

*На правах рукописи*

УДК 622.8:621.313.223

**ЧОРНОУС ЕВГЕНИЙ ВИТАЛЬЕВИЧ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАХТНОЙ  
УЧАСТКОВОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ НА  
ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМ ШУНТИРОВАНИЯ  
ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ**

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

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк - 2019

Работа выполнена в ГОУВПО "ДОННТУ" Министерства образования и науки Донецкой народной республики, (г. Донецк).

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор Ковалев Александр Петрович, профессор кафедры "Электроснабжение промышленных предприятий и городов" ГОУВПО "ДОННТУ" Министерства образования и науки Донецкой народной республики (г. Донецк).

**Официальные  
оппоненты:**

**Ведущая  
организация**

Защита состоится \_\_\_\_ \_\_\_\_ 2019 г. в :\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 01.008.01 при ГОУВПО "ДОННТУ" по адресу: 283001, г.Донецк, ул. Артема, 58, I уч. корпус, ауд. 1.203,  
Тел./факс: +380(062)304-30-55, E-mail:uchensovet@donntu.org

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

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2019 г.

Ученый секретарь Д 01.008.01

д-р техн. наук, доцент

И.А. Бершадский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современное демократическое общество провозглашает жизнь и здоровье человека наивысшей ценностью, тем самым беря на себя обязательства обеспечивать безопасные условия жизнедеятельности, а также определять пути развития и совершенствования мероприятий, средств и устройств защиты человека. В настоящее время в концепции обеспечения электробезопасности на производстве все большее значение приобретает разработка и внедрение устройств защитного шунтирования, важнейшим элементом которых являются органы выбора поврежденной фазы. Таким образом, быстрое (5 - 12 мс) и гарантированно надежное определение поврежденной фазы в сети с изолированной нейтралью является актуальной и важной научно-технической задачей обеспечения безопасности человека при использовании электроэнергии на предприятиях горной промышленности.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Работа выполнена по одному из основных научных направлений ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» в рамках разработок по гостемам Г-4-01 (№ госрегистрации 0101U001194) «Развитие основ теории процесса поражения человека электрическим током при эксплуатации электрооборудования», Н 27/2000 «Повышение эффективности систем электроснабжения и электропотребления», (Н 30/05) «Повышение эффективности электропотребления, живучести систем электроснабжения промышленных предприятий и безопасности технологических объектов при их эксплуатации», Н-22-15 «Развитие методов оценки пожарной безопасности электрических сетей 0,4/0,22 кВ», Н-21-10 «Прогнозирование искробезопасных параметров электрических цепей взрывозащищенного электрооборудования, вероятности возникновения взрывов, пожаров в квартирах и разработка мероприятий по их предотвращению» (госрегистрация №0101U007239).

**Степень разработанности темы.** Анализ путей развития обеспечения электробезопасности в мировой практике позволяет сделать вывод о том, что защитное шунтирование может обеспечить электробезопасность подземных электрических сетей с изолированной нейтралью, с перспективой дальнейшего повышения производственных мощностей и классов напряжений. Применение устройств защитного шунтирования уже сейчас находит отражение в нормативных документах по обеспечению электробезопасности при разработке подземных и открытых месторождений полезных ископаемых ведущих стран мира (Россия, США, Канада, Австралия и Новая Зеландия, ЮАР, Чили и др.), хотя по-прежнему не является обязательным. В настоящее время ряд не решенных технических задач исключает возможность применения защитного шунтирования в качестве основного средства обеспечения электробезопасности низковольтных шахтных сетей. Одной из таких задач является надежное и, по возможности, быстрое определение поврежденной фазы для ее последующего замыкания (шунтирования) на землю.

Существенный вклад в развитие методов и средств обеспечения электробезопасности, в частности, защитного шунтирования, внесли советские и постсоветские ученые Вареник Е.А., Дзюбан В.С., Жидков В.О., Ильин Ю.Н., Колосюк В.П., Маренич К.Н., Савицкий В.Н. Шкрабец П.Ф., Щуцкий В.И., и др.

**Цель и задачи исследования.** Целью диссертационной работы является обеспечение безопасности человека от поражения электрическим током в сетях с изолированной нейтралью на основе разработки быстродействующего способа определения поврежденной фазы и научного обоснования его работоспособности и устойчивости к помехам и возмущениям со стороны силовой сети.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие основные задачи:

1. На основе интегральных показателей тяжести поражения человека электрическим током выполнить сравнительный анализ степени опасности сети с защитным отключением и сети с защитным шунтированием.

2. Разработать быстродействующий способ идентификации поврежденной фазы сети в системе электроснабжения участка угольной шахты, функционирующий в условиях интенсивного динамического режима, наличия продольной или поперечной несимметрии сети, воздействия высших гармонических составляющих.

3. Обосновать возможности повышения надежности функционирования нового способа и его устойчивости к помехам и возмущениям со стороны сети при высоких (более 10 кОм) значениях сопротивления тела человека.

4. Выполнить экспериментальную проверку работоспособности предложенного способа определения поврежденной фазы и алгоритма его реализации.

**Объект исследования** – процессы, происходящие в силовой участковой сети при случайном касании человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

**Предмет исследования** – возмущения и помехи со стороны силовой сети, способные исказить работу устройства выбора поврежденной фазы при случайном касании человека к токоведущим частям, находящимся под напряжением.

### **Научная новизна полученных результатов**

1. Впервые получена новая аналитическая зависимость аргумента потенциала нейтрали и его интегрального значения от сопротивления изоляции и емкости сети и сопротивления тела человека, случайно оказавшегося под напряжением, которая позволила обосновать теоретически и подтвердить экспериментально то, что помехоустойчивость способа и алгоритма можно обеспечить, применяя “плавающие” опорные фазовые интервалы, а также доказано, что смещение последних должно осуществляться в функции интегрального значения потенциала нейтрали.

