

Г.М. Петров, А.Г. Кутепов**АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ TN
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК**

Обогастительные предприятия в Российской Федерации относятся к опасным производственным объектам. Низковольтные электрические приемники таких объектов должны быть запитаны от электрической сети с изолированной нейтралью источника питания. Тем не менее, существующие Правила безопасности при дроблении, сортировке, обогащении полезных ископаемых и окусковании руды концентратов по разному трактуют применение электрических сетей с различными режимами нейтрали для электроснабжения потребителей обогастительных фабрик. Для питания потребителей напряжением до 1 кВ рекомендуются к использованию электрические сети с различными режимами нейтрали. Эта неясность толкования поставила задачу сравнить электрические сети до 1 кВ с различными режимами нейтрали. Рассмотрены различные случаи прикосновения человека к аварийному оборудованию в электрической сети с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1 кВ. При анализе различных случаев получены аналитические зависимости напряжения прикосновения от различных параметров электрической сети.

Ключевые слова: обогастительные фабрики, короткое замыкание, электрическая сеть с изолированной нейтралью, электрическая сеть с глухозаземленной нейтралью, системы заземления, зануление.

Общие сведения

В соответствии с технологическим назначением оборудование обогастительной фабрики делится на следующие технологические комплексы [1]:

- ТК транспортировки полезного ископаемого – комплекс технологического и вспомогательного оборудования для транспортировки полезного ископаемого в обогастительную установку, а также для складирования шлама, отсева и т.п.;
- ТК обогащения – комплекс технологического и вспомогательного оборудования по обогащению полезного ископаемого, а также складирования породы;
- ТК погрузки – комплекс технологического и вспомогательного оборудования для складирования сортового концентрата, погрузки сортового концентрата в железнодорожные вагоны со склада или напрямую из обогастительной установки;
- ТК электротолкателей – комплекс технологического и вспомогательного оборудования обеспечивающего работу вагонных электротолкателей.

Электроснабжение технологических комплексов обогастительной фабрики осуществляется от трансформаторных подстанций. Для приема электроэнергии от сети энергосистемы и распределения ее между цехами по территории предприятия сооружают одну или несколько главных понизительных подстанций (ГПП) или осуществляют глубокий ввод. В последнем случае напряжение поступает на несколько промежуточных подстанций, понижающих напряжение до 6–10 кВ и обслуживающих группу цехов и механизмов. От шин ГПП и ПГВ электрическая энергия поступает непосредственно к крупным механизмам (дробилкам, мельницам, эксгаустерам и др.) и к трансформаторам цеховых подстанций.

Цеховые подстанции (ТП) и распределительные устройства (РУ) 6–10 кВ, как правило, пристраиваются к корпусу цеха или встраиваются в него. Питание подстанций осуществляется чаще всего кабельными линиями; питание РУ – по кабельным линиям и шинпроводам.

Электроэнергию внутри производственных корпусов и между соседними корпусами, получающих электроэнергию от одной подстанции, распределяют с помощью распределительных линий (РЛ). Распределительные линии могут быть радиальными, магистральными и комбинированными.

Трехфазные электроприемники обогатительных фабрик в основном питаются напряжением 0,38; 0,66; 6 или 10 кВ; однофазные электроприемники – напряжением 0,22 кВ частотой 50 Гц.

В отношении надежности электроснабжения все электропотребители согласно ПУЭ (7-е изд.) [2] делятся на три категории. На углеобогатительных, рудообогатительных и агломерационных фабриках к потребителям первой категории относятся сравнительно небольшое число электроприемников, такие, как сгустители, вращающие печи, насосы смазки аглоэкстауэров, противопожарные насосы, насосы для перекачки хвостов, если не предусмотрен аварийный сброс их, а перерыв в электроснабжении может вызвать затопление фабрики. К электропотребителям второй категории на обогатительных фабриках относятся все основные электроприемники – дробилки, мельницы, сепараторы, вентиляторы, осадочные машины и т. п. К электропотребителям третьей категории относится большинство электроприемников вспомогательных цехов обогатительных и агломерационных фабрик, таких, как склады, механические мастерские, прибороразделочные отделения, химическая лаборатория, административный быткомбинат и другие помещения.

