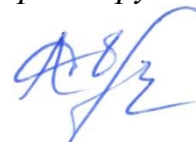


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



АБДУЛЛОЕВ РАМАЗОН ТОЛИБЖОНОВИЧ

СИСТЕМА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Специальность 05. 26. 01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор **А.И. Сидоров**

Челябинск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.1 Факторы, влияющие на коррозию элементов заземляющих устройств.....	9
1.2 Методы и средства контроля состояния заземляющих устройств....	16
1.3 Моделирования заземляющих устройств как способ изучения влияния различных факторов на состояние заземляющих устройств.....	36
1.4 Задачи исследования.....	41
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТОЯНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ.....	43
2.1 Разработка экспериментальной установки.....	43
2.2 Методика исследования.....	47
2.2.1 Методы исследования грунта.....	48
2.2.2 Методы регулирования свойство грунта.....	49
2.3 Экспериментальное исследование влияния различных факторов на процесс коррозии заземляющих устройств.....	58
2.4 Вывод.....	62
3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ БЕЗ ПРОВЕДЕНИЯ ВСКРЫШНЫХ РАБОТ.....	64
3.1 Получение зависимости коррозии и сопротивления растеканию ЗУ от влажности грунта и величины блуждающего тока.....	64
3.2 Методика определения состояния элементов ЗУ.....	73
3.2.1 Определение общей массы элементов ЗУ.....	73
3.2.2 Определение влажности грунта в месте нахождения ЗУ.....	76
3.2.3 Определение сопротивления растеканию тока ЗУ.....	76

3.2.4 Определение наличие блуждающих токов.....	77
3.3 Методика определение потеря массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов.....	78
3.4 Вывод.....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	81
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	82
ПРИЛОЖЕНИЯ А.....	97
ПРИЛОЖЕНИЯ Б.....	118
ПРИЛОЖЕНИЯ В.....	121
ПРИЛОЖЕНИЯ Г.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Заземляющие устройства (ЗУ) являются одним из наиболее распространённых защитных средств и используются не только для обеспечения электробезопасности и нормального режима работы электроустановки, но и при защите от атмосферных и коммутационных перенапряжений, а также, в ряде случаев, для обеспечения электромагнитной совместимости. Система заземления используется также во вторичных цепях трансформаторов тока и напряжения для целей релейной защиты и автоматики.

Изменение параметров ЗУ возникает под действием различных факторов окружающей среды (химико-минеральный состав грунта, влажность, температура, кислотность, бактериальный состав, газовый состав, электропроводность, а также вид грунта) и происходит непрерывно. В результате, с течением времени, процесс коррозии элементов заземлителя ускоряется, что приводит к росту сопротивления растеканию тока ЗУ. Коррозионные разрушения отдельных элементов заземлителей в случае возникновения аварийных режимов (короткое замыкание, атмосферное и коммутационное перенапряжения и др.) приводят к отказу срабатывания релейной защиты и автоматики, появлению высокого напряжения на корпусах электрооборудования, разрушению изоляции электрических аппаратов и могут являться причиной электротравм.

Отметим, что увлажнение грунта способствует уменьшению удельного электрического сопротивления грунта и, следовательно, сопротивления заземлителя. Однако это уменьшение существенно влияет на процесс коррозии, что приводит к снижению срока службы ЗУ. На лицо противоречие между факторами, определяющими основные характеристики ЗУ.

Согласно действующим нормативно-техническим документам коррозионное состояние элементов ЗУ определяется путем проведения визуальных осмотров (в основном, со вскрытием грунта) и расчета параметров ЗУ, позволяющих оценить его состояние. Количественная оценка коррозии элементов заземления производится выборочно по участкам контролируемого

элемента ЗУ путем измерения характерных размеров, зависящих от вида и скорости коррозии. Размеры определяются после удаления с поверхности элемента ЗУ следов коррозии. Учитывая, что вертикальные элементы ЗУ обычно находятся на глубине от 0,7 до 1,5 м, а их средняя длина от 3 до 5 м и более, такие операции вызывают увеличение временных затрат и являются достаточно трудоемкими.

Известные методы определения состояния ЗУ не позволяют в полной мере определить коррозионное состояние элементов заземлителя. Поэтому разработка системы оценки состояния заземляющего устройства, позволяющей устранить имеющиеся недостатки и обоснованно разрабатывать мероприятия, повышающие долговечность работы заземляющего устройства, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы. Обоснование и создание системы оценки состояния заземляющего устройства.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Разработать лабораторную установку для исследования влияния различных факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии элементов ЗУ.
2. Разработать методику и выполнить экспериментальные исследования влияния различных факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии элементов ЗУ.
3. На основании указанных исследований обосновать критерии выявления результатов процесса коррозии элементов ЗУ.
4. Построить математические модели для оценки состояния элементов ЗУ.
5. Разработать способ и методику определения состояния элементов ЗУ, основанных на измерении косвенных параметров.

Объект исследования – заземляющие устройства подстанций различного вида и назначения.

Предмет исследования – выявление закономерностей в изменении под действием коррозии состояния электродов, образующих заземляющее устройство.

Методологическая и теоретическая основа исследования: в основе данной работы лежат исследования таких ученых, как Р.К. Борисов, В.В. Бургсдорф, Ю.В. Демин, П.А. Долин, Р.Н. Карякин, Н.П. Катигроб, А.Б. Ослон, А.И. Сидоров, Ю.В. Целебровский, А.И. Якобс и других ученых, внесших большой вклад в разработку методик, а также способов определения основных параметров заземляющих устройств, характеризующих его состояние.

В качестве основных методик исследования применялись: методы физического моделирования, планирования многофакторного отсеивающего эксперимента, а также математического моделирования для построения зависимости потери массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов, и изменения сопротивления растеканию тока, стекающего с электродов, от влажности грунта и наличия блуждающего тока.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректным применением теории планирования эксперимента (для двухфакторного эксперимента) и большим объемом экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных условиях при масштабировании геометрических размеров и электрических параметров элементов ЗУ, согласно теории подобия и моделирования.

Научная новизна основных положений и результатов, выносимых на защиту:

1. Потеря массы металла, применяемого для изготовления электродов ЗУ, и увеличение сопротивления растеканию тока ЗУ зависит от влажности грунта и наличия блуждающих токов, при этом наибольшая потеря массы металла происходит при влажности грунта 25 %.

2. Для определения количественных показателей изменения массы электродов и сопротивления растеканию тока ЗУ с помощью уравнения регрессии второй

степени впервые получены численные значения коэффициентов, применение которых обеспечивает погрешность результатов не более 20 %, в зависимости от влажности грунта.

3. Разработана установка для исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии заземляющих устройств (защищена патентом на полезную модель).

4. Разработан способ и методика косвенного определения состояния ЗУ, не требующего проведения вскрышных работ.

Практическая значимость и реализация ее результатов:

1. Результаты исследования могут быть использованы научно-исследовательскими и конструкторскими организациями при разработке и совершенствовании способов определения срока службы элементов подземных металлических коммуникаций, находящихся под действием коррозии.

2. Разработанная экспериментальная установка позволяет в лабораторных условиях определять влияние влажности грунта, его водородного показателя, химического состава и наличия блуждающих токов на процесс коррозии элементов заземляющих устройств.

3. Полученные автором результаты исследования используются в процессе изучения студентами Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и Института энергетики Таджикистана дисциплин «Безопасность жизнедеятельности» и «Электробезопасность».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения, приведенные в диссертации, соответствуют области исследований специальности 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика), в частности, п. 3 «Разработка методов контроля, оценки и нормирования опасных и вредных факторов производства, способов и средств защиты от них».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены и получили одобрение на: VI Международной заочной научно-практической конференции «Энергетика в современном мире», г. Чита, 2013 г.;

LIII–LV Международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромышленному комплексу», г. Челябинск, 2014–2016 гг.; 6–8 научных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ, г. Челябинск, 2014–2016 гг.; 66–68 научных конференциях «Наука ЮУрГУ», г. Челябинск, 2014–2016 гг.; III Всероссийской студенческой конференции (с международным участием) «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи», г. Челябинск, 2014 г.; VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии», г. Челябинск, 2015 г.; XI международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах», г. Кемерово, 2015 г.; VII отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов «Молодежные инновации повышения эффективности и надежности транспорта газа», г. Екатеринбург, 2016 г.; международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг», г. Челябинск, 2016 г.; на семинарах аспирантов и докторантов кафедры «БЖД» ЮУрГУ (НИУ), г. Челябинск, 2013–2016 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, из них 1 работа – в периодическом издании, рекомендованном ВАК РФ, 1 работа – в периодическом издании, входящем в базу данных SCOPUS, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, основных выводов, списка литературы (147 наименований), 4 приложения. Содержит 119 страниц основного текста, в том числе 25 рисунков, 33 таблицы.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Факторы, влияющие на коррозию элементов заземляющих устройств

Система ЗУ является одним из основных элементов энергетических систем, влияющих на его устойчивость, надежность оборудования и на безопасность обслуживающего персонала. Заземляющее устройства выполняет различные функции, основной из которых является снижение уровня потенциала на металлических нетоковедущих частях электрооборудования, при возникновении коротких замыканий или замыканий на корпус.

Система ЗУ включает в себя естественные и искусственные заземлители, а также заземляющие проводники для присоединения корпусов электрооборудования к заземлителям [2, 5, 19, 24, 51, 63, 73, 83, 94, 133, 139].

Для ЗУ любого вида и назначения используются в первую очередь естественные заземлители [117, 141]. Они связываются с магистралями заземлений минимум двумя проводниками, присоединенными к заземлителю в разных местах, кроме металлических оболочек, кабелей, опор высоковольтных линий (ВЛ) и повторных заземлений нулевого защитного проводника [118].

Основными элементами ЗУ являются вертикальные и горизонтальные электроды, заземляющие сетки и заземляющий проводник, служащих для присоединения оборудования к заземлителям [30, 68, 71, 83, 74, 107, 109, 105, 113].

Естественными заземлителями могут быть [30, 54]:

- подземные или подводные части стальных и железобетонных конструкций и сооружений; все металлические трубопроводы, исключая трубопроводов горячих и взрывоопасных веществ и смесей, канализации и центрального отопления; обсадные трубы и рельсы; технологические кабельные и совмещенные (стальные и железобетонные) эстакады промышленных предприятий; свинцовые оболочки кабелей, проложенных в земле, при числе кабельных линий не менее двух;

- железобетонные фундаменты производственных зданий и сооружений;
- заземлители опор ВЛ, соединенные с ЗУ электроустановки при помощи грозозащитного троса линии.

При отсутствии или неэффективности естественных заземлителей используют искусственные заземлители, длина и глубина погружения электродов которых зависит от климатических условий [64]. Часто в электроустановках используются и те, и другие заземлители, подключенные параллельно [95]. Для изготовления электродов искусственных заземлителей применяется сталь. Электроды засыпаются однородным грунтом [22, 28, 105, 134], не содержащим щебня и строительного мусора, с утрамбовкой на разных глубинах.

Эффективность ЗУ определяется, в первую очередь, его сопротивлением, которое зависит от различных факторов, в том числе и от состояния его элементов, находящихся в грунте. Состояние элементов ЗУ, в свою очередь, зависит от коррозионной активности грунта.

В тяговых подстанциях, где заземляющие устройства используются в качестве рабочего заземления, коррозия заземляющих элементов во многом определяется величинами блуждающих токов.

На энергообъектах, как правило, разрушаются [87, 143]:

- заземляющие проводники в местах входа в грунт, непосредственно под поверхностью грунта;
- сварные соединения в грунте;
- горизонтальные заземлители;
- нижние концы вертикальных электродов.

Повреждение элементов заземляющих устройств приводит к ненормальным режимам работы электроустановок и создает опасность поражения электрическим током.

Так, например, проведенные обследования заземлителей в электроустановках Западно – Сибирской железной дороги показали, что в большинстве случаев средняя скорость коррозии заземлителей не превышает 37,5 – 125 мкм в год. Это обусловлено невысокой коррозионной агрессивностью

грунтов и результатом дренажной защиты на тяговых подстанциях. Вместе с тем на некоторых подстанциях, где отсутствует или не работает дренажная защита, обнаружены более существенные коррозионные повреждения заземлителей тяговых подстанций (ТПС): ТПС Осокино - 1,2 мм, ТПС Кочковатская – 0,8 мм, ТПС Чулымская - 2,6 мм. На тяговых подстанциях Новокиевская, Карбышево -1, Алонский обнаружено полное разрушение искусственных заземлителей. На подстанциях, входящих в первичную систему электроснабжения железной дороги (Чулымская – 220 кВ, Новоанжеровская – 500 кВ, Посевная – 110 кВ), глубина коррозии элементов заземлителей составила от 0,05 до 0,45 мм при сроке службы от 5 до 30 лет [15]. Примеры различных повреждений элементов, заземляющих устройства приведены на рисунках 1.1 и 1.2.



Рисунок 1.1 – Сочетание язвенных и локальных коррозионных повреждений



Рисунок 1.2 – Равномерное коррозионное разрушение элемента заземляющего устройства

Наиболее опасным является сочетание язвенного и локального видов разрушения элементов заземляющих устройств. В этом случае на поверхности металла наблюдается чередование участков с меньшим или большим скоплением язв, вплоть до их слияния в виде локального повреждения. Потеря сечения заземлителя в этом случае может составлять от 20 до 80%. Это приводит к росту сопротивления растеканию тока ЗУ [29, 145].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что коррозионные повреждения заземлителей имеются как на тяговых подстанциях, так и на подстанциях первичной системы электроснабжения. Однако из приведенных данных следует, что вероятность возникновения недопустимых коррозионных разрушений заземлителей на тяговых подстанциях много выше (из – за влияния блуждающих токов) [108].

Коррозийная активность грунта зависит от многих факторов, к числу которых относятся химико-минеральный состав грунта, его влажность, содержание газов, структура, электропроводность и бактериальный состав [4, 6, 9, 11, 14, 18, 20, 35, 75, 97, 102, 104, 111, 117, 127, 130, 144]. Одновременное влияние множества факторов делает невозможным на основании какого – либо одного простого показателя точно характеризовать коррозионную активность грунтов. Поэтому при ее оценке определяют только один основной или несколько показателей, которые позволяют оценить степень склонности грунта способствовать возникающим электрохимическим процессам коррозии. Методическая сложность возникает ещё и потому, что коррозионная активность грунтов может меняться через каждые 2 – 3 м. Поэтому в процессе изысканий следует давать оценку максимально неблагоприятным и средним коррозионным условиям на отдельных участках с достаточной точностью [47, 48, 81, 138, 142].

На коррозионную активность грунтов огромное влияние оказывает их влажность. В абсолютно сухих грунтах коррозия не наблюдается из-за отсутствия электролита, необходимого для создания коррозионных элементов. Однако уже при небольшой влажности, когда в грунтах существует только прочносвязанная вода, коррозионные процессы начинают проявляться, хотя скорость коррозии

будет незначительной. Дальнейшее увеличение влажности грунта вызывает увеличение скорости коррозии в результате увеличения интенсивности работы коррозионных элементов и уменьшения сопротивления их цепи.

Таблица 1.1 – Зависимость коррозии от влажности связанных грунтов

Влажность глинистых грунтов	Характеристика грунта с точки зрения влажности	Характер скорости коррозии
0 10 – 12 12 – 25 25 – 40 Свыше 40	Грунт сухой Возрастание влажности до критического значения Сохранение критического значения Образование сплошного слоя воды Увеличение толщины сплошного слоя воды	Коррозии нет Увеличение скорости коррозии до максимальной величины Возможно достижение максимальной скорости коррозии Снижение скорости коррозии Невысокая постоянная скорость коррозии

Предельная влажность, обеспечивающая возрастание скорости коррозии до максимальной, в связанных грунтах составляет 10 – 12 %, в песках она несколько ниже. При последующем увеличении влажности максимальная скорость коррозии остается практически постоянной до некоторого предела влажности (20 – 25 %) [6, 127].

Критерии коррозионной активности грунта различны для разных металлов. Так, например, для стали коррозионная активность грунта оценивается достаточно полно по значению его удельного электрического сопротивления (таблица 1.2 [29, 61, 67, 102, 110, 111]).

Таблица 1.2 – Зависимость коррозии от удельного электрического сопротивления связанных грунтов

Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом · м	Свыше 100	20-100	10-20	5-10
Коррозионная активность	Низкая	Средняя	Повышенная	Высокая

Для характеристики коррозионной активности грунтов по отношению к углеродистой стали используют величину их удельного электрического

сопротивления. Это свойство грунтов само по себе не является причиной, вызывающей коррозию, но в среде с малым удельным электрическим сопротивлением сила тока образующихся крупных по размеру коррозионных элементов может достигнуть величины, угрожающей сохранению стальных конструкций. Между электрическим сопротивлением грунтов и их коррозионной активностью в определенных пределах существует прямая зависимость: чем меньше сопротивление, тем больше возможность коррозии [127].

Оценивая коррозионную активность грунтов по отношению к свинцу, приходится учитывать pH грунта, содержание органических веществ, нитрат – иона. (таблица 1.4) [10].

Таблица 1.3 – Коррозионная активность грунтов по отношению к углеродистой стали в зависимости от их удельного электрического сопротивления (*ГОСТ 9 015 – 74*)

Коррозионная активность грунтов	Удельное электрические сопротивление, Ом·м
Низкая	>100
Средняя	20 – 100
Повышенная	10 – 20
Высокая	5 – 10
Весьма высокая	≤5

Таблица 1.4 – Коррозионная активность грунтов по отношению к свинцовой оболочке кабеля (*ГОСТ 9 015 – 74*)

Коррозионная активность грунтов	pH грунта	Содержание компонент, % от массы воздушно – сухого грунта	
		Органических веществ (гумуса)	Нитрат – иона
Низкая	6,5 – 7,5	до 0,01	до 0,0001
Средняя	5,0 – 6,4	0,01 – 0,02	0,0001 – 0,001
Высокая	7,6 – 9,0	>0,02	>0,001
	>5,0 <9,0		

Коррозионная активность грунтов существенно зависит от химического состава грунтов и, в частности, от наличия и состава водорастворимых соединений. Несмотря на то, что их содержание в грунтах обычно невелико, они играют важную роль в образовании порового электролита, формировании его удельного электрического сопротивления и, тем самым, влияют на протекание всего процесса коррозии. Замечено, что с повышением содержания ионов Cl^- и SO_4^{2-} (примерно свыше 0,1%) коррозионная активность грунтов обычно увеличивается: высокому содержанию хлоридов в грунтах почти всегда соответствует интенсивная коррозия металла, в меньшей степени это относится к сульфатам. Кислотность грунтов, как указывал В.А. Притула [127], в большинстве случаев не оказывает непосредственного влияния на скорость коррозии. Достаточно интенсивная коррозия может происходить и в кислых грунтах ($\text{pH} \approx 3 - 4$), и в щелочных ($\text{pH} < 14$), и в нейтральных ($\text{pH} 7$). Однако при высоких значениях кислотности ($\text{pH} 2 - 3$) и щелочности ($\text{pH} 11 - 14$) грунтов всегда наблюдается наиболее интенсивная коррозия [10]. При кислотности, близкой к нейтральной, интенсивность коррозии зависит от других факторов.

Критерием оценки опасности электрокоррозии является плотность тока утечки с единицы поверхности металла. Для подземных бронированных кабелей и стальных трубопроводов практически безопасным является длительное протекание тока утечки ниже $0,15 \text{ мА/дм}^2$, для чугунных трубопроводов - ниже $0,75 \text{ мА/дм}^2$, для стальной арматуры железобетонных конструкций - ниже $0,6 \text{ мА/дм}^2$ (таблица 1.5 [18, 20, 26, 124]).

Таблица 1.5 – Потери металла при электрокоррозии

Металл	Плотность г/см^3	Электрохимический эквивалент		Объемные потери металла $\text{см}^3/\text{А} \cdot \text{год}$	Нормальный потенциал В
		$\text{мг/А} \cdot \text{год}$	$\text{кг/А} \cdot \text{год}$		
Железо	7,83	0,2824	9,12	1165	-0,44
Алюминий	2,7	0,0932	2,93	1035	-1,67
Свинец	11,35	1,0376	33,8	2970	-0,126
Медь	8,6	0,6588	26,6	3100	+0,345
Примечание: Нормальный потенциал – потенциал металла в растворе его соли по отношению к потенциалу водорода, принимаемому за точку отсчета (нуль).					

Таким образом, основными факторами, влияющими на процесс коррозии элементов ЗУ, являются влажность грунта, его структура, химико-минеральный состав, бактериальный состав, кислотность, содержание в нём газов и наличие блуждающих токов.

1.2 Методы и средства контроля состояния заземляющих устройств

Проблема эксплуатационного контроля систем заземления всегда была одной из основных задач у специалистов, поскольку качественный эксплуатационный контроль компенсирует недоработки теории, может выявить строительные и монтажные ошибки. Кроме того, результаты эксплуатационного контроля позволяют определить техническое состояние ЗУ, своевременно планировать ремонтно-восстановительные работы [16, 19, 84, 132].

Периодичность проверки состояния ЗУ следующая [87, 88, 96, 100]:

- проверка ЗУ в полном объеме - не реже 1 раза в 12 лет;
- после монтажа, переустройства и капитального ремонта оборудования на подстанциях и линиях электропередачи проверка в той части, где возможно изменение ЗУ в результате проведенных работ;
- измерение напряжения прикосновения в электроустановках, ЗУ которых выполнено по нормам на напряжение прикосновения;
- после монтажа, переустройства и капитального ремонта ЗУ и изменения токов КЗ, но не реже 1 раза в 6 лет (измерения должны выполняться при присоединенных естественных заземлителях и тросах ВЛ).

Методы проверки состояния ЗУ предусматривают проведение измерений и расчетов с целью определения соответствия параметров ЗУ установленным нормам. Измерения параметров ЗУ выполняют с помощью приборов и устройств для имитации аварийных режимов. Для проведения необходимых расчетов могут быть использованы специальные компьютерные программы [27, 34, 40, 55, 56, 58, 59, 65, 71, 72, 73, 76, 71, 77, 114, 115, 118].

При проверке состояния ЗУ электроустановок в полном объеме выполняются следующие виды работ (см. рисунок 1.3). Согласно структурной

схеме анализируются основные электрические и механические параметры элементов ЗУ, характеризуется его состояние и рекомендуется дальнейший срок службы.



Рисунок 1.3 – Структурная схема проверки состояния ЗУ

1.2.1 Сбор исходных данных и визуальный контроль. Для сбора исходных данных и проведения визуального контроля состояния элементов ЗУ выполняются следующие виды работ (см. таблицу 1,6) [88].

Необходимыми параметрами при сборе исходных данных являются значение токов однофазного и двухфазного короткого замыканий, проектная схема заземляющего устройства, сечение заземлителей и заземляющих

проводников и климатические условия в месте погружения вертикальных и горизонтальных электродов.

Таблица 1.6 – Исходные данные для проверки состояния заземляющего устройства

№ п/п	Наименование исходных данных	Назначение исходных данных	Примечание
1	Схема первичных соединений электроустановки	Схему используют для ознакомления с электроустановкой, определения требований к заземляющему устройству и его элементам и расчетов высокочастотной составляющей тока КЗ	-
2	Ситуационный план расположения электроустановки. Сведения о выходящих за пределы электроустановки заземлителях и проводящих коммуникациях: присоединение грозозащитных тросов воздушной линии к конструкциям электроустановки, соединения оболочек отходящих силовых кабелей связи с заземляющим устройством, соединение с ЗУ приходящих в электроустановку металлических трубопроводов.	План используют для выявления: - электропроводящих объектов и коммуникаций за пределами электроустановки и определения направлений разноса измерительных электродов; - мест возможного выноса потенциала; - источник возможных блуждающих токов, расположенные вблизи электроустановки.	-
3	Значения токов однофазного короткого замыкания в сети 110 кВ и выше	Для расчета напряжения на заземляющем устройстве, напряжений прикосновения, разностей потенциалов по ЗУ и термической стойкости проводников необходимы значения токов однофазного короткого замыкания на ОРУ всех классов напряжений, в составе: полный ток однофазного КЗ и токи в нейтральных трансформаторов и автотрансформаторов.	Дополнительно могут быть запрошены данные по токам нулевой последовательности во всех обмотках трансформаторов и токам нулевой последовательности, подтекающие по всем ВЛ.

4	Ток двойного замыкания на землю в сети 6-35 кВ	Используется для расчета разностей потенциалов по ЗУ и проверки термической устойчивости заземляющих проводников, заземлителей и экранов кабелей.	-
5	Ток однофазного замыкания на землю в сети 6-35 кВ.	Используются для определения напряжений прикосновения на соответствующих РУ.	По схеме и осмотром определяются также номинальные токи реакторов или резисторов, установленных на подстанции.
6	Время отключения КЗ основными и резервными защитами. Время работы УРОВ.	Для определения допустимых значений напряжений прикосновения, расчета термической устойчивости заземляющих проводников, экранов и металлических оболочек кабелей.	-
7	Проектная схема заземляющего устройства (с учетом выполненных реконструкций). Паспорт заземляющего устройства.	Для нового строительства и реконструкции объекта выполняют проверку соответствия ЗУ проекту. Для действующего объекта выполняют проверку соответствия параметров ЗУ и исполнительной схемы паспортным данным.	-
8	Климатические условия: температура, давление, влажность, осадки, состояние грунта – сухой, влажный и т.д.	Для пересчета к наиболее неблагоприятным условиям.	-
9	Геоэлектрический разрез площадки электроустановки.	Для расчета параметров ЗУ.	По проекту(результаты пред проектных изысканий).

10	Сведения об объекте, включая: - тип РУ (ОРУ, КРУН, КРУЭ, КРУ, ЗРУ); - здания и сооружения на территории (ОПУ, РЩ, РУ, АТ), реакторы, вспомогательные здания и сооружения; - виды молниеотводов: отдельно стоящие, порталные, сетка, прожекторные мачты, антенные мачты; - материал, профиль, сечение заземлителей и заземляющих проводников; - тип кабельной канализации и кабелей; - трубопроводы; - дороги; - ограждения; - количество отходящих силовых кабелей 6-110 кВ, включая кабельные вставки перед ВЛ; - отходящие кабели связи, телемеханики и т.п.	Для составления исполнительной схемы, расчета параметров ЗУ и разработки проекта реконструкции ЗУ.	-
----	--	--	---

Визуальная проверка проводится с целью контроля качества монтажа и соответствия сечения заземляющих проводников требованиям проекта и ПУЭ.

Проводится измерение сечения электродов и заземляющих проводников и сравнивается измеренное значение со значениями, полученными в расчетах.

Уменьшение сечения из-за коррозии происходит в первую очередь непосредственно под поверхностью грунта, поэтому при контроле ЗУ в процессе эксплуатации обязательна выборочная проверка заземляющих проводников со вскрытием грунта на глубину примерно 20 см [88, 107].

Визуальным контролем на распределительном устройстве (РУ) проверяют наличие и число заземляющих проводников у каждого оборудования и качество монтажа. Болтовые соединения должны быть надежно затянуты, снабжены контргайкой и пружинной шайбой [89].

При визуальном осмотре производят ознакомление с электроустановкой,

выявляют источники возможных блуждающих токов, расположенные вблизи электроустановки (электрифицированная железная дорога, установки катодной защиты) и объекты, не нанесенные на плане.

1.2.2 Измерение сопротивления металlosвязей. Определение качества металlosвязи электрооборудования с ЗУ осуществляется путем определения переходного сопротивления контактных соединений заземляющих проводников с заземляющими электродами. Выполняется проверка целостности присоединения заземляемого оборудования к ЗУ и определяется неэквипотенциальность ЗУ [19, 27, 28, 40].

Контактные соединения проверяют осмотром, простукиванием, а также выборочно измерением переходных сопротивлений мостами, микроомметрами и по методу амперметра-вольтметра.

В соответствии с [100] качественное присоединение к заземлителю обеспечивается при переходном сопротивлении не более 0,05 Ом. Схема измерения сопротивления контактных соединений методом амперметра-вольтметра приведена ниже (рисунке 1.4). Контактные сопротивления измеряются в первую очередь в местах соединения и ответвления заземляющих элементов.

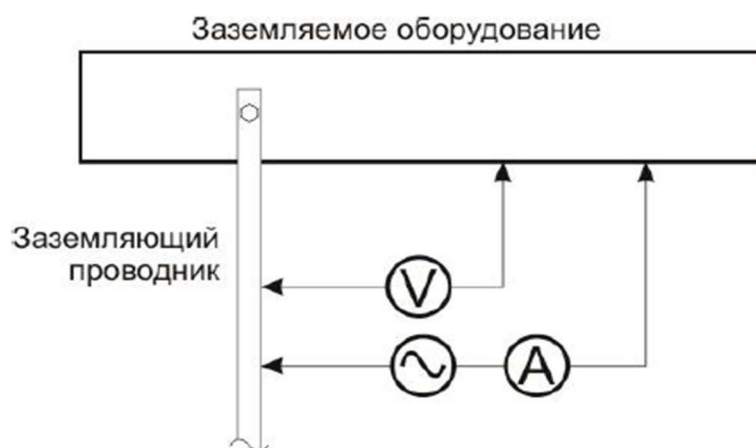


Рисунок 1.4 – Схема измерения сопротивления контактного соединения

Интервалы между токовой и потенциальной цепочками при погружение токовых и потенциальных электродов по территории электроустановки должны

быть более 1 м. Присоединение каждой цепочки к точке измерения производят отдельной струбциной [34, 35].

1.2.3 Определение исполнительной схемы заземляющего устройства. На исполнительной схеме заземляющего устройства должны быть указаны естественные и искусственные заземлители и заземляющие проводники: схема прокладки; материал, профиль (полоса, прут, стержень, арматура) и поперечное сечение; глубина прокладки заземлителей; места соединений заземлителей и заземляющих проводников с заземлителем [23].

Схему прокладки заземлителей и заземляющих проводников наносят на рабочий план объекта.

На рабочем плане должны быть показаны: здания и сооружения; силовое оборудование; металлоконструкции; опоры ВЛ; переходные пункты КЛ; молниеотводы и молниезащитные тросы; ОПН и разрядники; прожекторные и антенные мачты; порталы; трубопроводы; кабельная канализация; биологическая защита; клеммные шкафы; сварочные посты; места заземления нейтралей трансформаторов; дороги [64, 66].

Для зданий должны быть составлены поэтажные рабочие планы размещения оборудования, на которые наносят исполнительную схему внутреннего заземляющего устройства (системы уравнивания потенциалов). На схеме должны быть указаны заземляющие проводники, магистрали заземления, закладные металлоконструкции; межэтажные соединения магистралей заземления и места подключения к внешнему заземляющему устройству [134].

Трассы прокладки заземлителя и заземляющих проводников в грунте определяют с помощью специальных приборов, позволяющих определить местоположение и глубину залегания подземных коммуникаций [15, 135].

Для определения трассы прокладки заземлителя источник переменного тока подключают к различным удаленным друг от друга точкам ЗУ.

1.2.4 Определение удельного электрического сопротивления грунта. Удельное электрическое сопротивление грунта необходимо для расчета

параметров ЗУ и оценки его состояния с учетом наиболее неблагоприятных климатических условий [64, 67, 72, 128].

Удельное электрическое сопротивление грунта измеряют методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Метод ВЭЗ позволяет выявить электрическую неоднородность структуры грунта – число и толщину слоев с различными значениями удельного электрического сопротивления грунта [34, 38, 40, 109].

1.2.5 Измерение сопротивления заземляющего устройства. Методом амперметра-вольтметра измеряют сопротивление току растекания ЗУ. Принципиальная схема измерений приведена на рисунке 1.5.

Источник переменного тока подключают к ЗУ объекта (как правило, в опорной точке) и токовому электроду, вынесенному за пределы территории, на которой расположено ЗУ. Вольтметр подключают к ЗУ в той же точке, где подключен источник тока, и к вынесенному потенциальному электроду. Потенциальный электрод размещают на линии, соединяющей опорную точку и токовый электрод. Расстояния до токового и потенциального электродов от края заземлителя выбирают в зависимости от размеров заземлителя и наличия свободной от подземных коммуникаций территории за пределами заземляющего устройства [58, 89].

