

ИНДУКЦИОННО-ДИНАМИЧЕСКОЕ ТОРМОЖЕНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК СПОСОБ ОГРАНИЧЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ШАХТНУЮ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ СЕТЬ В ПРОЦЕССЕ ЗАЩИТНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ

Научно обоснована рациональность применения индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя в качестве средства технической реализации принципа подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя в процессе защитного отключения шахтной участковой электросети, что создает эффект всестороннего защитного ее обесточивания.

Ключевые слова: шахта, электротехнический комплекс, короткие замыкания, электротравматизм, электробезопасность, защитное отключение, асинхронный двигатель, обратный энергетический поток, индукционно-динамическое торможение, обратная ЭДС, подавление.

Постановка проблемы

Электротехнический комплекс (ЭТК) технологического участка угольной шахты представляет собой совокупность асинхронных двигателей (АД) потребителей, кабельных линий и коммутационной аппаратуры. Его условия эксплуатации предполагают перемещения электромеханического оборудования и, как следствие, применение разветвленной радиальной сети гибких кабелей. Таким образом, кабель является наименее механически защищенным элементом шахтного участкового электротехнического комплекса, что и определяет его как источник повышенной потенциальной опасности, объект, где концентрируются аварийные (междуфазные короткие замыкания) и опасные (утечки тока на землю в связи с повреждением изоляции) состояния [1...4].

Все технические решения в области защиты шахтных участковых электротехнических комплексов от аварийных и опасных состояний [5] ориентированы на применение со стороны силовой аппаратуры, коммутирующей энергетический поток участковой комплектной трансформаторной подстанции. Таким образом, их действие сводится к автоматическому защитному отключению участковой электросети. Однако применительно к электротехническому комплексу, содержащему асинхронные двигатели, это решение является недостаточным, поскольку после отключения сети ее опасное состояние поддерживается обратными энергетическими потоками электрических машин, переходящих в состояние выбега.

Исследованиями [6] установлена принципиальная возможность выявления аварийного состояния силового кабеля автономным устройством со стороны силового ввода асинхронного двигателя. Однако дальнейшей проработки требует концепция технической реализации исполнительного устройства, реализующего функцию принудительного подавления обратного энергетического потока электрической машины, адаптированного к промышленным условиям эксплуатации. Решение этой задачи имеет научную и практическую актуальность.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованиями подтверждены факторы, создающие возможность электропоражения и контуры короткого замыкания (КЗ), обусловленные действием обратных энергетических потоков АД после защитного отключения сети. Доказана принципиальная возможность ограничения на допустимом уровне электропоражающих и тепловых параметров шахтной участковой кабельной сети при условии подавления обратных энергетических потоков АД синхронно с защитным отключением сети. Проанализированы способы выявления аварийного состояния кабеля, а также обоснована рациональность применения автономно действующих защитных устройств на вводе каждого АД [7]. Однако открытым остается вопрос технической реализации исполнительного устройства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя. Достаточно перспективными можно считать ре-

зультаты исследований процесса подавления обратной электродвижущей силы (ЭДС) АД путем управления электромагнитным состоянием (параметрами) электрической машины. В частном случае [8] может быть замкнута накоротко отключенная от сети обмотка статора двигателя. Однако в общем случае для подобного эффекта асинхронный двигатель должен комплектоваться дополнительной статорной обмоткой, что не рационально [8]. В то же время, существует возможность достичь эффекта подавления обратной ЭДС АД применением его индукционно-динамического торможения. Представляется целесообразным исследовать этот процесс.

Цель (задачи) исследования

Целью исследования является определение возможности использования режима индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя для обеспечения безопасных параметров шахтной участковой электрической сети на начальном интервале времени после ее защитного отключения.

Основной материал исследования

Электропоражающим факторам и электрическим параметрам, поддерживающим опасный тепловой режим короткого замыкания после защитного отключения шахтной участковой электрической сети, остается ЭДС вращения асинхронного двигателя потребителя. Как известно, ее параметры обусловлены величиной токов ротора АД и его частотой вращения [7]:

$$u_{ep} = \frac{L_m}{L_p} j(1-S)\omega_0 \Psi_{op} e^{-\frac{t}{T_p}} e^{j\omega_0(1-s)t},$$

где L_m – индуктивность намагничивания АД; L_p – полная индуктивность ротора; S – скольжение; ω_0 – синхронная частота вращения ротора; t – время; T_p – постоянная затухания свободного тока ротора; Ψ_{op} – потокосцепление обмотки ротора.

В то же время, потенциальная опасность ЭДС вращения обусловлена как ее величиной, так и продолжительностью существования. Этим обусловлена целесообразность ускоренного подавления обратных энергетических потоков АД, в частности, способом индукционно-динамического торможения (ИДТ) АД.

Режим ИДТ формируется схемой (рис. 1), в которой тиристором VS2 создается контур короткого замыкания между фазами статора асинхронного двигателя, причем ток этого контура (в фазах статора) совпадает по направлению с током динамического торможения, созданного цепью тиристора VS1 (рис. 2). (Импульсы тока цепи короткого замыкания, имея значительную амплитуду, создают тормозной момент АД повышенной величины:

$$M_T = \frac{n_\phi I_T^2 r_p}{\omega_0 S_n},$$

где n_ϕ – число фаз присоединения; S_n – скольжение АД в начале интервала торможения; ω_0 – синхронная частота вращения ротора; r_p – сопротивление ротора; I_T – тормозной ток.