В соответствии с ПБ 03–571-03 «Единые правила безопасности при дроблении, сортировке, обогащении полезных ископаемых и окусковании руд и концентратов» [3] объекты, на которых ведутся работы по обогащению полезных ископаемых, в соответствии с Федеральным законом Российской Федерации «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [4] отнесены к опасным производственным объектам. Обогащение полезных ископаемых включает в себя технологические процессы дробления, сортировки и переработки полезных ископаемых, окускование руд и концентратов полезных ископаемых.

Обычно для электроснабжения опасных производственных объектов горнодобывающей отрасли используется электрическая сеть с изолированной нейтралью источника тока (подземные и открытые горные работы). На обогатительных же фабриках есть различные толкования. Так согласно п. 793 ПБ 05-580-03 [5] в электроустановках стационарного типа напряжением до 1 кВ на действующих объектах, как правило, используется глухозаземленная нейтраль, а для вновь проектируемых объектов обогатительных фабрик рекомендуется применение изолированной нейтрали. Согласно п. 354 ПБ 03-571-03 [3] для осветительных сетей обогатительных фабрик должна применяться электрическая схема с изолированной нейтралью при линейном напряжении не выше 220 В. Как должны питаться силовые электроприемники в данном нормативном документе вообще не прописано. Поэтому в данной статье была поставлена задача анализа применения различных систем заземления в электрических сетях напряжением до 1 кВ с различными режимами нейтрали источника тока.

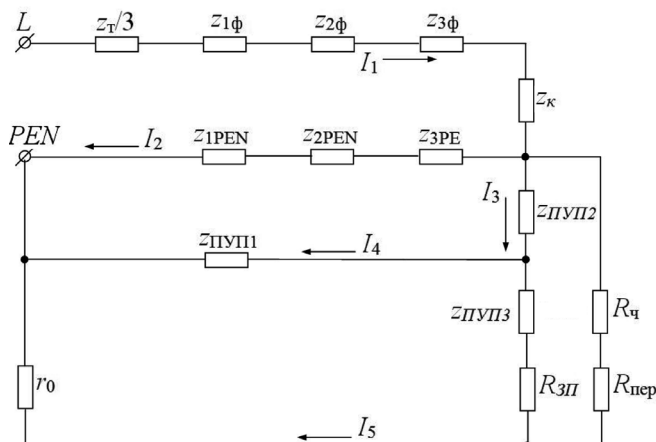


Рис. 2. Общая схема замещения: z_T – полное сопротивление трансформатора, Ом; z_K – сопротивление контакта в месте замыкания, Ом; $R_{пер} = R_{п} + R_{об}$ – переходное сопротивление между полом и человеком, Ом; $R_{п}$ – сопротивление пола, Ом; $R_{об}$ – сопротивление обуви, Ом

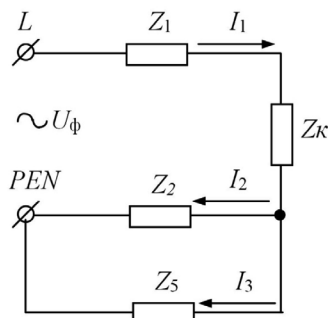


Рис. 3. Схема замещения

3. Линия № 2 (от ВРУ до РЩ № 1): кабель АНРГ 4х185 (2 шт.), $l_2 = 200$ м.
 4. Линия № 3 (от РЩ № 1 до ЭД (шаровая мельница – ШМ): $P_H = 25$ кВт, $l_3 = 50$ м.
 5. Магистральная стальная шина 40х4, $l = 270$ м (ПУП₁).
 6. Стальная шина от ШМ до магистральной стальной шины 40х4, $l = 10$ м (ПУП₂).
 7. Стальная шина от ШМ до повторного заземлителя 40х4, $l = 50$ м (ПУП₃).
- На рис. 2 представлена модель электрической сети при замыкании фазы на корпус электрооборудования.

