

УДК 621.313

К.Н. Маренич /д.т.н./, А.И. Денисова

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНЫЙ РУДНИЧНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. ОБОСНОВАНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

*Рассмотрены вопросы, относящиеся к проблематике подавления электропоражающего фактора, обусловленного действием обратной ЭДС асинхронного двигателя после отключения напряжения питания. Предложено концептуальное решение в контексте дооснащения асинхронного двигателя устройством контроля состояния изоляции в силовом присоединении кабеля электропитания и компактным устройством разъединения цепи «звезда» обмоток статора в процессе защитного отключения. Представлен сопоставительный анализ эффективности вариантов схем реализации защитной функции.*

**Ключевые слова:** асинхронный двигатель, обратная ЭДС, электропоражающий фактор, коммутация обмоток статора, варианты схем, исследование

### Постановка проблемы

В настоящее время электробезопасность эксплуатации шахтных участковых электрических сетей обеспечивается комплексным техническим решением применения: защитного заземления металлических корпусов силового электрооборудования; аппаратов защиты от утечек тока на землю. Последние входят в структуру участковых трансформаторных подстанций и формируют команду на отключение их автоматических выключателей (на стороне низшего напряжения) в момент касания человеком фазного проводника, находящегося под напряжением (т.е. появления цепи утечки  $R_{ут}$  тока на землю). Однако защитное отключение силовых электроустановок не является достаточным в контексте обеспечения безопасности их эксплуатации (в части защиты человека от электропоражения). Применяемая повсеместно концепция защитного отключения электрооборудования технологического участка шахты не предусматривает функцию обесточивания силовых цепей электротехнического комплекса подавлением обратных энергетических потоков асинхронных двигателей (АД) потребителей, находящихся в состоянии выбега после отключения питающего напряжения.

Таким образом, асинхронный двигатель электропривода рудничной технологической установки следует рассматривать как источник формирования электропоражающего фактора на интервале времени, следующем за отключением напряжения участковой электросети. В этом случае защитное действие (в дополнение к

штатным средствам защиты) должно предполагать:

- выявление цепи повышенной проводимости с фазы на землю (цепи утечки) техническими средствами, действующими непосредственно со стороны асинхронного двигателя и функционально не зависящими от технических средств защиты, предусмотренных со стороны участковой трансформаторной подстанции;

- отделение от кабельной сети участка шахты обратной ЭДС асинхронного двигателя техническими средствами коммутации силовых электрических цепей.

Применительно к шахтным участковым электротехническим комплексам наиболее приемлемым техническим решением является объединение указанных дополнительных защитных функций в одном устройстве, непосредственно адаптированном в структуру самого асинхронного двигателя электропривода рудничной технологической установки. Это позволит:

- исключить возможность повреждения электрических соединений обмоток статора АД и устройства защитного подавления его обратного энергетического потока;

- распространить данную защитную функцию на электродвигатели рудничных машин, перемещаемых в процессе эксплуатации.

В этом случае асинхронный двигатель горной машины в дополнение к своей основной функции создания вращающего электромагнитного момента приобретёт функцию автоматического выявления опасного состояния присоединения кабеля электропитания с последующим подавлением

обратного энергетического потока в процессе защитного отключения, что представляет собой новое концептуальное решение: «электробезопасный асинхронный двигатель».

### Анализ исследований и публикаций

Теория формирования обратной ЭДС асинхронного двигателя в процессе его перехода в режим выбега (после отключения напряжения в электрической сети) раскрыта в работах [1,2]. Её анализ позволяет сделать вывод о наличии зависимости продолжительности обратной ЭДС от мощностных параметров двигателя, косвенно связанных с параметрами индуктивности и активного сопротивления его обмоток и, как следствие, – формировании продолжительного электропоражающего фактора в шахтных участковых электротехнических комплексах, оснащённых асинхронными двигателями высокой мощности, после отключения напряжения питания. Это предположение подтверждается исследованием переходных процессов в шахтных участковых многомашиных электротехнических комплексах, где рассмотрены особенности формирования обобщённых ЭДС (в качестве электропоражающего фактора), обусловленных воздействием обратных энергетических потоков асинхронных электрических машин разного уровня мощности [3]. В исследовании [4] обоснована концепция выявления аварийного (опасного) состояния в кабеле электропитания асинхронного двигателя автономным устройством, действующим непосредственно со стороны ввода обмоток его статора. Проблематика практической реализации процесса защитного подавления обратного энергетического потока АД (вследствие появления соответствующего информационного сигнала от автономного устройства контроля состояния кабеля электропитания) рассмотрена в исследовании [5]. Здесь сделан акцент на возможности использования режима индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя в качестве процесса подавления его обратной ЭДС. Однако техническая реализация такого режима предполагает применение отдельного громоздкого (рудничное взрывозащищённое исполнение) и дорогостоящего силового коммутационного аппарата, основу которого составляет трёхфазный тиристорный коммутатор, содержащий дополнительно от одного до двух силовых тириستоров коммутации цепи закорачивания ЭДС вращения двигателя.

