



ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>

УДК 622:621.311

**Обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети для анализа режимов утечки тока через изоляцию**

А. В. Пичуев , В. Л. Петров

Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация

allexstone@mail.ru**Аннотация**

Характеристики безопасности и надежности шахтных электротехнических комплексов и систем во многом обеспечивают успешность горных предприятий. Сложные технологические условия, особенно при ведении подземных горных работ, многообразие индивидуальных факторов определяют совокупность требований, которые предъявляются к подземным электрическим сетям горных предприятий. Все это определяет необходимость совершенствования систем защиты персонала на основе исследования характеристик сетей, моделирования режимов работы, в том числе аварийных. Основная цель исследований – обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети путем синтеза ее структуры для последующего анализа режимов утечки тока через изоляцию. На основе методов математического моделирования дано обоснование параметров схемы замещения шахтной подземной электрической сети с учетом условий возникновения и развития аварийных и травмоопасных ситуаций. Определены количественные показатели и диапазоны изменения параметров элементов схемы замещения электрической сети. Для математического моделирования переходных процессов рекомендовано использование электромагнитных постоянных времени затухания колебаний в контурах, образованных параметрами фазных сопротивлений изоляции, а также абсорбционных составляющих токов утечки, и приведены соответствующие расчетные соотношения. В качестве примера приведена схема замещения шахтной подземной электрической сети с активно-индуктивным фильтром присоединения устройства защитного отключения, позволяющая выполнить анализ утечки тока при однополюсном прикосновении человека к токоведущей фазе, с учетом процесса низкочастотной поляризации в фазной изоляции. Предложенный методический подход к моделированию и анализу режимов утечки тока через изоляцию позволяет осуществить синтез схемы замещения подземной электрической сети для анализа несимметрии фазных напряжений, токов срабатывания устройств защитного отключения, процессов низкочастотной поляризации в изоляции, воздействия тока утечки на человека.

Ключевые слова

шахтная подземная электрическая сеть, режимы утечки тока, защитное отключение, параметры изоляции, источники ЭДС, электробезопасность

Для цитированияPichuev A. V., Petrov V. L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>

POWER ENGINEERING, AUTOMATION, AND ENERGY PERFORMANCE

Research paper

Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current

A. V. Pichuev , V. L. Petrov

University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation

allexstone@mail.ru**Abstract**

Successful mining businesses rely heavily on the safety and reliability of their mine power distribution systems. Mine power distribution systems are designed to withstand an aggressive environment with a range of hazards. The harsh operating conditions require improvement to personnel protection systems through the study and simulation of the electric network's normal and emergency operations. The purpose of this study is to assess insulation leakage current using an equivalent circuit of a mine power distribution system. The simulation identified the key properties of the equivalent circuit which can model potential hazardous situations. We also



selected the quantitative metrics and the equivalent circuit property ranges. In order to simulate the transients, we recommended using the time constants for the oscillation damping in circuits, the insulation phase resistance properties, and the absorption currents. This paper presents the equations to estimate these values. As an example, we considered the equivalent circuit of a mine power distribution system with an R-L filter in the residual current device line. The equivalent circuit helps analyze the current leakage when a person touches a live phase conductor accounting for low-frequency polarization in the phase insulation. The proposed approach to the simulation and analysis of the insulation current makes it possible to generate an equivalent circuit of the mine power distribution system to analyze phase voltage asymmetry, trip currents of residual current devices, low-frequency polarization of the insulation, and the leakage current effects on the human body.

Keywords

mine power distribution system, leakage current, residual current device, insulation properties, EMF sources, electrical safety

For citation

Pichuev A. V., Petrov V. L. Equivalent circuit for mine power distribution systems for the analysis of insulation leakage current. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023;8(1):78–86. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2023-01-72>

Термины и определения

Ток утечки – электрический ток, протекающий в землю через открытые, сторонние проводящие части и защитные проводники при нормальных условиях.

Режим утечки тока – режим, который определяется уровнем напряжения отдельных фаз электрической сети относительно земли при различных значениях активного сопротивления и емкости изоляции.

Ток абсорбции – ток, протекающий через изоляционный материал, величина которого зависит от релаксационного вида поляризации и перераспределения свободных зарядов в объеме диэлектрика.

Ток сквозной проводимости – ток, который обусловлен направленным движением заряженных частиц (ионов) при приложении напряжения к изоляционному материалу и сопровождается нейтрализацией зарядов на оболочке или токоведущей жиле проводника электрического тока.

Введение

Характеристики безопасности и надежности шахтных электротехнических комплексов и систем во многом обеспечивают успешность горных предприятий. Сложные технологические условия [1, 2], особенно при ведении подземных горных работ [1, 3, 4], определяют совокупность требований, которые предъявляются к подземным электрическим сетям горных предприятий [1, 5, 6]. Все это определяет необходимость совершенствования систем защиты персонала на основе исследования характеристик сетей, моделирования режимов работы, в том числе аварийных.

В процессе эксплуатации шахтных подземных электрических сетей происходит снижение уровня сопротивления изоляции сети относительно земли. При этом активное сопротивление изоляции каждой из фаз может изменяться как равномерно (режим симметричной утечки тока через изоляцию), так и неравномерно (режимы однофазной и двухфазной утечки тока) [1–3, 5]. В результате возникновения несимметричных утечек происходит существенное изменение фазных напряжений (возрастание в неповрежденных фазах до линейных величин), что не только приводит

к возникновению аварийных режимов в работе электрооборудования, но и представляет серьезную опасность в случае прикосновения человека к фазе сети.