При анализе данной схемы были рассмотрены три случая:

- прикосновение к аварийному оборудованию в случае отсутствия повторного заземлителя;
- прикосновение к аварийному оборудованию, расположенному от повторного заземлителя на определенном расстоянии;
- прикосновение к аварийному оборудованию, расположенному непосредственно у повторного заземлителя.

1-й случай.

На рис. 3 представлена схема замещения электрической сети для первого случая после выполнения преобразований рис. 2.

$$Z_1 = Z_T/3 + Z_{1\phi} + Z_{2\phi} + Z_{3\phi}, \text{ Ом.}$$

$$Z_2 = Z_{1PEN} + Z_{2PEN} + Z_{3PE}, \text{ Ом.}$$

$$Z_3 = r_0 + R_{3П} + Z_{ПУП3}, \text{ Ом.}$$

$$Z_4 = \frac{Z_{ПУП1} \cdot Z_3}{Z_{ПУП1} + Z_3}, \text{ Ом.}$$

$$Z_5 = Z_{ПУП2} + Z_4, \text{ Ом.}$$

Решая уравнения

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + I_3$$

$$\dot{U}_\phi = \dot{I}_1 \cdot (Z_1 + Z_\kappa) + \dot{I}_3 \cdot Z_5$$

$$\dot{I}_2 \cdot Z_2 = \dot{I}_3 \cdot Z_5, \text{ получим}$$

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_\phi (Z_2 + Z_5)}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_2 + Z_5) + Z_2 \cdot Z_5}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_\phi \cdot Z_5}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_2 + Z_5) + Z_2 \cdot Z_5}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_\phi \cdot Z_2}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_2 + Z_5) + Z_2 \cdot Z_5}$$

$$\dot{U}_{np} = \dot{I}_1 \cdot Z_\kappa + \dot{I}_3 \cdot Z_{\text{ПУП}2} + \dot{I}_5 \cdot (R_{3П} + Z_{\text{ПУП}3})$$

$$\dot{U}_{np} = \dot{U}_\phi \frac{[Z_{\text{ПУП}2} \cdot Z_3 + Z_4 \cdot (Z_{\text{ПУП}3} + R_{3П})] + Z_3 \cdot Z_\kappa \cdot (Z_2 + Z_5)}{Z_3 \cdot [(Z_1 + Z_\kappa)(Z_2 + Z_5) + Z_2 \cdot Z_5]}$$

Были получены зависимости напряжения прикосновения от следующих параметров электрической сети:

- Z_κ – контактное сопротивление в месте контакта;
- $R_{3П}$ – сопротивление повторного заземлителя;
- соотношения Z_1/Z_2 ;
- соотношения Z_1/Z_3 ,

где Z_1 – сопротивление цепи фазного проводника; Z_2 – сопротивление цепи зануления, Z_3 – сопротивление цепи заземления.

На рис. 4 приведена зависимость $U_{np} = f(R_{3П})$ при разных сопротивлениях заземления нейтрали источника питания, а на рис. 5 – зависимость $U_{np} = f(Z_1/Z_3)$

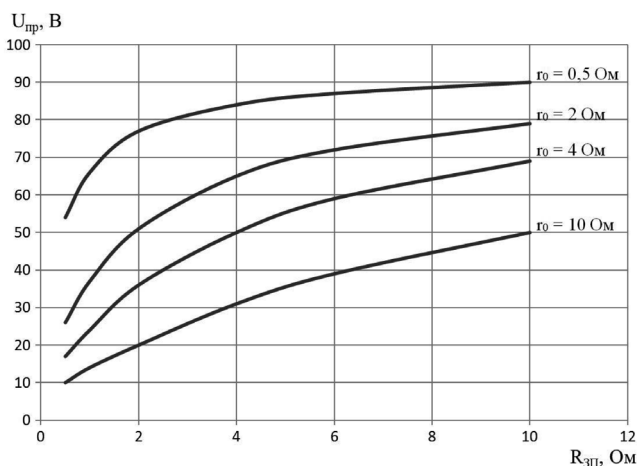


Рис. 4. Зависимость $U_{np} = f(R_{3П})$

при разных значениях сопротивления повторного заземлителя для двух случаев: случай 1 – шина уравнивания потенциалов (ШУП) и повторный заземлитель (ЗП) находятся вдалеке от аварийного оборудования; случай 2 – шина уравнивания потенциалов (ШУП) и повторный заземлитель (ЗП) находятся рядом с аварийным оборудованием.

