

**АБАЛАКОВ Геннадий Иванович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО  
КОНТРОЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ  
ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

**Специальность: 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы,  
включая их управление и регулирование**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Кемерово-1999**

**Актуальность работы**

Эксплуатационная надежность электрооборудования, работающего на открытых горных разработках, зависит от большого числа факторов, главные из которых погодно-климатические условия окружающей среды, горно-геологические и технологические факторы, условия эксплуатации. Как показывает анализ эксплуатационных данных аварийности карьерных сетей, на долю замыканий на землю приходится до 80% всех повреждений. Для угольных разрезов регионов Сибири и Урала значения относительной частоты однофазных замыканий на землю составляют: Кузбасс - 65%, Урал - 70%, Восточная Сибирь - 80%. Наиболее повреждаемым элементом в системе электроснабжения разрезов является гибкий экскаваторный кабель (более половины всех замыканий на землю).

Повышенная аварийность электрооборудования приводит к образованию источников опасности поражения электрическим током обслуживающего персонала. Значительная часть электротравм с тяжелым и смертельным исходом приходится на долю электроустановок напряжением 6кВ.

В соответствии с требованием Инструкции по безопасной эксплуатации и обслуживанию электрооборудования и электросетей на карьерах высоковольтных ящики (экскаваторные приключательные пункты), оборудованные устройством однократного автоматического повторного включения (ОАПВ), должны быть оснащены блокировочным реле контроля изоляции отходящего присоединения. Разработка устройств, позволяющих в автоматическом режиме эффективно контролировать диэлектрические параметры изоляции высоковольтных кабелей, обеспечивая при этом требуемый уровень электробезопасности человека, является актуальной задачей.

**Целью работы** является разработка блокировочного устройства контроля изоляции, предотвращающего подачу рабочего напряжения на человека, прикоснувшегося к токоведущим частям, или на устойчивое повреждение изоляции отходящего присоединения (гибкого экскаваторного кабеля).

**Задачи исследований.** Исходя из поставленной цели и анализа состояния вопроса, необходимо:

- выбрать метод контроля диэлектрических параметров изоляции высоковольтных кабелей, учитывая физические процессы, происходящие в реальных высоковольтных распределительных сетях, в частности, воздействие на изоляцию перенапряжений различного происхождения;
- определить параметры испытательного воздействия, способного эффективно выявлять опасные повреждения изоляции высоковольтных кабелей, оценить влияние испытательного воздействия на неповрежденную часть изоляции;
- на основе современных представлений о механизме действия электрического тока на человека и существующих критериев электробезопасности, определить параметры испытательного воздействия, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала в процессе контроля изоляции;
- разработать математическую модель, на основе которой определить параметры элементов блокировочного устройства контроля изоляции, обеспечивающих расчетные характеристики испытательного напряжения.

**На защиту** выносятся:

- импульсный метод контроля высоковольтной изоляции гибкого высоковольтного кабеля, обеспечивающий нормируемые критерии электробезопасности в процессе проведения испытания и выявления опасных повреждений высоковольтной изоляции;
- разработанное блокировочное реле импульсного контроля изоляции гибкого кабеля для экскаваторных приключательных пунктов.

**Научная новизна** работы:

- определены параметры испытательного напряжения, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала и выявление опасных повреждений изоляции высоковольтных кабельных линий;
- установлено, что в случае пробоя изоляции кабеля, если активное сопротивление в цепи искрового канала меньше 200-300 Ом, потеря заряда будет

больше 10% первоначального заряда накопительной емкости генератора импульсного напряжения (ГИН), независимо от длины кабельной линии, следовательно, относительную величину потери заряда можно принять в качестве параметра, характеризующего наличие электрического пробоя изоляции.

- разработана математическая модель, на основе которой определены параметры испытательного напряжения блокировочного устройства контроля изоляции, обеспечивающие нормируемые критерии электробезопасности.

#### **Личный вклад автора:**

- определены параметры испытательного напряжения блокировочного устройства контроля высоковольтной изоляции, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала и выявление опасных повреждений высоковольтного кабеля;

- разработана математическая модель цепи "ГИН – кабельная линия";
- установлено, что при пробое изоляции кабеля, если активное сопротивление в цепи искрового канала меньше 200-300 Ом, потеря заряда больше 10% первоначального заряда накопительной емкости ГИН, независимо от длины кабельной линии, следовательно, относительную величину потери заряда можно принять в качестве параметра, характеризующего наличие электрического пробоя изоляции.

- разработан алгоритм работы блокировочного реле импульсного контроля изоляции для экскаваторных приключательных пунктов;

- разработано и изготовлено блокировочное реле импульсного контроля изоляции гибких высоковольтных кабелей.

**Достоверность научных выводов и рекомендаций**, сформулированных в работе, обосновывается и подтверждается:

- совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований (в пределах 5 - 10 %);

- использованием в исследованиях последних достижений в области электробезопасности, современных представлений о механизме воздействия электрического тока на человека, исследований в области электротехники, фи-

зики, математики, математического моделирования, вычислительной техники, апробированных методов теории вероятности и математической статистики, планирования экспериментов.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что:

- разработано Техническое задание на блокировочное реле импульсного контроля изоляции высоковольтных (6 кВ) кабельных линий (БРИК - 6).
- разработан и изготовлен опытный образец БРИК - 6.
- результаты теоретических и лабораторных исследований используются в учебном процессе;
- проведенные исследования используются в НИР № И-3.22 "Разработка и изготовление устройства опережающего контроля изоляции в высоковольтных сетях горных предприятий", выполняемой в рамках целевой программы "Неотложные меры по улучшению условий и охраны труда в Кемеровской области".

**Апробация работы.** Основные материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались: на заседании электромеханической секции Ученого совета ВостНИИ (1986 г.); АО "Кузбассразрезуголь" (1999 г.); АО "Кедровский угольный разрез" (1999г.); на научном семинаре кафедры Электроснабжения горных и промышленных предприятий КузПИ (1987 г., 1999 г.), на совместном заседании кафедр "Электроснабжение горных и промышленных предприятий", "Электропривод и автоматизация ", "Общая электротехника" (1999 г.), научно-технических конференциях студентов, аспирантов и преподавателей КузГТУ (1990 - 1999).

