

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВУСТОРОННЕГО ОБЕСТОЧИВАНИЯ ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНЫХ СРЕДСТВ ВЫЯВЛЕНИЯ ЕЕ АВАРИЙНОГО СОСТОЯНИЯ**

*Разработан экспериментальный стенд и экспериментальный образец автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при повреждении его питающего кабеля. Проанализированы результаты экспериментальных исследований.*

**Ключевые слова:** *экспериментальный стенд, двустороннее обесточивание, адекватность математической модели, математическое ожидание, автономные технические средства.*

### **Постановка проблемы**

Нестационарность технологического оборудования в процессе эксплуатации шахтного участка определяет необходимость применения разветвленной сети гибких кабелей (ГК). При этом в условия горного производства существует повышенная опасность механического повреждения кабелей, что, в свою очередь, является причиной возникновения таких опасных аварийных состояний участковой электросети, как однофазная утечка тока на землю и междуфазные короткие замыкания (к.з.). Существующие средства максимальной токовой защиты отключают место замыкания от источника электропитания со стороны участковой трансформаторной подстанции (ТП) и характеризуются достаточным быстродействием. Опережающую защитную функцию выполняет также участковый аппарат защиты от утечек тока на землю в случае, если повреждение экранированного шахтного кабеля начинается с повреждения изоляции одной из силовых жил. Однако после защитного отключения сети электротехнического комплекса (ЭТК) от источника электропитания опасное аварийное состояние некоторое время может поддерживаться обратными энергетическими потоками асинхронных двигателей (АД), которые были включены в аварийном присоединении. Эта проблематика требует отдельного исследования с целью создания автономных технических средств защитного отключения обратных энергетических потоков асинхронных двигателей при возникновении аварийного состояния электротехнического комплекса. Их применение позволит избежать поддержания

тока в цепи короткого замыкания после защитного отключения электросети, а также значительно упростить структуру средств защиты от утечек тока на землю путем отказа от функции определения и последующего шунтирования на землю поврежденной фазы.

### **Анализ исследований и публикаций**

Исследования процессов в шахтных участковых электротехнических комплексах при возникновении опасных состояний касаются обоснования технических решений обесточивания места повреждения кабеля путем отключения энергетического потока, направленного от трансформаторной подстанции [1...3]. Кроме того, в результате проведенных теоретических исследований была разработана математическая модель электротехнического комплекса технологического участка шахты, описывающая процессы в его структурных составляющих в момент возникновения и дальнейшего протекания аварийных состояний междуфазной проводимости и утечки тока на землю с учетом влияния обратных энергетических потоков ранее включенных асинхронных двигателей потребителей и параметров цепи устройства их отключения [4,5]. Однако для проверки адекватности разработанной математической модели реальным процессам в ЭТК технологического участка горного предприятия возникает необходимость в проведении экспериментальных исследований.

### **Цель исследования**

Целью экспериментальных исследований является экспериментальная проверка и

подтверждение адекватности результатов, полученных при проведении теоретических исследований, а также анализ возможностей автономного устройства защиты относительно обеспечения приемлемых технических показателей подавления обратного энергетического потока АД при возникновении аварийного состояния в его питающем кабеле.

**Результаты исследования**

На основе результатов и рекомендаций, полученных при проведении теоретических исследований, обоснована структура и изготовлен исследовательский экспериментальный стенд и экспериментальный образец автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при повреждении его питающего кабеля, расположенный в лаборатории рудничного электрооборудования кафедры «Горная электротехника и автоматика им. Р.М. Лейбова» ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет». Это устройство имеет рудничное исполнение и адаптировано к применению в условиях шахты.

На рис. 1 приведена принципиальная схема исследовательского стенда, рассчитанного на номинальное линейное напряжение сети

$U_{л1}=380$  В, имитирующего функционирование участкового электротехнического комплекса напряжением  $U_{л2}=660$  В (режим нейтрали – изолированный).

