

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

Дубинка Екатерина Сергеевна

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ШАХТНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ УПРАВЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРАМИ ОБРАТНЫХ ЭДС ЭЛЕКТРОПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

Специальность 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Донецк – 2019

**Работа выполнена в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Министерства образования и науки
Донецкой Народной Республики, г. Донецк**

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Маренич Константин Николаевич,
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»,
заведующий кафедрой «Горная электротехника и
автоматики им. Р.М. Лейбова»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

кандидат технических наук

Ведущее предприятие:

Защита состоится « » _____ 2019 г. в 12 час. 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 01.008.01 в ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу:
283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304-30-
55, e-mail: uchensovet@donntu.org.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ»
по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 2. Адрес сайта
университета: <http://donntu.org>

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета Д 01.008.01
доктор технических наук

И.А. Бершадский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследований. Эксплуатация участковых электротехнических комплексов (ЭТК) в условиях шахты сопряжена с повышенными рисками электротравматизма, что обуславливает необходимость ограничения времени существования обратных энергетических потоков асинхронных двигателей на интервале свободного выбега с целью обеспечения безопасных режимов работы. Причины этого состоят не только в сложных условиях подземных горных выработок, в которых эксплуатируется силовое рудничное электрооборудование, но и в необходимости широкого применения механически незащищённых гибких кабелей для передачи энергии от распределительных пунктов к асинхронным двигателям (АД) потребителей, функционирующих нестационарно.

Задачи обеспечения безопасности эксплуатации ЭТК решаются в направлениях: создания быстродействующих средств выявления касания человека к элементам электрической сети, находящейся под напряжением и обесточивания цепи прикосновения; применения многократно дублирующих друг друга устройств защиты от к.з. защит от токовых перегрузок, перегрева и др. Фактором, объединяющим эти технические решения, является защитное отключение - отделение энергетического потока трансформаторной подстанции (ТП) участка от всех компонентов участкового ЭТК. Тем не менее, опыт эксплуатации силового электрооборудования участков шахт свидетельствует о наличии электротравматизма, что подтверждается официальными статистическими данными и имеет тенденцию роста в электротехнических комплексах с оборудованием высокой мощности.

Повышение мощности технологических установок участка шахты обуславливает широкое применение электрических сетей напряжения 1140 В, повсеместное применение АД высокой мощности в составе электроприводов. В этом случае функция автоматического защитного отключения электрической сети участка шахты оказывается недостаточной, поскольку после него электрическая сеть продолжает оставаться под напряжением, создаваемым обратными ЭДС АД (в режиме выбега), продолжительности которых в условиях применения АД высокой мощности оказываются достаточными для создания прецедентов электропоражения в отключенной сети.

Степень разработанности темы исследований. Комплексное обоснование процессов автоматического защитного отключения электрооборудования участков угольных шахт дано в исследованиях В.П. Колосюка. В них обобщены исследования и разработки в области обеспечения электробезопасности ЭТК (работы Р.М. Лейбова, В.Д. Кочеткова, В.С. Дзюбана), защиты от к.з. (работы Я.С. Римана), рассмотрены вопросы безопасности эксплуатации электрооборудования ЭТК в условиях применения импульсных полупроводниковых регуляторов. Принципиально важным результатом исследований явились разработки нормативных документов в области электробезопасности, в частности, ГОСТ 22929-78 «Аппараты защиты

от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические условия», где регламентируются параметры факторов электропоражения: допустимый ток через тело человека 25 мА, количество электричества – 50 мА·с; сопротивление тела человека – 1 кОм. Исследования в области ускорения защитного отключения электросети выполнены Н.Ф. Шишкиным. Им же была предложена концепция сопровождения защитного отключения коротким замыканием выхода коммутационного аппарата. Разработки Л.А. Муфеля, О.А Демченко в области ограничения токов к.з., посвящены вопросам повышения ресурса и безопасности эксплуатации шахтных кабелей. Разработки аппаратов защиты на современной элементной базе с улучшенными параметрами чувствительности и быстродействия освещены в работах Е.А. Вареника, В.Н. Савицкого. Однако все они касаются вопросов выявления опасного состояния ЭТК участка шахты и его защитного отключения, и не рассматривают проблематику, обусловленную действием обратных ЭДС АД высокой мощности на элементы электрооборудования после защитного отключения электрической сети.

В исследованиях К.Н. Маренича, И.В. Ковалёвой, С.В. Васильца, анализируется обратная ЭДС АД в режиме выбега как фактор опасности электротравматизма, обоснована концепция выявления опасного состояния кабеля электропитания АД автономно действующим устройством. Проблематике защиты обслуживающего персонала от ЭДС выбега электродвигателей посвящены работы А.В. Пичуева, В.И. Петурова, И.Ф. Суворова, Д.А., где анализируется влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий. Однако данные исследования представляют собой только начальный этап решения комплекса научно-технических задач в области автоматического ускоренного защитного обесточивания ЭТК участков шахты, в частности, обоснования способов и структуры устройств подавления обратных ЭДС АД в режиме выбега.

Цель и задачи исследования. Цель работы – обеспечение безопасных режимов работы шахтных участковых электрических сетей на основе ограничения электрогенерирующей функции асинхронных двигателей потребителей в процессе отключения путём управления параметрами их обратных ЭДС.

Задачи исследований:

- анализ исследований и разработок в области обеспечения безопасных условий эксплуатации шахтных участковых ЭТК, включая особенности проявления опасных состояний, особенности устройства и функционирования защит; анализ факторов опасности, обусловленных обратными ЭДС АД потребителей;
- исследование свойств управления электромагнитными параметрами АД, включая двухскоростные АД и эффект индукционно-динамического торможения АД, в контексте установления возможности подавления их

обратных ЭДС на интервале выбега и обеспечения на основе этого состояния ЭТК участка шахты, соответствующего критериям безопасности эксплуатации;

- разработка исследовательских стендов и экспериментальные исследования процессов подавления обратных ЭДС АД обоснованными способами управления их электромагнитными параметрами;

- разработка схем устройств выявления аварийных и опасных состояний шахтного участкового ЭТК и устройств подавления обратных ЭДС АД потребителей в процессе и после защитного отключения электропитания.

Объект исследования. Объектом исследования являются процессы, происходящие в электрической сети участка шахты при касании человеком проводника фазы, обусловленные электроэнергетической функцией асинхронных двигателей.

Предмет исследования. Предметом исследования являются принципы управления энергетическими параметрами обратных ЭДС в структуре электротехнического комплекса участка шахты в контексте ограничения электрогенерирующей функции асинхронных двигателей потребителей на уровне, соответствующем критерию безопасности по фактору электропоражения.