**Публикации.** Основное содержание диссертации опубликовано в 4 научных статьях, в том числе, имеется одно авторское свидетельство на изобретение.

**Структура и объем диссертации** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения, изложена на 180 страницах машинописного текста, иллюстрирована 41 рисунком, содержит 5 таблиц, список использованной литературы из 87 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Задача бесперебойного и надежного электроснабжения электроприемников разрезов во многом зависит от состояния эксплуатируемого электрооборудования, интенсивности повреждений электроустановок и сетей. Большая площадь разработок и децентрализация рабочих мест требуют создания весьма сложных распределительных сетей передачи электрической энергии для питания горных машин. Тяжелые условия эксплуатации, передвижной характер работы приводят к частым отказам в карьерных распределительных сетях (КРС). Из-за повреждений воздушных (ВЛ) и кабельных (КЛ) линий электропередачи происходит примерно 75 % всех отказов в КРС, причем около 50 % всех отказов приходится на гибкие высоковольтные кабели с резиновой изоляцией. Средняя наработка на отказ 1 км кабельной линии в условиях карьера составляет 961 ч. Анализ характера и места повреждений кабельных линий показывает, что более 90% их всех повреждений относится к замыканиям на землю, причем наименее надежным является призабойный участок - приключательный пункт - гибкий экскаваторный кабель - экскаватор.

Важную роль в формировании уровня электробезопасности и бесперебойности электроснабжения в высоковольтных распределительных сетях горных предприятий играют внешние и внутренние перенапряжения. В числе основных причин повреждений изоляции гибких высоковольтных кабелей - пробой (перекрытия) при внутренних и атмосферных перенапряжениях. Удельный вес повреждений элементов КРС при наиболее частых дуговых перенапряжениях характеризуется такими соотношениями: гибкие резиновые кабели - 73,7 %; воздушные ЛЭП - 2,9 %; высоковольтное электрооборудование горнотранспортных машин и электросетевых устройств - 23,4 % . При атмосферных перенапряжениях свыше 40 % повреждений также происходит в гибких кабелях.

Согласно статистическим данным на открытые разработки приходится около 30 % от общего числа электротравм в угольной промышленности. Из анализа причин электротравм следует, что подавляющее большинство электро-

поражений произошло в результате однополюсного соприкосновения людей с токоведущими частями электроустановок (80 - 90%). Причем на открытых работах выделяются поражения из-за нарушения технических мероприятий при ремонтах под напряжением, ошибочная подача напряжения во время ремонта, осмотров (около 11%) и т. п.

В соответствии с требованием Инструкции по безопасной эксплуатации и обслуживанию электрооборудования и электросетей на карьерах запрещается применение автоматического повторного включения (АПВ) без предварительного контроля изоляции отходящего присоединения.

Предварительный контроль изоляции должен преследовать две основные цели: во-первых, перед включением силового выключателя выявить в отходящей линии электропередачи 6-10кВ места с ослабленной или поврежденной изоляцией; во-вторых, предотвратить поражение человека электрическим током в момент включения отходящего присоединения. Контроль линии электропередачи (высоковольтной или низковольтной) необходим для выявления повреждений изоляции и для установления факта прикосновения человека к токоведущим частям включаемой в работу ЛЭП. Поэтому вопросы безопасности человека в процессе предварительного контроля изоляции являются главными при определении характера и параметров испытательного воздействия.

Исследования ученых С. Еллинек, С. Кёппена, Х. Швана, Дж. Купфера, Г. Л. Френкеля, К. А. Ажабаева и др. доказывают, что психофизическое состояние высокоорганизованных живых организмов оказывает особенно большое влияние на исход электропоражения. С. Еллинек выявил роль так называемого "фактора внимания" на исход электротравмы. Исследованиями, проведенными физиологами, биофизиками и т.д. установлено, что на коже человека существуют чувствительные к току участки - акупунктурные зоны. Электрическая цепь, возникающая через эти участки, в ряде случаев может привести к смертельному исходу даже при очень малом напряжении.

С ростом величины тока, протекающего через тело человека, при прочих равных условиях опасность его для организма возрастает. Но абсолютно безо-

пасного для человека тока практически не существует - ток любой величины представляет опасность. В этом заключается условность критериев электро-безопасности.

Допустимое значение переменного тока для человека при времени воздействия менее 0.003с., принимаемое согласно нормативным документам, определяется из выражения

$$I_{d(0.14\%)} = \frac{65}{\sqrt{t}}, \quad (1)$$

где  $I_{d(0.14\%)}$  - допустимый ток, который с вероятностью 0,14% не вызывает фибрилляцию сердца, мА;  $t$  - длительность воздействия тока, с.

Попытки определить численное значение электрического сопротивления тела человека начались еще в конце прошлого века многими учеными. В нашей стране этой задачей занимались Э. И. Александров, М. И. Бараш, А. Н. Каканович, В. И. Щуцкий, А. П. Киселев и другие. Для инженерных расчетов при выборе параметров средств электробезопасности принято считать, что при напряжении до 1 кВ и времени действия электрического тока в пределах 0,1-1с значение внутреннего сопротивления человека  $R_{чв.1} = 1000$  Ом. При напряжении выше 1кВ и времени воздействия тока менее 0,1с значение  $R_{чв.1} = 600 \div 900$ Ом. Из всех органов и тканей наибольшей электрической прочностью обладает кожа, точнее ее верхний слой. В. И. Королькова отмечает, что "пробой" кожи наблюдается уже при напряжении 10 - 50 В. По данным В. И. Манойлова при напряжении более 500 В можно полностью нейтрализовать сопротивление кожи, тогда полное сопротивление человека будет равно внутреннему сопротивлению, независимо от величины приложенного напряжения. Внутреннее электрическое сопротивление тела человека не связано с параметрами тела человека.