Создается эффект ускоренной остановки ротора, а следовательно, подавления ЭДС вращения АД. Общая интенсивность замедления ротора АД регулируется величиной углов отпирания тириستоров VS1 и VS2.

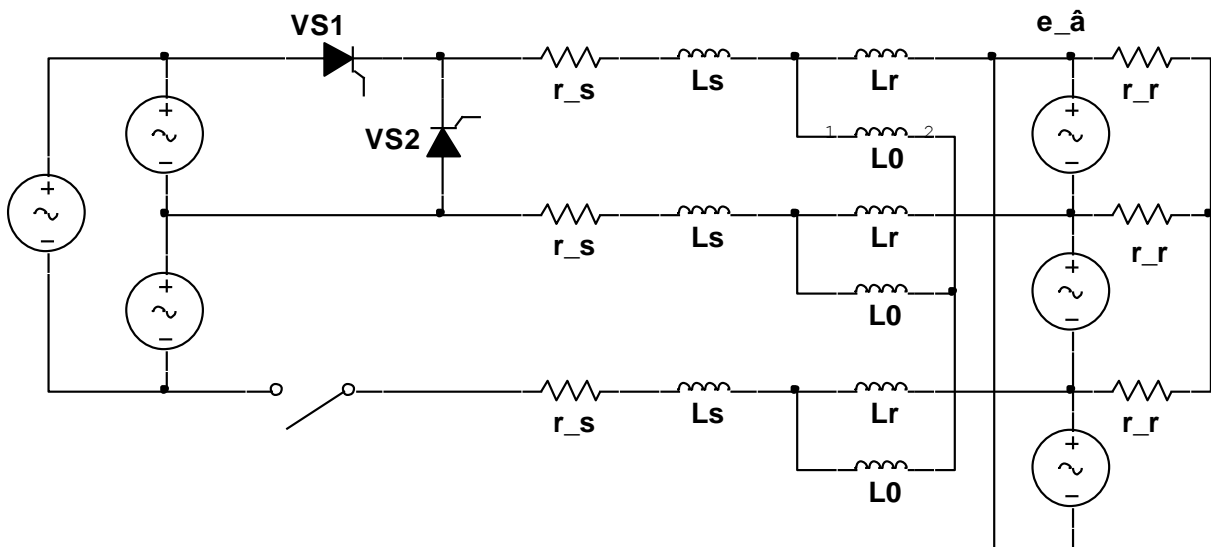


Рис. 1. Схема для исследования процесса индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя

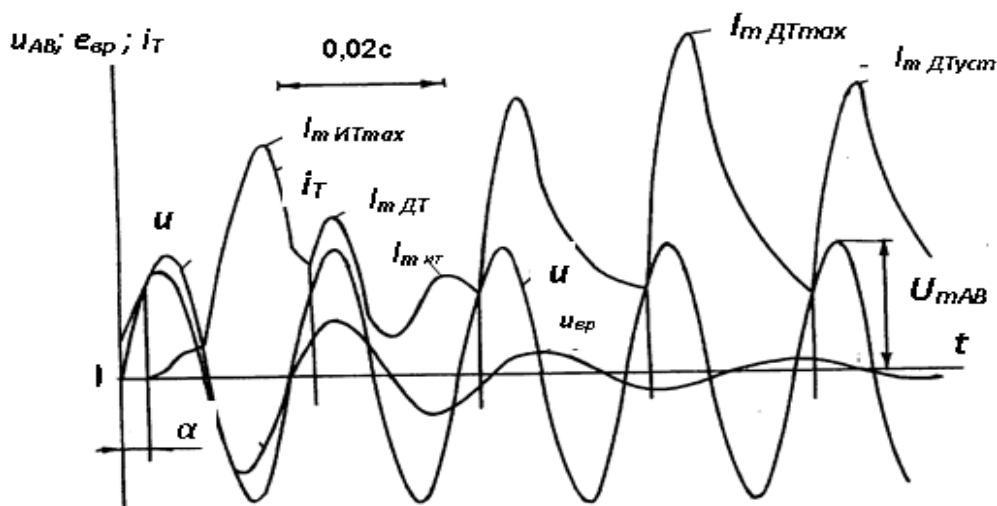


Рис. 2. Диаграммы формирования тока статора асинхронного двигателя в процессе его индукционно-динамического торможения: α – угол отпирания тиристора VS1

Рассмотрим модель процесса индукционно-динамического торможения АД в контексте реализации способа ускоренного подавления обратного энергетического потока.