2-й случай (прикосновение человека к ШУП – шине уравнивания потенциалов).

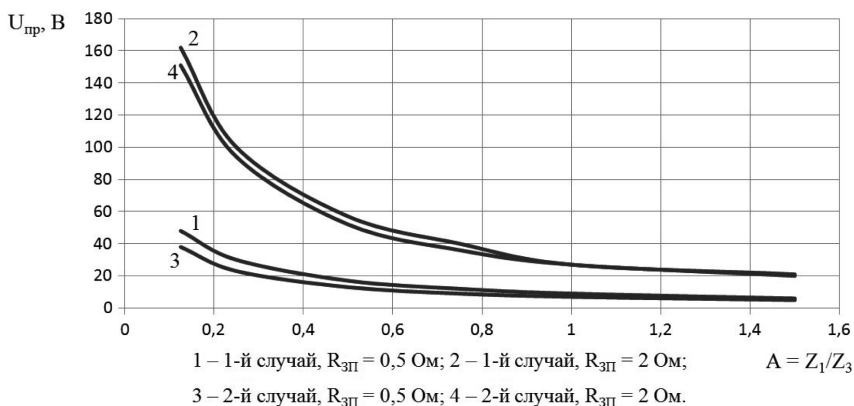


Рис. 5. Зависимость $U_{пр} = f(Z_1/Z_3)$

На рис. 6 представлена схема замещения электрической сети для второго случая после выполнения преобразований рис. 2.

Решая уравнения

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$$

$$\dot{U}_\phi = \dot{I}_1 \cdot (Z_1 + Z_\kappa) + \dot{I}_3 \cdot Z_{11}$$

$$\dot{I}_2 \cdot Z_2 = \dot{I}_3 \cdot Z_{11}$$

$$\text{где } Z_6 = Z_{\text{ПУПЗ}} + R_{зп}; Z_7 = R_\text{ч} + R_{\text{пер}}; Z_8 = \frac{Z_6 \cdot Z_7}{Z_6 + Z_7}; Z_9 = r_0 + Z_8; Z_{10} = \frac{Z_{\text{ПУП1}} \cdot Z_9}{Z_{\text{ПУП1}} + Z_9};$$

$Z_{11} = Z_{\text{ПУП2}} + Z_{10}$, получим

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_\phi (Z_2 + Z_5)}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_2 + Z_{11}) + Z_2 \cdot Z_{11}}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_\phi Z_5}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_2 + Z_{11}) + Z_2 \cdot Z_{11}}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_\phi Z_2}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_2 + Z_{11}) + Z_2 \cdot Z_{11}}$$

$$\dot{U}_{пр} = \dot{U}_\phi \frac{Z_8 \cdot Z_5}{(r_0 + Z_8) \cdot [Z_1 \cdot (Z_2 + Z_5) + Z_2 \cdot Z_5]}$$

Были получены зависимости напряжения прикосновения от следующих параметров электрической сети:

- Z_κ – контактное сопротивление в месте контакта;
- Z_8 – сопротивление цепи заземления;
- соотношения Z_1/Z_8 ;
- соотношения r_0/Z_8 ,

где Z_1 – сопротивление цепи фазного проводника;
 r_0 – сопротивление заземления нейтрали источника