Сопротивление обуви человека  $R_o$  является одним из важнейших элементов цепи "фаза - человек - земля", от которого в большой степени зависит исход электротравмы. При малых значениях приложенного напряжения оно достигает величины десятков и сотен МОм. При увеличении напряжения, наступит электрический пробой, при этом сопротивление  $R_o$  снижается до величины сопро-



тивления дугового промежутка. Величина напряжения пробоя для различного вида обуви, по данным ВостНИИ, лежит в пределах: от  $1 \div 2$  кВ для кожаной обуви, до  $8 \div 10$  кВ для валенок и обуви на синтетической подошве. Характерным для всех видов обуви является наступление электрического пробоя при токах утечки  $5 \div 7$  мА. Величина остаточного сопротивления после пробоя обуви носит чисто активный характер и колеблется в пределах  $300 \div 2600$  Ом.

Переходное сопротивление цепи "обувь – грунт"  $R_{0-г}$  также является случайной величиной, зависящей от множества факторов. Диапазон изменения этого сопротивления: в летнее время  $0,1 \div 0,88$  кОм в сырых местах и  $2,8 \div 25$  кОм в сухих местах; в зимнее время переходное сопротивление может увеличиться до 1 МОм. Проведенные исследования позволили составить уточненную схему замещения цепи "фаза - человек - земля" (см. рис. 1), в которой дополнительно введены элементы, моделирующие процессы электрического пробоя между токоведущей частью и телом человека  $U_{пер}$ , кожи  $U_k$  и обуви  $U_o$  человека. На рис.1 обозначено:  $R_{пер}$ ,  $U_{пер}$ ,  $C_{пер}$  - переходное активное сопротивление, напряжение пробоя и емкость в точке контакта человека с фазой сети, соответственно;  $R_k$ ,  $U_k$ ,  $C_k$  - активное сопротивление, напряжение пробоя и емкость кожи человека в точке контакта, соответственно;  $R_{вн}$  - внутреннее сопротивление человека;  $R_o$ ,  $U_o$ ,  $C_o$  - активное сопротивление, напряжение пробоя, емкость обуви человека, соответственно;  $R_{0-г}$  - переходное сопротивление

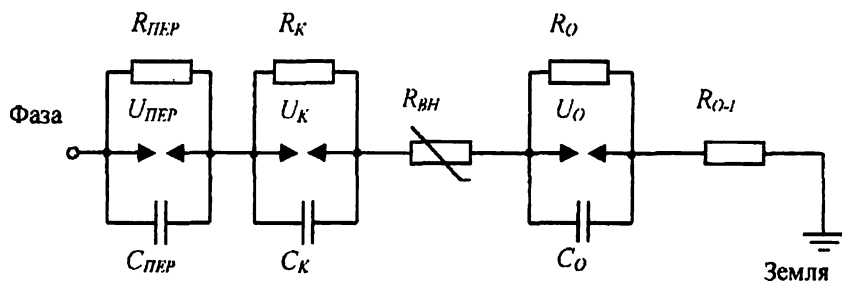


Рис. 1. Схема замещения цепи "фаза - человек - земля" при однополюсном прикосновении человека к токоведущим частям электрооборудования

"обувь – грунт".

Состояние изоляции гибких высоковольтных экскаваторных кабелей, применяемых на открытых горных работах, характеризуется, в основном, напряжением пробоя (электрической прочностью)  $U_{пр}$ , активным  $R_{и}$  и емкостным  $X_c$  сопротивлением изоляции кабеля. В реальных условиях сетей 6кВ разрывов, пробоев фазной изоляции носят электрический и, реже, тепловой характер. Особенностью электрического пробоя является внезапность его наступления без заметного увеличения токов утечки на предпробойной стадии. Установлено, что 50 % высоковольтных кабелей напряжением 6кВ, не выдержавших испытательное напряжение, до пробоя изоляции имели утечку тока до 20 - 40мкА. Экспериментальные исследования импульсной электрической прочности (напряжение пробоя при испытании импульсным напряжением) поврежденной изоляции  $U_H$  показали, что распределение величины  $U_H$  описывается нормальным законом с параметрами: математическое ожидание - 12,07кВ и 9,93кВ; дисперсия - 5,07 и 2,04 (первые числа относятся к повреждениям изоляции типа "прокол", вторые к повреждению типа "порез"). Максимальные значения импульсной прочности поврежденной изоляции  $U_{Hmax}$ , соответственно, равны 17кВ при проколе и 13кВ при порезе. Минимальное значение  $U_{Hmin}$  равно 7кВ и не зависит от типа повреждения.

Проведенный анализ электрических методов измерения диэлектрических параметров изоляции позволил сделать вывод о том, что большинство методов контроля (измерение емкости, активного сопротивления, тангенса угла диэлектрических потерь и т. д.) достаточно эффективно выявляют дефекты, охватывающие значительный объем изоляции (распределенные дефекты). Скрытые повреждения, охватывающие незначительный объем изоляции (сквозные проколы или порезы), вызывающие электрический пробой ослабленной изоляции в процессе эксплуатации, могут быть обнаружены при испытании повышенным напряжением переменного, постоянного (выпрямленного) тока или импульсным напряжением. Метод контроля импульсами высокого напряжения позволяет наиболее эффективно выявлять локальные дефекты высоковольтной изо-

ляции, обеспечивая при этом необходимый уровень безопасности человека.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями ряда ученых (Козырев Н. А., Гришин В. А., Жидков В. О и т. д.) установлено, что высоковольтные импульсы напряжения практически не оказывают негативного воздействия на неповрежденную часть изоляции, если напряженность электрического поля в изоляции не превышает критического значения.

