

УДК 621.647.1

**К.М. Маренич, канд. техн. наук; І.В. Ковальова**  
(Україна, Донецьк, Донецький національний технічний університет)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ У ДІЛЬНИЧНІЙ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ ШАХТИ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ ЗАСОБУ СИНХРОННОГО ДВОБІЧНОГО ЗНЕСТРУМЛЕННЯ МІСЦЯ ПОШКОДЖЕННЯ КАБЕЛЮ**

**Постановка проблеми і її зв'язок з прикладними задачами**

Умови експлуатації електромеханічного обладнання технологічних дільниць гірничих підприємств визначають нестаціонарність його місцезнаходження, що, у свою чергу, обумовлює необхідність застосування гнучких кабелів. У той же час, в умовах шахти має місце підвищена небезпека механічного пошкодження таких кабелів, що являє собою причину найнебезпечніших аварійних станів електротехнічного комплексу – коротких замикань (КЗ). Дія існуючих пристроїв максимального струмового захисту полягає у відокремленні місця виникнення КЗ від джерела живлення з боку дільничної трансформаторної підстанції. Крім цього, непряму захисну функцію виконує дільничний апарат захисту від витоків струму на землю (АЗ). Він формує команду на відключення дільничної мережі від в разі пошкодження ізоляції (замикання на заземлюючу жилу кабелю через провідниковий гумовий екран) навіть однієї фази кабелю. Враховуючи на те, що замикання на землю однієї фази в мережі з ізольованою нейтраллю не створює струмів, небезпечних за займанням обладнання, та виходячи з того, що розташування силових жил кабелю не дозволяє виникнення трифазного короткого замикання перш, ніж виникне однофазне або двофазне замикання на землю, захисне відключення мережі при пошкодженні ізоляції однієї фази може розглядатися як захід випереджального струмового захисту. Ці засоби дозволяють виявити коротке замикання у силовому приєднанні електротехнічного комплексу і відключити останній від джерела електроживлення, але не дозволяють припинити струм у точці К.З., який певний час буде підтримуватись дією зворотного енергетичного потоку (електрорушійної сили обертання) асинхронного двигуна (АД), що був увімкнений в аварійному приєднанні. Тому задача обґрунтування принципу і розробки пристрою випереджального струмового захисту, дія якого мала б забезпечити синхронне двобічне знеструмлення місця пошкодження силової жили кабелю як з боку живильної трансформаторної підстанції, так і з боку асинхронного двигуна споживача аварійного приєднання є актуальною. Актуальним також є вивчення питань щодо сумісності такого пристрою з роботою дільничного апарату захисту від витоків струму на землю.

## Аналіз досліджень та публікацій

Комплексні дослідження процесів у гірничих дільничних електротехнічних комплексах при виникненні небезпечних станів описані у монографіях [1,2], де також розглянуто принципи напрями побудови систем захисту. Однак проблематика досліджень стосується лише припинення енергетичного потоку, спрямованого від живильної трансформаторної підстанції. Дослідження процесів в електротехнічному комплексі, що визначаються зворотними енергетичним потоками асинхронних двигунів описані в роботі [3], але вони стосуються тільки питань впливу цієї енергетики на параметри струму витoku на землю в дільничній шахтній мережі. Тому питання створення засобів синхронного двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю в дільничному електротехнічному комплексі шахти потребує спеціального дослідження.

## Постановка задачі

Задачею дослідження є обґрунтування технічних рішень випереджального струмового захисту з функцією синхронного двобічного знеструмлення місця пошкодження силової жили кабелю та встановлення характеру зміни параметрів шахтного дільничного електротехнічного комплексу в разі виникнення замикання фази на землю за умови застосування удосконаленого пристрою струмового захисту.

## Основний матеріал і результати досліджень

Задача обґрунтування способу і схеми пристрою випереджального струмового захисту з функцією синхронного двобічного знеструмлення місця пошкодження силової жили кабелю може бути вирішена стосовно до рудникового (шахтного) дільничного електротехнічного комплексу, де обов'язковою умовою експлуатації є застосування шахтних гнучких екранованих кабелів із підключенням заземлюючої жили кожного з них до засобів заземлення у пристроях кабельних введів відповідних магнітних пускачів і АД [4]. У цьому разі інформаційним параметром про виникнення однофазного або двофазного К.З. на землю за умови наявності інформаційного зв'язку між статорною обмоткою та заземленим корпусом АД споживача аварійного приєднання може бути струм у заземлюючій жилі кабелю електроживлення.