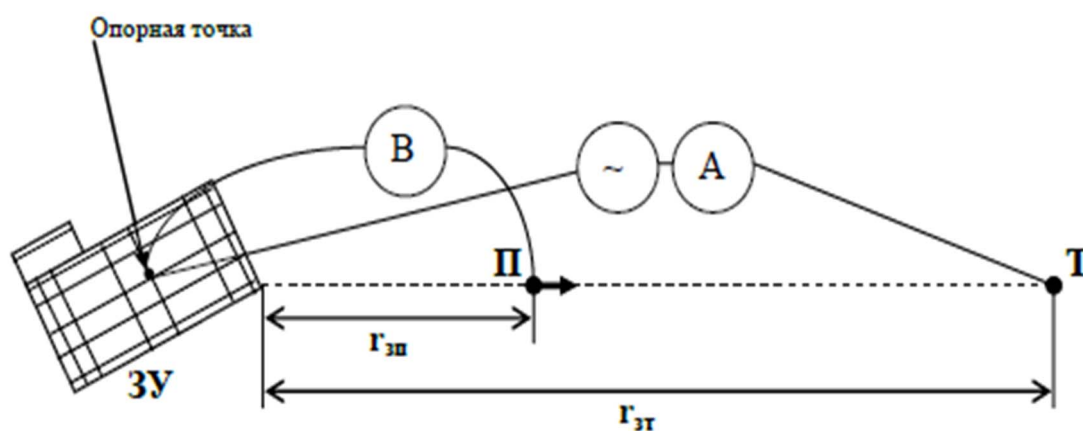


Рисунок 1. 5 – Схема измерения сопротивления заземляющего устройства
 П – потенциальный электрод, Т – токовый электрод

При производстве измерений в качестве вспомогательных электродов применяют стальные стержни или трубы диаметром до 50 мм. Стержни должны быть очищены от краски, а в месте присоединения соединительных проводников и от ржавчины. Стержни забивают или ввинчивают в грунт на глубину 1,0 – 1,5 м. В случае необходимости токовый электрод выполняют из нескольких параллельно соединенных электродов, размещаемых по окружности, с расстоянием между ними 1,0 – 1,5 м [88].

1.2.6 Определение напряжения на заземляющем устройстве. Наличие напряжения на ЗУ определяют, как произведение измеренного сопротивления заземляющего устройства на потенциалоповышающий ток [59, 87, 109, 140, 146]:

$$U_{\text{зу}} = R_{\text{зу}} \cdot I_{\text{пп}} \quad (1.1)$$

В качестве потенциалоповышающего тока принимают [81]:

- в электроустановках напряжением до 1 кВ с изолированной нейтралью – ток однофазного замыкания на землю;
- в электроустановках напряжением до 1 кВ с глухо заземленной нейтралью напряжение на ЗУ не нормируется и не определяется;
- в электроустановках напряжением выше 1 кВ в сети с изолированной нейтралью – ток двойного замыкания на землю;
- в электроустановках напряжением выше 1 кВ в сети с эффективно заземленной нейтралью, но не имеющей заземленной нейтрали в самой электроустановке – ток однофазного короткого замыкания;
- в электроустановках напряжением выше 1 кВ, в сети с эффективно заземленной нейтралью, и имеющих заземленные нейтрали силовых трансформаторов в самой электроустановке, – суммарный ток нулевой последовательности, подтекающий по всем присоединениям при коротком замыкании на территории электроустановки.

В электроустановках, принадлежащих сети с эффективно заземленной нейтралью, и имеющих заземленные нейтрали силовых трансформаторов в

самой электроустановке, потенциалоповышающие токи определяются при однофазных коротких замыканиях на шинах всех РУ, и в качестве расчетного тока выбирается наибольший.

1.2.7 Определение напряжения прикосновения. Напряжение прикосновения в сетях с глухозаземленной нейтралью (110 кВ и выше) измеряют при имитации КЗ на землю, а в сетях с изолированной нейтралью (6-35 кВ), при имитации двойного замыкания на землю [81, 83, 146, 147].

В соответствии с [87, 100, 101] при измерении напряжения прикосновения в электроустановках напряжением 110кВ и выше сопротивление тела человека моделируется резистором $R_{ч} = 1 \text{ кОм}$, а в электроустановках 6-35 кВ, $R_{ч} = 1 \text{ кОм}$ при воздействии до 1с и $R_{ч} = 6 \text{ кОм}$ при воздействии более 1с. Сопротивление растеканию тока с ног человека должно моделироваться с помощью квадратной пластины размером 25 x 25 см², которая располагается на поверхности земли (пола) на расстоянии 0,8-1 м от оборудования, в местах возможного нахождения человека.

Напряжение прикосновения рассчитывают по результатам измерений [24, 25, 96]. При расчетах напряжения прикосновения с помощью компьютерной программы в качестве исходных данных принимают: исполнительную схему ЗУ; значения тока замыкания на землю; удельное сопротивление грунта. Результаты измерений напряжения прикосновения используют для тестирования расчетной модели.

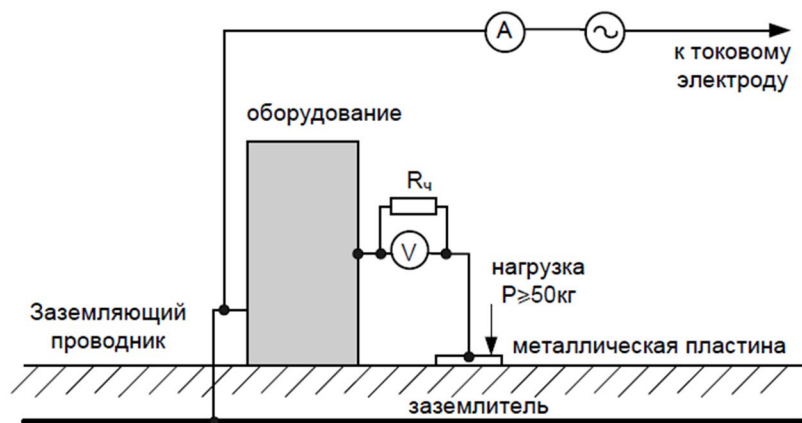


Рисунок 1.6 – Схема измерения напряжения прикосновения

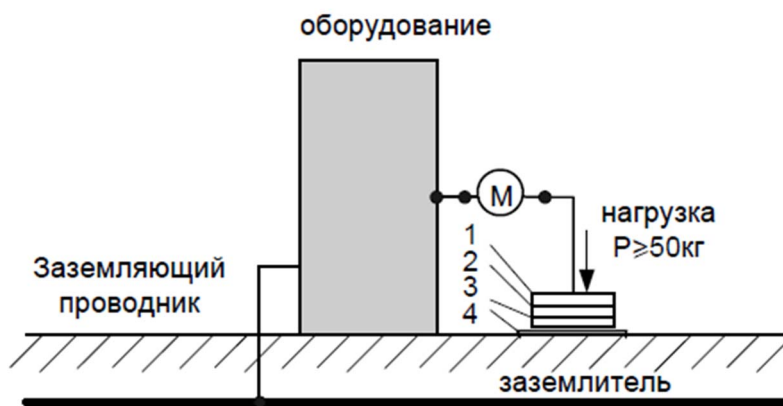


Рисунок 1.7 – Схема измерения сопротивления основания

М – мегаомметр, 1- доска, 2 –поролон, 3 –медная сетка; 4 - мокрая ткань.

В соответствии с [96, 101, 105] напряжения прикосновения при нормальном режиме работы электроустановки не должны превышать допустимых значений (для переменного напряжения частотой 50 Гц - 2 В). Напряжения прикосновения к открытым проводящим частям рекомендуется измерять в следующих местах:

- у мест заземленных нейтралей трансформаторов (в том числе ТСН), автотрансформаторов, шунтирующих реакторов, а также у мест заземления дугогасящих реакторов или резисторов;
- у калиток внутренних ограждений наружной электроустановки;
- у периферийных открытых проводящих частей электроустановки, в частности, у калиток внешних ограждений;
- у стоек конденсаторов связи.

Ожидаемые напряжения прикосновения измеряют при помощи вольтметра переменного тока с большим внутренним сопротивлением. Один конец вольтметра присоединяют к металлическому штырю, который погружают в грунт на расстоянии 1 м от оборудования, на глубину 0,4 м, другой к открытой проводящей части. Если измеренное ожидаемое напряжение прикосновения оказывается выше 2 В, производят измерение напряжения прикосновения повторно при шунтировании вольтметра сопротивлением 6 кОм по схеме подключения вольтметра [86].

1.2.8 Определение распределения потенциалов и токов промышленной частоты по элементам заземляющего устройства при установившихся токах КЗ. В сетях с глухозаземленной нейтралью наибольший ток промышленной частоты протекает по ЗУ при однофазном КЗ. В сетях с изолированной нейтралью протекание большого тока по ЗУ возможно при двойном замыкании на землю. В этом случае ток протекает от точки замыкания на землю одной фазы до точки замыкания на землю другой фазы. Для того чтобы определить возможные уровни воздействующих на вторичное оборудование и кабели напряжений и токов при коротком и двойном замыкании на землю, проводят измерения распределения потенциалов и токов на заземляющем устройстве при имитации этих режимов в соответствии с [58, 101].

На основании исполнительной схемы ЗУ выбирают оборудование, на котором при КЗ на землю ожидается наибольший потенциал. Такими местами являются: оборудование, присоединенное к сетке заземлителя заземляющими проводниками наибольшей длины; группа оборудования, у которого большое сопротивление металlosвязи с основным заземлителем; оборудование, наиболее удаленное и ближайшее от места установки вторичного оборудования (например, от релейного щита) [55].

Измерения проводят с помощью селективных к частоте источника переменного тока (ИПТ) токовых клещей. Измеряют ток от ИПТ и в процентах к нему токи, проходящие по естественным и искусственным частям заземляющего устройства [86].

После достижения совпадения результатов в пределах 15%, считают, что расчетная схема ЗУ соответствует реальной. Далее проводят расчеты распределения напряжений по ЗУ и токов в экранах, оболочке или броне кабелей для каждого из оборудования при удельном сопротивлении грунта, соответствующему наиболее неблагоприятным климатическим условиям [88].

1.2.9 Определение тепловой устойчивости заземлителей, заземляющих проводников и экранов кабелей. Допустимые токи короткого замыкания для искусственных заземляющих проводников и заземлителей определяют исходя из допустимой по [89] температуры нагрева:

$$I_{\text{доп}} = \frac{S}{S_{\text{доп}} q}, \quad (1.2)$$

где S – поперечное сечение проводника или экрана кабеля, мм²;

$S_{\text{доп}}$ – допустимое сечение для тока в 1 кА продолжительностью воздействия 1 секунда; q – коэффициент, учитывающий продолжительность воздействия тока:

$$q = \begin{cases} \sqrt{t + 0,09}, & t < 1 \text{ с} ; \\ 0,8\sqrt{t}, & t > 1 \text{ с} . \end{cases} \quad (1.3)$$

Расчет допустимой плотности тока по заземляющему проводнику выполняют на основании п.1.7.126 ПУЭ 7-е издание.

$$i = \frac{I}{S} \leq \frac{k}{\sqrt{t}}, \quad (1.4)$$

где i – максимально допустимая плотность тока для защитного проводника;

S - площадь поперечного сечения защитного проводника, мм²;

I – ток, протекающий по защитному проводнику, А;

t – время протекания тока по защитному проводнику; (соответствует полному времени отключения КЗ – не более 5 с), с;

k - коэффициент, значение которого зависит от материала защитного проводника, изоляции кабеля, начальной и конечной температур нагрева.

Значение k для защитного проводника берут из таблицы 1.7.6 ПУЭ. Если тип изоляции кабеля не известен, то берут значения k , соответствующие температуре нагрева 160 °С.

1.2.10 Определение распределения импульсных напряжений при коротких замыканиях на землю, ударах молнии в молниеотводы и протекании токов через ограничители перенапряжений. При коммутациях (через емкости оборудования на землю) и коротких замыканиях на землю (через место замыкания) в ЗУ проходит импульсный ток высокой частоты. На оборудовании возникает скачок потенциала. Возросший потенциал с определенным коэффициентом ослабления передается по кабелям на входы вторичного оборудования [59].

Для определения возможного обратного перекрытия изоляции кабелей вторичных цепей проводят измерения распределения потенциалов по земле при имитации удара молнии в молниеприемник с помощью генератора импульсных токов [56].

Полученные результаты измерений пересчитывают к току молнии в соответствии с [88]. Коэффициент пересчета принимают пропорциональным отношению тока молнии к току от генератора при условии, что время фронта и длительность импульса при имитации отличались от нормируемых параметров импульса тока молнии не более, чем на 10%. Если время фронта и длительность импульса при имитации отличались от нормируемых параметров импульса тока молнии более, чем на 10%, производят экстраполяцию результатов измерений при различных импульсах тока к нормируемым значениям времени фронта импульса.

Расчеты распределения импульсных потенциалов проводят при помощи компьютерной программы. Результаты расчета, проведенного для условий имитации, сравнивают с результатами измерений. При расхождении результатов расчетов и измерений более, чем на 20% рекомендуется повторить измерения при других направлениях разноса электродов и уточнить расчетную схему и исходные данные для расчета (например, удельное сопротивление грунта) [41, 73, 140].

1.2.11 Определение коррозионного состояния заземляющих проводников и заземлителей. Коррозионное состояние заземляющих проводников и заземлителей определяют путем выборочного вскрытия и осмотра заземлителей и заземляющих проводников, находящихся под землей [75, 76, 113].

Выборочное вскрытие проводится, как правило [59, 88, 89]:

- у мест заземления нейтралей трансформаторов, реакторов, разрядников, ОПН, короткозамыкателей;
- в местах расположения горизонтальных искусственных заземлителей, обеспечивающих металlosвязи между заземляющими устройствами ОРУ разных классов напряжения;
- у оборудования, находящегося на периферии открытой части электроустановки (равномерно по внешнему контуру электроустановки);
- особое внимание следует уделять осмотру заземляющих проводников под поверхностью грунта у места их входа в грунт.

Общее число мест проверки должно быть не менее 10, а для открытых электроустановок большой площади может быть увеличено до $0,1 \sqrt{S}$, где S - площадь электроустановки в м^2 .

На основе результатов вскрытия определяют существующие на момент проверки минимальные размеры поперечного сечения заземляющих проводников и заземлителей, и выполняют их проверку на термическую устойчивость. Элемент ЗУ должен быть заменен или усилен, если коррозионное разрушение нарушает его термическую устойчивость [83].

Если сечение удовлетворяет условию термической устойчивости, то по определенному снижению поперечного сечения заземляющих проводников и заземлителей и сроку эксплуатации ЗУ делают оценку срока снижения сечения до предела термической устойчивости [87].

Срок следующей проверки назначают на год, предшествующий году снижения сечения до предела термической устойчивости, но не позднее, чем через 12 лет после текущей проверки [83].

При повышенном коррозионном износе заземляющих проводников и заземлителей для определения дальнейшего срока эксплуатации ЗУ необходимо выполнить измерения и расчеты коррозионных характеристик грунта, а также определение наличия блуждающих постоянных токов [22, 76, 77, 95, 106, 112].

1.2.12 Средства для определения состояния элементов ЗУ. Для определения толщины коррозии, контактного сопротивления металлических соединений элементов ЗУ и сопротивления заземлителей используются следующие виды приборов [115]:

- микрометр или штангенциркуль;
- микроомметр;
- мегаомметр (измеритель сопротивления ЗУ).

Толщина коррозии вокруг заземляющего электрод (арматуры) измеряется с помощью микрометра. Микрометр позволяет точно определить механическое состояние заземляющих электродов.

В настоящее время для определения толщины коррозии ЗУ используются современные микрометры разных моделей. Одним из таких приборов является цифровой микрометр типа МКЦ, внешний вид которого приведен на рисунке 1.8, а в таблице 1.7 даны его характеристики [49, 90].

Таблица 1.7 – Характеристики цифровых микрометров типа МКЦ

Наименование	Класс	Рабочий диапазон мм	Дискретность см	Погрешности измерения см
МКЦ-25 (5)	1	0,0 – 24,99	0,0001	0,0002
МКЦ-25 (5)	2	0,0 – 24,99	0,0001	0,0004
МКЦ-50 (5)	1	25,0 – 49,99	0,0001	0,0002
МКЦ-50 (5)	2	25,0 – 49,99	0,0001	0,0004
МКЦ-75 (5)	1	50 – 74,99	0,0001	0,0002
МКЦ-75 (5)	2	50 – 74,99	0,0001	0,0004



Рисунок 1. 8– Цифровой микрометр МКЦ

Для определения контактного (переходного) сопротивления элементов ЗУ используется микроомметр. Современные цифровые микроомметры позволяют измерять контактное сопротивление металlosвязи с незначительной погрешностью. В качестве таких приборов используются микроомметры ИКС-5, М4104 и ТС-3.

Прибор ИКС-5 предназначен для оперативного измерения низкого электрического сопротивления постоянному току, в том числе переходного сопротивления высоковольтных выключателей и разъединителей [80].

Прибор ИКС-5 позволяет также измерять электрическое сопротивление низкоиндуктивных цепей других машин и аппаратов в диапазоне от 0 до 10^4 мкОм.

Таблица 1.8 – Характеристики цифрового микроомметра типа ИКС-5

Температура окружающей среды °C	Относительная влажность воздуха %	Атмосферное давление кПа	Напряженность электрического поля частотой 50 Гц кВ/м	Напряженность магнитного поля частотой 50 Гц А/м	Напряжение питающей сети переменного тока, при частоте 50 Гц В
-20...55	90	84...106,7	до 5	до 400	220±22

Диапазон измеряемого электрического сопротивления составляет 0...10000 мкОм. Пределы допускаемой основной относительной погрешности измерения:

$$\pm (0,2 + 0,01(10000/R - 1))\%, \quad (1.5)$$

где: R – измеренное значение сопротивления, мкОм.

Допускаемая дополнительная относительная погрешность измерения при изменении температуры окружающего воздуха от нормальных до предельных значений в рабочем диапазоне температур не должна превышать предела допускаемой основной погрешности $(\pm (0,2+0,01(10000/R-1)))\%$,

где: R – измеренное значение сопротивления, мкОм) на каждые 20 °С.

Допускаемая дополнительная относительная погрешность измерения при наличии внешнего магнитного поля частотой 50 Гц напряженностью до 400 А/м не должна превышать предела допускаемой основной погрешности $(\pm(0,2+0,01(10000/R-1)))\%$, где: R – измеренное значение сопротивления, мкОм).



Рисунок 1.9 – Цифровой микроомметр ИКС-5

Сопротивления ЗУ электроустановок раньше измерялись известными аналоговыми приборами М416, Ф4103 и др. Сейчас используются разные цифровые приборы с низкими погрешностями и удобными для эксплуатации. В качестве такого прибора можно использовать цифровой мегаомметр ИС-10, MRU-105 и MRU-120.

В настоящее время в России для измерения сопротивления ЗУ разным методом и измерения удельного сопротивления грунта используется цифровой современный прибор ИС – 10, так как он всем доступен, удобен для измерения и имеет большой диапазон измерения (см. таблицу 1.9).

ИС-10 предназначен для измерения сопротивления элементов заземления, металлосоединений, непрерывности защитных проводников в различных

режимах: по двух-, трёх- или четырёхпроводному методу и измерения с автоматическим вычислением удельного сопротивления грунта. С применением клещей (при наличии в составе прибора) прибор измеряет переменный ток без разрыва измеряемой цепи, а также позволяет сделать качественную оценку состояния единичных заземлителей в многоэлементном заземлении путём определения процентного распределения токов [57].

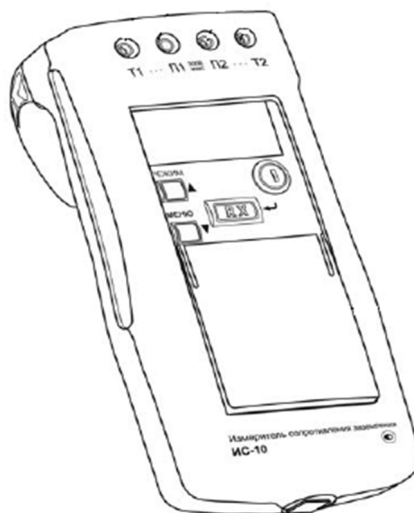


Рисунок 1.10 – Общий вид прибора ИС-10 и расположение гнезд подключения

Таблица 1.9 – Технические характеристики прибора ИС-10

Диапазон измерения прибора
- до 999 мОм с разрешающей способностью 1 мОм
- от 1,00 до 9,99 Ом с разрешающей способностью 0,01 Ом
- от 10,0 до 99,9 Ом с разрешающей способностью 0,1 Ом
- от 100 до 999 Ом с разрешающей способностью 1 Ом
- от 1,00 до 9,99 кОм с разрешающей способностью 0,01 кОм

Пределы основной относительной погрешности измерения сопротивления в нормальных условиях, в режиме четырёхпроводного метода измерения, не более:

$$\delta = \pm \{ [3 + 0,01 (R_k / R_x - 1)] \% + 3 \text{ емп} \}, \quad (1.6)$$

где R_k - конечное значение поддиапазона измеряемого сопротивления;

R_x – значение измеряемого сопротивления в пределах поддиапазона;
 емр – аббревиатура – единица младшего разряда.

Измерение сопротивления ЗУ с помощью ИС-10 осуществляется по четырёхпроводному и трехпроводному методам. Схема подключения токового и потенциального электродов прибора показана на рисунке 1.11.

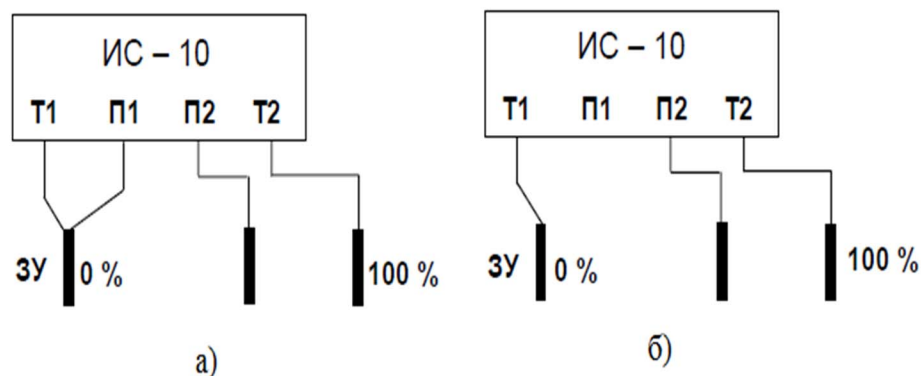


Рисунок 1.11 – Схема измерения сопротивления заземления

а) четырёхпроводным методом б) трехпроводным методом

Прибор используется и для измерения удельного сопротивления грунта. Величина удельного сопротивления грунта рассчитывается по методике измерения Вернера. Эта методика предполагает равные расстояния между электродами (d), которое следует принимать не менее чем в 5 раз больше глубины погружения штырей.

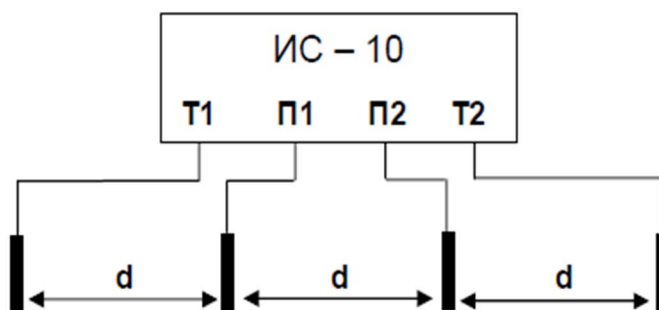


Рисунок 1.12 – Схема подключения прибора при измерении удельного сопротивления грунта

Удельное сопротивление грунта рассчитывается по формуле:

$$R_{уд} = 2\pi \cdot d \cdot R_E = (6,28 \cdot d \cdot R_E). \quad (1.7)$$

где R_E – показания значения сопротивления.

Анализ методов и средств, приведенных в данном параграфе, показывает отсутствие каких-либо приборов или методик, которое позволяли бы оценить состояние заземляющего устройство, прежде всего его коррозионное состояние. Устранение этого недостатка может, по нашему мнению, достигнуто изучением влияния различных факторов на ЗУ с помощью моделирующих систем.

1.3 Моделирования заземляющих устройств как способ изучения влияния различных факторов на их состояние

Электрические модели физических систем и физических полей получили в настоящее время широкое применение благодаря сравнительной простоте их осуществления и обслуживания [121].

Электрические модели используются при изучении стационарных состояний, в особенности широко применяются при исследовании динамических процессов.

Преимуществами электрических моделей являются простота набора схем и изменения их параметров, удобство и точность электрических измерений, возможность осциллографической регистрации процессов во времени. При осуществлении электрических моделей не требуется выполнения точных механических работ и применения деталей точной механики. Изготовление моделей производится обычными методами электрорадиомонтажа [31, 70, 82, 136].

Общая классификация современных моделей показана на рисунке 1.13. Модели подразделяют на две основные группы: вещественные (материальные, приборные) и символические (языковые) [126].

Вещественные модели часто называют просто «модели». Широкое проведение моделирования связано с построением специальных аналоговых

(или цифровых) устройств и моделей установок, входящих также в класс вещественных моделей.

В символических моделях фиксация, построение, описание объекта или явления даются на том или ином языке. При этом не имеет значения на каком конкретном языке описан тот или иной объект, так как переход с одного языка описания объекта на другой не представляет принципиальных трудностей.

К словесно-описательным моделям [126] относятся технические задания, пояснительные записки к проектам и отчетам, постановки задач в словесно-описательной форме. Такие модели позволяют достаточно полно описать объект или ситуацию, однако их невозможно использовать непосредственно для анализа процессов формализованным путем с помощью ЭВМ. Поэтому словесно-описательные модели обычно преобразуют в математические для удобства дальнейшего оперирования с ними.



Рисунок 1.13 – Общая классификация моделей

Математическими моделями называются комплексы математических зависимостей и знаковых логических выражений, отображающих существенные характеристики изучаемого явления. Во многих случаях математические модели наиболее полно отображают объект. Примером являются системы алгебраических

и дифференциальных уравнений. Поскольку последние представляют собой наиболее абстрактные и, следовательно, наиболее общие модели, математические модели широко применяются в системных исследованиях.

Однако каждое применение математической модели должно быть обоснованным и осторожным: символическая модель всегда является абстрактной идеализацией задачи, поэтому при решении последней необходимы некоторые упрощающие предположения, которые могут привести к тому, что модель не будет служить действительным представлением данной задачи [32].

Математические модели могут быть аналитическими или имитационными. При использовании аналитических моделей процессы функционирования элементов сложной системы записываются в виде некоторых функциональных соотношений (алгебраических, интегро-дифференциальных, конечно-разностных и т.п.) или логических условий. Аналитическая модель может исследоваться одним из следующих способов [98, 113, 134, 136, 137]:

аналитически, - когда получают в общем виде явные зависимости для искомых величин;

численно, - когда, не имея решения уравнений в общем виде, применяют средства вычислительной техники, чтобы получить числовые результаты при конкретных численных данных;

качественно, - когда, не имея решения в явном виде, можно найти некоторые свойства решения, например, оценить устойчивость решения и т.п.

При использовании имитационных моделей, в отличие от аналитических, в ЭВМ воспроизводится текущее функционирование технической системы в некотором масштабе времени. При этом требуется воспроизводить входные воздействия в виде набора чисел – реализаций процессов (а не числовых характеристик, как при аналитическом моделировании). В зависимости от характера решаемой задачи в процессе имитационного моделирования с различной степенью точности воспроизводятся и промежуточные преобразования сигнала. Например, если при анализе динамического режима работы блока на его вход подается набор чисел, отображающий процесс с заданной корреляционной

функцией, то в ходе моделирования получается реализация выходного процесса, по которой, в случае необходимости, может быть дана выборочная оценка корреляционной функции выходного сигнала.

Имитационное моделирование напоминает физический эксперимент. Отсюда первое достоинство имитационных моделей – наглядность результатов моделирования (как окончательных, так и промежуточных). Если при аналитическом моделировании обеспечивается подобие характеристик объекта и модели, то при имитационном - подобие имеется в самих процессах, протекающих в модели и реальном объекте [126].

Одно из основных достоинств имитационных моделей – возможность моделирования даже в тех случаях, когда аналитические модели либо отсутствуют, либо (из-за сложности системы) не дают практически удобных результатов. Достаточно просто при имитационном моделировании реализуются алгоритмы обработки результатов измерений для выработки, например, управляющих воздействий в АСУТП, что позволяет оценить точные характеристики управляющих сигналов. При наличии соответствующих данных можно включить в сферу моделирования объекта, управляемого АСУТП, и тем самым оценить качество управления объектом по некоторому показателю эффективности [33].

Имитационное моделирование позволяет учесть влияние большого числа случайных и детерминированных факторов, а также сложных зависимостей при вводе в модель соответствующих элементов и операций. С точки зрения сбора статистических данных имитационная модель дает возможность проводить активный эксперимент с помощью целенаправленных изменений параметров модели на некотором множестве реализаций. Последнее позволяет исследовать оптимизируемые функции качества (функционалы) системы с помощью ЭВМ [35]. Для анализа функциональных зависимостей с помощью полученного в результате моделирования ряда числовых результатов могут быть использованы методы поиска: регулярные методы, методы случайного поиска и методы теории статистических решений. Таким образом, в отличие от решения отдельных задач

имитационное моделирование на ЭВМ является качественно более высокой ступенью изучения сложных систем.

К достоинствам имитационного моделирования применительно к промышленным объектам относятся: динамический характер отображения системы; возможность учета случайных факторов и сложных зависимостей от них; сравнительная простота введения модификации в модель (поскольку ее структура аналогична функциональной и логической структуры системы); возможность исследования системы на множестве модельных реализаций ее функционирования, т.е. проведения статистических экспериментов; практически неограниченные возможности применения различных видов математического аппарата.

При решении ряда задач могут применяться имитационные математические модели, отображающие только структурные (в частности, геометрические) свойства объекта. Такие структурные модели могут иметь формы матриц, графов, списков векторов и выражать возможное расположение элементов в пространстве, непосредственные связи между элементами в виде каналов, проводов, трубопроводов и т.п. [120].

Структурные модели используют в случаях, когда задачи структурного синтеза удастся ставить и решать, не учитывая особенности физических процессов в объекте [126].

При моделирование сложных технологических объектов возрастает объем входной информации (описание связей, задание параметров элементов модели и т.д.). Укрупненность же элементов моделей приводит к разрастанию необходимой номенклатуры элементарных моделей, к увеличению объема моделирующей программы. Компромиссным вариантом может быть соответствие разбиения модели делению моделируемой системы на функциональные блоки. Функциональные модели отражают как структуру, так и процессы функционирования объекта и чаще всего имеют форму систем уравнений [79].

По способам получения функциональные математические модели делят на теоретические и формальные. Теоретические модели получают на основе

изучения физических закономерностей. Структура уравнений и параметры моделей имеют определенное физическое толкование. Формальные модели получают на основе проявления свойств моделируемого объекта во внешней среде. Теоретический подход в большинстве случаев позволяет получать математические модели более универсальные, справедливые для широких диапазонов изменения вещественных параметров. Формальные модели по сравнению с теоретическими более точны в окрестностях той точки пространства параметров, вблизи которой они определялись, но менее точны вдали от этой точки.

Моделирование заземляющих устройств облегчает задачу для измерения параметров заземленных электродов. Удобство модели при проведении экспериментов заключается в следующем: простота конструкций, малогабаритность, безопасность, удобство наблюдения [1, 33, 113].

