

**Е.В. Чорноус***ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)*

## **О ВЛИЯНИИ ПЕРЕХОДНОГО РЕЖИМА В ШАХТНОЙ УЧАСТКОВОЙ СЕТИ НА ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОЙ ФАЗЫ**

*Исследовано быстродействие работы алгоритма определения поврежденной фазы в шахтной сети с изолированной нейтралью в условиях воздействия помех и искажений реальной сети, обусловленных ее динамическим режимом при возникновении утечки. Установлено, что наиболее весомым фактором, влияющим на время идентификации поврежденной фазы, является сопротивление цепи утечки.*

**Ключевые слова:** защитное шунтирование, поврежденная фаза, ток утечки, устройство выбора фазы, переходный процесс.

### **Постановка проблемы**

Существующая тенденция к повышению требований по защите человека, заключающаяся, в частности, в снижении допустимой величины напряжения касания [1], требует новых технических решений по охране труда. Применительно к участковой шахтной сети ( $U=660$  или  $1140$  В, нейтраль изолирована, емкость «фаза – земля» до  $1$  мкФ). Таким решением является защитное шунтирование поврежденной фазы, заключающееся в ее автоматическом соединении с заземляющим устройством [2]. Это, в свою очередь, требует надежной работы и высокого быстродействия устройства определения (выбора) поврежденной фазы (УВФ).

В [3] предложен алгоритм идентификации поврежденной фазы по двум мгновенным значениям потенциала нейтрали  $u_N(t_1)$ , и  $u_N(t_2)$ , снятым для двух смежных значений аргумента  $\omega t_1$  и  $\omega t_2$ , разница между которыми  $\Delta\omega t$  фиксирована и находится в пределах от  $10$  до  $20$  градусов. В качестве опорного напряжения, задающего отсчет времени (или угла), удобно принять одно из линейных напряжений, например  $u_{AB}$ .

Требования к УВФ достаточно жесткие и в определенной мере противоречивые. С одной стороны, возможное пребывание человека под фазным напряжением требует максимального быстродействия. С другой стороны, ошибочное определение поврежденной фазы при еще не отключенном состоянии может привести к развитию аварийной ситуации, недопустимой в шахтных условиях [4].

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Учитывая неоспоримые преимущества защитного шунтирования, его применение уже

сейчас находит отражение в нормативных документах по обеспечению электробезопасности при разработке подземных и открытых месторождений полезных ископаемых некоторых стран мира [5].

Отечественные научно-исследовательские и промышленные предприятия интенсивно начали осваивать применение систем шунтирования поврежденной фазы [6], однако не более как дополнение к защитному отключению, которое является основной мерой обеспечения электробезопасности.

### **Цель (задачи) исследования**

Целью работы является, учитывая требования максимально быстрой идентификации поврежденной фазы, исследовать работоспособность и быстродействие предложенного алгоритма в условиях, когда в составе потенциала нейтрали есть динамические составляющие, обусловленные переходным процессом при возникновении утечки.

### **Основной материал исследования**

Упрощенная схема замещения шахтной участковой сети (рис. 1) содержит: сопротивления изоляции и емкости фаз кабелей по отношению к земле  $R$ ,  $C$ ; эквивалентные параметры трехфазного источника питания  $e$ ,  $r_0$ ,  $L_0$ ; эквивалентные параметры потребителей участка  $r_n$ ,  $L_n$ ; сопротивление утечки (в частности, сопротивление тела человека)  $R_h$ . При ее анализе в установленемся режиме однофазной утечки не учитываются продольные сопротивления кабелей (активные сопротивления и индуктивности), межвитковые емкости машин и трансформаторов, а также волновые процессы в кабельных коммуникациях.

$$\frac{d\Psi_0}{dt} = -\frac{1}{C} \left( \frac{\Psi_0}{R} + \frac{u_A}{3 \cdot R_h} \right),$$

$$\frac{du_A}{dt} = \frac{1}{C} \left( i_{0A} - i_{HA} - \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{R_h} \right) \cdot u_A \right),$$

$$\frac{di_{0A}}{dt} = \frac{1}{L_0} (e_A + \Psi_0 - i_{0A} \cdot r_0 - u_A), \quad (1)$$

$$\frac{di_{HA}}{dt} = \frac{1}{L_H} (-\Psi_0 + u_A - i_{HA} \cdot r_H),$$

где  $\Psi_0$  – потенциал (относительно земли) нейтрали источника питания;  $u_A$ ,  $u_B$ ,  $u_C$  – фазные напряжения.