Схемою пристрою реалізації цього способу (рис.1) передбачено, що підключення заземлюючої жили живильного кабелю в пристрої кабельного вводу АД до заземлюючого болта має бути виконане через трансформатор струму ТА1, вихід якого призначений для приєднання до входу виконавчого комутаційного апарата SF1 (на схемі не показаний). Два його розмикаючих контакти (SF1.1; SF1.2) з'єднують обмотки статора двигуна (опори  $Z_s$  обмоток) у трифазну схему. Таким чином, наявність струму в мережі трансформатора ТА1 є інформаційним сигналом для спрацьовування комутаційного апарата SF1 і розмикання його контактів. Цим роз'єднується трифазна схема статорної обмотки двигуна, що перешкоджає протіканню зворотного струму з цієї обмотки на точку К.З. у живильному кабелі. Загальна точка фазних обмоток статора і розмикаючих контактів комутаційного апарата (відповідно до схеми) приєднана до металевого корпусу двигуна через ланцюг із з'єднаних зустрічно діода VD1, стабілітрона VD2 та послідовно з ними – струмообмежуючого резистора R1.

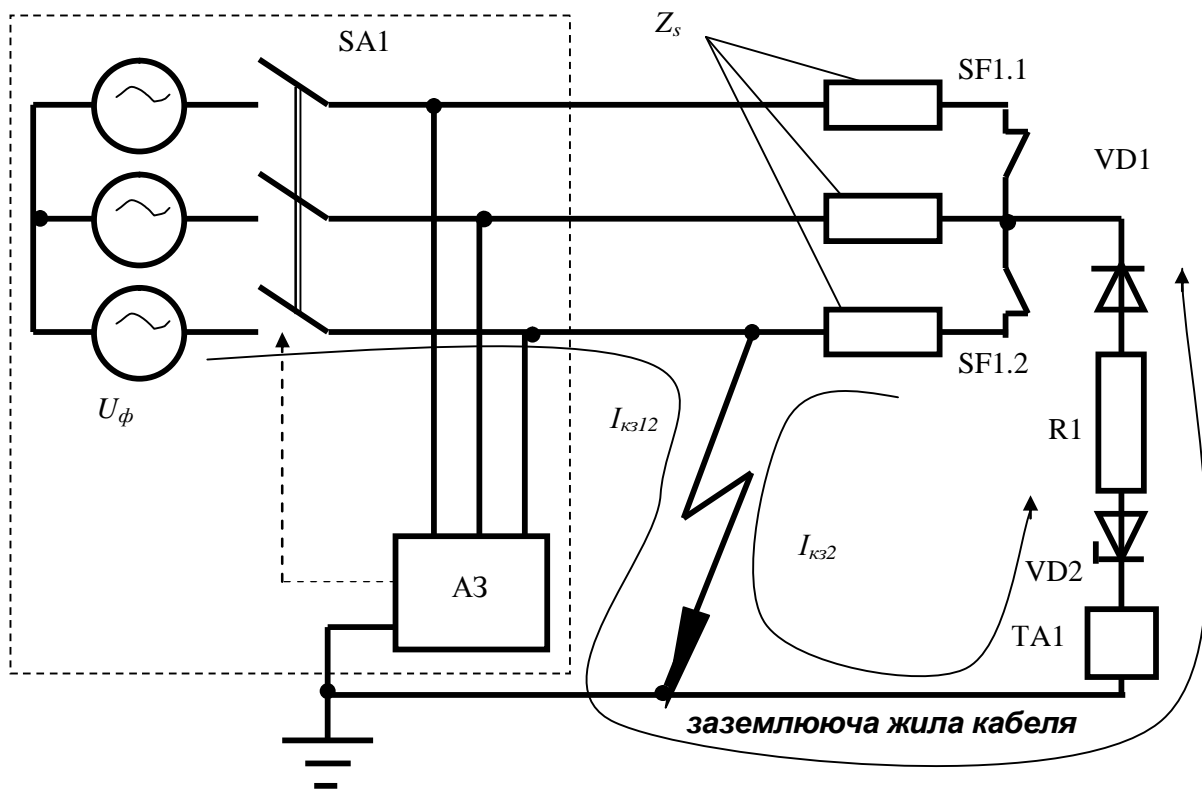


Рис. 1. Розподіл струмів замикання фази на землю в кабелі живлення АД за умови застосування шахтного екранованого кабелю та пристрою відключення зворотного енергетичного потоку (виконавчий пристрій SF1 не показаний)