2. Впервые доказано аналитически и подтверждено экспериментальными исследованиями, что применение критерия принятия решения, состоящего в определении необходимого и достаточного количества промежуточных результатов аргумента потенциала нейтрали из условия соответствия доверительного интервала их среднего значения опорным фазовым интервалам, обеспечивает устойчивость и быстродействие предложенного способа определения поврежденной фазы сети, под напряжением которой оказался человек, в условиях высокого (более 10 кОм) значения сопротивления цепи утечки.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая значимость работы:

- описаны математические основы нового быстродействующего способа определения поврежденной фазы, доказана возможность определения

промежуточных значений серии аргумента потенциала нейтрали по двум мгновенным значениям;

- разработаны элементы теории применения “плавающих” опорных интервалов, аналитически обоснована целесообразность использования интегрального значения серии полученных результатов, применяемого для обеспечения устойчивости работы способа при высоких (более 10 кОм) значениях сопротивления человека и управления смещением “плавающих” интервалов;

- разработан критерий принятия решения, состоящий в определении необходимого и достаточного количества промежуточных результатов аргумента потенциала нейтрали из условия соответствия доверительного интервала их среднего опорным фазовым интервалам, предложены алгоритмы его определения в зависимости от закона распределения серии.

Практическая значимость работы:

- установлено, что алгоритм устройства выбора фазы (УВФ), реализующий предложенный способ, устойчиво функционирует в условиях продольной несимметрии с разбросом параметров нагрузки по фазам до 70%; при наличии в составе потенциала нейтрали до 7 нечетных высших гармоник с амплитудами до 15% от основной, в условиях затянувшегося переходного процесса с постоянной времени до 40 мс, а также при неоднократном скачкообразном изменении сопротивления утечки в пределах от 15 кОм до 1 кОм; однако в условиях неблагоприятной поперечной несимметрии, когда “фон” потенциал нейтрали находится в противофазе к аварийному сигналу, чувствительность устройства выбора фазы по сопротивлению утечки может снизиться с 20 кОм до значения, находящегося в пределах от 14 кОм до 15 кОм;

- установлено, что длительность определения поврежденной фазы, под напряжением которой случайно оказался человек, при низкоомной утечке ( $R_h \leq 5$  кОм,  $C = 0.7$  мкФ) составляет от 2.5 мс до 4.0 мс, а при высокоомной ( $R_h \geq 10$  кОм) от 5 мс до 12 мс;

- предложенный способ определения поврежденной фазы сети, реализующий его алгоритм и результаты исследований его работы используются научно-исследовательскими и технологическими предприятиями Донбасса при разработке систем защитного шунтирования и разработке требований для их производства и эксплуатации;

- ряд положений, содержащихся в работе (математические модели двигателя в режиме выбега, сети после аварийного отключения, определения тока утечки в динамических режимах и др.) используются в учебном процессе подготовки инженеров-электриков.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования базируются на теории электрических цепей. Динамические режимы сети исследовались с использованием современных методов математического моделирования, при разработке и исследовании алгоритма устройства выбора фазы использованы аналитические методы решения трансцендентных уравнений, включающих операции отделения и устранения побочных корней. Экспериментальная проверка результатов анализа выполнена с использованием современных цифровых средств измерения и апробированного математического аппарата обработки результатов наблюдений.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Новый быстродействующий способ определения поврежденной фазы шахтной участковой сети, отличающийся тем, что с опорными фазовыми интервалами сопоставляется серия промежуточных значений аргумента потенциала нейтрали, определяемых по двум его мгновенным значениям, считываемых через равные промежутки времени.

2. Метод применения “плавающих” опорных фазовых интервалов, который позволяет обеспечить помехоустойчивость предложенного способа определения поврежденной фазы, под напряжением которой оказался человек, а также функциональная зависимость интегрального значения потенциала нейтрали от емкости сети и сопротивлений тела человека и изоляции, определяющая функцию смещения “плавающих” опорных фазовых интервалов.

3. Критерий принятия решения, который позволяет обеспечить устойчивость и быстродействие способа выбора поврежденной фазы при значениях сопротивления тела человека более 10 кОм и состоящий в определении необходимого и достаточного количества промежуточных результатов аргумента потенциала нейтрали из условия соответствия доверительного интервала, определяемого с учетом их среднего значения, опорным фазовым интервалам.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается корректностью поставленных задач, обоснованностью принятых допущений, использованием апробированных методов математического моделирования и современных методов статистической обработки результатов наблюдений, а также приемлемой сходимостью результатов анализа и эксперимента. Основные положения диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительные отзывы на Международных научно-технических конференциях: “Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах” (Севастополь, 2007 г.), посвященной 100-летию со дня рождения проф. М.А. Киклевича (Донецк, 2007 г.), посвященной 90 – летию Донецкого национального технического университета (Донецк, 2011 г.), 1 Всеукраинской научно-технической конференции преподавателей, аспирантов и студентов (Донецк, 2012 г.), «Управление режимами работы объектов электрических и электромеханических систем 2013. КРЕС-2013» (Донецк, 2013 г.).

**Личный вклад автора.** Научные положения, содержащиеся в работе, получены соискателем самостоятельно. Ему принадлежит защищенная патентом идея быстродействующего способа идентификации поврежденной фазы и разработка алгоритма его реализации. Предложена и защищена патентом идея “плавающих” ОФИ и разработан вариант ее практического осуществления. Предложен критерий принятия решения и экспериментально доказана необходимость его использования в условиях интенсивных помех и искажений. В предложении о применении способа и алгоритма в комбинированных сетях, защищенном патентом на изобретение, соискателю принадлежит идея измерения частоты преобразователя путем фиксации моментов перехода через нуль его линейных напряжений.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 17 печатных работах: 9 в специальных научных журналах и сборниках, 5 в докладах и тезисах

конференций, 1 патент Украины на изобретение, 2 патента Украины на полезные модели.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из вступления, 5 разделов с выводами по каждому разделу, общих выводов, списка использованных источников и приложений. Она изложена на 178 страницах сквозной нумерации, в том числе включает 56 рисунков, 3 таблицы, список использованных источников из 93 наименований на 11 страницах и 5 приложений на 33 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В первом разделе** "Сравнительный анализ существующих методов защиты человека от возможного поражения его электрическим током" на основе интегральных показателей сравниваются две наиболее распространенные системы защиты человека: защитное отключение (ЗО) и защитное шунтирование (ЗШ).

Сравнение выполнено на основе результатов исследования динамической модели участковой сети в режиме однофазной утечки, причем, для метода защитного отключения проанализированы три этапа аварийной ситуации с учетом переходных процессов между ними. Сеть с защитным шунтированием характеризуется одним этапом, но исследование выполнено для напряжений 660 В и 1140 В.