Предварительный анализ показал, что характеристическое уравнение системы (1) в рабочей области параметров содержит два комплексных корня с частотой свободных колебаний от 7 до 20 кГц и два действительных корня, величина которых составляет от нескольких десятков до нескольких сотен. Однако динамическая составляющая потенциала нейтрали определяется, по сути, только одним из действительных корней, а постоянная интегрирования, связанная с другим действительным корнем, в десятки и сотни раз меньше. Что же касается высокочастотных колебаний, обусловленных комплексными корнями, то они почти не проявляют себя в составе потенциала нейтрали, что объясняется шунтирующим действием емкости «фаза – земля». Фактически это значит, что длительность переходного процесса можно характеризовать только одним действительным корнем или, вернее, величиной ему обратной и взятой по модулю (постоянной времени)  $\tau = 1/|p|$ .

Методика исследования заключается в сопоставлении значений аргумента потенциала нейтрали, полученных из анализа установившегося режима цепи рис. 1 и переходного режима, в котором проявляется влияние динамической составляющей. Порядок численного эксперимента следующий:

1. Для момента времени  $t_1$  с момента коммутации исследуется переходный процесс цепи рис. 1 при возникновении утечки (начальная фаза источника питания выбирается из условия наибольшей интенсивности переходного процесса). Определяются фактические значения величин  $u_{N\phi}(t_1)$ ,  $u_{N\phi}(t_2)$  с учетом погрешностей, вносимых динамическим процессом.

2. Путем моделирования работы УВФ вычисляется отношение входных данных и расчетное значение амплитуды потенциала нейтрали  $U_{m\text{расч}}$  (эти данные используются для косвенной оценки работоспособности алгоритма работы УВФ в условиях динамических возмущений).

3. Проверяется условие  $0,1 < u_{N\phi}(t_1)/u_{N\phi}(t_2) < 10$ , при выполнении которого вычисляется расчетное значение аргумента потенциала нейтрали  $\psi_{\text{расч}}$ . При невыполнении этого условия в данной модели значение  $\psi_{\text{расч}}$  обнуляется, а в реальном устройстве входные данные игнорируются, и идентификация продолжается уже при новых данных.

4. Опыты 1...3 повторяются для всего интервала длительности переходного процесса, в различных фазах и при различных значениях сопротивления утечки  $R_h$ .

5. Для установившегося симметричного режима цепи рис. 1 определяются фактическое значение аргумента потенциала нейтрали  $\psi_{\text{фак}}$  для данного  $R_h$  и устанавливаются его граничные значения  $\psi_{ep}$  для интервала  $0 < R_h < \infty$ .