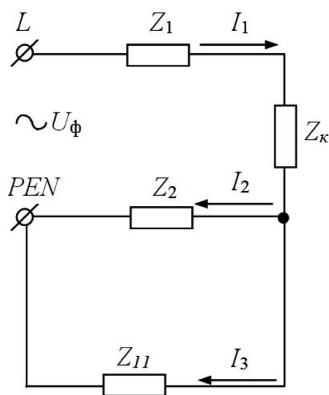


Рис. 6. Схема замещения

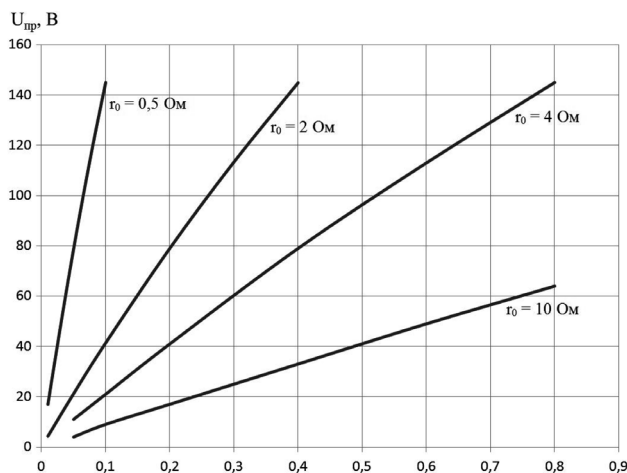


Рис. 7. Зависимость $U_{пр} = f(Z_г)$

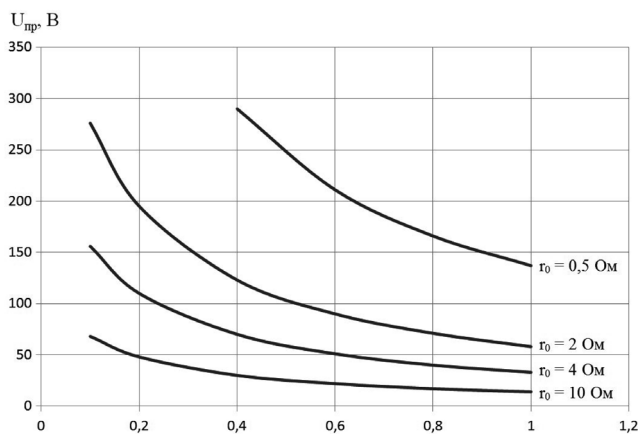


Рис. 8. Зависимость $U_{пр} = f(Z_1/Z_г)$

Решая уравнения

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + I_3$$

$$\dot{U}_\phi = \dot{I}_1 \cdot (Z_1 + Z_\kappa) + \dot{I}_3 \cdot Z_9$$

$$\dot{I}_2 \cdot Z_8 = \dot{I}_3 \cdot Z_9$$

где $Z_7 = Z_{\text{ПУП1}} + Z_{\text{ПУП2}}$; $Z_8 = \frac{Z_2 \cdot Z_7}{Z_2 + Z_7}$; $Z_9 = r_0 + R_\text{ч} + R_{\text{пер}}$, получим

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_\phi (Z_8 + Z_9)}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_8 + Z_9) + Z_8 \cdot Z_9} \quad \dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_\phi \cdot Z_9}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_8 + Z_9) + Z_8 \cdot Z_9}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_\phi \cdot Z_8}{(Z_1 + Z_\kappa)(Z_8 + Z_9) + Z_8 \cdot Z_9}$$

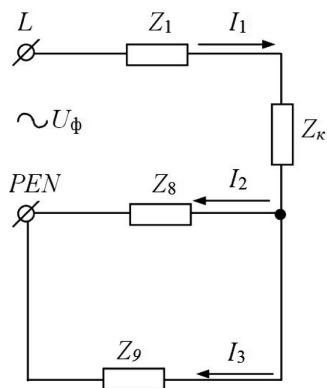


Рис. 9. Схема замещения

питания, Z_8 – сопротивление цепи заземления.

На рис. 7 приведена зависимость $U_{пр} = f(Z_г)$ при разных сопротивлениях заземления нейтрали источника питания, а на рис. 8 – зависимость $U_{пр} = f(Z_1/Z_г)$.

3-й случай (прикосновение человека к аварийному оборудованию).