Ниже приведены основные результаты анализа (Таблица 1), где:  $I_e$ ,  $q$  – эквивалентное значение тока и заряда при длительности  $\Delta t$ ;  $I_n$ ,  $q_n$  – их предельные значения для той же длительности.

Таблица 1 - Сравнение методов защиты человека от поражения электрическим током

Методы защиты	$\Delta t$ , мс	$I_e/I_n$	$q/q_n$
ЗО, 660 В	1000	1	1
ЗШ, 660 В	60 - 80	0.60 - 0.55	0.32 - 0.45
ЗШ, 1140 В	60 - 80	1.05 - 1.0	0.55 - 0.75

Таким образом, в результате сравнительного анализа установлено, что интегральные показатели тяжести поражения при ЗШ снижаются в 1.5 - 2 раза по сравнению с ЗО и, кроме того, ЗШ не чувствительно к точности настройки средств компенсации и имеет резервы для повышения напряжения сети.

**Во втором разделе** "Математическая модель УВФ и анализ его статической устойчивости" разработана математическая модель и предложен алгоритм, реализующий предложенный способ идентификации поврежденной фазы.

Сущность способа заключается в определении аргумента (начальной фазы) потенциала нейтрали (ПН) на основе рабочей гипотезы, что этот потенциал меняется по синусоидальному закону:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi) \quad (1)$$

где  $u(t)$ ,  $U_m$ ,  $\psi$  – соответственно мгновенное значение, амплитуда и аргумент ПН.

Если зафиксировать мгновенные значения потенциала нейтрали для двух смежных значений времени (угла)  $\omega t_1$  и  $\omega t_2$ , разница между которыми  $\Delta \omega t$  фиксирована и составляет от 9 до 20 градусов, приходим к системе (2), (3), которая, в отличие от (1), в пределах периода имеет только одно решение.

$$u(t_1) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_1 + \psi) \quad (2)$$

$$u(t_2) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t_2 + \psi) \quad (3)$$

Исключив из полученной системы амплитуду  $U_m$ , получаем функцию  $y(\psi)$  и ее производную  $y'(\psi)$ :

$$y(\psi) = \frac{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi)}{\sin(\omega \cdot t_2 + \psi)} - \frac{u(t_1)}{u(t_2)} \quad (4)$$

$$y'(\psi) = \frac{\sin(\Delta\omega t)}{(\sin(\omega \cdot t_2 + \psi))^2} \quad (5)$$

Из анализа функций (4) и (5), (Рисунок 1), следует, что их период по аргументу  $\psi$  составляет  $\pi$ . Это значит, что зависимость (4) в интервале от 0 до  $2\pi$  имеет один побочный корень, а учитывая, что  $y'(\psi) > 0$ , зависимость (4) монотонно возрастает и в пределах интервала от 0 до  $\pi$  имеет только один корень и характеризуется разрывами второго рода. В простейшем варианте истинный корень соответствует условию:

$$U_m = \frac{u(t_1)}{\sin(\omega \cdot t_1 + \psi_1)} > 0 \quad (6)$$

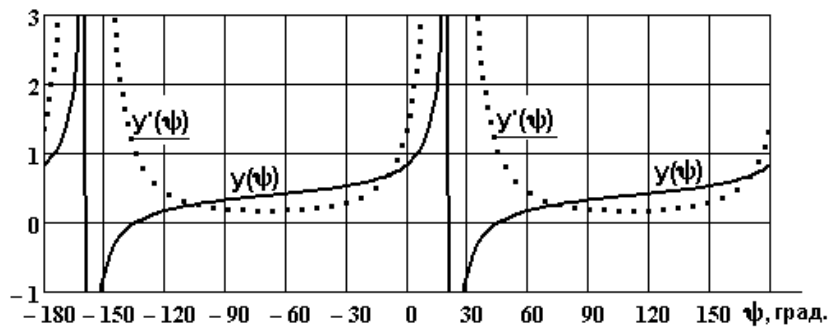


Рисунок 1 - Графики функций  $y(\psi)$  и  $y'(\psi)$  в пределах периода

Соотношения (1) – (6) являются математической основой для построения алгоритма, реализующего предложенный способ, в котором предусматривается вычисление промежуточных значений ПН, а также установлено, что в качестве системы отсчета рационально принять одно из линейных напряжений.

Из анализа математической модели сети в установившемся режиме однофазной утечки были получены зависимости  $\psi = f(R_h, C)$  и  $U_u = f(R_h, C)$ , позволяющие определить области значений  $\psi$  и  $U_u$ , но из-за одновременного влияния двух параметров не позволяющие определить рациональные границы ОФИ.

Однако, на их основе получены обобщенные зависимости, учитывающие совместное влияние параметров  $R_h$  и  $C$ . Это аргумент ПН в функции его среднего значения и емкости  $\psi = f(U_u, C)$ , и наибольшая постоянная времени системы  $\tau = f(R_h, C)$ . Эти зависимости (Рисунок 2) в меньшей мере зависят от емкости сети и, следовательно, приемлемы для определения границ ОФИ.

Для фазы А эти границы составляют:

$$35^\circ - 155^\circ \text{ для } U_u/U_\phi > 0.3 \text{ или } \tau < 7\text{мс} \quad (8)$$

$$5^\circ - 125^\circ \text{ для } U_u/U_\phi < 0.3 \text{ или } \tau > 7\text{мс} \quad (9)$$

Под устойчивостью УВФ и алгоритма, его реализующего, подразумевается их способность определять фазу с утечкой тока на землю, несмотря на действие возмущающих или искажающих факторов. Основные из них: экспонента с медленным затуханием, продольная или поперечная несимметрия сети, высшие гармонические составляющие. Наиболее существенным фактором является поперечная несимметрия, при которой образуется "фон" ПН, способный исказить основной (аварийный) сигнал.