Таким образом, модель – это неполная копия объекта. Чтобы подчеркнуть это обстоятельство, иногда говорят, что «точная модель не нужна, а слишком неточная бесполезна, при точной модели нет подобия, а есть тождество» [31]. Физическое моделирование элементов ЗУ позволяет в лабораторных условиях исследовать процесса коррозию и ее влияния на параметры заземлителя характеризующими ее состоянием.

1.4 Задачи исследования

Анализ влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии элементов ЗУ и изучение литературных источников о зависимостях электротехнических характеристик от факторов как химического, так и электрического характера, показали, что отсутствуют какие-либо результаты экспериментов о влияния каждого, из ранее упомянутых фактора, на процесс коррозии заземлителя или методик, которые позволили бы определять влияние каждого фактора. Подобные исследования имеют, в первую очередь, теоретическое значение, расширяя наше представление о факторах, влияющих на техническое состояние элементов ЗУ.

Для количественного исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии элементов ЗУ предполагается выполнить следующее:

1. Сформулировать требования, на основании которых разработать экспериментальную установку для исследований в лабораторных условиях.
2. Разработать методику исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии ЗУ.
3. Провести экспериментальное исследование влияние каждого фактора окружающей среды и блуждающих токов в разных диапазонах.
4. Установить зависимость характеристик ЗУ от всех факторов, влияющих на его состояние, их интенсивности и продолжительности воздействия.
5. На основании полученных данных разработать предложения, корректирующие нормативные документы в частности разработать новой методик для определения состояния ЗУ без вскрытия грунта.

Решение предполагаемой выше задачи позволяет разработать математическую модель, для определения состояния элементов заземляющих устройств без вскрытия грунта, в зависимости от косвенных факторов.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СОСТОЯНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Как было показано в § 1.2 процесс коррозии металлических элементов, в т. ч. образующих заземляющие устройства, зависит от ряда факторов. По некоторым из них установлены количественные соотношения, позволяющие оценить результат коррозии, при этом зависимости, которые связывали бы воедино различные факторы, нам неизвестны. Наиболее просто устранить указанный недостаток можно экспериментальным путём.

2.1 Разработка экспериментальной установки

Анализ литературных источников не позволил выявить наличие экспериментальных установок для исследования влияния различных факторов на процесс коррозии ЗУ, однако при этом были найдены установки для исследования влияния на коррозию отдельных факторов.

Например, известна установка для исследования коррозионной активности грунта, которая включает: источник питания постоянного тока; миллиамперметр; регулятор тока; милливольтметр; ячейку (металлическую ванну, выполняющую функцию наружных электродов), и внутренние электроды. С помощью данной установки можно определить коррозионность любого типа грунта [124].

Для исследования влияния различных факторов окружающей среды и блуждающих токов на скорость коррозии заземляющих устройств в лабораторных условиях идеальным вариантом является использование диэлектрической ванны, засыпаемой грунтом с разным удельным сопротивлением, поскольку для воссоздания производственного процесса коррозии элементов заземлителей необходимы определенные электрохимические условия.

С целью обеспечения химических и электрохимических условий для воссоздания коррозии в лабораторных условиях на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» ЮУрГУ была разработана экспериментальная установка (физическая модель) для исследования влияния внешних факторов и блуждающих токов на коррозионное состояние элементов ЗУ [1, 3, 129].

Предлагаемая нами установка позволяет провести комплексное исследование влияния разных факторов на процесс коррозии ЗУ, а именно:

- блуждающего тока;
- влажности грунта;
- pH грунта;
- химических минералов грунта (концентрация SO_4^{2-} , Cl^-).

Основными элементами установки является лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 1, разделительный трансформатор 2, амперметр 3, вольтметр 4, диэлектрические ванны 5, в которые засыпан грунт 6, заземляющие электроды 7, медную фольгу 8 и прибор для измерения влажности и pH грунта 9. Применение четырёх диэлектрических ванн позволяет одновременно провести эксперимент по оценке сочетанного влияния факторов на процесс коррозии ЗУ. Источник питания ЛАТР в целях безопасности подключен к установке через разделительный трансформатор. Контроль свойства грунта осуществляется как с использованием прибора для измерения влажности и кислотности грунта и термометра, так и с отбором проб для последующего химического анализа [40 – 43]. Контроль электрических параметров – с помощью амперметра и вольтметра. Вольтметр имеет большое внутреннее сопротивление.

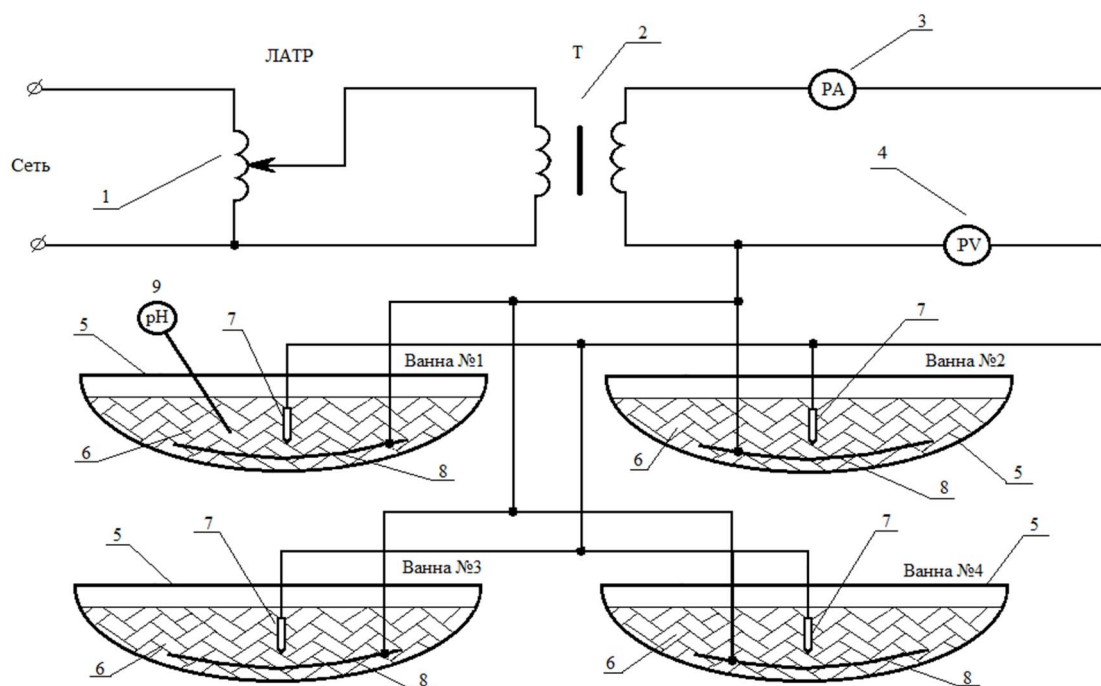


Рисунок 2.1 – Принципиальная электрическая схема модели

Для исследования влияния блуждающих токов на процесс коррозии ЗУ подключаем каждый электрод модели к источнику питания (рисунок 2.1.). В остальных случаях (при исследовании влияния влажности грунта, его pH и концентрации химических минералов на процесс коррозии ЗУ) электроды погружаются в грунт, но не подключаются к источнику питания.

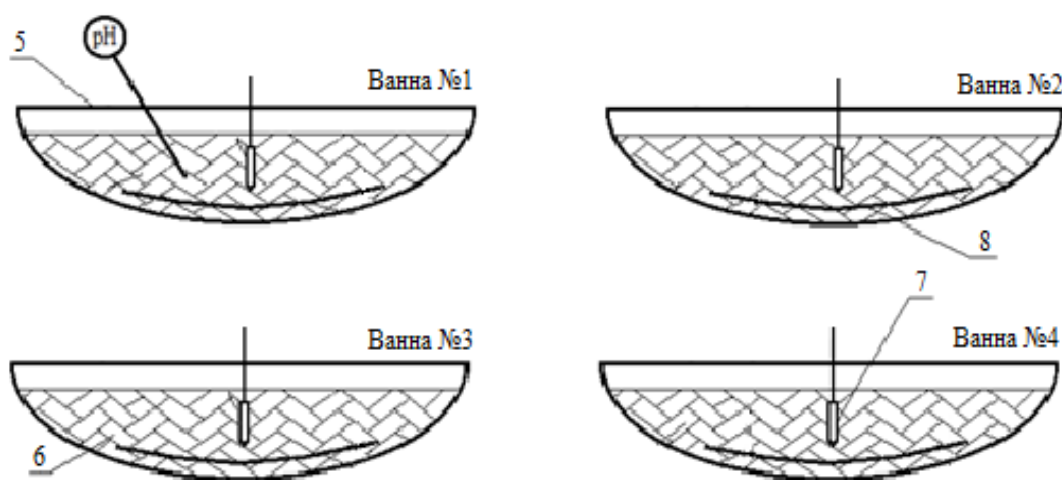


Рисунок 2.2 – Схема расположения электродов в диэлектрических ваннах

В качестве материала для электродов заземляющих устройств используется сталь без антикоррозионного покрытия. Все электроды в каждой ванне соединены между собой параллельно и составляют контур заземления.

Геометрические размеры и электрические параметры элементов модели были определены согласно принципу теории подобия и моделирования, т.е. при моделировании заземлителей критерии подобия сводятся к условиям геометрического подобия и соблюдению основных критериев подобия электромагнитных процессов [2, 7, 32, 33, 36].

При расчете основных геометрических размеров заземляющих электродов установки были получены следующие размеры:

- диаметр вертикального электрода $D_1 = 6$ мм;
- длина электрода $L = 120$ мм;
- расстояние между вертикальными электродами $a = 105$ мм;

- сечение горизонтального электрода $S_2 = 12 \text{ см}^2$;
- глубина погружения горизонтального электрода $t_b = 10,5 \text{ мм}$.

Электроды были изготовлены из стали Ст3, поскольку сталь таких марок широко используется в ЗУ электроустановках различного назначения [100].

Для создания контура протекания тока на дне каждой диэлектрической ванны размещена медная фольга (рисунок 2.3).

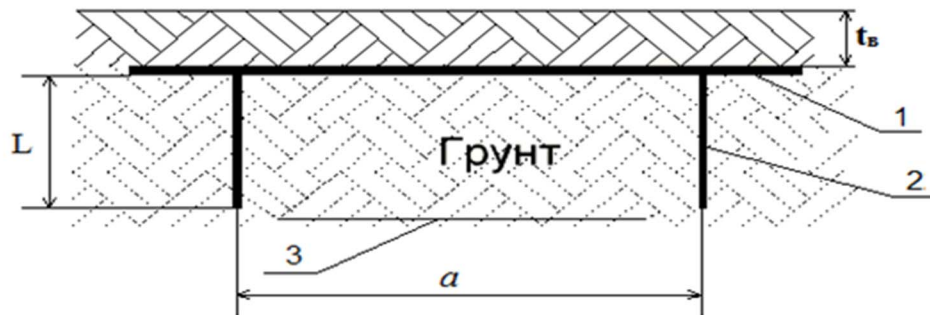


Рисунок 2.3 – Схема расположения электродов установки

1 – горизонтальный электрод, 2 – вертикальный электрод, 3 – медная фольга

На рисунке 2.4 показан общий вид экспериментальной установки.



Рисунок 2.4 – Общий вид экспериментальной установки

Установка защищена патентом РФ № 161812 (на полезную модель), «Установка для исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии заземляющих устройств» (Приложение Б).

Перед испытанием поверхность заземляющих электродов очищаем, обезжириваем и взвешиваем на электронных лабораторных весах типа RV412D, а значение массы электродов заносим в таблицу 2.1.

По завершению каждого этапа исследований извлекаем заземляющие электроды из диэлектрических ванн и обрабатываем его механическим методом [50]. После удаления продуктов коррозии с заземляющего электрода, тщательно промываем проточной затем дистиллированной водой, высушиваем фильтрованной бумагой, взвешиваем с точностью до 0,0001 г и определяем масса металла электродов после процесса эксперимента. Результат изменение массы заносим в ту же таблицу 2.1.

Разницей массы электродов до и после процесса эксперимента определяем влияние исследуемого фактора на процесс коррозии. Для этого необходимо количественно оценивать коррозионность каждого электрода (после эксперимента). Для количественного оценка коррозии заземляющих электродов обрабатываем результаты эксперимента согласно [50].

Для обеспечения условий эксперимента необходимо разработка методики исследования грунта и воспользоваться методы регулирования свойство грунта в различных диапазонах.

2.2 Методика исследования

Исследования на разработанной нами экспериментальной установке проводятся в следующей последовательности:

1. Определяются исходные характеристики грунта;
2. Устанавливается диапазон варьирования факторов;
3. Определяется влияние каждого фактора на процесс коррозии ЗУ;
 - 3.1 Влажности;
 - 3.2 Щелочности и кислотности грунта (рН);

3.3 Химико-минерального состава, т.е. содержания ионов SO_4^{2-} и Cl^- ;

4. Выявляется общая математическая модель процесса коррозии ЗУ.

4.1 Определяется зависимость потери массы электродов ЗУ от факторов, влияющих на процесс коррозии:

Контроль содержания сульфатов в грунте осуществлялся гравиметрическим методом с осаждением сульфата (SO_4^{2-}) ионами бария из водной вытяжки [44]. Определение содержания хлорид-ионов проводили аргентометрическим методом [43].

2.2.1 Методы исследования грунта

Определение влажности грунта. Измерение влажности грунта осуществляем прибором типа ТК100S. Прибор имеет достаточный диапазон (0 – 60%) и допустимую погрешность измерения $\pm 5\%$. Проводим измерения следующим образом: погружаем электроды прибора в грунт диэлектрической ванны и снимаем показания с дисплея прибора.

Для определения адекватности настроек прибора определяем влажность грунта методом высушивания до постоянной массы [20], берем пробы грунта из каждой диэлектрической ванны, заполняем тигли, взвешиваем и просушиваем в сушильном шкафу при температуре не более $105\text{ }^\circ\text{C}$ [45]. Просушиваем грунт до постоянной массы.

После прохождения процесса сушки взвешиваем сухой грунт на лабораторных цифровых весах с точностью до $0,0001\text{ г.}$ и по потере массы определяем влажность грунта. Измерения влажности грунта методом высушивания до постоянной массы осуществляем следующим образом:

- взвешиваем и фиксируем массу тиглей;
- заполняем пробы грунта из каждой диэлектрической ванны в отдельный тигель, взвешиваем и фиксируем общую массу;
- ставим все тигли в сушильный шкаф, задавая температуру, и запускаем процесс сушки;

- после прохождения процесса сушки взвешиваем каждый тигель. Разница масс проб до и после просушки определяет содержание влаги в грунте и определяется по формуле 2.1 [20].

$$\beta_{\text{в}} = \frac{B_1 - B_2}{B_2 - B} \cdot 100 \% \quad (2.1)$$

где $\beta_{\text{в}}$ - искомая влажность, % от массы сухой почвы; B - масса тигля, г;

B_1 - масса тигля с влажной почвой до сушки, г;

B_2 - масса тигля с сухой почвой после сушки, г.

Определение pH грунта. Показатель pH грунта определяется по водным вытяжкам из грунта, полученным по методике, приведенной в [45].

Уровень кислотности или щелочности грунта (величина pH) измеряем прибором типа ST-23. Приводим положение переключателя в режим «pH», погружаем электроды прибора в грунт и фиксируем показания.

Кроме того, измеряем величину pH грунта прибором типа рХ-150 по водной вытяжке. Берем 20 мл водной вытяжки, приготовленной по [45], погружаем электрод pH-метра и снимаем показание прибора.

Определение содержания ионов сульфата (SO_4^{2-}) в грунте. Содержание сульфатов в грунте определяем гравиметрическим методом с осаждением SO_4^{2-} ионами бария из водной вытяжки [44].

Определения содержания ионов хлорида (Cl^-) в грунте. Содержанию ионов хлорида грунта определяем аргентометрическим методом по [43].

2.2.2 Методы регулирования свойств грунта

Регулирование влажности грунта;

1. Высушиваем грунт в сушильном шкафу при температуре $t = 105^\circ\text{C}$ до величины 10 – 12 %;
2. Регулируем влажность грунта путем разбрызгивания необходимого количества дистиллированной воды на грунт (таблица. 2.1).

Таблица 2.1– Диапазон варьирования влажности грунта в каждой диэлектрической ванне

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Искомая влажность, %	Требуемая влажность, %	H ₂ O мл
1	I	10 – 11	14-15	500
2	II	11 – 12	19 - 20	550
3	III	11 - 12	24 - 25	800
4	IV	11 - 12	29 – 30	1000

Регулирование pH, концентрации ионов сульфата и ионов хлорида грунта осуществляем путем добавления раствора гидроокиси натрия NaOH, соляной кислоты HCl, сульфата натрия Na₂SO₄ и хлорида натрия NaCl, пропорции которых приведены в таблицах 2.2 – 2.9.

Таблица 2.2 – Диапазон щелочности грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходный pH грунта	Объем NaOH, г	Требуемый показатель, pH
1	I	7,38	5,0	8,8 – 9,2
2	II	7,61	5,5	
3	III	7,64	6,0	
4	IV	7,88	6,5	

Таблица 2.3 – Диапазон щелочности грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходный pH грунта	Объем NaOH г	H ₂ O мл	Требуемый показатель, pH
1	I	7,38	9,0	500	10 – 10,5
2	II	7,61	9,5	550	
3	III	7,64	9,0	800	
4	IV	7,88	9,5	1000	

Таблица 2.4 – Диапазон варьирования кислотности грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходный pH грунта	Объем HCl мл	H ₂ O мл	Требуемый показатель, pH
1	I	7,38	35	480	4,8 – 5,1
2	II	7,61	40	430	
3	III	7,64	50	584	
4	IV	7,88	60	730	

Таблица 2.5 – Диапазон варьирования кислотности грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходный pH грунта	Объем HCl мл	H ₂ O мл	Требуемый показатель pH
1	I	7,38	50	475	3,5 – 3,8
2	II	7,61	50	420	
3	III	7,64	60	575	
4	IV	7,88	65	725	

Таблица 2.6 – Диапазон варьирования ионов сульфата грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходная концентрация SO ₄ ²⁻ грунта, %	Объем Na ₂ SO ₄ г	H ₂ O мл	Требуемая концентрация SO ₄ ²⁻ %
1	I	0,317	155	350	4,4 – 4,6
2	II	0,323	127	423	
3	III	0,331	139	660	
4	IV	0,337	113	890	

Таблица 2.7 – Диапазон варьирования ионов сульфата грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходная концентрация SO ₄ ²⁻ грунта, %	Объем Na ₂ SO ₄ г	H ₂ O мл	Требуемая концентрация SO ₄ ²⁻ %
1	I	0,443	155	350	5,9 – 6,0
2	II	0,461	140	423	
3	III	0,452	150	650	
4	IV	0,447	155	850	

Таблица 2.8 – Диапазон варьирования ионов хлорида грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходная концентрация Cl ⁻ грунта, %	Масса NaCl г	H ₂ O мл	Требуемая концентрация Cl %
1	I	0,0136	48	450	0.3 – 0.31
2	II	0,0136	30	520	
3	III	0,0132	30	760	
4	IV	0,0132	30	970	

Таблица 2.9 – Диапазон варьирования ионов хлорида грунта

№ п/п	Номера диэлектрических ванн	Исходная концентрация Cl ⁻ грунта, %	Масса NaCl г	H ₂ O мл	Требуемая концентрация Cl %
1	I	0,30	24	475	0.44 – 0.45
2	II	0,30	15	535	
3	III	0,30	15	785	
4	IV	0,31	14	986	

На первом этапе исследования фиксируем исходные: величину pH, концентрацию SO_4^{2-} и Cl^- . Задаем влажность грунта: на первой диэлектрической ванне 4 – 5%, на второй 14 – 15 % на третьей 24 – 25 % и на четвертой 29 – 30 % и запускаем процесса эксперимента (таблица 2.2).

Для сохранения нужного диапазона влажности грунта контролируем его ежедневно.

На втором этапе варьируем pH грунта при том же уровне влажности грунта (таблица 2.2). Проводим эксперименты в условиях щелочности грунта, $\text{pH} \approx 7 - 10$ и кислотности $\text{pH} \approx 7 - 4$ (таблицы 2.3 – 2.6). т.е. проверяем влияние величины pH при максимальных и минимальных значениях щелочности и кислотности грунта на процесс коррозии ЗУ. Задаем величину pH грунта всех диэлектрических ванн одинаковой при разной влажности грунта.

На третьем этапе варьируем содержание SO_4^{2-} в грунте. Первый раз проводим эксперимент при концентрации $\text{SO}_4^{2-} = 0,3 - 0,35\%$ в грунте, а второй раз-при $\text{SO}_4^{2-} = 0,4 - 0,45\%$ (таблицы 2.7 – 2.8).

На четвертом этапе эксперимента проверяем влияние хлорида иона при $\text{Cl}^- = 0,2 - 0,3\%$ и $0,3 - 0,4 \%$ (таблицы 2.9 – 2.10).

Пятым этапом исследования является проверка влияния блуждающих токов на процесс коррозии ЗУ.

Для исследования влияния блуждающего тока на процесс коррозии элементов ЗУ погружаем все заземляющие электроды в грунт диэлектрических ванн и подключаем их к источнику питания (рисунок 2.1).

В таблице 2.10 приведены исходные концентрации химических минералов и его pH во всех диэлектрических ваннах экспериментальной установки.

Таблица 2.10 – Исходная концентрация химических минералов и **pH** грунта

№ п/п	Диэлектрическая ванна	Содержание химических минералов, %		pH грунта
		SO_4^{2-}	Cl^-	
1	I	0,317	0,0136	7,38
2	II	0,323	0,0136	7,61
3	III	0,331	0,0132	7,64
4	IV	0,337	0,0123	7,88

В таблицах 2.11 – 2.16 и на рисунках 2.5 – 2.7, приводятся результаты проведенных нами опытов на разработанной установке по исследованию влияния различных факторов (влажности грунта, его водородный показатель pH, содержание химических минералов, и наличие блуждающих токов) на процесс коррозии элементов ЗУ. Диапазон варьирования влажности грунта приводится на рисунках 2.5 – 2.7.

Таблица 2.11 – Потеря массы электродов при разной влажности грунта

№ п/п	Влажность грунта, %	Масса электродов, г			Потеря массы электродов, %
		до эксперимента	после эксперимента	потеря массы электродов	
1	5	8.5523	8.5503	0.0020	0,0233
2	20	8,4525	8.4409	0.0116	0,1372
3	25	8,1281	8.1147	0.0134	0,1648
4	30	8,3252	8.3158	0.0094	0,1129

Таблица 2.12 – Потеря массы электродов в разных диапазонах pH грунта

№ п/п	Водородный показатель грунта	Потеря массы электродов, % (при влажности грунта, %)			
		15	20	25	30
1	3,5	0,0988	0,1582	0,1593	0,1303
2	7,38	0,1223	0,1468	0,1598	0,1135
3	10,5	0,0872	0,1423	0,1578	0,1211

Таблица 2.13 – Потеря массы электродов в разных диапазонах концентрации сульфат-ионов грунта

№ п/п	Концентрация сульфат-ионов в грунте, %	Потеря массы электродов, % (при влажности грунта, %)			
		15	20	25	30
1	0,317	0,0988	0,1388	0,1659	0,1136
2	0,45	0,1225	0,1564	0,1594	0,1386
3	0,6	0,1195	0,1426	0,1592	0,1204

Таблица 2.14 – Потеря массы электродов в разных диапазонах концентрации хлорид-ионов грунта

№ п/п	Концентрация хлорид-ионов в грунте, %	Потеря массы электродов, % (при влажности грунта, %)			
		15	20	25	30
1	0,0136	0,0988	0,1388	0,1659	0,1136
2	0,3	0,1349	0,1578	0,1597	0,1401
3	0,45	0,1331	0,1563	0,1592	0,1398

Таблица 2.15 – Потеря массы электродов в разные диапазоны значения блуждающих токов

№ п/п	Значение блуждающих токов	Потеря массы электродов, % (при влажности грунта, %)			
		15	20	25	30
1	0	0,0988	0,1388	0,1659	0,1136
2	120	0,1348	0,1369	0,1378	0,1632
3	150	0,1368	0,1572	0,1688	0,1603