При моделировании принимаем следующие допущения: в сети действует трехфазная система напряжения промышленной частоты; аварийный (опасный) режим возникает в середине кабеля подключения к АД; защитное отключение напряжения питания выполняется групповым автоматическим выключателем через 0,2 с после возникновения аварийного (опасного) состояния; в качестве причины защитного отключения принимается возникновение цепи утечки тока на землю сопротивлением 1 кОм (что соответствует сопротивлению тела человека в соответствии с ГОСТ 22929-78 [9]), а также режим двухфазного короткого замыкания; номинальное линейное

напряжение сети 1140 В; частота 50 Гц; асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт, сечение силовых жил кабеля варьируется от 25 мм² до 95 мм², тип питающей подстанции КТПВ-1000 [10, 11]. Структурная схема модели фрагмента ЭТК представлена на рис. 3.

Модель фрагмента ЭТК содержит: SIFU – систему импульсно-фазового управления тиристорами VS1, VS2; КА1, КА2 – коммутационные аппараты; АВ – автоматический выключатель; Rut – возникновение утечки тока на землю (1 кОм); асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, КТП – комплектную трансформаторную подстанцию. Процесс ИДТ АД начинается в момент возникновения аварийного (опасного) состояния электросети, т.е. до защитного отключения энергетического потока со стороны участковой трансформаторной подстанции.

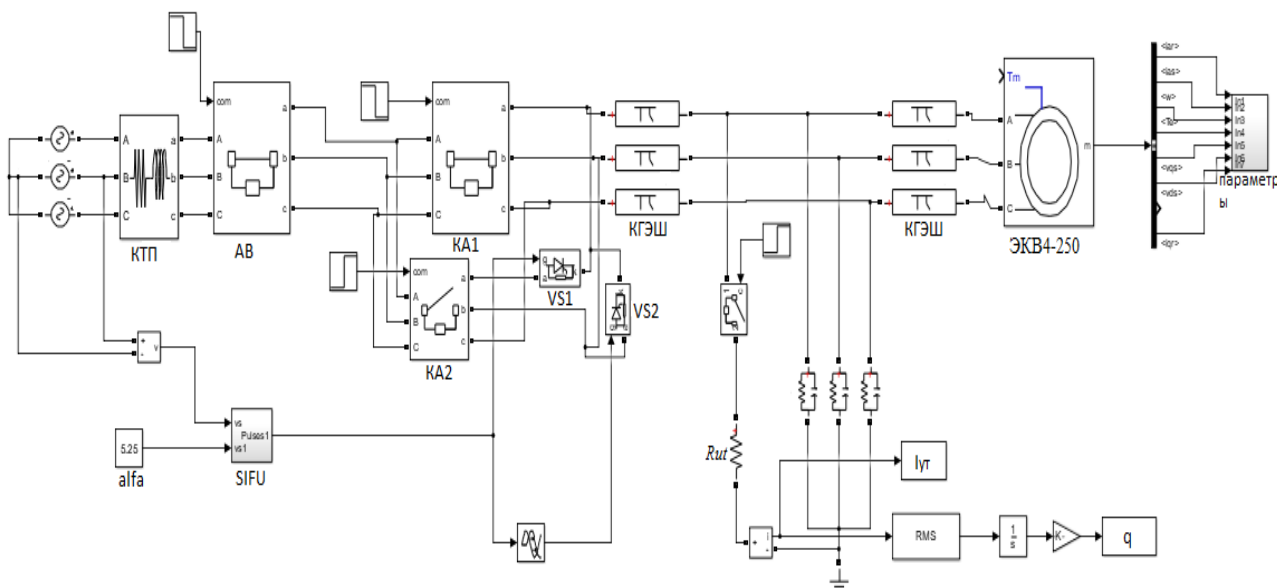


Рис. 3. Структурная схема модели фрагмента ЭТК

Результаты моделирования процессов в электротехническом комплексе при возникновении цепи утечки тока на землю представлены на рис. 4...8.

Анализ полученных диаграмм тока утечки на землю и накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки (без учета компенсации емкостной составляющей тока утечки) позволяет сделать вывод о превышении уровня количества электричества через человека нормированной величины по критерию электробезопасности ($50 \text{ mA} \cdot \text{c}$) [9], даже после защитного отключения сети (момент t_2). Наличие обрат-

ных ЭДС асинхронных двигателей потребителей, переходящих в режим выбега после отключения сети, подтверждает предположение о формировании эффекта поддержания опасного состояния электросети участка, а параметры энергетического потока достигают уровня представляющего опасность электропоражения (при возникновении цепи утечки тока на землю).

Исследованием компьютерной модели (см. рис. 3) подтвержден положительный эффект процесса ИДТ АД в контексте устранения опасных факторов участковой шахтной электросети после ее защитного отключения ($q > 50 \text{ mA} \cdot \text{c}$).

