

УДК 620.1.08

**О СПОСОБЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ
В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ
НА ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ**

Б. Б. Утегулов, А. Б. Утегулов, А. Б. Уахитова

*Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина,
E-mail: utegulov_bolatbek@mail.ru, просп. Победы, 62, 010000, г. Астана, Казахстан*

Получены результаты по обеспечению электробезопасности в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на горных предприятиях. Представлен способ измерения полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В, который позволит упростить измерения полной проводимости изоляции сети. Измерение осуществляется за счет регулирования величины активной дополнительной проводимости до обеспечения равенства модулей напряжения фазы относительно земли и напряжения нулевой последовательности. При этом подключаемая активная дополнительная проводимость будет соответствовать полной проводимости изоляции сети. Смоделирована имитационная модель способа измерения полной проводимости изоляции в среде Matlab/Simulink.

Горные предприятия, электробезопасность, состояние изоляции, моделирование

К одним из наиболее важных в горной отрасли можно отнести проблемы повышения надежности систем электроснабжения и снижения уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок на горных предприятиях. Это связано с физическим и моральным старением большей части оборудования. Интенсивное увеличение производительности горнодобывающих предприятий приводит к усложнению конфигурации сетей, что значительно сказывается на состоянии электрических сетей, снижая надежность их эксплуатации [1]. При разработке угольных месторождений открытым способом горные машины работают в “тяжелых” условиях, что приводит к изменению электроизоляционных свойств оборудования [2–3].

Указанные факторы усиливают интенсивный процесс снижения уровня сопротивления изоляции фаз электрической сети относительно земли, увеличивается вероятность возникновения аварийных режимов. Рост количества электротравм обусловлен главным образом слабой постановкой организационных и технических мероприятий по осмотру, ремонту и контролю состояния изоляции в электрических сетях и электрооборудовании. Своевременное определение степени износа изоляции может предотвратить выход оборудования из строя [4].

Согласно правилам техники безопасности, при разработке угольных месторождений в электроустановках напряжением до 1000 В требуется обязательное применение устройств автоматического контроля изоляции с действием на отключение и периодическим измерением сопротивления изоляции фаз электрической сети относительно земли [5, 6].

На экскаваторах горнодобывающей отрасли электрические сети напряжением до 1000 В не содержат линий протяженностью более 10 м, поэтому данные сети аналогичны сетям электрических дуговых печей, которые называются короткими. Установленные устройства защитного отключения в коротких сетях напряжением до 1000 В экскаваторов недостаточно исследованы по отношению к критериям электробезопасности в нормальном и аварийном режимах [7].

Наиболее широкое применение нашел метод измерения сопротивления изоляции путем применения измерительного устройства мегаомметра [8]. Однако результаты измерения мегаомметром, предусмотренные Правилами [9, 10], не соответствуют действительным значениям сопротивления изоляции сети, так как измерения проводятся при отсутствии рабочего напряжения электрической сети и отключенных электроприемников. Следовательно, применение мегаомметра как средства оценки условий электробезопасности при эксплуатации электроустановок недостаточно, поскольку не позволяет измерить полное сопротивление изоляции фаз электрической сети относительно земли под рабочим напряжением.

Основной задачей исследования состояния изоляции электроустановок при разработке мероприятий открытым способом является измерение параметров изоляции электрических сетей напряжением до 1000 В и выявление факторов, влияющих на них.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ КРУГОВОЙ ДИАГРАММЫ

Активная проводимость характеризует изоляционные свойства диэлектрика, емкостная проводимость — емкость сети, т. е. количество подключенных электроприемников и протяженность воздушных и кабельных линий, полная проводимость — величину тока однофазного замыкания на землю. В практике эксплуатации электроустановок необходимо знать активную, емкостную и полную проводимости изоляции фаз электрической сети относительно земли. Это позволит правильно выбрать стратегию разработки организационных и технических мероприятий по повышению уровня электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В [11].

В [8] разработан метод определения параметров изоляции в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В (метод амперметра-вольтметра). К его недостаткам относится измерение тока однофазного замыкания на землю в исследуемой трехфазной электрической сети с изолированной нейтралью. При этом напряжение фазы, где проводится измерение, становится равным нулю, а напряжения двух других фаз достигают линейного значения. Это может привести к короткому замыканию, что является аварийным режимом.