Математическое моделирование режимов утечки позволяет с достаточной степенью точности аналитически описать любые, в том числе и такие сложные, как переходные процессы в электроустановках.

Важным этапом в аналитическом исследовании является обоснование структуры и параметров математической модели, определение целей и задач моделирования, условий и порядка проведения эксперимента, выбор метода обработки результатов исследований.

Основой математической модели для анализа режимов утечки тока, определения уровней напряжения и параметров изоляции электрической сети относительно земли является вывод и составление на основе синтезированной схемы замещения системы уравнений для оценки степени их воздействия на режимы утечки тока.

Анализ научных исследований режимов утечки тока через изоляцию показал, что существует множество различных методов и средств решения поставленных задач в зависимости от конкретных условий, параметров и режимов работы электроустановок.

Многие авторы при решении задач, связанных с вопросами контроля режимов утечки, в своих исследованиях использовали различные варианты схем замещения изоляции электрической сети относительно земли [2, 6, 7]. Изоляция кабельной сети характеризуется *активным сопротивлением*, определяемым качеством изоляционного материала по всей длине линии, и *сосредоточенным сопротивлением*, являющимся результатом механических повреждений, старения, увлажнения и т.д., *емкость изоляции* относительно земли определяется в основном протяженностью электрически связанных линий и сечением кабелей. При этом следует отметить тот факт, что в процессе работы шахтной подземной электрической сети величины сопротивлений и емкости изоляции изменяются с зависимости от последовательности подачи (снятия) питания на отдельные электроустановки, осуществляемой в соответствии

с протоколом запуска (останова). Например, подача электроэнергии на магистральный кабель участковой сети и последующее подключение к магистрали отходящих от распределительного пункта до электроустановок кабельных линий.

При моделировании режимов утечки тока возникают проблемы, обусловленные тем, что переходные процессы по мере усложнения расчетной схемы замещения электрической сети достаточно сложно описать математически. Учет широкого спектра параметров устройств защитного отключения, фазной изоляции сети, цепи утечки тока, компенсаторов емкостного тока, устройств защитного шунтирования и т.д., приводящих к возникновению электромагнитных переходных процессов в RC -колебательных контурах, математическая интерпретация которых до настоящего времени в полной мере не решена, существенно усложняет применение классических методов моделирования. Одним из решений данной проблемы является имитационное моделирование исследуемых режимов утечки, для которого и возникает необходимость разработки соответствующей схемы замещения и подбора ее параметров.

Цели и задачи

Целью данной статьи является обоснование схемы замещения шахтной подземной электрической сети путем синтеза ее структуры для последующего анализа режимов утечки тока через изоляцию в зависимости от решаемой исследователем научной задачи.

К основным задачам, решение которых предложено в статье, относятся:

- обоснование структуры схемы замещения шахтной подземной электрической сети и определение параметров элементов схемы;

- определение расчетных соотношений для электромагнитных постоянных времени затухания коле-

баний в контурах, образованных параметрами изоляции и дополнительными сопротивлениями цепи утечки тока;

- синтез схемы замещения для решения конкретной научной задачи в области контроля изоляции и защитного отключения.

Структура и параметры модели

Для моделирования режимов была принята схема замещения цепей утечки тока, характерная для шахтной подземной электрической сети напряжением до 1140 В (рис. 1).

Рассмотрим основные элементы схемы замещения для анализа режимов утечки тока через изоляцию и человека, в случае его прикосновения к токоведущей фазе.

Источником ЭДС (рис. 1, а) является вторичная обмотка силового трансформатора передвижной участковой электрической подстанции напряжением 6000/660 (1140) В.

Устройство защитного отключения (УЗО) представлено в виде схемы замещения активно-индуктивного (рис. 1, б) или, как вариант, активно-вентильного (рис. 1, в) фильтров подключения к электрической сети (УЗО типа УАКИ, АЗАК, АЗШ, САЗУ, АСЗС, АЗУР) [7, 8]. УЗО задается параметрами активно-вентильного фильтра: фазные сопротивления цепей подключения к сети $R_{Fa} = R_{Fb} = R_{Fc} = 15$ кОм, сопротивления $R_{PN} = 1$ кОм и индуктивности $L_{PN} = 8$ Г цепи измерителя, подключаемые между искусственной нулевой точкой фильтра присоединения и землей. Для УЗО с активно-индуктивной схемой присоединения принимаются следующие параметры фильтра: фазные активные сопротивления $R_{Fa} = R_{Fb} = R_{Fc} = 0,3$ кОм, фазные индуктивности $L_{Fa} = L_{Fb} = L_{Fc} = 75$ Г, сопротивление и индуктивность цепи измерителя соответственно $R_0 = 3,9$ кОм, $L_0 = 8$ Г [5].