Для импульса напряжения синусоидальной формы амплитудой  $U_{max}=12\text{кВ}$  требование критерия электробезопасности человека (1) может быть выполнено при длительности импульса испытательного воздействия  $t_{\text{и}} \leq 60\text{мкс}$ . Для достижения минимального воздействия, при котором можно зафиксировать прикосновение человека к токоведущим частям, в испытуемую линию подается серия нарастающих по амплитуде однополярных импульсов напряжения. Если схема контроля фиксирует электрический пробой или снижение активного сопротивления изоляции, то последующий импульс с большей амплитудой не подается и процесс контроля прекращается. В этом случае импульс тока через человека, во-первых, никогда не превысит предельный для человека безопасный уровень, и, во-вторых, его величина будет минимально-достаточной для каждого конкретного случая, т. е. будет равна или несколько больше электрической прочности конкретной обуви и повреждения изоляции кабельной линии (см. рис. 2). Чтобы исключить возникновение явления "приковывания", последующий импульс испытательного напряжения подается через  $t_{\text{и}} = 400\text{мс}$ .

На основании проведенного анализа и расчетов, для устройства предварительного контроля изоляции, предложен следующий метод.

С целью выявления опасных повреждений изоляции гибких высоковольтных экскаваторных кабелей и обеспечения безопасности обслуживающего персонала, контроль изоляции осуществляется серией однополярных импульсов напряжения, длительностью не более 60мкс, амплитуда которых дискретно через  $t_{\text{и}} = 400\text{мс}$ , с шагом  $\Delta U = 1,5\text{кВ}$ , изменяется от  $U_{min} = 1,5\text{кВ}$  до  $U_{max} = 12\text{кВ}$ , до подачи первого высоковольтного импульса, между импульсами в серии и до

подачи разрешающего сигнала на включение силового выключателя, контролируется активное сопротивление изоляции жил кабеля относительно земли. Общее время цикла контроля равно  $T_{ц} = 3,6с$ .

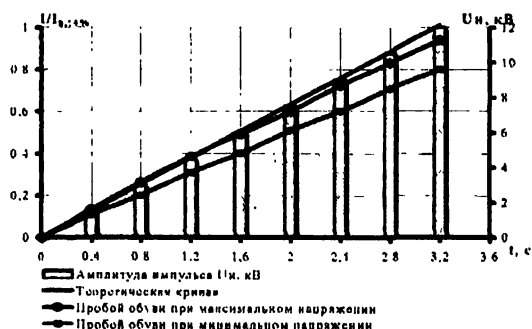


Рис. 2. Зависимость кратности тока через человека ( $I/I_{0.14\%}$ ) от амплитуды импульса  $U_n$  ( $R_ч = 1 \text{кОм}$ )

Зондирование изоляции кабельной линии перед включением силового выключателя серией коротких импульсов напряжения, в отличие от действия одиночного импульса максимальной амплитуды, позволяет включить защитный канал - собственный организм человека. Расчеты показывают, что в диапазоне 2 - 8кВ человек объективно начинает ощущать действие электрического тока при любом уровне электрической прочности обуви человека (см. рис.3).

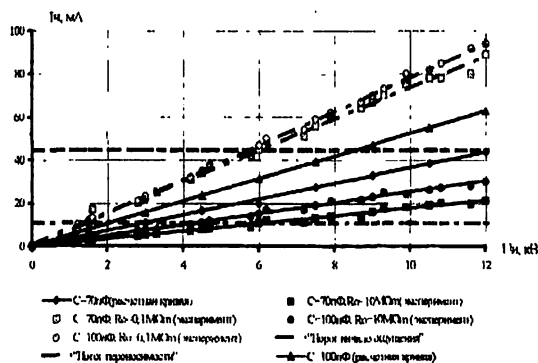


Рис. 3. Зависимость тока через человека от амплитуды импульса (без пробоя обуви)

Нарастающие по силе, уколы электрического тока должны привести в возбужденное состояние центральную нервную систему человека, что позволит включить в работу "фактор внимания". Если произойдет пробой обуви, при максимальной амплитуде испытательных импульсов напряжения, то возбуждение позволит ослабить поражающее действие. Уколы электрического тока будут сигнализировать человеку о том, что линия электропередачи включается в работу и необходимо покинуть опасное место.

Исходя из функционального назначения и принятого метода контроля, разработан алгоритм работы блокировочного реле импульсного контроля изоляции гибкого высоковольтного экскаваторного кабеля (рис.4).

Реле включается в работу по сигналу "Включить СВ", поступившему от кнопки "Включить" при оперативном управлении СВ обслуживающим персоналом, от устройств защиты и автоматики схемы СВ (нулевая защита или ОАПВ), от схем телемеханики (дистанционное управление СВ диспетчером или машинистом экскаватора). Если СВ отключен, схема реле приводится в исходное состояние и вакуумные высоковольтные контакторы блока присоединения (БПр) подключают ГИН к жилам отходящего кабеля (2). Если схема контроля блока присоединения зафиксирует включение всех трех фаз (3), то включается блок питания БП устройства (4). В противном случае блокируется процесс дальнейшего включения силового выключателя (18, 19). После включения БП контролируется активное сопротивление изоляции кабеля  $R_{из}$  (5), и формируется заданная амплитуда зондирующего высоковольтного импульса (6). Если сопротивление изоляции больше уставки срабатывания  $R_{из} > R_{уст}$  (7), в кабельную линию подается первый высоковольтный импульс длительностью  $t_H = 60 \text{ мкс}$  и амплитудой  $U_H = U_{min}$ . Если  $R_{из} < R_{уст}$ , блокируется дальнейшее включение СВ. В момент прохождения зондирующего импульса, выполняется контроль напряжения пробоя  $U_{пр}$  изоляции.

Если не обнаружен электрический пробой (12), активное сопротивление изоляции больше минимально допустимого (10, 11), то формируется амплитуда второго импульса  $U_H = n U_{min}$ , где  $n$  - порядковый номер импульса.