Разработанный в [12] фазочувствительный метод определения параметров изоляции в симметричной сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В основан на измерении модулей линейного напряжения и напряжения фазы относительно земли после подключения между ней и землей дополнительной активной проводимости, и измерении угла сдвига фаз между вектором линейного напряжения и вектором напряжения фазы относительно земли. С учетом величины вводимой активной дополнительной проводимости определяются параметры изоляции. Однако фазочувствительные методы содержат существенный недостаток, заключающийся в необходимости использования специального прибора для измерения угла сдвига фаз между двумя векторами напряжения.

С целью упрощения проводимых измерений рассмотрим способ измерения полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В [13]:

$$y = \frac{U_{\phi o}}{U_o} g_o, \quad (1)$$

где $U_{\phi o}$ — напряжение фазы относительно земли после подключения активной дополнительной проводимости g_o ; U_o — напряжение нулевой последовательности.

Для измерения полной проводимости изоляции сети в соответствии с (1) необходимо в электрическую сеть ввести регулируемое активное сопротивление между фазой электрической сети и землей. При изменении величины активного сопротивления между фазой электрической сети и землей будут изменяться модули напряжения фазы относительно земли и напряжения нулевой последовательности. Из (1) следует, что при равенстве полной проводимости изоляции сети и активной дополнительной проводимости измеряемые модули напряжения фазы относительно земли и напряжения нулевой последовательности будут равны $U_{\phi o} = U_o$.

Таким образом, для измерения полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью необходимо ввести регулируемую дополнительную проводимость для выполнения условия равенства модулей напряжения фазы относительно земли и напряжения нулевой последовательности $U_{\phi o} = U_o$.

Для определения активной проводимости изоляции сети при использовании равенства модулей напряжения фазы относительно земли и напряжения нулевой последовательности $U_{\phi o} = U_o$ уравнение имеет вид

$$g = \frac{U_{\phi}^2 - 2U_{\phi o}^2}{2U_{\phi o}^2} g_o. \quad (2)$$

Емкостная проводимость изоляции находится как геометрическая разность полной и активной проводимости изоляции сети [13].

Метод измерения параметров изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В описывается круговой диаграммой изменения модулей напряжения фаз относительно земли и напряжения нулевой последовательности (рис. 1). Изменения модулей напряжения фаз относительно земли и напряжения нулевой последовательности проводятся в соответствии с круговой диаграммой в зависимости от изменения вводимой активной дополнительной проводимости.

На рис. 1 показаны фазные напряжения U_{ϕ} трех фаз А, В, С до подключения активной дополнительной проводимости к фазе А; напряжение смещения нейтрали U_o ; напряжение фазы относительно земли после подключения активной дополнительной проводимости g_o к фазе А — $U_{\phi o}$. Точка O_2 соответствует равенству величин $U_{\phi o}$ и U_{o2} .

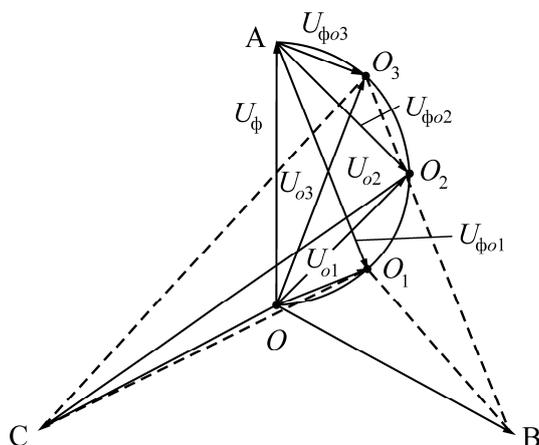


Рис. 1. Круговая диаграмма изменения модулей напряжения фаз относительно земли и напряжения нулевой последовательности в зависимости от вводимой активной дополнительной проводимости

Исследования показали, что представленная круговая диаграмма изменения модулей напряжения фаз относительно земли и напряжения нулевой последовательности в зависимости от подбора вводимой активной проводимости соответствует главным положениям теоретических основ электротехники.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОЙ ПРОВОДИМОСТИ В СЕТИ С ИЗОЛИРОВАННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Для обеспечения равенства напряжения фазы относительно земли при подключенной активной дополнительной проводимости и напряжения нулевой последовательности в качестве дополнительной проводимости используется переменное сопротивление. Оно подключается между измеряемой фазой электрической сети и землей, и проводится регулирование сопротивления до обеспечения равенства между напряжением фазы относительно земли и напряжением нулевой последовательности. При равенстве напряжения полная проводимость будет соответствовать переменному сопротивлению, которое подключено между измеряемой фазой электрической сети и землей. Способ измерения полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В позволит обеспечить оперативность измерения полной проводимости изоляции сети [14].