Дія цього пристрою забезпечує відокремлення впливу енергетичного потоку на місце пошкодження живильного кабелю з боку АД синхронно із відокремленням впливу енергетичного потоку від живильної трансформаторної підстанції. Таке синхронне відокремлення за умови реакції захисту на пошкодження ізоляції однієї із фаз кабелю є випереджальним щодо подальшого розвитку міжфазного короткого замикання. Це пояснюється наступним .

Процес міжфазного короткого замикання в кабелі живлення асинхронного двигуна розпочинається з пошкодження ізоляції однієї або двох фаз, що за умови застосування гнучкого екранованого шахтного кабелю призводить до металевих контактів жил пошкоджених фаз із заземлюючою жилою. З одного боку, це викликає спрацювання максимального струмового захисту живильної трансформаторної підстанції (при міжфазному замиканні) та апарата захисту АЗ від витоків струму на землю і відповідного відключення пошкодженого кабелю від цієї підстанції (фазні напруги  $U_\phi$ ) автоматичним вимикачем SA1. Водночас, в момент виникнення однофазного або двофазного замикання на землю під дією значної різниці потенціалів між заземлюючою жилою та загальною точкою статора двигуна стабілітрон VD2 відкриється у зворотному напрямі. Створиться коло протікання струму  $I_{k31}$  із живильної трансформаторної підстанції через пошкоджену жилу (пошкоджені жили) кабелю та його заземлюючу жилу, корпус АД, стабілітрон VD2, резистор R1, діод VD1 – до загальної точки статора. У разі виникнення К.З. в кабелі після відключення мережі за умови знаходження АД споживача в стані вільного вибігу струм  $I_{k32}$  буде визначатися

величиною ЕРС обертання АД і протікати від його статора за вищезначеним шляхом. Це сприяє до виникнення струму у вторинній обмотці трансформатора струму ТА1, що знаходиться в приєднанні заземлюючої жили кабелю до металевого корпусу АД. Через це виконавчий пристрій SF1 формує команду на роз'єднання контактами трифазної схеми статора і припинення струму в точці пошкодження кабелю живлення, обумовленого дією зворотного енергетичного потоку АД.

Схема приєднання діода VD1 і стабілітрона VD2 виключає вплив пристрою на роботу дільничного апарата захисту (АЗ) від витоків струму на землю, оскільки перешкоджає протіканню на землю постійного оперативного струму цього апарата (що накладається на трифазну електричну мережу) через обмотку статора двигуна. Ця схема приєднання відокремлює статор АД від його заземленого корпусу, що відповідає принципу ізоляції статора двигуна від елементів заземлення мережі у робочому режимі експлуатації.

За умови застосування розглянутого вище засобу синхронного двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю структура електротехнічного комплексу технологічної дільниці шахти набуває принципово нового вигляду, що обумовлює необхідність комплексного дослідження процесів у цьому об'єкті в разі виникнення замикання фази на землю в кабелі силового приєднання. Схема електротехнічного комплексу дільниці шахти з урахуванням наявності АЗ типу АЗУР-4 та зосередженого характеру опорів ізоляції кабелю ( $R_{is}, C_{is}$ ) наведена на рис.2.