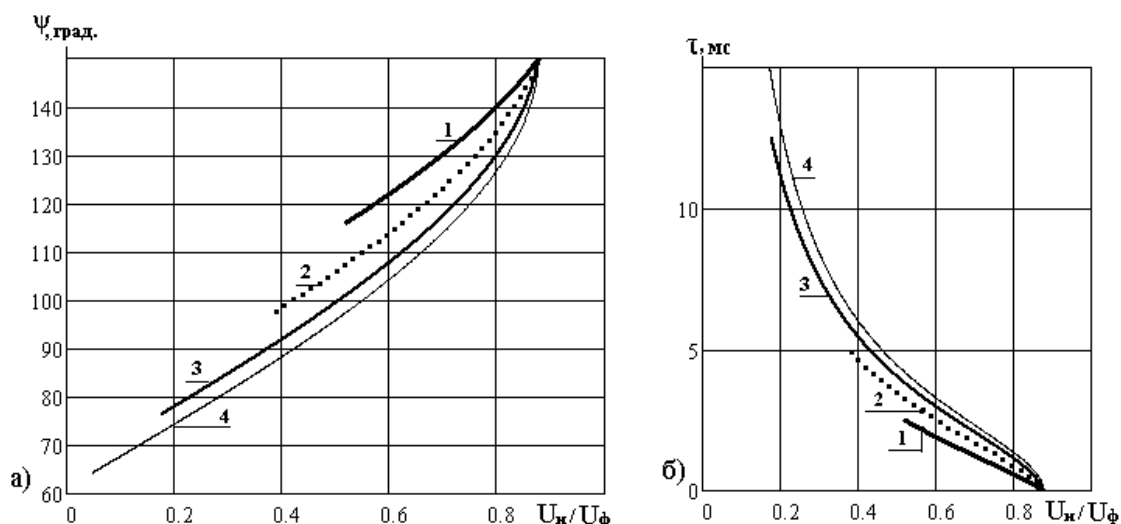


Рисунок 2 - Графики зависимостей аргумента ПН (а) и постоянной времени цепи  $\tau$  (б) в функции интегрального значения ПН при изменении сопротивления утечки. Условия опытов:  $R = 300$  кОм;  $R_h$  изменяется от 0 до 20 кОм; значения емкости (1 - 4) соответственно: 0.05; 0.1; 0.25; 1.0 (мкФ/фазу)

Ниже, на рисунке 3, приведены годографы векторов ПН, представленные в виде отрезков круговых диаграмм. Они позволяют оценить влияние "фона" ПН на основной сигнал при утечке в фазе А. Точки 5к – 20к на каждом из годографов соответствуют значениям сопротивления утечки (кОм).

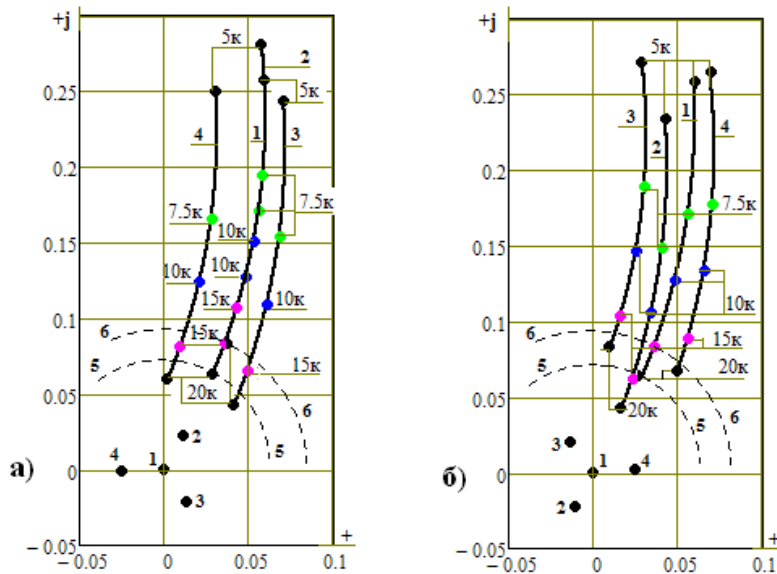


Рисунок 3 - Фрагменты круговых диаграмм потенциала нейтрали для режимов:

- а) – двухфазная утечка;  
б) – трехфазная утечка

Для определения предела статической устойчивости УВФ по отношению к высшим гармоникам проведено исследование, когда в составе ПН одновременно действуют 5, 7, 11 и 13-я гармоники, причем, каждая из них по амплитуде составляет 15% от основной, а искажение ПН больше, чем у сети, питаемой от преобразователя частоты (рисунок 4). Несмотря на абсолютные погрешности  $\Delta\psi$ , достигающие в отдельных случаях  $150^\circ$  -  $200^\circ$ , ее среднее значение  $\Delta\psi_{cp}$  стремится к нулю, причем, работа УВФ устойчива.

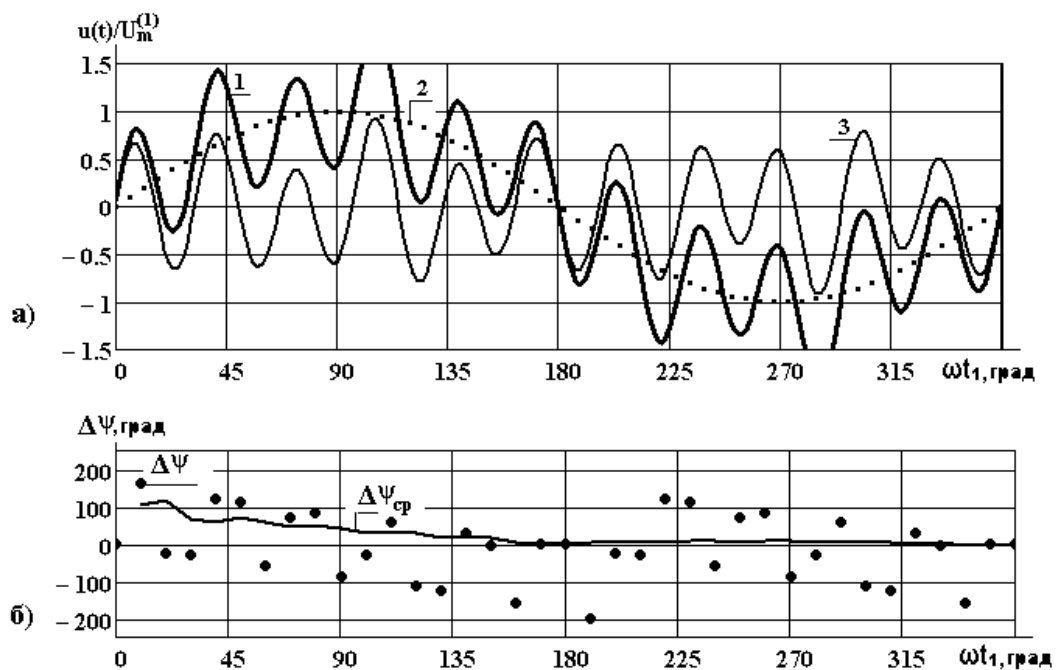


Рисунок 4 - Исследование влияния высших гармоник на работу УВФ:

- а) 1 – мгновенные значения ПН, 2 – основная гармоника, 3 – сумма высших гармоник;  
б) абсолютная  $\Delta\psi$  и средняя  $\Delta\psi_{cp}$  погрешности аргумента ПН (в градусах)

Это значит, что предложенный способ способен устойчиво функционировать в сети, питаемой от преобразователя частоты (комбинированная сеть) при условии, что решение принимается с учетом среднего значения промежуточных результатов.