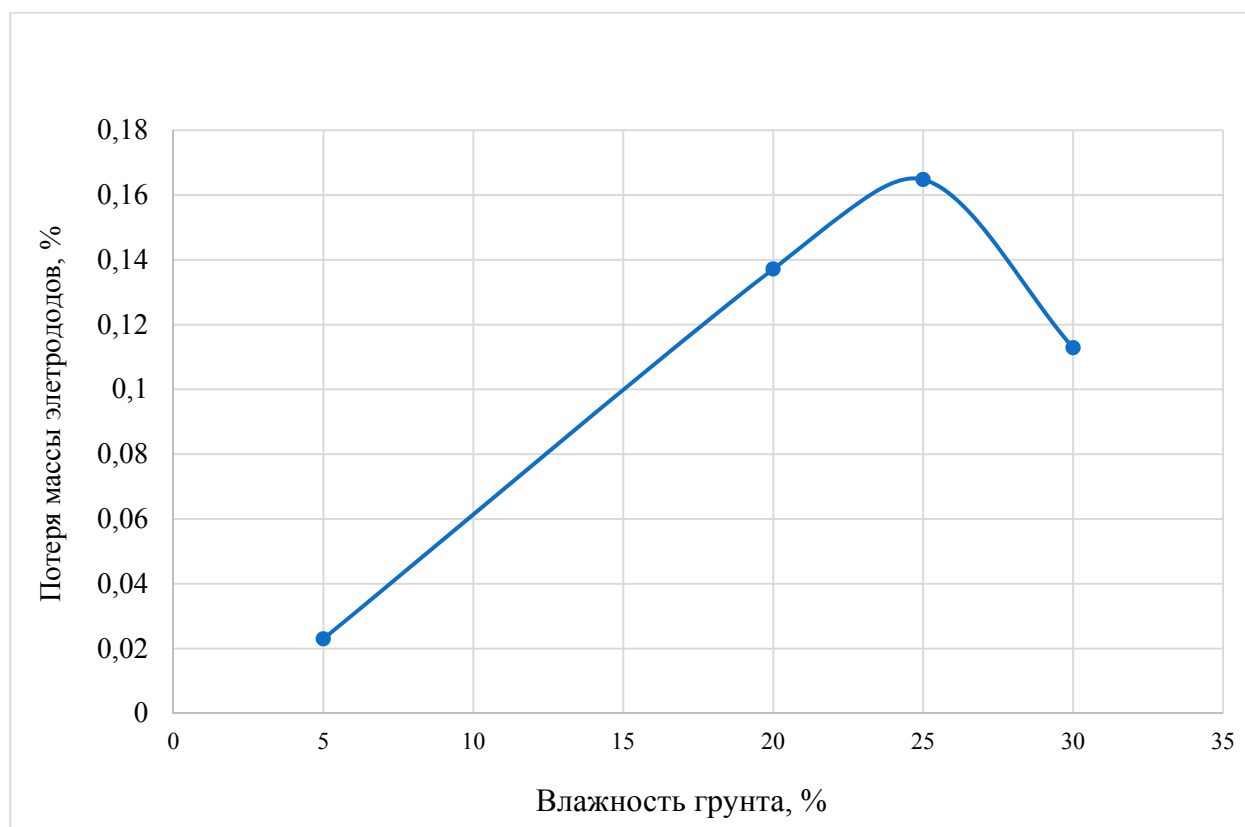


Рисунок 2.5 – Зависимость потери массы электродов от влажности грунта

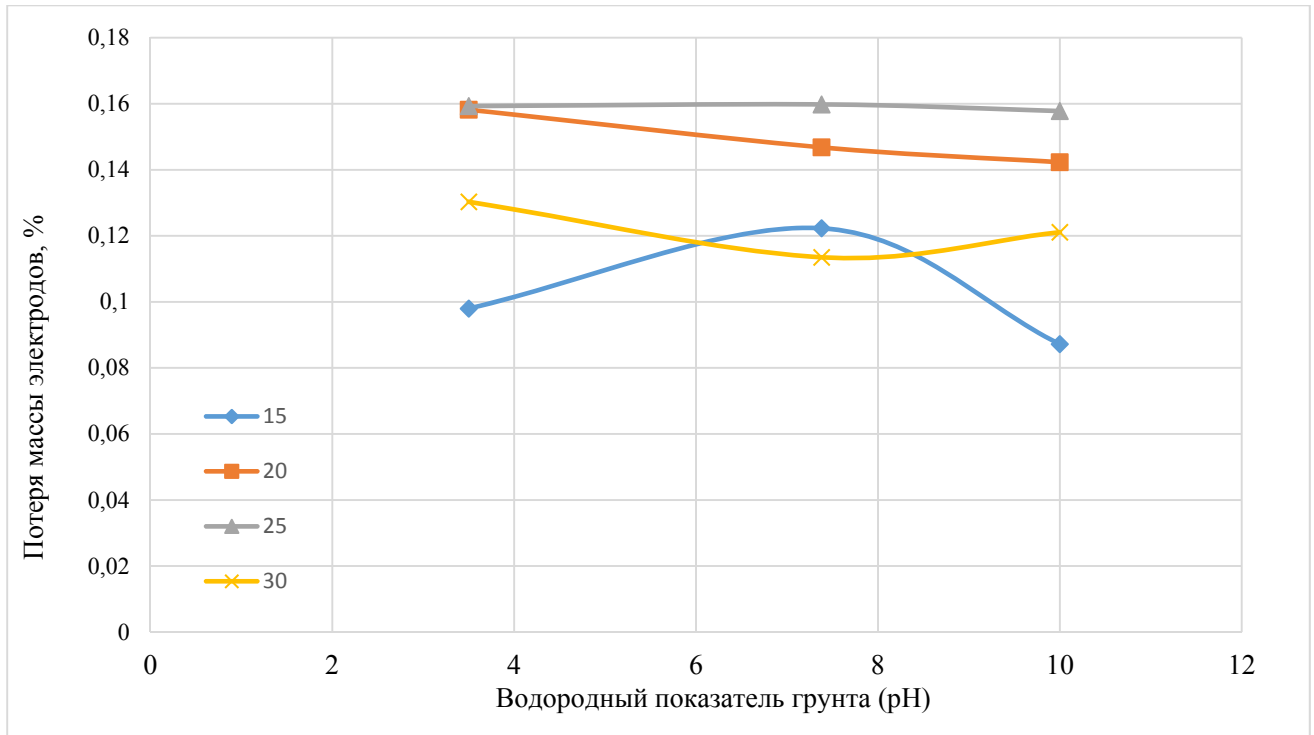


Рисунок 2.6 – Зависимость потери массы электродов от pH грунта

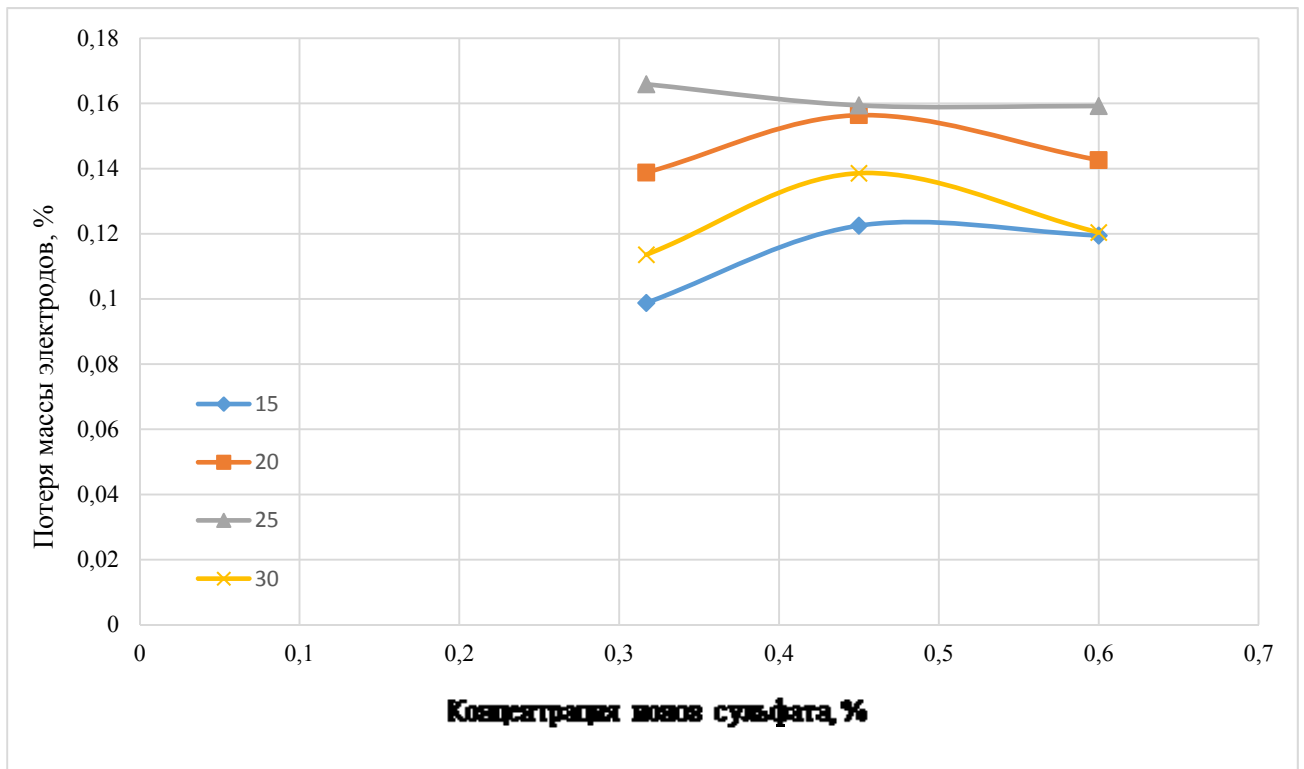


Рисунок 2.7 – Зависимость потери массы электродов от содержания сульфат-иона

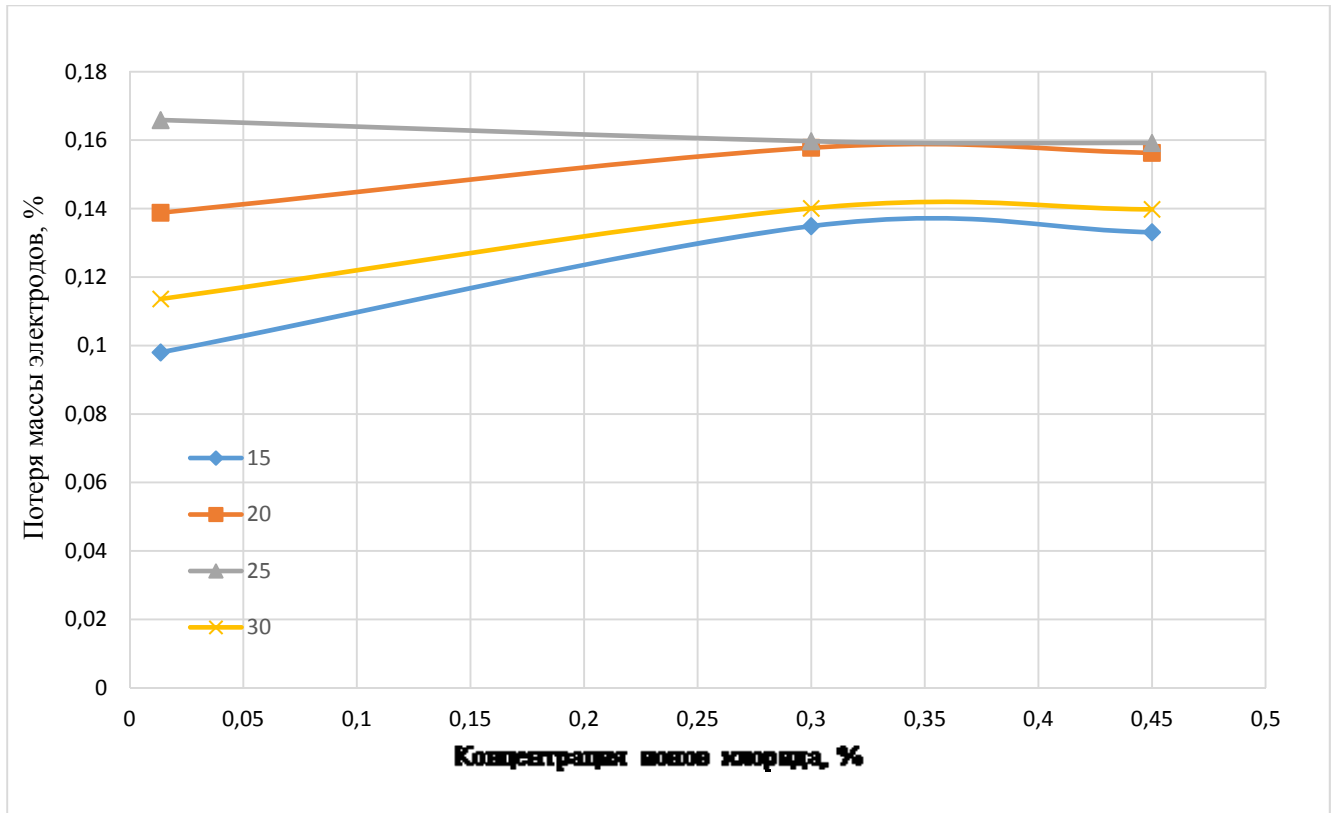


Рисунок 2.8 – Зависимость потери массы электродов от содержаний хлорид-иона

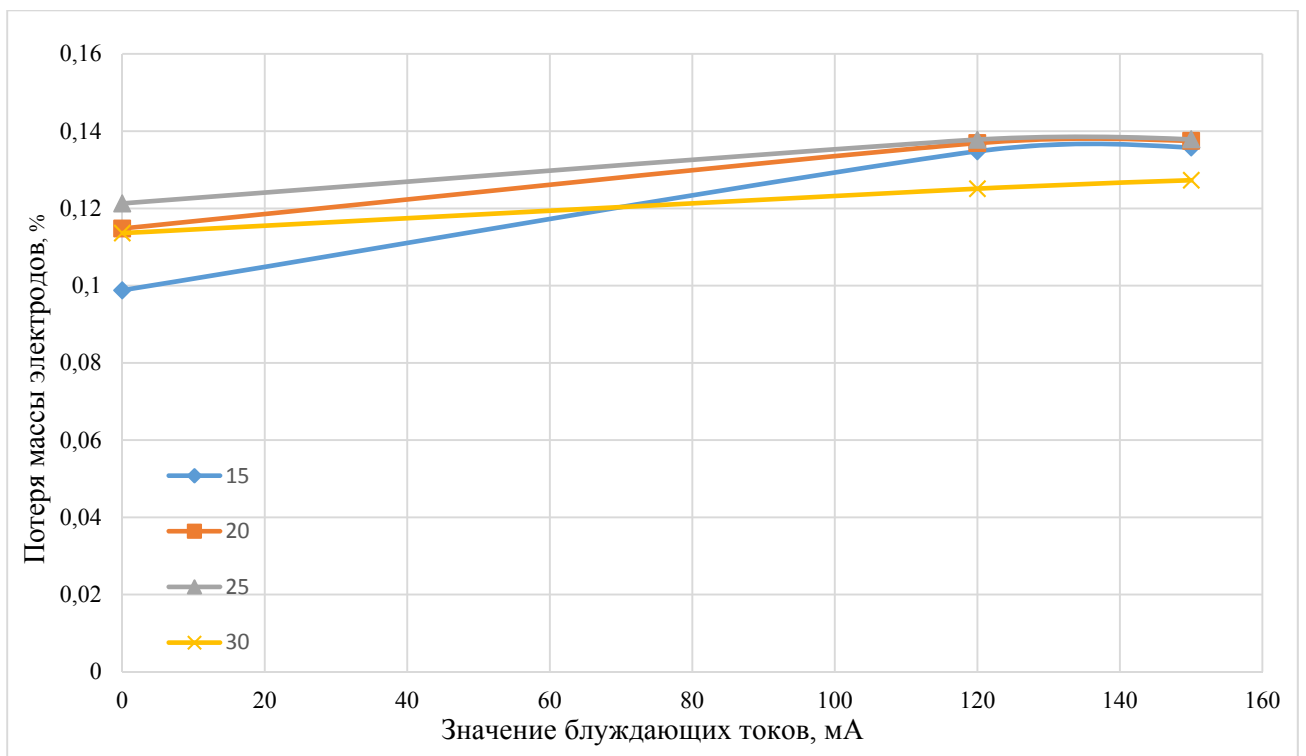


Рисунок 2.9 – Зависимость потери массы электродов от наличия и величины блуждающих токов

Как следует из анализа экспериментальных данных, представленных на рисунке 2.5, влажность грунта влияет на процесс коррозии заземляющих электродов разнообразно. Коррозия при влажности 5 – 25 % увеличивается, а наиболее ускоренный процесс коррозии металла, применяемого для изготовления заземляющего электрода, наблюдается в диапазоне 15 – 25 % влажности грунта. Дальнейшее увеличение влажности грунта замедляет процесса коррозии. В диапазоне 25 – 30 % влажности грунта происходит замедление процесса коррозии заземляющих электродов.

Остальные показатели грунта экспериментальной установки, такие как водородный показатель и концентрации химических элементов были определены по таблице 2.10.

На рисунках 2.6 – 2.9 приводятся результаты экспериментов при изменении значений pH, содержания химических минералов и блуждающих токов для разных значений влажности грунта (15, 20, 25 и 30 %). В нижнем поле каждого рисунка приводятся условно графическое обозначение разных линий, влажности грунта.

Влияние водородного показателя грунта на процесс коррозии заземляющих электродов наиболее сложно и при разных значениях влажности грунта ведет себя по-разному. Наиболее максимальный процесс коррозии происходит при кислотности $\text{pH} = 3,5$ и влажности грунта 25 %. Наименьшее влияние pH на процесс коррозии наблюдается при $\text{pH} = 10,5$ и влажности грунта 15 % (рисунок 2.6).

Концентрация сульфат-ионов грунта влияет на процесс коррозии ЗУ различным образом, например, при влажности 20 – 25 %, увеличение концентрация сульфат-иона ведет к ускорению процесса коррозии. Дальнейшее увеличение влажности грунта (до 30 %) с ростом концентрации сульфат-иона сопровождается замедлением процесса коррозии (рисунок 2.7). Минимальная потеря металла, применяемого для изготовления заземляющего электрода, наблюдается при концентрации сульфат-иона 0,6 % и влажности грунта 15 %.

Увеличение ионов хлорида грунта ведет к росту скорости коррозии заземляющих электродов, но при этом сильно зависит от влажности грунта. Максимальный скорость коррозии происходит при содержании хлорид-иона 0,0136 % и 25 % влажности грунта (рисунок. 2.8). Замедление процесса коррозии возникает при 15 % влажности грунта, при том же показателе хлорид-иона (0,0136) [122].

Анализ экспериментальных исследований показывает, что блуждающий ток существенно влияет на процесс коррозии металла, применяемого для изготовления заземляющего электрода. Эксперименты были проведены при трех разных значениях блуждающего тока и разных значениях влажности грунта (рисунок 2.9).

Для определения количества опытов, выбора управляемых факторов, существенно влияющих на процесс коррозии ЗУ, и количества откликов применим теорию планирования эксперимента.

2. 3 Экспериментальное исследование влияния различных факторов на процесс коррозии заземляющих устройств

Для минимизации трудовых и временных затрат, воспользуемся теорией планирования многофакторного отсеивающего эксперимента. Под планированием эксперимента понимается процедура выбора числа опытов и условий их проведения, необходимых для решения поставленной задачи с требуемой точностью [17, 21, 37, 39, 62]. Все переменные, определяющие изучаемый объект, изменяются одновременно по специальным правилам. Результаты эксперимента представляются в виде математической модели, обладающей определенными статистическими свойствами.

Для построения математической модели объекта исследования применим кибернетическую систему, называемую «черным ящиком». Это способ изучения системы, в котором намеренно отказываются от изучения структуры системы, связей между элементами системы, а исследуют только воздействия на систему и реакции системы на эти воздействия (рисунок. 2.5).

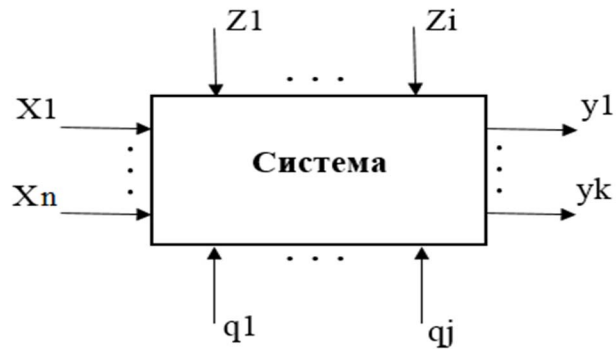


Рисунок 2.5 – Система черного ящика

Все факторы, воздействующие на систему, разбиваем по группам X , Z , q , (таблица 2.11):

X – факторы, которые влияют на поведение системы и которыми мы можем управлять по определенным законам (матрицам);

Z – факторы, которые влияют на поведение системы, но управлять ими вследствие ограничений (технических, технологических, экономических, социальных и др.) не представляется возможным;

q – факторы, которые влияют на поведение системы, но управление ими на данном этапе развития цивилизации невозможно.

y – реакции системы на воздействия, параметры оптимизации, целевые функции.

Каждый фактор может принимать в опыте одно из нескольких значений. При решении задачи будем использовать математические модели объекта исследования. Под математической моделью мы понимаем уравнение, связывающее параметр оптимизации с факторами. Это уравнение в общем виде можно записывать так [8, 116, 123]:

$$Y = f(X) + e_1 + e_2,$$

$$Z = \text{const}; q = \text{const},$$

где: Y , X , Z , q – совокупность соответствующих элементов «черного ящика»;

e_1 , e_2 – погрешности системы 1-го и 2-го рода (систематические и случайные).

В качестве констант для Z и q рекомендуется принимать наилучшие значения этих факторов.

В качестве отклика, характеризующего систему, примем:

y_1 – потерю массы заземляющих электродов, мкг.

y_2 – изменение сопротивления растеканию тока заземляющих электродов, %

Таблица 2.16 – Факторы, воздействующие на систему «черный ящик»

№ п/п	Номер фактора	Классификация факторов	Расшифровка и диапазон варьирования регулируемых факторов
1	r_1	X_1	Влажность грунта (5 – 30 %)
2	r_2	X_2	Водородный показатель грунта (3,5 – 10,5)
3	r_3	X_3	Концентрация ионов сульфата (0,45 – 0,65 %)
4	r_4	X_4	Концентрация ионов хлорида (0,3 – 0,45 %)
5	r_5	X_5	Наличие блуждающих токов (0 – 150 мА)
6	r_6	Z_1	Температура грунта, °С
7	r_7	Z_2	Электропроводность грунта, Ом·м
8	r_8	Z_3	Вид грунта
9	r_9	q_1	Бактериальный состав грунта
10	r_{10}	q_2	Газовый состав грунта
11	r_{11}	Z_4	Частота приложенного напряжения, 50 Гц
12	r_{12}	Z_5	Объем диэлектрической ванны, (0,37 м³)
13	r_{13}	Z_6	Глубина диэлектрической ванны, (165 мм)
14	r_{14}	Z_7	Место расположения электродов
15	r_{15}	Z_8	Форма электродов (цилиндрическая)
16	r_{16}	Z_9	Глубина залегания электродов, (35 мм)
17	r_{17}	Z_{10}	Площадь электродов, (990 мм²)
18	r_{18}	Z_{11}	Материал электродов, (сталь без антикоррозионного покрытия)
19	r_{19}	Z_{12}	Геометрическая форма контура (прямоугольная)
20	r_{20}	Z_{13}	Площадь контура, (351 см²)
21	r_{21}	Z_{14}	Глубина расположения контура, (3 мм)
22	r_{22}	Z_{15}	Материал контура, (сталь без антикоррозионного покрытия)
23	r_{23}	Z_{16}	Обратный провод (медная фольга)
24	r_{24}	Z_{17}	Площадь фольги, (112 см²)
25	r_{25}	Z_{18}	Источник блуждающих токов
27	y_1		Потеря массы электродов, %
26	y_2		Изменение сопротивления растекания тока заземляющих электродов, %

Опираясь на данные таблицы 2.12, построим план Плакетта-Бермана (таблица 2. 13) с кодированными и физическими факторами, обозначая знаками «+», «-» и диапазон физического значения каждого фактора [8, 88].

Таблица 2.17 – План Плакетта-Бермана

№ опыта	Уровни факторов										Отклики	
	X_1		X_2		X_3		X_4		X_5		y ₁ , %	y ₂ , %
	код	физ.	код	физ.	код	физ.	код	физ.	код	физ.		
1	+	30	+	10.5	-	0.45	+	0.45	-	120	0,1604	4,732
2	-	5	+	10.5	+	0.6	-	0.3	+	150	0,1381	1,236
3	-	5	-	3.5	+	0.6	+	0.45	-	120	0,1352	1,132
4	+	30	-	3.5	+	0.6	+	0.45	+	150	0,1724	5,023
5	-	5	+	10.5	-	0.45	+	0.45	+	150	0,1359	2,321
6	+	30	-	3.5	-	0.45	-	0.3	+	150	0,1721	6,123
7	+	30	+	10.5	+	0.6	-	0.3	-	120	0,1345	4,221
8	-	5	-	3.5	-	0.45	-	0.3	-	120	0,0233	0,689

Известно, что, при изучению какого-нибудь сложного технологического процесса, приходится включать в исследование большое количество факторов. В дальнейшем обычно большая часть их отсеивается, как незначимые факторы. Поэтому весьма важно с целью уменьшения времени и затрат на проведение отсеивающих экспериментов [78]. Для этого определяем влияния факторов существенно влияющих на процесс коррозии заземляющих электродов и изменению сопротивления растеканию тока ЗУ.

По результатам исследований, проведенных экспериментов по планам Плакета-Бермана была построена диаграмма рассеяния выделения существенных факторов рисунок 2.6 [116].

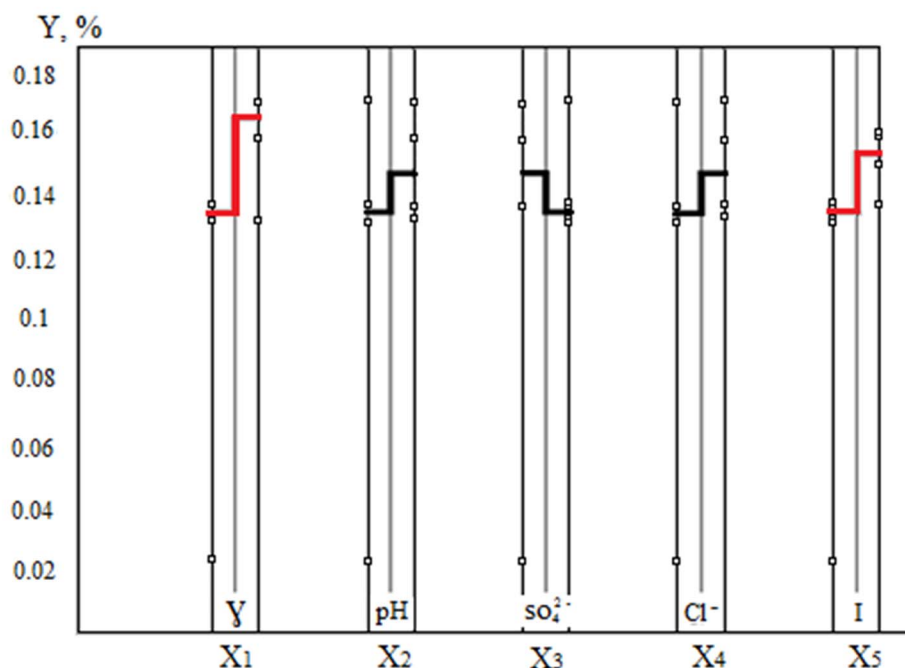


Рисунок 2.6 – Диаграмма рассеяния результатов первого этапа выделения существенных эффектов

Результаты исследований показывают, что наиболее существенными факторами, влияющими на процесс коррозии ЗУ, являются влажность грунта и наличие блуждающих токов (X_1 , X_5).

Для определения состояния ЗУ расчетным путем рассматриваем уравнения регрессии для двухфакторного эксперимента. Проводим эксперимент в условиях изменении влажности грунта и значения блуждающих токов и определяем коэффициенты регрессии по [37].

2.4 Выводы

1. На основе анализа литературных источников и подобных установок разработана экспериментальная установка для исследования процесса коррозии ЗУ в лабораторных условиях на которой получена патент на полезную модель.
2. Все геометрические размеры и электрические параметры экспериментальной установки масштабированы согласно теорией подобия и моделирования.

3. Разработана методика исследования влияния влажности грунта, его pH, химико-минерального состава и наличия, и величины блуждающих токов на процесс коррозии ЗУ.
4. Разработана математическая модель проведения эксперимента (выделены и разбиты на группы факторы, воздействующие на объект исследования и выбраны диапазоны варьирования управляемых факторов).
5. На основании плана отсеивающего эксперимента значительно сокращено число опытов. Получены количественные оценки влияния варьируемых факторов на процесс коррозии ЗУ.

3. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ БЕЗ ПРОВЕДЕНИЯ ВСКРЫШНЫХ РАБОТ

Исследования, результаты которых представлены выше, показали, что коррозия ЗУ возникает, в основном, за счет влажности грунта и блуждающего тока и ее влияние на сопротивление растеканию тока заземлителя существенно. Вместе с тем выявилась необходимость построения математической модели для косвенного определения состояния ЗУ без проведения вскрышных работ.

3.1 Получение зависимости коррозии и сопротивления растеканию ЗУ от влажности грунта и величины блуждающего тока

Согласно теории математического моделирования и теории планирования эксперимента [52, 91, 92, 99] при наличии хотя бы одной нелинейной зависимости отклика от любого варьируемого фактора, необходимо использовать регрессионное уравнение второй степени (3.1), а матрицу эксперимента выбирать из каталога [26, 62]. Матрица эксперимента представлена в таблице 3.1.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot X_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n b_{ij} \cdot X_i \cdot X_{ij} + \sum_{i=1}^n b_{ii} \cdot X_{ii}^2 \quad (3.1)$$

Уравнение регрессии второй степени для двух переменных имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.2)$$

Таблица 3.1 – Матрица двухфакторного эксперимента

№ фактора	№ опыта						
	1	2	3	4	5	6	7
x ₁	+0.5	+1	+0.5	-0.5	-1	-0.5	0
x ₅	+0.866	0	-0.866	-0.866	0	+0.866	0

Для задач, которые решаются изучением двух факторов, эффективными являются планы, в которых экспериментальные точки располагаются в вершинах шестиугольника или пятиугольника и в центрах этих фигур. Особенно ценными свойствами обладает план, образованный вершинами шестиугольника. Данный план для первого и второго факторов (соответственно X₁ и X₂) требует пять уровней, а для второго – три уровня варьирования, (рисунок. 3.1).

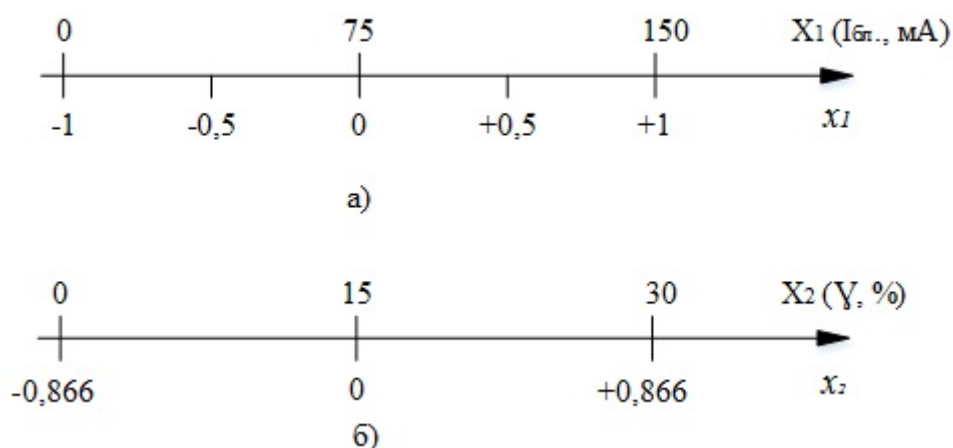


Рисунок 3.1 – Векторное изображение факторов:

а) влажность грунта; б) значение блуждающих токов

При планировании эксперимента было установлено, что существенное влияние на процесс коррозии ЗУ оказывают влажность грунта и наличие блуждающих токов [116]. Учитывая это, дальнейшие исследования решено провести для получения математической зависимости коррозии ЗУ при воздействии влажности грунта и наличии блуждающего тока.

Коррозия ЗУ была оценена по потере массы электродов, а их сопротивление растеканию тока – методом амперметра-вольтметра.

Таблица 3.2 – Матрица и результаты эксперимента

№ п/п	Дата	Влажность грунта, %		Наличие блуждающих токов, мА		y ₁ , %	y ₂ , %
		код. x_1	физическое значение X_1	код. x_5	физическое значение X_5		
1	28.02. 2016	+0,5	23,75	0,866	150	0,1717	6,331
2		+0,5	23,75	-0,866	120	0,1610	6,182
3		-1	5	0	135	0,0236	0,986
4		+1	30	0	135	0,1141	4,835
5		-0,5	11,5	0,866	150	0,1232	5,238
6		-0,5	11,5	-0,866	120	0,1149	4,921
7		0	17,5	0	135	0,1525	5,932

Для определения среднего значения откликов воспользуемся формулой 3.3.

$$y_{\text{ср}} = \sum y_i / n \quad (3.3)$$

где $n = 3$, число повторных опытов.

В таблице 3.2 приведено среднее значение откликов (потеря массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов, и изменение сопротивления растеканию тока заземляющих электродов).

Для вычисления коэффициентов $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{12}, b_{22}$, входящих в уравнение 3.2, необходимо воспользоваться L-матрицей, приведенной в [26, 79, 99] и соответствующей матрицей эксперимента.

Коэффициенты $b_0, b_1, b_2, b_{11}, b_{12}, b_{22}$, вычислены по формулам 3.4, 3.5 и приведены в таблице 3.3.

$$b_n = \sum_{u=1}^7 Q_{ni} \cdot \bar{y}_u, \quad (3.4)$$

где Q_{ni} – коэффициент из L – матрицы, $n = 0 \dots 2$;

$\bar{y}_u$ – u-ое значение влажности грунта или блуждающего тока, $u=1 \dots 7$ (таблица 3.2)

$$b_{nn} = \sum_{u=1}^7 Q_{nni} \cdot \bar{y}_u, \quad (3.5)$$

где Q_{nni} – коэффициент из L – матрицы, $n = 1 \dots 2$;

$$b_{nm} = \sum_{u=1}^7 Q_{nm_i} \cdot \bar{y}_u, \quad (3.6)$$

где Q_{nm_i} – коэффициент из L – матрицы, $n = 1, m = n + 1$.

Таблица 3.3 – Коэффициенты регрессионного уравнения

№ п/п	Отклики	b_0	b_1	b_2	b_{11}	b_{12}	b_{22}
1	y_1	0.1525	–0.0205	–0.02359	0.0138	–0.08338	–0.0568
2	y_2	5,932	– 0,7692	–1,01368	0,3245	– 2,72325	– 2,39545

С учетом значений коэффициентов регрессионного уравнения (таблица 3.3), уравнения регрессии второй степени для определения потери массы металла, применяемого для изготовления электродов, и изменения сопротивления растеканию тока примут вид 3.7 и 3.8 соответственно.

$$y_1 = 0.1525 - 0.0205X_1 - 0.023591X_5 + 0.0138X_1^2 - 0.083381X_5^2 - 0.0568X_1X_5 \quad (3.7)$$

$$y_2 = 5,932 - 0,76928X_1 - 1,01368X_5 + 0,3245X_1^2 - 2,72325X_5^2 - 2,39545X_1X_5 \quad (3.8)$$

Для определения потери массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ, с помощью полученных нами уравнений (3.7, 3.8), необходимо определить кодированное значение i -го фактора, т. е. значение влажности грунта и величину блуждающих токов.

Переход от физических значений переменных к кодированным осуществляется с помощью уравнения (3.9).

$$X_i = \frac{X_{in} - X_{i0}}{\lambda_i} \cdot 100 \% \quad (3.9)$$

где X_i – кодированное значение i -го фактора;

X_{in} – натуральное (физическое) значение i -го фактора;

X_{i0} – нулевое (центральное) значение i -го фактора;

λ_i – интервал варьирования i -го фактора в физическом значении.

После того, как получено значение уравнения регрессии для определения потери массы электродов и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ, проверяем адекватность уравнений (3.7, 3.8). Для этого выбираем любое значение, полученное в ходе экспериментальных исследований, определяем его же расчетным путем и производим их сравнение.

После отсеивающего эксперимента была проведена серия опытов с оставшимися существенно значимыми факторами с использованием плана на шестиугольнике, особенностью которого является то, что факторы имеют различное количество уровней: для более изученного назначается три уровня, для менее исследованного пять уровней. Это свойство плана определило его выбор, так как при этих условиях удастся получить адекватную математическую модель второго порядка при минимальном количестве опытов.

В таблице 3.4 приводится сравнение этих значений.

Таблица 3.4 – Сравнение экспериментальные данные с расчетными

№ п/п	Экспериментальные данные, %	Расчетные данные, %	Погрешность, %
1	0,1348	0,1451	7,691
2	0,1369	0,1369	14,77
3	0,1378	0,1378	18,13

Для определения погрешности при иных значениях влажности грунта был построен график (полином) и методом наименьших квадратов получены значения коэффициентов первого порядка (рисунок 3.2).

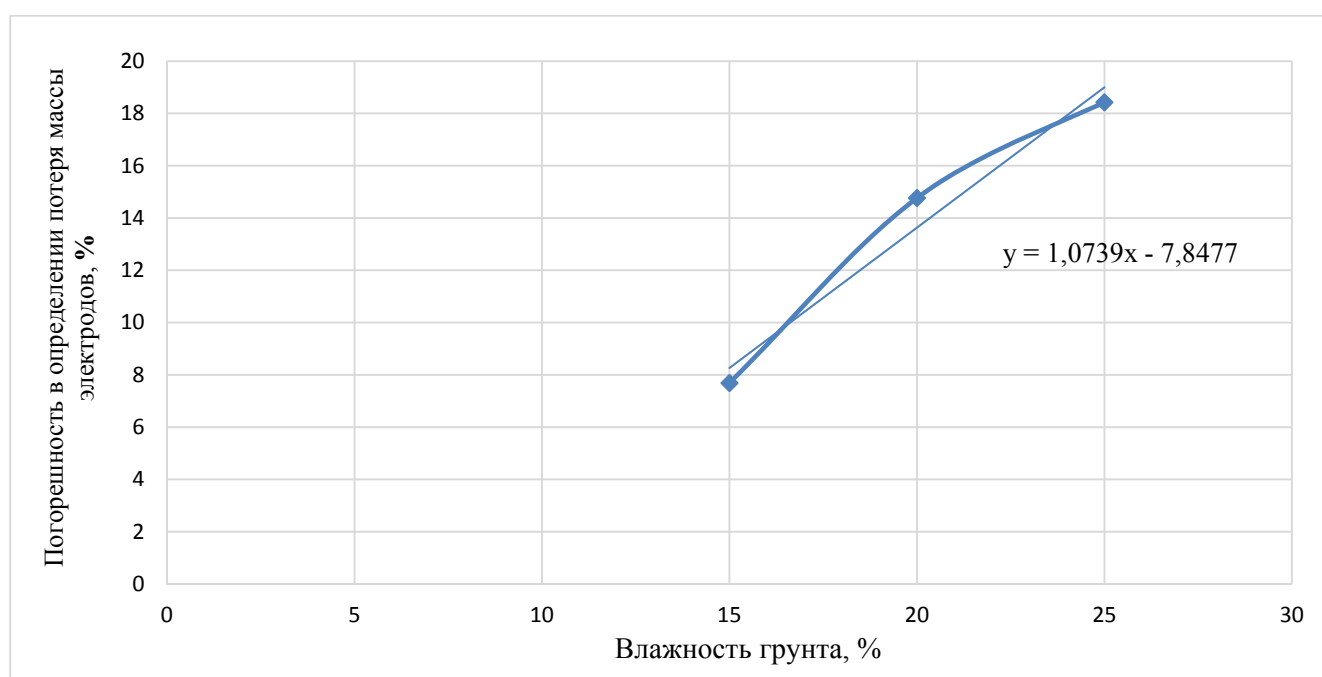


Рисунок 3.2 – Средне значение коэффициентов первого порядка

В таблице 3.5 приведены результаты определения погрешности при расчете сопротивления растеканию тока ЗУ, а на рисунках 3.3 - значения соответствующих коэффициентов.