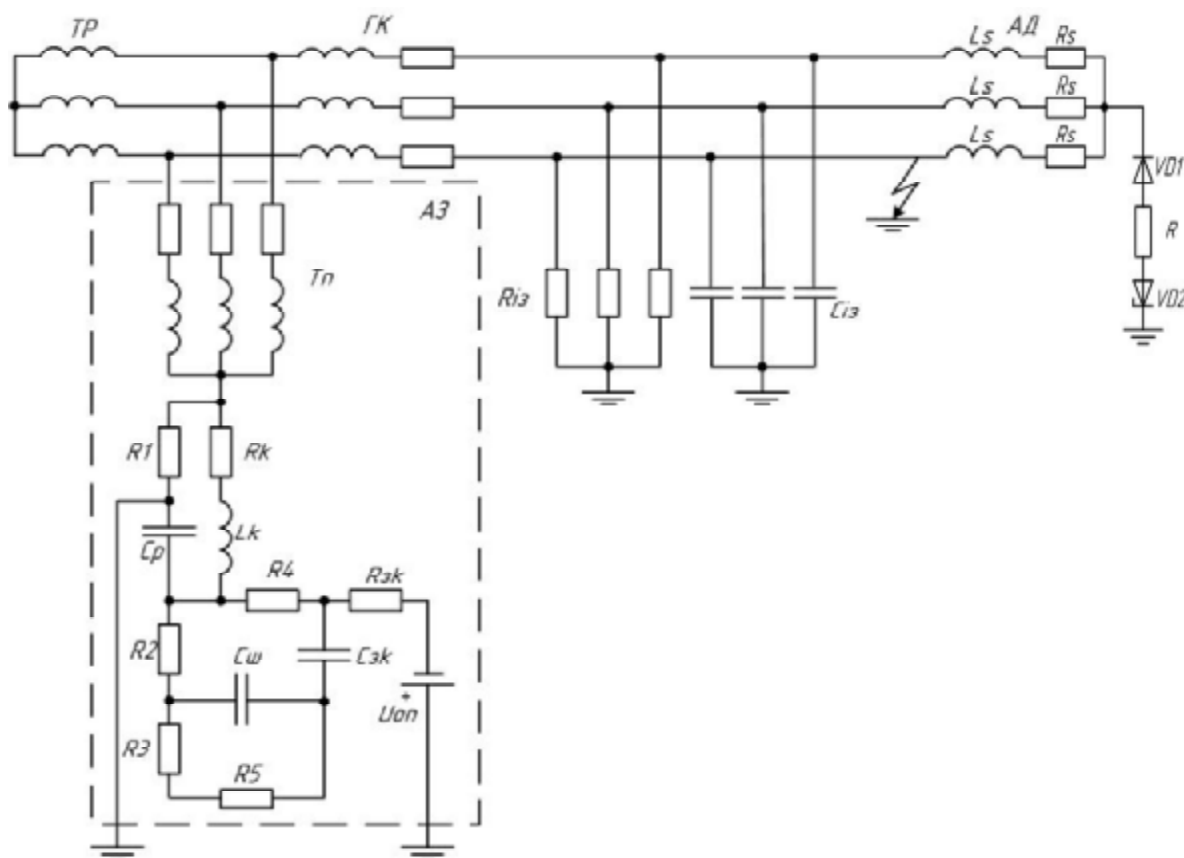


Рис. 2. Схема електротехнічного комплексу дільниці шахти в стані однофазного замикання на землю з урахуванням наявності апарата захисту АЗУР-4

Відповідно до наведеної схеми запропонована комп'ютерна модель (рис.3) з уведенням таких припущень:

