

УДК 621.316.925.014.6

К ВОПРОСУ ЗАЩИТЫ ОТ ТОКОВ УТЕЧКИ В УСЛОВИЯХ РУДНИЧНЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

О. Н. Синчук, В. С. Моркун, А. Г. Ликаренко, А. А. Петриченко

Государственное высшее учебное заведение «Криворожский национальный университет»

ул. XXII Партсъезда, 11, г. Кривой Рог, 50027, Украина. E-mail: speet@ukr.net

Рассмотрены вопросы электробезопасности в рудничных комбинированных электрических сетях, содержащих участки промышленной частоты, участки постоянного тока и участки изменяемой частоты 0–70 Гц в связи с использованием полупроводниковых преобразователей для регулирования электрических приводов постоянного и переменного токов. Приведены результаты исследований защитных характеристик аппаратов защиты от токов утечки АЗАК и САЗУ в условиях комбинированной электрической сети с целью оценки возможности использования в них постоянного тока для контроля сопротивлений изоляции и утечек. Установлено бесперспективность направления создания новых аппаратов защиты от токов утечки на постоянном оперативном токе на базе существующих аппаратов защиты для рудничных комбинированных электрических сетей. Альтернативой является разработка для рудничных комбинированных сетей аппаратуры защиты на переменном оперативном токе при выделении и контроле его активной составляющей.

Ключевые слова: защитная характеристика, ток утечки, комбинированная электрическая сеть.

ДО ПИТАННЯ ЗАХИСТУ ВІД СТРУМІВ ВИТОКУ В УМОВАХ РУДНИКОВИХ КОМБІНОВАНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

О. М. Синчук, В. С. Моркун, А. Г. Лікаренко, А. А. Петриченко

Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»

вул. XXII Парт'їзду, 11, м. Кривий Ріг, 50027, Україна. E-mail: speet@ukr.net

Розглянуті питання електробезпеки в рудникових комбінованих електричних мережах, які містять ділянки промислової частоти, ділянки постійного струму та ділянки змінної частоти 0–70 Гц в зв'язку з використанням напівпровідникових перетворювачів для регулювання електричних приводів постійного та змінного струмів. Наведено результати досліджень захисних характеристик апаратів захисту від струмів витоку АЗАК і САЗУ в умовах комбінованої електричної мережі з метою оцінки можливості використання в них постійного струму для контролю опору ізоляції та витоків. Встановлено безперспективність наряду створення нових апаратів захисту від струмів витоку на постійному оперативному струмі на базі існуючих апаратів захисту для рудникових комбінованих електричних мереж. Альтернативою являється розробка для рудникових комбінованих електричних мереж апаратури захисту на змінному оперативному струмі при виділенні та контролі його активної складової.

Ключові слова: захисна характеристика, струм витоку, комбінована електрична мережа.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Для защиты горнорабочих от поражения электрическим током и других опасностей вследствие утечек тока на землю рудничные электрические сети до 1200 В с изолированной нейтралью трансформатора, применяемые в подземных выработках угольных и горнорудных предприятий, оснащены рудничными аппаратами от токов утечки, к которым относят аппараты общесетевой защиты от утечек, устройства компенсации емкостной составляющей тока утечки (встраиваемые в аппараты защиты или индивидуального исполнения), фазные короткозамыкатели и аппараты предупредительного контроля и блокировки [1].

Применяемые в отечественной и зарубежной практике схемы аппаратов защиты от токов утечки основаны на принципе измерения активного сопротивления фаз сети относительно земли. Они предназначены для применения в простых сетях промышленной частоты, где основными дестабилизирующими факторами являются параметры изоляции сети. Однако, в этих сетях уже давно начато внедрение полупроводниковых преобразователей для регулируемых электроприводов постоянного и переменного токов, что превратило эти сети в комбинированные, состоящие из участков промышленной частоты, участков постоянного тока и участка изменяемой частоты 0–70 Гц. Поскольку существующие

аппараты защиты выполнены в требованиях ГОСТ 22929-78 [1], который не распространяется на аппараты защиты для комбинированных сетей, то и применение существующих аппаратов защиты в этих сетях неправомерно. Это было известно еще в 80-х годах прошлого века, когда предпринимались попытки внедрения в шахты комбайнов с регулируемой подачей на постоянном токе. Однако аппарат защиты от токов утечки для комбинированных сетей до настоящего времени не создан.

