

## ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ЗАДАЧИ ПОДАВЛЕНИЯ ОБРАТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТОКОВ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Рассмотрены средства подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей и исследованы возможности применения индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя как способа реализации функции подавления его обратного энергетического потока в процессе защитного обесточивания промышленного участкового электротехнического комплекса.*

**Ключевые слова:** электротехнический комплекс, асинхронный двигатель, обратный энергетический поток, ограничение.

### Постановка проблемы

Электротехнический комплекс (ЭТК) технологического участка угольной шахты отличается совокупностью асинхронных двигателей (АД) потребителей и нестационарностью расположения оборудования, что обуславливает необходимость применения разветвленной сети гибких кабелей (ГК), которые наиболее подвержены механическим повреждениям, способным вызывать аварийные и опасные состояния – короткое замыкание либо опасность поражения человека электрическим током [1].

До недавнего времени в большинстве исследований и практических разработок асинхронные двигатели рассматривались как пассивные составляющие структуры ЭТК, которые формируют те или иные параметры и характеристики в зависимости от воспринимаемых управляющих воздействий (напряжение, частота и т.п.). В то же время характерной особенностью асинхронных двигателей является формирование обратного энергетического потока в режиме выбега, что определяется параметрами вращающегося магнитного поля ротора. В условиях шахты, когда существует повышенная вероятность механического повреждения кабеля силового присоединения, обратные электродвижущие силы (ЭДС) представляют особую опасность в связи со способностью поддерживать аварийные и опасные состояния после защитного отключения сети [2-5]. Поэтому поиск эффективных технических решений в области защитного подавления обратных энергетических потоков является актуальной научно-практической задачей.

### Анализ последних исследований и публикаций

Решение задачи предотвращения опасного

воздействия обратных энергетических потоков АД осуществлялось в разных направлениях, наиболее характерными из которых являлись:

1. Способы и устройства выявления аварийного состояния питающего кабеля автономно действующими техническими средствами, установленными как со стороны питающей подстанции, так и со стороны асинхронного двигателя потребителя [6].

2. Поиск и реализация исполнительных технических средств отключения либо подавления обратных энергетических потоков АД. Результаты исследований [7] позволяют сделать вывод о принципиальной возможности осуществления защитного обесточивания ЭТК, однако каждое из предложенных технических решений имеет определенную ограниченную область применения либо специфику технического исполнения, ограничивающую возможности практического применения. В частности, проблемным вопросом является внедрение конструкции силового полупроводникового короткозамыкателя либо трехфазного коммутатора статорной обмотки непосредственно в конструкцию двигателя, потенциальная опасность искусственного создания короткого замыкания вследствие ложного срабатывания короткозамыкателя [8].

Следовательно, в настоящее время не существует корректного технического решения, которое отличалось бы достаточными параметрами быстродействия и приемлемостью реализации. Поэтому актуальным является аналитический обзор исследовательского материала в контексте эволюции развития идеи защитного подавления обратных энергетических потоков АД в процессе отключения аварийных и опасных состояний электрической сети и поиск путей корректного решения поставленной научно-технической задачи.

### Цель (задачи) исследования

Целью исследования является установление рациональной структуры исполнительного устройства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя в режиме выбега, удовлетворяющей критерию минимизации элементов силовой схемы и быстродействия обесточивания аварийного присоединения. Указанная цель может быть достигнута, в частности, на основе анализа и сопоставления схемных решений и функций устройств, потенциально пригодных для обесточивания силовой цепи присоединения статора асинхронного двигателя в режиме выбега.

### Основной материал исследования

Диалектика развития способов и устройств оперативной реализации защитной функции при возникновении аварийных (опасных) состояний элементов промышленного многомашинного электротехнического комплекса выражается в поэтапном совершенствовании технических средств защитного отключения (отделения энергетического потока питающей трансформаторной подстанции) аварийного присоединения потребителя. При этом упор делается на повышение быстродействия защитного отключения и повышение коммутационной способности силовых аппаратов отключения. Такой подход исчерпал себя по мере применения высокоомощных асинхронных двигателей электропотребителей – электромашин, создающих продолжительные мощные обратные энергетические потоки в режиме выбега на начальном этапе после их отключения от сети. Это обусловило поиск и обоснование технических решений двустороннего (полного) защитного обесточивания ЭТК как со стороны подстанции, так и со стороны совокупности АД потребителей.

Известный принцип ускоренного обесточивания аварийного присоединения заключается в сочетании функции отключения сети с функцией создания цепи искусственного короткого замыкания всех трех фаз на выходе силового коммутационного аппарата и вводе статоров АД потребителей, что было реализовано в схеме автоматического быстродействующего выключателя серии АБВ-250 с учетом применения устройства быстродействующей токовой защиты типа БМЗ с функцией определения скорости нарастания тока сети [9].