Методология и методы исследований. Исследования выполнены с использованием: общей теории электрических цепей, теории переходных процессов, теории электрических машин, теории эксперимента, включая проведение натурных экспериментов; методов: пространственного вектора, математического моделирования, применения цифровых измерительных устройств.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

- разработана математическая модель управления параметрами электрогенерирующей функции асинхронного двигателя, отличающаяся представлением электрической машины трансформаторными связями, коммутируемыми с фиксированной частотой и скважностью, что составило основу экспресс-метода расчёта параметров воздействия обратной ЭДС в структуре электротехнического комплекса на цепь касания человеком контура «фаза – земля», включая процессы, обусловленные управлением электромагнитными параметрами асинхронного двигателя в контексте ограничения электропоражающего фактора величинами, нормируемыми в ГОСТ 22929-78.

- разработана математическая модель электрогенерирующей функции двухскоростного асинхронного двигателя, отличающаяся способом представления взаимного влияния ротора, рабочей и отключенной от сети обмоток статора при создании в последней контура короткого замыкания и позволяющая произвести точный расчёт параметров воздействия обратной ЭДС асинхронного двигателя в структуре электротехнического комплекса на цепь касания человеком контура «фаза – земля».

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в совершенствовании методов математического моделирования процессов в ЭТК участка шахты, в частности, методов моделирования процесса воздействия на величину обратной ЭДС управлением электромагнитными параметрами АД, включая специфику электромагнитной системы двухскоростного двигателя, а также применение способа представления АД многообмоточным трансформатором с управляемой коммутацией его электрических и магнитных компонентов в контексте подавления электропоражающего фактора, обусловленного воздействием обратной ЭДС АД при касании человеком контура «фаза – земля».

Практическое значение результатов исследований.

- в обосновании способов управления электромагнитными параметрами асинхронного, в т.ч., двухскоростного двигателя, создающими эффект ускоренного уменьшения величины и частоты обратной ЭДС в режиме выбега, что соответствует задаче повышения безопасности технического состояния шахтного участкового ЭТК после защитного отключения напряжения электропитания;

- в обосновании возможности применения индукционно-динамического торможения АД как средства предотвращения опасности электротравматизма в ЭТК участка шахты после защитного отключения напряжения питания;

- в усовершенствовании способа контроля состояния изоляции электрической сети участка шахты, техническим средством, действующим вне привязки к месту подключения, позволяющим выявить момент возникновения утечки тока на землю, включая синхронную утечку двух и трёх фаз, без информационной связи с устройством защиты, действующим со стороны ТП и позволяющим сформировать функцию управления ограничением параметров обратной ЭДС АД в процессе защитного отключения напряжения питания сети.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Закономерности изменения величины электропоражающего фактора в шахтной участковой электрической сети при защитном отключении цепи утечки тока на землю в зависимости от способа управления электромагнитными параметрами асинхронного двигателя в процессе подавления его обратной ЭДС.

2. Новая парадигма представления проблемы и способа её решения в области обеспечения безопасности эксплуатации шахтных участковых электротехнических комплексов, состоящая в дополнении действия защиты от утечек тока на землю функцией независимого контроля проводимости контура «фаза – земля» со стороны присоединений асинхронных двигателей потребителей и ограничения их обратных ЭДС управлением электромагнитными параметрами при возникновении утечки тока на землю.

3. Способ устранения электропоражающего фактора в электрической сети участка шахты, состоящий в создании контура токов индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя потребителя в диапазоне

углов отпирания тиристоров цепи динамического торможения 100 - 135 электрических градусов, что достаточно для ограничения продолжительности обратной ЭДС двигателя на уровне 0,2 – 0,3 с и не сопровождается его динамическими перегрузками.

4. Научное обоснование способа выявления утечки тока на землю, состоящего в формировании цепи импульса оперативного тока путём присоединения к фазам сети через точку нулевого потенциала источника напряжения постоянного тока, подключенного выходом к заземляющему проводнику через диодно-ёмкостную цепь с целью формирования информационного импульса напряжения в момент появления утечки тока на землю, включая синхронную утечку тока трёх фаз, что создаёт возможность контроля состояния изоляции электротехнического комплекса участка шахты техническим средством со стороны подключения статора асинхронного двигателя потребителя, не связанным функционально с устройством защиты, действующим со стороны участковой трансформаторной подстанции.

Научные и практические результаты диссертационного исследования в виде научных обоснований и разработки технических решений приняты ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ «НИИВЭ») к использованию в профильных научно-исследовательских работах.

Личный вклад соискателя. Все разделы и положения, составляющие основное содержание диссертации, вынесенные на защиту, получены автором самостоятельно. Личный вклад соискателя заключается в обосновании идеи работы и её реализации, в разработке испытательных стендов, в выполнении теоретических и экспериментальных исследований.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным применением методов математического и компьютерного моделирования, представительным объёмом экспериментальных данных, полученных на натурных моделях элементов электротехнического комплекса участка шахты, а также удовлетворительной сходимостью аналитических и экспериментальных результатов.

По направлению исследований, содержанию научных положений и выводов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки), в частности: п. 7 «Научное обоснование, конструирование, установление области рационального применения и оптимизация параметров способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов».

Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и одобрены на XV, XVI, XVII, XVIII и XIX Международных научно-технических конференциях аспирантов и студентов «Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых» (Донецк, ДОННТУ, 2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г.), XVIII и XIX Международных

молодёжных научных конференциях «Севергеоэкотех» (Ухта, УГТУ, 2017 г., 2018 г.), VI и IX Международных научно-практических конференциях «Наука, техника, инновации» (Усинск, филиал УГТУ, 2016 г., 2019 г.), заседании круглого стола по теме «Новые способы и средства обеспечения безопасности применения электрической энергии в шахтах» (ГУ «МакНИИ», 2019 г.) в рамках V Международного научного форума ДНР «Инновационные перспективы Донбасса: инфраструктурное и социально-экономическое развитие»; Международном научно-практическом форуме «Россия в XXI веке: глобальные вызовы, риски и решения» (Москва, РАН, 2019 г.); XVII Всероссийской конференции молодых учёных, аспирантов и студентов «Информационные технологии, системный анализ и управление» (Таганрог, ЮФУ, 2019 г.).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 17 печатных работах, из них, 6 – в специализированных научных изданиях, рекомендованных МОН ДНР, 11 – в материалах конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 разделов, общих выводов, изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 106 рисунков, 10 таблиц, список использованной литературы из 98 наименований и 3 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, определяющие научное и практическое значение результатов исследований.

В первом разделе рассмотрены особенности устройства и функционирования ЭТК участков шахты в диалектике расширения функциональности их оборудования, в т.ч., средств защиты от аварийных и опасных состояний. Проанализированы причины и факторы электротравматизма человека связанные с эксплуатацией гибких кабелей.

Проанализированы процессы, обусловленные формированием обратных ЭДС АД в процессе выбега и их воздействием на функциональные компоненты ЭТК в части поддержания опасных состояний в местах повреждения кабелей после защитного отключения напряжения, подаваемого от ТП участка.