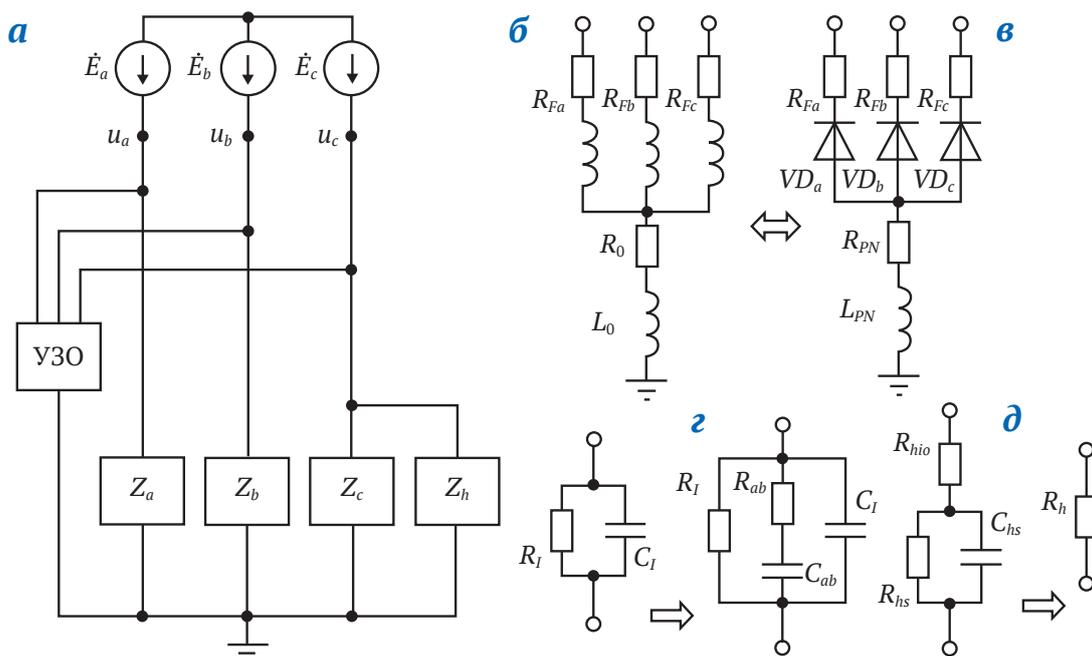


Рис. 1. Схема замещения цепей утечки тока в шахтной подземной электрической сети

Составляющие полных сопротивлений изоляции фаз сети (Z_a, Z_b, Z_c) принимаются в следующих диапазонах: активная – $R_I = 10,5–300$ кОм/фазу, емкостная – $C_I = 0,1–1,5$ мкФ/фазу (рис. 1, г). Сопротивление и емкость абсорбции принимаются соответственно в диапазонах $R_{ab} = 0,01 – 10$ МОм/фазу, $C_{ab} = 0,01–0,5$ мкФ/фазу. Составляющие сопротивления цепи утечки тока через схему замещения тела человека (Z_h): сопротивление внутренних органов $R_{hio} = 0,7–1$ кОм, сопротивление кожных покровов $R_{hs} = 0,5–3,5$ кОм, емкость кожных покровов $C_{hs} = 0,3–1$ мкФ (рис. 1, д). При напряжении более 380 В допустимо упрощение $Z_h \approx R_h = R_{hio} = 1$ кОм, т. к. уже при напряжении более 40 В утрачиваются защитные свойства кожных покровов и сопротивление цепи утечки определяется активным сопротивлением внутренних органов [9–11].

Анализ результатов исследований показал, что учет параметров УЗО в схеме замещения электрических цепей утечки значительно усложняет как схему замещения, так и математическую модель [12–14]. Важным фактором является то, что введение в схему замещения узла искусственного смещения нейтрали и дополнительной цепи утечки через измеритель УЗО приводит к заметному (на 15–20 %) возрастанию тока утечки через изоляцию (особенно при активно-вентильном фильтре подключения к сети) [5, 7, 15].

Количественные показатели токов утечки в симметричных режимах на напряжениях 380 и 660 В достаточно известны для схем замещения нулевой последовательности [4, 6, 12].

При всём многообразии схемных решений наиболее распространенными являются схемы замещения нулевой последовательности, для которых параметры изоляции эквивалентируются по формулам:

$$R_I = \frac{R_a R_b R_c}{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}; C_I = C_a + C_b + C_c, \quad (1)$$

где $R_a, R_b, R_c, C_a, C_b, C_c$ – соответственно фазные активные сопротивления и емкости.

Для таких схем параметры изоляции изменяются в пределах: $R_I = 3,5–300$ кОм/фазу, $C_I = 0,03–1$ мкФ/фазу.

Схемы замещения фазной изоляции линейными сосредоточенными емкостями и активными сопротивлениями позволяют более точно описать процессы, происходящие в электрической сети в несимметричных режимах утечки тока.

Для таких схем при анализе токов утечки сопротивления и емкости фаз сети относительно земли задаются в пределах $R_I = 31,5–300$ кОм и $C_I = 0,3–3$ мкФ.