На рис. 9 представлена схема замещения электрической сети для третьего случая после выполнения преобразований рис. 2.

$$\dot{U}_{пр} = \dot{I}_1 \cdot Z_k + \dot{I}_3 (R_{\text{ч}} + R_{\text{пер}})$$

$$\dot{U}_{пр} = \dot{U}_{\phi} \frac{Z_k (Z_8 + Z_9) + Z_8 (R_{\text{ч}} + R_{\text{пер}})}{(Z_1 + Z_k)(Z_8 + Z_9) + Z_8 \cdot Z_9}$$

Были получены зависимости напряжения прикосновения от следующих параметров электрической сети:

- Z_k – контактное сопротивление в месте контакта;
- соотношения $r_0/R_{\text{ч}}$;
- соотношения Z_1/Z_8 ;
- соотношения Z_1/Z_9 ;
- соотношения $r_0/R_{\text{пер}}$,

где Z_1 – сопротивление цепи фазного проводника; $R_{\text{ч}}$ – сопротивление тела человека; r_0 – сопротивление заземления нейтрали источника питания; Z_8 – сопротивление цепи зануления; Z_9 – сопротивление цепи заземления; $R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление между полом и телом человека.

На рис. 10 приведена зависимость $U_{пр} = f(r_0/R_{\text{ч}})$ при разных значениях переходного сопротивления, а на рис. 11 – зависимость $U_{пр} = f(Z_1/Z_9)$.

Выводы:

Полученные аналитические выражения позволят в дальнейшем получить зависимости для типового участка обогатительной фабрики для различных систем заземления с разными режимами нейтрали источника тока.

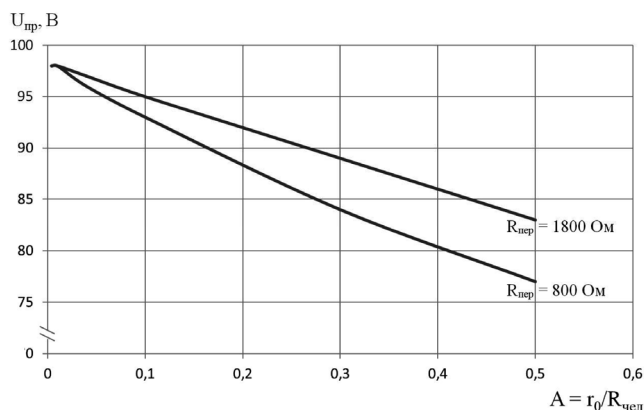


Рис. 10. Зависимость $U_{пр} = f(r_0/R_{\text{ч}})$

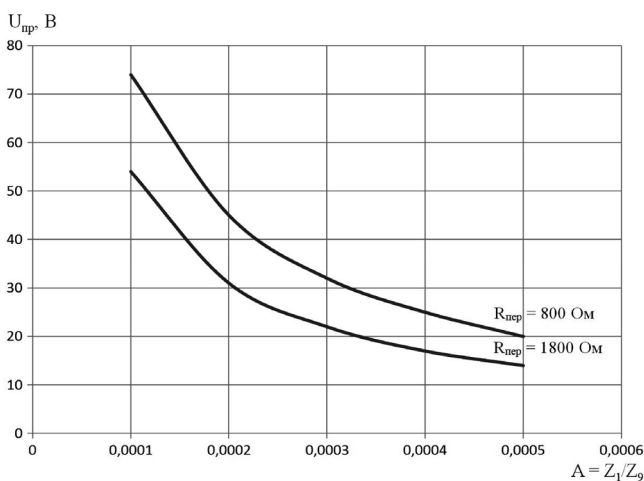


Рис. 11. Зависимость $U_{пр} = f(Z_1/Z_9)$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: Учебник для вузов. Т. 2. Технология обогащения полезных ископаемых. – М.: Изд-во МГТУ, 2004. – 510 с.
2. Правила устройства электроустановок.

Седьмое издание. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2002.

3. ПБ 03–571–03. Единые правила безопасности при дроблении, сортировке, обогащении полезных ископаемых и окучивании руд и концентратов, 2003.

4. Федеральный закон № 116-ФЗ от 15.03.2013 г. О промышленной безопасности опасных производственных объектов, 2013.