Однако применение подобной схемы сопряжено с вероятностью ложного срабатывания короткозамыкателя, который выполняет подчиненную функцию и срабатывает по команде основной защиты со стороны комплектной транс-

форматорной подстанции (КТП). Эта защита не позволяет почувствовать утечку (в частности, на интервале выбега), а информационный сигнал может не доходить до короткозамыкателя АД при повреждении кабеля. Кроме того, существует вероятность ошибки персонала при подключении сигнальных жил кабеля к проходным зажимам пускателя, что приведет к разрыву канала передачи управляющих команд. Отмеченные недостатки обусловили отказ (в настоящее время) от производства технических средств системы так называемой «опережающей» токовой защиты. Тем не менее промышленное использование этой схемы доказало принципиальную возможность применения быстродействующего обесточивания точки короткого замыкания в кабеле питания АД путем отделения энергетических потоков как со стороны питающей трансформаторной подстанции, так и со стороны статора двигателя аварийного присоединения [10].

В то же время принципиально важным является то, что отделение обратного энергетического потока АД должно происходить по команде автономно действующего средства выявления опасного состояния силового присоединения одновременно со срабатыванием защитного устройства со стороны питающей трансформаторной подстанции.

Таким образом, проблема реализации защитного обесточивания промышленных участков ЭТК предполагала решение в двух направлениях: создания автономно действующего со стороны присоединения статора АД устройства выявления аварийного состояния питающего кабеля и создания компактного силового коммутационного устройства быстродействующего отделения от сети обратного энергетического потока АД (в режиме выбега).

Эффективным решением первой задачи является техническое решение (рис. 1), позволяющее сформировать информационный сигнал (на резисторе  $R_4$ ) в момент возникновения междуфазного короткого замыкания (КЗ) или цепи утечки ( $R_{yt}$ ) тока на землю. В этом случае формирование информационного импульса обусловлено начальным этапом прохождения выпрямленного тока от сети через конденсаторные присоединения ( $C_1-C_2$ ) диод  $VD_1$  на контур «земля». При этом конденсаторы ограничивают временной интервал проводимости цепи «сеть – контур «земля»» и не создают прецедента параллельного подключения резисторов присоединения ( $R_1-R_3$ ) к цепи утечки  $R_{ym}$  тока на землю [11].

В этом случае исполнительное устройство может быть построено как по принципу отключения статора АД контактным разъединением

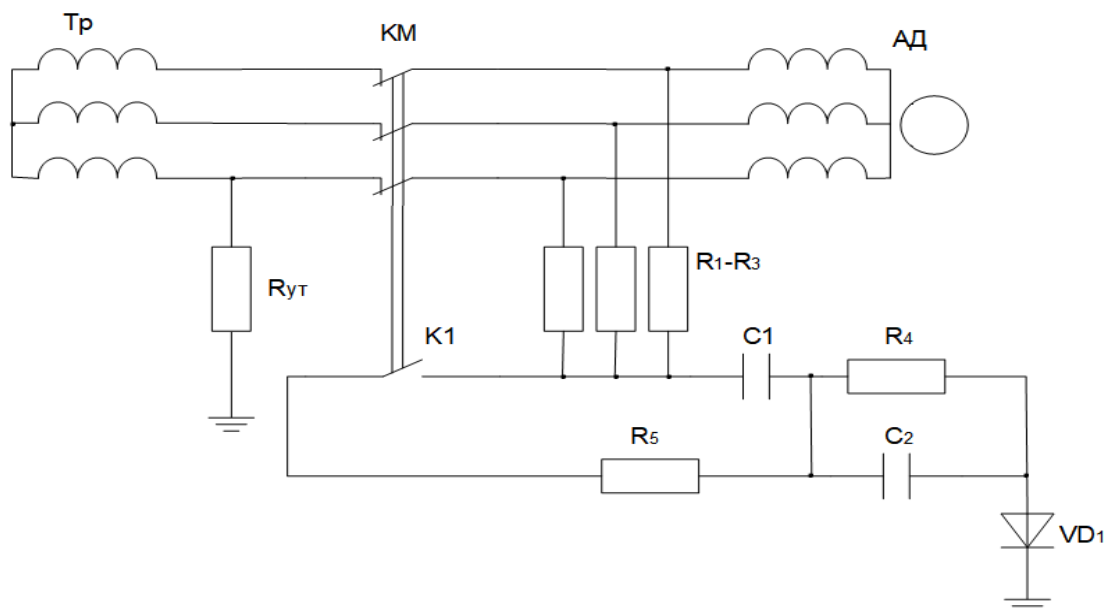


Рис. 1. Схема, поясняющая принцип аварийного состояния силового присоединения автономно действующим устройством со стороны статора АД

его трехфазной схемы, так и по принципу создания искусственной цепи КЗ на вводе статора (в момент защитного отключения).

Выше упомянуты недостатки применения искусственного короткозамыкателя. Что касается силовых контактных коммутационных аппаратов, то в данном случае речь идет об их расположении в конструкции АД (непосредственно усложняет схему и снижает ее надежность). В связи с этим практическую актуальность приобретает схема, реализующая процесс индукционно-динамического торможения АД и отличающаяся компактностью и быстродействием (рис. 2).