Измерения напряжения фазы относительно земли и напряжения нулевой последовательности осуществляются вольтметрами переменного тока. Напряжение нулевой последовательности выделяется из сети с помощью трех однофазных трансформаторов, первичные обмотки которых соединены в звезду, а вторичные — в открытый треугольник.

Разработанный способ измерения полной проводимости изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В [14] поясняется электрической принципиальной схемой (рис. 2), которая содержит: электрическую сеть с фазами А, В, С; три однофазных трансформатора напряжения TV1, TV2, TV3; вольтметры PV1, PV2; коммутирующий аппарат QF1; активную дополнительную проводимость g_o ; полную проводимость изоляции сети y .

Для определения полной проводимости изоляции сети вольтметром PV2 измеряют напряжение фазы относительно земли, вольтметром PV1 — напряжение нулевой последовательности на вторичной обмотке однофазных трансформаторов напряжения TV1, TV2, TV3, которые соединены в открытый треугольник. Коммутирующим аппаратом QF1 вводится активная дополнительная проводимость g_o , которая регулируется до обеспечения равенства модулей напряжения фазы относительно земли по показанию вольтметра PV2 и напряжения нулевой последовательности по показанию вольтметра PV1. При этом g_o будет соответствовать полной проводимости изоляции сети y [14].

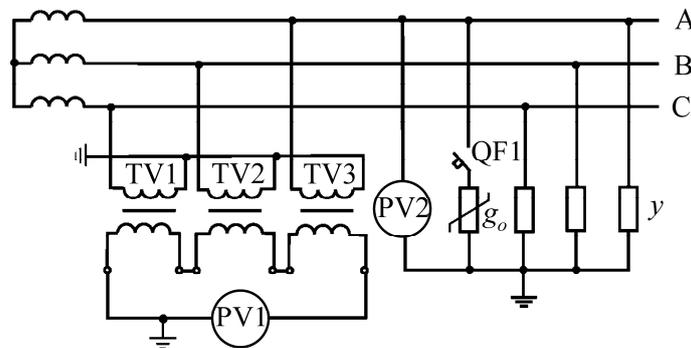


Рис. 2. Электрическая принципиальная схема измерения полной проводимости изоляции сети

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ИЗОЛЯЦИИ В СРЕДЕ MATLAB/SIMULINK

В качестве расчетного инструмента для анализа режимов работы сети использован пакет программ Matlab/Simulink, располагающий достаточно развитым набором специальных блоков для моделирования элементов энергетической системы.

Электрическая принципиальная схема способа измерения полной проводимости изоляции (рис. 3) содержит: TPhS — трехфазный источник питания напряжением 380/220 В; RC, RC1, RC2 — активно-реактивные сопротивления; TV1–TV3 — три однофазных трансформатора напряжения, образующих фильтр нулевой последовательности; VM ZPSV — измеритель напряжения нулевой последовательности; VM phA-0 — измеритель напряжения фазы А относительно земли; VM phC-0 — измерители напряжения фазы С относительно земли; VM A-B — измеритель междуфазного напряжения А-В; CM — измерители тока; Scope — осциллограф для отображения параметров сети; Display — дисплей для отображения амплитудного значения параметров электрической сети; RMS — блок для вычисления истинного среднеквадратичного значения входного сигнала; Breaker — разъединитель; Step — блок для установки времени замыкания блока Breaker.

Для проверки схемы симитирован режим однофазного металлического замыкания фазы А на землю при помощи блока Breaker с модулируемым временем замыкания 0.2 с, осуществляемым блоком Step. Блок RMS позволяет вычислить истинное среднеквадратичное значение входного сигнала [15].