С учетом того факта, что исследуемые режимы утечки тока относятся к переходным процессам за время срабатывания УЗО, при моделировании фазную изоляцию целесообразно представить в виде постоянных времени затухания электромагнитных колебаний в RC-контурах:

$$T_{Ia} = \frac{X_{Ia}}{R_{Ia}}, \quad T_{Ib} = \frac{X_{Ib}}{R_{Ib}}, \quad T_{Ic} = \frac{X_{Ic}}{R_{Ic}}, \quad (2)$$

где R_{Ia}, R_{Ib}, R_{Ic} – активные сопротивления изоляции; X_{Ia}, X_{Ib}, X_{Ic} – емкостные сопротивления изоляции

($X_I = 1/(\omega_0 C_I)$); T_{Ia}, T_{Ib}, T_{Ic} – постоянные времени затухания.

Анализ показывает, что амплитуда и скорость затухания электромагнитных колебаний в значительной степени зависят от сочетания активного и емкостного сопротивлений фаз электрической сети. Наибольшие показатели приходятся на сопротивления изоляции до 60 кОм/фазу при емкостях менее 0,3 мкФ/фазу. В диапазоне активного сопротивления $R_I = 60–300$ кОм/фазу и емкостях более 0,5 мкФ/фазу значения постоянных T_I менее 0,1 рад/с и стремятся к нулю.

Этот факт обусловлен тем, что при больших емкостях активная составляющая не оказывает заметного влияния на характер успокоения колебаний частоты в контурах фазной изоляции, утечка тока носит чисто емкостный характер и защитные свойства изоляции резко снижаются. По сути, утечка тока в фазе не приводит к мгновенному снижению ее фазного напряжения за счет достаточно высокого зарядного потенциала емкости изоляции сети относительно земли. При этом опасность поражения электрическим током резко возрастает [16–18].

При моделировании процесса утечки тока через схему замещения тела человека (рис. 2) в случае учета его параметров в виде активных сопротивлений внутренних органов R_{hio} и кожных покровов R_{hs} , а также емкости кожи C_{hs} ($X_{hs} = 1/(\omega_0 C_{hs})$) выполним следующие преобразования.

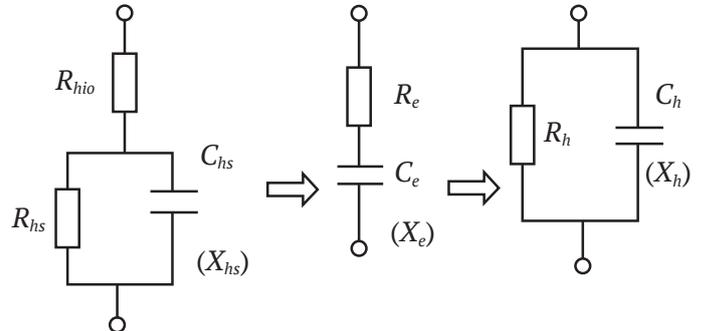


Рис. 2. Преобразование схемы замещения тела человека

Эквивалентные сопротивления для схемы замещения параметров тела человека определяются из выражений:

$$R_e = R_{hio} + \frac{R_{hs} X_{hs}^2}{X_{hs}^2 + R_{hs}}; \quad X_e = R_{hio} + \frac{X_{hs} R_{hs}^2}{R_{hs}^2 + X_{hs}}. \quad (3)$$

С учетом обратного преобразования цепочки $R_e C_e$ составляющие полного сопротивления тела человека:

$$R_h = \frac{X_e^2 + R_e^2}{R_e}; \quad X_h = \frac{X_e^2 + R_e^2}{X_e}. \quad (4)$$

Тогда активное и емкостное сопротивления фазы сети, в которой произошло однополюсное прикосновение к токоведущей части электрической сети, определится по формулам:

$$R_{Ih} = \frac{R_I R_h}{R_I + R_h}; \quad X_{Ih} = \frac{X_I X_h}{X_I + X_h}. \quad (5)$$

Электромагнитная постоянная времени затухания колебаний в контуре фазной изоляции с учетом параметров тела человека:

$$T_{th} = \frac{X_{th}}{R_{th}}. \quad (6)$$

В случае пробоя кожных покровов сопротивление тела человека будет определяться только сопротивлением его внутренних органов $R_{hio} \approx 1$ кОм, поэтому параметры цепи утечки определяются по формулам:

$$R_{th} = \frac{R_I}{1 + R_I} \approx 1; \quad X_{th} = X_I; \quad T_{th} = \frac{X_I(1 + R_I)}{R_I}; \quad (7)$$

Анализ показывает, что в данном случае значение постоянной T_I (2,5–35 рад/с) на порядок превышает аналогичные значения постоянной T_{th} (0,1–3 рад/с). Наибольшее приращение значений T_{th} происходит при величинах сопротивления изоляции менее 31,5 кОм/фазу и емкости изоляции менее 0,3 мкФ/фазу. При увеличении сопротивления изоляции $R_I > 31,5$ кОм/фазу электромагнитные постоянные T_{th} практически не изменяются, их уровень определяется только величиной емкости фазной изоляции C_I .

Этот факт объясняется тем, что в случае прикосновения человека к фазе сети сопротивление цепи утечки через его активную составляющую резко снижается до значений, близких к 1 кОм и практически не зависит от значения R_I . По сути, происходит шунтирование активного сопротивления изоляции. При этом величина тока утечки I_y и электромагнитная постоянная T_{th} зависят только от величины емкости изоляции фазы сети относительно земли.