Поскольку обратная ЭДС статора АД находится в функциональной зависимости от угловой

скорости ротора, достаточное быстродействие ее подавления может быть достигнуто применением эффективных средств торможения АД [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;  $s$  и  $\omega_0$  – скольжение и синхронная частота вращения ротора;  $t$  – время;  $T_p$  – постоянная затухания свободного тока ротора;  $\psi_{op}$  – потокосцепление обмотки ротора.

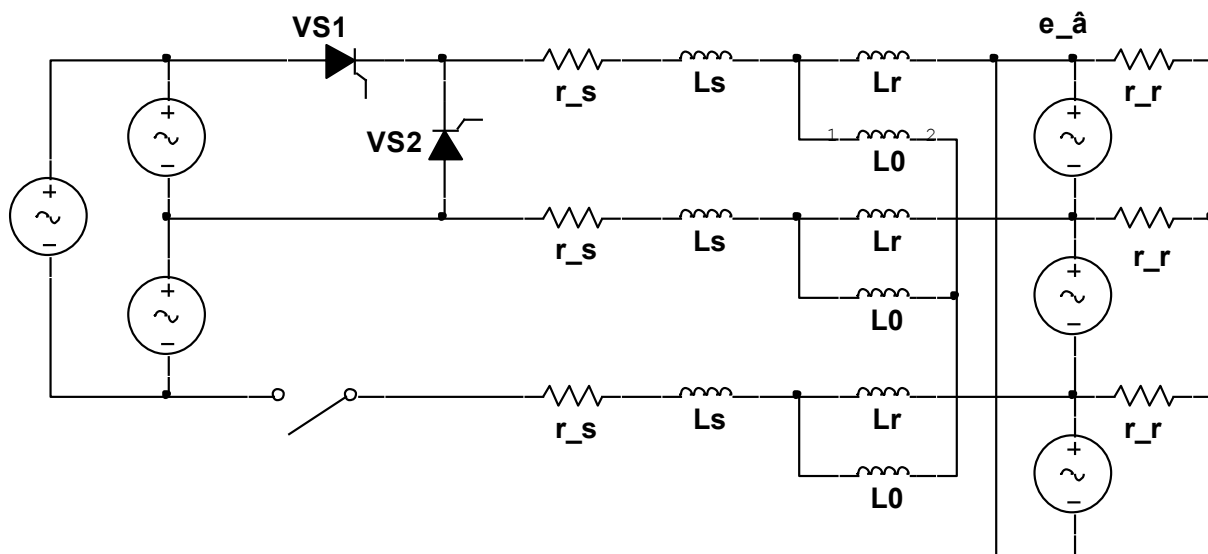


Рис. 2. Расчетная схема для исследования процесса индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя

Постоянная времени снижения тока ротора:

$$T_p = \frac{L_p}{r_p} = \frac{U_\phi K_n}{I_0 r_p \omega_0},$$

где  $r_p$  – активное сопротивление обмотки ротора;  $U_\phi$  – фазное напряжение обмотки статора АД в режиме холостого хода;  $L_p$  – полная индуктивность ротора;  $\omega_0$  – синхронная частота вращения ротора;  $K_n \approx 1,1$  – коэффициент насыщения магнитной системы АД;  $I_0$  – ток холостого хода АД.

В связи с этим практический интерес представляет анализ процесса индукционно-динамического торможения АД в контексте применения в качестве решения задачи подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя.

Процесс индукционно-динамического торможения обеспечивается силовой схемой в цепи статора асинхронного двигателя (см. рис. 2) и предполагает чередование состояний динамического (ДТ), индукционного (ИТ) и индукционно-динамического (ИДТ) торможения двигателя [12].

Ток динамического торможения создается посредством подачи на статор через тиристор *VS1* полуволн линейного напряжения  $U_{AB}$  сети (рис. 3). Эффект индукционного торможения создается при замыкании через тиристор *VS2* ЭДС вращения ( $U_{ep}$ ) ротора АД.

Важным аспектом следует считать, что полуволны тока индукционного торможения создаются за счет замыкания соответствующих полуволн ЭДС вращения  $U_{ep}$  через открытый тиристор *VS2*, т.е. создаются импульсы тормозного тока значительной амплитуды ( $I_m$ ) (рис. 3). Этим обусловлено возникновение значительного по величине тормозного момента  $M_T$ , который, как

известно, пропорционален квадрату тормозного тока  $I_T$  [12]:

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

где  $n_\phi$  – число фаз присоединения;  $S_n$  – скольжение АД в начале интервала торможения.

Рассмотрим модель процесса индукционно-динамического торможения АД в контексте реализации концепции ускоренного подавления обратного энергетического потока (снижения величины потока до уровня, не представляющего опасности воспламенения питающего кабеля после отключения присоединения с коротким междуфазным замыканием, а также не представляющего опасность электропоражения в режиме выбега АД).