В режиме однофазного металлического замыкания фазы А на землю амплитудное напряжение фазы С относительно земли равно 537 В, что соответствует действующему значению 380 В. Действующее напряжение фазы А относительно земли после металлического замыкания соответствует 0.001009 В; ток поврежденной фазы А равен 0.1057 А. На выводах фильтра напряжения нулевой последовательности действующее напряжение возросло с 0 до 218.4 В (рис. 4).

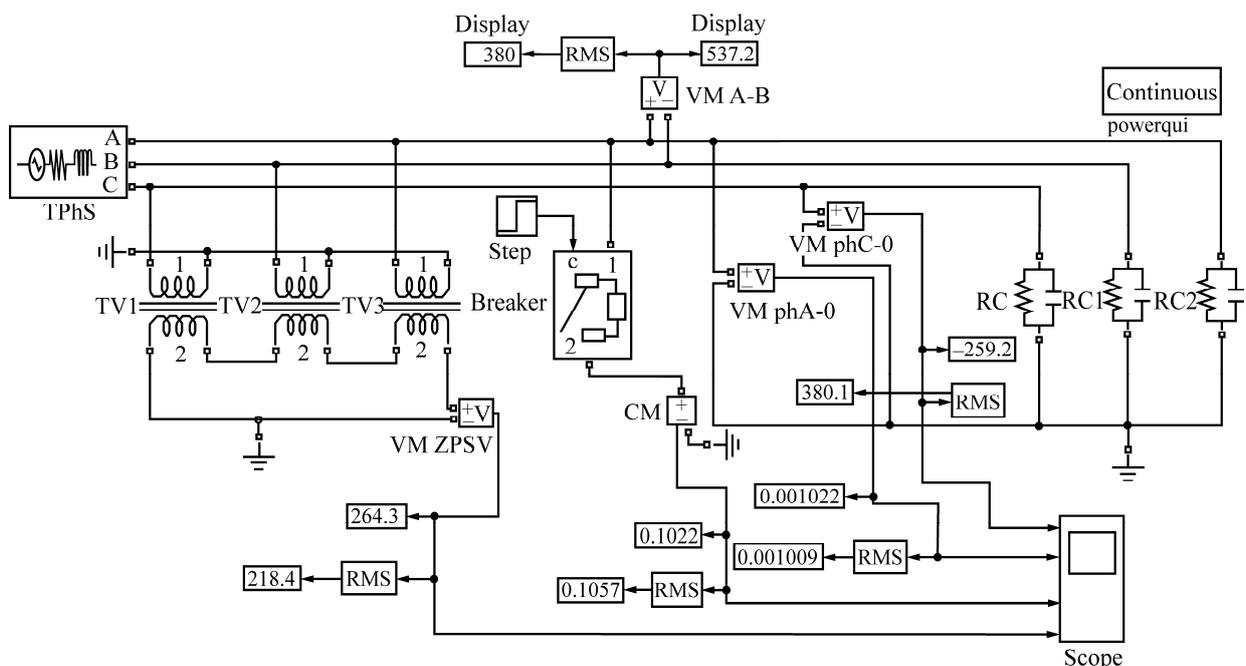


Рис. 3. Имитационная модель металлического замыкания фазы на землю

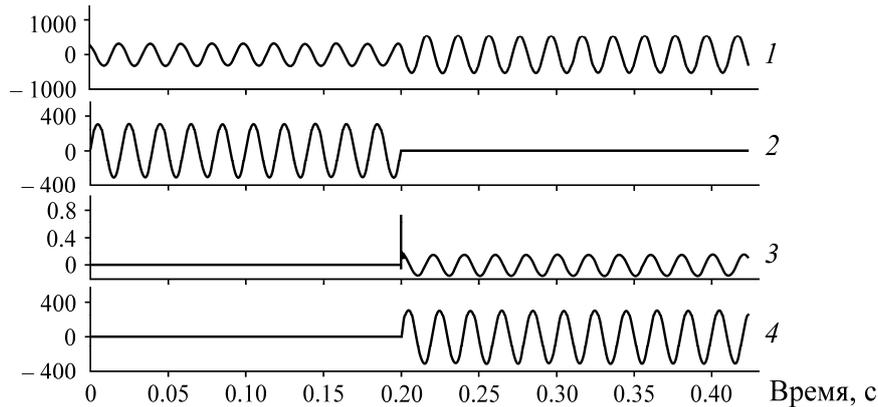


Рис. 4. Напряжения и ток при однофазном металлическом замыкании фазы А на землю: 1 — напряжение фазы С относительно земли, В; 2 — напряжение фазы А относительно земли, В; 3 — ток при однофазном металлическом замыкании фазы А на землю, А; 4 — напряжение нулевой последовательности, В. Время однофазного металлического замыкания 0.2 с