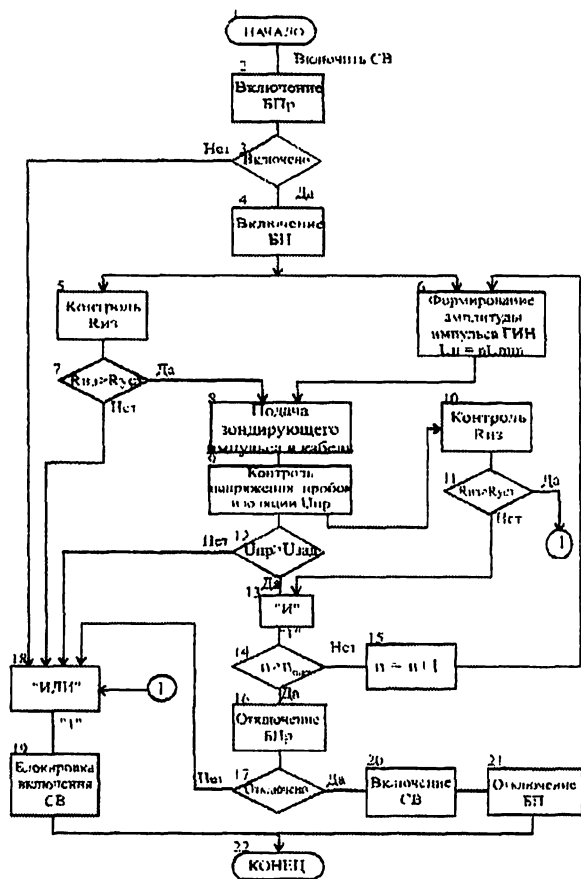


Рис. 4. Алгоритм работы блокировочного реле импульсного контроля изоляции высоковольтной кабельной линии

Если  $R_{из} > R_{уст}$  (10,11), и  $n < n_{кон}$  (14), то порядковый номер импульса увеличивается на единицу ( $n = n + 1$ ) (15) и выполняется переход к (6). Если номер импульса становится больше заданного ( $n > n_{кон}$ ), то блок присоединения БПр отключает ГИН от фаз отходящего присоединения (16). Если схемой блока присоединения зафиксировано отключение всех трех фаз, то (17) разрешает

дальнейшее включение СВ (20). Отключается блок питания (21) и схема приводится в исходное положение (22).

Если в процессе работы реле обнаружено прикосновение человека или утечка тока на землю ( $R_{из} < R_{уст}$ ), произойдет электрический пробой изоляции ( $Unp < U_{зд}$ ), возникнет неисправность в работе блока присоединения БПр, то (18) (логическое "ИЛИ") блокирует схему управления силовым выключателя (19). Включение силового выключателя возможно после устранения неисправности и ручного возврата схемы БРИК - 6 в исходное состояние.

На основании алгоритма составлены структурные, функциональные и принципиальные схемы блокировочного реле БРИК - 6.

Структурная схема устройства (рис.5), содержит блок питания, генератор импульсного напряжения ГИН, блок автоматического управления (БАУ), блок присоединения к фазам отходящего кабеля (БПр), измерительный блок (БИ), блок индикации и настройки (БИиН).

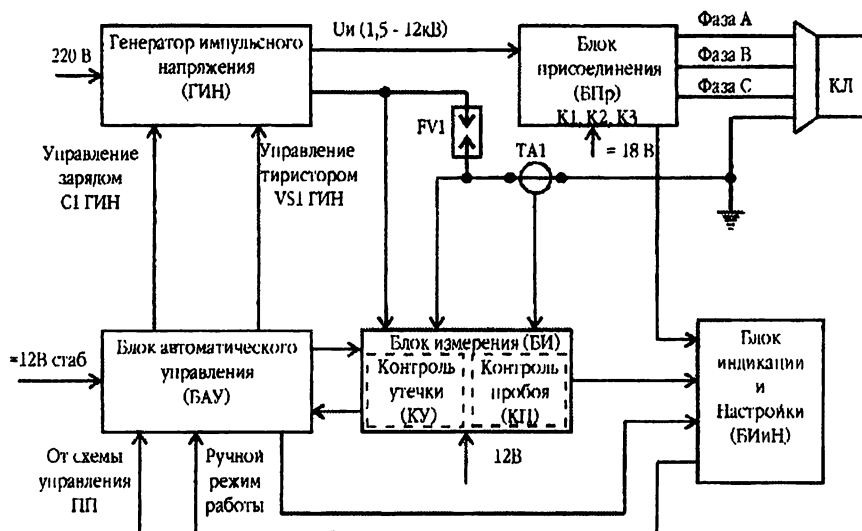


Рис. 5 Структурная схема БРИК - 6

Блок питания (БП) БРИК - 6 предназначен для питания всех функциональных блоков устройства. БП подключается к цепи питания собственных

нужд шкафов (приключательного пункта (ПП) или КРУ) напряжением 220В переменного тока

Генератор импульсного напряжения ГИН предназначен для формирования импульсов испытательного напряжения. Высоковольтный выход ГИН через три высоковольтных вакуумных контактора К1, К2, К3 блока присоединения БПр подключается к жилам кабельной линии КЛ.

Блок автоматического управления (БАУ) служит для управления и синхронизации работы всех узлов и блоков БРИК-6. БАУ реализует алгоритм работы устройства, формирует сигналы для управления ГИН, БПр и БИ и Н, анализирует состояние узлов и блоков БРИК-6. Измерительный блок (БИ) состоит из схем контроля утечки (КУ), контроля пробоя (КП), логических элементов. Блок индикации и настройки (БИ и Н) служит для сигнализации о работе основных узлов БРИК - 6, состоянии изоляции отходящего присоединения ("пробой", "утечка"), управления работой устройства в ручном режиме при отладке и настройке блоков.

Устройство контроля пробоя (КП) функционально входит в состав блока измерения и служит для фиксирования электрического пробоя изоляции кабельной линии при испытании высоковольтным импульсным напряжением.

Принцип действия устройства основан на измерении импульсов зарядных и разрядных токов (электрических зарядов), протекающих в кабельной линии в момент прохождения зондирующего импульса напряжения.