При моделировании принимаем следующие допущения: изначально 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; для исследования принимается режим двухфазного короткого замыкания, а также возникновение цепи утечки тока на землю сопротивлением 1 кОм (что соответствует сопротивлению тела человека в соответствии с ГОСТ 22929-78 [12]); номинальное линейное напряжение сети 660 В; частота 50 Гц; асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, мощностью 250 кВт, длина кабеля 200 м, сечение силовых жил 70 мм<sup>2</sup>, тип питающей подстанции КТПВ-1000 [14]. Структурная схема модели фрагмента ЭТК представлена на рис. 4.

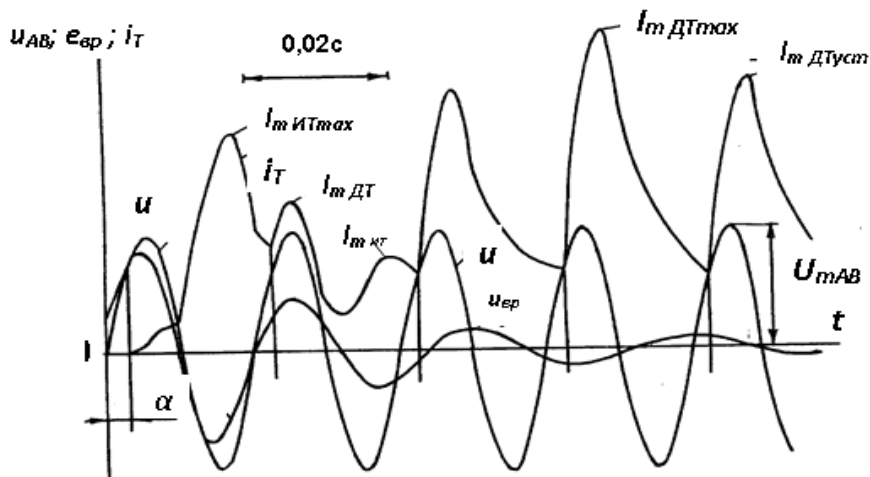


Рис. 3. Диаграммы формирования тока статора асинхронного двигателя в процессе его индукционно-динамического торможения:  $\alpha$  – угол отпирания тиристора *VS1*

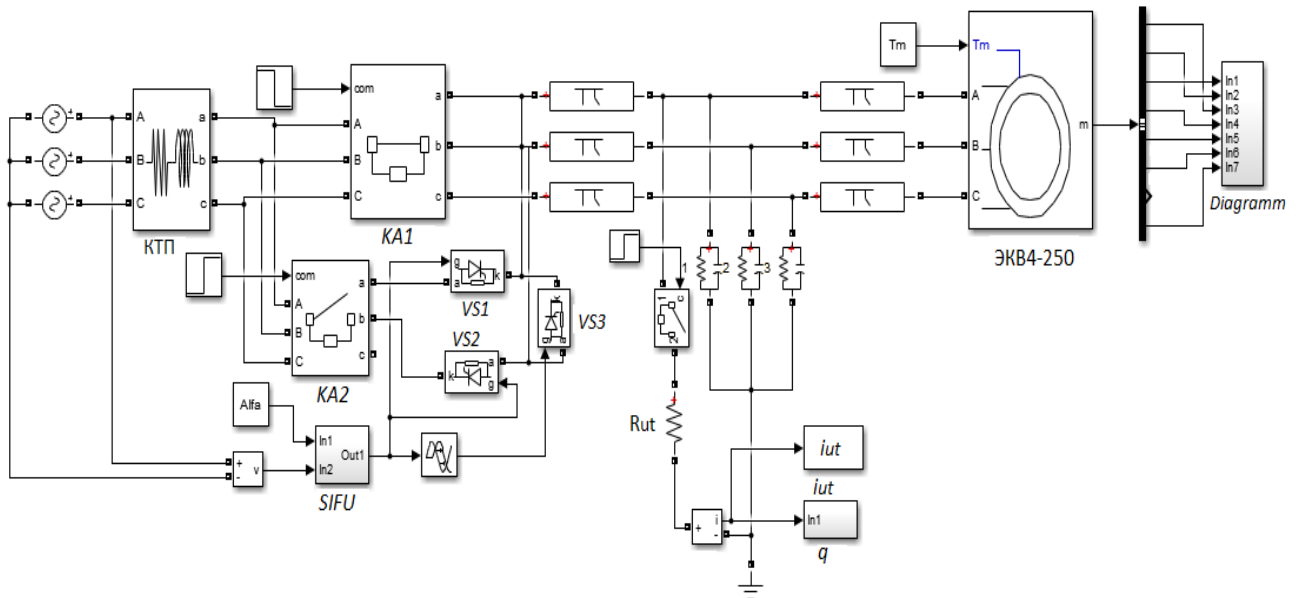


Рис. 4. Структурная схема модели фрагмента ЭТК

Модель фрагмента ЭТК содержит: *SIFU* – система импульсно-фазового управления тиристорами *VS1*, *VS2* и *VS3*; *KA1*, *KA2* – коммутационные аппараты; *Rut* – возникновение утечки тока на землю (1 кОм); асинхронный двигатель типа ЭКВ4-250, КТП – комплектная трансформаторная подстанция.