Силовая часть экспериментального стенда состоит из: коммутационных аппаратов SF1 (АЕ-2056-10 0-00У3.УХЛ4-А) и SF2 (Moeller AK51F PL4-C63/3); резисторов  $R_A - R_C$  (МЛТ-1-1М±5%) и конденсаторов  $C_A - C_C$  (МБГЧ-1 0,25мкФ±10%), которые подключены между фазами сети и общей шиной «искусственная земля», имитируя параметры изоляции гибкого кабеля участкового ЭТК; коммутационного аппарата KM1 (ПМА-3102 У4), который включает асинхронный двигатель типа ВАО-51-4У2 мощностью 7,5 кВт; аппарата защиты от утечек тока на землю типа АЗУР.1, выходные цепи управления которого подключены к независимому расцепителю PH (Moeller AK68B ZP-ASA/230) коммутационного аппарата (автоматического выключателя) SF2; экспериментального образца устройства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя. Между фазой А и шиной «искусственная земля» подключена цепь замыкания фазы на землю, которая состоит из тумблера ТУ и магазина сопротивлений М.С. (Р33 класс 0,2).

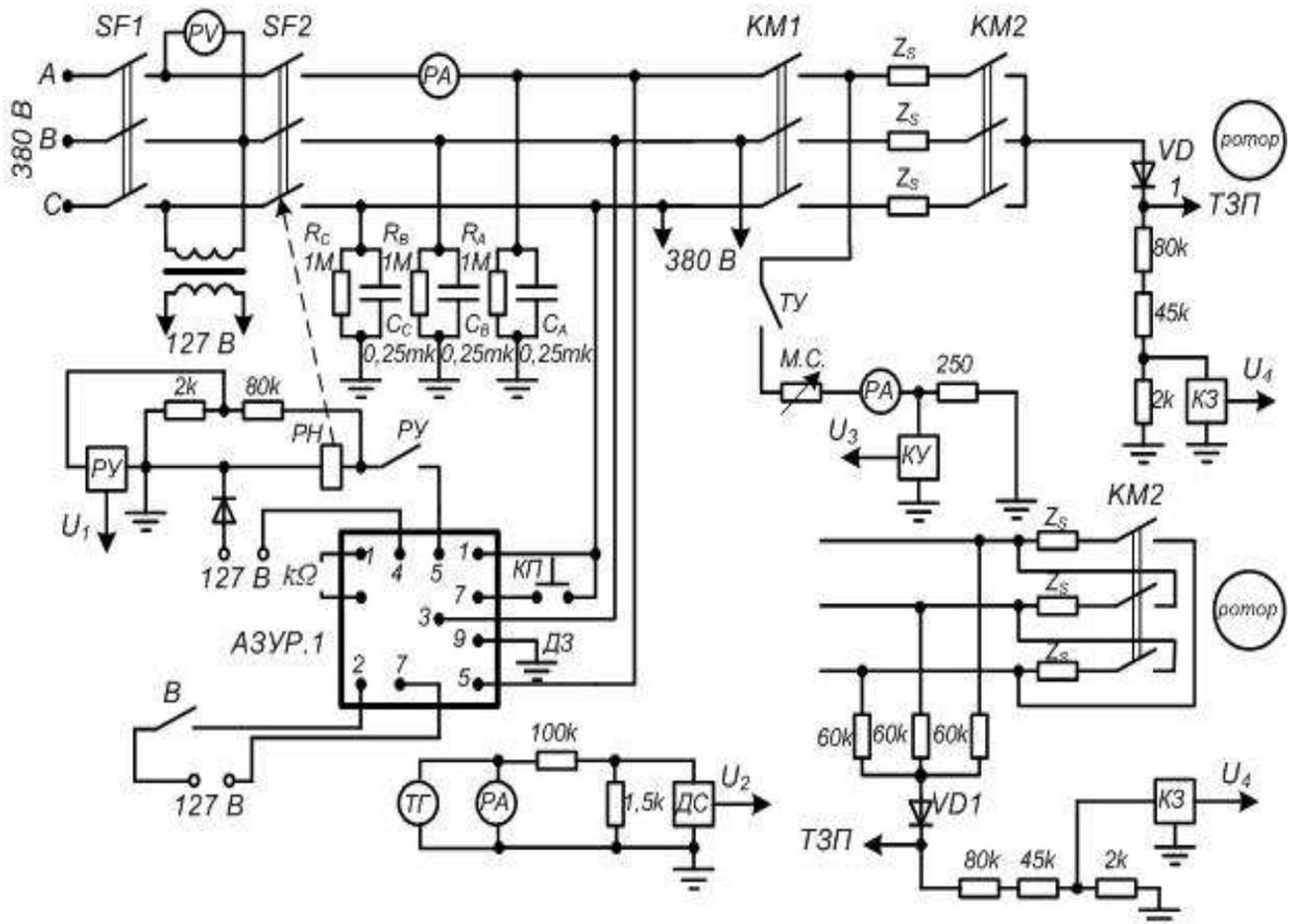


Рис. 1. Принципиальная схема исследовательского стенда

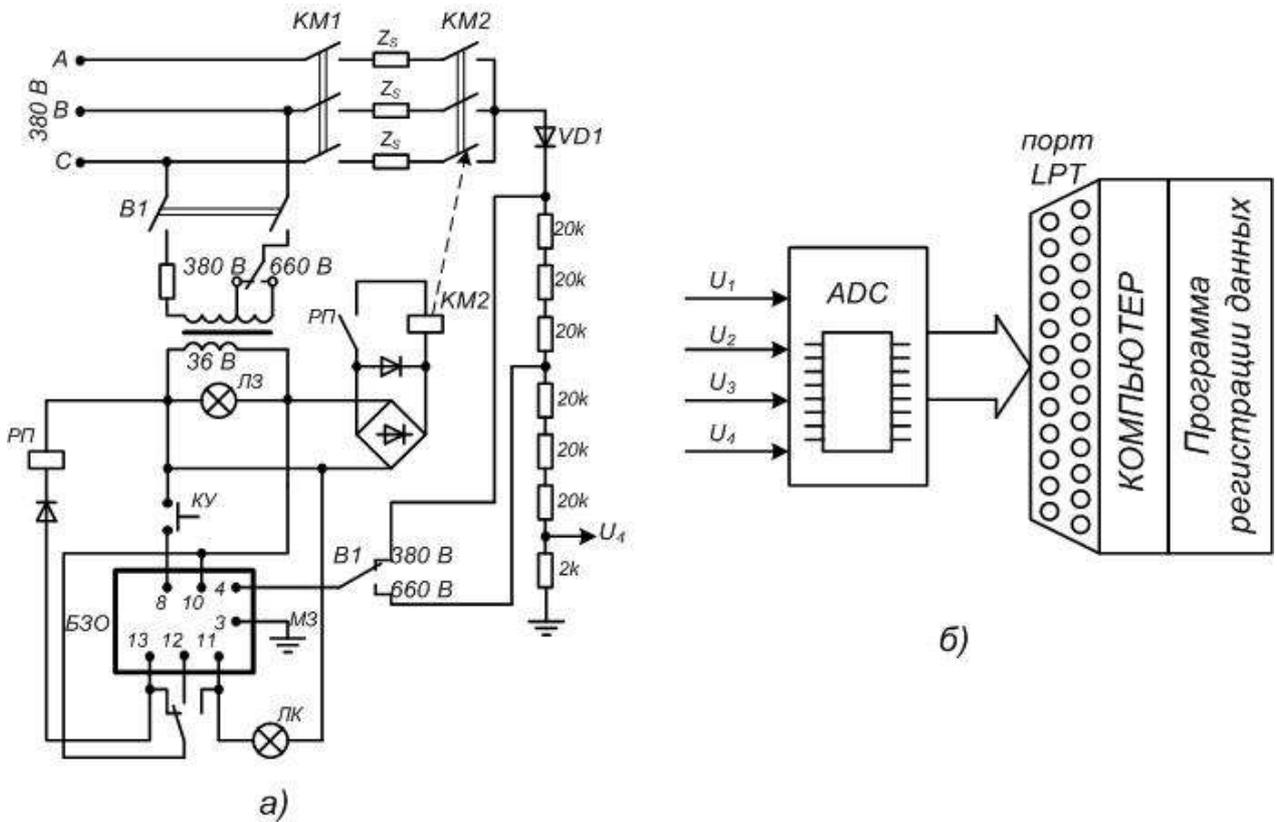


Рис. 2. Принципиальная схема экспериментального образца автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока АД (а) и функциональная схема системы регистрации данных (б)