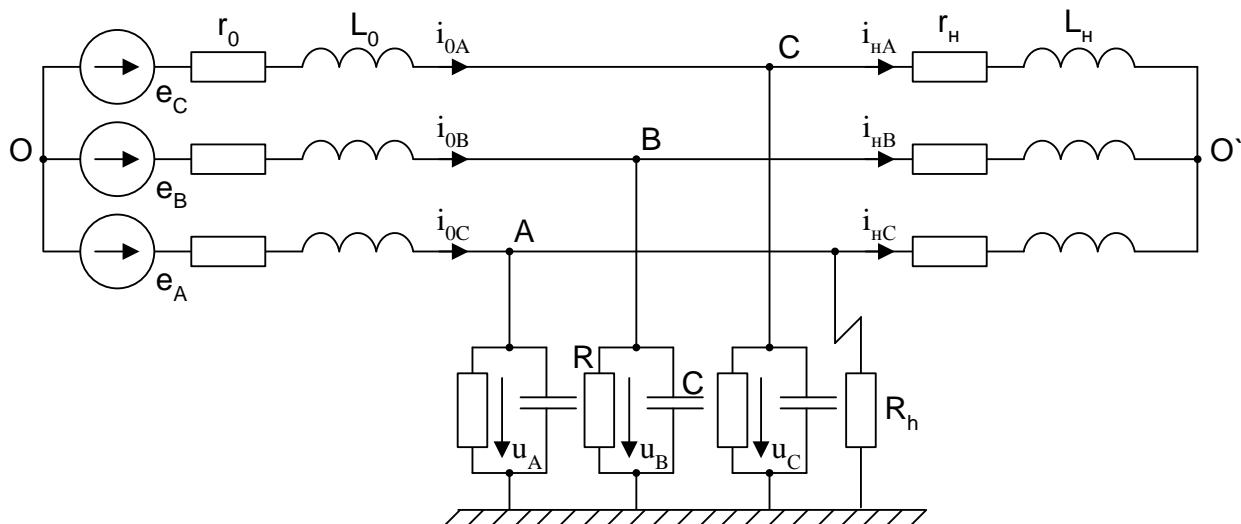


Рис. 1. Схема замещения участковой шахтной сети

Условия экспериментов:  $U=660$  В,  $C=0,75$  мкФ,  $R=100$  кОм,  $R_h$  меняется от 10 Ом до 25 кОм. Момент коммутации подбирается из условия наиболее интенсивного переходного процесса.

На рис. 2 приведены результаты первой серии численных экспериментов (утечка в фазе А,  $R_h=2,5$  кОм, наибольшая постоянная времени  $\tau=0,0049$  с (88 эл. градусов), начальная фаза эдс  $E_A$  в момент коммутации – 50°, значение аргумента потенциала нейтрали без возмущения  $\Psi_{\text{фак}}=123^\circ$ , его амплитуда 256 В, допустимые границы изменения аргумента  $\Psi_{ep}$  от 25° до 145°).

На рис. 2а приведены: расчетное  $\Psi_{\text{расч}}$  и фактическое  $\Psi_{\text{фак}}$  значения аргумента потенциала нейтрали, их допустимые границы  $\Psi_{ep}$ , а также отношение входных величин  $u_{N\phi}(t_1)/u_{N\phi}(t_2)$  (масштаб увеличен в 100 раз). Справа приведены кривые потенциала нейтрали  $u_N(t)$  в переходном режиме, его установившаяся  $u_{Nyest}(t)$  и свободная  $u_{Nce}(t)$  составляющие, а также расчетное значение амплитуды потенциала нейтрали  $U_{\text{трасч}}$ , по знаку которой отбрасывается «лишний» корень  $\Psi_{\text{расч}}$  [3].

Проанализируем возможные варианты работы УВФ на основании кривых рис. 2. На начальном участке ( $0 < \omega t < 40^\circ$ ) происходит интенсивный рост потенциала нейтрали. Сигнал на запуск УВФ может быть подан уже при значении  $\omega t$  от 25° до 30°. Ближайший переход потенциала нейтрали через нуль соответствует моменту  $\omega t \approx 70^\circ$ . Это значит, что для идентификации имеется интервал от 40° до 75°. Этого интервала достаточно для получения трех различных значений  $\Psi_{\text{расч}}$ , и, поскольку, все они находятся в области от 25° до 125°, принять решение о шунтировании фазы А. В этом случае время определе-

ния поврежденной фазы с момента коммутации составляет приблизительно 70° (4 мс).

Представим, однако, худшую ситуацию, когда времени для трехкратной идентификации на начальной стадии переходного процесса оказалось недостаточно. Это может произойти по двум причинам.