Результаты моделирования процессов в электротехническом комплексе в случае возникновения цепи утечки тока на землю представлены на рис. 5, в случае возникновения аварийного режи-

ма двухфазного короткого замыкания в питающем кабеле асинхронного двигателя – на рис. 6.

Представленные диаграммы характеризуют количественные показатели ЭДС выбега асинхронного двигателя типа ЭКВ4-250, тока двухфазного короткого замыкания в кабеле питания АД (рис. 6) и тока утечки на землю через тело человека, а также накопления количества электричества (рис. 5). В момент времени  $t_1$  возникает аварийное (опасное) состояние, в момент времени  $t_2$  отключается коммутационный аппарат.

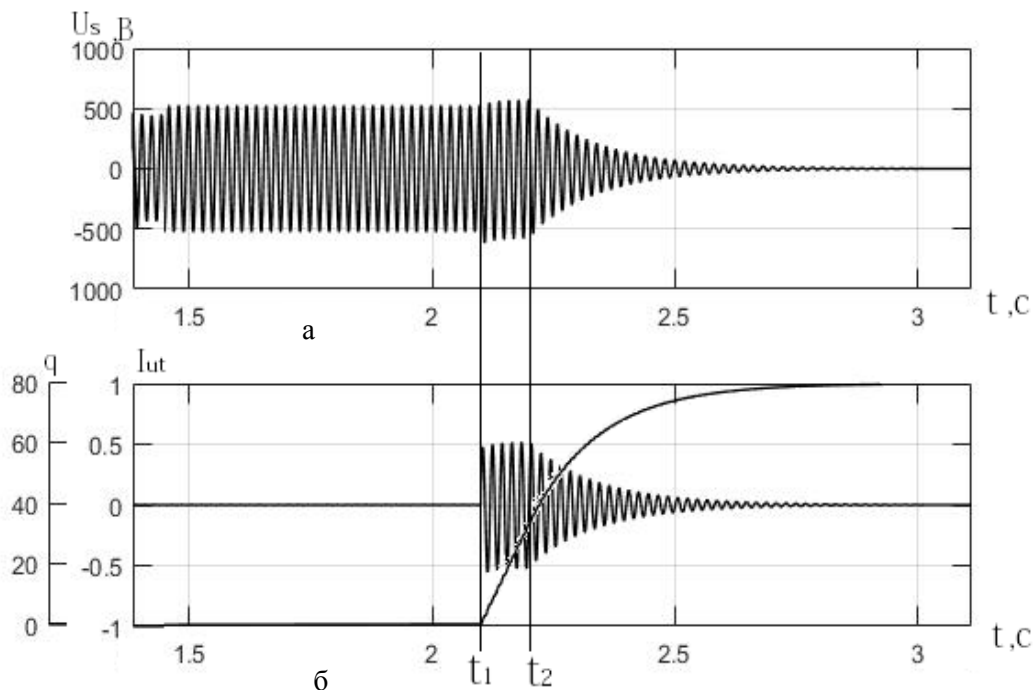


Рис. 5. Диаграммы величин: а – ЭДС выбега АД типа ЭКВ4-250; б – тока утечки на землю и накопления количества электричества без учета эффекта ИДТ

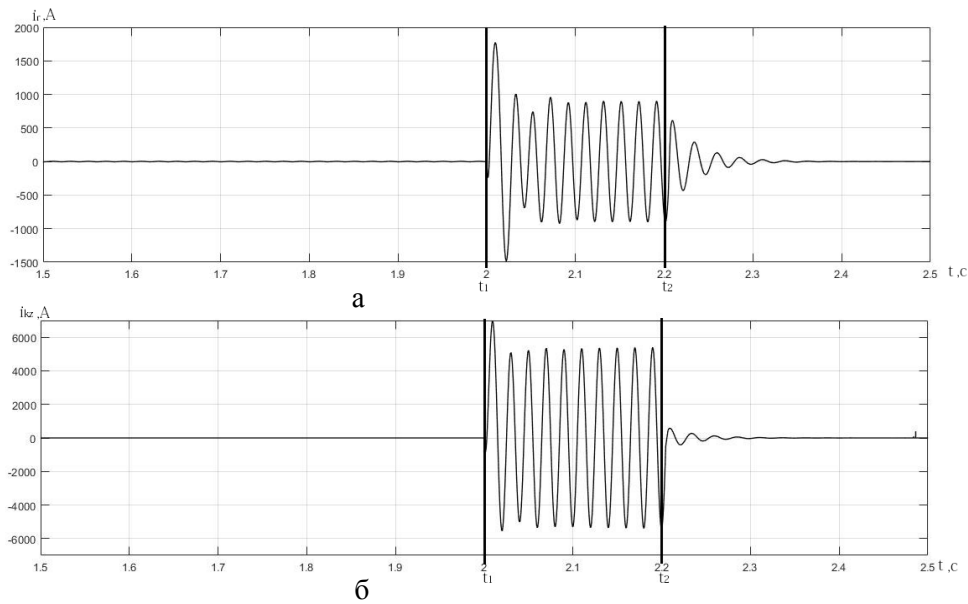


Рис. 6. Диаграммы величин: *a* – тока ротора АД типа ЭКВ4-250; *б* – тока двухфазного короткого замыкания в кабеле питания АД