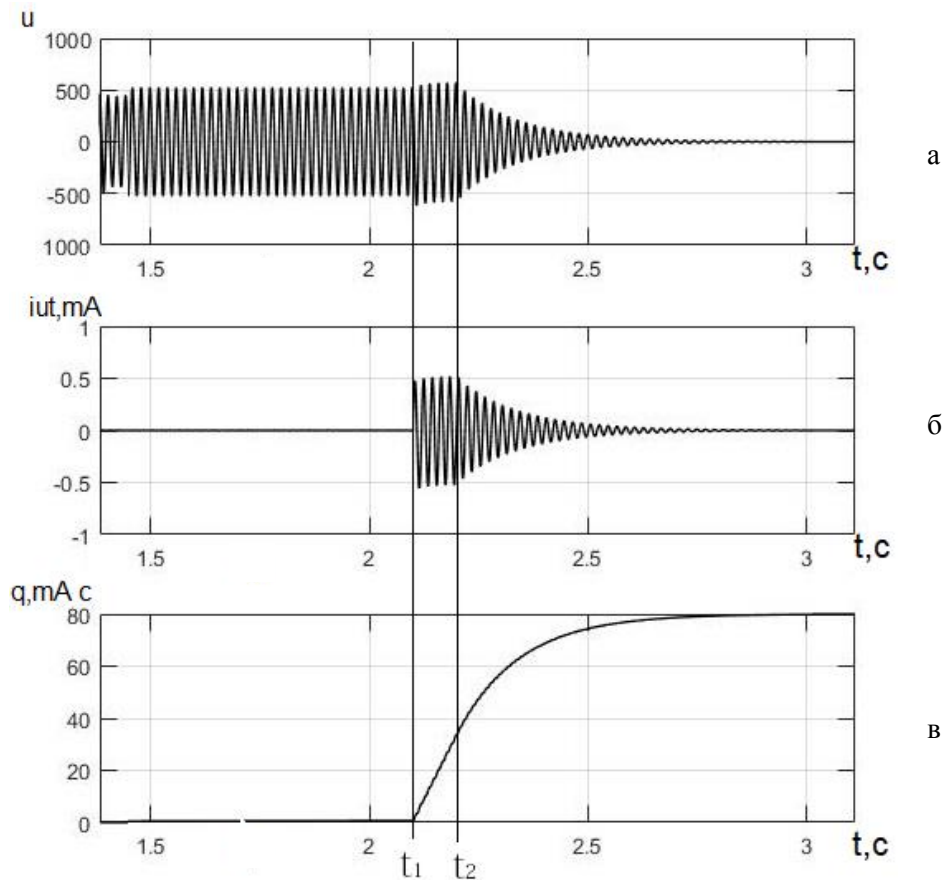


Рис. 4. Диаграммы величин: а – выбега; б – утечки тока на землю; в – количества электричества при отсутствии воздействия со стороны ИДТ

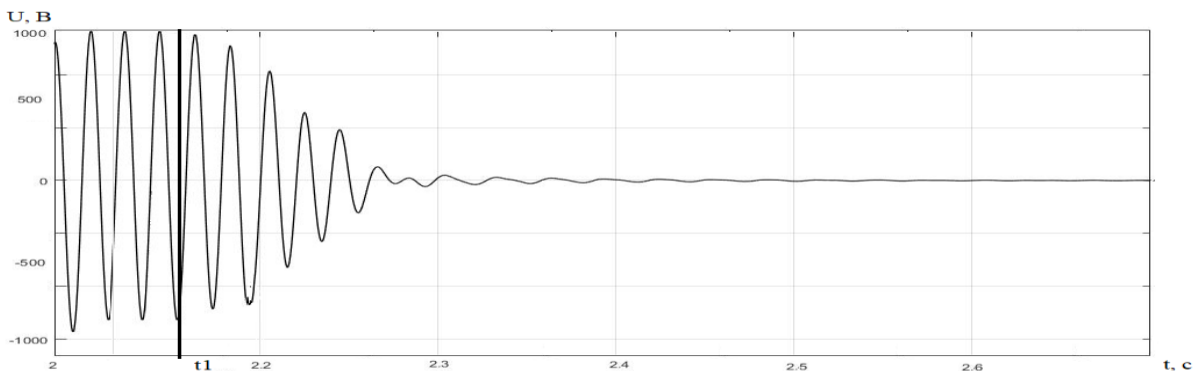


Рис. 5. Диаграмма напряжения статора АД типа ЭКВ 4-250 мощностью 250 кВт на интервале перехода из двигательного режима в режим ИДТ

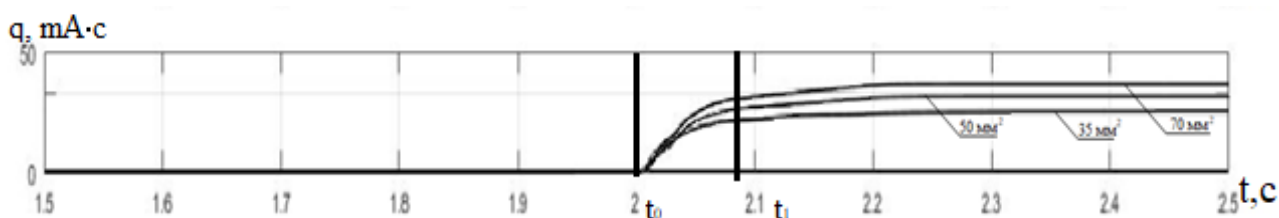


Рис. 6. Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}=1$ кОм, для кабелей марки КГЭШ сечением 35 мм^2 , 50 мм^2 и 70 мм^2 при величине угла отпирания тиристора VS1 $\alpha=30$ эл. град., по схеме рис. 3