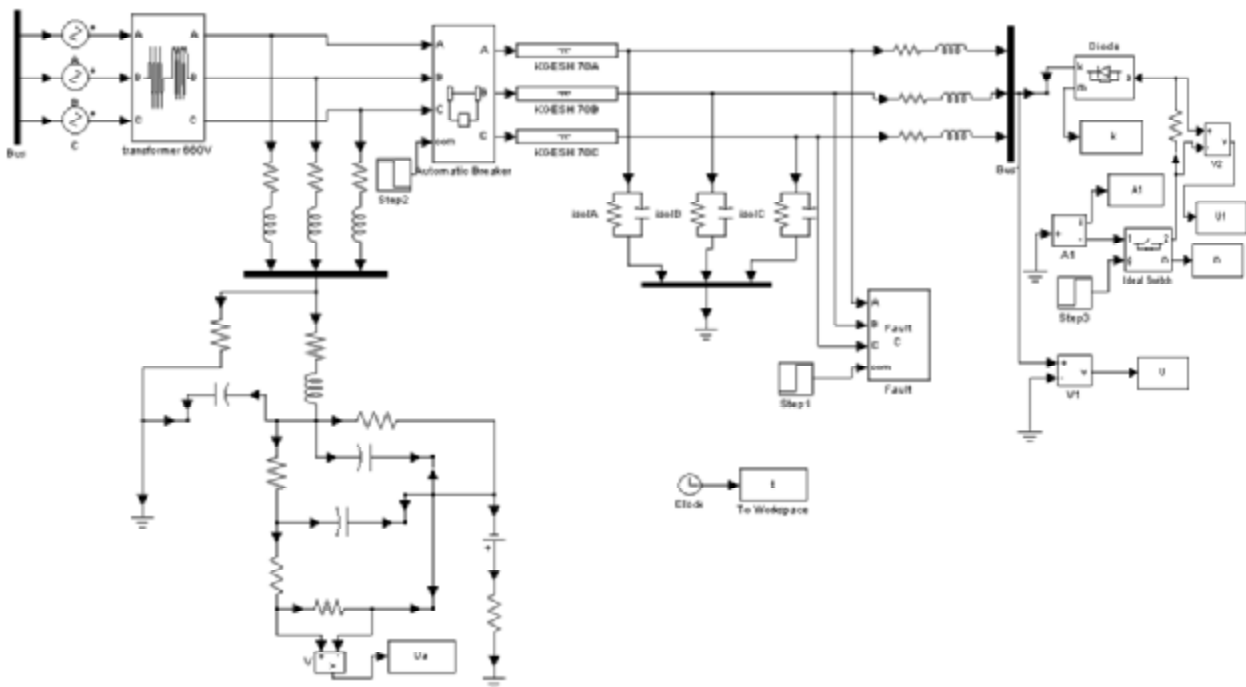


Рис. 3. Комп'ютерна модель електротехнічного комплексу дільниці шахти в стані однофазного замикання на землю

- асинхронний двигун являє собою еквівалентне активно-індуктивне навантаження ( $R_s, L_s$ ), що дозволяє додати до моделі ланцюг між заземлюючою жилою та «зіркою» статора (надалі за текстом – струмоведучий ланцюг „статор – корпус АД”;

- робота стабілітрона VD2 моделюється замиканням «ідеального контакту» в момент виникнення однофазного (двофазного) замикання на землю.

Практичне значення має дослідження параметрів струму в ланцюзі „статор – корпус АД” (рис. 4) та падіння напруги (рис.5) на контрольованому резисторі R5 реагуючого пристрою апарата АЗУР-4 за умови виникнення одно- або двофазного замикання на землю (в момент  $t_0$ ) в кабелі живлення АД за умови відкриття у зворотному напрямі стабілітрона VD2 пристрою захисту (рис. 1, рис. 2).

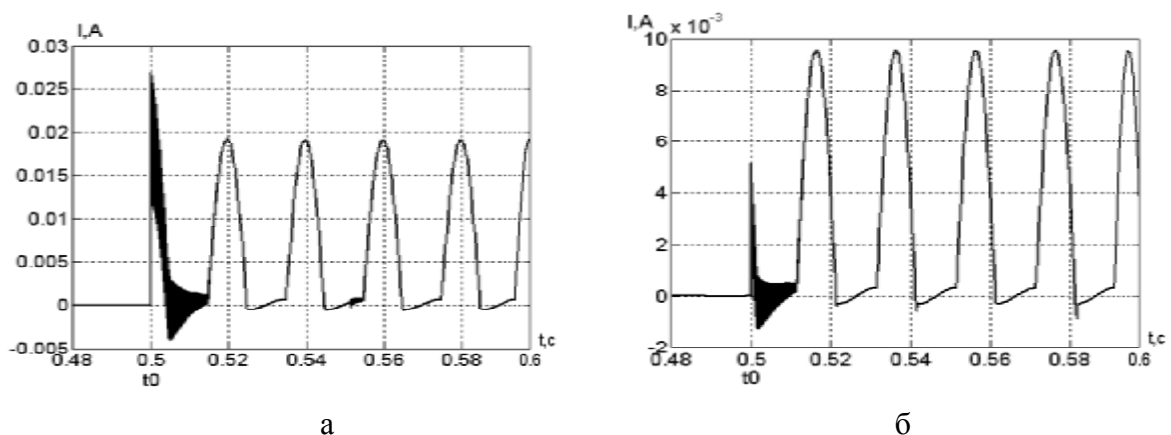


Рис. 4. Струм  $I_{K31}$  в ланцюзі „статор – корпус АД”, обумовлений напругою мережі при однофазному (а) та двофазному (б) замиканні на землю в кабелі живлення АД

