2%, що свідчить про рівнозначність двох розглянутих варіантів розміщення закорочувачів у відгалуженнях з точки зору підтримання електробезпеки експлуатації. За наявності автокомпенсації ємнісної складової струму витoku для кожного з двох варіантів розміщення закорочувачів отримано вибірки значень Q об'ємом $n=50$.

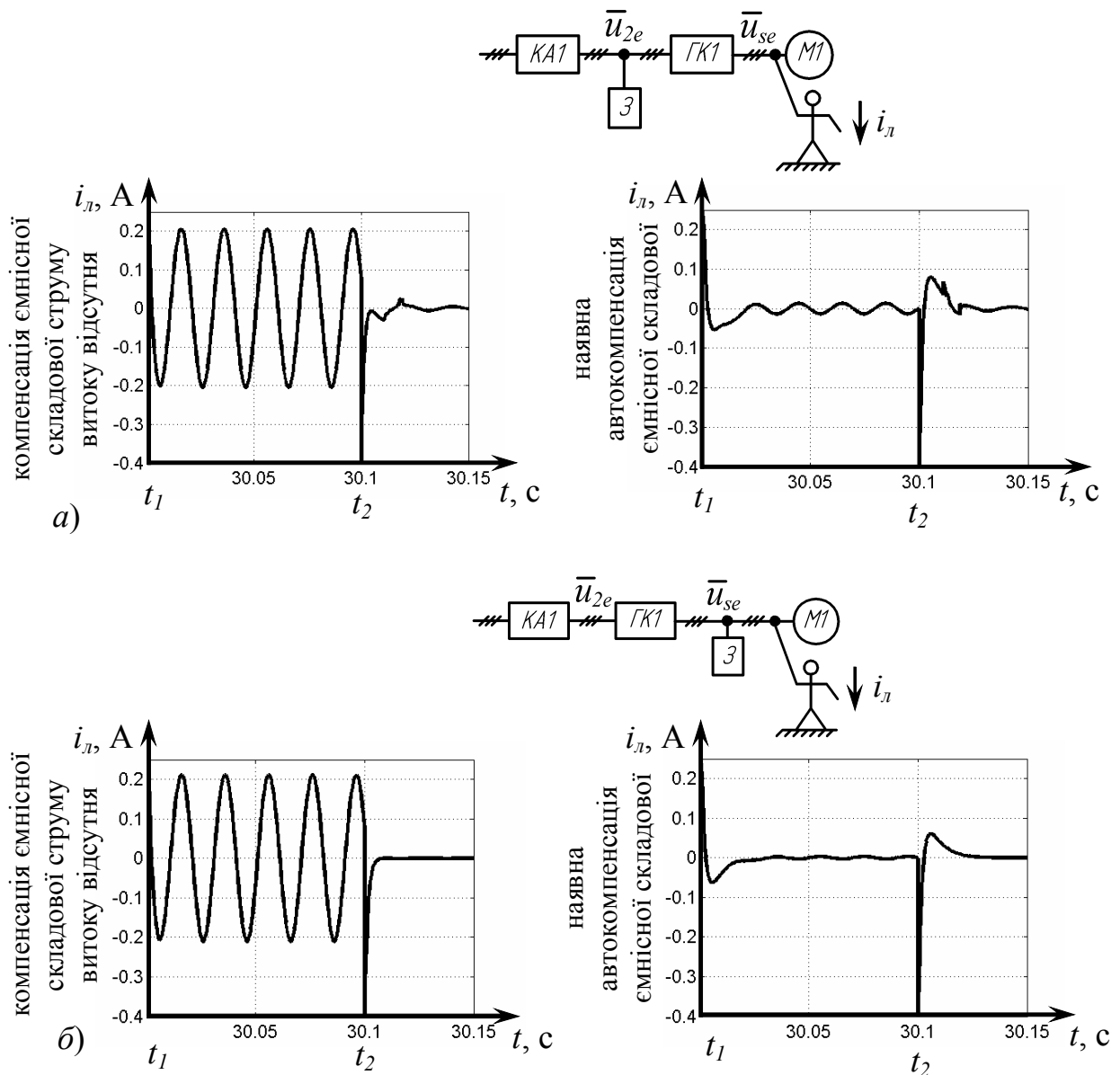


Рис. 2. Діаграми струму витoku на землю при закороченні фаз відгалужень в момент t_2 , отримані шляхом моделювання аварійного процесу в ЕТК ДШ напругою 660 В при підключенні закорочувачів до виходів КА відгалужень (а) та затискачів статорів двигунів споживачів (б); штучна нульова точка кожного закорочувача ізолювана