Рассмотрим электрические процессы в цепи "ГИН - кабельная линия" при возникновении электрического пробоя изоляции. На рис.6 представлена упрощенная схема замещения цепи, описывающая процесс заряда емкости кабеля от ГИН и процесс пробоя изоляции через переходное сопротивление  $R_{np}$

Силовой тиристор  $VS1$  ГИН моделируется нелинейным сопротивлением  $R1=f(i1)$ . При  $Rn=\infty$ , т. е. в предпробойную стадию (от  $t=0$  - включение тиристора до  $t=t1$  - момент пробоя изоляции кабеля) заряд  $Q1 = C1 Uc1$ , запасенный в емкости  $C1$ , практически без потерь, вследствие малого активного сопротивления кабеля, передается в емкость кабеля  $Ck$ .



$$Q1 = Q_{ck} = \int_0^{t1} i1(t) dt, \quad (2)$$

где  $t1$  - время заряда емкости кабеля  $C_k$ , с.

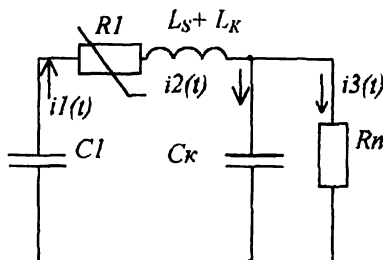


Рис. 6 Расчетная схема цепи "ГИН - кабельная линия"

При достижении напряжения на емкости кабеля  $U_k$  напряжения пробоя изоляции  $Unp$ , через активное сопротивление  $R_n$ , в цепи будут протекать токи перезаряда емкостей

$$i1(t) = i2(t) + i3(t), \quad (3)$$

При этом часть электрического заряда  $Q_{Rn}$  теряется на активном сопротивлении  $R_n$ .

$$Q_{Rn} = Q_{ck} - Q_{c1} = Q1 - Q_{c1} = \int_0^{\infty} i1(t) dt. \quad (4)$$

Для исключения влияния напряжения заряда емкости, параметров ГИН необходимо определить величину  $B$ , которая позволяет оценить потерю электрического заряда в схеме при возникновении электрического пробоя через активное сопротивления  $R_n$  в месте пробоя изоляции.

$$B = \frac{Q_{Rn}}{Q1} = \frac{\int_0^{\infty} i1(t) dt}{\int_0^{t1} i1(t) dt}. \quad (5)$$

Для определения токов в цепи (см. рис 3.14) была составлена и решена средствами Системы математических расчетов MathCAD7.0PRO [31,32] система дифференциальных уравнений. На рис.7 представлена разработанная авто-

ром программа расчета. На рис.8 приведены расчетные зависимости  $B=f(Rn\rho)$  для различных длин экскаваторных кабелей (0,1 – 1 км).

$$\begin{aligned}
 & l \quad 1 \quad L_0 \quad 4 \cdot 10^{-4} \quad C_0 \quad 0.9 \cdot 10^{-6} \quad C_1 \quad 1 \cdot 10^{-6} \quad R \quad 0.01 \quad L_s \quad 4 \cdot 10^{-4} \quad C_k = C_0 \cdot L \quad L_0 = L_s \\
 & R_y(t) = \begin{cases} 1 \cdot 10^6 & \text{if } t < 6 \cdot 10^{-5} \\ R & \text{otherwise} \end{cases} \quad R_l(t) = \begin{cases} 1 \cdot 10^6 & \text{if } t > 21 \cdot 10^{-5} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \\
 & f(t, x) = \begin{cases} \frac{1}{C_k} \cdot x_2 \cdot \frac{x_1}{R_y(t)} & v = 0 \\ \frac{1}{L} \cdot x_1 - x_1 - x_2 \cdot R_l(t) & v = 1 \end{cases} \\
 & t_1 = 0 \quad t_2 = 3 \cdot 10^{-4} \quad n = 1000 \quad j = 0.1000 \\
 & z = R_{kadapt}(v, t_1, t_2, n, f) \\
 & t_3 = 12.5 \cdot 10^{-5} \quad k = 0.1 \quad n_1 = \frac{t_3}{t_2} \quad n_2 = \text{ceil}(n_1) \quad n_2 = \\
 & A_1 = \frac{n_2}{j=0} \quad z_{j,3} \cdot \frac{t_2}{n} \quad A_2 = \frac{n}{j=0} \quad z_{j,3} \cdot \frac{t_2}{n} \quad B = \frac{A_1}{A_2}
 \end{aligned}$$

Рис. 7 Программа решения системы дифференциальных уравнений и функции  $B = f(Rn)$ .

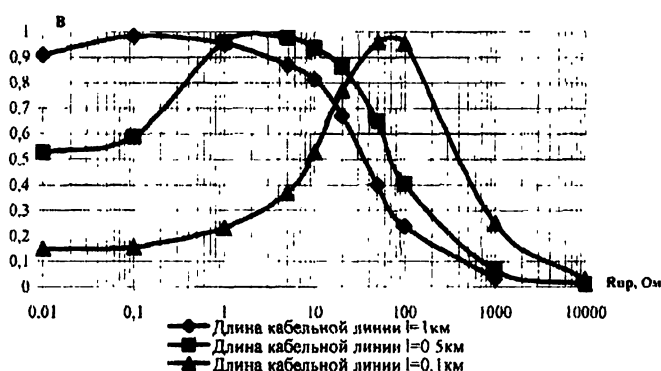


Рис.8 Зависимость относительной потери заряда (электрической энергии)  $B = f(Rn)$  от сопротивления  $Rn$  и длины кабеля

На основании выполненных расчетов и полученных зависимостей, можно утверждать, что при пробое изоляции кабеля, если активное сопротивление в цепи искрового канала меньше 200-300 Ом, потеря заряда всегда больше 10% первоначального заряда накопительной емкости  $C1$  ГИН независимо от длины кабельной линии. Исходя из сказанного, можно принять величину  $B$  в качестве параметра, характеризующего наличие электрического пробоя изоляции. Проведенные расчеты и лабораторные исследования использованы при разработке устройства контроля пробоя изоляции (КПИ).