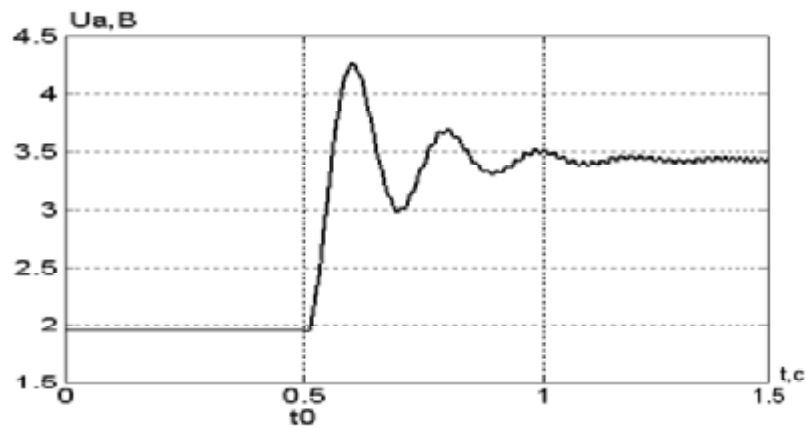


Рис. 5. Напруга на контрольованому резисторі R5 апарата захисту АЗУР-4 при замиканні на землю в кабелі живлення асинхронного двигуна

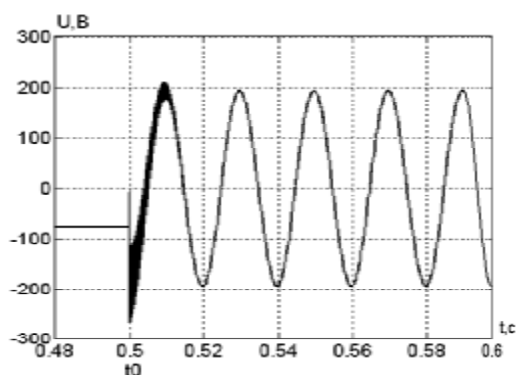
Величина струму в струмоведучому ланцюзі „статор – корпус АД” після виникнення замикання дозволяє виявити початкову стадію аварійного процесу та виконати знеструмлення пошкодженої точки живильного кабелю з боку зворотного енергетичного потоку АД.

Дослідження проводилося для електротехнічного комплексу з такими параметрами: трансформаторна підстанція КТПВ-630 (вихідна напруга 660В), гнучкий кабель КГЕШ 3×70 довжиною 50 м, асинхронний двигун типу 2ЭКВ4УС2 потужністю 220 кВт.

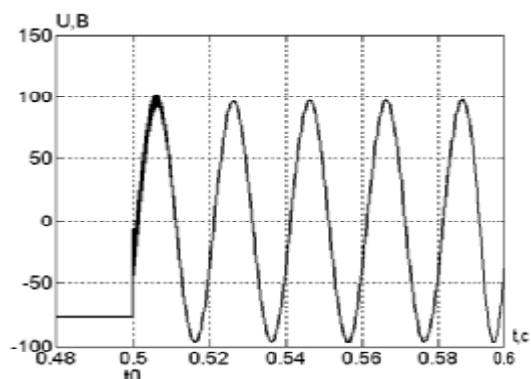
Величина напруги на контрольованому резисторі R5 підтверджує виключення впливу пристрою (рис 1) на параметри апарата захисту від витоків струму на землю АЗУР-4 за відсутності замикання фази на землю (до моменту  $t_0$ ). У той же час матиме місце реакція апарата АЗУР-4 на замикання фази на землю (термін часу після моменту  $t_0$ ) у формі сигналу напруги на контрольованому резисторі R5 апарата АЗУР-4 (рис. 5). Це дозволяє стверджувати про створення умов для синхронного двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю живлення АД.

Для визначення параметрів стабілітрона VD2 необхідно проаналізувати параметри потенціалів між „зіркою” статорної обмотки АД та його заземленим металевим корпусом. Зокрема, за відсутності замикання фази на землю, різниця відповідних потенціалів не повинна перевищувати напругу стабілізації стабілітрона VD2. Результати моделювання процесів відносно до мережі з номінальною лінійною напругою 660 В підтверджують наявність суттєвої різниці між вищевказаними потенціалами за відсутності (до моменту  $t_0$ ) та наявності (після  $t_0$ ) короткого замикання навіть однієї фази на землю (рис. 6). Це свідчить про працездатність запропонованого пристрою синхронного двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю живлення АД.