Перевірка отриманих вибірок за критерієм Ст'юдента не виявила підстав для відкидання гіпотези про однорідність цих вибірок при рівні значущості 0,05 (обраховане абсолютне значення критерія 0,69 є меншим від граничного 1,98). Це підтверджує рівнозначність, з точки зору електробезпеки експлуатації, розглянутих варіантів підключення закорочувачів до фаз відгалужень

Для графічного відображення чисельних характеристик розподілення імовірностей величини Q використовується фігура, наведена на рис. 3. При цьому прийняті наступні позначення: $m(x)$ – математичне очікування дійсної величини X ; $\tilde{m}(x)$ – медіана; s – стандартне відхилення; t – коефіцієнт розподілення Ст'юдента для довірчої імовірності γ та числа ступенів свободи $(n-1)$, де n – об'єм вибірки. Обрахування довірчих інтервалів для оцінок математичного очікування та стандартного відхилення величини Q проводилося для довірчої імовірності $\gamma=0,95$.

Аналіз порівняльних діаграм результатів моделювання (рис. 4) дозволяє встановити, що застосування захисного відключення без додаткових засобів захисту в ЕТК ДШ напругою 660 В та 1140 В розглянутої конфігурації є недостатніми для підтримання безпечного стану мережі. В першому випадку математичне очікування загальної кількості електрики Q через опір тіла людини (1 кОм) за час аварійного процесу складає 56,9 мА·с при стандартному відхиленні 1,499 мА·с. Для мережі напругою 1140 В цей показник складає 173,28 мА·с при стандартному відхиленні 5,74 мА·с.

Результати моделювання підтверджують ефективність автокомпенсації ємнісної складової струму витoku в ЕТК напругою 660 В: обрахована імовірність менша за прийняту граничну $P_{ep}=10^{-6}$: $P(Q > Q_{nprun}) < 10^{-10}$. У мережі напругою 1140 В застосування автокомпенсації як додаткового засобу підтримання електробезпеки виявляється недостатнім: обрахована імовірність $P(Q > Q_{nprun})=0,25$ перевищує граничну $P_{ep}=10^{-6}$.

Порівняльні діаграми (рис. 4) свідчать, що ефективність застосування гасіння зворотньої ЕРС обертання приблизно ідентична застосуванню автокомпенсації ємнісної складової струму витoku. В першому випадку для мережі 660 В величина Q становить близько 17 мА·с, а із застосуванням автокомпенсації – $\bar{Q}=15$ мА·с.

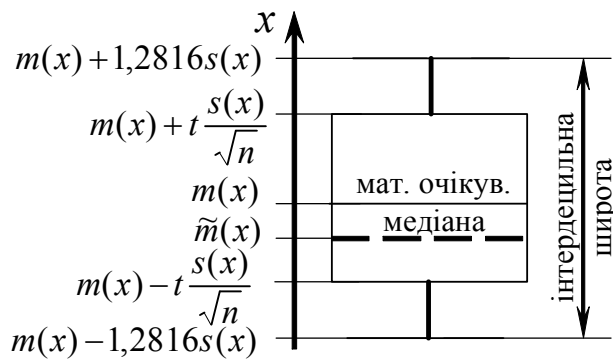


Рис. 3. Фігура для графічного відображення чисельних характеристик нормального розподілення імовірностей дійсної випадкової величини X з функцією розподілення $F(x)$