Во-первых, прежде чем будут выполнены три опыта, дающие одинаковые результаты, наступает «неблагоприятная» область, где потенциал нейтрали оказывается вблизи нуля и условия п. 2 не выполняются. При этом входные данные алгоритмом игнорируются, а повторная трехкратная идентификация задерживается до наступления следующей «благоприятной» области (на рис. 2 это  $\omega t > 95^\circ$ ). Задержка в принятии решения на защитное шунтирование составляет около 70° (4 мс).

Во-вторых, первая идентификация на начальном участке из-за существенного динамического возмущения может оказаться ложной (это нельзя исключить). В этом случае ее результат не совпадает с результатами двух последующих. Поскольку для принятия решения необходимы одинаковые результаты трех, следующих друг за другом опытов, то при наступлении «нерабочей» области результаты, полученные на начальной стадии, отбрасываются. Повторяется предыдущая ситуация: идентификация задерживается до новой «благоприятной» области. И в этом случае задержка составляет приблизительно 70° (4 мс).

Таким образом, вне зависимости от причины, по которой трехкратная идентификация на первом этапе не состоялась, мы получаем задержку, в результате которой время принятия решения на защитное шунтирование достигает около 150° (8 мс).

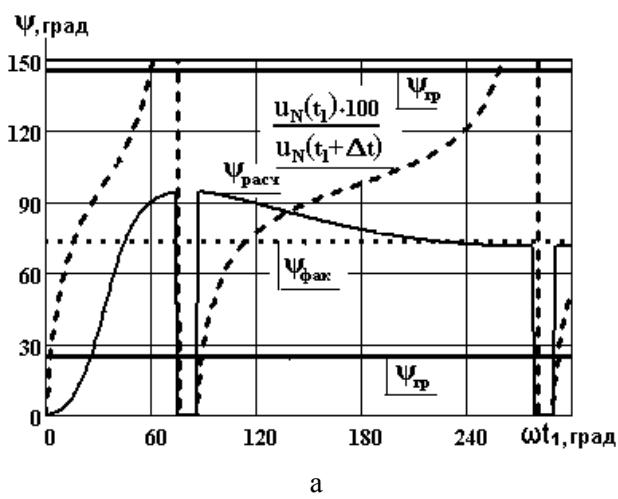
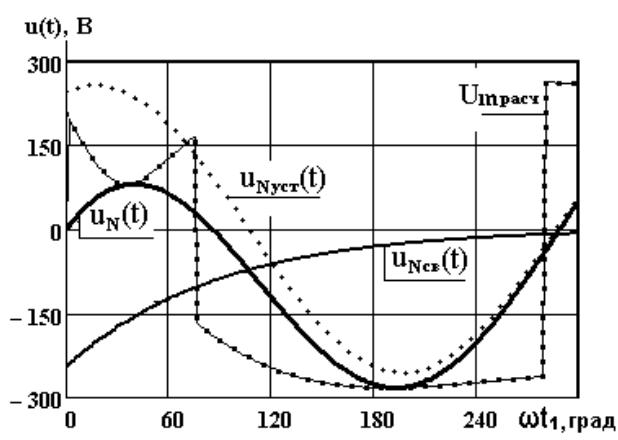


Рис. 2. Результаты третьей серии опытов,  $R_h=2,5$  кОм:

*а* – сопоставление фактических и вычисленных аргументов потенциала нейтрали;  
*б* – кривые переходного процесса



Если для защитного шунтирования применить тиристоры, то полное время срабатывания защиты при благоприятном варианте составит от 8 до 15 мс, а в худшем варианте может затянуться до 20 мс. Но даже это время в 10 раз меньше нормированного времени защитного отключения согласно [7].

На рис. 3 приведены результаты еще одной серии численных экспериментов (утечка в фазе А,  $R_h=250$  Ом, наибольшая постоянная времени  $\tau=0,55$  мс (10 эл. градусов), начальная фаза эдс  $E_A$  в момент коммутации – 80°, значение аргумента потенциала нейтрали без возмущения  $\Psi_{фак}=90,1^\circ$ , его амплитуда 523 В, допустимые границы изменения аргумента  $\Psi_{ep}$  от -5° до 115°). Обозначения на рисунках те же, что и в предыдущей серии опытов.