В процесі експлуатації електротехнічного комплексу дільниці шахти існує вірогідність появи аварійного стану в разі пошкодження кабелю живлення АД одразу після відключення живильної напруги (трансформаторної підстанції) за наявності ЕРС обертання АД, який перебуває в стані вільного вибігу.



а



б

Рис. 6. Осцилограми різниці потенціалів між „зіркою” статора та заземленим металевим корпусом асинхронного двигуна при виникненні в момент часу  $t_0$  однофазного а та двофазного б замикання жил живильного кабелю на землю (заземлюючу жилу)

Відповідно до цього корегується схема (рис.2) електротехнічного комплексу дільниці шати в стані однофазного короткого замикання на землю. До неї, а також до складу відповідної комп'ютерної моделі додаються фазні ЕРС обертання АД (рис.7) із припущенням, що в момент виникнення К.З. амплітуда та частота ЕРС обертання асинхронного двигуна є постійними величинами, які залежать від тривалості часу між моментами відключення АД та виникнення К.З. і змінюються за експонентою відповідно до постійної часу двигуна [3].

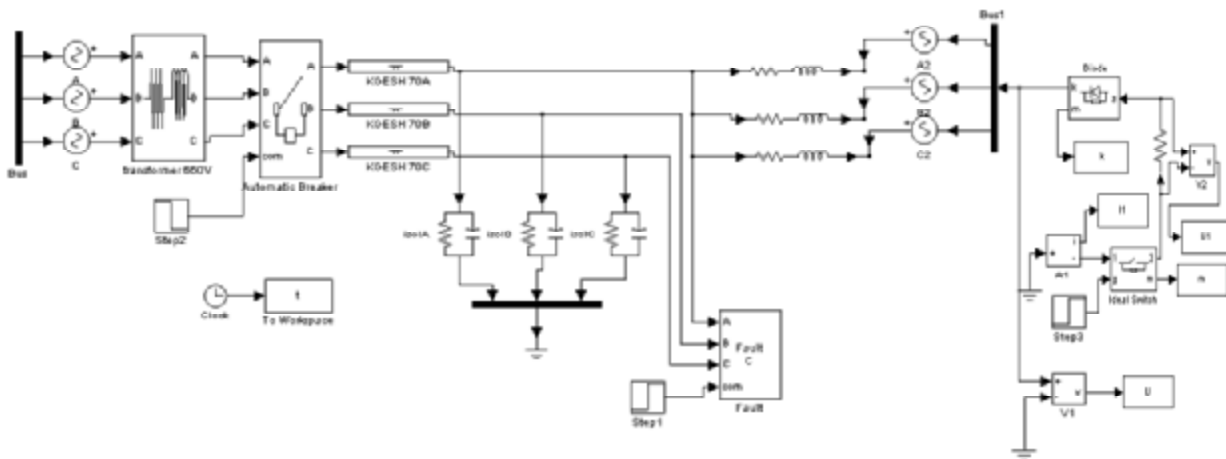
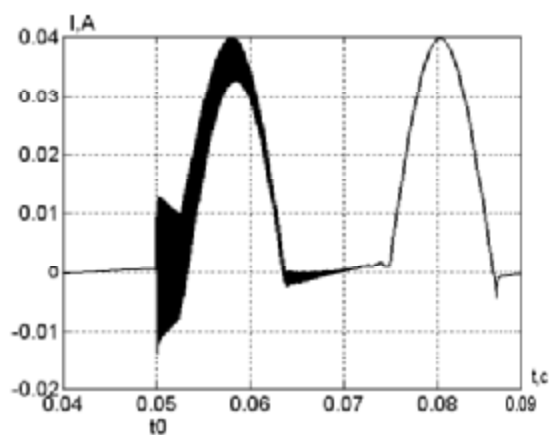
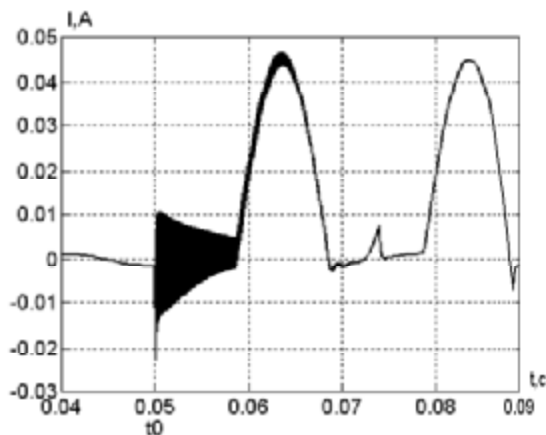