Схема экспериментального образца автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя (рис. 2а) состоит из коммутационного аппарата *KM2* (КРМ), коммутирующего схему его статора, общая точка которого подключена к шине «искусственная земля» через полупроводниково-резистивную цепь *VD1-R*. Сигнал по напряжению от этой цепи поступает в блок определения информационного параметра полупроводниково-резистивную цепи (блока защитного отключения БЗО). Схема последнего выполнена на основе адаптации схемы серийного блока токовой защиты от перегрузки ТЗП [6] путем исключения из его состава каналов моделирования экспонента нагрева двигателя потребляемым током. Выходные цепи БЗО подключены к схеме управления коммутационного аппарата *KM2*. Переключатель *B1* предназначен для выбора уровня напряжения сети (380/660 В).

Система регистрации данных в комплексе с персональным компьютером (рис. 2б) позволяет фиксировать осциллограммы с измерительных датчиков напряжения в памяти персонального компьютера.

Для измерения электрических параметров в контрольных точках (сигнал о срабатывании АЗУР.1  $U_1$ , сигнал от датчика скорости ДС  $U_2$ , ток в аварийной цепи  $U_3$ , ток в измерительной цепи аппарата защиты  $U_4$ ) в составе исследовательского стенда предусмотрены делители напряжения, предназначенные для снижения амплитуды сигнала до величины, согласованной с параметрами аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Микроконтроллер блока АЦП по очереди опрашивает каждый из датчиков и передает снятые сигналы на параллельный порт персонального компьютера, где они регистрируются.

Кроме того, в составе стенда предусмотрен вольтметр Э378, миллиамперметр М906 и микроамперметр Э513, предназначенные для визуального контроля за состоянием процессов в системе, а также тахогенератор постоянного тока типа ЭТ-7/110 для измерения частоты вращения приводного асинхронного двигателя.

С использованием стенда описанной конфигурации проведены экспериментальные исследования параметров сети электропитания асинхронного двигателя, сопровождающие процессы возникновения недопустимо низкого электрического сопротивления между фазой

сети и земель, определенного нормативными документами как сопротивление тела человека ( $R_y=1$  кОм), или сопротивление срабатывания аппарата защиты от утечки тока на землю ( $R_{cp}=10$  кОм/фазу при напряжении 380 В;  $R_{cp}=30$  кОм/фазу при напряжении 660 В) [6]. Перечень проведенных экспериментов представлен в табл. 1.

Программа проведения экспериментов предусматривала выполнение следующей последовательности операций: пуск двигателя; подключение цепи возникновения недопустимо низкого электрического сопротивления между фазой сети и «искусственной землей»; автоматическое отключение или принудительное удержание во включенном состоянии коммутационных аппаратов; отключение асинхронного двигателя; после окончания эксперимента – возврат системы в первоначальное состояние. Указанная последовательность действий сопровождалась компьютерной регистрацией сигналов с датчиков.

В ходе исследований анализировались переходные процессы при возникновении цепи повышенной проводимости между фазой сети и землей. После пуска двигателя, путем включения автоматического выключателя *SF2* и коммутационного аппарата *KM1*, в момент времени  $t_1$  образуется цепь повышенной проводимости на землю фазы А присоединения (замыканием тумблера *TU*).

Условия эксперимента №1 предусматривают принудительное сохранение включенного состояния всех коммутационных аппаратов (*KM1*, *KM2*, *SF2*) при возникновении утечки тока на землю ( $R_y=1$  кОм). Включенное состояние автоматического выключателя *SF2* обеспечивается отключением тумблера *B* (рис. 1), включенное состояние контактора *KM2* обеспечивается разрывом измерительной цепи *BЗО*.

Условия эксперимента №2 предусматривают принудительное сохранение включенного состояния коммутационного аппарата *KM2*, что обеспечивается разрывом измерительной цепи *BЗО*, при возникновении утечки тока на землю ( $R_y=1$  кОм). По сигналу от аппарата защиты от утечек тока на землю отключается автоматический выключатель *SF2*. Время срабатывания АЗУР.1 обозначено как момент времени  $t_2$ .