Для учета процесса низкочастотных поляризации модель фазной изоляции может быть дополнена RC-цепочкой, состоящей из емкости C_{ab} и активного сопротивления R_{ab} абсорбционному току i_{ab} (рис. 1, 2) [5, 7, 18].

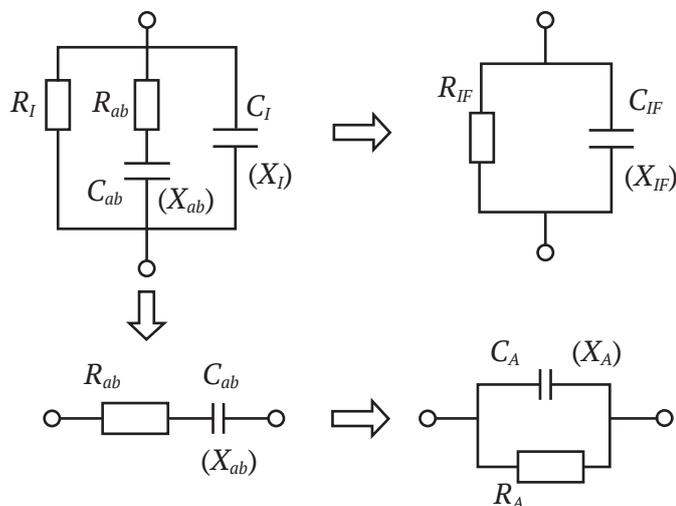


Рис. 3. Этапы преобразования схемы замещения фазной изоляции шахтной подземной электрической сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции

При математическом анализе электромагнитного переходного процесса в изоляции непосредственный учет дифференциального звена (R_{ab} , X_{ab}) приводит к усложнению математической модели, т.к. последовательная активно-емкостная цепь является так называемым «источником помех» в заданном колебательном контуре. В этом случае необходимо выполнить определенные преобразования схемы замещения фазной изоляции шахтной подземной электрической сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции (рис. 3).

Следующая зависимость позволяет определить электромагнитную постоянную времени затухания колебаний в контуре активного и емкостного сопротивления изоляции электрической сети:

$$T_{IF} = \frac{X_{IF}}{R_{IF}} = \frac{X_I(R_I R_{ab} + Z_{ab}^2)}{R_I(X_I X_{ab} + Z_{ab}^2)} = T_I \frac{R_I R_{ab} + Z_{ab}^2}{X_I X_{ab} + Z_{ab}^2}, \quad (8)$$

где R_{ab} , X_{ab} , Z_{ab} – активное, емкостное и полное сопротивление току абсорбции в фазе сети; R_{IF} , X_{IF} – составляющие эквивалентного фазного сопротивления изоляции сети относительно земли, определяемые по формулам:

$$R_{IF} = \frac{R_I R_A}{R_I + R_A} = \frac{R_I Z_{ab}^2}{R_I R_{ab} + Z_{ab}^2}; \quad (9)$$

$$X_{IF} = \frac{X_I X_A}{X_I + X_A} = \frac{X_I Z_{ab}^2}{X_I X_{ab} + Z_{ab}^2}.$$

Здесь R_I , X_I – активное и емкостное фазные сопротивления изоляции сети относительно земли, соответствующие их проводимостям сквозного тока; R_A , X_A – активное и емкостное сопротивления току абсорбции, определяемые по формулам:

$$R_A = \frac{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}{R_{ab}}; \quad X_A = \frac{R_{ab}^2 + X_{ab}^2}{X_{ab}}. \quad (10)$$

При значениях емкости C_{ab} , соизмеримой с емкостью изоляции C_I , электромагнитная постоянная T_{IF} достигает максимального значения [14].

Использование приведенных выше зависимостей позволяет синтезировать схему замещения шахтной подземной электрической сети для широкого спектра решаемых задач.

В качестве примера на рис. 4 приведена разработанная в среде *Simulink* имитационная модель шахтной электрической сети с активно-индуктивным фильтром присоединения устройства защитного отключения.

Имитационная модель обеспечивает выполнение следующих функций:

- моделирование режимов утечки тока через фазную изоляцию электрической сети с учетом параметров активно-индуктивного фильтра присоединения устройства защитного отключения;

- анализ влияния низкочастотной поляризации на уровень электробезопасности в переходных и установившихся режимах утечки тока через фазную изоляцию шахтной подземной электрической сети;

– анализ переходных и установившихся режимов утечки через фазную изоляцию для оценки потенциальной опасности поражения человека электрическим током в случае прикосновения к токоведущей части электроустановки;

– анализ изменения токов и напряжений в ветвях фильтра присоединения и цепи измерителя устройства защитного отключения в зависимости от режима утечки тока через изоляцию шахтных подземных электрических сетей.

В качестве примера на рис. 5 и 6 приведены осциллограммы токов утечки и фазных напряжений

сети относительно земли при однофазной утечке тока через человека (однополюсное прикосновение к фазе А, $R_h = 1$ кОм), симметричных параметрах изоляции $R_I = 300$ кОм, $C_I = 0,03$ мкФ, $R_{ab} = 1$ МОм, $C_{ab} = 0,01$ мкФ и напряжении $U_L = 1140$ В.

Представленные осциллограммы позволяют определить в контролируемых узлах схемы замещения количественные показатели мгновенных и действующих значений токов и напряжений, углы фазовых сдвигов, амплитуду ударного тока и длительность переходного процесса при возникновении режима однофазной утечки тока через человека.