Анализ исследований и публикаций. Многочисленные исследования токов утечки на участках промышленной частоты и изменяемой частоты показали, что они являются переменными, а при несимметричном токе утечки на участке постоянного тока появляется постоянная составляющая, возникновение которой является причиной неработоспособности серийных общесетевых аппаратов защиты от токов утечки [2–4]. Необходима разработка системы защиты, свободной от этого недостатка. Его давно и безуспешно пытаются устранить созданием аппаратуры защиты от утечек для сетей с выпрямителями на базе существующих аппаратов защиты на постоянном оперативном токе, которые разработаны для трехфазных электрических сетей переменного тока [5–7]. Однако давно известно, что любой аппарат, работающий на постоянном оперативном токе, не

может обеспечить безопасность эксплуатации сетей с выпрямителями из-за функциональных отказов при возникновении утечек или плавном снижении сопротивления изоляции на участке постоянного тока, так как появляется дополнительный источник постоянного тока между сетью и землей, напряжение которого значительно выше напряжения оперативного тока аппарата защиты [6]. Более тяжелые последствия возникают в распределительных сетях напряжением 1140 В, где для ограничения тока утечки используют устройства обнаружения поврежденной фазы и шунтирование ее через малое сопротивление. Однако, это приводит к тому, что протекающий ток будет подпитывать утечки на участках постоянного тока и изменяющейся частоты, т.е. ухудшит условия обеспечения электробезопасности [6].

Предполагалось дополнительно применить асимметр для контроля асимметрии напряжения положительного и отрицательного полюсов относительно земли. При возникновении асимметрии сеть будет отключаться асимметром, во всех остальных случаях – общесетевым аппаратом. Однако является очевидным что аппарат защиты на постоянном оперативном токе принципиально невозможно отстроить от дестабилизирующего действия утечек на участке постоянного тока.

Цель работы – исследование защитных характеристик аппаратов защиты от токов утечки АЗАК и САЗУ в условиях комбинированной электрической сети для оценки возможности использования в них постоянного тока для контроля сопротивлений изоляции и утечек.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Нами были проведены исследования защитных характеристик аппаратов защиты АЗАК и САЗУ, имеющих принципиально различные схемные решения. Для проведения исследований была создана физическая модель комбинированной сети, которая содержала промышленный выпрямитель и тиристорный преобразователь напряжения, а в качестве их нагрузки использовалась система “двигатель–генератор”. Генератор нагружался на балластные сопротивления.

Параметры изоляции участков сети принимались сосредоточенными, а их имитация осуществлялась набором соответствующих сопротивлений (резисторов) и конденсаторов. Испытание аппаратов защиты осуществлялись методом активного эксперимента. Общие условия и методика испытаний аппаратов защиты соответствовала ГОСТ 22929 [1].

Защитные характеристики представлены в относительных единицах, при базовой величине уставки по отключающему сопротивлению утечки:

$$r'_{уст} = \frac{U_{\phi}}{I_{дл.д}} = \frac{220}{25} = 8,8 \text{ кОм}.$$

На рис. 1 представлены защитные характеристики аппаратов АЗУР (1, 3, 5) и САЗУ (2, 4, 6) в комбинированной сети, содержащей электропривод постоянного тока, питаемый через нерегулируемый выпрямитель.

Защитные характеристики являются зависимо-

стями однофазной $r'_{y(\approx)}$ и однополюсной $r'_{y(=)}$ утечек от сопротивления изоляции на участках переменного $R_{u(\approx)}$ и постоянного $R_{u(=)}$ токов. Параметры изоляции на участках, где не создавалась утечка, принимались равными $R_{u(=)}^* = R_{u(\approx)}^* = 11,25$. При утечках на отрицательном полюсе отключающие сопротивление для обеих аппаратов значительно превышали требуемую защитную характеристику: САЗУ в (4,5–7) раз; АЗУР в (2–6,5) раз. При утечках на положительном полюсе выпрямителя АЗУР и САЗУ не срабатывали, т.е. $r'_{y(+)} = \infty$. Введение емкости в электрическую сеть, как до выпрямителя, так и после него, практически никакого влияния на отключающие сопротивление утечки САЗУ–2 и АЗУР не оказывало. Напряжение выпрямителя даже при высоком симметричном сопротивлении изоляции (99 кОм) на участке выпрямленного напряжения существенно увеличивает отключающие сопротивление при однофазной утечке до выпрямителя как в аппарате АЗУР, так и САЗУ, т.е. имеет место значительная “перезащита” сети.