Условия эксперимента №3 предусматривают автоматическое отключение всех

коммутационных аппаратов (*KM1*, *KM2*, *SF2*) при возникновении утечки тока на землю ( $R_y=1$  кОм). В момент времени  $t_2'$  по сигналу от блока защитного отключения *BЗО* коммутационный аппарат *KM2* разрывает статорную обмотку асинхронного двигателя, что обеспечивает подавление его энергетического потока. В момент времени  $t_2$  по сигналу от аппарата защиты от утечек тока на землю отключается автоматический выключатель *SF2*.

В ходе проведения экспериментов №1-3 по снятым с делителей напряжения *KЗ*, *KУ* (рис. 1) данным, получены осциллограммы тока в цепи утечки на землю (рис. 3). Путем анализа этих осциллограмм при проведении экспериментов №2-3 вычислены кривые  $q(t)$  накопления количества электричества через сопротивление  $R_y$  цепи утечки (рис. 3 б, в). По этим кривым определено общее количество электричества ( $Q$ ) через сопротивление  $R_y$  в каждом из экспериментов. Выборочное математическое ожидание общего количества электричества через сопротивление  $R_y$  в условиях экспериментов №2-3 составляет, соответственно,  $m(Q)=34,02$  мА·с и  $m(Q)=25,4$  мА·с при стандартном отклонении  $s(Q)=1,01$  мА·с и  $s(Q)=0,73$  мА·с.

Для проверки адекватности обоснованной ранее математической модели электротехнического комплекса результатам экспериментальных исследований, рассчитаны параметры распределения величины  $Q$ , полученные путем компьютерного моделирования для условий исследований №2-3. Полученные при математическом моделировании средние значения количества электричества  $Q$  соответствуют экспериментальным значениям в пределах ошибки 4%, что допустимо для технических расчетов.

В ходе эксперимента №4 выполнен анализ чувствительности срабатывания аппарата защиты от утечек тока на землю и устройства автоматического подавления обратного энергетического потока АД при возникновении утечки тока на землю при изменении электрического сопротивления между фазой сети и землей.

Изменение сопротивления выполнялось с помощью магазина сопротивлений *М.С.* в пределах, соответствующих нормативным (при линейном напряжении питания 380 В –  $R_y=10$  кОм). В каждом эксперименте определялось сопротивление

Табл. 1. Перечень экспериментов, проведенных на исследовательском стенде

(знаком «×» обозначено включенное состояние коммутационного аппарата)

№	Состояние коммутационных аппаратов			Режим функционирования исследовательского стенда
	<i>KM1</i>	<i>SF2</i>	<i>KM2</i>	
1	×	×	×	Возникновение аварийного состояния (1кОм)
2	-	-	×	Возникновение аварийного состояния (1кОм)
3	-	-	-	Возникновение аварийного состояния (1кОм)
4	-	-	-	Возникновение аварийного состояния (10кОм)