Таблица 3.5 – Сравнение экспериментальные данные с расчетными

№ п/п	Экспериментальные данные, %	Расчетные данные, %	Погрешность, %
1	4,197	5,023	16,439
2	4,899	4,343	11,34
3	5,895	5,443	7,653

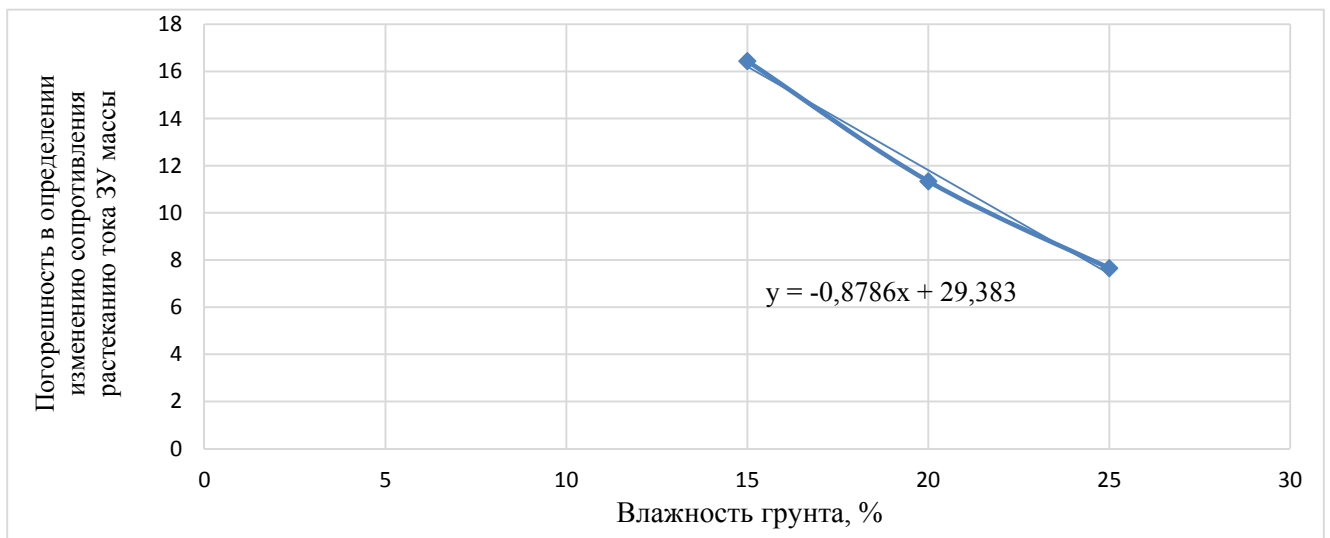


Рисунок 3.3 – Средне значение коэффициентов первого порядка

После проведенных экспериментов по матрице, геометрический образ которой представлен в виде шестиугольника, результаты обработаны при помощи программы Mathcad. Полученные уравнения представляют трехмерную минимаксную поверхность, представленную на рисунках 3.4 – 3.7 [12].

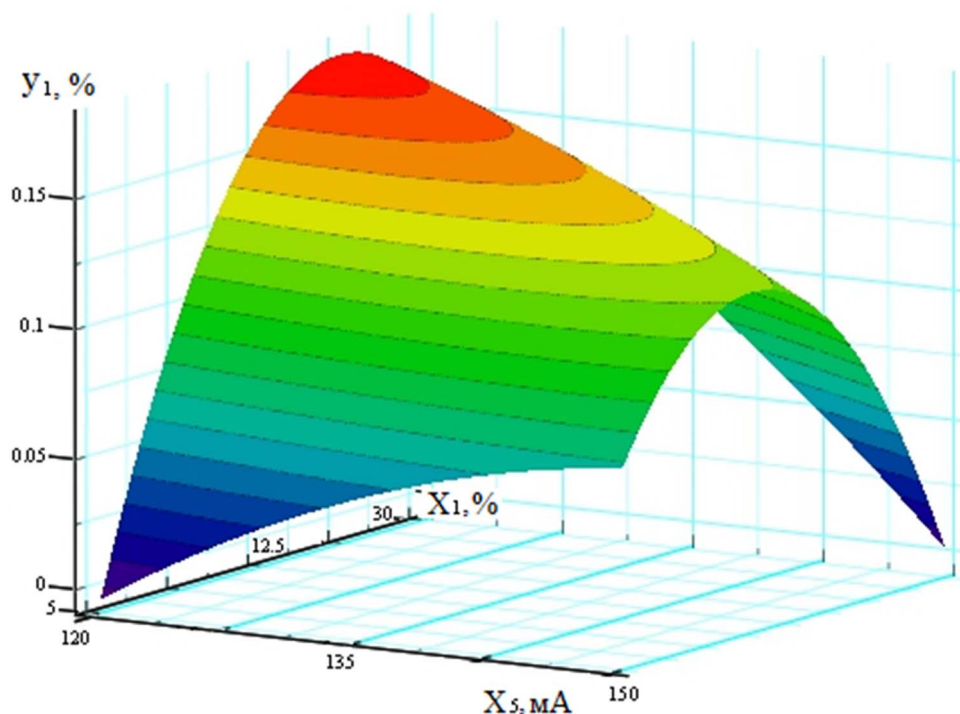


Рисунок 3.4 – Графическая модель потери массы металла, применяемого для ЗУ в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в физическом значении)

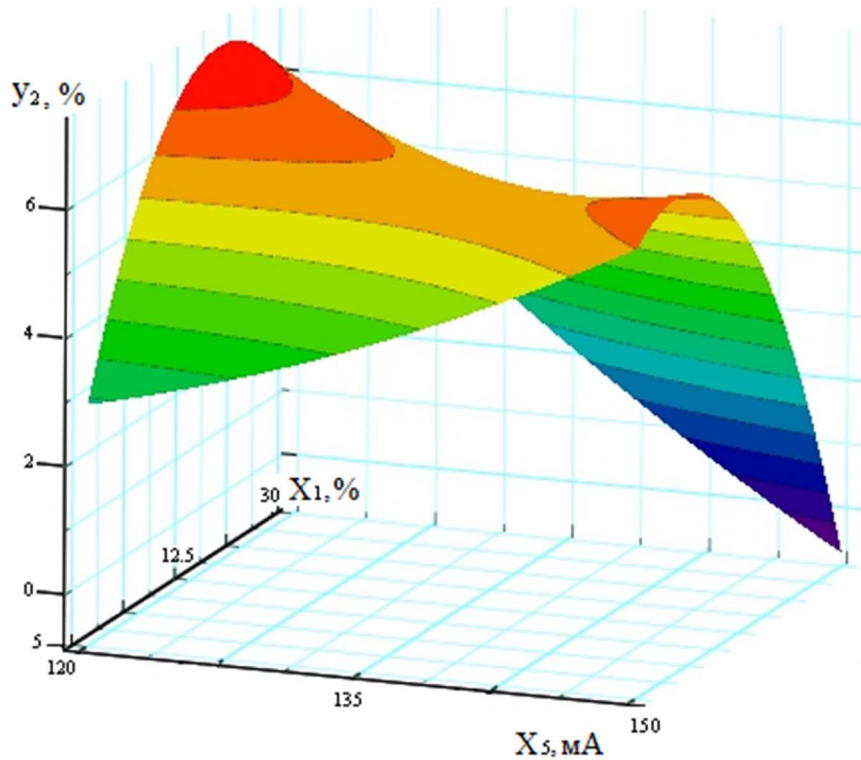


Рисунок 3.5 – Графическая модель изменения сопротивления растеканию тока ЗУ в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в физическом значении)

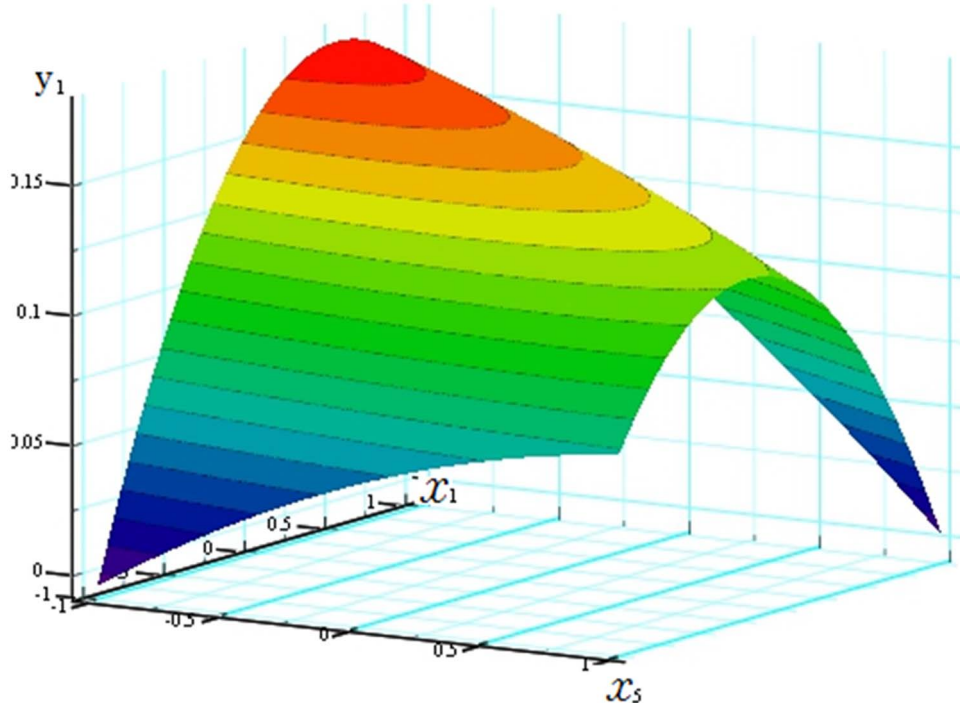


Рисунок 3.6 – Графическая модель потери массы металла, применяемого для ЗУ в зависимости от влажности грунта и блуждающих токов (факторы в кодированном значении)

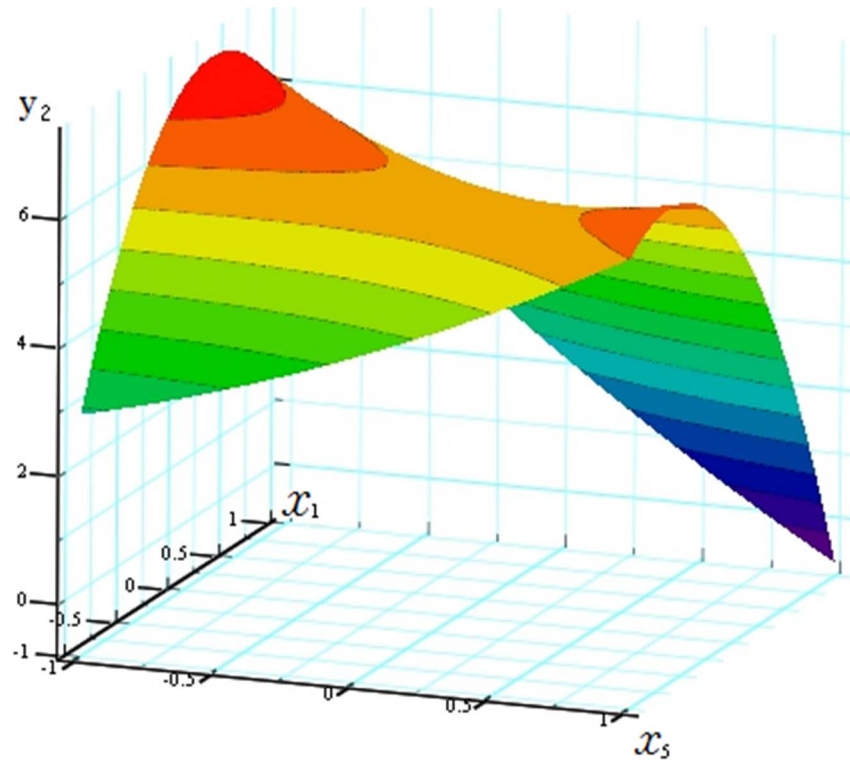


Рисунок 3.7 – Графическая модель изменения сопротивления растеканию тока ЗУ в зависимости от влажности грунта и блуждающих токов (факторы в кодированном значении)

Построенные графические модели (рисунки. 3.4 – 3.7) наглядно показывают, как влияют влажность грунта и значение блуждающих токов на процесс коррозии металла, применяемого для изготовления заземляющего электрода, и сопротивления растеканию тока ЗУ.

Рассмотрим зависимости, изображенные на графической модели (рисунок 3.4) для y_1 . Вершина графической модели определена исходя из заданных нами для проведения эксперимента значений X_1 и X_5 в натуральных величинах (приведены в таблице 3.3). Полученные результаты исследований подтверждают, что наиболее интенсивный процесс коррозии заземляющих электродов происходит в диапазонах 17 – 25 % влажности грунта. При влажности грунта до 5 % коррозия (потеря металла заземляющих электродов) практически не наблюдается, а в 15 – 25 % процесс коррозии ускоряется и в 30 % скорость коррозии снижается.

Зависимости сопротивления растеканию тока ЗУ от влажности грунта и значения блуждающих токов (рисунок 3.5) ведут себя приблизительно, как и процесс коррозии (рисунок 3.4). Влажность грунта на сопротивление растеканию

тока ЗУ влияет неоднозначно, т.е. при увеличении влажности сопротивления грунта уменьшается, но как было показано в [13], появление коррозионной оболочки вокруг заземляющих электродов приводит к увеличению сопротивления растеканию тока ЗУ. За счет этого явления, изменение сопротивления растеканию тока ЗУ происходит также, как и процесс коррозии.

На рисунках 3.5 и 3.6 приводятся результаты экспериментов аналогично рисункам 3.5 и 3.5, только при кодированных значениях исследуемых факторов (X_1 и X_5).

В технических исследованиях перед началом экспериментальной части традиционно составляют перечень факторов, влияющих на поведение исследуемой системы посредством анализа литературных источников или на основе субъективной оценки, что не является строго формализованным. В данной работе использован другой, более формализованный подход к выбору факторов, существенно влияющих на исследуемый процесс – метод отсеивающего эксперимента по матрице Плакетта-Бермана. В результате проведенного отсеивающего эксперимента удалось сократить количество варьируемых факторов с пяти до двух, что позволило существенно уменьшить ресурсы при проведении экспериментальной части работы.

Трехмерную модель необходимо построить для получения общего представления динамики варьируемых факторов на процессы коррозии элементов заземлителя и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ. После анализа этой сложной поверхности (рисунки 3.4 и 3.7) получили качественную характеристику процесса коррозии и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ (рисунки 3.6 и 3.7). Для построения количественной зависимости и проведения оптимизации, трехмерную модель рассекли семейством горизонтальных плоскостей в результате чего получены изокванты (изолинии), приведенные в приложение 1.

3.2 Методика определения состояния элементов ЗУ

Определение состояния элементов ЗУ с помощью математической модели (уравнением регрессии второго порядка) имеет целый ряд преимуществ по сравнению с действующим методикам, приведенными в § 1.2:

- использование уравнений регрессии (содержащими полученные нами коэффициенты) позволяет эффективно снижать количество вскрышных работ над элементами заземлителей;
- снижает количество замеров параметров заземлителя и сбора исходных данных для оценки коррозионности элементов ЗУ, сокращает количество визуальных осмотров;
- снижает трудовые и временные затраты при контроле состоянии элементов ЗУ.

Основными исходными параметрами для определения состояния элементов ЗУ с помощью предлагаемой методики, являются среднегодовое значение влажности грунта в месте нахождения заземляющих электродов, величина блуждающих токов, время нахождения элементов заземлителя в эксплуатации и общая масса заземляющих электродов. В зависимости от исходных параметров определяются потеря массы элементов ЗУ и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ, что характеризует его коррозионное состояние.

Потеря массы элементов ЗУ вызванная коррозией, приводит к снижению сечений вертикальных и горизонтальных электродов, и к росту сопротивления растеканию тока ЗУ. Такие электроды могут не выдержать наиболее вероятные величины возникающих токов короткого замыкания (однофазного) и импульсных токов.

3.2.1 Определение общей массы элементов ЗУ

Общая масса заземляющих электродов в литературных источниках не указывается. Исходя из параметров паспортных данных ЗУ (по количеству, сечению, длине и марке электродов) можно определить полную массу вертикальных и горизонтальных электродов и их время нахождения в эксплуатации.

Основными геометрическими размерами элементов заземлителя, определяющими его массу, являются:

- диаметр, сечение и марка стали из которой изготовлены электроды;
- количество и длина параллельных (вертикальных) электродов;
- общая длина горизонтальных электродов;
- марки стали из которой изготовлены вертикальные и горизонтальные электроды.

Исходя из указанных размеров, общую длину вертикальных электродов определяют по формуле 3.10:

$$L_{\Sigma B} = n \cdot L_B, \quad (3.10)$$

где n - количество вертикальных электродов, L_B -длина одного вертикального электрода.

Длина горизонтальных электродов указывается в паспортных данных ЗУ. Общую массу вертикальных и горизонтальных электродов определяют по формулам 3.11 и 3.12, а общую массу заземлителя – по 3.13.

$$m_B = L_{\Sigma B} \cdot k \quad (3.11)$$

$$m_G = L_G \cdot k \quad (3.12)$$

$$m_{\Sigma} = m_B + m_G \quad (3.13)$$

где L_G -длина горизонтальных электродов; k - удельная масса профиля (стержня) на погонный метр, значение которой в зависимости от марки стали определяется по таблице 3.6 [46].

Таблица 3.6 – Номинальные размеры и удельные массы электродов

Диаметр электродов	Площадь поперечного сечения стержня, см^2	Масса 1 м профиля (к)	
		Теоретическая, кг	Предельные отклонения, %
6	0,283	0,222	+9,0
8	0,503	0,395	-7,0
10	0,785	0,617	+5,0 - 6,0
12	1,131	0,888	
14	1,540	1,210	

окончание таблицы 3.6

16	2,010	1,580	+3,0 - 5,0
18	2,540	2,000	
20	3,140	2,470	
22	3,800	2,980	
25	4,910	3,850	
28	6,160	4,830	
32	8,040	6,310	+3,0 -4,0
36	10,180	7,990	
40	12,570	9,870	
45	15,000	12,480	
50	19,630	15,410	+2,0 4,0
55	23,760	18,650	
60	28,270	22,190	
70	38,480	30,210	
80	50,270	39,460	

Удельную массу вертикальных и горизонтальных электродов ЗУ (значение k) можно также определить по классу арматуры и марке стали, из которой изготовлены заземляющие электроды (таблица 3.7) [46].

Таблица 3.7 – Классы арматуры и марки стали для изготовления электродов

Класс арматурной стали	Диаметр профиля, мм	Марка стали
A-I (A240)	6 – 40	Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп
A-II (A300)	10 – 40 40 – 80	Ст5сп, Ст5пс И8Г2С
Ac-H (Ac300)	10 – 32 (36 – 40)	10ГТ
A-III (A400)	6 – 40 6 – 22	35ГС, 25Г2С 32Г2Рпс
A-IV (A600)	10 – 18 (6 – 8)	80С
A-IV (A600)	10 – 32 (36 – 40)	20ХГ2Ц
A-V (A800)	(6 – 8) 10 – 32 (36 – 40)	23Х2Г2Т
A-VI (A1000)	10 – 22	22Х2Г2АЮ, 22Х2Г21Р, 20Х2Г2Ср

Исходя из класса арматуры и марки стали, применяемой для изготовления заземляющих электродов, по таблице 3.7 определяют диаметр вертикальных и горизонтальных электродов.

5.2.2 Определение влажности грунта в месте нахождения ЗУ

Как было показано выше, влажность грунта является основным параметром, существенно влияющим на процесс коррозии элементов ЗУ, соответственно её значения весьма важно для расчета состояния ЗУ.

Для определения состояния заземлителя необходимо среднее значение влажности грунта в период ввода в эксплуатацию и до проверки состояния ЗУ.

Статистические данные, среднее значение влажности грунта для разной глубины приводятся в [138].

Методика определения влажности грунта приведена в [45]. Определить влажность грунта в месте нахождения ЗУ можно с помощью специальных приборов (влагомеров).

5.2.3 Определение сопротивления растеканию тока ЗУ

Проверка состояния элементов ЗУ согласно действующим методикам проводится путем определения его основных электрических параметров, одним из которых является сопротивление растеканию тока. Сопротивление растеканию тока заземлителей измеряется при подключении токовых и потенциальных электродов к соответствующему прибору. При измерении сопротивления растеканию тока ЗУ, конкретное место погружения токовых и потенциальных электродов прибора не указывается. Задаются расстояние (радиус) от ЗУ до токового и потенциального электродов. Перемещение электродов измерительного прибора при производстве измерения сопротивления растеканию тока ЗУ в разных точках, (нахождения ЗУ), в разное время и в одном радиусе приводит к изменению показаний прибора, т.е. сопротивление в разных точках одного радиуса не остается постоянным. Это связано со свойствами грунта, его влажностью, температурой, химическим составом и т.д.

Полученные нами данные об изменении сопротивления растеканию тока ЗУ находятся в противоречии с результатами других исследователей, например, Манойлова В.З. [84]. В своей монографии [84] Манойлов В.З. указывает, что с течением времени упомянутое сопротивление ЗУ снижается и объясняется это улучшением контакта заземляющих электродов с грунтом.

Мы полагаем, что результаты измерения сопротивления растеканию тока ЗУ, получаемые при очередных испытаниях последнего, не могут служить основанием для приведенного выше вывода о снижении сопротивления ЗУ в силу следующих обстоятельств:

- при проведении измерений сопротивления растеканию тока ЗУ в протоколе указываются сведения о том, кто проводил измерения, информация о применяемом приборе, дате измерения;
- точное местоположение потенциального и токового электродов НЕ УКАЗЫВАЕТСЯ.

Последнее позволяет предполагать, что смещение электродов по дуге (без нарушения расстояний от ЗУ) может влиять на результат измерений.

Учитывая, что сопротивления растеканию тока ЗУ является одним из основных показателей, характеризующих его состояние, ПРЕДЛАГАЕМ фиксировать места погружения измерительных электродов и при всех последующих измерениях погружать эти электроды именно в этих точках.

В этом случае мы не только обеспечим сопоставимость результатов измерения, но и получим истинную информацию о состоянии ЗУ по такому показателю как его сопротивление растеканию тока.

5.2.4 Определение наличия блуждающих токов

Результаты выполненных нами исследований показали, что наличие и величина блуждающих токов существенно влияют на процесс коррозии элементов ЗУ. Под действием блуждающих токов коррозия становится электрохимической и потере массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов, увеличивается.

Наличие блуждающих токов характерно, прежде всего, для тяговых подстанций переменного и постоянного тока.

Применительно к системам электроснабжения промышленных предприятий наличие блуждающих токов будет обуславливается применением различных преобразовательных агрегатов, широким применением в технологических процессах электросварки и т.п.

В городских электрических сетях наличие блуждающих токов вызывает рельсовым транспортом.

В системах электроснабжения сельскохозяйственных потребителей блуждающие токи, как правило, отсутствуют.

Однако на всех подстанциях указанных систем электроснабжения существует вероятность протекания по элементам ЗУ токов нулевой последовательности при возникновении в электрических сетях несимметричных режимов.

Поэтому, мы считаем, что учет наличия и величин блуждающих токов необходим на любых главных понизительных подстанциях.

Этот учет может быть организован следующим образом.

5.3 Методика определение потеря массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов

После определения вышеуказанных параметров для расчета состояния ЗУ, уравнением 3.7, 3.8, определяются потеря массы заземляющих электродов и изменение его сопротивлению растекания тока для десяти суток, так, как полученные нами коэффициентов регрессии рассчитана на 240 часов. Учитывая этого, необходимо определить *«коэффициент времени»* $k_{в}$, для большего количество времени так, как заземляющие электроды в реальные условия (в подстанциях, электроустановках и т.д.) в течение года находятся в землю и попадает под действием более длительного процесса коррозии.

Определяем $k_{в1}$ потеря массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов и $k_{в2}$ изменения сопротивления растеканию тока ЗУ.

$$k_{в1} = \frac{y_1}{n} \%/\text{сут} \quad (3.14)$$

$$k_{B2} = \frac{y^2}{n} \%/\text{сут} \quad (3.15)$$

где $n = 10$ продолжительность эксперимента в сутки.

Для точного расчета потеря массы заземляющих электродов или изменения сопротивлении растекания тока заземлителя, умножаем значение k_B на число, продолжительности эксплуатации ЗУ.

$$\Delta m = k_{B1} \cdot T, \% \quad (3.16)$$

$$\Delta R = k_{B2} \cdot T, \% \quad (3.17)$$

где Δm – потеря массы электродов, ΔR – изменения сопротивления растекания тока ЗУ, T – продолжительность эксплуатации ЗУ.

Для количественного определения потеря массы электродов заземлителя воспользуемся уравнение 3.18.

$$m = \frac{\Delta m \cdot m_{\Sigma}}{100}, \text{ кг} \quad (3.18)$$

Предлагаемая методика позволяет точно определить коррозийность элементов заземлителя и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ находящихся под влиянием различных диапазонах влажности грунта и наличием блуждающих токов. Также можно определить коррозийность элементов заземлителя находящихся в любое продолжительности эксплуатации.

3.4 Выводы

1. Для исследования процесса коррозии элементов ЗУ разработана математическая модель, основанная на двухфакторном плане второго порядка.
2. В первые экспериментальным путем получены зависимости потеря массы и изменение сопротивления растекания тока ЗУ в функции от варьируемых факторов: влажности грунта и наличие блуждающих токов.
3. Расчетным путем получены уравнения для определения общей массы элементов заземлителя, зависимость потеря массы металла, применяемого для заземляющего электрода и изменение сопротивления растекания тока ЗУ от влажности грунта и наличие блуждающих токов.

4. На основании расчетных и экспериментальных данных построены графические модели и номограммы, позволяющие определить коррозионное состояние элементов заземлителя в зависимости от влажности грунта и наличие блуждающих токов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в определении зависимости коррозионного состояния элементов заземлителя от различных факторов грунта и величины блуждающего тока.

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты:

1. На основе теории подобия и моделирования разработана экспериментальная установка, позволяющая исследовать процесс коррозии ЗУ в разных диапазонах факторов, влияющих на ее развитие. Установка защищена патентом на полезную модель.

2. Для исследования процесса коррозии элементов ЗУ разработана математическая модель, основанная на двухфакторном плане второго порядка, с помощью которой установлено, что основными факторами, существенно влияющими на процесс коррозии элементов ЗУ, являются влажность грунта и наличие в нем блуждающих токов.

3. Впервые получены зависимости потери массы металла электродов и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ, обусловленные коррозией. При этом установлено, что наибольшее влияние на коррозию оказывает влажность грунта величиной 17–25 %.

4. Разработаны способ и методика определения состояния элементов ЗУ, основанных на измерении косвенных параметров и не требующих проведения вскрышных работ.

5. Результаты исследования используются в процессе изучения студентами Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и Института энергетики Таджикистана дисциплин «Безопасность жизнедеятельности» и «Электробезопасность».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Абдуллоев, Р.Т.** Моделирование заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев // материалы VI Международной заочной научно-практической конференции «Энергетика в современном мире». Чита: ЗабГУ, 2013. С. 30–33.
2. **Абдуллоев, Р.Т.** Особенности конструктивного выполнения заземляющих устройств тяговых подстанций [Электронный ресурс] / Р.Т. Абдуллоев, А.Б. Тряпицын, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 66-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 551–554.
3. **Абдуллоев, Р.Т.** Стенд для исследования заземляющих устройств [Электронный ресурс] / Р.Т. Абдуллоев, А.Б. Тряпицын // Материалы LIII международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук П.Г. Свечникова. – Челябинск: ЧГАА, 2014. – Ч. IV. – С. 98–103.
4. **Абдуллоев, Р.Т.** Факторы, определяющие состояние заземляющих устройств тяговых подстанций / Р.Т. Абдуллоев, С.А. Тропин, В.М. Галеев // Безопасности жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов III – й Всероссийской конференции (с международным участием) / под. ред. А.И. Сидорова. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 5–7.
5. **Абдуллоев, Р.Т.** Особенности работы заземляющих устройств тяговых подстанций / Р.Т. Абдуллоев, А.А. Вершинина // Безопасности жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов III – й Всероссийской конференции (с международным участием) / под. ред. А.И. Сидорова. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2014. – С. 4–5.
6. **Абдуллоев, Р.Т.** Факторы, влияющие на коррозию заземляющих устройств [Электронный ресурс] / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Материалы LIV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под

ред. докт. техн. наук П.Г. Свечникова. – Челябинск: ЧГАА, 2015. – Ч. IV. – С. 93–96.

7. **Абдуллоев, Р.Т.** Физическое моделирование элементов заземлителей при учете электромагнитных процессов [Электронный ресурс] / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции. Секции технических наук. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – С. 467–473.

8. **Абдуллоев, Р.Т.** Планирование эксперимента по исследованию влияния внешних факторов на техническое состояние заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Электробезопасность. 2015. №2. С. 38–42.

9. **Абдуллоев, Р.Т.** Исследование влияния температуры грунта на электрические параметры заземлителей в лабораторных условиях [Электронный ресурс] / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // материалы XI международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах»: Секции 1. Кемерово: КузГТУ. 2015 – С. 3–6.

10. **Абдуллоев, Р.Т.** Исследование влияния водородного показателя грунта на процесс коррозии заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.И. Солдатов, А.Б. Тряпицын // Электробезопасность. 2015. №4. С. 54–63.

11. **Абдуллоев, Р.Т.** Экспериментальное исследование влияния блуждающих токов на процесс коррозии заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев // Сборник тезисов докладов участников XVII отраслевой научно-технической конференции молодых руководителей и специалистов: Секция «Основное производство» Екатеринбург: 2016. С. 15–16.

12. **Абдуллоев, Р.Т.** Прогнозирование коррозионного состояния заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, Н.И. Горбунов // Электробезопасность. 2016. №2. С. 36–43.

13. **Абдуллоев, Р.Т.** Методика и результаты исследования влияния различных факторов на процесс коррозии заземляющих устройств [Электронный ресурс] / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // Материалы LV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук П.Г. Свечникова. – Челябинск: ЮУрГАУ, 2016. – Ч. IV. 92–97.
14. **Абдуллоев, Р.Т.** Исследование в лабораторных условиях влияния влажности грунта на процесс коррозии заземляющих устройств / Р.Т. Абдуллоев, А.И. Сидоров, А.И. Солдатов // Электробезопасность. 2016. №3. С. 37–43.
15. **Авдеева, К.В.** Аппаратура для определения технического состояния заземляющих устройств / К.В. Авдеева, А.О. Иванова // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность: Материалы II всерос. молодежной науч. – техн. конф. / Омский гос. техн. ун-т. Омск, 2009: Кн.1. С. 140–144.
16. **Авдеева, К.В.** Совершенствование методов и программно-аппаратных средств определения технического состояния заземляющих устройств: дис. канд. техн. наук: 05. 22. 07 / К.В. Авдеева. – Омск: ОмГУПС, 2009.–132 с.
17. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Макаров, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976.–279 с.
18. **Андреев, И.Н.** Введение в коррозиологию: учебное пособие / И.Н. Андреев. – Казань: Изд-во КГТУ, 2004.–140 с.
19. **Анненков, В.З.** Прогноз коррозии заземляющих устройств тяговых подстанций / В.З. Анненков // Новые технологии – железнодорожному транспорту: подготовка специалистов, организация перевозочного процесса, эксплуатация технических средств: Сб. науч. статей с международным участием в четырех частях. Часть 3 // Омский гос. университет путей сообщения. – Омск, 2004.–403 с.