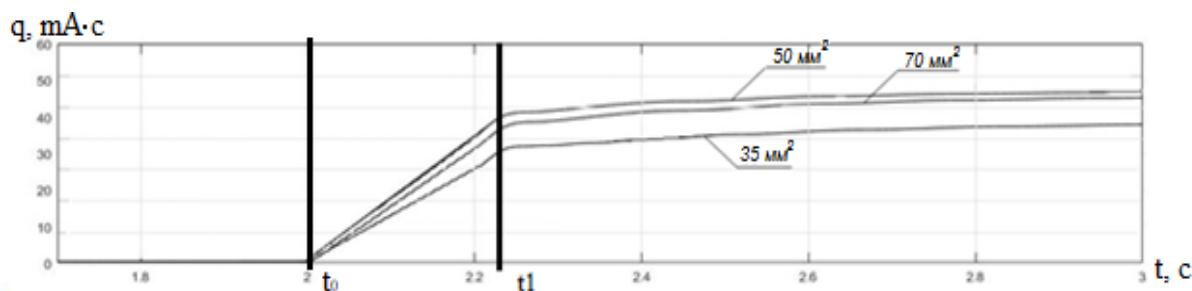


Рис. 7. Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}=1$ кОм, применительно к фрагменту электросети с кабелем марки КГЭШ сечением $3 \times 35 \text{ мм}^2$, $3 \times 50 \text{ мм}^2$ и $3 \times 70 \text{ мм}^2$ при использовании ИДТ и величине угла отпирания тиристора VS1 $\alpha=45$ эл. град., по схеме рис. 3

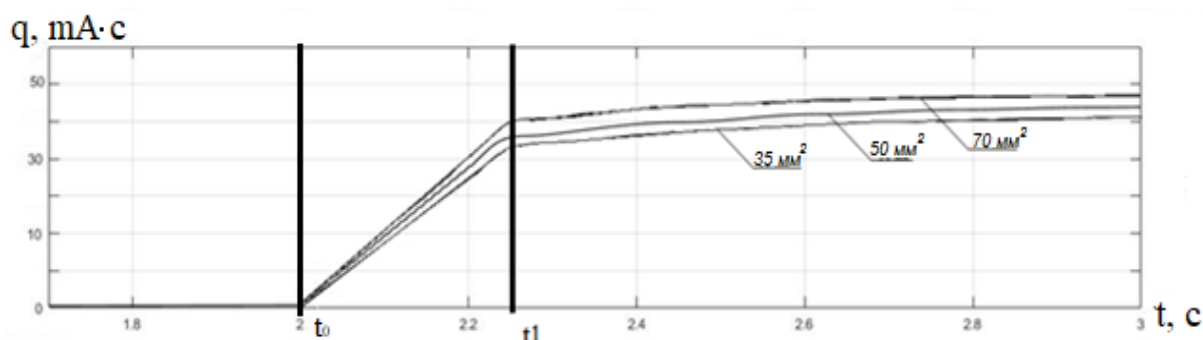


Рис. 8. Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}=1$ кОм, применительно к фрагменту электросети с кабелем марки КГЭШ сечением $3 \times 35 \text{ мм}^2$, $3 \times 50 \text{ мм}^2$ и $3 \times 70 \text{ мм}^2$ при использовании ИДТ и величине угла отпирания тиристора VS1 $\alpha=60$ эл. град., по схеме рис. 3

При этом установлены зависимости интенсивности замедления ротора АД, количества электричества в цепи утечки тока на землю от величины угла α отпирания тиристора VS1, что иллюстрируется рис. 5...8. Установлено, что в сети линейного напряжения 1140 В при использовании кабеля КГЭШ 3×70 в цепи питания двигателя мощностью 250 кВт электробезопасность состояния после защитного отключения будет поддерживаться при использовании режима ИДТ с углом отпирания тиристора VS1 $\alpha \leq 60$ эл. град. При этом угол отпирания тиристора VS2 может оставаться равным нулю (эл. град.), а задержка на включение в работу этого тиристора может составлять 7 ± 2 мс. Последнее

обстоятельство крайне важно в контексте практической реализации, поскольку позволяет применять вместо этого тиристора диод, коммутируемый вакуумным однополюсным контактором, например серии SPVC отечественного производства [12].

Моделированием установлен также положительный эффект режима ИДТ АД в процессе выполнения защитных функций при отключении междуфазного КЗ в кабеле питания АД. Диаграмма тока статора АД (рис. 9) в режиме ИДТ, полученная в компьютерной модели (см. рис. 3), соответствует расчетным диаграммам (см. рис. 2), что позволяет сделать вывод об адекватности модели исследуемому процессу.