Обоснована актуальность исследований в области поиска эффективного способа подавления обратных ЭДС АД в режиме выбега, позволяющего обеспечить параметры безопасности эксплуатации ЭТК в процессе и после защитного отключения в соответствии с нормируемыми показателями и принятыми критериями. В качестве перспективного направления определён способ воздействия на обратную ЭДС АД управлением его электромагнитными параметрами. Сформированы цель и задачи диссертационных исследований.

Второй раздел посвящен вопросам исследования свойств различных способов управления электромагнитными параметрами АД применительно к процессу подавления обратной ЭДС АД в режиме выбега, Исследован способ

воздействия на параметры обмотки статора АД формированием контура повышенного тока в дополнительной обмотке статора, в т.ч., применительно к двухскоростному АД – в отключенной от сети второй обмотке статора. В последнем случае учтено различие количества полюсов обмоток статора двухскоростного АД.

С целью определения тенденции влияния на параметры обратной ЭДС АД был применён обобщённый метод исследования, в последующем выполнен уточнённый анализ процессов.

В первом случае АД, снабженный дополнительной обмоткой статора, представляется многообмоточным трансформатором, активные и магнитные компоненты которого коммутируются с заданными частотой и скважностью. Результат позволил установить количественные показатели воздействия цепи к.з. трансформаторной ЭДС в дополнительной (не подключенной к сети) обмотке статора АД на параметры обратной ЭДС рабочей обмотки статора в режиме выбега (Рисунок 1).

Математическая модель процессов при подавлении обратных энергетических потоков электрических машин получила развитие применительно к конструкции и параметрам двухскоростного АД. Модель процесса формирования ЭДС в отключенной от сети обмотке статора учитывает взаимное влияние магнитных потоков ротора и рабочей обмотки статора, отличается учётом возмущающих факторов на интервале свободного выбега и позволяет установить характер изменения и численные значения параметров ЭДС рабочей обмотки статора в зависимости от величины тока отключенной от сети обмотки статора при её закорачивании. Результаты в совокупности достаточны для расчёта количественных показателей энергетических параметров в точке повреждения кабеля силового присоединения АД и установления степени опасности обратной ЭДС АД в области электропоражения человека.

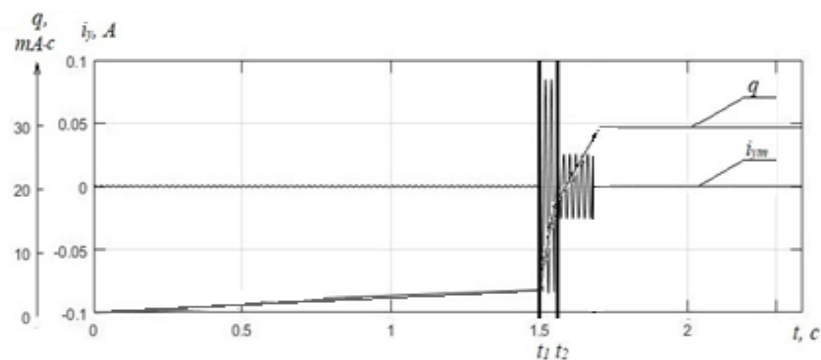


Рисунок 1 – Диаграммы изменения величины тока утечки на землю, мА ; q – количество электричества, $\text{мА}\cdot\text{с}$; t_1 – начало аварийного процесса; t_2 – момент создания к.з. в дополнительной обмотке

Переходный процесс в АД описывается дифференциальным уравнением, где учитываются составляющие потокосцеплений и углы поворота ротора θ :

$$\frac{d\bar{\psi}_{AD}}{dt} = \bar{F}_{AD} \cdot \bar{\psi}_{AD} + \bar{G}_{AD} \cdot \bar{S}_{AD} + \bar{H}_{AD} \cdot \bar{U}_{AD}$$

где $\bar{\psi}_{AD} = [\psi_{s\alpha} \ \psi_{s\beta} \ \psi_{r\alpha} \ \psi_{r\beta} \ \omega \ \theta]^T$ – вектор переменных состояний; \bar{G}_{AD} , \bar{H}_{AD} – матричные константы; $\bar{S}_{AD} = [-\omega\psi_{r\beta} \ \omega\psi_{r\alpha} \ (M_e - M_c)/J]^T$ – вектор соотношений между переменными состояниями; $\bar{U}_{AD} = [u_{AB} \ u_{BC} \ u_{CA}]^T$ – вектор линейных напряжений статора; $\bar{F}_{AD} = \bar{R} \cdot \bar{M}^{-1}(\theta)$, причем \bar{R} матрица, учитывающая сопротивления контуров статора и ротора; $\bar{M}^{-1}(\theta)$ – матрица, обратная к матрице индуктивностей $\bar{M}(\theta)$ АД.

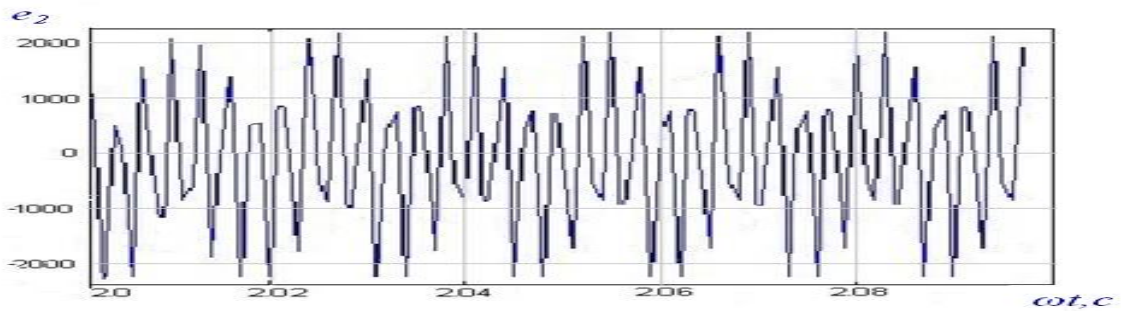


Рисунок 2 - Диаграммы величин ЭДС в отключенной обмотке фазы статора двухскоростного асинхронного двигателя АДВК-355LA12/4

Определенные таким образом ЭДС пазовых проводников суммируются (с учётом схемы соединения обмотки), что позволяет определить параметр ЭДС e_2 , индуктируемой в каждой фазе отключенной обмотки (Рисунок 2).

Полученный параметр позволяет определить, как величину тока в цепи утечки на землю, так и количество электричества в этой цепи. Моделированием воздействия на процессы эффекта закорачивания цепи отключенной обмотки статора двухскоростного АД установлена возможность сокращения продолжительности существования обратной ЭДС рабочей обмотки статора на интервале выбега (Рисунок 3). Это позволяет рассматривать потенциальную возможность способа в контексте ограничения электропоражающего фактора (количества электричества) в цепи утечки тока на землю,

В контексте решения задачи ограничения величины обратной ЭДС АД на уровне, не допускающем возникновения опасности электротравматизма в структуре ЭТК участка шахты во время и после отключения напряжения питания установлена функциональная недостаточность закорачивания дополнительной обмотки статора АД. Это обусловило необходимость исследования способа воздействия на электрические параметры АД посредством индукционно-динамического торможения (ИДТ) ротора (в предположении функциональной зависимости ЭДС вращения АД от интенсивности замедления ротора).