Такое техническое решение в принципе не может быть использовано применительно к электродвигателям горных машин, перемещаемых в процессе эксплуатации (очистные комбайны, забойные скребковые конвейера и т.п.). В целом же, расположение силового устройства подавления обратного энергетического потока АД отдельно от самого двигателя предполагает наличие вероятности невыполнения возложенной на данное устройство защитной функции по причинам:

- возможного повреждения электрических соединений данного устройства и силовых цепей статора двигателя;
- неподключения (вследствие ошибочных действия персонала) данного устройства к силовым цепям статора двигателя.

Таким образом, научную и практическую актуальность представляет задача обоснования концепции электробезопасного рудничного асинхронного двигателя, содержащего в своей структуре (помимо элементов, обеспечивающих формирование вращающего электромагнитного момента) технические средства контроля состояния кабеля электропитания и управления подавлением обратного энергетического потока в процессе защитного отключения. При этом, действия данных технических средств должны выполняться в автоматическом режиме и не быть подчинены воздействию штатных средств защиты, функционирующих со стороны участковой трансформаторной подстанции.

### Цель исследования

Целью исследования является обоснование концептуального решения в части структуры рудничного асинхронного двигателя, реализующего функцию выявления опасного состояния силовой цепи кабеля электропитания с последующим подавлением обратного энергетического потока в процессе защитного отключения (концепция электробезопасного рудничного асинхронного двигателя).

### Результаты исследования

Ввод в структуру асинхронного двигателя устройства подавления его обратного энергетического потока может быть реализован на основе анализа возможности изменения его конструкции (рис. 1) [6] путём размещения соответствующего дополнительного функционального узла (ДФУ). При этом, местом размещения ДФУ может служить металлическая коробка в рудничном взрывозащищённом исполнении [7], аналогичная по конструкции вводной коробке кабельного ввода

электродвигателя, пускателя и т.п. (рис. 2) [6,8]. Ограниченные размеры корпуса и способ его размещения на внешней стороне корпуса асинхронного двигателя обуславливают необходимость применения в структуре ДФУ компактного силового коммутационного устройства. Применительно к контактору, этим исключается возможность использования трёхполюсного, а также двухполюсного коммутационного аппарата. А учитывая, что поток охлаждающего воздуха от вентилятора (поз. 5, рис. 1), будучи направленным вдоль рёбер теплоотвода корпуса двигателя, не обтекает дополнительные корпуса (пример – поз. 7, рис. 1), в качестве приоритетного (в отношении ДФУ) следует рассматривать техническое

решение, в котором возможное применение силовых полупроводниковых приборов будет связано с кратковременным включением их в работу – на интервале времени подавления обратного энергетического потока АД (что не приведёт к перегреву последних).

Размещение дополнительного корпуса на внешней стороне корпуса двигателя согласуется с практикой применения рудничных асинхронных электрических машин [9] на примере электродвигателей с фазным ротором (двигатели

серии ВРК; ВАОК, рис. 3а), оснащённых двумя коробками кабельных вводов. Кроме этого, кабельные вводы могут быть вынесены от

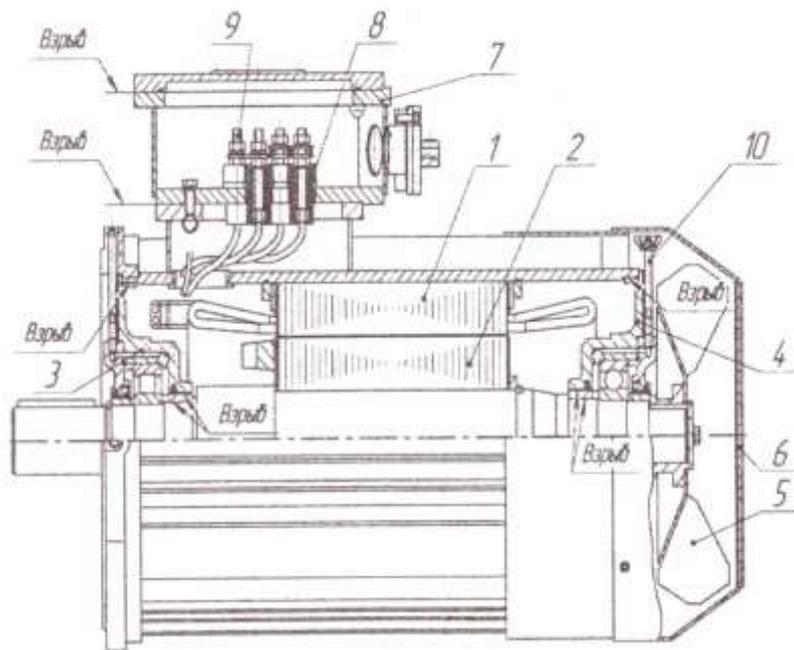


Рис. 1. Компоновка рудничного асинхронного двигателя 2АКДВ250М4:  
 1 – статор; 2 – ротор; 3, 4 – подшипниковые щиты; 5 – вентилятор; 6 – кожух; 7 – коробка кабельного ввода; 8 – изолятор; 9 – силовой зажим; 10 – устройство для пополнения смазки