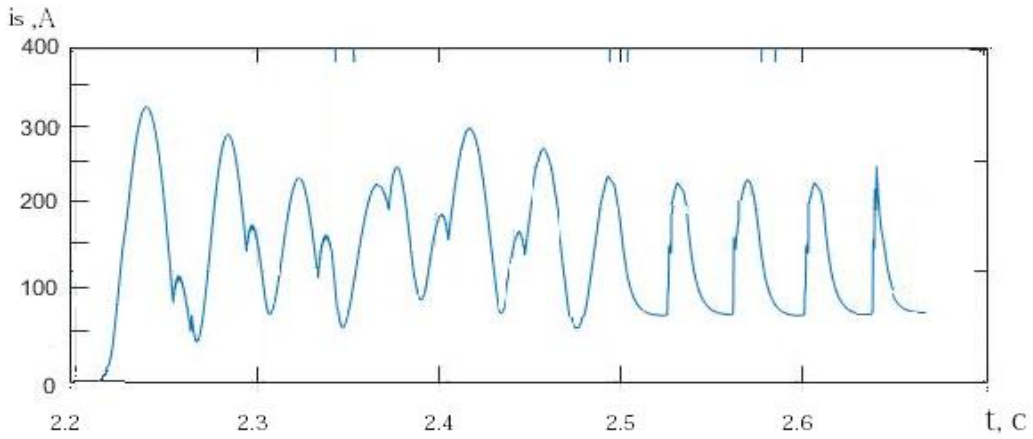


Рис. 9. Диаграмма тока статора АД типа ЭКВ4-250 при ИДТ

На рис. 10 и 11 представлены токи в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле без эффекта ИДТ АД и при наличии такого эффекта. Теплоэнергетика процесса представлена следующими показателями (табл. 1).

Применение режима ИДТ АД приближает энергетические показатели процесса междофазного КЗ к нормируемым параметрам продолжительности защитного отключения без учета воздействия обратных энергетических потоков двигателя.

Реально, с учетом защитного отключения

энергетического потока участковой КТП ее силовым коммутационным аппаратом, процесс ИДТ АД, начатый в момент возникновения аварийного (опасного) состояния сети, будет протекать не в полной мере, т.к. после отключения коммутационного аппарата КТП (спустя $t=0,1$ с момента аварии) прекратится условие протекания тока через тиристор VS1 (см. рис. 1). Тогда процесс будет продолжен индукционным торможением (включенное состояние тиристора VS2 (см. рис. 1) с углом отпирания $\alpha=0$ эл. град.).

Табл. 1. Теплоэнергетика процесса трехфазного короткого замыкания

Линейное напряжение, В	Мощность КТП, кВА	Марка кабеля, сечение, мм ²	Длина кабеля общая, м	Длина кабеля до точки КЗ, м	Тепловая мощность в точке КЗ, Вт		
					$t_{к.з.}=0,1$ с		ИДТ
					Без учета ЭДС АД	С учетом ЭДС АД	
660	630	50	200	100	1,2	3,1	0,7
	1000	50	200	100	0,6	1,4	0,3
1140	630	50	200	100	4,25	8,5	3,4
	1000	50	200	100	2,3	2,7	1,8

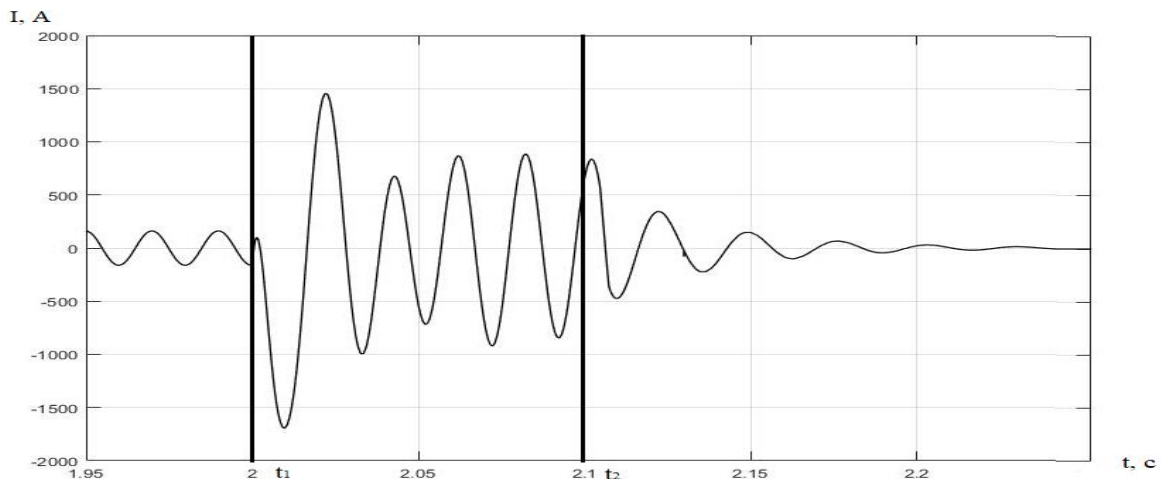


Рис. 10. Диаграммы тока в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле без учета эффекта ИДТ АД: t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – отключение коммутационного аппарата, начало процесса ИДТ

Уточненные диаграммы электрических параметров в питающем кабеле в режиме утечки тока на землю и в режиме трехфазного КЗ представлены на рис. 12 и 13.

Они свидетельствуют о целесообразности применения индукционно-динамического и по-

следующего индукционного торможения как эффективного инструмента прекращения опасного состояния сети после ее защитного отключения.

Уточненная энергетика процесса трехфазного КЗ представлена данными табл. 2.