**Третий раздел** "Анализ динамической устойчивости УВФ" посвящен анализу факторов, влияющих на работу алгоритма в динамическом режиме сети, являющегося основным. Математическая модель сети предусматривает анализ работы УВФ в условиях переходного режима при различных условиях коммутации, наличии поперечной несимметрии, а также воздействии высших гармонических составляющих.

На рисунке 5, а) приведены кривые напряжений ПН  $u$ , его установившейся  $u_y$  и свободной  $u_{св}$  составляющих, суммарная кривая высших гармоник  $u^{(5)}+u^{(7)}$ , а также текущие расчетное  $u_N^p$  и среднее по модулю  $U_N^{cp}$  значения амплитуды ПН, используемые в УВФ при поиске промежуточных результатов, а на Рисунок 5, б) значения аргумента ПН  $\psi$ , их среднее  $\psi_{ср}$ , и расчетное  $\psi_{рсч}$  значения, а также границы ОФИ  $\beta_{гр}$ , скорректированные согласно (9). Одновременное воздействие экспоненциальных и частотных возмущений даже при неблагоприятном переходном режиме не нарушает устойчивость УВФ.

Скачкообразные изменения сопротивления утечки также не нарушают устойчивость УВФ, так как при уменьшении  $R_h$  влияние помех и искажений снижается.

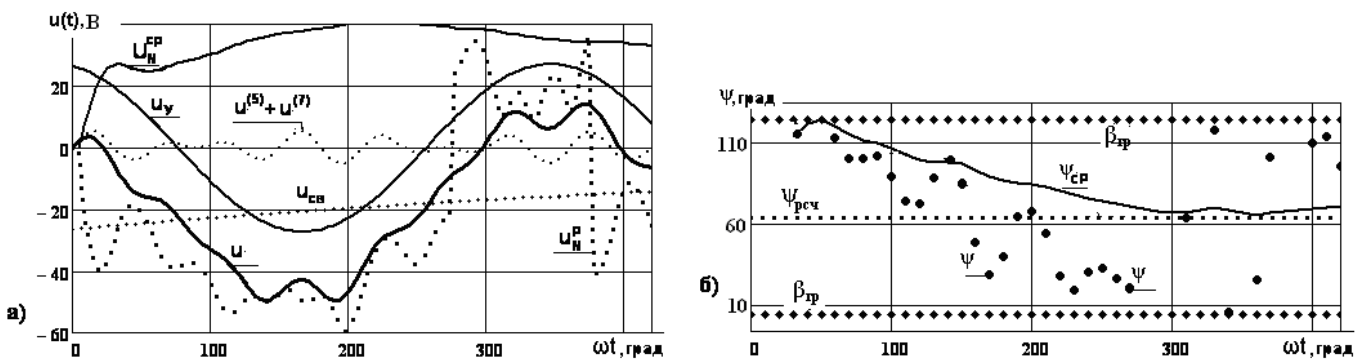


Рисунок 5 - Работа УВФ в области высокоомной утечки ( $R_h = 20$  кОм,  $C = 0.75$  мкФ), при неблагоприятном переходном процессе и действии высших гармонических составляющих: а) – кривые мгновенных значений составляющих ПН; б) – значения аргумента ПН при скорректированных границах ОФИ

**Четвертый раздел** "Анализ структурной схемы УВФ" посвящен уточнению технических требований и разработке структурной схемы алгоритма, осуществляющего предложенный способ. Для реализации "плавающих" ОФИ проведено сопоставление двух функциональных зависимостей: расчетного среднего значения амплитуды ПН, используемого в УВФ при решении уравнения (4), и среднего по модулю текущего значения ПН, используемого для контроля возникновения и наличия утечки. Анализ показал, что вторая величина предпочтительнее, так как в меньшей мере подвержена влиянию помех и искажений и, что важнее, готова к применению немедленно после запуска блока промежуточных результатов (БПР).

Добавочным фактором, определяющим быстродействие УВФ, является интервал времени с момента возникновения утечки до запуска БПР. Установлено, что эта задержка, зависящая от сопротивления  $R_h$  и фазы коммутации, в условиях неблагоприятной поперечной несимметрии может находиться в пределах от 2 до 10 мс.

По результатам проведенного анализа уточнены требования к УВФ и разработана его структурная схема, состоящая из четырех блоков: блок системы отсчета, определяющий текущий момент времени; блок утечки, осуществляющий контроль наличия утечки, используя текущее среднее ПН; блок промежуточных результатов, осуществляющий расчет серии значений  $\psi$  и их предварительную обработку; блок принятия решения, в котором устанавливаются текущие границы ОФИ, определяется ОФИ, в границах которого находится усредненный аргумент ПН, проверяется запас устойчивости УВФ и принимается конечное решение.

**Пятый раздел** “Экспериментальная проверка работоспособности УВФ” посвящен методике проведения, результатам экспериментальной проверки работоспособности предлагаемого способа и УВФ, а также вопросу принятия решения. Поскольку УВФ является цифровым устройством и, адекватность его модели практически не зависит от среды моделирования, то основным объектом исследования является силовая сеть, основным исследуемым режимом – переходный процесс, сопровождающий возникновение утечки.

Для экспериментальных исследований использован исследовательский стенд УИЛС. В качестве критериев подобия приняты безразмерные параметры: аргумент потенциала нейтрали и аргументы линейных и фазных напряжений. В качестве основного регистрирующего прибора использован измерительный многоканальный прибор типа «Рекон – 08МС», обеспечивающий регистрацию мгновенных значений исследуемых величин с частотой 10 кГц.