Имитационная модель исследуемого способа измерения полной проводимости изоляции с использованием переменного резистора R представлена на рис. 5. На схеме в качестве переменного сопротивления, подключаемого между измеряемой фазой электрической сети и землей, используется блок нелинейного резистора [16].

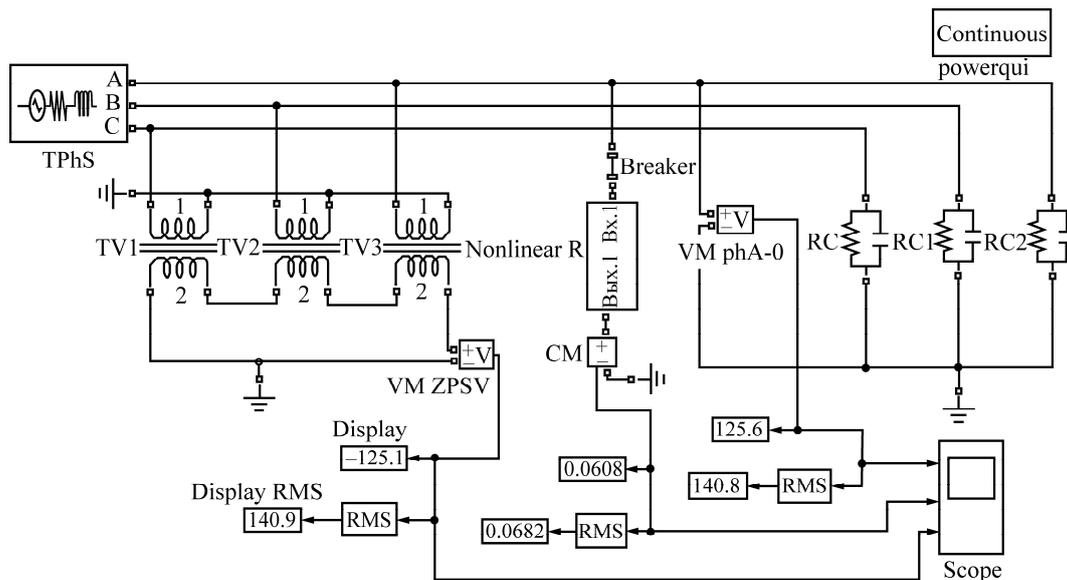


Рис. 5. Имитационная модель способа измерения полной проводимости изоляции в среде Simulink: Display RMS — дисплей для отображения действующего значения параметров электрической сети; Nonlinear R — переменный резистор для регулирования активной дополнительной проводимости; ост. усл. обозн. см. рис. 3

Применение переменного резистора позволяет проводить многократное регулирование параметров электрической цепи. Коммутирующим аппаратом Breaker вводится регулируемая активная дополнительная проводимость g_o , представленная переменным резистором Nonlinear R. Подсистема переменного резистора показана на рис. 6, где блоком Slider Gain (SG) можно регулировать параметры резистора.

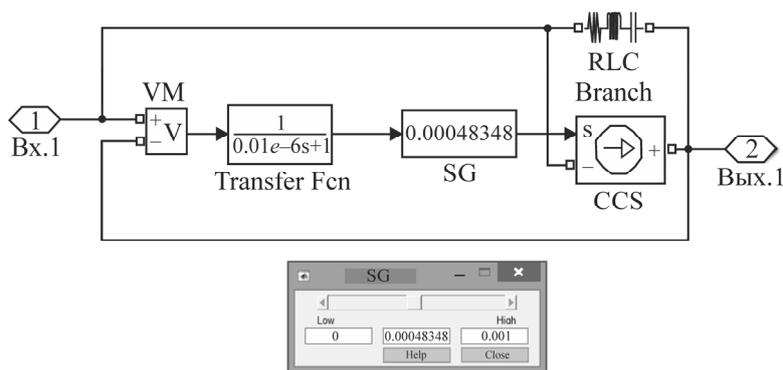


Рис. 6. Подсистема переменного резистора: VM — измеритель напряжения; Transfer Fcn — блок передаточной характеристики; SG — ползунок для регулирования параметров резистора; RLC Branch — развязывающий резистор; CCS — управляемый источник тока