Составляющие структуру модели основные функциональные зависимости представлены выражениями:

$$i_T(t) = e^{-t/T_H} \left[C + \int_{t_H}^{t_k} \left(\frac{u(t)}{L_H} \right) e^{-t/T_H} dt \right]$$

где $T_H = L_H / R_H$ – постоянная времени цепи нагрузки (АД); $C = U(t_H) / Z_H$; t_H и t_k – моменты начала и окончания соответствующего интервала протекания тормозного тока.

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

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.

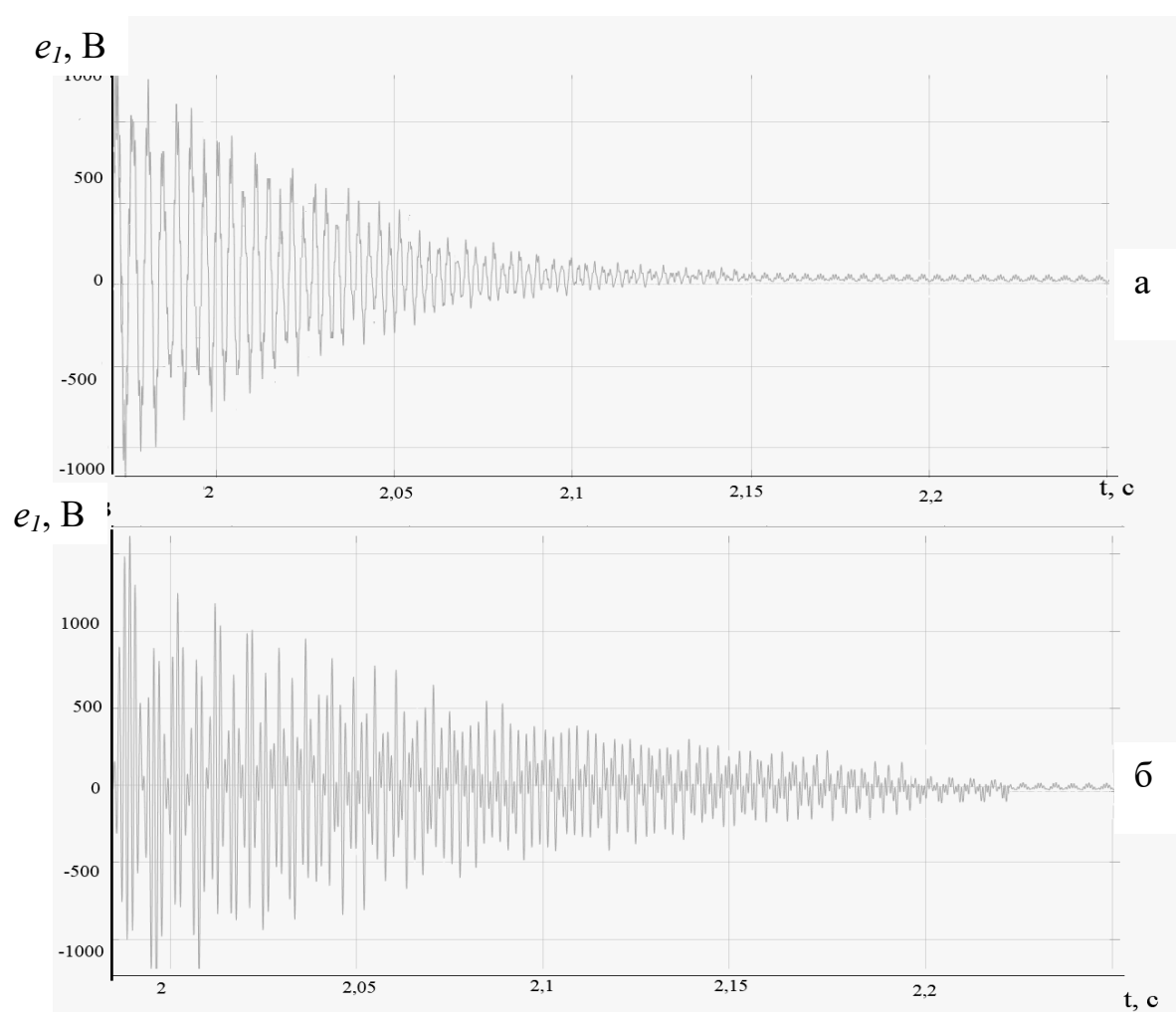


Рисунок 3 - Диаграммы величин формирования обратных ЭДС в обмотке W1 статора двухскоростного АД: а – с учетом замыкания цепи обмотки W2 статора; б – без учёта замыкания цепи обмотки W2 статора

Это выражение позволяют установить степень воздействия процесса на параметры электробезопасности в цепи утечки тока на землю (Рисунок 4).

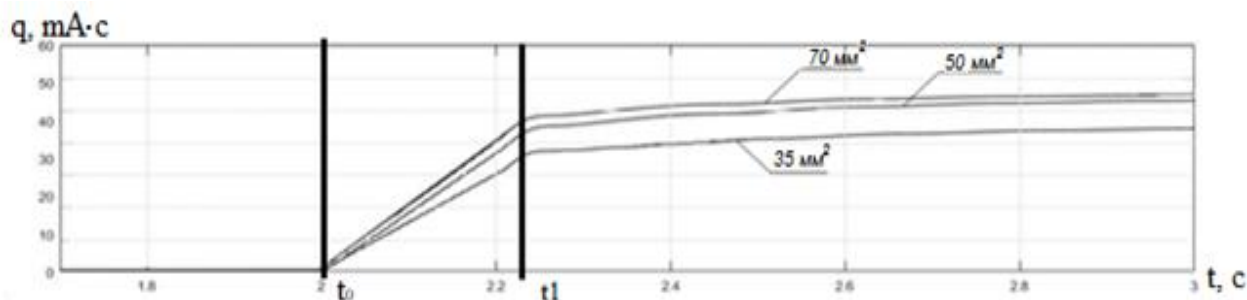


Рисунок 4 - Диаграммы величин накопления количества электричества через сопротивление цепи утечки тока на землю ($R_{ym} = 1$ кОм) применительно к фрагменту электросети с кабелем марки КГЭШ длиной 200 м и сечением 3х35 мм², 3х50 мм² и 3х70 мм² при использовании ИДТ и величине угла отпирания тиристора VS1 $\alpha = 45$ эл. град. (t_0 – начала аварийного процесса; t_1 – начало ИДТ)

Таким образом, получил развитие метод моделирования процессов в АД в контексте установления параметров эффективности подавления обратной ЭДС на интервале выбега (торможения) путём управления параметрами электромагнитного состояния АД.