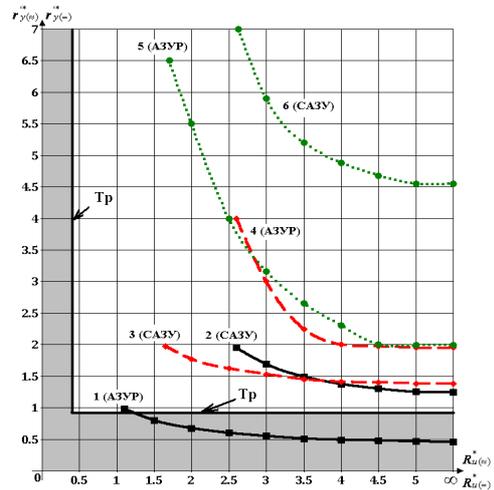


Рисунок 1 – Защитные характеристики аппаратов защиты АЗУР и САЗУ при работе в сети неуправляемого выпрямителя и утечках на стороне питания и выпрямленной стороне:

- 1,2 - $r'_{y(\approx)} = f(R_{u(\approx)}^*; R_{u(=)}^* = 11,25); C_u^{\approx} = C_u^{\approx} = 0$;
 - 3,4 - $r'_{y(\approx)} = f(R_{u(=)}^*; R_{u(\approx)}^* = 11,25); C_u^{\approx} = C_u^{\approx} = 0$;
 - 5,6 - $r'_{y(=)} = f(R_{u(\approx)}^*; R_{u(=)}^* = 11,25); C_u^{\approx} = C_u^{\approx} = 0$;
 - $r'_{y(+)} = \infty$; T_p – требуемая защитная характеристика по электробезопасности :
- $$r'_{уст} = U_{\phi} / I_{дл.д}; R_{u(кр)} = 3,5 \text{ кОм}.$$

Из сравнения защитных характеристик АЗУР и САЗУ можно сделать вывод, что они не обеспечивают минимальную безопасность при работе в сети неуправляемого выпрямителя, т.к. при утечках с положительного полюса имеют место их полные функциональные отказы. При утечках в других точках комбинированной сети аппараты срабатывают со значительным превышением требуемого по условиям электробезопасности значения (в 1,5–7 раз),

т.е. создают неприемлемую по условиям эксплуатации “перезащиту” сети.

Защитные характеристики аппаратов САЗУ и АЗАК в комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения для регулируемого электропривода постоянного тока снимались для случаев возникновения однофазной утечки до и после выпрямителя $r_{y(\approx)}^*$, $r_{y(=)}^*$ в зависимости от сопротивления изоляции на участке, где возникла утечка $R_{u(\approx)}^*$ или $R_{u(=)}^*$ и величины регулируемого напряжения $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250 В$. На участке, где не создавалась утечка, сопротивление изоляции устанавливались равным 99 кОм.

На рис. 2 представлены защитные характеристики аппарата АЗАК при утечке тока до тиристорного регулятора, а на рис. 3 – для аппарата САЗУ в зависимости от регулируемого напряжения $U_{пр} = 0, 50, 100, 150, 200 В$ и сопротивления изоляции участков сети переменного тока $R_{u(\approx)}^*$ и постоянного токов $R_{u(=)}^*$.

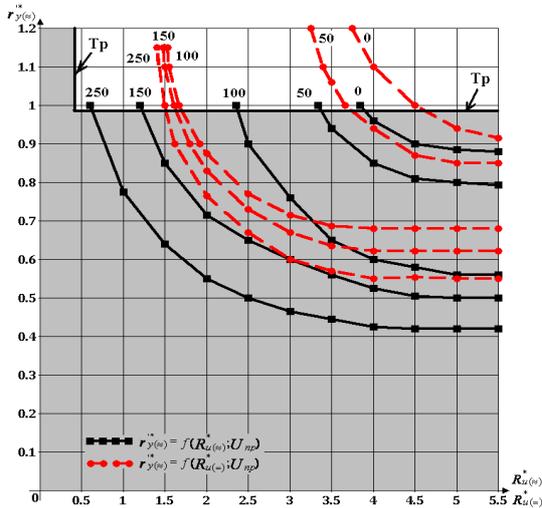


Рисунок 2 – Защитные характеристики АЗАК при утечке до тиристорного регулятора напряжения