5. ПБ 05–580-03. Правила безопасности при обогащении и брикетировании углей (сланцев), 2003.

6. Манойлов В.Е. Основы электробезопасности. – 5-е изд., перераб. и доб. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.

7. Петров Г.М., Кутепов А.Г., Саркисян Р.М. Анализ заземляющей системы в электрической сети с глухозаземленной нейтралью источника питания // Горный информационный аналитический бюллетень. – 2012. – № 6. – С. 270–275.

8. Кутепов А.Г., Петров Г.М. Исследование заземляющей сети машин и оборудования горной промышленности // Научный вестник МГТУ. – 2012. – № 5. – С. 50–58. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Петров Геннадий Михайлович – кандидат технических наук, профессор,
e-mail: petrovgm@mail.ru,

Кутепов Антон Григорьевич – аспирант, e-mail: antkut@mail.ru,
МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC 622.862.7

ANALYSIS OF THE EARTHING SYSTEM TN WHEN OPERATING OF ELECTRIC NETWORKS OF PROCESSING PLANTS

Petrov G.M.¹, Candidate of Technical Sciences, Professor, e-mail: petrovgm@mail.ru,

Kutepov A.G.¹, Graduate Student, e-mail: antkut@mail.ru,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

Processing plants in the Russian Federation are hazardous production facilities. Low-voltage electrical receivers such objects must be powered from the electrical network with insulated neutral of power supply. However, existing safety rules at crushing, screening, mineral processing and agglomeration of ores and concentrates on the different interpretations of the application of electrical networks with different modes of neutral electricity for consumers of processing plants. To supply consumers with voltage up to 1 kV are recommended to use electrical networks with different modes of neutral. This ambiguity of interpretation set the task to compare the electrical networks up to 1 kV with different modes of neutral.

Examined various cases of human contact to emergency equipment in the electrical network with dead earthed neutral voltage up to 1 kV. In the analysis of different cases are obtained analytical dependences of contact voltage from various parameters of electrical network.

Key words: processing plants, short circuit, electrical network system with isolated neutral, electrical network system with dead earthed neutral, earthing systems, earth and neutral.

REFERENCES

1. Abramov A.A. *Pererabotka, obogashchenie i kompleksnoe ispol'zovanie tverdykh poleznykh iskopayemykh: Uchebnik dlya vuzov*. T. 2. Tekhnologiya obogashcheniya poleznykh iskopayemykh (Processing, dressing and multipurpose utilization of solid minerals: Textbook for high schools, vol. 2. Technology of dressing of minerals), Moscow, Izd-vo MGGU, 2004, 510 p.

2. *Pravila ustroystva elektroustanovok*. 7-e izd. (Regulations for Electrical Installation, 7th edition), Moscow, ZAO «Energoservis», 2002.

3. *Edinye pravila bezopasnosti pri droblenii, sortirovke, obogashchenii poleznykh iskopayemykh i okuskovanii rud i kontsentratov*. PB 03–571-03 (Unified safety rules for crushing, sorting, dressing of minerals and agglomeration of ores and concentrates. Safety Regulations 03–571-03), Moscow, 2003.

4. *O promyshlennoi bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'ektov. Federal'nyi zakon no 116-FZ ot 15.03.2013 g.* (On industrial safety of hazardous production facilities. Federal Law No. 116-FZ of 03.15.2013.), Moscow, 2013.

5. *Pravila bezopasnosti pri obogashchenii i briketirovanii uglei (slantsev)* PB 05–580-03 (Safety rules for dressing and briquetting of coal (shale). Safety Regulations 05–580-03), Moscow, 2003.

6. Manoilov V.E. *Osnovy elektrobezopasnosti*. 5-e izd. (Fundamentals of electrical safety, 5th edition), Leningrad, Energoatomizdat, 1991, 480 p.

7. Petrov G.M., Kutepov A.G., Sarkisyan R.M. *Gornyi informatsionnyi analiticheskii byulleten'*. 2012, no 6, pp. 270–275.

8. Kutepov A.G., Petrov G.M. *Nauchnyi vestnik MGGU*. 2012, no 5, pp. 50–58.