В третьем разделе проведен анализ степени эффективности рассмотренных способов управления электромагнитным состоянием АД, реализуемых в процессе подавления обратной ЭДС, в контексте обеспечения безопасного состояния ЭТК участка шахты после защитного отключения напряжения питания. Проанализирована схема электропоражения человека, включая состояние – после отключения напряжения питания сети. Определены величины электропоражающего фактора в условиях применения кабелей разной длины и сечения и разной мощности двигателей? в сетях напряжения 660 В и 1140 В. Установлена возможность достижения электробезопасного состояния ЭТК участка шахты применением ИДТ АД в момент выявления утечки тока на землю и до остановки ротора АД.

Четвёртый раздел посвящён постановке экспериментальных исследований процессов при управляемой коммутации обмоток АД в контексте решения задачи обеспечения безопасных состояний шахтных ЭТК в процессе и после их отключения от источника электропитания. Выполнены эксперименты на стендах, созданных для исследования процессов подавления обратной ЭДС в двухскоростном АД закорачиванием отключенной обмотки статора (Рисунок 5), а также односкоростного АД - индукционно-динамическим торможением его ротора (Рисунок 6).

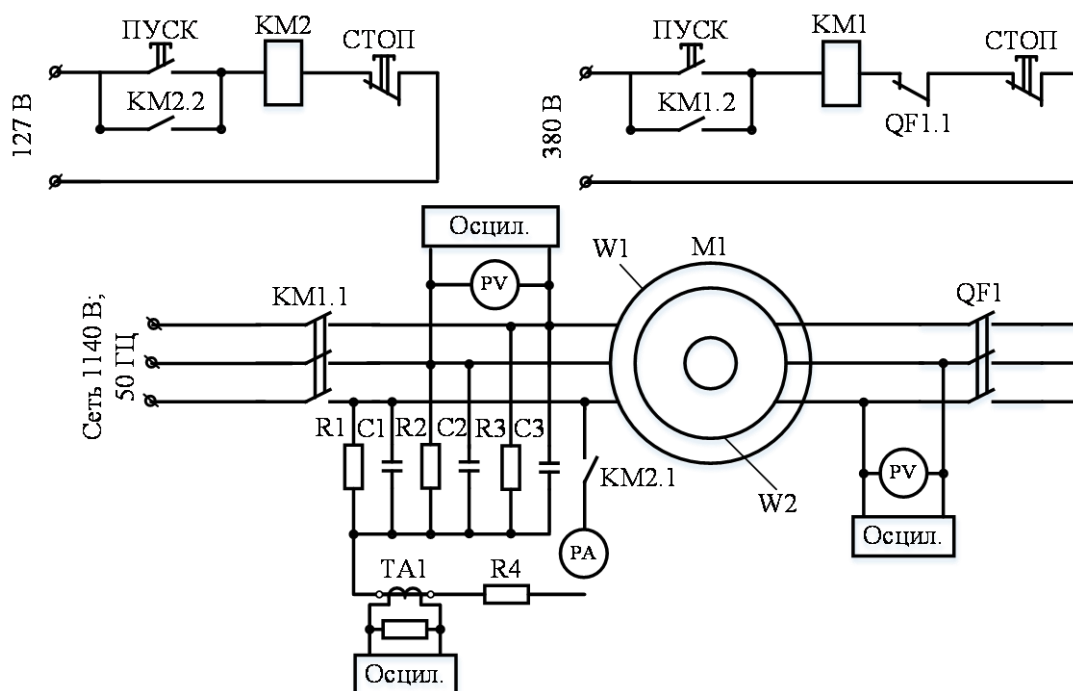


Рисунок 5 – Структура стенда для исследования процесса подавления обратной ЭДС двухскоростного АД методом закорачивания отключенной обмотки статора

Экспериментами подтверждена достоверность результатов математического и компьютерного моделирования:

- наличие потенциально опасной (по фактору электропоражения человека) величины ЭДС в отключенной от сети обмотке статора работающего двухскоростного АД;

- эффект интенсивности снижения ЭДС вращения статора двухскоростного АД в режиме выбега при закорачивании отключенной от сети второй обмотки статора, а также его функциональная недостаточность в части обеспечения безопасного состояния электрической сети участка шахты после защитного отключения напряжения питания;

- показатели продолжительности и интенсивности снижения обратной ЭДС АД в процессе ИДТ ротора (Рисунок 7).

Установлены функциональные зависимости (Рисунок 8), отражающие взаимосвязь интенсивности снижения ЭДС, величины тока в цепи утечки от параметра проводимости (отпирания) ключей проводимости тока цепи ИДТ АД. Подтверждена возможность эффективного использования данного режима как при размещении коммутационного устройства, создающего эффект индукционно-динамического торможения АД, как со стороны ТП участка, так и при его подключении непосредственно к вводам статора электродвигателя потребителя.

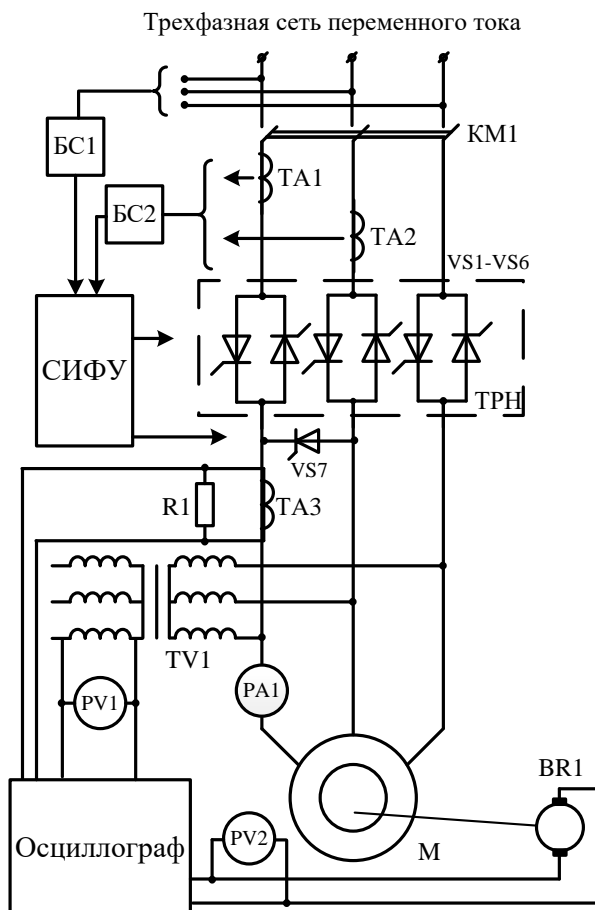


Рисунок 6 – Типовая схема реализации режима ИДТ АД на основе применения трёхфазного тиристорного регулятора напряжения

Пятый раздел посвящён разработке технических решений в области реализации результатов диссертационных исследований. Обоснована структура устройства (Рисунок 9), реализующего способ выявления утечки тока на землю, состоящий в формировании цепи импульса оперативного тока путём присоединения к фазам сети через точку нулевого потенциала источника напряжения постоянного тока (VD1-VD6), подключенного выходом к заземляющему проводнику через диодно-ёмкостную цепь (C5 - C6 - VD7) с целью формирования информационного импульса напряжения (на R4) в момент появления утечки тока на землю, включая синхронную утечку тока трёх фаз. Это создаёт возможность контроля состояния изоляции электротехнического комплекса участка шахты техническим средством со стороны подключения статора АД потребителя, не связанным функционально с устройством защиты, действующим со стороны участковой ТП.