Переходный процесс весьма скоротечен. Сигнал на запуск алгоритма подается уже через 10° с момента коммутации, а еще через 40...45° выполняется серия из трех промежуточных дан-

ных об аргументе потенциала нейтрали для идентификации. Вероятность задержек из-за ложной идентификации ничтожна, так как расчетное значение аргумента потенциала нейтрали находится в пределах своих границ в отличие от первой серии опытов (см. рис. 2 интервал  $\omega t < 20^\circ$ ). Характерно то, что уже через 40° расчетное и фактическое значения аргумента потенциала нейтрали практически совпадают. Таким образом, уменьшение сопротивления утечки более благоприятно для ускоренной идентификации поврежденной фазы. Минимальное время идентификации составляет около 3 мс с момента коммутации.

Рассмотрим результаты аналогичных исследований при  $R_h=10$  кОм, представленные на рис. 4 ( $R_h=10$  кОм, наибольшая постоянная времени  $\tau=14$  мс (253 эл. градусов), начальная фаза эдс  $E_A$  в момент коммутации – 40°, значение аргумента потенциала нейтрали без возмущения  $\Psi_{фак}=63^\circ$ , его амплитуда 74 В, допустимые границы

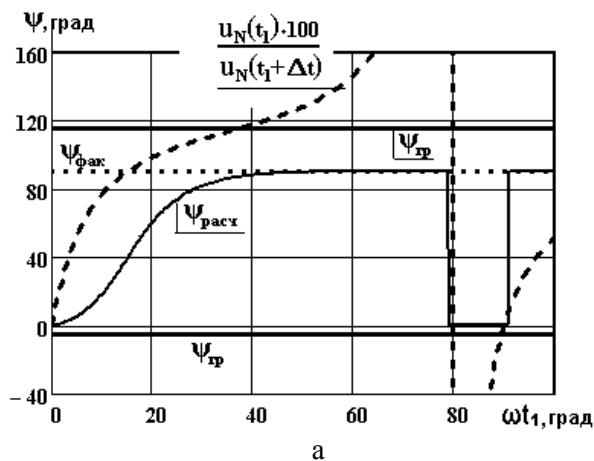


Рис. 3. Результаты второй серии опытов,  $R_h=250$  Ом:

*а* – сопоставление фактических и вычисленных аргументов потенциала нейтрали;  
*б* – кривые переходного процесса

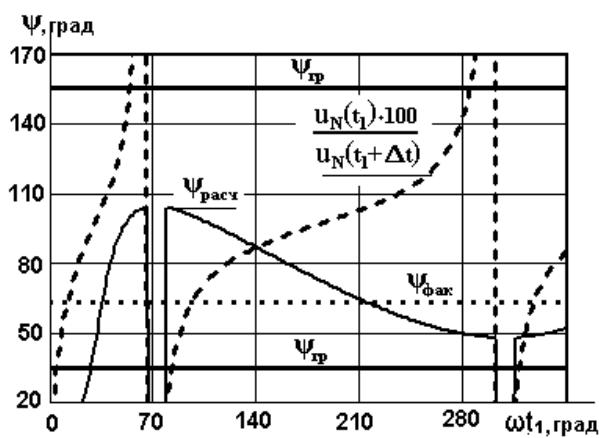
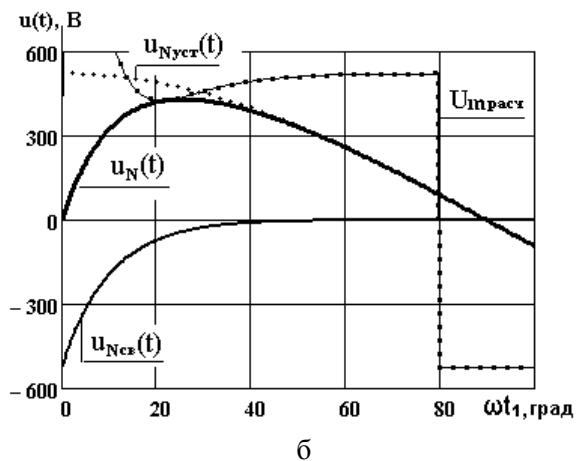
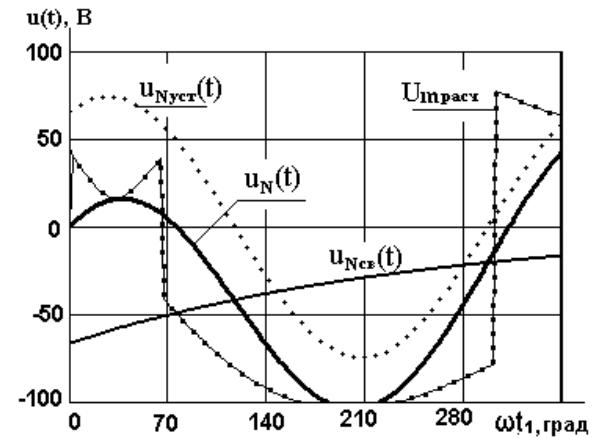