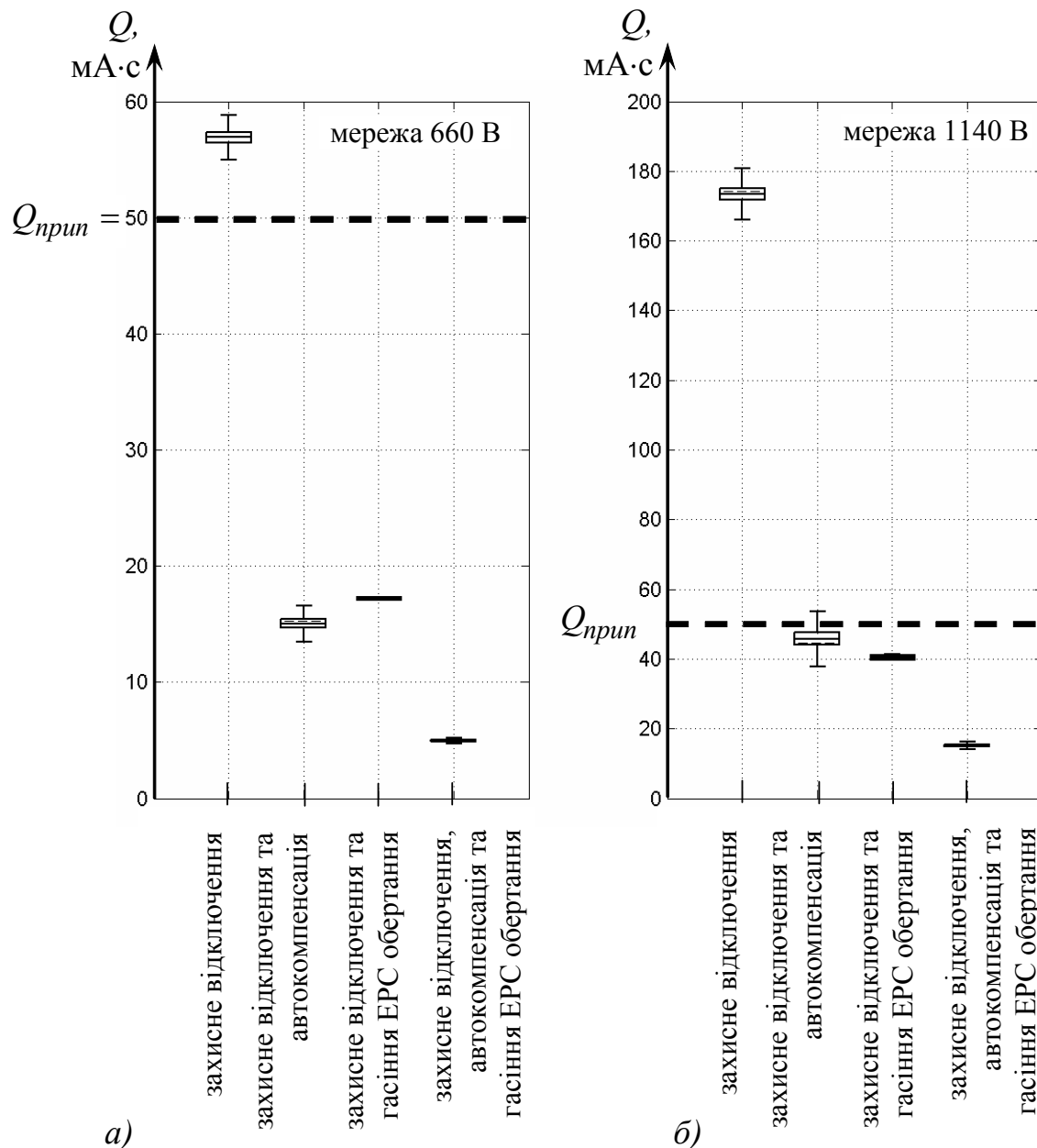


Рис. 4. Діаграми для порівняння ефективності засобів підтримання електробезпеки ЕТК ДШ за обрахованими при моделюванні вибірковими характеристиками кількості електрики через опір кола витoku струму на землю для прийнятої конфігурації ЕТК ДШ напругою 660 В (а) та 1140 В (б)

Для ЕТК напругою 1140 В вказані показники становлять близько 41 мА·с та 46 мА·с відповідно.

Найкращі показники електробезпеки, за даними моделювання, спостерігаються при застосуванні автокомпенсації ємнісної складової струму виток до моменту захисного відключення мережі з подальшим гасінням зворотньої ЕРС двигунів. За цих умов для ЕТК ДШ напругою 660 В математичне очікування величини Q складає близько 5 мА·с при стандартному відхиленні 0,2 мА·с, для мережі напругою 1140 В – близько 15 мА·с при відхиленні 0,8 мА·с.