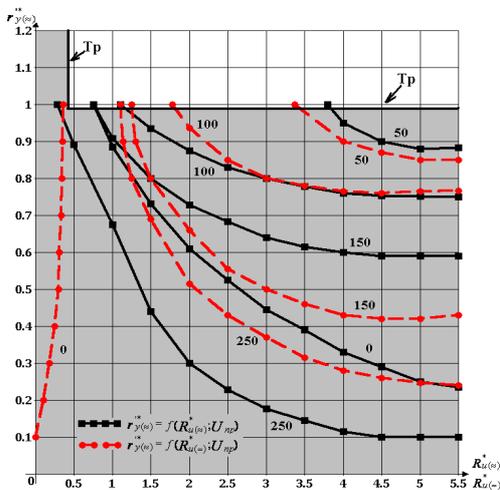


Рисунок 3 – Защитные характеристики САЗУ при утечке до тиристорного регулятора напряжения

Сопротивление изоляции участка сети без утечки $R_{u(=)}^*$ или $R_{u(\approx)}^*$ принималось 11,25, а емкость изоляции до и после преобразователя – равной нулю.

Так как защитные характеристики АЗАК и САЗУ при утечке на участке сети до выпрямителя при включенном его состоянии находятся существенно ниже характеристики, требуемой по условиям минимальной безопасности (затененная область), то эти аппараты её не обеспечивают, причем в аппарате САЗУ при критическом значении сопротивления изоляции имеет место его полный функциональный отказ, т.е. несрабатывание.

Таким образом, защитные характеристики аппаратов АЗАК и САЗУ (рис. 2, 3) опровергают существующее мнение, что симметричное сопротивление изоляции на участке постоянного тока никакого влияния на их работу не оказывает.

На рис. 4, 5 представлены защитные характеристики соответственно аппаратов АЗАК и САЗУ в комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения на участке сети постоянного тока.

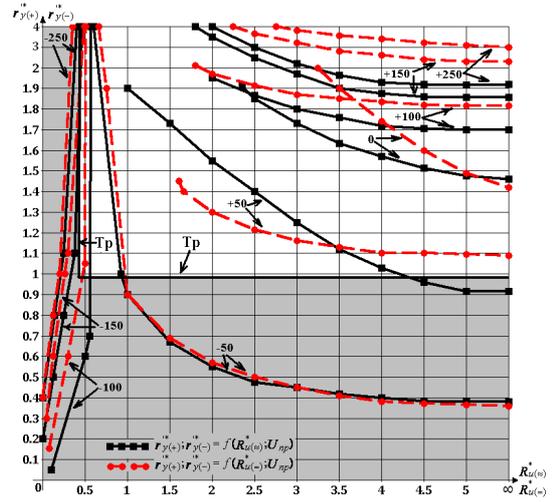


Рисунок 4 – Защитные характеристики АЗАК на участке постоянного тока

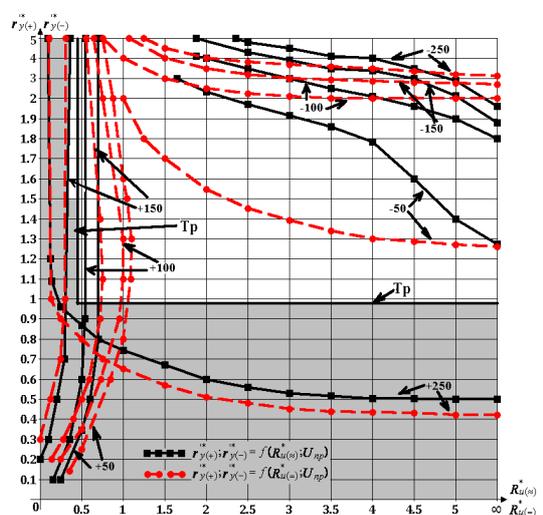


Рисунок 5 – Защитные характеристики САЗУ на участке постоянного тока

Эти защитные характеристики есть зависимости предельно отключающего сопротивления утечки с положительного (+) или отрицательного (-) полюса тиристорного регулятора в зависимости от:

1) сопротивления изоляции участка промышленной частоты $R_{u(\approx)}^*$ и напряжения преобразователя $U_{np} = 0; 50; 100; 150; 250 В$: $r_{y(+)}^* = f(R_{u(\approx)}^*; U_{np})$ и $r_{y(-)}^* = f(R_{u(\approx)}^*; U_{np})$;

2) сопротивления изоляции участка постоянного тока $R_{u(=)}^*$ и тех же значений напряжения U_{np} преобразователя:

$$r_{y(+)}^* = f(R_{u(=)}^*; U_{np}) \text{ и } r_{y(-)}^* = f(R_{u(=)}^*; U_{np}).$$

Сопротивление изоляции участка без утечки: $R_{u(=)}^* = R_{u(\approx)}^* = 11,25$; емкость изоляции участков сети: $C_u = 0$.