На схеме к управляемому источнику тока параллельно подключен измеритель напряжения. Между выходом измерителя напряжения и входом источника тока включена Simulink-модель, реализующая нужную вольт-амперную характеристику устройства. Параллельно источнику также подключен развязывающий резистор. Его наличие обусловлено тем, что большое число блоков SimPowerSystems выполнено на базе источников тока. При последовательном соединении таких блоков источники тока оказываются включенными последовательно, что недопустимо. Наличие развязывающего резистора устраняет эту проблему. Величина сопротивления резистора должна выбираться достаточно большой, чтобы его влияние на характеристики создаваемого блока было минимально [16].

Модель Simulink резистора реализована с помощью блока SG, который позволяет изменять скалярный коэффициент усиления в процессе моделирования с помощью ползунка. Таким образом проводится регулирование положения ползунка до обеспечения равенства модулей напряжения фазы относительно земли по показанию измерителей напряжения на выходе фильтра нулевой последовательности и напряжения фазы A относительно земли.

Согласно полученным данным, при регулировании переменного резистора до 2068 Ом действующее значение напряжения на выводах фильтра напряжения нулевой последовательности и фазное напряжение фазы A становятся равны 140.8 В. На рис. 7 представлены амплитудные значения фазного напряжения, тока и напряжения на выводах фильтра напряжения нулевой последовательности переменного резистора $R = 2068$ Ом.

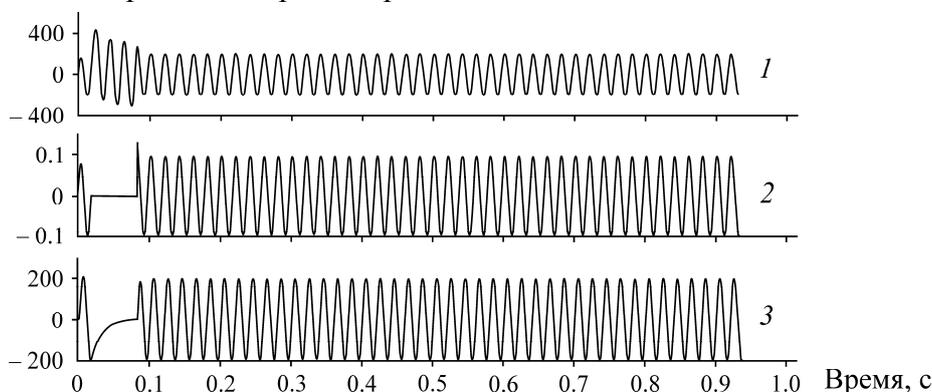


Рис. 7. Фазное напряжение, ток и напряжение на выводах фильтра напряжения нулевой последовательности: 1 — напряжение фазы A относительно земли, В; 2 — ток фазы A относительно земли, А; 3 — напряжение нулевой последовательности, В

Согласно круговой диаграмме, при равенстве напряжения фазы относительно земли U_A и напряжения нулевой последовательности $U_{\text{нп}}$ полная проводимость y соответствует переменному сопротивлению, которое подключено между фазой А электрической сети и землей.

Поскольку при измерении полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью необходимо ввести активную дополнительную проводимость g_o , которая в имитационной модели исследуемого способа представлена в виде регулируемого переменного резистора R (Nonlinear R), то для данной сети напряжением 380 В, $R = 2068$ Ом определяемая полная проводимость будет $y = 0.48$ мСм.