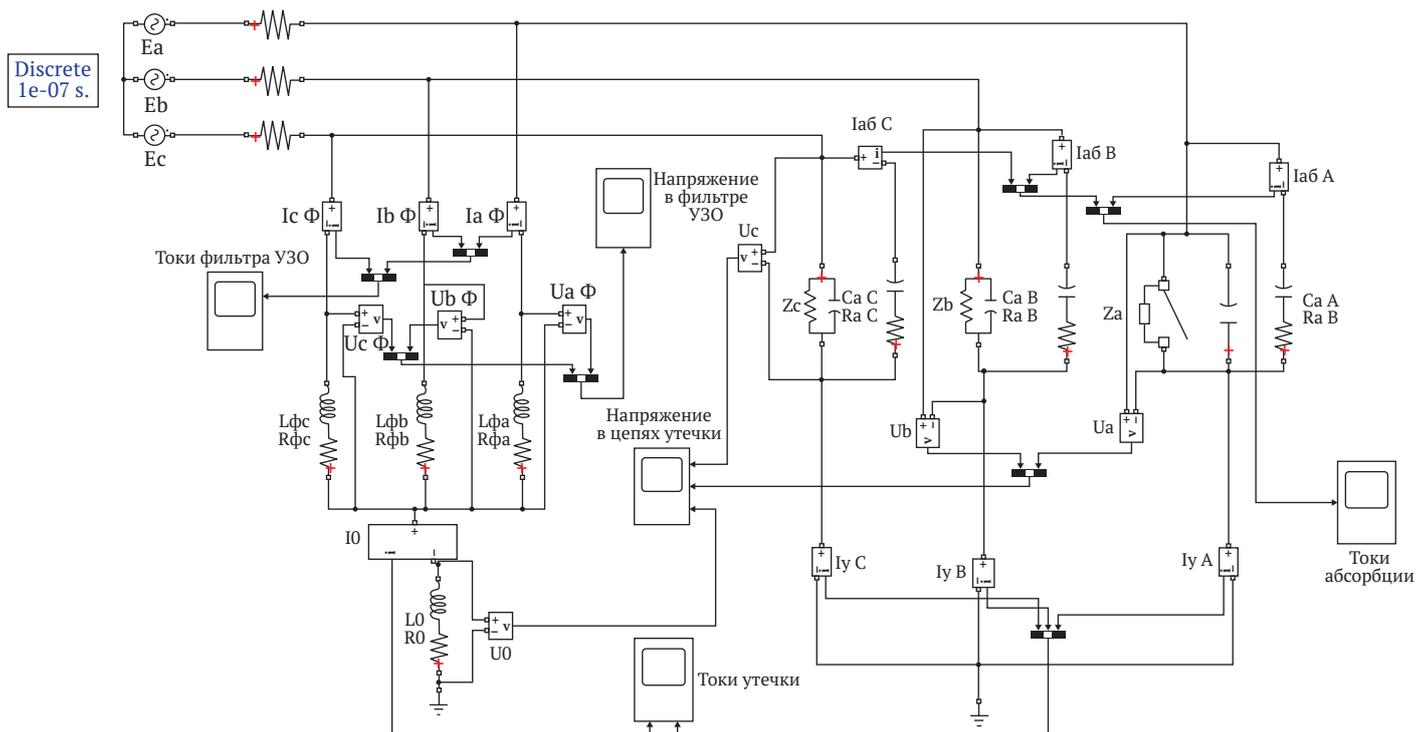


Рис. 4. Имитационная модель шахтной подземной электрической сети с активно-индуктивным фильтром присоединения устройства защитного отключения



Рис. 5. Осциллограмма токов утечки через изоляцию, тело человека и цепь измерителя УЗО с активно-индуктивным фильтром присоединения к сети