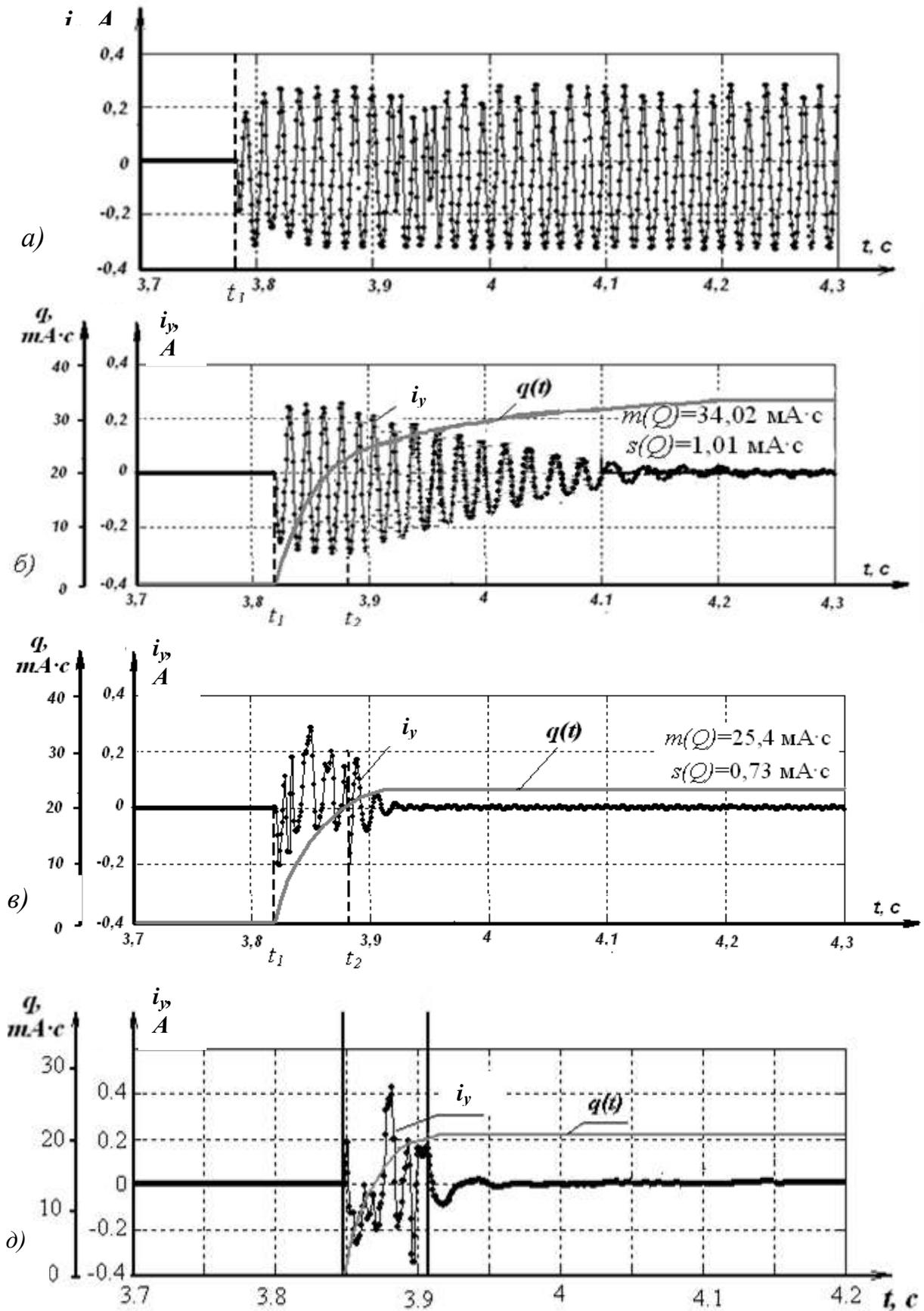


Рис. 3. Осциллограммы мгновенных значений тока утечки на землю и кривая накопления количества электричества во времени через сопротивление  $R_y$  цепи утечки:  
 а) эксперимент №1; б) эксперимент №2; в) эксперимент №3;  
 д) эксперимент №3 с подключением искусственной «звезды» резисторов



$R_y$ , цепи утечки, при котором осуществлялось защитное двустороннее обесточивание аварийной точки. Выборочные значения сопротивления  $R_y$ , цепи утечки тока на землю имеют следующие статистические характеристики:  $m(R_y)=9,7$  кОм;  $s(R_y)=0,98$  кОм.

### Выводы

Разработан экспериментальный стенд и экспериментальный образец автономного устройства автоматического подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя при повреждении его питающего кабеля, что позволило моделировать работу ЭТК шахтного участка и проводить измерения необходимых величин.

Экспериментальные исследования подтвердили достоверность полученных результатов теоретических исследований с допустимыми значениями относительных ошибок расчетов: отклонение рассчитанных на математической модели выборочных математических ожиданий общего количества электричества  $Q$  через сопротивление цепи утечки тока на землю от эмпирических величин не превышает 4%; определенная экспериментальными исследованиями чувствительность срабатывания устройства автоматического подавления обратного энергетического потока АД при возникновении утечки тока на землю соответствует нормативным документам [7]; подтверждено отсутствие влияния автономного средства подавления обратного потока асинхронного двигателя на параметры функционирования участкового аппарата защиты от утечек тока на землю; подтверждена способность автономного средства подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя в комплексе с участковым аппаратом защиты от утечек тока на землю (при условии применения экранированных гибких кабелей в электротехническом комплексе участка шахты) обеспечить функцию двустороннего обесточивания места повреждения сети электротехнического комплекса.