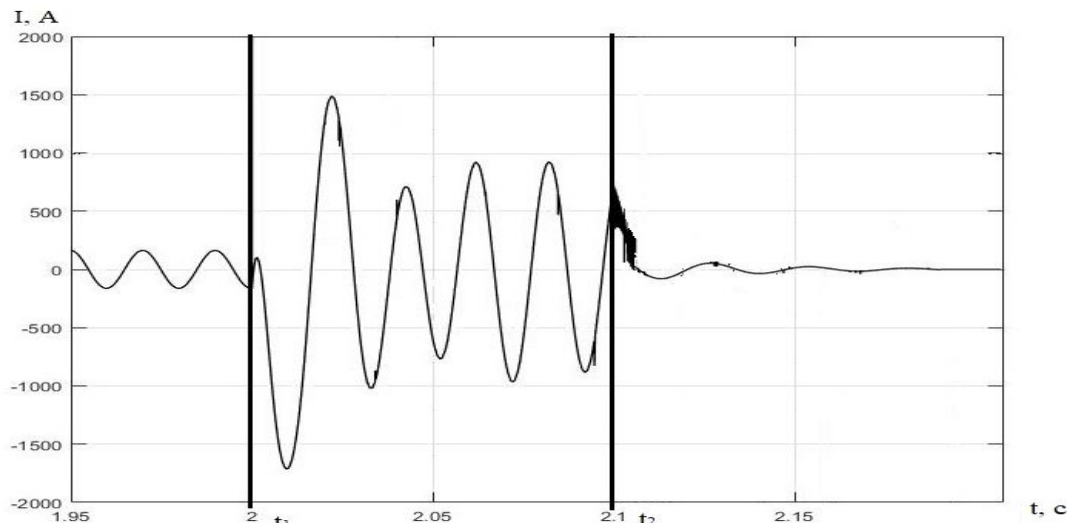


Рис. 11. Диаграммы тока в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле с учетом эффекта ИДТ АД: t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – отключение коммутационного аппарата, начало процесса ИДТ

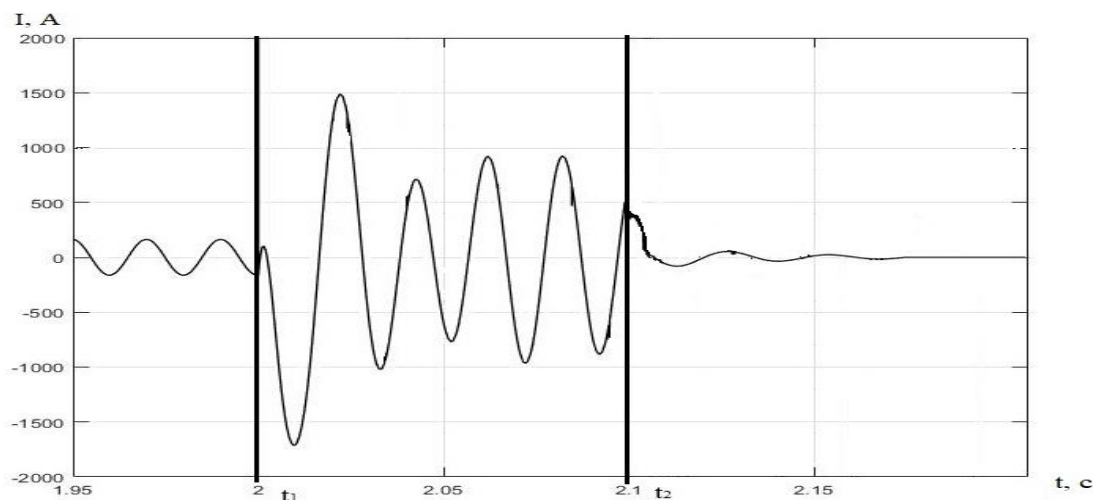


Рис. 12. Уточненные диаграммы тока в цепи трехфазного КЗ в питающем кабеле с учетом эффекта ИДТ АД в точке А1, по схеме рис. 7: t_1 – возникновение аварийной ситуации; t_2 – отключение коммутационного аппарата

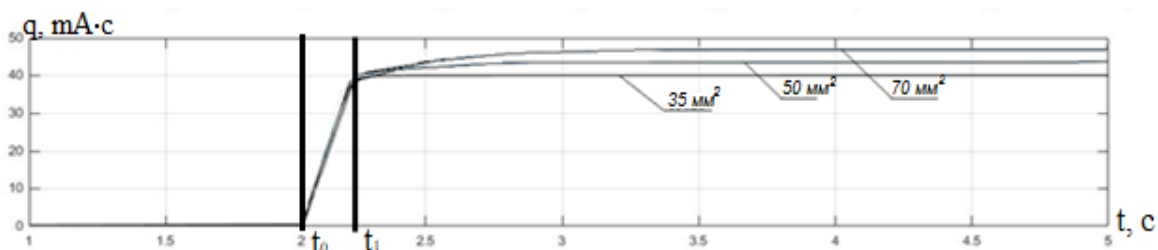


Рис. 13. Уточненные диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю, $R_{ут}=1$ кОм, для кабелей марки КГЭШ сечением 3×35 мм², 3×50 мм² и 3×70 мм² с использованием ИДТ, при величине угла отпираания тиристора VS1 $\alpha=60$ эл. град., по схеме рис. 3