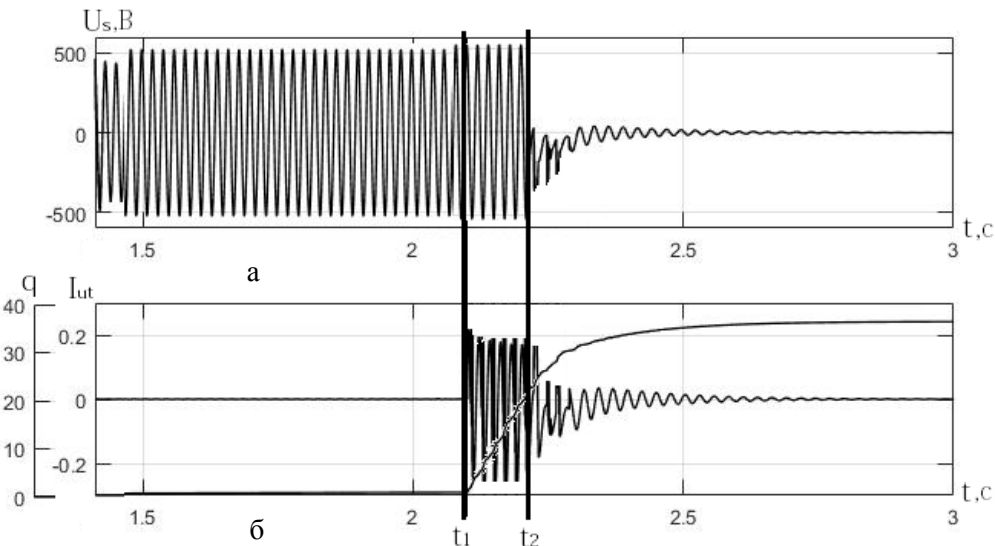


Рис. 7. Диаграммы величин: *a* – ЭДС выбега АД типа ЭКВ4-250; *б* – тока утечки на землю и накопления количества электричества с учетом эффекта ИДТ

Анализ диаграмм формирования тока утечки на землю, накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки и токов короткого замыкания, при отсутствии средств подавления обратных энергетических потоков в ходе выбега двигателя, позволяет сделать вывод о превышении допустимого уровня количества электричества, проходящего через тело человека, по критерию электробезопасности ( $50 \text{ mA}\cdot\text{s}$ ) [12]. Это подтверждает необходимость поиска технических решений в области ускоренного подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при возникновении утечки тока на землю или междуфазного короткого замыкания.

Действие предлагаемого технического решения заключается в применении индукционно-

динамического торможения двигателя при возникновении аварийного (опасного) состояния сети посредством подключения к сети соответствующих тиристоров. Ток динамического торможения создается посредством подачи на статор через тиристор *VS1* полуволн линейного напряжения  $U_{AB}$  сети, ток индукционного торможения – при замыкании через тиристор *VS2*  $U_{ep}$  ротора АД.

Результаты моделирования представлены на рис. 7 (утечка тока на землю) и рис. 8-9 (междуфазное короткое замыкание). В момент времени  $t_1$  возникает аварийное (опасное) состояние, в момент времени  $t_2$  отключается автоматический выключатель и начинается процесс индукционно-динамического торможения.