Рис. 4. Результаты третьей серии опытов,  $R_h=10$  кОм:

*а* – сопоставление фактических и вычисленных аргументов потенциала нейтрали;  
*б* – кривые переходного процесса



изменения аргумента  $\psi_{cp}$  от  $35^\circ$  до  $155^\circ$ ). Обозначения на рисунках те же, что и в предыдущих опытах.

Переходный процесс затянувшийся. Его практическая длительность около 50 мс. На первой его стадии (до  $120^\circ$  с момента коммутации) потенциал нейтрали недостаточен для запуска УВФ. Обусловленная этим задержка составляет до 8 мс.

Однако далее, на интервале от  $130^\circ$  до  $200^\circ$  условия для трехкратной идентификации и принятия решения благоприятные. Во-первых, расчетное значение аргумента  $\psi_{расч}$  находится в рабочей зоне, плавно изменяется, приближаясь к его фактическому значению  $\psi_{фак}$ . Во-вторых, отношение входных данных  $i_{N\phi}(t_1)$ ,  $i_{N\phi}(t_2)$  не имеет «прыжков» и разрывов и находится в благоприятном интервале от 0,8 до 1,4. В-третьих, расчетное значение  $U_{t_{расч}}$ , позволяющее выбрать нужный корень при определении  $\psi_{расч}$ , также не имеет разрывов и не меняет своего знака. Это позволяет алгоритму уже через  $45^\circ \dots 50^\circ$  надежно определить поврежденную фазу и принять решение на защитное шунтирование. Полное время решения задачи идентификации находится в пределах от 10 до 11 мс. Это время практически то же, что и в первой серии опытов.

Таким образом, результаты третьей серии численных экспериментов при достаточно большом сопротивлении утечки показали, что УВФ, работая по предложенному алгоритму, устойчиво и надежно определяет фазу, в которой произошла утечка, причем время идентификации при наиболее неблагоприятной ситуации не превышает половину периода питающего напряжения (0,01 с).

## Выводы

Выполнено исследование работоспособности алгоритма идентификации поврежденной фазы шахтной участковой сети, основанное на определении аргумента потенциала нейтрали по двум его мгновенным значениям, в условиях динамических возмущений вследствие переходного режима при возникновении утечки. Исследование построено на моделировании динамики сети с одновременным моделированием алгоритма идентификации фазы с утечкой. Сопротивление утечки варьировалось в пределах от 0,25 до 10 кОм.

Установлено:

- предложенный алгоритм обеспечивает устойчивую и надежную идентификацию поврежденной фазы на всем исследованном диапазоне изменения сопротивления утечки;

- максимальное время идентификации при наиболее неблагоприятных условиях не превышает 11 мс;

- уменьшение сопротивления утечки ( $R_h < 0,25$  кОм) более благоприятно для ускорения идентификации. Время определения поврежденной фазы может быть уменьшено до 3 мс.