Представлены технические решения в области практической реализации способов подавления обратных энергетических потоков АД в процессе защитного обесточивания шахтного участкового ЭТК.

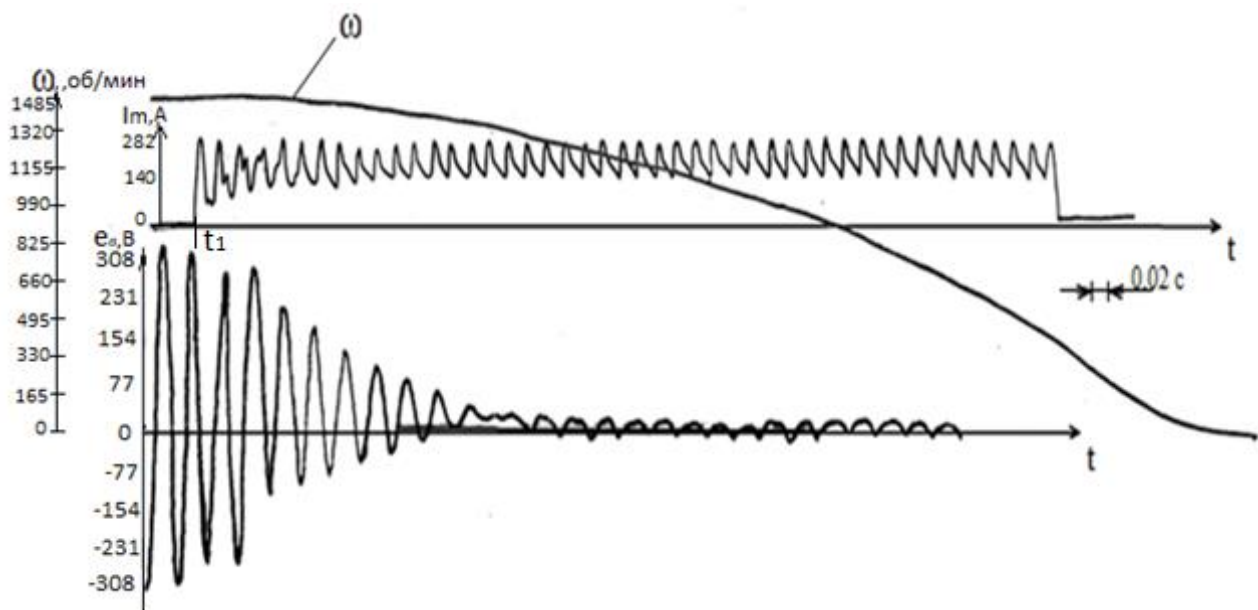


Рисунок 7 – Осциллограммы тока статора, ЭДС вращения ротора и скорости асинхронного двигателя КОФ-32 при ИДТ ($\alpha = 100$ эл. град.)

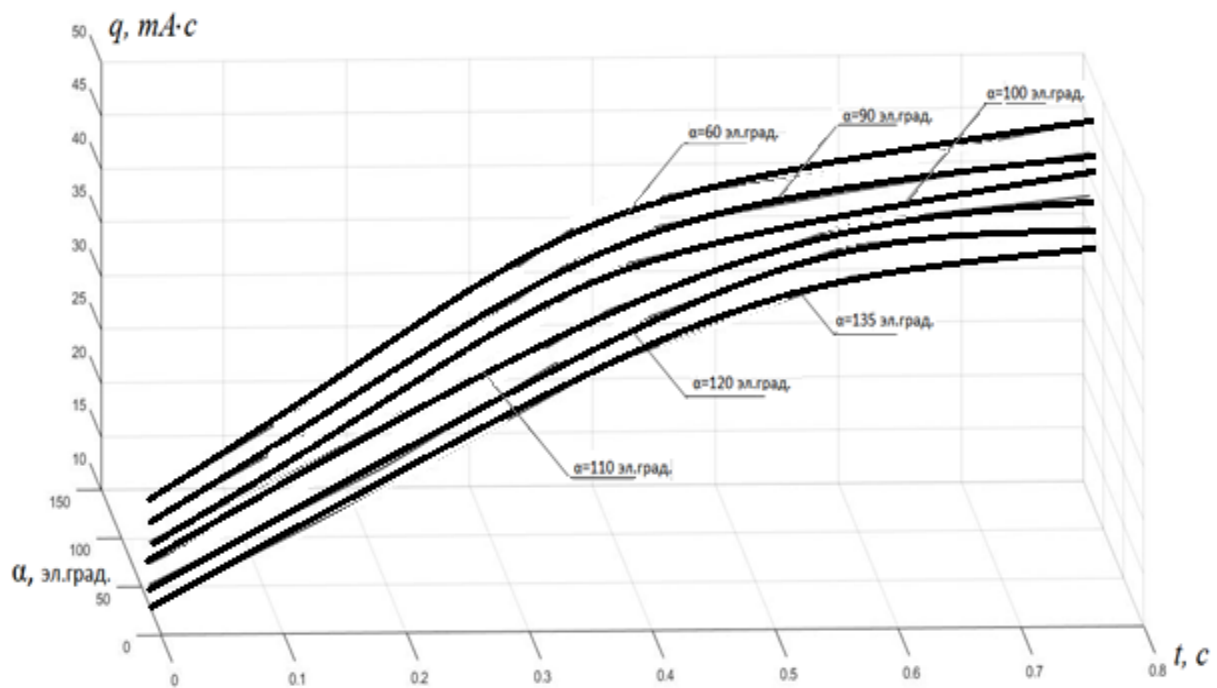


Рисунок 8 – График величин накопления количества электричества в цепи утечки тока на землю при ИДТ ($\alpha = 60 \div 135$ эл. град)