Для расчета основных параметров элементов схемы и определения безопасных параметров импульсного напряжения ГИН разработана математическая модель системы, содержащей ГИН, нагрузку (кабельная линия) и схему замещения человека, схему замещения изоляции кабеля. По расчетной схеме цепи (рис.9) составлена система дифференциальных уравнений (уравнения переменных состояний), описывающая переходной процесс в цепи (рис.10). Расчетная схема содержит:  $C1, Cs, Cc, Ck$  - емкости накопительного конденсатора, рассеяния ИТ, человека, кабеля, соответственно;  $Ls, Lk$  - индуктивности рассеяния ИТ, кабеля, соответственно;  $Rk, Rc$  - сопротивления кабеля и человека, соответственно; нелинейных элемента:  $R1$  - модель силового тиристора;  $L\mu$  - индуктивность намагничивания импульсного трансформатора;  $Ro$  - аналог сопротивления обуви человека;  $Ry$  - аналог сопротивления изоляции кабеля. Нелинейные элементы задаются методом кусочно-линейной аппроксимации (рис. 11).

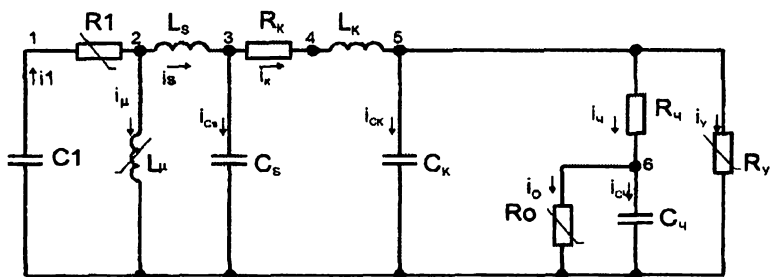


Рис. 9 Расчетная схема цепи "ГИН - кабельная линия"

Для решения системы дифференциальных уравнений цепи используется программа, разработанная автором с использованием универсальной системы

математических расчетов MathCAD 7.0 PRO. Пример расчета представлен на рис. 12

- $x_0(t)$  - напряжение на накопительной емкости C1 (UC1);  
 $x_1(t)$  - напряжение на емкости импульсного трансформатора Cs (UCs);  
 $x_2(t)$  - напряжение на емкости кабельной линии Ck (UCk);  
 $x_3(t)$  - напряжение на емкости человека Cч (UCч);  
 $x_4(t)$  - ток индуктивности рассеяния импульсного трансформатора Ls (Is);  
 $x_5(t)$  - ток индуктивности намагничивания импульсного трансформатора Lμ (Iμ);  
 $x_6(t)$  - ток в кабельной линии Ik.

Уравнение состояния сземы замещения цепи

$$f(t, x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{C1} \cdot x_4 - x_5 \\ \frac{1}{Cs} \cdot (x_5 - x_6) \\ \frac{1}{Ck1} \cdot x_6 - \frac{x_2 - x_3}{Rч} - \frac{x_2}{Ry(t, x)} \\ \frac{1}{Cч} \cdot \frac{x_2 - x_3}{Rч} - \frac{x_3}{Ro(t, x)} \\ \left( \frac{1}{Lμ(x)} \right) \cdot x_0 - Rl(t) \cdot (x_4 + x_5) \\ \left( \frac{1}{Ls} \right) \cdot x_0 - x_1 - Rl(t) \cdot (x_4 + x_5) \\ \left( \frac{1}{Lk1} \right) \cdot (x_1 - x_2 - Rk1 \cdot x_6) \end{pmatrix}$$

Рис. 10 Система дифференциальных уравнений, описывающая переходный процесс в цепи (фрагмент программы).

Математическая модель использована для определения характера и величины электрического тока через человека, определения количества электрической энергии, поглощенной организмом человека при прохождении импульсов напряжения различной амплитуды и длительности, определения параметров основных элементов схемы ГИИ, определения исходных данных для расчета параметров элементов принципиальных схем и настройки блока автоматического управления (БАУ) и измерительного блока (БИ).

|   |   |
|---|---|
| $L\mu(x) = \begin{cases} L\mu & \text{if } x_4 < in \\ \frac{L\mu}{\mu_0} & \text{otherwise} \end{cases}$         | - индукция намагничивания ИТ с учетом насыщения сердечника, |
| $R1(t) = \begin{cases} R1_0 & \text{if } t < 130 \cdot 10^{-6} \\ 10^5 & \text{otherwise} \end{cases}$            | - нелинейное сопротивление силового тиристора ГИИ;          |
| $Ro(t,x) = \begin{cases} Ro_0 & \text{if } t < 4 \cdot 10^{-4} \\ (5 \text{ ohm}) & \text{otherwise} \end{cases}$ | - модель электрического пробоя обуви человека;              |
| $Ry(t,x) = \begin{cases} Ry_0 & \text{if } t < 4 \cdot 10^{-4} \\ 1 \text{ ohm} & \text{otherwise} \end{cases}$   | - модель сопротивления изоляции кабельной линии;            |

Рис. 11. Нелинейные элементы расчетной схемы (фрагмент программы)

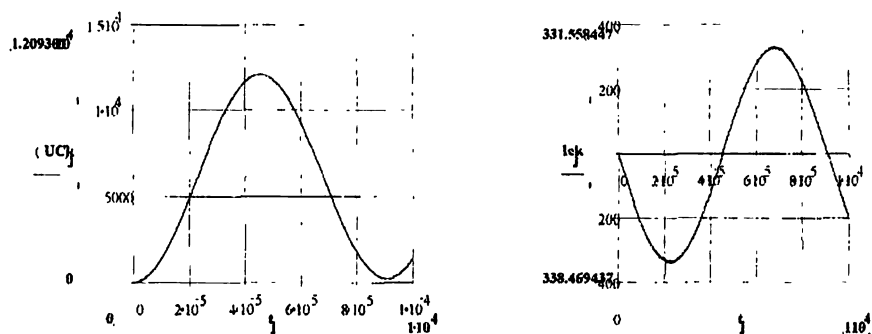


Рис.12. Зависимость напряжения  $U_{ck} = f(t)$  и тока  $I_{ck} = f(t)$  в кабеле от времени  $t$  (фрагмент программы)

С целью экспериментальной проверки теоретических положений, изготовлен макетный образец блокировочного реле и проведены лабораторные испытания, которые показали, что расчетные параметры переходных процессов в цепи "ГИИ - кабельная линия", полученных на математической модели, качественно и количественно соответствуют экспериментальным данным. На рис.13 представлены осциллограммы токов и напряжений в кабеле СБ-6 3 x 16мм<sup>2</sup> длиной 1000м при воздействии импульса напряжения амплитудой 12кВ в двух режимах: без электрического пробоя (а) и при пробое изоляции кабеля (б).