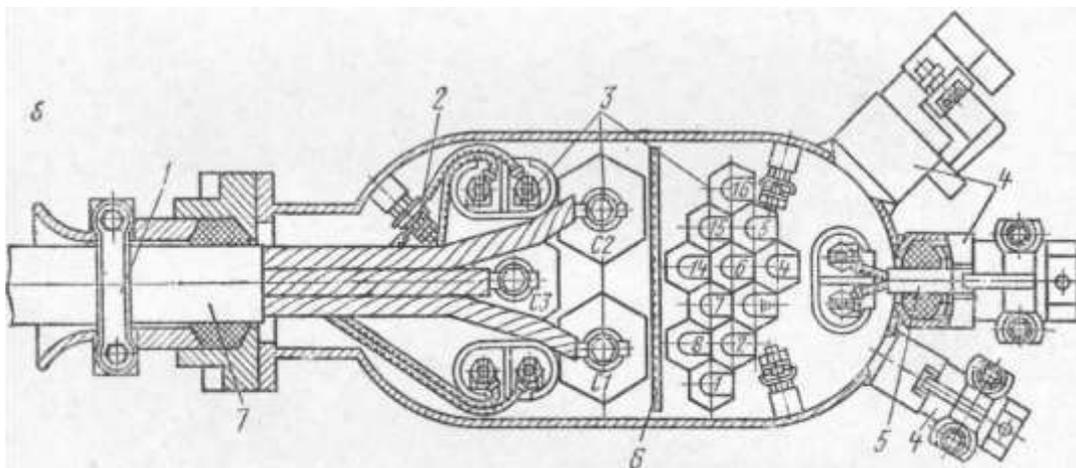


Рис. 2. Общий вид коробки кабельного ввода рудничного электроаппарата во взрывозащищённом исполнении:

1 – кабельная муфта ввода силового кабеля; 2 – заземляющий зажим;  
 3 – проходные зажимы (контакты); 4 – устройство ввода кабеля 5 контрольных цепей;  
 6 – перегородка

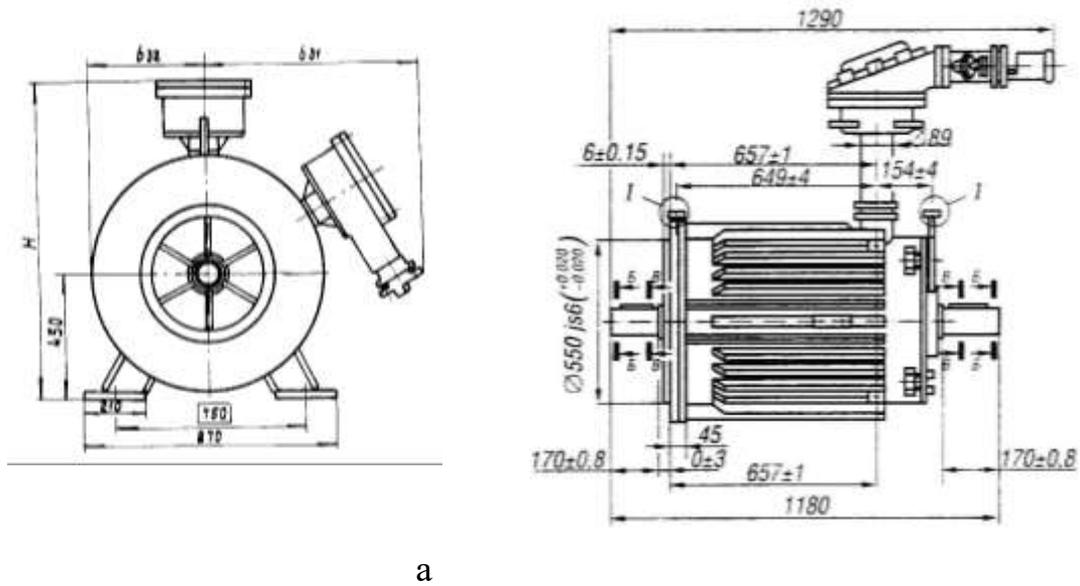


Рис. 3. Варианты размещения коробок кабельных вводов на корпусах асинхронных двигателей ВАОК (а) и ВРМ (б)