20. Бабков, В.Ф. Основы грунтоведения и механики грунтов: учебное пособие / В.Ф. Бабков, В.М. Безруков. – М.: Высшая школа, 1986.–239 с.
21. Баженов, В.И. Основы планирования и моделирования в теории инженерного эксперимента: учебное пособие / В.И. Баженов, А.Н. Стрельченко. – М.: МАИ, 1983.–59 с.
22. Бей, Ю.М. Тяговые подстанции: учебник для вузов / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1986.–319 с.
23. Борисов, Р.К. Диагностики заземляющих устройств электрических станций / Р. К. Борисов, Ю.В. Жарков // Третья российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов. Сибирская энергетическая академия. Новосибирск, 2008. С. 131–136.
24. Борисов, Р.К. Заземлители подстанций высокого напряжения: современные проблемы и способы их решения / Р.К. Борисов, В.В. Балашов, Ю.В. Жарков, А.В. Горшков, Е.С. Колечицкий // Электричество. 2001. №7. С. 30–36.
25. Борисов, Р.К. Методика и технические средства для диагностики состояния заземляющих устройств энергообъектов / Р.К. Борисов, Е.С. Колечицкий, А.В. Горшков, В.В. Балашов // Электричество. 1996. №7. С. 65–67.
26. Бродский, В.З. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справочное издание / В.З. Бродский, Л.И. Бродский, Т.И. Голикова, Е.П. Никитина, Л.А. Панченко. – М.: Металлургия, 1982.–750 с.
27. Бургсдорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987.–400 с.
28. Бухаров, А.И. Основы безопасной эксплуатации электроустановок / А.И. Бухаров, В.В. Петунин. – М.: Военное издательство, 1989.–272 с.
29. Вайнштейн, А.Л. Коррозионные повреждения опор контактной сети / А.Л. Вайнштейн, А.В. Павлов. – М.: Транспорт, 1988.–111 с.

30. Вашурин, А.А. Справочник электромеханика тяговой подстанции / А.А. Вашурин, В.Б. Лапин, М.Б. Прусаков. – М.: Транспорт, 1964.–424 с.
31. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебное пособие / В.А. Веников, Г.В. Веников. – 3-е изде., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1984.–439 с.
32. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики): учебное пособие / В.А. Веников. – М.: Высшая школа. 1976.–479 с.
33. Веников, В.И. Физическое моделирование электрических систем / В.И. Веников, А.В. Иванов – Смоленский. – М.: Государственное энергетическое издательство. 1956.–359 с.
34. Владимиров, Ю.Ф. Расчет несимметричных режимов и учет параметров заземляющей системы в электроустановках до 1000 В / Владимиров Ю.Ф. // Электричество. 2007. №1. С. 18–22.
35. Гаррис, Н.А. Влияние химического состава грунта на коррозионные и стресс-коррозионные процессы / Н.А. Гаррис, Г.Р. Аскарров // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта. Мат. V межд. науч.-техн. конф. – Новополюцк: УО «ПГУ», 2006. – С.101–105.
36. Голенко, Д.И. Статическое моделирование в технико-экономических системах / Д.И. Голенко, С.Е. Лившиц, С.Ш. Кеселер. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977.–264 с.
37. Голикова, Т.И. Каталог планов второго порядка / Т.И. Голикова, Л.А. Панченко, М.З. Фридман. – М.: МГУ. Ч. 1. Вып. 47.1974.–387 с.
38. Гомберг, А.Е. Измеритель заземления / А.Е. Гомберг. – М.: Госэнергоиздат, 1961.–40 с.
39. Горский, В.Г. Планирование промышленных экспериментов / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер. – М.: Металлургия, 1974.–264 с.
40. Горшков, А.В. Оценка сопротивления заземлителя подстанции в многослойном грунте / Горшков А.В. // Электричество. 2014. №2. С. 25–31.

41. ГОСТ 12.1.038-82 Система стандартов безопасности труда. – Введ. 30.06.1983. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1983.–7 с.
42. ГОСТ 26423-85 Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, рН и плотного остатка водной вытяжки. – Введ. 08.02.1985. М.: ИПК Изд-во стандартов. 1985.–4 с.
43. ГОСТ 26425-85 Почвы. Методы определения иона хлорида в водной вытяжке. – Введ. 01.01.1986. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1985.–9 с.
44. ГОСТ 26426-85 Почвы. Методы определения иона сульфата в водной вытяжке. – Введ. 01.01.1986. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1985.–7 с.
45. ГОСТ 5180-84 Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. – Введ. 24.10.1984. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1985.–17 с.
46. ГОСТ 5781-82 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Введ. 1983 – 07 – 01. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1985.–17 с.
47. ГОСТ 9.602-89 Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – Введ. 01.07.1995. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1995.–10 с.
48. ГОСТ 9.907-83 Единая система защиты от коррозии и старения. Металлы, сплавы, покрытия металлические. Методы удаления продуктов коррозии после коррозионных испытаний. – Введ. 20.12.1983. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1985.–6 с.
49. ГОСТ 6507-90 Микрометры. – Введ. 01.01.1991. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1990.–10 с.
50. ГОСТ 9.908-85 Методы определения показателей коррозии и коррозионной стойкости. – Введ. 01.01.1987. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 1985.–17 с.
51. Демин, Ю.В. Обеспечение долговечности электросетевых материалов и конструкций в агрессивных средах: Кн. 1. Теоретические основы / Ю.В. Демин, Р.Ю. Демина, В.П. Горелов. – Новосибирск: НГАВТ, 1988.–209 с.

52. Джонсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион. Пер. с англ. – М.: Мир, 1980.–620 с.
53. Димо, П. Модели РЕИ и параметры режима. Объединенные энергосистемы пер. с рум. / П. Димо. – М.: Энергоатомиздат, 1987.–392. с.
54. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учебное пособие для вузов. – 2 – е изд., перераб. и доп. / П.А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984.–448 с.
55. Долин, П.А. Электробезопасность. Теория и практика: учебное пособие для вузов 3-е изд., перераб. и доп / П.А. Долин, В.Т. Медведев, В.В. Корочков, А.Ф. Монахов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012.–280 с.
56. Дулицкий, Г.А. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В / Г.А. Дулицкий, А.П. Комаревцев. – М.: Воениздат, 1988.–128 с.
57. Измеритель сопротивления заземления ИС-10 / Руководство по эксплуатации. – Ижевск: ЗАО «НПФ «Радио – Сервис», 2006.–24 с.
58. Инструкция по заземлению устройств электроснабжения на электрифицированных железных дорогах / ЦЭ-191 от 10. 06. 93. – М.: МПС. 1993.–68 с.
59. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций / СО 153-34.21.122-2003. – М.: МЭРФ. 2004.–75 с.
60. Исабекова, Б.Б. Определение температуры и влажности грунта для расчета сопротивлений заземлителей: дис. ... канд. техн. наук: 05. 14. 02 / Б.Б. Исабекова. – Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, ОмГТУ, 2011.–109 с.
61. Калиновский, Б.Т. Приведения физических моделей неоднородных систем к эквивалентно-однородным / Б.Т. Калиновский // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: сборник докладов, под ред. Ю.В. Целебровского – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. С. 71–77.

62. Карамышева, Ф.Н. Методические рекомендации по планированию эксперимента в технологии стройматериалов. План II порядка на «кубе» размерность 2 и 3 / Ф.Н. Карамышева, А.Н. Жучкова. – Челябинск: Изд-во УралНИИИстромпроект, 1989.–41 с.
63. Карвовский, Г.А. Электрооборудование и окружающая среда: Выбор и защита / Г.А. Карвовский. – М.: Энергоатомиздат, 1984.–232 с.
64. Карякин, Р.Н. Заземляющие устройства промышленных электроустановок: справочник электромонтажника / Р.Н. Карякин, В.И. Солнцев, под ред. А.Д. Смирнова и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989.–191 с.
65. Карякин, Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник второе изд. / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис 2006.–518 с.
66. Карякин, Р.Н. Нормы устройства сетей заземлений / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2002.–234 с.
67. Катигроб, Н.П. Влияние коррозии простого заземлителя на его сопротивление растеканию / Н.П. Катигроб, Н.Н. Вертий // Электрические станции. 1994, №2. С. 36–40.
68. Князевский, Б.А. Охрана труда в электроустановках: учебник для вузов 3-е изд., перераб. и доп. / Б.А. Князевский. – М.: Энергоатомиздат, 1983.–336 с.
69. Королькова, В.И. Электробезопасность на промышленных предприятиях: учебник / Королькова, В.И. – М., «Машиностроение», 1970.–522 с.
70. Косарев, А.Б. Моделирование электрических характеристик заземлителей электроустановок транспортных тоннелей / А.Б. Косарев, А.В. Котельников, Б.И. Косарев, А.А. Недовиченко // Вестник ВНИИЖТ, 2003, №5.
71. Косарев, Б.И. Электробезопасность в тяговых сетях переменного тока / Б.И. Косарев. – М.: Транспорт, 1989.–216 с.
72. Коструба, С.И. Измерение Электрических параметров земли и заземляющих устройств / С.И. Коструба. – М.: Энергоатомиздат, 1987.–400 с.

73. Коструба, С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств: учебное пособие / С.И. Коструба. – М.: Энергия, 1979.–320 с.
74. Коструба, С.И. К расчету заземлителей электроустановок с эффективно – заземленной нейтралью / С.И. Коструба // Электрические станции. 2004. №6. С. 55–60.
75. Котельников, А.В. Определение технического состояния заземляющих устройств тяговых подстанций / А.В. Котельников, В.А. Кандаев, Н.Ю. Свешникова, К.В. Авдеева // Инновационные проекты и новые технологии на железном транспорте: Сб. науч. ст. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2007. С. 109–117.
76. Котельников, А.В. Рельсовые цепи в условиях влияния заземляющих устройств / А.В. Котельников, А.В. Наумов, Л.П. Слободянюк. – М.: Транспорт, 1980.–207 с.
77. Крикун, И.В. Испытания заземляющих и зануляющих устройств электроустановок / И.В. Крикун. – М.: Энергия, 1973.–81 с.
78. Крупин, А.Е. Отсеивание факторов при планировании эксперимента / А.Е. Крупин, Д.В. Зуйков // Вестник НГИЭИ. Серия «Экономика и экономические науки». – 2014. – Вып. № 4 (35). – С. 62–70.
79. Львовский, Е.Н. Статические методы построения эмпирических формул: учебное пособие вузов / Е.Н. Львовский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988.–298 с.
80. Малогабаритный переносной микроомметр ИКС-5 / Руководство по эксплуатации. – Челябинск: ООО «Челэнергоприбор», 2012.–19 с.
81. Мальцева, Г. Н. Коррозия и защита оборудования от коррозии: учебное пособие / Г. Н. Мальцева. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2000.–210 с.
82. Мандельшман, С.М. Имитационное моделирование в задачах анализа и синтеза многоблочных средств измерений / С.М. Мандельшман, Г.Н. Хуснутдинов // Приборы и системы упр. 1977. №3. С. 5–8.

83. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов. – М.: Энергия, 1971.–320 с.
84. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности / В.Е. Манойлов.– 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд – ние, 1991.–480 с.
85. Маркова, Е.В. Комбинаторные планы в задачах многофакторного эксперимента / Е.В. Маркова, А.Н. Лисенков. – М.: Наука, 1976.– 345 с.
86. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок / РД-153-34.0-20.525-00. – М: СПО ОРГРЭС, 2000.–64 с.
87. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок / СТО 56947007 - 29.130.15.105-2011. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС» 2011.–75 с.
88. Методические указания по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. – М: НГТУ, МЭИ ТУ, НПФ ЭЛНАП и АО «Фирма ОРГРЭС», 2000.–54 с.
89. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости. М.: ОАО «ФСК ЕЭС» 2010.–147. с.
90. Микрометры электронные цифровые МКЦ / Каталог. – Минск: ОДО «Атласинвест», 2016.– 3 с.
91. Налимов, В.В. Логические основания планирования эксперимента / В.В. Налимов, Т.И. Голикова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1981.–151 с.
92. Налимов, В.В. Статические методы планирования экспериментальных экспериментов / В.В. Налимов, Н.А. Чернова. – М.: Наука, 1965.–365 с.
93. Нейфельд, М.Р. Заземления и защитные меры безопасности / М.Р. Нейфельд. – М.: Энергия, 1965.–228 с.
94. Нейфельд, М.Р. Что такое заземление и защитные меры безопасности / М.Р. Нейфельд, изд. второе, перераб. и дополн., М – Л.: издательство «Энергия», 1966.–72 с.

95. Нейфельд, М.Р. Что такое защитное заземление и как его устраивать / М.Р. Нейфельд. – М.: Госэнергоиздат, 1959.–42 с.
96. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанции и подстанций: Учебник для вузов / Б.Н. Неклепаев. – М.: Энергоатомиздат, 1986.–640 с.
97. Нерпин, С.В. Физика почвы / С.В. Нерпин, А.Ф. Чудновский. – М.: Издательство «Наука» Главная редакция физико – математической литературы, 1967.–584 с.
98. Нестеров, С.В. Математическая модель заземляющего устройства / С.В. Нестеров // Первая Российская конференция по заземляющим устройствам: Сборник докладов // Под ред. Ю.В. Целебровского – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2002. С. 45–58.
99. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я. Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980.–304 с.
100. Объем и нормы испытаний электрооборудования / РД 34.45-51.300-97. – М.: «Издательство НЦ ЭНАС» 2004.–64 с.
101. Оллендорф, Ф. Токи в земле / Ф. Оллендорф. – М.: 1932.– 214 с.
102. Орлов, Д.С. Химия почв: учебник / Д.С. Орлов. – М.: Изд – во Московский университет, 1985.–376 с.
103. Ослон, А.Б. Модель заземлителя электроустановки в неоднородном грунте / А.Б. Ослон, Коструба С.И. // Электричество. 2005. №1. С. 15–18.
104. Почвоведение. Учеб. для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г.Д. Белинца, В.Д. Васильевская, Л.А. Гришина – М.: Высш. шк., 1988.–400 с.
105. Правила технически безопасности при эксплуатации электроустановок. – М.: Энергия, 1981.–160 с.
106. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации / Минэнерго России. – М.: СПО ОРГРЭС, 2003.–320 с.
107. Правила устройств электроустановок: ПУЭ -7 (по состоянию на 1 мая 2005 года). – Новосибирск: Сибирское издательство, 2005.–511 с.

108. Раевский, Н.В. Разработка модели оперативного расчета минимального межпоездного интервала в условиях эксплуатации системы тягового электроснабжения / Н.Г. Раевский, А.М. Сапожникова // Электробезопасность. 2007. №2 С. 42–48.
109. Рябков, Е.Я. Заземления в электроустановках высокого напряжения / Е.Я. Рябков. – М.: Энергия, 1978.–224 с.
110. Самофалова, И.А. Химический состав почв и почвообразующих пород: учебное пособие / И.А. Самофалова. – Пермь: Изд-во ФГОУ ВПО «Пермская ГСХА», 2009.–132 с.
111. Свешникова, Н.Ю. Определение коррозионного состояния элементов заземляющего устройства / Н.Ю. Свешникова, К.В. Авдеева // Электроснабжение железных дорог: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, 2007. С. 66–71.
112. Селиванов, А.Г. Разработка заземляющих устройств электрических подстанций 110 кВ комплектного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05 14. 02 / А.Г. Селиванов. – Новосибирск: НГАСУ, 2001.–149 с.
113. Сидоров, А.И. О проблеме непрерывного контроля состояния заземляющего устройства / А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын // ЮУрГУ: материалы 65-й научной конференции. Секции технических наук: в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – Т. 1. С. 241–244.
114. Сидоров, А.И. Обзор компьютерных моделей для анализа состояния заземляющих устройств / А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын, **Р.Т. Абдуллоев** // Безопасности жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов VI-й научно практической конференции: в 2 т. / под. ред. А.И. Сидорова – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Т.1. С. 243–245.
115. Сидоров, А.И. Технические средства для определения состояния заземляющих устройств / А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын, **Р.Т. Абдуллоев** // Безопасности жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов VI-й научно практической конференции: в 2 т. / под. ред. А.И. Сидорова – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Т.1. С. 245–249.

116. Сидоров, А.И. Разработка плана отсеивающего эксперимента по исследованию влияния различных факторов на процесс коррозии заземляющих устройств / А.И. Сидоров, **Р.Т. Абдуллоев** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика».–2016.–Т. 16, № 2.–С. 52–58. DOI: 10.14529/power160207
117. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: учебное пособие / А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001.– 344 с.
118. Сидоров, А.И. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения: монография / А.И. Сидоров, В.И. Петуров, А.В. Пичуев, И.Ф. Суворов. – Чита, ЧитГУ, 2009.–268 с.
119. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: учебное пособие / А.И. Сидоров, И.С. Окраинская, Н.В. Глотова. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2015.– 223 с.
120. Скурихин, В.И. Математическое моделирование / В.И. Скурихин, В.Б. Шифрин, В.В. Дубровский. – К.: Техніка, 1983.–270 с.
121. Снапелев Ю.М. Моделирование и управление в сложных системах / Ю.М. Снапелев, В.А. Старосельский. – М.: Сов. Радио, 1974.–264 с.
122. Солдатов, А.И. Экспериментальное исследование влияния химических минералов грунта на процесс коррозии заземляющих устройств / А.И. Солдатов, **Р.Т. Абдуллоев** // Электробезопасность. 2016. №2. С. 44–50.
123. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981.– 184 с.
124. Стариков, Е.Ю. Исследование коррозионной активности почв и грунта / Е.А. Стариков // Вестник КузГТУ 2007. №2. С. 52–55.
125. Сумин, А.Р. Обеспечение электробезопасности на тяговых подстанциях переменного тока / А.Р. Сумин. – М.: Транспорт, 1975–61 с.
126. Тетельбаум, И.М. Электрическое моделирование / И.М. Тетельбаум. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы. 1959.– 319 с.

127. Трофимов, В.Т. Грунтоведение / В.Т. Трофимов, В.А. Королев, Е.А. Вознесенский, Г.А. Голодковская, Ю.К. Васильчук, Р.С. Зиангиров // Под ред. В.Т. Трофимова. – 6-е изд., переработ. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 1024 с.
128. Усова, С.В. Электрическая часть электростанций: Учебник для вузов / С.В. Усова. – М.: Энергия, 1977. – 556 с.
129. Установка для исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии заземляющих устройств (полезная модель): пат. № 161812 Рос. Федерация: МПК G01R 19/45 (2006.01) / **Р.Т. Абдуллоев**, А.И. Сидоров, А.Б. Тряпицын. – № 2015145568/28; заявл. 22. 10. 2015; опубл. 28. 03. 2016, Бюл. № 13-2016. – 2 с.
130. Хабаров, А.В. Почвоведение: учебное пособие / А.В. Хабаров, А.А. Яскин, В.А. Хабаров. – М.: КолоС, 2007. – 311 с.
131. Хартман, К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман Г.А. Фомина, Н.С. Лецкого. пер. с нем., под ред. Э.К. Лецкого. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
132. Целебровский, Ю.Б. Измерение сопротивлений заземления опор ВЛ / Ю.Б. Целебровский, М.Ш. Микитинский, – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 48 с.
133. Чекулаев, В.Е. Охрана труда и электробезопасность: учебник / В.Е.Чекулаев, Е.Н. Горожникина, В.В. Лепеха. – М.: ФГБОУ «Учебно – методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2012. – 304 с.
134. Чикаров, Ю.А. Математическая модель сложного заземляющего устройства / Ю.А. Чикаров, М.П. Бахирева // Научно – техническое и экономическое сотрудничество стран: Труды четвертой международной конференции творческой молодежи Т.1. – Хабаровск: Изд – во ДВГУПС, 2005.
135. Чикаров, Ю.А. Разработка метода и технических средств контроля состояния элементов заземляющих устройств: дис. ... канд. техн. наук: 05. 02. 07 / Ю.А. Чикаров. – Хабаровск: ДВГУПС, 2005. – 140 с.
136. Шеннон, Р. Имитационные моделирование систем-искусство и наука / Р. Шеннон. Пер. с англ. – М.: Мир, 1978. – 418 с.

137. Шепелев, И.Г. Математические методы и модели управления в строительстве / И.Г. Шепелев. – М.: Высшая школа, 1980.–213 с.
138. Ширнин, Ю.А. Состояние грунтов для одежд лесовозных дорог республики Мари Эл (РМЭ) / Ю.А. Ширнин, В.М. Вайнштейн // Лесной Вестник, 2001. №2. С. 123–127.
139. Щуцкий, В.И. Безопасность при эксплуатации электрических систем: учебное пособие / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд. – во ЮУрГУ, 2001.–282 с.
140. Эбин, Л.Е. Применение метода наведенных потенциалов при расчете сложных заземлителей в неоднородных грунтах / Л.Е. Эбин, А.И. Якобс // Электричество. 1964. №9. С. 1–6.
141. Якобс, А.И. Метода расчета сложных заземлителей в многослойной земле / А.И. Якобс // Электричество. 1981. №5. С. 27–32.
142. Якобс, А.И. Приведение многослойной электрической структуры земли к эквивалентной двухслойной при расчете сложных заземлителей / А.И. Якобс // Электричество. 1970. №8. С. 19–23.
143. Bertling T, Dischnez J., Helm G., Paul H.V. Corrosion behavior of earthing material. Доклад 36-02 на сессии СИГРЭ, 1984. 1–10 с.
144. Fitzgerald, J.H. Corrosion Problems in URD Sistems. - Elektrikal South, 1969, № 49, № 7. - p. 58-61, 91–92.
145. Raj an S., Wenugopalan S.I. Corrosion and grounding systems. - IEEE Cem. Ind. Techn. Conf, Montreal, 1975, New York, N.Y. 1975. - p. 1–14.
146. Thapar B. Conductor for grounding high voltage stations.- Power End. 1965, 15, №4.-p. 185–190.
147. Wolkowinski K. Trwalose Uziomon urzadzen Elektroenergetycznych zeszyty Naukowe politechniki Wroclawsiej, 1964, № 83. - p. 11–35.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЯ А Построение графической модели с помощью Mathcad

Построение графической модели, изоквантов, изолинии изоквантов и номограмм для процесса коррозии и сопротивления растеканию тока ЗУ с помощью Mathcad.

Для построение графической зависимости процесса коррозии и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ от влажности грунта и наличия блуждающих токов необходимо знание этих двух факторов и время нахождения заземлителя в эксплуатации. Исходя из этих параметров с помощью Mathcad построим графические зависимости.

Запускаем программу Mathcad 14 (рисунок А.1) в разделе «Mathcad Tips», вставим галочку в «Show tips on startup» и откроем программу, нажатием на «Close».

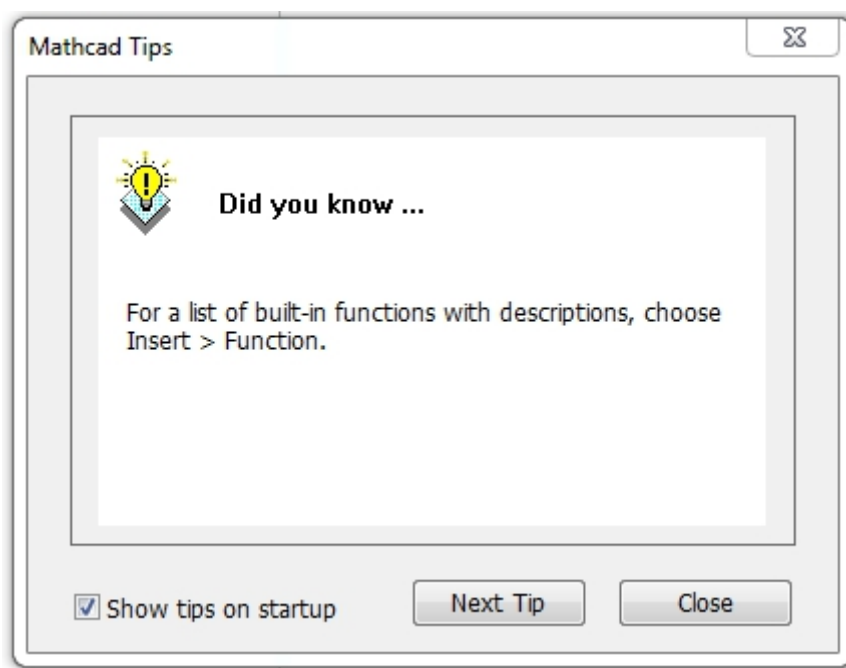


Рисунок А.1 – Главный интерфейс программы MathCAD 14

Откроются главное окно программы с элементами интерфейса Mathcad (рисунок А.1).

Для построения графической зависимости потерь массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов и сопротивлению

растекания тока ЗУ необходимо готовит алгоритм на основе уравнение регрессии второго порядка для Mathcad.

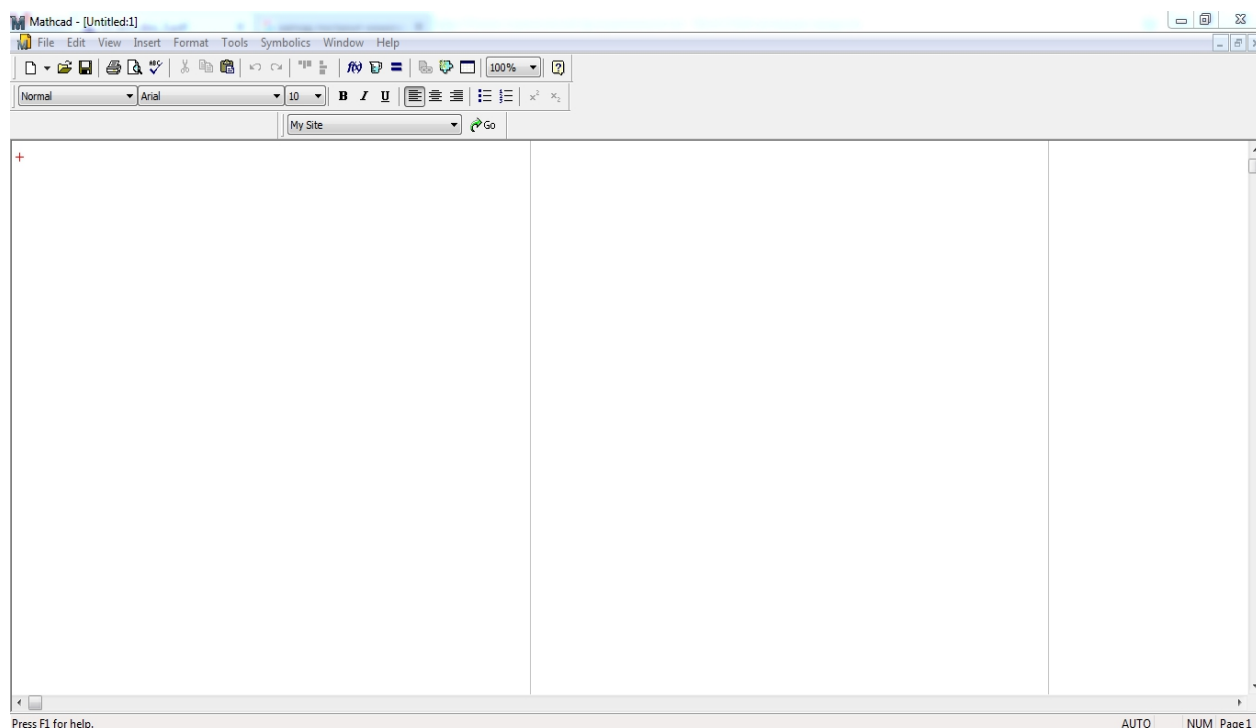


Рисунок А.2 – Главный интерфейс программы MathCAD 14

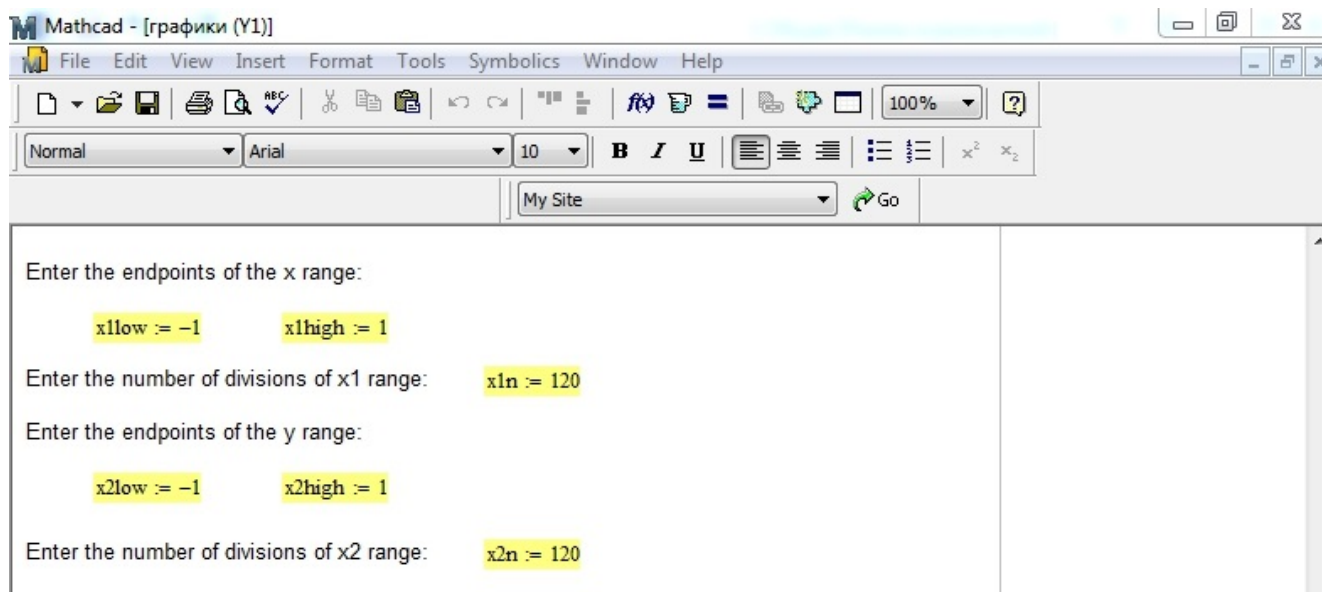
Построим алгоритм для графиков. Для этого вставим курсор в левом поле интерфейса и вводим данного текста «This QuickSheet can be used to produce level curves of a function of two variables using a Mathcad contour plot».

На второй нижней строке, добавляем текст, «Enter a function f of two variables:». После этого алгоритм зависимости потеря массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов (А.1) и изменению сопротивления растеканию тока ЗУ (А.2), в зависимости от влажности грунта и значением блуждающих токов (x_1 и x_2). Алгоритм в Mathcad примут вид:

$$y_1(x_1, x_2) := 0.1525 - 0.020599 \cdot x_1 + 0.0235914 \cdot x_2 - 0.01385 x_1^2 - 0.0833815 x_2^2 - 0.05681 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{A.1})$$

$$y_2(x_1, x_2) := 5.932 - 0.076928 \cdot x_1 - 1.01368 \cdot x_2 + 0.03245 x_1^2 - 2.723255 x_2^2 - 2.39545 \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (\text{A.2})$$

Задаем диапазона изменения двух результатов (y_1 и y_2) добавлением «Enter the endpoints of the x range:» (рисунок А.3).