Табл. 2. Уточненная теплоэнергетика процесса трехфазного короткого замыкания

Линейное напряжение, В	Мощность КТП, кВА	Марка кабеля, сечение, мм ²	Длина кабеля общая, м	Длина кабеля до точки КЗ, м	Тепловая мощность в точке КЗ, Вт		
					$t_{к.з.}=0,1$ с	$t_{к.з.}=0,1$ с	ИДТ
					Без учета ЭДС АД	С учетом ЭДС АД	В процессе отключения контактора (0,1 с)
660	630	50	200	100	1,2	3,1	1,1
	1000	50	200	100	0,6	1,4	0,5
1140	630	50	200	100	4,25	8,5	4,25
	1000	50	200	100	2,3	2,7	1,97

Выводы

Исследованиями установлена целесообразность применения индукционно-динамического и последующего индукционного торможения асинхронного двигателя потребителя в качестве способа прекращения опасного состояния шахтной участковой электрической сети после защитного отключения утечки тока на землю либо междуфазного КЗ.

Доказана возможность применения упрощенной схемы реализации процесса на основе использования диодно-контакторной силовой схемы.

Направлением дальнейших исследований может служить проблематика технической реализации процесса подавления обратного энергетического потока АД на основе применения его индукционно-динамического и последующего индукционного торможения.

Список литературы

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Риман, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт. – М.: Недра, 1977. – 206 с.
3. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
4. Berryann, R.J. Evolution of Longwall Mining and Control Systems in the United States [Electronic resource] / R.J. Berryann, J.A. Voelker // Mine Safety and Health Administration, Division of Electric Safety. – Triadelphia, West Virginia, 2005. – Available at: https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395

5. Колосюк, В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок. – М.: Недра, 1980. – 334 с.
6. Маренич, К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмлення шахтної дільничної електромережі: монографія / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – Донецьк: ДонНТУ, 2012. – 125 с.
7. Маренич, К.Н. Теоретические основы и принципы применения защитного обесточивания рудничных электротехнических комплексов: монография. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.
8. Дубинка, Е.С. Управление электромагнитным состоянием асинхронной машины как способ ограничения параметров обратного энергетического потока / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – №4. Т.17. – С. 39-47.
9. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 Вт. Общие технические условия: ГОСТ 22929-78. Введ. 1979-01-01; внес. изм. согл. ИУС 11-80, 7-81, 11-83; соответствует СТ СЭВ 2309-80. – Москва: Изд-во стандартов, 1987. – 13 с.
10. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В.С. Дзюбан [и др.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток Лтд, 2001. – Т.1. (Гл.1-21). – 477 с.
11. Справочник энергетика угольной шахты: в 2 т. / В.С. Дзюбан [и др.]; под ред. Б.Н. Ванеева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк: Юго-Восток Лтд, 2001. – Т.2. (Гл.22-44). – 440 с.
12. Контактор однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактор серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tara-senko/library/5.htm>

E.S. Dubinka

Donetsk National Technical University (Donetsk)

**INDUCTION DYNAMIC BRAKING OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR
AS A WAY OF RESTRICTING THE ENERGY EXPOSURE
TO A MINE ELECTRIC NETWORK IN THE PROCESS OF PROTECTIVE TRIPPING**

Background. *The paper considers the technical solution for restricting the parameters of back EMF of the induction motor, which is necessary to the suppression of the inverse energy flux of the induction motor of mine multimachine electrotechnical complex (ETC) in the state of free running after tripping the mains.*

Materials and/or methods. *The electrical cable network of the technological section of the mine is the object most prone to damage due to mechanical influences. All this creates a risk of ignition of the equipment in the state of a phase-to-phase short circuit, as well as a threat of electrical injury if the cable insulation is damaged. The emergency (hazardous) condition prevented by protective tripping of the mine site transformer substation. However, in electrical systems equipped with asynchronous motors, the dangerous state will be maintained by the back energy fluxes of these electric machines. At the present stage, the possibility proved of detecting the emergency condition of the power grid by autonomous devices on the inlets of the engines.*

Results. *The rationality of application of induction-dynamic braking of the asynchronous motor as a means of technical implementation of the principle of suppression of the inverse energy flow of the asynchronous motor in the process of the protective shutdown of the mine power supply network that creates the effect of comprehensive protective tripping scientifically proved.*

Conclusion. *The studies have established the feasibility of induction-dynamic and subsequent induction braking of the induction motor of the consumer as a way to stop the dangerous state of the mine electrical network after the protective shutdown of the current leakage to the ground or phase-to-phase short circuit. The possibility proved of applying a simplified implementation scheme of the process based on the use of diode-contactor power circuits.*

Keywords: *mine, electrical complex, short circuit, electrical injury, electrical safety, protective tripping, asynchronous motor, reverse energy flux, induction-dynamic braking, reverse EMF, suppression.*

Сведения об авторе

Е.С. Дубинка

SPIN-код: 3110-5247

ORCID: 0000-0002-3003-6421

Телефон: +380 (71) 302-74-94

Эл. почта: ekaterina_sd@bk.ru

Статья поступила 26.04.2019 г.

© Е.С. Дубинка, 2019

Рецензент д.т.н., проф. А.П. Кононенко