## Список литературы

1. High voltage mining equipment for use underground: handbook. – Sydney, N.S.W.: Standards Australia, 2007. – 68 p.
2. Щуцкий, В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок / В.И. Щуцкий, В.О. Жидков, Ю.Н. Ильин // М.: Энергоатомиздат, 1986. – 152 с.
3. Чорноус, Е.В. Об альтернативном варианте защиты шахтной сети от тока утечки / Электричество. – 2009. – №8. – С. 33-36.
4. Чорноус, Е.В. Моделирование режима заземляющего контура при двухфазном замыкании шахтной участковой сети в разнесенных точках / Донбас-2020: наука і техніка – виробництву: II науково-практична конференція, 03-04 лютого 2004 року.: зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – С. 353-357.
5. AS/NZS 2081.3:2002 Electrical equipment for coal and shale mines. Electrical protection devices – Part 3: Earth-leakage protection systems for use on earth-fault current limited systems (IT systems). – Jointly published by Standards Australia International Ltd, GPO Box 5420, Sydney, NSW 2001 and standards New Zealand, Private Bag 2439, Wellington 6020. – ISBN 0 7337 4749 3; 12 August 2002.
6. Савицкий, А.В. Микроконтроллерные аппараты защиты от токов утечек на землю в шахтных распределительных сетях напряжением до 1200 В / А.В. Савицкий, В.Н. Савицкий, А.И. Белошистов // Взрывозащищенное электрооборудование: Сб. науч. тр. УкрНИИВЭ. – Донецк: ООО «АИР», 2013. – С. 83-96.
7. Правила безопасности в угольных шахтах. С изменениями, внесенными на основании Приказа Министерства угля и энергетики Донецкой Народной Республики, Государственного Комитета горного и технического надзора Донецкой Народной Республики от 07.07.2016 №63/319, от 20.06.2017 №157/291. Регистрационный №1284 от 17 мая 2016 г. – Государственная информационная система нормативно-правовых актов Донецкой Народной Республики. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gisnpa-dnr.ru/npa/0024-0105-36-208-20160418/>

**E.V. Chornous**

Donetsk National Technical University (Donetsk)

**ON THE IMPACT OF THE TRANSITIONAL MODE  
IN THE MINE SITE NETWORK ON DAMAGED PHASE TIME DEFINITION**

**Background.** Protective shunting is becoming increasingly important in the modern concept of electrical safety of mine electrical networks. The most stringent requirements for reliability and speed imposed on the devices for selecting the damaged phase. In this regard, investigated the efficiency and speed of the previously proposed algorithm for determining the damaged phase under conditions when the neutral potential contains dynamic components determined by the transient process in the event of a leak.

**Materials and/or methods.** For this purpose, the mathematical model of the mine network used to calculate the argument of the neutral potential taking into account the dynamic components and compared with its actual value and the boundaries of the reference phase intervals. The identification time determined by obtaining three consecutive calculated values of the neutral potential argument corresponding to the reference phase interval. The study performed for different values of leakage resistance.

**Results.** Established that the algorithm provides reliable identification in the case of leakage resistance up to 10 kOhm in a time of not more than 11 ms. Also, the regularity of increasing the operating speed while reducing the leakage resistance revealed.

**Conclusion.** In the conditions of increasing the requirements for electrical safety, as well as the increasing power and voltage classes of mine electrical equipment, the proposed algorithm can provide a reliable and rapid determination of the damaged phase for its subsequent shunting, thereby reducing the value of the leakage current up to zero.

**Keywords:** protective shunting, damaged phase, leakage current, phase selection device, transition process.

**Сведения об авторе****Е.В. Чорноус**

СПИН-код: 9090-8141

Телефон: +380 (62) 305-23-58

Эл. почта: emitoe@yandex.ru

Статья поступила 07.12.2018 г.

© Е.В. Чорноус, 2018

Рецензент д.т.н., доц. И.А. Бершадский