Рисунок А.3 – Диапазон изменения y_1 и y_2 в MathCAD

Для построения графических моделей, необходимо добавит следующего текста в программе Mathcad «Use **CreateMesh** to build a grid of values:» и наименовать каждого рисунка (для y_1 и y_2) следующим образом:

$$F1 := \text{CreateMesh}(y1, x1low, x1high, x2low, x2high, x1n, x2n) \quad (\text{A.3})$$

$$F2 := \text{CreateMesh}(y2, x1low, x1high, x2low, x2high, x1n, x2n) \quad (\text{A.4})$$

View the function in a contour plot:

После того, в нижнем поле интерфейса появляется две рисунки F1 и F2 (Рисунок А.4).

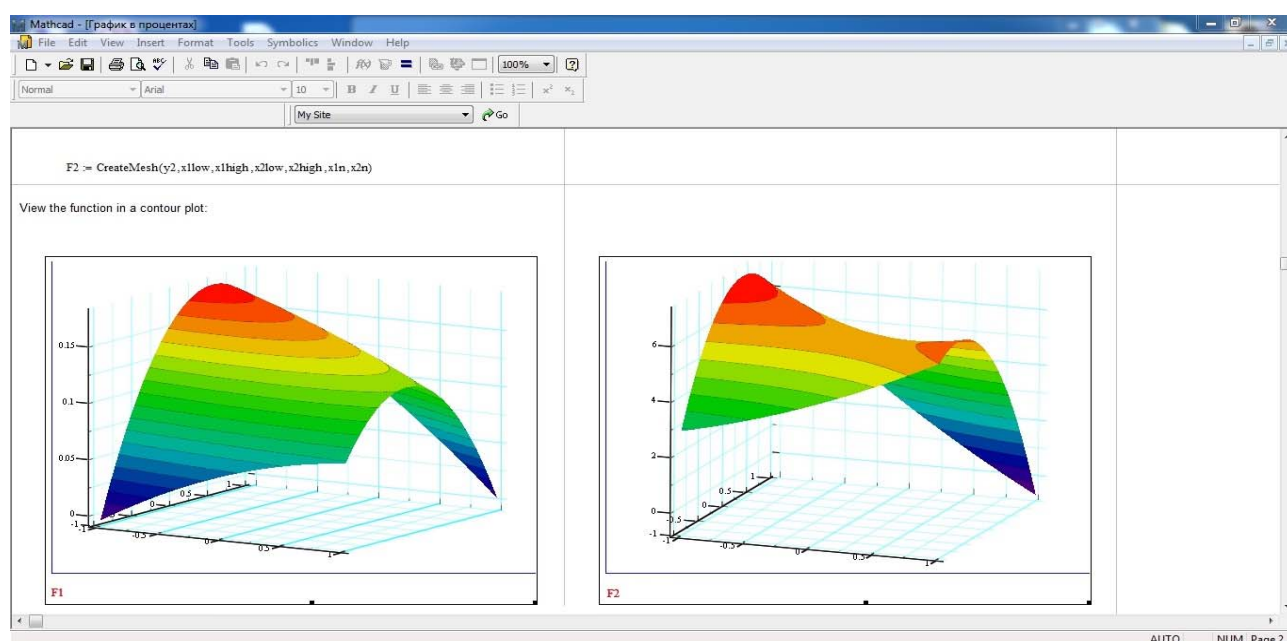


Рисунок А.4 – Построение трехмерных графиков в MathCAD

С помощью, приведенной выше алгоритмов (А.3, А.4) в MathCAD, можно построить трехмерная зависимость (рисунок А.4), изоквантов, изолинии изоквантов и номограммы для определения потерь массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов и изменению сопротивления растеканию тока ЗУ.

Изокванты, изолинии изоквантов и номограммы аналогично построится, как и трехмерная модель одним алгоритмом и для построения этих графиков откроем окно Insert, Graph и выбираем команду Surface Plot (Рисунок А.5). Затем в нижнем поле интерфейса появляется общий вид номограммы (рисунок А.5).

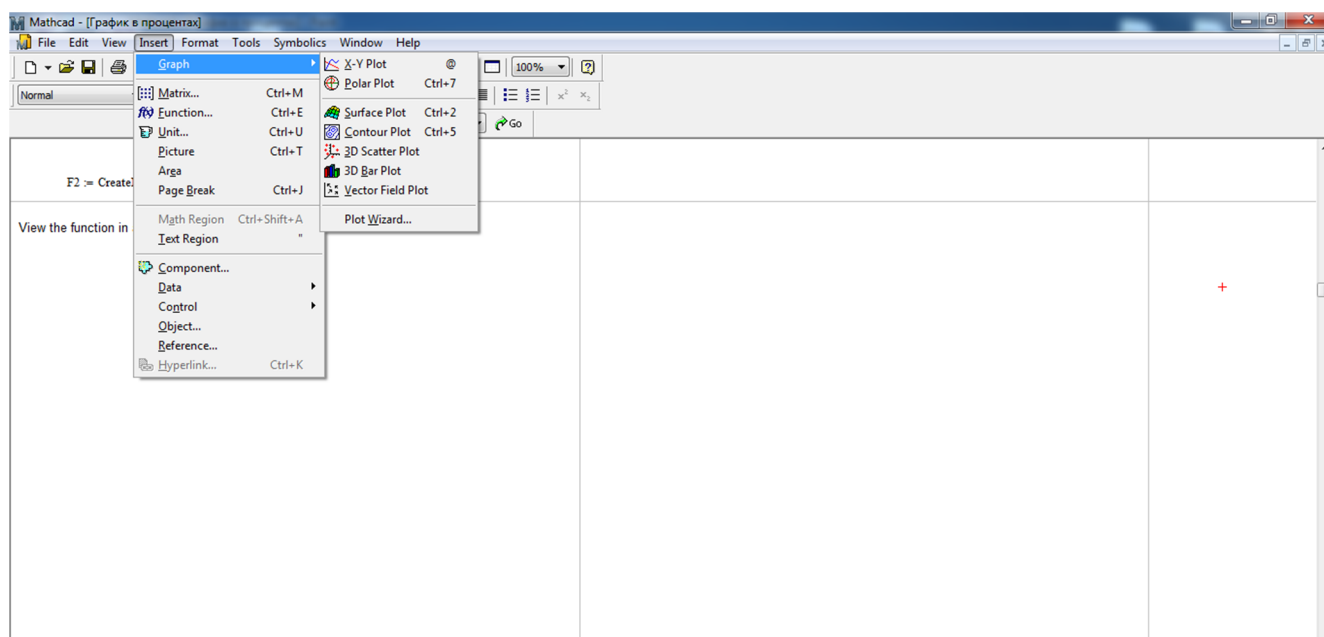


Рисунок А.5 – Построение изоквантов и номограмм в MathCAD

Построенные нами изоквантов и номограммы для определения потерь массы, металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов и изменению сопротивления растеканию тока ЗУ, приводятся ниже (в рисунках А.6 – А.36).

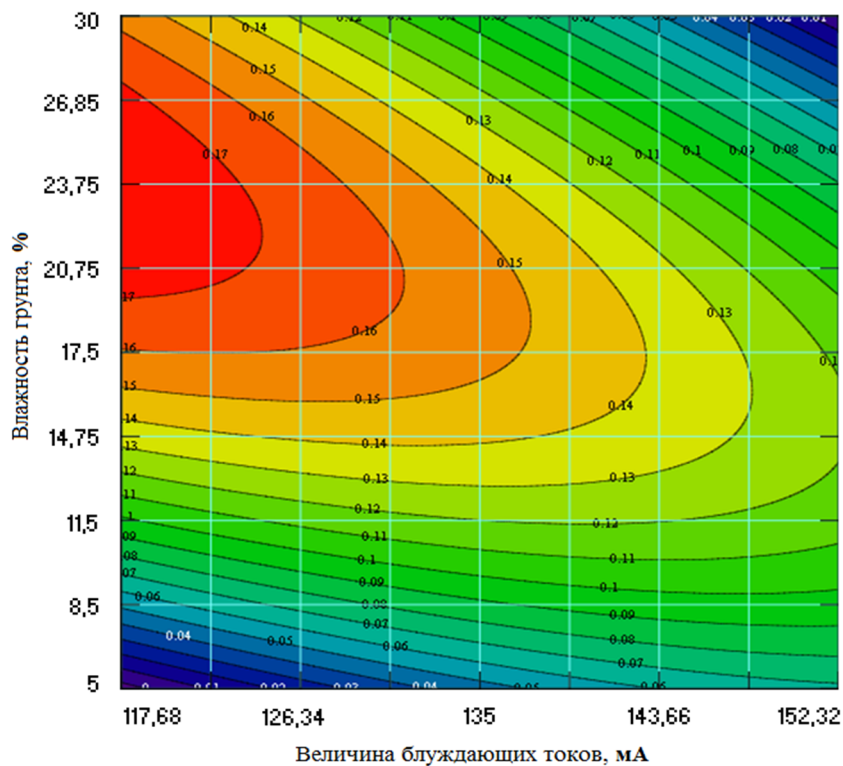


Рисунок А.6 – Изокванты для определения коррозии ЗУ (%) в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в физическом значении)

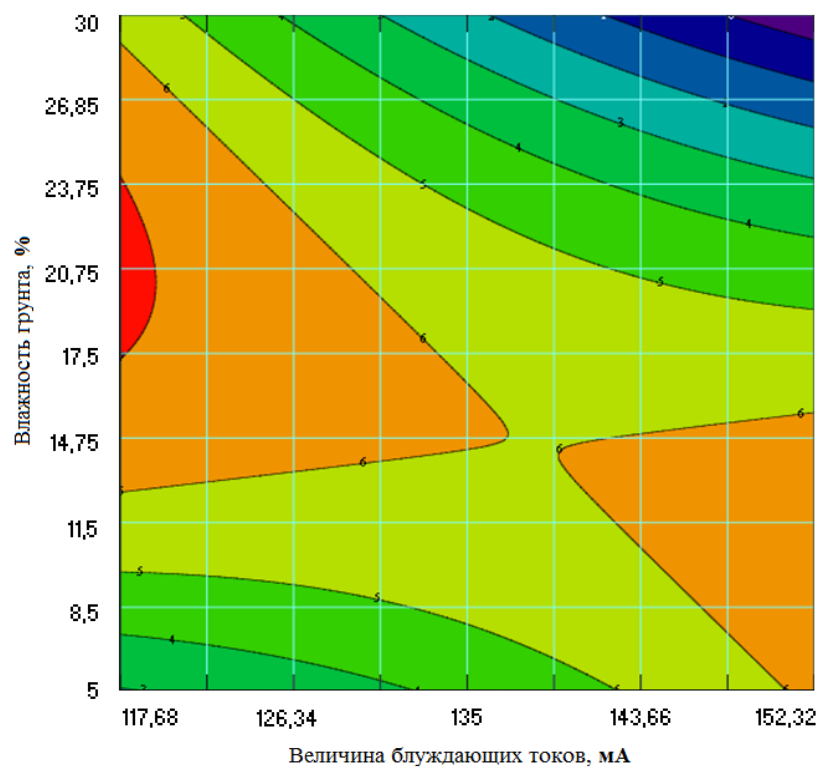


Рисунок А.7 – Изокванты для определения процента изменения сопротивления растеканию тока ЗУ в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в физическом значении)

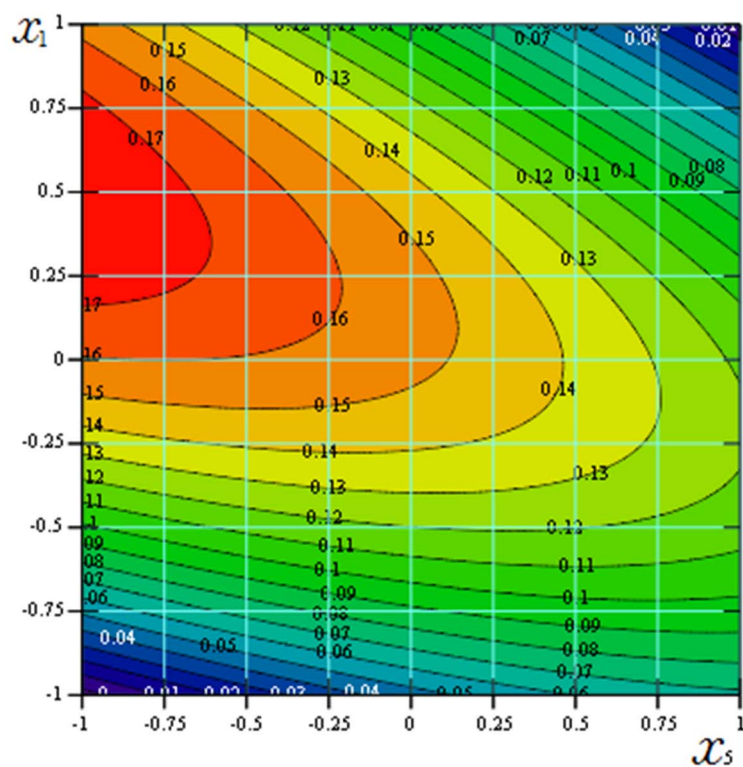


Рисунок А.8 – Изокванты для определения коррозии ЗУ (%) в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в кодированном значении)

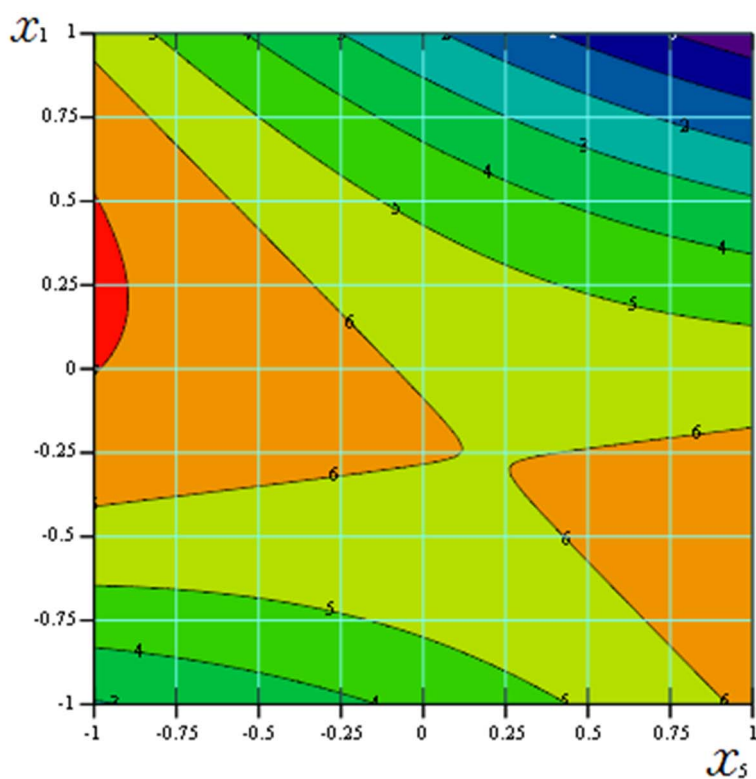


Рисунок А.9 – Изокванты для определения процента изменения сопротивления растеканию тока ЗУ в зависимости от влажности грунта и блуждающих токов (факторы в кодированном значении)

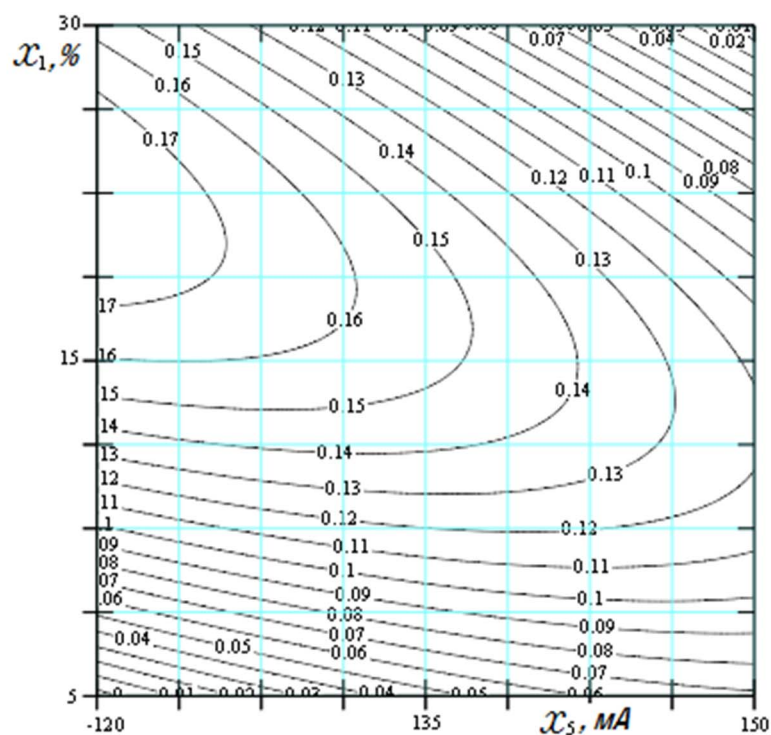


Рисунок А.10 – Изолинии изоквантов для определения коррозии ЗУ (%) в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в физическом значении)

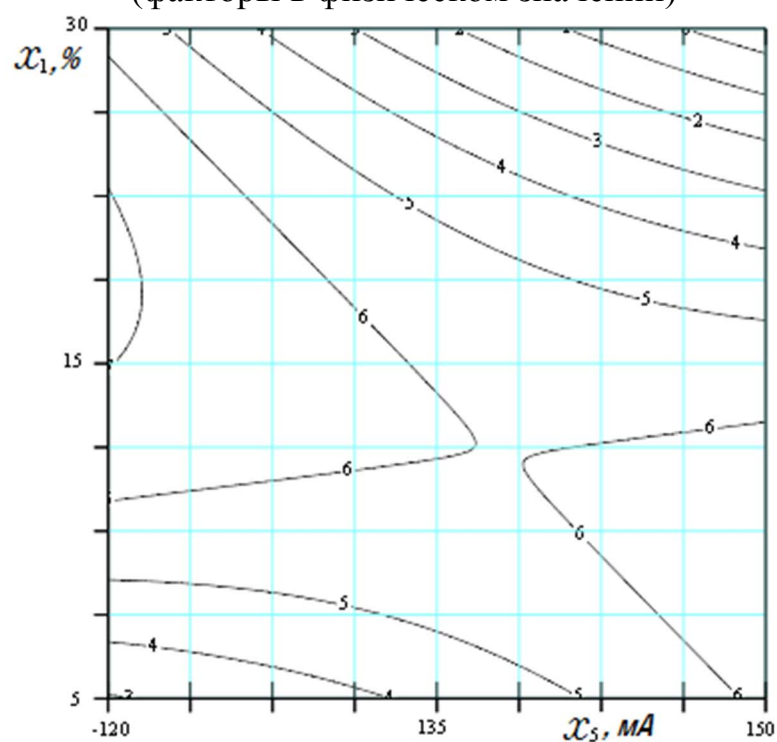


Рисунок А.11 – Изолинии изоквантов для определения процента изменения сопротивления растеканию тока ЗУ в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в физическом значении)

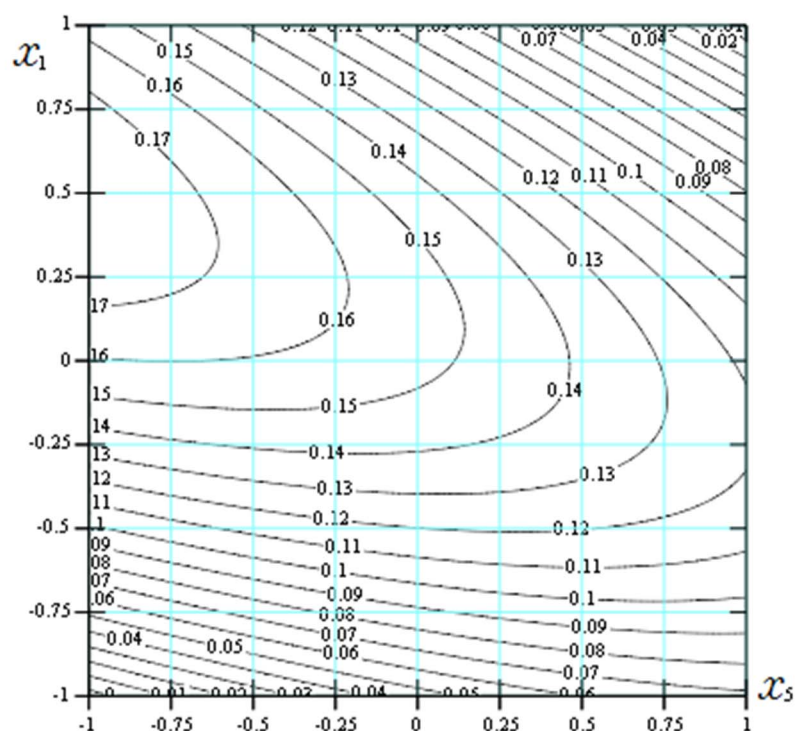


Рисунок А.12 – Изолинии изоквантов для определения коррозии ЗУ (%) в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в кодированном значении)

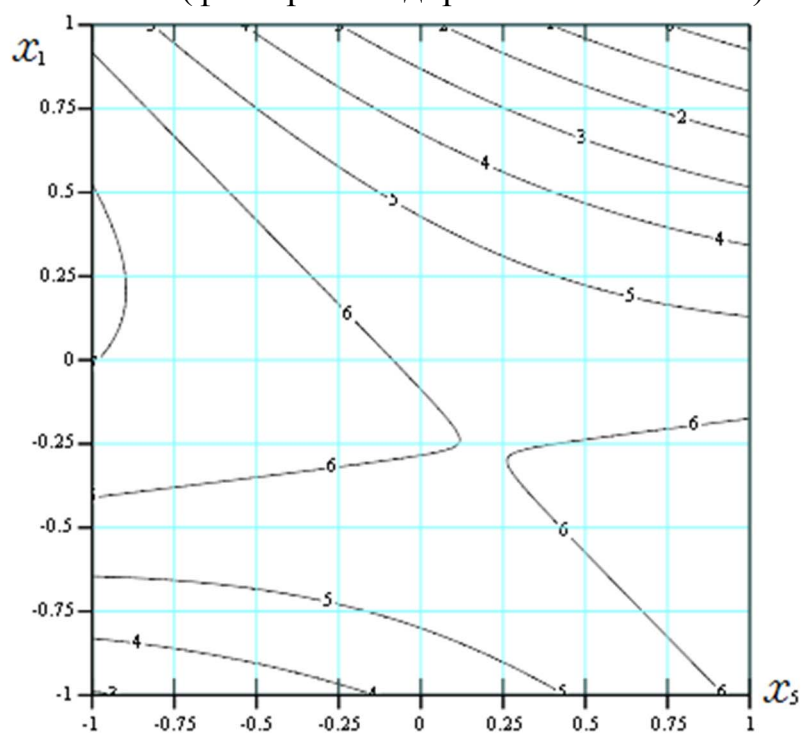


Рисунок А.13 – Изолинии изоквантов для определения процента изменения сопротивления растеканию тока ЗУ в зависимости от влажности грунта и величины блуждающих токов (факторы в кодированном значении)

Используя изолинии изоквантов построим номограмму для разных диапазонов влажности грунта и значением блуждающих токов. В номограмме изображаются значения влажности грунта, величины блуждающих токов, и влияние этих двух факторов на процесс коррозии (потеря массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов) и изменения сопротивления сопротивлению растеканию тока ЗУ.

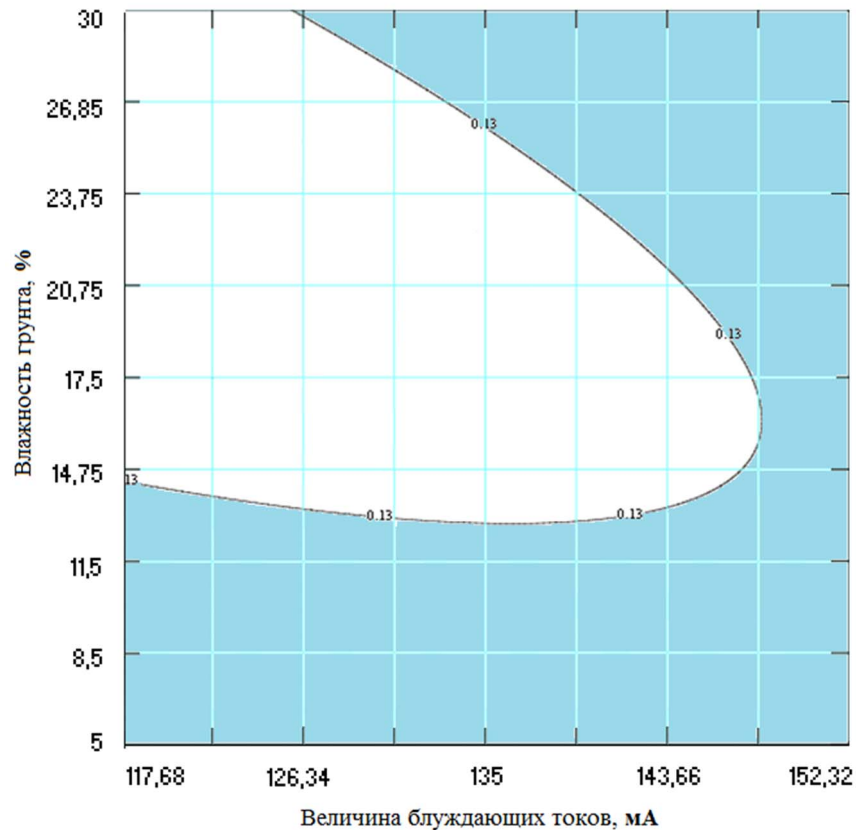


Рисунок А.14 – Номограмма процесса коррозии при потере не более 0,13 % массы электродов ЗУ (светлая зона)

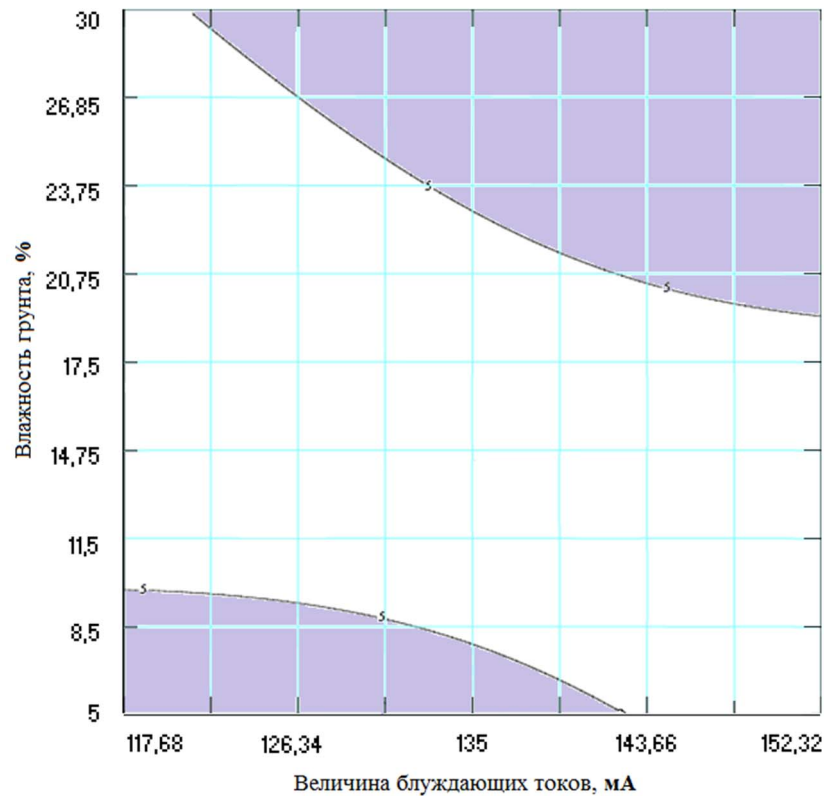


Рисунок А.15– Номограмма при не более 5 % изменении сопротивления растеканию тока ЗУ (светлая зона)

Используя полученные математические модели и их геометрические представления в виде номограмм, возможно определять состояние элементов ЗУ без проведения дорогостоящих вскрышных работ. Таким образом, получен интеллектуальный инструмент для выявления протекающих процессов в ЗУ, т.е. осуществлять их мониторинг.

Потеря массы металла, применяемого для изготовления заземляющих электродов и изменения сопротивления растеканию тока ЗУ в других диапазонах влажности грунта и величины блуждающих токов приводятся в ПРИЛОЖЕНИЕ.