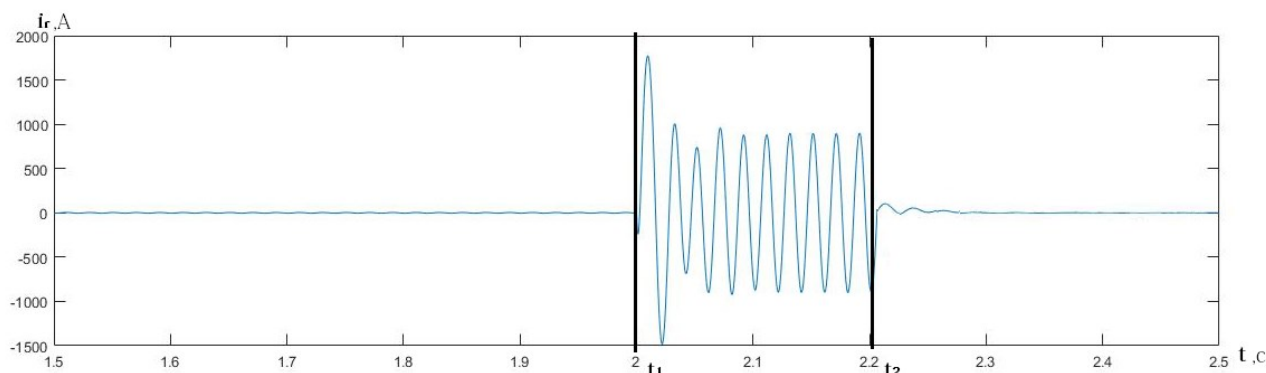


Рис. 8. Диаграмма величины тока ротора АД типа ЭКВ4-250

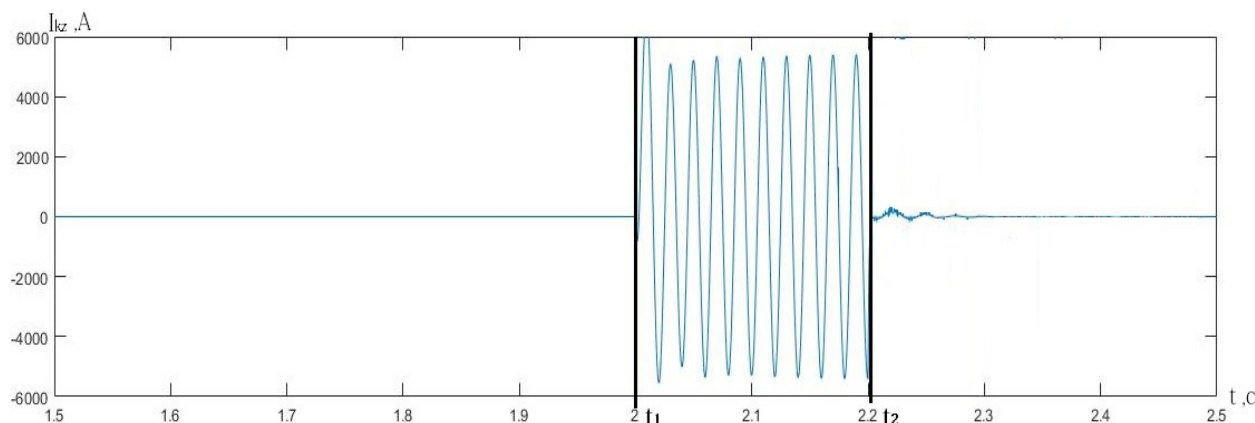


Рис. 9. Диаграмма величины тока двухфазного короткого замыкания в кабеле питания АД типа ЭКВ4-250 с учетом эффекта ИДТ

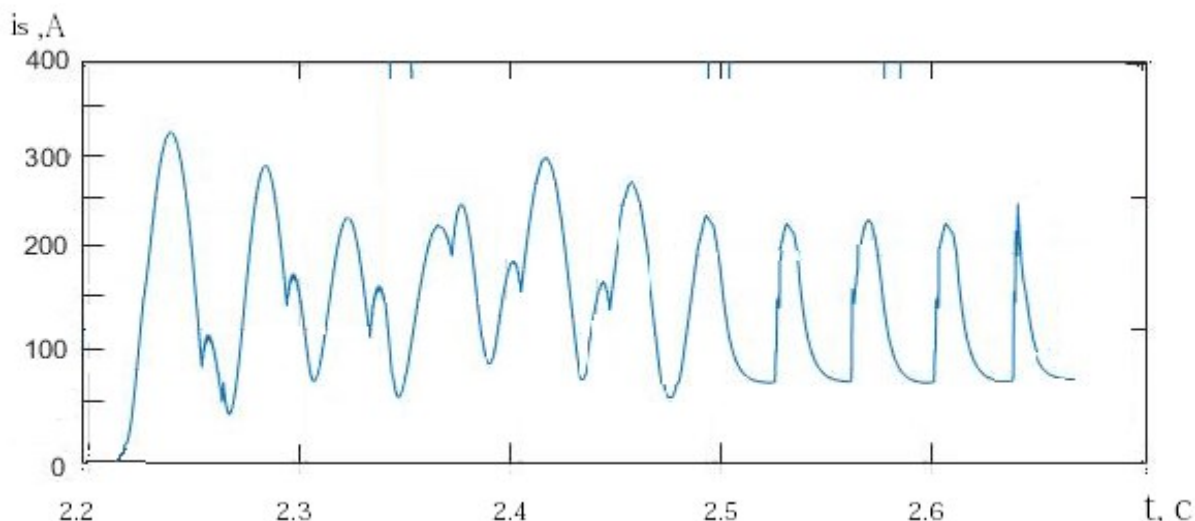


Рис. 10. Диаграмма тока статора АД типа ЭКВ4-250 при ИДТ

Диаграмма тока статора асинхронного двигателя типа ЭКВ4-250 при индукционно-динамическом торможении соответствует реально существующей (рис. 10). Анализ полученной диаграммы позволяет сделать вывод об адекватности исследуемой модели реальному объекту.

Результатами исследования установлен положительный токоограничивающий эффект при индукционно-динамическом торможении, поз-

воляющий предотвратить существование тока двухфазного короткого замыкания в питающем кабеле АД после защитного отключения автоматического выключателя. При этом в случае возникновения цепи утечки тока на землю, уровень количества электричества, проходящего через тело человека, снижается более чем в 1,3 раза и не превышает 38 мА·с, что соответствует критерию электробезопасности.

**Выводы**

В результате проведенных исследований установлена принципиальная возможность ускоренного подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя на основе применения принципа индукционно-динамического торможения.