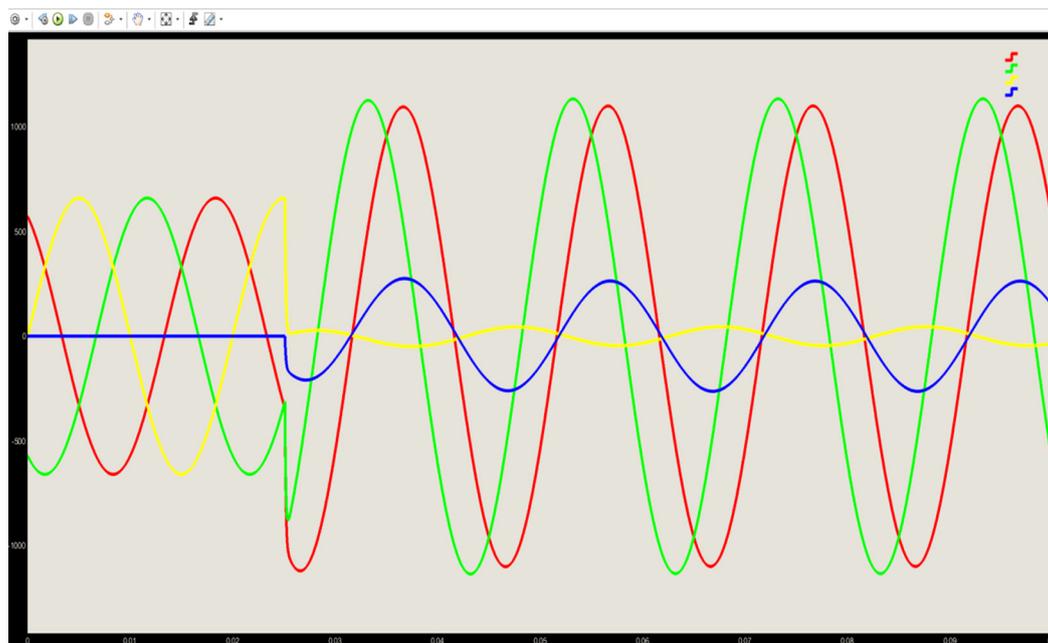


Рис. 6. Оциллограмма фазных напряжений и напряжения нулевой последовательности до и после момента прикосновения человека к токоведущей фазе А

Сравнительный анализ результатов моделирования показал не только высокую сходимость (более 0,95) с аналогичными результатами исследований [5, 7, 13], но и возможность существенно расширить диапазон решения целого ряда задач в области контроля изоляции, определения эффективности устройств защитного отключения и обеспечения электробезопасности шахтных подземных электрических сетей.

Выводы

Предложенная схема замещения шахтной подземной электрической сети может быть использована для анализа токов через изоляцию и фазных напряжений при изменении сопротивления изоляции в симметричных, однофазных и двухфазных режимах утечки, в том числе в случае прикосновения человека к токоведущей части электроустановки.

Параметры схемы замещения источника ЭДС, устройства защитного отключения и цепей утечки

через изоляцию позволяют проводить исследования в широком диапазоне их изменения, в том числе в зоне критических значений. Это позволяет дать более точную количественную и качественную оценку эффективности работы устройств защитного отключения, оценить допустимые уровни сопротивления изоляции и токов через человека, оценить степень влияния низкочастотной поляризации на уровень сопротивления изоляции и дать рекомендации по определению качества изоляционного материала, обоснованию использования средств защитного шунтирования поврежденных фаз, а также применения средств гашения остаточного напряжения в отключаемой сети.

Применение схемы замещения шахтной подземной электрической сети и ее параметров на основе предложенного методического подхода позволяет выполнить решение широкого спектра задач в области контроля изоляции и защитного отключения с учетом специфики горного производства.

Список литературы

1. Гладилин Л.В., Щуцкий В.И., Бацезев Ю. Г. и др. *Электробезопасность в горнодобывающей промышленности*. М.: Недра; 1977. 327 с.
2. Щуцкий В.И., Сидоров А.И., Ситчихин Ю.В. и др. *Электробезопасность на открытых горных работах*. М.: Недра; 1996.
3. Пичуев А.В., Петуров В.И., Суворов И.Ф. *Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий*. М.: Горная книга; 2011. 326 с.
4. Ключев Р.В., Босиков И.И., Гаврина О.А., Ляшенко В.И. Оценка эксплуатационной надежности электроснабжения развивающихся участков добычи руд на высокогорном руднике. *Горные науки и технологии*. 2021;6(3):211–220. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>
5. Ким К.Е. *Исследование нестационарных режимов шахтных электрических сетей напряжением до 1000 В и их влияние на условия электробезопасности*. [Дисс. канд. техн. наук] М.: МГИ; 1975.
6. Колосюк В.П. *Защитное отключение рудничных электроустановок*. М.: Недра; 1980. 334 с.



7. Сидоров А.И., Петуров В.И., Пичуев А.В. и др. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения. *Успехи современного естествознания*. 2010;(2):114. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=7752>
8. Петуров В.И. Способ измерения параметров изоляции фаз в сетях с изолированной нейтралью. *Электробезопасность*. 1998;(1):9–12.
9. Kano Murga J. Electricity. The danger of its use and protection of people from electric shock. MF. Per. GPNTB, “Instalador”. 1976;(106):75–78.
10. Pouvel I. Problems de protection dans les reseaux miniers. *Revue de l'industrie minerale*. 1983;25(7). (In French)
11. Kupfer J., Bastek R., Eggert S. Grenzwerte zur Vermeidung von unfallen durch electrischen strom min tödlichem Ausgang. *Zeitschrift für die Gesamte Hygiene*. 1981;27(1):9–12.
12. Суворов И.Ф. *Комплексные системы обеспечения условий электробезопасности при эксплуатации электроустановок до 1000 В*. Чита: ЧитГУ; 2005. 328 с.
13. Хусаинов Ш.Н., Сидоров А.И., Хусаинова Н.А. Улучшенный метод определения проводимостей изоляции участка сети, содержащего линию с отпайкой, по результатам измерения режимных параметров. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика»*. 2002;(7):24–29.
14. Пичуев А.В. Параметрические зависимости сопротивления изоляции рудничных участков электрических сетей. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2011;(4):398–400.
15. Цапенко Е.Ф. Резонансные перенапряжения в шахтных сетях вследствие применения аппаратов защиты типа УАКИ, АЗАК, АЗШ, АЗУР. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2000;(3):106–109.
16. Цапенко Е.Ф. Состояние защиты от токов утечки на землю в шахтных сетях напряжением до 1200 В. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003;(6):155–156.
17. Пичуев А.В. Режимы несимметричной утечки тока через изоляцию рудничной участковой электрической сети. *Электробезопасность*. 2011;(2):28–33.
18. Abderrezak H., Mizane A. Hybrid model for insulation active component control in an isolated neutral electrical network. In: *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Istanbul, Turkey, July 3–6, 2012. Pp. 1961–1970. URL: <https://ieomsociety.org/ieom2012/pdfs/466.pdf>