Из сравнений защитных характеристик АЗАК (рис. 4) и САЗУ (рис. 5) видно, что влияние однополюсных утечек тока на их защитные характеристики практически одинаково. При утечке с положительного полюса защитные характеристики аппаратов располагаются значительно ниже требуемой, по условиям электробезопасности, а в зоне критического сопротивления изоляции они имеют разрыв, т.е. не срабатывают. При утечке с отрицательного полюса защитные характеристики АЗАК и САЗУ располагаются значительно выше требуемой, т.е. имеет место “перезащита” сети в 2–7 раз, что не приемлемо по условиям эксплуатации.

Таким образом, защитные характеристики аппаратов защиты на постоянном оперативном токе не удовлетворяют требованиям электробезопасности и условиям эксплуатации комбинированных сетей. Поэтому направления создания аппаратуры защиты от утечек для сетей с преобразователями энергии на базе существующих аппаратов от утечек в трехфазных электрических сетях, т.е. аппаратов на постоянном оперативном токе является *бесперспективным*. Необходимо вести разработку аппаратуры защиты для этих сетей на переменном оперативном токе, выделяя и контролируя его активную составляющую [5].

ВЫВОДЫ. 1. В комбинированной сети с неуправляемым выпрямителем защитные характеристики аппарата защиты на постоянном оперативном токе существенно отличаются от требуемой по условиям электробезопасности. На участке промышленной частоты $r'_{yo} = f(R_{u(\approx)})$, уже при симметричной изоляции 99 кОм на участке постоянного тока, у аппарата САЗУ они проходят значительно выше требуемой (2-5 раз), а АЗАК – в зоне значений меньших половины требуемых. Зависимость отключающих сопротивлений однофазных сопротивлений изоляции на участке постоянного тока $r'_{yo} = f(R_{u(=)})$ отличается от требуемой в 2–7 раз.

2. В комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения защитные характеристики исследуемых аппаратов на участке промышленной частоты в зависимости от параметров симметричной изоляции на участке промышленной частоты

$r'_{yo} = f(R_{u(\approx)})$ и постоянного тока $r'_{yo} = f(R_{u(=)})$ проходят существенно ниже требуемой, т.е. электробезопасность не обеспечивается. Причем у аппарата САЗУ имеет место функциональный отказ при напряжении выпрямителя $U_{np} = 0$, вплоть до критического значения сопротивления изоляции.

3. В комбинированной сети с тиристорным регулятором напряжения защитные характеристики исследуемых аппаратов на участке постоянного тока с отрицательного и положительного полюса в зависимости от сопротивлений симметричной изоляции на участках промышленной частоты r_{yo}^+ ; $r_{yo}^- = f(R_{u(\approx)})$ и постоянного тока r_{yo}^+ ; $r_{yo}^- = f(R_{u(=)})$ имеют разрывы, а их участки проходят как выше, так и ниже требуемой защитной характеристики.