Таким чином, найменші вибіркові середні значення загальної кількості електрики через опір кола виток на землю за час аварійного процесу (для ЕТК ДШ типової конфігурації напругою 660 В – близько 5 мА·с, при напрузі 1140 В – 15 мА·с) відповідають виконанню примусового гасіння зворотньої ЕРС двигуна кожного відгалуження під час вибігу (шляхом закорочення фаз відгалужень) за умови автоматичної компенсації ємнісної складової струму виток до моменту захисного відключення мережі. Сукупність таких заходів дозволяє приблизно на порядок зменшити математичне очікування загальної кількості електрики через опір кола виток на землю за час аварійного процесу порівняно із виконанням захисного відключення мережі без додаткових засобів зниження струму виток (в останньому випадку для ЕТК напругою 660 В вказаний показник знаходиться на рівні 57 мА·с, а при напрузі 1140 В – 173 мА·с).

Висновки і напрямок подальших досліджень. Дані моделювання свідчать про зниження на порядок кількості електрики через опір кола виток на землю за час аварійного процесу в разі застосування автокомпенсації до моменту захисного відключення мережі з подальшим гасінням ЕРС обертання двигунів шляхом закорочування фаз відгалужень порівняно із застосуванням захисного відключення мережі за відсутності додаткових засобів зниження струму виток. Порівняно із застосуванням лише автокомпенсації або гасіння ЕРС обертання, комбінація цих засобів знижує кількість електрики приблизно в три рази. В ході подальших досліджень має бути встановлена залежність ефективності гасіння зворотньої ЕРС двигунів від конфігурації мережі та режимів роботи двигунів.

Список літератури

1. Забезпечення безпеки та ефективності шахтних електроустановок / [Вареник Є.О., Випанасенко С.І., Дзюбан В.С. и др.]; за ред. Г. Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Нац. гірничий ун-т, 2004. – 334 с.

2. Способ защиты человека от поражения электрическим током в сети с изолированной нейтралью: авт. изобрет. В.С. Прудников. – А.с. СРСР №1691917, H02H3/16; опубл., Бюл. №42, 15.11.1991.
3. Федорашко Ю.И. Защита от токов утечки с автоматическим самоконтролем в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 6 кВ: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн наук: спец. 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы» / Ю.И. Федорашко. – Алматы, 2006. – 18 с.
4. Спосіб захисту людини від ураження електричним струмом в мережі з ізольованою нейтраллю: патент на винахід 82111 (UA), МПК (2006) H02H 3/16 / К.М. Маренич, С.В. Василець. – а 2006 00387.; заявл. 16.01.2006.; опубл 11.03.2008., Бюл. №5
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. 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 інформатизації. – 2008. – №2 (17). – С. 71-74.
7. Ковач К.П. Переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Стаття надійшла до редколегії 24.10.2011.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ковальов Є.Б.

К.Н. Маренич, С.В. Василець. Повышение безопасности эксплуатации электросети участка шахты путем гашения обратной ЭДС двигателей. Путем математического моделирования оценена эффективность принудительного прекращения действия обратной ЭДС асинхронных двигателей потребителей при помощи коротчения трех фаз каждого из ответвлений сети в кратчайший срок после отключения группового силового коммутационного аппарата как способа повышения безопасности эксплуатации электротехнического комплекса участка шахты.

Ключевые слова: математическая модель, шахта, участок, электротехнический комплекс, утечка тока на землю, количество электричества, асинхронный двигатель, защита.

K. Marenych, S. Vasylets. The Mine Power Net Safety Increasing by Suppression of Motors Back EMF. By mathematical modelling the effectiveness of forced suppression of motors back EMF was estimated. The suppression was realized by three-phase closing of each network branch at once after circuit breaker tripping in case of leakage current. This method is intended for safety increasing of mine power net.

Keywords: mathematical model, coal mine, section, power network, leakage current, quantity of electricity, induction motor, protection.

© Маренич К.М., Василець С.В., 2012