Результаты гармонического анализа, проведенного для оценки “фонового” значения ПН приведены в таблице 2, где первая строка содержит номер гармоники, а вторая – процентное значение отдельных составляющих по отношению к действующему значению “фона”. Характерно заметное преобладание третьей и девятой гармоник, а также нечетных по отношению к четным.

Таблица 2 - Процентное содержание составляющих “фона” ПН

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
-0.34	78.78	4.98	42.73	1.83	6.24	2	11.85	3.94	34.41	...

10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0.35	5.68	0.83	5.21	2.94	3.87	2.12	4.48	1.83	2.28	...

Результаты экспериментальных исследований в области низкоомной утечки в полной мере подтвердили результаты анализа. Все промежуточные результаты  $\psi$  находятся в пределах “своего” опорного интервала, а время определения находится в пределах от 3 мс до 5 мс.

При высокоомной утечке, характеризующейся высоким уровнем высших гармоник и более длительным переходным процессом, наблюдается большой разброс значений  $\psi$ , часть которых ( $\approx 20\%$ ) оказывается за пределами ОФИ. Причем

выяснилось, что более весомым фактором, определяющим разброс и искажение промежуточных результатов, оказались не динамические составляющие переходного процесса, а высшие гармонические составляющие. Возникает необходимость разработки количественного показателя (критерия принятия решения), определяющего число значений  $\psi$ , необходимое и достаточное для принятия решения вне зависимости от интенсивности помех и искажений.

Критерий принятия решения, предлагаемый для решения этой задачи, состоит в том, что кроме серии промежуточных значений аргумента ПН и их среднего, дополнительно, для заданной доверительной вероятности (0.95 для большинства технических измерений) определяется доверительный интервал указанного среднего. Последний сопоставляется с опорными фазовыми интервалами, на основе чего и принимается окончательное решение об определении фазы, под напряжением которой случайно оказался человек.

На рисунке 6 приведена одна из осциллограмм эксперимента для  $R_h = 14$  кОм с использованием предлагаемого критерия. Положение ОФИ соответствует условию (9). Промежуточные результаты  $\psi$  следуют через каждые  $9^\circ$  (0.5 мс). Вследствие искажений, вносимых высшими гармониками и затянувшимся переходным процессом, несколько результатов (12.5 % за период) вышли за пределы ОФИ. Тем не менее, УВФ свою задачу выполняет полностью. Экспериментальное значение  $\psi_{cp}$  устойчиво стремится к теоретическому  $\psi_{рч}$ , а доверительный интервал среднего позволяет принять решение уже через 4.5 мс с момента включения БПР.

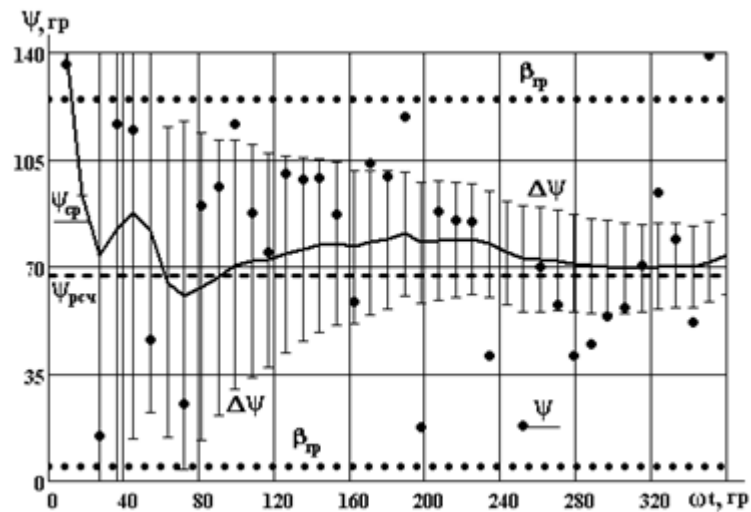


Рисунок 6 - Работа БПР при  $R_h = 14$  кОм:  $\psi$ ,  $\psi_{cp}$ ,  $\psi_{рч}$  – текущее, среднее и расчетное значения аргумента ПН;  $\Delta\psi$  – доверительный интервал среднего;  $\beta_{гр}$  - границы ОФИ

Путем обработки осциллограмм с различными  $R_h$ , получена усредненная зависимость времени с момента возникновения утечки до момента принятия решения (время определения)  $t_{uo} = f(R_h)$  при  $C = 0.75$  мкФ. График этой зависимости представлен на рисунке 7. Верхняя граница времени идентификации отвечает наиболее неблагоприятным условиям поперечной несимметрии, когда “фон” ПН вычитается из основного сигнала.

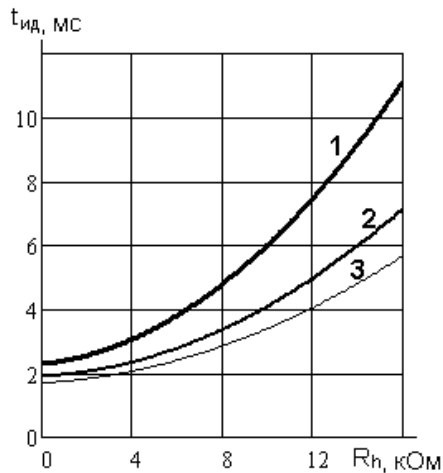


Рисунок 7 – Время определения поврежденной фазы.  
Верхняя (1) и нижняя (2) границы длительности определения;  
(3) – время работы БПР

Таким образом, в результате проведенных экспериментов подтверждена работоспособность предложенного способа, алгоритма его реализации, а также доказана необходимость применения “плавающих” ОФИ и критерия принятия решения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой дано теоретическое обоснование и практическое решение актуальной научно-технической задачи по обеспечению электробезопасности человека, эксплуатирующего шахтное электрооборудование напряжением до 1000 В, что позволило разработать быстродействующий способ определения поврежденной фазы, а также научно обосновать, что способ устойчиво функционирует в условиях длительного переходного процесса и воздействия высших гармоник, при неоднократном скачкообразном изменении сопротивления утечки в пределах от 15 до 1 кОм, а также при одновременном воздействии нескольких возмущающих факторов.