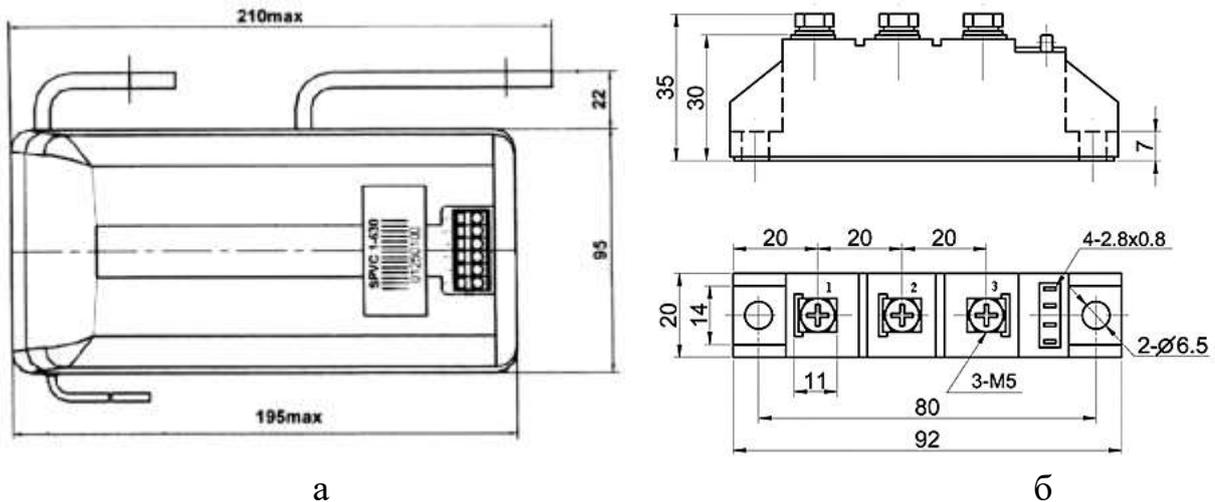


Рис. 4. Компоненты силовой схемы дополнительного функционального устройства а – вакуумный контактор SPVC (выпускаемый в производстве Российской Федерации); б – диодный модуль серии МДД

корпуса статора двигателя (двигатели серии ВРМ, расположение коробок кабельных вводов на цилиндрических основаниях, рис. 3б) [6]. Критерию минимизации габаритов дополнительного функционального устройства соответствует применение в его структуре однополюсного вакуумного контактора SPVC-630 [10] и диодно-диодного модуля серии МДД [11] (рис. 4) в качестве силовых коммутационных элементов электрической схемы.

Техническим решением задачи выявления аварийного (опасного) состояния кабеля электропитания АД с последующим

подавлением обратного энергетического потока является схема, представленная на рис. 5.

Участковая трансформаторная подстанция 1 представлена такими структурными элементами, как: силовой трансформатор 2, автоматический выключатель 3 и аппарат 4 защиты от утечек тока на землю (заземление представлено структурным элементом 5). Статор 6 АД представлен фазными обмотками 7, соединёнными в схему «звезда» посредством размыкаемого силового контакта 8 и диодов VD1, VD2. Цепь выявления утечки ( $R_{ут}$ ) тока на землю, предназначенная для использования в структуре АД, состоит из конденсаторов C1, C2, диода VD3, а также резистора R2,