Рис. 7. Комп'ютерна модель електротехнічного комплексу дільниці шахти в стані однофазного замикання на землю після штучного відключення мережі живлення (автоматичний вимикач Automatic Breaker розімкнено)

Отримані параметри струму (рис. 8) в колі підключення трансформатора струму ТА1 заземлюючої жили кабелю струмоведучому ланцюзі „статор – корпус АД”) підтверджують здатність пристрою захисту за сх. рис.1 виявити замикання в кабелі живлення АД після відключення напруги мережі і знеструмлення місця пошкодження цього кабелю з боку зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна споживача аварійного приєднання.

Однофазне замикання на заземлюючу жилу кабелю:  
 $E_{об} = 630 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}$   $E_{об} = 500 \text{ В}; f = 40 \text{ Гц}$



Двофазне замикання на заземлюючу жилу кабелю:  
 $E_{об} = 630 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}$   $E_{об} = 500 \text{ В}; f = 40 \text{ Гц}$

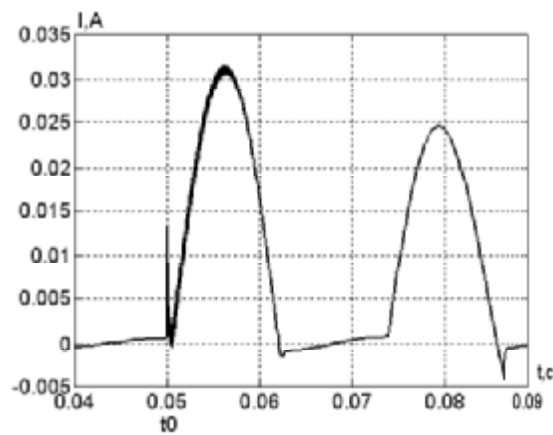
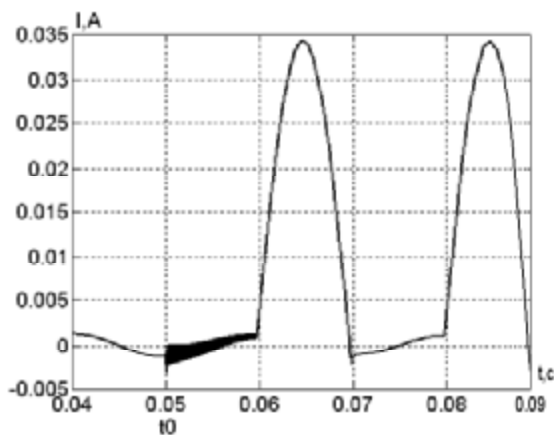


Рис.8 Криві струму  $I_{кз2}$  в струмоведучому ланцюзі „статор – корпус АД”, обумовленого ЕРС обертання двигуна ( $E_{об}$ ) у різні моменти існування вільного вибігу АД після штучного відключення напруги живлення

### Висновки і напрями подальших досліджень

Таким чином, установлена принципова можливість симетричного двобічного знеструмлення пошкодженої точки кабелю на основі контролю струму в штучному ланцюзі між заземленим корпусом двигуна і трифазною обмоткою статора за умови застосування екранованого гнучкого кабелю в складі електротехнічного комплексу дільниці шахти. Напрямом подальшого дослідження має бути аналіз процесів при виникненні міжфазного дугового замикання в кабелі живлення АД і обґрунтування технічного рішення щодо двобічного знеструмлення місця пошкодження кабелю.

### Список літератури

1. Дзюбан, В.С. Взрывозащищенные аппараты низкого напряжения [текст]/ В.С. Дзюбан. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 240 с.
2. Римап Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт [текст] / Я.С Римап. – М.: Недра, 1977. – 206 с.



3. 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
4. Правила безпеки у вугільних шахтах – К.: ДНАОП, 1996. – 150 с.