Имитационная модель способа измерения полной проводимости изоляции в среде Matlab/Simulink позволяет упростить расчеты полной проводимости изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены вопросы электробезопасности в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В на горных предприятиях. Описаны наиболее широко применяемые методы определения параметров изоляции в низковольтной сети с указанием их недостатков. С целью упрощения проводимых измерений в статье рассмотрен способ измерения полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В. Способ основан на измерении модулей напряжения нулевой последовательности и напряжения фазы относительно земли с дополнительной активной проводимостью. При обеспечении равенства напряжения нулевой последовательности и напряжения фазы относительно земли подключаемая активная дополнительная проводимость будет соответствовать полной проводимости изоляции сети. Для анализа режимов работы рассматриваемой сети использован пакет программ Matlab/Simulink. Согласно созданной имитационной модели, проводится регулирование величины переменного резистора Slider Gain до обеспечения равенства модулей напряжения фазы относительно земли и напряжения фазы А относительно земли. Для рассматриваемой сети напряжением 380 В, $R = 2068$ Ом, соответственно определяемая полная проводимость будет составлять $y = 0.48$ мСм. Предложенный способ измерения полной проводимости изоляции сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В позволяет упростить измерения полной проводимости изоляции сети. Предлагаемый способ достаточно прост к исполнению, так как измерительные приборы, однофазные трансформаторы напряжения, которые необходимы для измерения полной проводимости изоляции сети, имеются в службе эксплуатации энергохозяйства предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sinclair J. Quarrying opencast and alluvial mining, Elsevier, 1969. — 375 p.
2. Mattis A. R., Cheskidov V. I., Labutin V. N. Choice of the hard rock surface mining machinery in Russia, J. of Mining Science, 2012, Vol. 48, No. 2. — P. 329–338.
3. Fry P. R. Loads and stresses — the real cause of failures in surface mining machinery, Practical Failure Analysis, 2003, Vol. 3, No. 2. — P. 7–14.
4. Zeng Xiangjun, Li K. K., Chan W. L., Yin Xianggen On-site safety evaluation for earth fault in mining power systems, Browse J. & Magazines, 2003, Vol. 39, No. 6. — P. 1563–1569.
5. Правила техники безопасности для электрических установок. — М.: Главгосэнергонадзор, 2001.
6. Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок. — М.: Энергоиздат, 1986. — 447 с.

7. **Утегулов Б. Б., Утегулов А. Б., Уахитова А. Б.** Повышение эффективности устройства защитного отключения горных машин // ФТПРПИ. — 2016. — № 2. — С. 102–108.
8. **Гладилин Л. В., Щуцкий В. И., Бацежев Ю. Г., Чеботаев Н. И.** Электробезопасность в горнодобывающей промышленности. — М.: Недра, 1977. — 327 с.
9. **Правила** устройства электроустановок. 7-е изд. Утв. Приказом Минэнерго РФ от 8 июля 2002 г. № 204. — 607 с. Дата введения 01.01.2003 г.
10. **Правила** технической эксплуатации угольных и сланцевых шахт. — М.: Недра, 1976. — 303 с.
11. **Нагорных В. В.** Математическое моделирование определения параметров изоляции отдельных фаз электрической сети с изолированной нейтралью // ГИАБ. — 2011. — Т. 6. — № 12. — С. 394–405.
12. **Утегулов А. Б.** Разработка фазочувствительных методов повышения уровня электробезопасности и надежности эксплуатации электрических сетей с изолированной нейтралью напряжением до и выше 1000 В: дис. ... канд. техн. наук. — Павлодар: ПГУ, 2003. — 230 с.
13. **Utegulov B. B., Utegulov A. B., Begentayev M. M., Begentayev V. M., Uakhitova A. B., Zhumazhanov N., Zhakipov N. B.** Method for determining parameters of isolation network voltage up to 1000 V in mining enterprises, Paper presented at the IASTED International Conference on “Power and Energy Systems and Applications (PESA)”, Pittsburgh, USA, 2011. — P. 50–53.
14. **Утегулов Б. Б., Утегулов А. Б., Уахитова А. Б., Бегентаев Б., Амургалинов С.** Способ измерения полной проводимости изоляции в сети с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В // Инновационный пат. 24286 КазПАТЕНТ. — Астана, 2011.
15. **SimPowerSystems** User’s Guide COPYRIGHT 1998–2003 TransEnergie Technologies Inc., under sublicense from Hydro-Québec, and The MathWorks, Inc.
16. **Черных И. В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс, 2007. — 288 с.

Поступила в редакцию 12/XII 2016