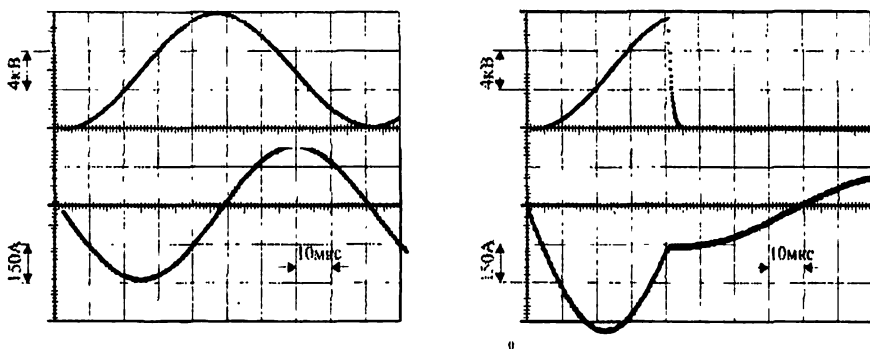


Рис. 13. Осциллограммы напряжения  $U_k$  (1) и тока  $I_k$  (2) в кабеле: а) без пробоя изоляции; б) пробой изоляции

Экспериментально определена зависимость энергии, поглощенной внутренним сопротивлением человека, от амплитуды зондирующих импульсов напряжения (см. рис.2 и рис.3). Результаты лабораторных исследований макетного образца устройства подтверждают, что разработанная математическая модель может быть использована при расчете параметров блокировочного реле.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что решение вопросов безопасного контроля диэлектрических параметров изоляции высоковольтных распределительных сетей горных предприятий имеет важное социальное и народнохозяйственное значение.

Результаты выполненной работы дают основания сделать следующие выводы:

1. На основе анализа состояния изоляции и уровня электротравматизма в электрических распределительных сетях угольных предприятий, анализа методов контроля диэлектрических параметров изоляции разработан метод контроля изоляции кабельных высоковольтных линий электропередачи, обеспечивающий эффективное выявление опасных повреждений изоляции отходящего присоединения, при соблюдении нормируемых критериев электробезопасности.

В качестве контролирующего воздействия выбран метод контроля изоляции импульсным повышенным напряжением.

2. Произведена оценка воздействия электрического тока на человека, диэлектрических параметров типичных повреждений изоляции в высоковольтных кабельных линиях в условиях открытых горных работ, параметров перенапряжений, действующих в распределительных электрических сетях, определены параметры испытательного напряжения для кабельных линий электропередачи 6кВ. Установлено, что для выявления опасных повреждений изоляции высоковольтных кабельных линий электропередачи и обеспечения требуемого уровня безопасности человека в процессе проведения испытания, необходимо подавать в кабельную линию серию нарастающих по амплитуде от 1,5 до 12 кВ импульсов напряжения, длительностью менее 60 мкс.

3. Установлено, что при пробое изоляции кабеля, если активное сопротивление в цепи искрового канала меньше 200-300 Ом, потеря заряда всегда больше 10% первоначального заряда накопительной емкости  $C/Г$ ИН независимо от длины кабельной линии. Исходя из сказанного, можно принять относительную величину потери заряда в качестве параметра, характеризующего наличие электрического пробоя изоляции.

4. Разработан алгоритм работы блокировочного реле импульсного контроля изоляции кабельных линий электропередачи 6 кВ. Алгоритмом предусматривается работа устройства в двух режимах: автоматическом (совместно со схемами управления силовым выключателем, устройствами защиты и АПВ) и ручном (отладочном).

5. Разработана математическая модель цепи "ГИН - кабельная линия - человек", которая использована для расчетов оптимальных параметров основных элементов схемы ГИН, обеспечивающих заданную амплитуду и длительность зондирующих импульсов. Разработана программа расчета модели цепи с использованием универсальной системы математических расчетов MathCAD7.0 PRO.

6. Разработано и изготовлено блокировочное реле импульсного контроля

изоляции высоковольтных кабельных ЛЭП-6кВ для экскаваторных приключательных пунктов. Проведены лабораторные испытания реле, которые показали положительные результаты.

7. Результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при выполнении научно-исследовательской работы по целевой региональной программе " Неотложные меры по улучшению условий и охране труда в Кемеровской области" по работе № И-3.22 (1997-2000гг.), "Разработка и изготовление устройства опережающего контроля изоляции в высоковольтных сетях горных предприятий".

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гришин В. А., Юрьев А. А., Абалаков Г. И. Безопасный метод выявления повреждений изоляции в шахтных кабельных сетях. //Повышение безопасности ведения горных работ: Труды ВостНИИ, - Кемерово, 1983. -С.146-151.

2. Абалаков Г. И. Предварительный контроль изоляции линий электропередачи 6кВ разрезом // Электроснабжение и электропривод горных предприятий: Сб. науч. тр.; Кузбасс. политехн. ин-т. Кемерово, -1988.- С. 105 - 109.

3. Курехин В.В., Абалаков Г.И. Импульсный контроль изоляции в распределительных сетях карьеров // Вестник. КузГТУ,- 1999,- № 2.- С. 30-32

4. А.с. № 807427 СССР, Н 02 Н 3/16. Устройство для защиты от замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью / В. А. Гришин, А. А. Юрьев, Г. И. Абалаков (СССР). -№ 2772627; Заявлено 29.05.79; Опубл. 23.02.81, Бюл № 7