**I.V. Kovalyova /Cand. Sci. (Eng.)/**

*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

Направлением дальнейших исследований является обоснование параметров технических средств защитного подавления обратного энергетического потока асинхронного двигателя, адаптированных к условиям эксплуатации существующих и перспективных шахтных участковых электрических сетей.

### Список литературы

1. Риман, Я.С. Защита подземных электрических установок угольных шахт / Я.С. Риман. – Москва: Недра, 1977. – 206 с.
2. Nelson, J.P. System Grounding, Ground Fault Protection and Electrical Safety. IEEE Press Series on Power Engineering / J.P. Nelson, P.K. Sen. – Wiley-IEEE Press, 2009. – 500 p.
3. Переходные процессы в системах электроснабжения: учеб. для вузов / Г.Г. Пивняк [и др.]; под ред. Г.Г. Пивняка. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат; Днепропетровск: НГУ, 2003. – 548с.
4. Маренич, К.Н. Научные основы применения автоматического защитного двустороннего обесточивания электросети участка шахты: монография / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва. – Донецк: ООО «Технопарк ДонГТУ «УНИТЕХ», 2017. – 125 с.
5. Маренич, К.Н. Автоматическая защита электрооборудования шахт от аварийных и опасных состояний: учебное пособие / К.Н. Маренич, И.В. Ковалёва. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2021. – 216 с.
6. Справочник энергетика угольной шахты / [Дзюбан В.С., Ширнин И.Г., Ванеев Б.Н., Гостищев В.М.]; под общ. ред. Ванеева Б.Н. – [2-е изд.] – Донецк, ООО «Юго-Восток Ltd.», 2001 – Т1, – 447 с.
7. Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования: ГОСТ 31612-2012. – [Дата введения 15.02.2013]. – Москва: Стандартинформ, 2013. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт).

## EXPERIMENTAL SUBSTANTIATION OF THE EFFICIENCY OF TWO-END POWER SUPPLY DISCONNECTION OF THE ENGINE ELECTROTECHNICAL COMPLEX OF MINE BASED ON THE USE OF AUTONOMOUS MEANS OF DETECTING ITS EMERGENCY CONDITION

*Background. Operating conditions of engine electromechanical equipment of mine is determined by its location nonstationarity, which, in turn, makes it necessary to use of flexible cables. Mechanical*

damage to the supply cable is the cause of phase-to-phase short circuits and earth leakages. Overcurrent protection and leakage protection disconnect emergency point from power supply. However back-to-network power generation produced by induction motors after the protective disconnection of power supply de-energizing has occurred.

**Materials and/or methods.** The mathematical model of an engine electrotechnical complex of mine describing its structural elements and covering behavior of variables and other important factors, as follows: variable referring to emergency conditions caused by phase-to-phase short circuits and earth leakages; factors causing back-to-network power generation produced by induction motors, including its conditions prior to and after the protective disconnection of power supply de-energizing has occurred; as well as variables of the protection circuits intended for breaking possible distribution circuits for the induction-motor generated power. However, it is necessary to conduct experimental studies to verify the compliance of the mathematical model with real processes in the engine electromechanical equipment of mine.

**Results.** The experimental stand and the experimental sample of autonomous technical means for automatic disconnection of back-to-network power generation produced by induction motors in case of fault to its supply cable have been developed. This made it possible to simulate processes in the engine electrotechnical complex of mine and to measure the required values.

**Conclusion.** Experimental studies have confirmed the veracity of the obtained results of theoretical studies on the mathematical model.

**Keywords:** experimental stand, two-end power supply disconnection, adequacy of the mathematical model, mathematical expectation, autonomous technical means .

#### Сведения об авторах

**И.В. Ковалёва**

SPIN-код: 5187-2555

ORCID ID: 0000-0002-6437-5683

Телефон: +7 (949) 334-91-00

Эл. почта: visara85@mail.ru

Статья поступила 02.09.2022 г.

© И.В. Ковалёва, 2022

Рецензент д.т.н., проф. К.Н. Маренич