Основные результаты работы заключаются в следующем:

1. Усовершенствована математическая модель электродвигателя в режиме свободного выбега и уточнен закон изменения частоты и амплитуды его ЭДС в функции механической и электромагнитной постоянных времени, позволившие исследовать два этапа динамического режима сети после ее защитного отключения и определить закон изменения тока, протекающего через тело человека на этих этапах.

2. Установлено, что интегральные показатели тяжести поражения электрическим током при защитном шунтировании по сравнению с защитным отключением снижаются в 1.5 – 2 раза вследствие того, что человек не подвергается воздействию ЭДС двигателей и уменьшается время его пребывания под напряжением.

3. Предложен новый быстродействующий способ определения фазы, под напряжением которой случайно оказался человек, отличающийся от известных тем, что с опорными фазовыми интервалами сопоставляется серия промежуточных значений аргумента ПН, определяемых из мгновенных значений последнего и считываемых через равные интервалы времени; а также разработаны математическая модель и алгоритм функционирования УВФ, реализующего предлагаемый способ.

4. Впервые установлено, что при сопротивлении тела человека  $R_h < 5$  кОм УВФ функционирует устойчиво как при наличии продольной или поперечной несимметрии, так и при воздействии высших гармоник и динамических составляющих переходного процесса, а также при скачкообразном изменении сопротивления утечки, когда новый переходный процесс, накладывается на неоконченный предыдущий.

5. Для области сопротивления тела человека ( $R_h > 10$  кОм,  $C = 0.75$  мкФ) установлено, что динамические и высшие гармонические составляющие ПН приводят к более широкому разбросу промежуточных значений его аргумента, а наличие “фона” потенциала нейтрали, обусловленного поперечной несимметрией кабельной сети, может создать абсолютную систематическую погрешность промежуточных результатов, достигающую  $15^0$ .

6. Впервые установлено, что наиболее неблагоприятным для УВФ вариантом поперечной несимметрии является снижение сопротивления двух неаварийных фаз (двухфазная утечка) до уровня, еще недостаточного для срабатывания защитного отключения, а “фон” ПН находится в противофазе к аварийному сигналу, что снижает чувствительность УВФ к сопротивлению утечки на  $\approx 20\%$ .

7. Впервые доказано, что устойчивость УВФ можно повысить, применив “плавающие” опорные интервалы, смещение которых осуществляется в функции интегрального значения ПН, а также установлено, что для решения задачи достаточно двух состояний ОФИ, граница между которыми по сопротивлению утечки при  $C = 0.75$  мкФ находится в пределах от 4 кОм до 6 кОм.

8. Предложен критерий принятия решения, позволяющий УВФ определять количество промежуточных результатов, достаточное для принятия обоснованного решения, состоящий в том, что для заданной доверительной вероятности определяется доверительный интервал среднего промежуточных результатов, который сопоставляется с опорными фазовыми интервалами.

9. Впервые доказано, что предложенный способ обеспечения безопасности человека и алгоритм его реализации применимы в комбинированной сети при условии, что частота преобразователя уточняется в каждый момент перехода линейных напряжений через нуль; а при изменении порядка чередования фаз с прямого на обратный ОФИ смещаются на шестую часть периода в сторону опережения, а два из них меняются местами.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых изданиях*

1. Черноус, Е.В. Об оценке третьей гармоники в составе тока утечки шахтной участковой сети / **Е.В. Черноус**, И.И. Белинская, М.В. Апухтин // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика», вип. 7(128). – Донецьк: ДонНТУ, 2007. - С.208 - 209.
2. Черноус, Е.В. До аналізу факторів ураження людини електричним струмом в дільничній шахтній мережі / **Е.В. Черноус**, Л.О. Сорочка // Наукові праці Донецького нац. техн. ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика», вип. 7(128). – Донецьк: ДонНТУ, 2007. – С. 221 - 224.

3. Чорноус, Е.В. Учет несимметрии в алгоритме поиска поврежденной фазы сети с изолированной нейтралью // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО “АИР”, 2010. - С. 116 - 121
4. Чорноус, Е.В. О динамических свойствах быстродействующего алгоритма выбора поврежденной фазы сети с изолированной нейтралью // Наукові праці Дон. нац. техн. ун-ту. Серія «Електротехніка і енергетика», вип.10(180). – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – С. 208 - 210.
5. Чорноус, Е.В. Определение поврежденной фазы в сети с изолированной нейтралью при наличии высших гармоник в составе потенциала нейтрали. // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Електротехніка і енергетика», вип. 11(186). – Донецьк: ДонНТУ, 2011.– С. 422 - 424.
6. Чорноус, Є.В. Математична основа та межі статичної стійкості швидкодіючого способу визначення пошкодженої фази // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО “АИР”, - 2011. – С. 212 - 217.
7. Ковалев, А.П. Динамическая погрешность аргумента потенциала нейтрали / А.П. Ковалев, **Е.В. Чорноус** //Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО “АИР”, - 2012. – С. 143-147.
8. Ковалев, О.П. Про «плаваючі» опорні інтервали при визначенні фази з витоком. / О.П. Ковальов, **Є.В. Чорноус** // Наукові праці Дон. нац. техн. ун-ту, серія «Електротехніка та енергетика», вип. 2(15). – Донецьк: ДонНТУ, 2013. - С. 133 - 136.
9. Чорноус, Е.В. О влиянии переходного режима в шахтной участковой сети на длительность определения поврежденной фазы // Вестник Донецкого национального технического университета, №4, 2018. <http://vestnik.donntu.org/dl/2018/04/chernous.pdf>

#### ***Публикации в рецензируемых изданиях ВАК Минобрнауки РФ***

10. Чорноус, Е.В. Об оценке электробезопасности сети с изолированной нейтралью / Е.В. Чорноус, А.П. Ковалев, В.П. Чорноус // Электричество. – 2006 – № 5 – С. 59 - 61.
11. Чорноус, Е.В. Об альтернативном варианте защиты шахтной сети от токов утечки / Е.В. Чорноус // Электричество №8, 2009. – С. 33 - 36.

#### ***Публикации в нерецензируемых изданиях***

12. Чорноус, Е.В. Способ определения поврежденной фазы при несимметрии участковой шахтной сети / Е.В.Чорноус // Способы и средства создания безопасных и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. / МакНИИ. – Макеевка: МакНИИ. – 2018. – № 2(41). – С. 34 - 42.