В дальнейшем актуальной является задача исследования характера изменения параметров рассматриваемой системы с учетом изменения угла управления тиристорами.

**Список литературы**

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Рима́н, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Рима́н. – М.: Недра, 1977. – 206 с.
3. Переходные процессы в системах электро-снабжения: учеб. для вузов / Г.Г. Пивняк [и др.]. – М.: Энергоатомиздат; Днепропетровск: НГУ, 2003. – 548 с.
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](https://pdfs.semanticscholar.org/6827/53887a0b319296f716beb11b9f01273115a1.pdf?_ga=2.1670840.803898779.1508794395-959523617.1508794395)
5. Groh, H. Explosion protection: electrical apparatus and systems for chemical plants, oil and gas industry, coal mining / Heinrich Groh. – Amsterdam; London: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004. – 524 p.
6. Маренич, К.М. Наукові основи впровадження автоматичного захисного двобічного знеструмування 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 / К.Н. Маренич. – Донецк: Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2015. – 234 с.
8. Шишкин, Н.Ф. Быстродействующая защита шахтных сетей от замыкания на землю / Н.Ф. Шишкин. – М.: Госгортехиздат, 1960. – 53 с.
9. Шишкин, Н.Ф. Быстродействующая защита от токов утечки на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В / Н.Ф. Шишкин. – М.: ИГД, 1960. – 50 с.
10. Пат. 103934 (UA), МПК (2006.01) H02H 3/02, H02H 3/10. Пристрій захисту від впливу зворотного енергетичного потоку асинхронного двигуна на точку ушкодження в кабелі живлення / К.М. Маренич, І.В. Ковальова. – а2012 01369; заявл. 09.02.2012; опубл. 10.12.2013. Бюл.№23.
11. Маренич, К.Н. Синхронное двустороннее обесточивание поврежденного участка кабеля шахтной участковой электросети / К.Н. Маренич, И.В. Ковалева // Уголь Украины. – 2011. – №5. – С. 53-54.
12. 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. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 13 с.
13. 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. – 477 с. Т.2 – 440 с.
14. Маренич, К.Н. Проблематика электробезопасности системы «кабель-двигатель» участка шахты / К.Н. Маренич // Наукові праці Донецького державного технічного університету, серія гірничо-електромеханічна. – 2001. – Вип.27. – С. 270-277.

**K.N. Marenich /Dr. Sci. (Eng.)/, E.S. Dubinka**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

**THE EVOLUTION OF TECHNICAL SOLUTIONS TO THE PROBLEM OF REVERSE ENERGY FLOWS SUPPRESSION IN INDUCTION MOTORS**

***Background.** The technical solution of parameter limitations of the reverse electromotive force (EMF) of an induction motor considered, which is necessary for the suppression of the reverse energy flow of the induction motor (IM) of the multi-machine electrotechnical complex (ETC) of the mine site in the state of free coasting after tripping the mains.*

***Materials and/or methods.** Established that in the operation of the electricity supply systems of the technological sites of coal mines the induction motors of medium and high power are able to create*



long-time reverse energy flows, which creates a precedent for the maintenance of the precarious state of the electrotechnical complex in case when the reason for shutoff was a short circuit in the power connection or leakage of current to ground. These electrical factors are the reason of maintenance in the switched-on state of contactors of starters and time increase of the current flow in an emergency point of an electric network that reduces the efficiency of automatic protection and can cause negative consequences.

**Results.** Solving of the problem of preventing the dangerous effects of reverse energy flows was carried out in different directions. The currently known technical solutions for detecting the emergency condition of the electrical network do not allow proper ensuring of the electrical safety, which determines the relevance of the search for effective technical solutions in the field of protective suppression of reverse energy flows.

**Conclusion.** The essence of the paper is in the analysis of the existing variants of protections supposing suppression of return energy flows of induction motors; substantiation of the structure of the AD model in the mode of induction-dynamic braking. Considered the possibility of maintaining the accelerated decline of the reverse EMF induced in the stator of the induction motor, which determines the possibility of the mode use for separating the IM from the reverse energy flow network in its protective shutoff. The parameters of the model are determined by the methods of computer modeling, which allow reducing currents and voltages to safe values as well as maintaining the reverse EMF at a safe level.

**Keywords:** electrotechnical complex, induction motor, reverses energy flow, limitation.

**Сведения об авторах**

**К.Н. Маренич**

SPIN-код: 8632-8425  
 Author ID: 377905  
 ORCID iD: 0000-0002-6309-4986  
 Телефон: +380 (71) 301-98-61  
 Эл. почта: knm@donntu.org

**Е.С. Дубинка**

SPIN-код: 3110-5247  
 Author ID: 914120  
 ORCID iD: 0000-0002-3003-6421  
 Телефон: +380 (71) 302-74-94  
 Эл. почта: ekaterina\_sd@bk.ru

Статья поступила 10.04.2018 г.  
 © К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка, 2018  
 Рецензент д.т.н., проф. Э.Г. Куренный