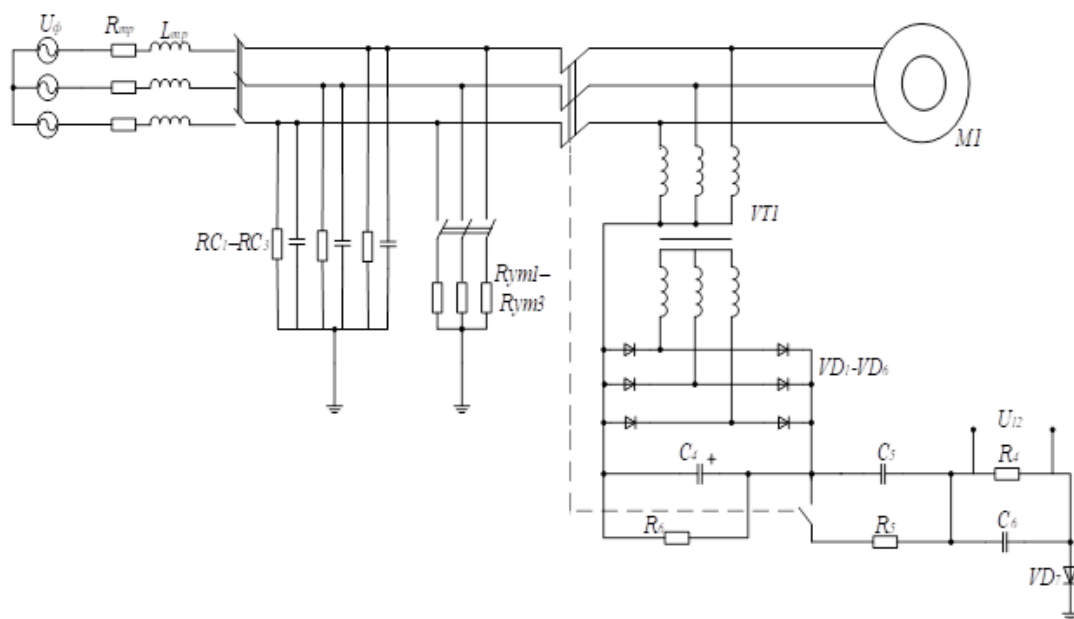


Рисунок 9 – Схема состояния электрической сети питания асинхронного двигателя в случае выявления мгновенного трёхфазного замыкания на землю универсальным устройством контроля со стороны присоединений статора

ВЫВОДЫ

Повсеместное применение в структуре ЭТК участков шахт электрооборудования с АД высокой мощности сопряжено с формированием факторов опасности электротравматизма, обусловленных действием обратных ЭДС после защитного отключения напряжения электропитания. Существующие методы и средства в области обеспечения безопасности эксплуатации шахтных участковых ЭТК реализуют функцию автоматического защитного отключения напряжения и не предусматривают воздействия на параметры обратных ЭДС АД потребителей, переходящих в режим выбега. В связи с этим, научную и практическую актуальность приобретает задача быстросействующего защитного обесточивания шахтного участкового ЭТК на основе подавления обратных ЭДС АД потребителей.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в обеспечении безопасных режимов работы шахтных участковых электрических сетей на основе ограничения электрогенерирующей функции асинхронных двигателей потребителей в процессе отключения путём управления параметрами их обратных ЭДС.

Основные научные и практические результаты работы состоят:

- в совершенствовании методов математического моделирования процессов в ЭТК участка шахты, в частности, методов моделирования процесса воздействия на величину обратной ЭДС управлением электромагнитными параметрами АД, включая специфику электромагнитной системы двухскоростного двигателя, а также применение способа представления АД

многообмоточным трансформатором с управляемой коммутацией его электрических и магнитных компонентов;

- обосновании приемлемости применения индукционно-динамического торможения АД как средства предотвращения опасности электропоражения в сети участка шахты после её защитного отключения в связи с возникновением утечки тока на землю;

- в разработке технических решений в области подавления обратных ЭДС АД на интервале выбега в контексте обеспечения безопасного состояний ЭТК участка шахты после защитного отключения напряжения питания;

- усовершенствовано устройство выявления аварийного состояния кабеля электропитания АД в структуре ЭТК участка шахты, функционирующее автономно и отличающееся наличием структуры, обеспечивающей реакцию на одновременный мгновенный контакт трёх фаз сети с контуром «земля».

Результаты диссертационного исследования приняты ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищённого и рудничного электрооборудования» (ГУ НИИВЭ, г. Донецк) к использованию в профильных научно-исследовательских работах и внедрены в учебный процесс в ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Министерством образования и науки Российской Федерации:

1. Дубинка, Е.С. Управление электромагнитным состоянием асинхронной машины как способ ограничения параметров обратного энергетического потока [Электронный ресурс] / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – Режим доступа: <https://vestnik.susu.ru/power/article/view/7295>. – Загл. с экрана.

- в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Министерством образования и науки ДНР:

2. Маренич, К.Н. Двухскоростной асинхронный двигатель как объект реализации функции защитного подавления обратного энергетического потока [Электронный ресурс] / К.Н. Маренич, Е.С. Дубинка // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- Вып 3(17). – Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/03/marenich.pdf> .- Загл. с экрана.

3. Дубинка, Е.С. Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ ограничения энергетического воздействия на шахтную электрическую сеть в процессе защитного отключения [Электронный ресурс] / Е.С. Дубинка // Вестник Донецкого национального технического университета.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- Вып. 2(16).– Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2019/02/dubinka.pdf>.- Загл. с экрана.

4. Маренич, К.Н. Эволюция технических решений задачи подавления обратных энергетических потоков асинхронных двигателей [Электронный ресурс] / К.Н. Маренич, **Е.С. Дубинка** // Вестник Донецкого национального технического университета. -Донецк: ДОННТУ, 2018.- Вып. 2(12). – Режим доступа: <http://vestnik.donntu.org/dl/2018/02/dubinka.pdf>.- Загл. с экрана.

5. Маренич, К.Н. Техническая реализация двустороннего обесточивания мгновенного трехфазного короткого замыкания как способ повышения безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети / К.Н. Маренич, **Е.С. Дубинка** // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – Вып. 2 (18). – С. 101-105.

6. Маренич, К.Н. Подавление обратного энергетического потока асинхронного двигателя как фактор повышения электробезопасности электротехнического комплекса [Электронный ресурс] / К.Н. Маренич, **Е.С. Дубинка** // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения, 2018. № 2 (12).- – Режим доступа: <http://resteo.ru/marenich-12/>.- Загл. с экрана.

- в других изданиях:

7. **Дубинка, Е.С.** Анализ технических возможностей подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя / Е.С. Дубинка, И.В. Ковалёва // Взрывозащищенное электрооборудование: сб. науч. тр. ГУ "НИИВЭ". - Донецк: ООО "Типография Восток Пресс", 2017. – Вып. 1(52). - С.66 -72.

8. **Дубинка, Е.С.** Новые технические решения в области повышения ресурса и безопасности эксплуатации электрооборудования технологического комплекса участка шахты / Е.С. Дубинка, О.К. Маренич // Актуальные эколого-политологические аспекты современности : научно-практическая конференция (в рамках междунар. науч.-практ. форума "Россия в 21 веке: глобальные вызовы, риски и решения", г. Донецк, 28 февр. - 4 апр. 2019 г.) : сб. науч. тр. конф.- Донецк: ДОННТУ, 2019.- С 51-53.