4. Направление создания аппаратуры защиты от утечек для сетей с преобразователями энергии на базе существующих аппаратов защиты на постоянном оперативном токе следует признать бесперспективным. Альтернативой ему является разработка для этих сетей аппаратуры на переменном оперативном токе при выделении и контроле его активной составляющей.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 22929. Аппараты защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200В. Общие технические условия. Введен 01.01.1979.
- Траубе Е.С., Лукашевич Ю.Ю., Шавелкин А.А. Закономерности формирования токов утечки на землю в шахтных электрических сетях с преобразователями частоты // Безопасная, экономичная и надежная эксплуатация взрывозащищенного электрооборудования: сбор. научн. трудов ВНИИВЭ. – Донецк, 1990. – Вып. № 4.
- Дзюбан В.С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. – М.: Недра, 1982. – 152 с.
- Лейбов Р.М. Утечки в шахтных электрических сетях. – М.: Углетехиздат, 1952. – 363 с.
- Дзюбан В.С., Кононенко В.П., Леонтьева Л.А. О защите от утечек сетей, питающих через выпрямители электроприводы постоянного тока // Взрывозащищенное электрооборудование: сбор. науч. трудов ВНИИВЭ. – Донецк, 1976. – Вып. № 12.
- Савицкий В.И., Белошистов А.И. Защита от токов утечки в комбинированных распределительных сетях электроснабжения очистных комбайнов // Уголь Украины. – 2005. – № 12 (612).
- Киампо Е.М. Исследование и разработка аппаратуры защиты от утечек тока для тиристорного электропривода горных машин: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Восточный НИИ по безопасности работ в горной промышленности. – Кемерово, 1985.
- ГОСТ ССБТ 12.4.155-85. Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические условия. Дата введения: 01.01.1986.
- Гладиш Л.В. Изоляция подземных электроустановок шахт и электробезопасность. – М.: Недра, 1964. – 261 с.
- Шишкин Н.Ф., Миндели Г.В. Электробезопасность в шахтных и взрывобезопасных помещениях. – Тбилиси: Цодна, 1960.

**ON THE PROBLEM OF LEAKAGE CURRENT PROTECTION
IN THE ORE-MINING COMBINED POWER SUPPLY NETWORKS**

O. Sinchuk, V. Morkun, A. Likarenko, A. Petrychenko

Kryvyi Rih National University

vul. XXII Parts'ezda 11, Krivoy Rog, 50027, Ukraine. E-mail: speet@ukr.net

The article is devoted to the questions of electrical safety in the ore-mining combined power supply networks that contain areas of industrial frequency, DC zones and zones of variable frequency 0 -70 Hz as a result of the use of semiconductor converters for regulating AC and DC electric drives. The results of the research of protective characteristics of leakage-current protection devices AZAK and SAZY were presented for the combined power supply networks in order to assess the possibility of using DC to control insulation resistance and current leakage. It was established that development of the branch of new DC leakage-current protection devices and were based on the existing devices for ore-mining combined electrical supply networks would not be rational. The alternative way for the ore-mining combined electrical supply networks is development of AC protection devices operating while selection and control of AC active component.

Key words: protective characteristics, leakage current, combined electrical supply networks.

REFERENCES

1. GOST 22929. Devices of protection against leakage current for the electrical grids 1200V. General specifications. Introduced on Jan 1, 1979.
2. Traube, E.S., Lukashovich, Yu.Yu., Shavelkin, A.A. (1990), "Laws of formation of earth leakage currents in mine power grids with frequency converters", *Sbornik nauchnykh trudov VNIIVE*, vol. 4.
3. Dzyuban, V. (1982), *Apparatyi zaschityi ot tokov utechki v shahtnyih elektricheskikh setyah* [Apparatuses of protection against leakage currents in mine power grids], Nedra, Moscow, Russia.
4. Leybov, R. (1952), *Utechki v shahtnyih elektricheskikh setyah* [Leaks in the mine power grids], Ugletehzdat, Moscow, Russia.
5. Dzyuban, V.S., Kononenko, V.P., Leonteva, L.A. (1976), "On protection against current leaks in power grids that feed through the rectifiers DC drives", *Sbornik nauchnykh trudov VNIIVE*, vol. 12.
6. Savitskiy, V.I., Beloshistov, A.I. (2005), "Protection against leakage currents in distribution power grids of clearing combines", *Ugol Ukrainyi*, vol. 12, no. 612.
7. Kiampo, E.A. (1985) "Research and development of the protection against leakage current for the thyristor electric drive of mining machines.", Thesis abstract for Cand. Sc. (Engineering.), Vostochnyj NII po bezopasnosti rabot v gornoj promyshlennosti, Kemerovo, Russia.
8. GOST SSBT. Residual current devices. Classification. General specifications. Introduced 1/1/1979.
9. Gladin, L. (1964), *Izolyatsiya podzemnyih elektroustanovok shaht i elektrobezopasnost* [Insulation of underground mines electrical installations and electrical safety], Nedra, Moscow, Russia.
10. Shishkin, N.F. and Mindeli, G.V. (1960), *Elektrobezopasnost v shahtnyih i vzryivobezopasnyih pomesche-niyah* [Electrical safety in mines and explosion-proof areas.], Tsodna, Tbilisi, Georgia.

Стаття надійшла 28.10.2013.