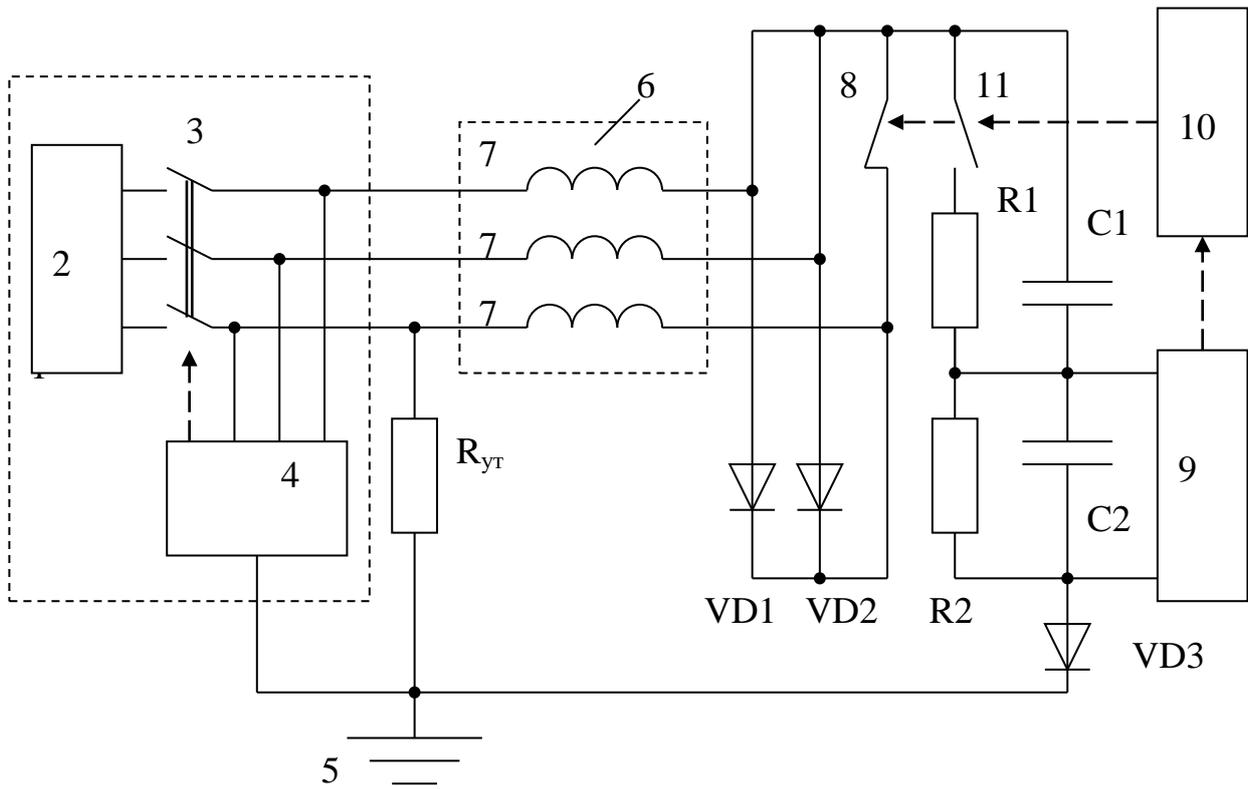


Рис. 5. Схема устройства коммутации цепи подключения обмоток статора асинхронного двигателя в процессе подавления обратного энергетического потока при возникновении утечки тока на землю

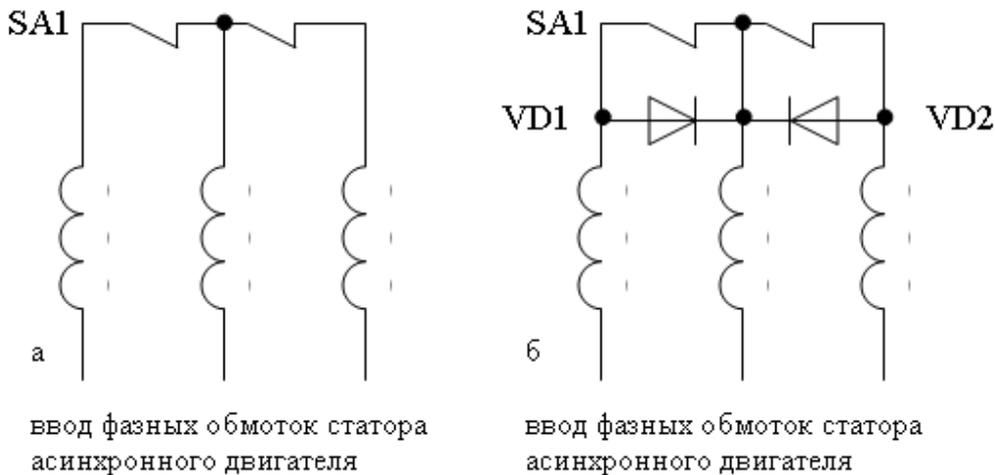


Рис. 6. Варианты схем коммутации цепи «звезда» фазных обмоток статора асинхронного двигателя на основе применения двухполюсного автоматического выключателя

присоединённого параллельно конденсатору C2. Таким образом, команда на защитное подавление обратного энергетического потока АД, снимаемая в виде импульса напряжения на резисторе R2, приводит к срабатыванию реагирующий орган 9 и коммутационный аппарат 10. Последний разомкнёт силовой контакт 8 и замкнёт слаботочный контакт 11, разрядив конденсатор C1 через резистор R1 и подготовив, тем самым, измерительную цепь C1

– C2 – VD3 к последующему использованию. Разъединение контакта 8 нарушит целостность схемы «звезда» соединения обмоток статора АД, а схема присоединения диодов VD1, VD2 к фазным обмоткам статора создаст эффект протекания выпрямленного тока по обмотке статора, соединённой с катодами диодов VD1, VD2, что способствует снижению величины формируемого вращающего электромагнитного момента АД на интервале времени, когда ещё не

прекращена подача напряжения на статор. Кратковременность протекания тока по силовым диодам VD1, VD2 не приведёт к их перегреву, что исключит необходимость применения средств их охлаждения.