References

1. Gladilin L.V., Shchutsky V.I., Batsezhev Yu.G. et al. *Electrical safety in the mining industry*. Moscow: Nedra; 1977. 327 p. (In Russ.)
2. Shchutsky V.I., Sidorov A.I., Sitchikhin Yu.V. et al. *Electrical safety in open-pit mining*. Moscow: Nedra; 1996. (In Russ.)
3. Pichuev A.V., Peturov V.I., Suvorov I.F. *Effects of non-stationary modes on electrical safety of mining electrical equipment*. Moscow: Gornaya kniga; 2011. 326 p. (In Russ.)
4. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Gavrina O.A., Lyashenko V.I. Assessment of operational reliability of power supply to developing ore mining areas at a high-altitude mine. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2021;6(3):211–220. (In Russ.) <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2021-3-211-220>
5. Kim K.E. *Non-stationary modes in mine electrical networks up to 1,000 V and their impact on electrical safety*. [Ph.D. Thesis] Moscow: Moscow Mining University; 1975. (In Russ.)
6. Kolosyuk V.P. *Emergency tripping in mine electrical installations*. Moscow: Nedra; 1980. 334 p. (In Russ.)
7. Sidorov A.I., Peturov V.I., Pichuev A.V. et al. Electrical safety of power supply systems. *Advances in Current Natural Sciences*. 2010;(2):114. URL: <https://natural-sciences.ru/article/view?id=7752> (In Russ.)
8. Peturov V.I. Method for measuring phase insulation properties in insulated neutral systems. *Elektrobezopasnost*. 1998;(1):9–12. (In Russ.)
9. Kano Murga J. *Electricity. The danger of its use and protection of people from electric shock*. MF. Per. GPNTB, “Instalador”. 1976;(106):75–78.
10. Pouvel I. Problems de protection dans les reseaux miniers. *Revue de l'industrie minerale*. 1983;25(7). (In French)
11. Kupfer J., Bastek R., Eggert S. Grenzwerte zur Vermeidung von unfallen durch electrischen strom min tödlichem Ausgang. *Zeitschrift für die Gesamte Hygiene*. 1981;27(1):9–12. (In German)
12. Suvorov I.F. *Integrated electrical safety systems for electrical installations up to 1000 V*. Chita: Chita State University; 2005. 328 p. (In Russ.)
13. Khusainov Sh.N., Sidorov A.I., Khusainova N.A. Improved method for insulation conductivity estimation of a grid segment with a branch line from the electric parameter measurements. *Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*. 2002;(7):24–29. (In Russ.)
14. Pichuev A.V. Parametric relationships for the insulation resistance of mine electrical networks. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2011;(4):398–400. (In Russ.)



15. Tsapenko E.F. Resonant overvoltages in mine networks caused by the use of UAKI, AZAK, AZSh, AZUR RCP Devices. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2000;(3):106–109. (In Russ.)
16. Tsapenko E.F. Leakage current protection monitoring in mine networks up to 1,200 V. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2003;(6):155–156. (In Russ.)
17. Pichuev A.V. Unsymmetrical current leakage through the insulation in mine electrical networks. *Elektrobezopasnost*. 2011;(2):28–33. (In Russ.)
18. Abderrezak H., Mizane A. Hybrid model for insulation active component control in an isolated neutral electrical network. In: *Proceedings of the 2012 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Istanbul, Turkey, July 3–6, 2012. Pp. 1961–1970. URL: <https://ieomsociety.org/ieom2012/pdfs/466.pdf>

Информация об авторах

Александр Вадимович Пичуев – кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики и энергоэффективности горной промышленности, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.com/authorid/57209798580); e-mail allexstone@mail.ru

Вадим Леонидович Петров – доктор технических наук, проректор, профессор кафедры энергетики и энергоэффективности промышленных предприятий, Университет науки и технологий МИСИС, г. Москва, Российская Федерация; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.com/authorid/8919065900); e-mail petrovv@misis.ru

Information about the authors

Alexandr V. Pichuev – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of Mining Industry, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0001-7457-5702](https://orcid.org/0000-0001-7457-5702), Scopus ID [57209798580](https://scopus.com/authorid/57209798580); e-mail allexstone@mail.ru

Vadim L. Petrov – Dr. Sci. (Eng.), Vice-Rector, Professor of the Department of Energy and Energy Efficiency of Industrial Enterprises, University of Science and Technology MISIS, Moscow, Russian Federation; ORCID [0000-0002-6474-5349](https://orcid.org/0000-0002-6474-5349), Scopus ID [8919065900](https://scopus.com/authorid/8919065900); e-mail petrovv@misis.ru

Поступила в редакцию	07.01.2023	Received	07.01.2023
Поступила после рецензирования	25.01.2023	Revised	25.01.2023
Принята к публикации	26.01.2023	Accepted	26.01.2023