#### ***Тезисы***

13. Чорноус, Е.В. Математическая модель асинхронного двигателя как составная часть модели шахтной участковой сети после аварийного отключения / **Е.В. Чорноус**, И.И. Белинская // Материалы международной науч.-техн. конференции «Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах» (24-28 сентября 2007 г.): сб. науч. трудов СевНТУ: г. Севастополь, - 2007. – С. 64 –68.

14. Чорноус, Е.В. Погрешность потенциала искусственной нейтрали. / **Е.В. Чорноус**, В.Х. Антамонов, Нагорный М.А. // Сучасні проблеми електропостачання промислових та побутових об'єктів. Збірник наукових праць І Всеукраїнської наук.-техн. конференції викладачів, аспірантів і студентів: 18-19 жовтня 2012 р., зб. наук. праць. - м. Донецьк: ДонНТУ, - 2012.- С. 47 – 49.

### ***Патенты на полезные модели и изобретения***

15. Патент на корисну модель 51307 (UA), МПК (2009) H02N 3/16 G01R 31/08 Спосіб визначення пошкодженої фази з витокм на землю в електричній мережі з ізольованою нейтраллю / Є.В. Чорноус. и 2010 00703. Заявл. 25.01.2010, Опубл.12.07.2010. Бюл. № 13, – 6 с.: іл.
16. Патент на корисну модель № 63716 (UA), МПК H02N 3/16. G01R 31/08. Спосіб визначення пошкодженої фази з витокм на землю в електричній мережі з ізольованою нейтраллю / Є.В. Чорноус. и 2010 13824. Заявл. 22.11.2010, Опубл. 25.10.2011. Бюл. № 20, – 4 с.: іл.
17. Патент на винахід №104695, МПК H02N 3/16, G01R 31/08. Спосіб визначення пошкодженої фази в комбінованих електричних мережах з ізольованою нейтраллю / **Є.В. Чорноус**, О.П. Ковальов, В.П. Чорноус, Б.О. Готін. а 201303104. Заявл. 14.03.2013. Опубл.25.02.2014. Бюл. № 4, – 6 с.: іл.

В публикациях, написанных в соавторстве, соискателю принадлежит: [1] – анализ влияния высших гармоник в составе тока утечки; [2] – анализ интегральных показателей тяжести поражения; [4] – обоснование мат. моделей и анализ влияния момента измерения значений потенциала нейтрали; [8] – обоснование необходимости применения “плавающих” ОФИ при определении фазы с утечкой, [9] – анализ трех этапов аварийной ситуации, обусловленной прикосновением человека фазе сети; [11] – разработка модели и выявление функциональной связи между мгновенной ЭДС двигателя в режиме выбега и его электромагнитной и механической постоянными времени; [13] – постановка задачи, получение и анализ функциональных зависимостей фазовой и амплитудных погрешностей; [16] – идея измерения частоты преобразователя путем фиксации моментов перехода через ноль его опорного напряжения.

### **АННОТАЦИИ**

**Чорноус Е.В. Обеспечение безопасности эксплуатации шахтной участковой электросети повышенной мощности на основе совершенствования систем шунтирования поврежденной фазы. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям) (технические науки). – ДОННТУ, Донецк, 2018г.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача повышения электробезопасности человека, эксплуатирующего шахтные участковые электрические сети, на основе быстродействующего способа определения поврежденной фазы. Сущность способа состоит в определении серии аргументов (начальных фаз) потенциала нейтрали и сопоставлении их среднего значения с опорными фазовыми интервалами.

Разработаны структурная схема и алгоритм функционирования устройства выбора поврежденной фазы, реализующих предложенный способ.

Основными факторами, искажающими кривую потенциала нейтрали и способными нарушить устойчивость устройства выбора фазы, являются динамические составляющие переходного процесса, высшие гармонические составляющие в составе потенциала нейтрали и поперечная несимметрия сети. При низкоомной утечке влияние указанных факторов незначительно, но с ростом сопротивления утечки их влияние резко возрастает.

Устойчивость и избирательность устройства выбора фазы в области высокоомной утечки повышается применением “плавающих” ОФИ, смещение которых необходимо осуществлять в функции текущего интегрального значения ПН.

Предложен критерий принятия решения, позволяющий алгоритму устройства выбора фазы определять необходимое и достаточное количество промежуточных результатов аргумента ПН для принятия обоснованного решения. Сущность критерия состоит в том, что кроме серии промежуточных результатов и их текущего среднего, дополнительно, для заданной доверительной вероятности, определяется доверительный интервал указанного среднего, который сопоставляется с ОФИ.

Экспериментальные исследования подтвердили эффективность применения нового способа идентификации, “плавающих” ОФИ и критерия принятия решения. УВФ функционирует устойчиво при значениях сопротивления утечки до 16 кОм, а время определения составляет от 2 мс до 12 мс, уменьшая время пребывания человека под напряжением и избавляя его от воздействия ЭДС двигателей.

**Ключевые слова:** электробезопасность, способ определения фазы с утечкой, потенциал нейтрали, поперечная несимметрия, сопротивление утечки, динамические и высшие гармонические составляющие, смещение опорных фазовых интервалов, принятие решения.

**Chornous E. Ensuring the safety of operation of the mine precinct electrical network of increased power based on the improvement of the damaged phase bypass systems. - Manuscript.**

Thesis for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.26.01 - Labor protection (by branches) (technical sciences). - DONNTU, Donetsk, 2018.

In the thesis, the actual scientific and technical problem of increasing the electrical safety of a person operating a mine precinct electrical network was solved on the basis of a fast-acting method for determining the damaged phase. The essence of the method consists in determining a series of arguments (initial phases) of the potential of a neutral and comparing their average value with the reference phase intervals. A block diagram and an algorithm for the functioning of a device for selecting a damaged phase are implemented that implement the proposed method.

A decision criterion is proposed that allows the method of selecting a phase to determine the necessary and sufficient number of intermediate results of the neutral potential argument to make an informed decision to bypass the phase.

**Key words:** electrical safety, method for determining phase with leakage, potential of neutral, transverse asymmetry, leakage resistance, dynamic and higher harmonic components, offset of reference phase intervals, decision making.