Рассматривая особенности функционирования схемы (рис. 5), следует отметить, что после срабатывания защиты (разъединения контакта 8) электропоражающий фактор на вводе статора АД не будет устранён мгновенно, поскольку сохранится соединение выводов обмоток двух фаз статора, присоединённых к анодам диодов VD1, VD2. Таким образом, схема (рис. 5) может быть рассмотрена только в качестве концепции. Проблематичным также представляется применение контактора в качестве исполнительного силового коммутационного устройства, поскольку его исходное отключенное состояние предопределяет необходимость применения устройства управления его включением и, собственно, включение контактора предварительно перед включением в работу асинхронного двигателя.

Развитием предложенной концепции является схема коммутации соединения «звезда» обмоток статора АД двухполюсным

автоматическим выключателем (рис. 6). Компактность конструкции автоматического выключателя типа А3711Б (320x157x112 мм), рассчитанного на работу в сетях линейного напряжения 660 В и 1140 В при номинальном токе до 160 А включительно [12], позволяет рассматривать это техническое решение применительно к рудничным асинхронным двигателям малой и средней мощности.

В этом соответствии со схемой (рис. 6) автоматический выключатель SA1 может находиться продолжительно во включенном состоянии (что соответствует штатному режиму эксплуатации АД) без применения дополнительных средств управления. Его отключение осуществляется подачей импульса тока в цепь независимого расцепителя, что согласуется с функционированием реагирующего органа 9 (рис. 5). Отключение автоматического выключателя SA1 приводит к разрыву цепи трёхфазного соединения обмоток статора АД и прекращению тока в этих обмотках и в соответствующих фазах защищаемого силового присоединения.

Кроме этого, цепь силового исполнительного устройства может быть дополнена встречно соединёнными диодами VD1, VD2 (рис. 6б),

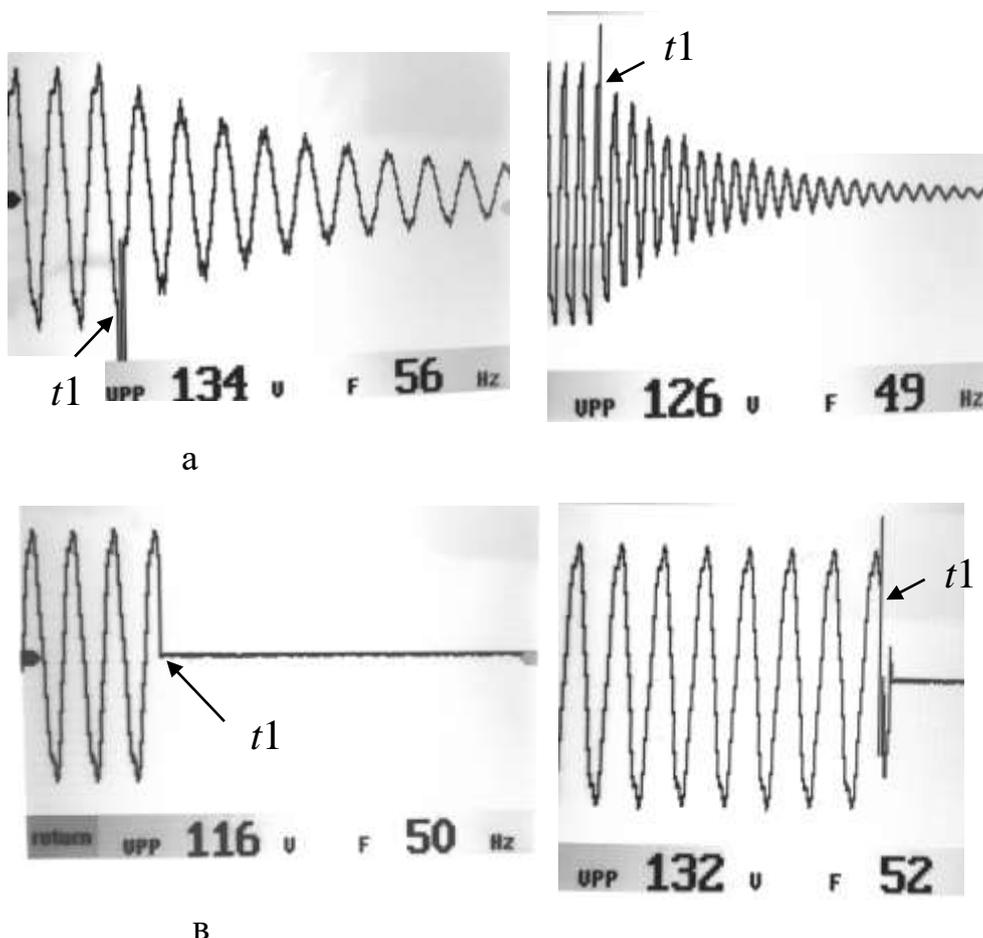


Рис. 7. Осциллограммы напряжений на резисторе – имитаторе сопротивления утечки тока на землю в вариантах схем коммутации обмоток статора асинхронного двигателя:  
 а, б – по рис. 5; в – по рис. 6а; г – по рис. 6б; параметр VPP – разность потенциалов