9. **Дубинка, Е.С.** Исследование переходных процессов в элементе сложной электромагнитной системы при искусственном создании токовой перегрузки в контексте создания устройства защиты / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVI междунар. науч.-техн.конф., 25-26 мая 2016 г.: материалы конф. - Донецк, ДОННТУ, 2016. – 341 с.

10. **Дубинка, Е.С.** Исследование свойств виткового замыкания многообмоточного трансформатора в контексте воздействия на его энергетические характеристики / Е.С.Дубинка // VI междунар. научн.-техн. конф., 22 апреля 2016 г., материалы конф.- Усинск, УФ УГТУ, 2016.- С.66-68

11. **Дубинка, Е.С.** Управление процессами в асинхронном двигателе как способ подавления обратного энергетического потока в процессе выбега / Севергеоэкотех-2017: XVIII междунар. молодёжная науч. конф., 12-14 апреля 2017 г.: материалы конф. – Ухта, УГТУ, 2017.- Ч.1.- С. 16-18.

12. **Дубинка, Е.С.** Анализ технической возможности процесса подавления обратного энергетического потока электрической машины методом воздействия на электромагнитные параметры / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVII междунар. науч.-техн.конф., 24-25 мая 2017 г. : материалы конф. - Донецк, ДОННТУ, 2017. - С. 108-112.

13. **Дубинка, Е.С.** Принцип моделирования процесса формирования ЭДС отключенной обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XV междунар. науч.-техн.конф., 20-22 мая 2015 г.: материалы конф. - Донецк, ДОННТУ, 2015. – С. 65-69.

14. **Дубинка, Е.С.** Использование конструкции двухскоростного двигателя как базы эксперимента по ускоренному подавлению энергетических потоков / Е.С. Дубинка // Севергеоэкотех-2018: XIX междунар. молодёжная науч. конф., 21-23 марта 2018 г.: материалы конф. – Ухта, УГТУ, 2019.-Ч1.- С. 16-18.

15. **Дубинка, Е.С.** Индукционно-динамическое торможение асинхронного двигателя как способ подавления обратного энергетического потока в случае аварийного отключения сети / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVIII междунар. науч.-техн. конф., 22-24 мая 2018 г.: материалы конф.- Донецк, ДонНТУ, 2018. С. 166-169.

16. **Дубинка, Е.С.** Применение индукционно-динамического торможения как способа подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя / Е.С. Дубинка // Наука, техника, инновации: IX междунар. науч.-практ. конф., 25 апр. 2019 г., материалы конф.- Усинск, УФ УГТУ, 2019.- 5с.

17. **Дубинка, Е.С.** Автоматическое подавление обратного энергетического потока асинхронного двигателя – комплексное решение задачи защитного обесточивания электросети участка шахты / / Е.С. Дубинка, К.Н. Маренич // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XIX междунар. науч.-техн. конф., 21-23 мая 2019 г. материалы конф. - Донецк, ДОННТУ, 2019. - С. 95-98.

В публикациях, написанных в соавторстве, личный вклад Дубинки Е.С. заключается в следующем: [1] – обоснование структуры модели исследования технических возможностей процесса управления электромагнитными параметрами асинхронного двигателя; [2] – моделирование процесса управления электрическими параметрами отключенной обмотки статора двухскоростного асинхронного двигателя при его переходе в режим выбега; [4] – обоснование рациональности применения процесса индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя в контексте применения в качестве решения задачи подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя; [5; 17] – обоснование технических решений реализации способа двустороннего обесточивания места повреждения кабеля

электропитания АД; [6; 7] – обоснована принципиальная возможность подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя в режиме выбега за счет закорачивания дополнительной статорной обмотки; [8] – обоснование концепции реализации подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя как меры повышения безопасности эксплуатации электротехнических комплексов шахт; [9; 12] – математическое моделирование переходных процессов в элементе сложной электромагнитной системы; [13, 14] – обоснование концепции подавления обратных энергетических потоков асинхронных машин методом воздействия на их электромагнитные параметры на примере двухскоростного асинхронного двигателя; [15] – разработка схемы моделирования процесса индукционно-динамического торможения асинхронного двигателя.

АННОТАЦИЯ

Дубинка Е.С. Обеспечение безопасных режимов работы шахтных электрических сетей на основе управления параметрами обратных ЭДС электропотребителей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки). – ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», Донецк, 2019.

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача достижения безопасного состояния электротехнического комплекса участка шахты после защитного отключения напряжения питания на основе применения научно-обоснованных методов подавления обратных ЭДС асинхронных двигателей потребителей.

На основании развития методов математического и компьютерного моделирования исследованы процессы, обусловленные воздействием обратной ЭДС асинхронного двигателя в режиме выбега на элементы ЭТК участка шахты и установлены условия поддержания электрических параметров, представляющих опасность эксплуатации силового электрооборудования участка шахты после защитного отключения напряжения электропитания.

Исследованы способы подавления обратной ЭДС асинхронного двигателя, методом создания контура повышенного тока в дополнительной обмотке статора (включая способы коммутации отключенной от сети обмотки статора двухскоростного двигателя), а также методом перевода АД в режим индукционно-динамического торможения.

Установлены приемлемые параметры процесса воздействия на обратную ЭДС АД удовлетворяющие критериям безопасности эксплуатации ЭТК участка шахты. Разработаны схемные решения реализации результатов исследований.

Ключевые слова: шахта, электротехнический комплекс, электробезопасность, защитное отключение, асинхронный двигатель, обратная ЭДС, электро-магнитные параметры., управление, индукционно-динамическое торможение, исследование, эксперимент

ABSTRACT

Dubinka Ye. S. Maintenance of safe operating modes of mines electric networks on the basis of control of parameters of reversed EMF of electric consumers – Manuscript.

Ph.D. (Candidate's) Thesis in Engineering Science by speciality 05.26.01 -

Labor protection and safety (by industry) (engineering science). - DONETSK NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY, Donetsk, 2019.

In the dissertation, the urgent scientific and technical problem of achieving the safe state of the electrical complex of the mine section after a protective disconnection of the supply voltage based on the use of scientifically-based methods for suppressing the back EMF of consumer induction motors was solved.

Based on the development of methods of mathematical and computer modeling, the processes caused by the inverse EMF of an induction motor in the run-out mode on the elements of the mine section ETC are investigated and the conditions for maintaining electrical parameters that are dangerous for the operation of the power electrical equipment of the mine section after a protective power outage are established.

Methods of suppressing the reverse EMF of an asynchronous motor are investigated, by creating a high current circuit in the additional stator winding (including switching methods of a two-speed motor disconnected from the mains stator winding), as well as by switching the asynchronous motor to the induction-dynamic braking mode.

Acceptable parameters of the process of impact on the reverse EMF of the blood pressure are established that meet the safety criteria for the operation of the ETC of the mine section. Design solutions for the implementation of research results have been developed.

Keywords: mine, electrical complex, electrical safety, protective shutdown, induction motor, reverse EMF, electro-magnetic parameters, control, induction-dynamic braking, research, experiment