формирующими постоянные токи в каждой фазе статора АД (что эффективнее в сравнении со схемой по рис. 5), создавая условия для режима динамического торможения двигателя в случае срабатывания защиты. Кратковременность протекания тока в цепи диодов (на интервале динамического торможения АД) не требует применения средств их охлаждения, что сохраняет компактность силовой схемы и согласуется с предложенной концепцией применения средств коммутации цепи «звезда» обмоток статора АД в контексте противодействия формированию электропоражающего фактора в цепи силовых присоединений.

Эффективность вариантов реализации концептуального технического решения в контексте подавления электропоражающего фактора, образуемого обратной ЭДС АД проверена на физической модели, соответствующей рис. 5, где в качестве электрической машины использован асинхронный двигатель ДК16N мощностью 1,5 кВт с параметрами: напряжение питания  $\Delta / Y$  : 220 / 380 В;  $\cos \varphi=0,84$ ; частота вращения ротора номинальная 1420 об/мин.

В структуре физической модели принято сопротивление утечки  $R_{ym}=0,75$  кОм; активные сопротивления изоляции и ёмкости изоляции (относительно земли), соответственно, 150 кОм/фазу и 0,6 мкФ/фазу. В процессе экспериментов асинхронный двигатель работал без нагрузки на валу, что является условием формирования максимальных продолжительностей обратных ЭДС при его отключении от сети. Падения напряжения на сопротивлении утечки (цепь «фаза – земля») в момент срабатывания защиты (отключения напряжения, подаваемого на статор АД и синхронного разъединения силового контакта 8 (по рис. 5); контактов SA1 (по рис. 6) фиксировались электронным осциллографом YEAPOOK ADS5012h и приведены на рис. 7.

### Выводы

Анализ осциллограмм показывает, что эффект мгновенного отключения обратной ЭДС асинхронного двигателя от силового присоединения кабеля электропитания может быть достигнут синхронным размыканием соединения «звезда» фазных обмоток статора (рис. 6а, рис. 7в). Это позволяет решить задачу создания электробезопасного асинхронного двигателя (в т.ч., рудничного исполнения) на основе адаптации в его структуру компактного устройства выявления аварийного (опасного)

состояния кабеля электропитания и коммутации схемы «звезда» обмоток статора.

В качестве коммутационного устройства в этом случае приемлемо использовать двухполюсный автоматический выключатель, что подтверждается наличием серийных компактных аппаратов данного типа и согласуется с эксплуатационными требованиями:

- продолжительное поддержание замкнутого состояния контактов коммутационного устройства без дополнительных управляющих воздействий (штатный режим работы двигателя);
- разъединение контактов коммутационного устройства кратковременным воздействием на его независимый расцепитель срабатыванием функционального узла выявления аварийного (опасного) состояния в кабеле электропитания двигателя.

Применение диодов по схеме (рис. 6б) позволяет создать цепи постоянного тока в фазах статора асинхронного двигателя в процессе защитного отключения, однако это сопровождается формированием кратковременных импульсов тока в цепи утечки тока на землю (рис. 7г) после разъединения контактов коммутации цепи «звезда» обмоток статора.

Применение однополюсного коммутационного устройства с диодной схемой формирования однополярного тока в одной обмотке статора АД (по рис. 5) не позволяет достичь эффекта подавления обратной ЭДС двигателя и торможения его ротора, что подтверждается осциллограммами (рис 7а, б).

### Список литературы

1. Ковач К.П. переходные процессы в машинах переменного тока / К.П. Ковач, И. Рац. – М.-Л., Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей / И.А. Сыромятников; под ред. Л.Г. Мимикоянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985.– 136 с.
3. Василец С.В. Математичне моделювання перехідних процесів в багатомашинних шахтних електротехнічних комплексах: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03 /Василец Святослав Володимирович. – Донецк, 2010.– 194 с.
4. Маренич К.Н. Синхронное двустороннее обесточивание повреждённого участка кабеля шахтной участковой электросети / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва // Уголь

- Украины: научный журнал. – Киев, 2011. – Вып. №5. – С. 53-54.
5. Дубинка Е.С. Обоснование безопасных режимов работы шахтных электрических сетей на основе управления параметрами обратных ЭДС электропотребителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 /Дубинка Екатерина Сергеевна, – Донецк, 2020. – 155 с.
  6. Взрывозащищённые асинхронные двигатели: выбор, эксплуатация, ремонт / В.В. Каика, Т.В. Швецова, А.И. Аликанов и др.; под общ. ред. В.В. Каики. – Донецк: Юго-Восток, 2010. – 360 с.
  7. Корпуса взрывозащищённые. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://exd.ru/pdf/catalog\\_37/goreltech\\_37\\_2022\\_a11.pdf?ysclid=ljpmi2a3ud351596540](https://exd.ru/pdf/catalog_37/goreltech_37_2022_a11.pdf?ysclid=ljpmi2a3ud351596540). – Загл. с экрана.
  8. Светличный П.Л. Выбор и эксплуатация электрооборудования участка шахты: справочник / П.Л. Светличный. – М.: Недра, 1980. – 343 с.
  9. Проектирование электрич. машин: учеб. пос. / Д.В. Цыпленков, Ю.В. Куваев, А.Б. Иванов, И.А. Кириллов; под общ. ред. Ф.П. Шкрабца. – Днепропетровск, НГУ, 2008. – 325 с.
  10. Контактёр однофазный вакуумный серии SPVC. Техническое описание: Контактёр серии SPVC, завод «Таврида», Севастополь: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.masters.donntu.org/2008/fema/tarasenko/library/5.htm> – Загл. с экрана.
  11. Модуль диодный МДД-80-12. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://asenergi.ru/catalog/modul-silovye/modul-mdd/mdd-80-12.html>. – Загл. с экрана.
  12. Выключатели автоматические серии АЗ700 Ф, Б, БР Техническое описание, 16 с. – Режим доступа: <http://www.ktp.ru/cat/cat/00001.pdf>. – Загл. с экрана.

**K.N. Marenich /Doct. Sci. (Eng.)/, A.I. Denisova**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

### **AN ELECTRICALLY SAFE MINE ASYNCHRONOUS MOTOR. JUSTIFICATION OF THE CONCEPTUAL SOLUTION**

**Background.** *The danger of human electric shock during the operation of industrial electrical installations is caused, in particular, by the presence of reverse EMF asynchronous motors after the power supply voltage is turned off, which determines the relevance of finding technical solutions in the field of adaptation of reverse EMF suppression means directly into the structure of an asynchronous motor.*

**Materials and/or methods.** *The variants of the conceptual solution schemes are investigated on the physical model of the power supply system of the technological section containing an asynchronous motor, the conductivity to the ground of cable insulation and the resistance of current leakage to the ground.*

**Results.** *The analysis of the waveforms shows that the effect of instantaneous separation of the reverse EMF of the asynchronous motor from the power connection of the power supply cable can be achieved by synchronously opening the "star" connection of the phase windings of the stator.. This makes it possible to solve the problem of creating an electrically safe asynchronous motor (including mine design) on the basis of adapting into its structure a compact device for detecting an emergency (dangerous) state of the power supply cable and switching the "star" circuit of the stator windings. In this case, it is acceptable to use a two-pole circuit breaker as a switching device, which is confirmed by the presence of serial compact devices of this type and is consistent with operational requirements:*

*– continuous maintenance of the closed state of the contacts of the switching device without additional control actions (normal operation of the engine);*

*– disconnection of the contacts of the switching device by a short-term effect on its independent disconnecter of the actuation of the functional node for detecting an emergency (dangerous) condition in the motor power cable.*

*The use of diodes according to the scheme in the switching circuit of the phase windings of the stator allows them to create DC circuits in the process of motor shutdown, however, this is accompanied by the formation of short-term current pulses in the current leakage circuit to the ground after disconnecting the switching contacts of these stator windings.*

*The use of a single-pole switching device with a diode circuit for the formation of a unipolar current in one stator winding of an asynchronous motor does not allow to achieve the effect of suppressing the reverse EMF of the motor and braking its rotor, which is confirmed by oscillograms.*

**Conclusion.** *Issues related to the problem of suppressing the electrodamaging factor caused by the action of the back EMF of an asynchronous motor after turning off the supply voltage are considered. A conceptual solution is proposed in the context of retrofitting an asynchronous motor with a device for monitoring the insulation condition in the power connection of the power supply cable and a compact device for disconnecting the star circuit of the stator windings during protective shutdown. A comparative analysis of the effectiveness of variants of schemes for implementing the protective function is presented.*

**Keywords:** *asynchronous motor, reverse EMF, electro-damaging factor, switching of stator windings, circuit variants, research.*

**Сведения об авторах**

**К.Н. Маренич**

SPIN-код: 8632-8425  
 ORCID iD: 0000-0002-6309-4986  
 Телефон: +7 (949) 301-98-61  
 Эл. почта: marenich\_1958@mail.ru

**А.И. Денисова**

Телефон: +7 (950) 037-25-81  
 Эл. почта: denisova\_anastasi@mail.ru

*Статья поступила 15.09.2022 г.  
 © К.Н. Маренич, А.И. Денисова, 2022  
 Рецензент д.т.н., проф. А.П. Ковалёв*