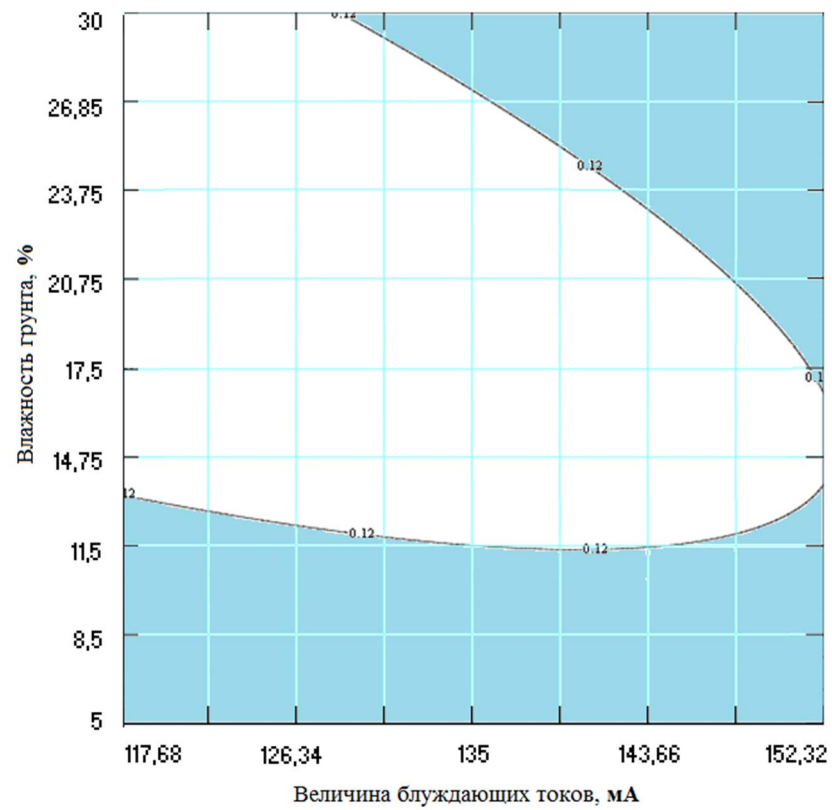


Рисунок А.16 – Номограмма процесса коррозии при потере не более 0,12 % массы электродов ЗУ

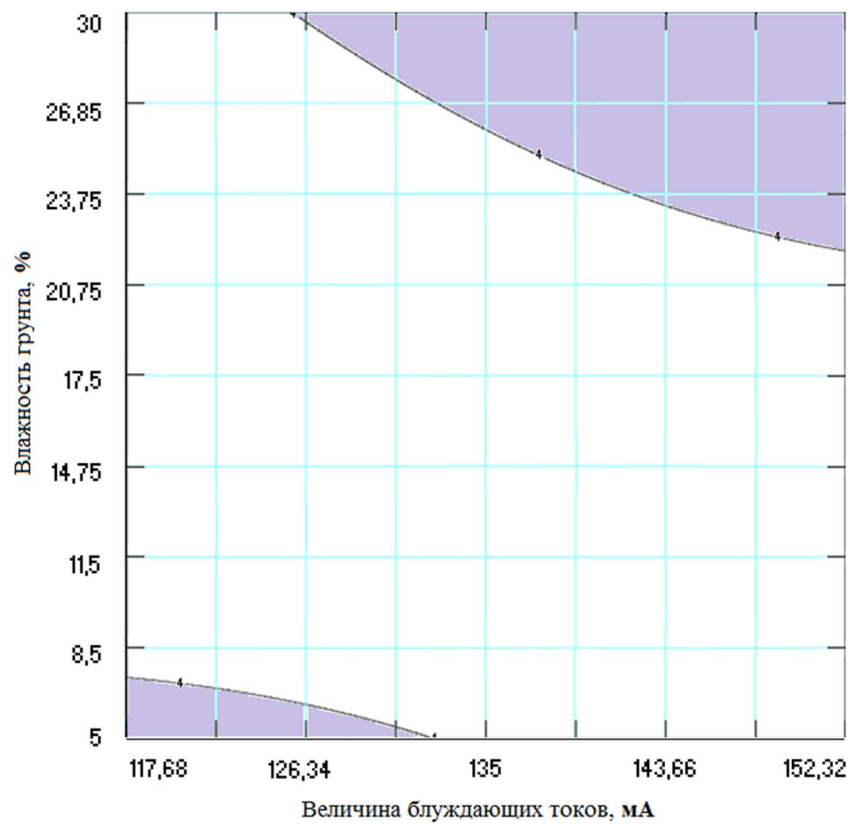


Рисунок А.17 – Номограмма при 4 % изменении сопротивления растеканию тока ЗУ

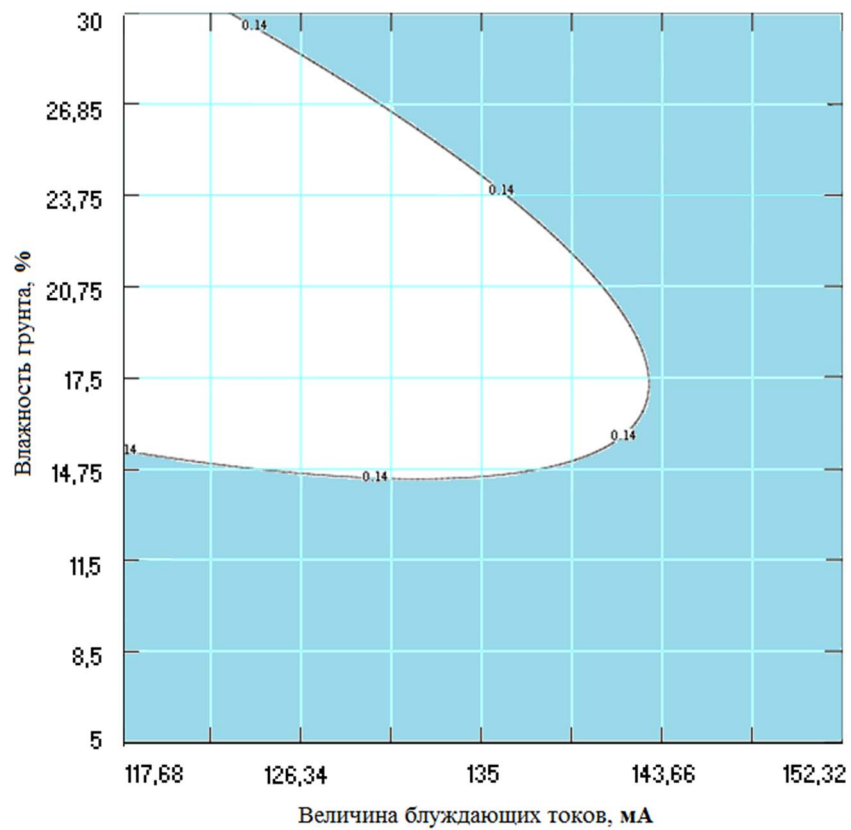


Рисунок А.18 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,14 % массы электродов ЗУ

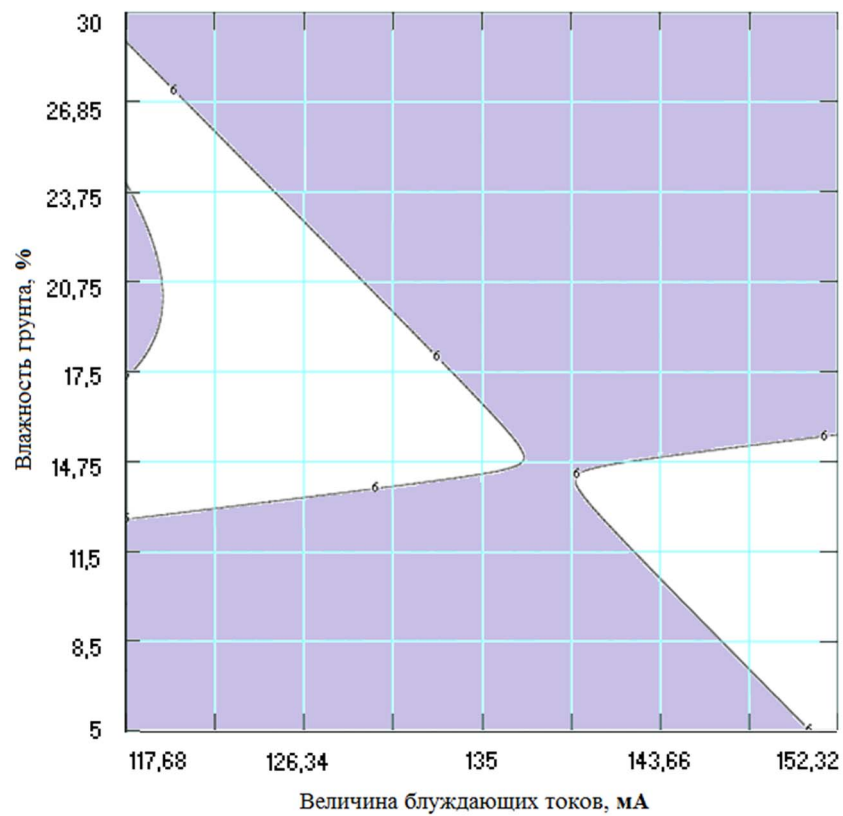


Рисунок А.19 – Номограмма при 6 % изменении сопротивления растеканию тока ЗУ

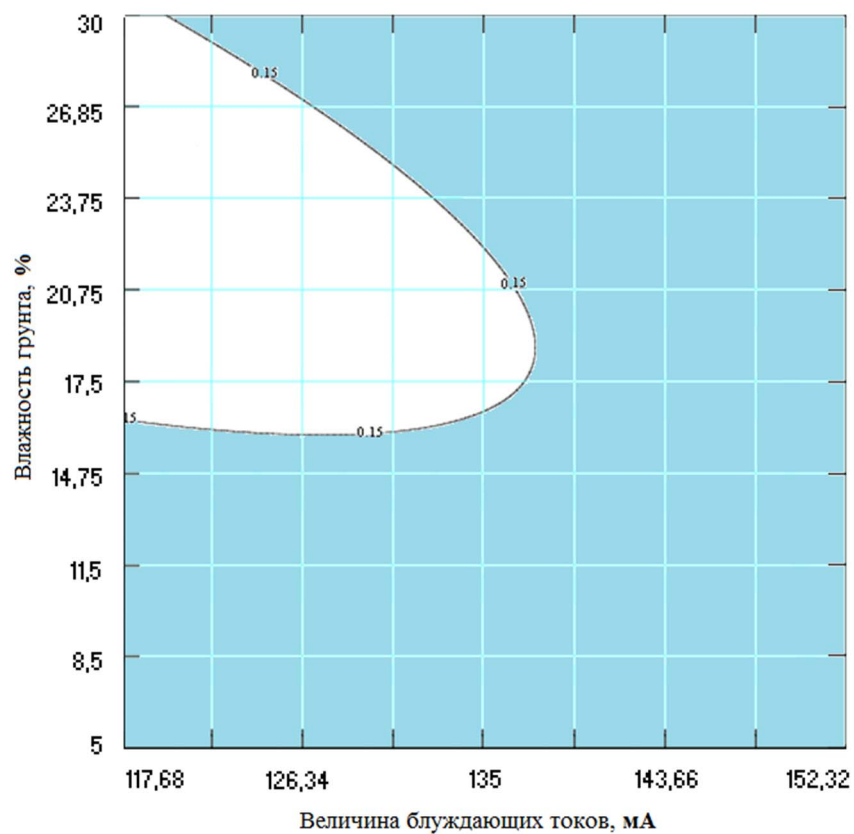


Рисунок А.20 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,15 % массы электродов ЗУ

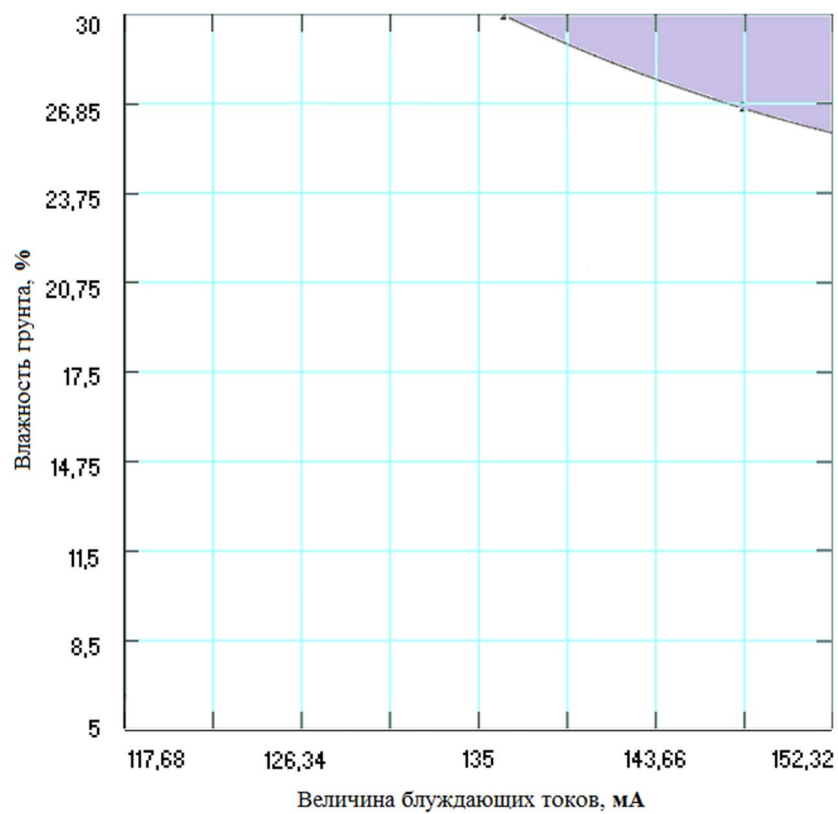


Рисунок А.21 – Номограмма при 2 % изменении сопротивления растеканию тока ЗУ

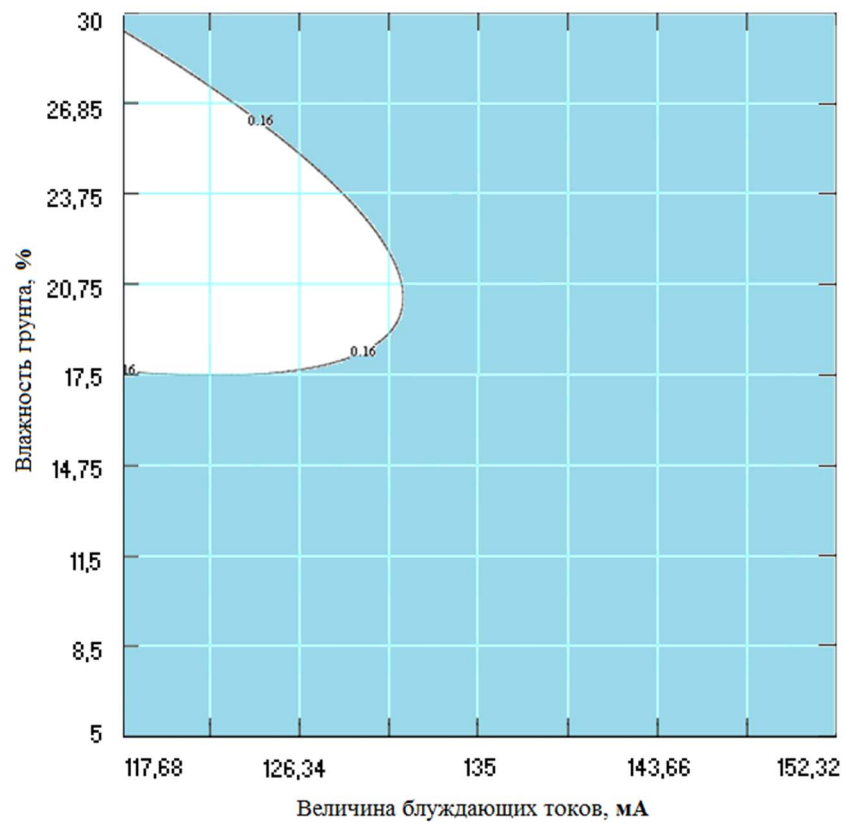


Рисунок А.22 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,16 % массы электродов ЗУ

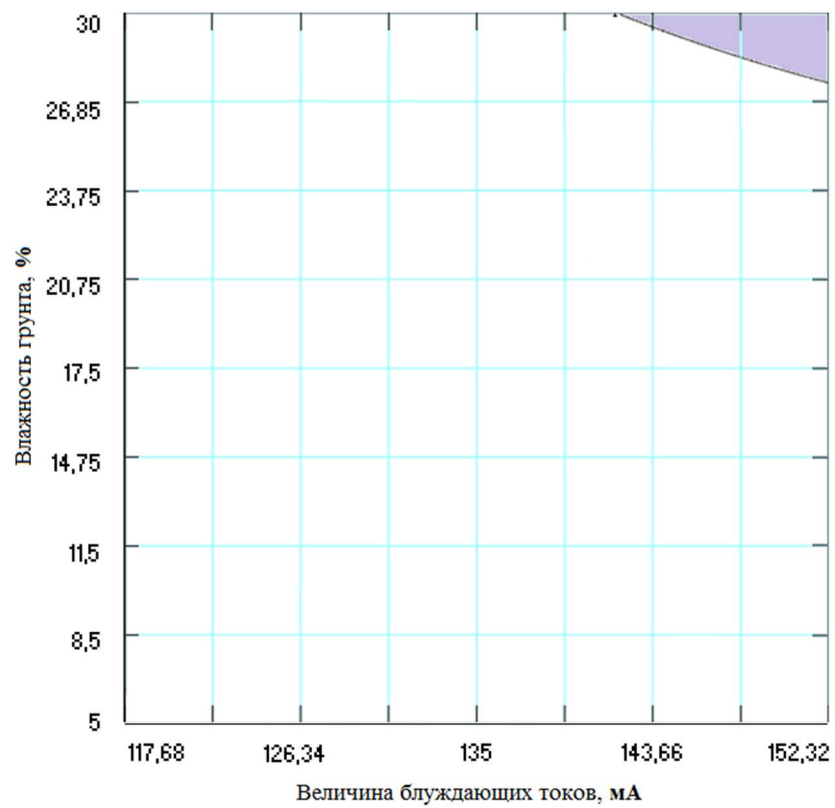


Рисунок А.23 – Номограмма при 1 % изменении сопротивления растеканию тока ЗУ

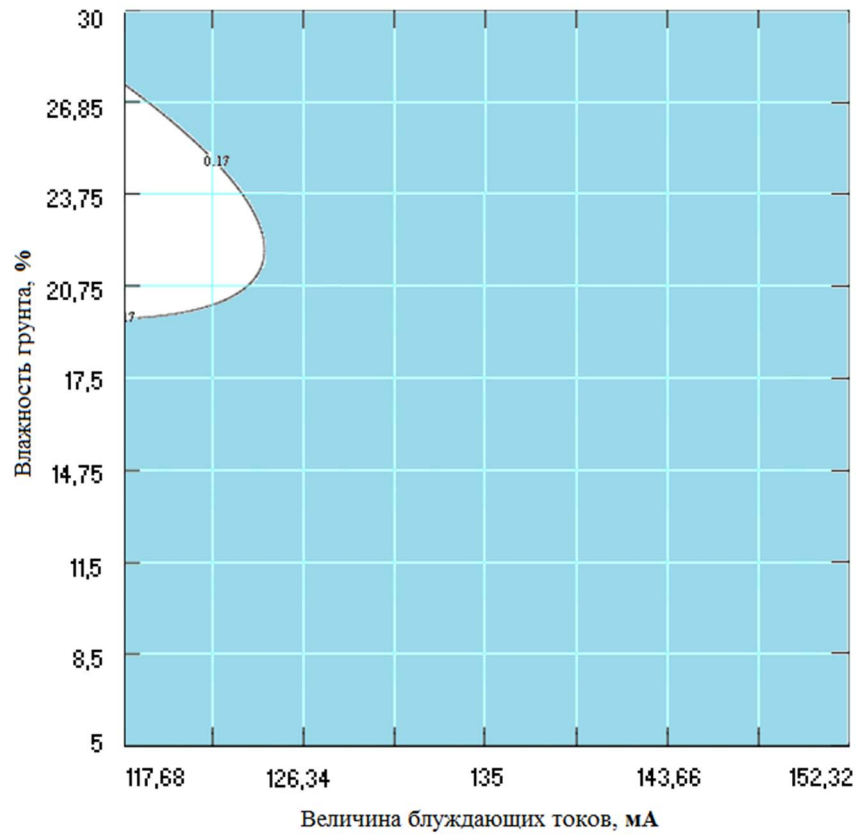


Рисунок А.24 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,17 % массы электродов ЗУ

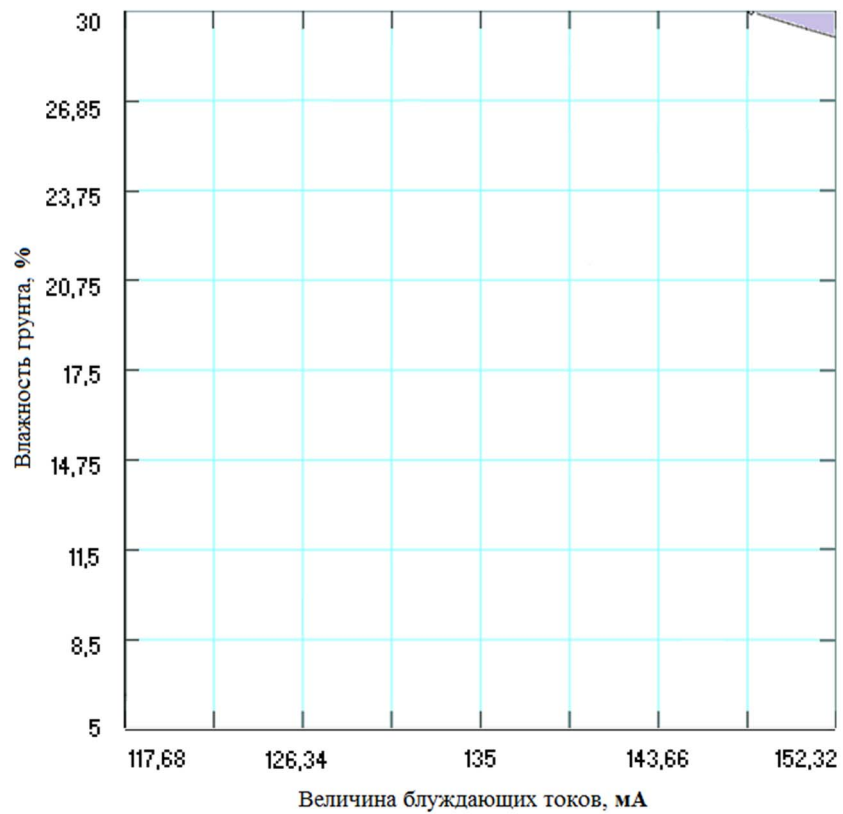


Рисунок А.25 – Номограмма при 0,5 % изменении сопротивления растеканию тока ЗУ

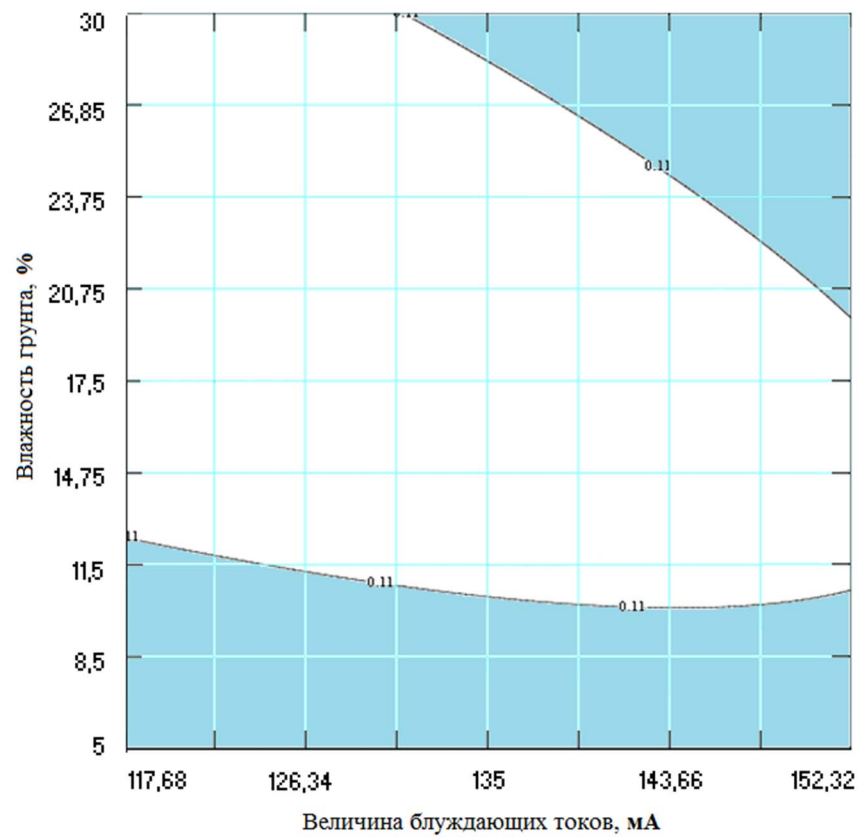


Рисунок А.26 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,11 % массы электродов ЗУ

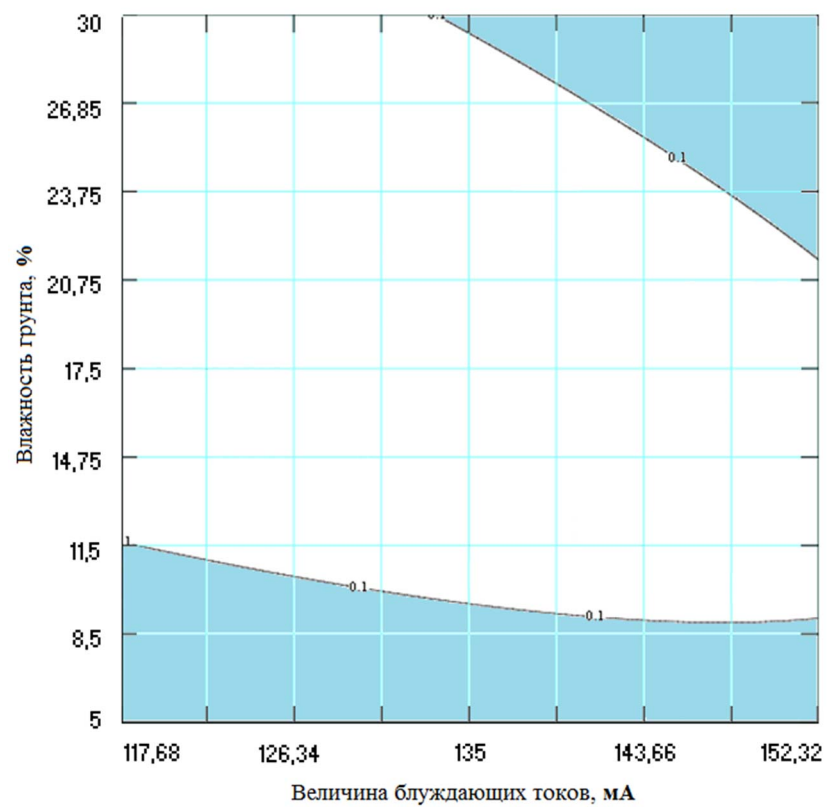


Рисунок А.27 – Номограмма процесса коррозии при потере массы 0,1 % электродов ЗУ

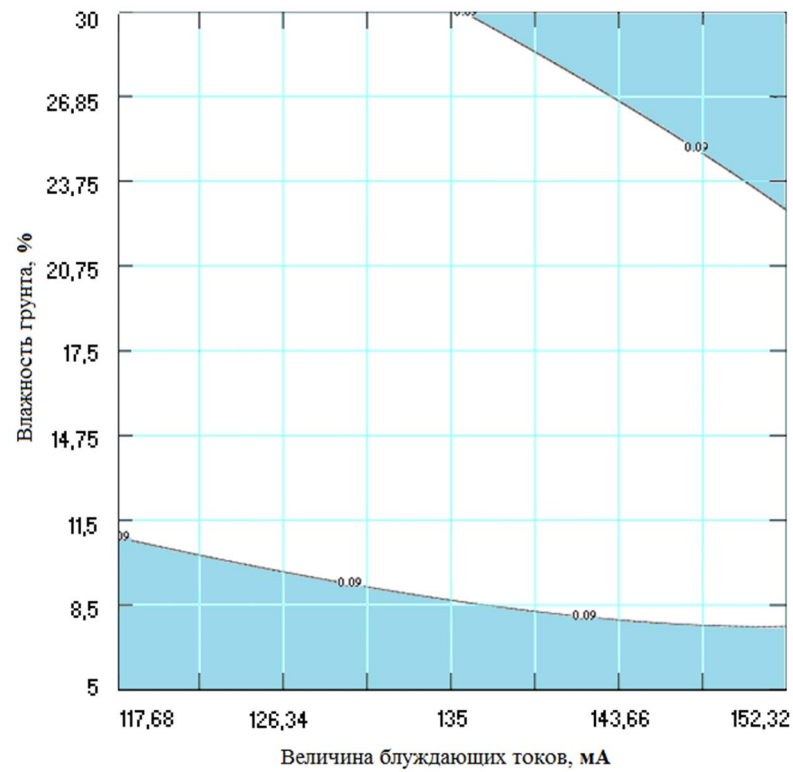


Рисунок А.28 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,09 % массы электродов ЗУ

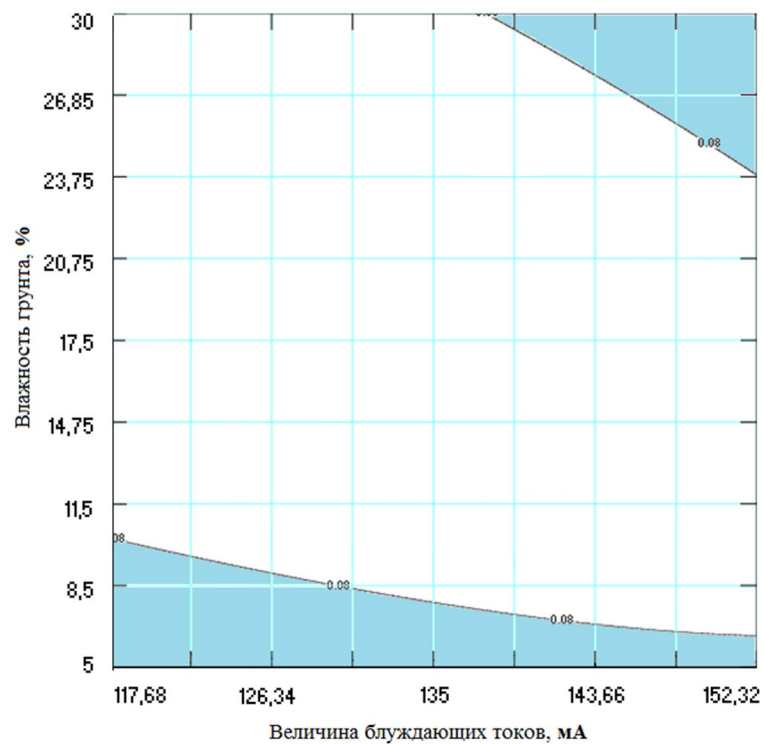


Рисунок А.29 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,08 % массы электродов ЗУ

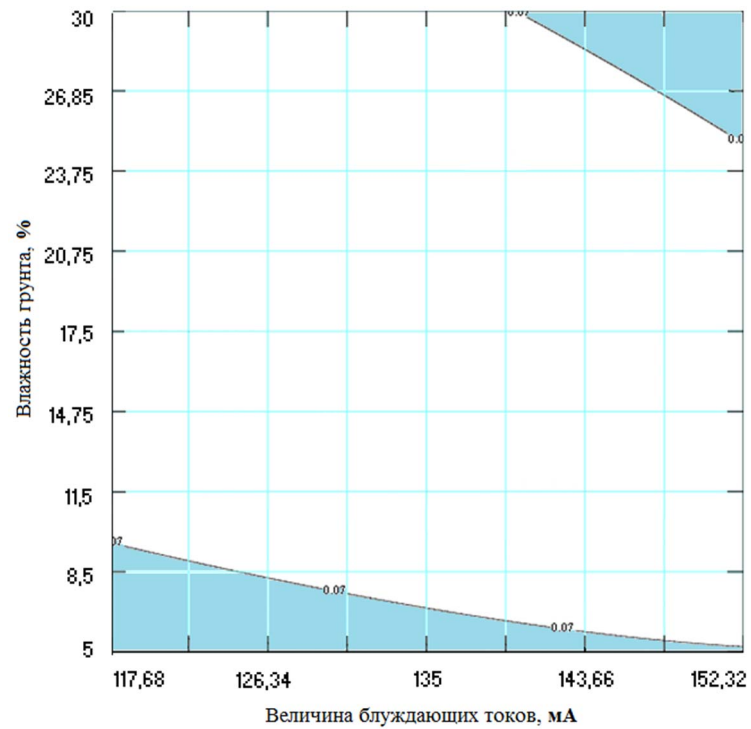


Рисунок А.30 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,07 % массы электродов ЗУ

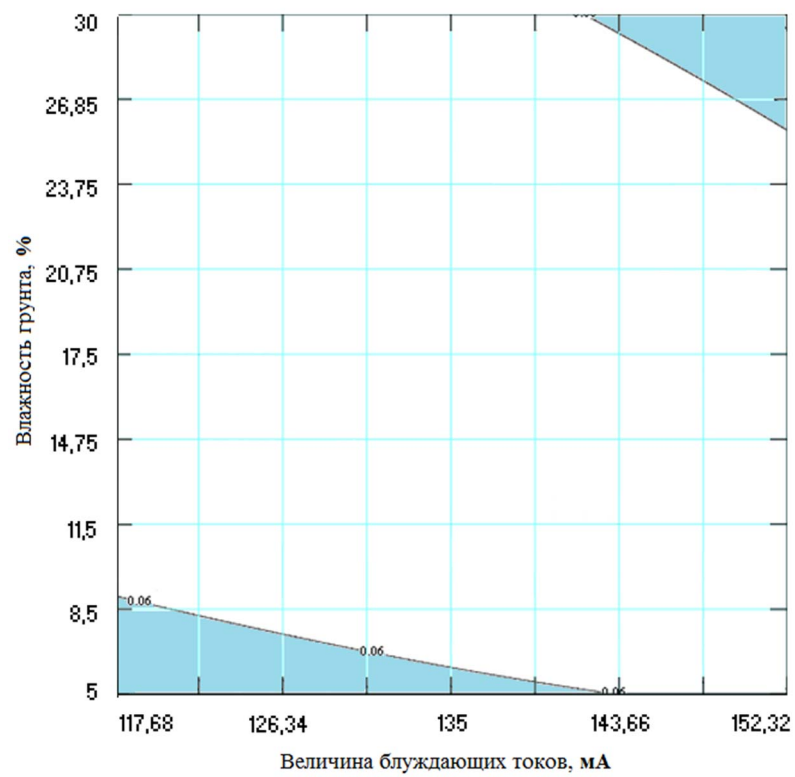


Рисунок А.31 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,06 % массы электродов ЗУ

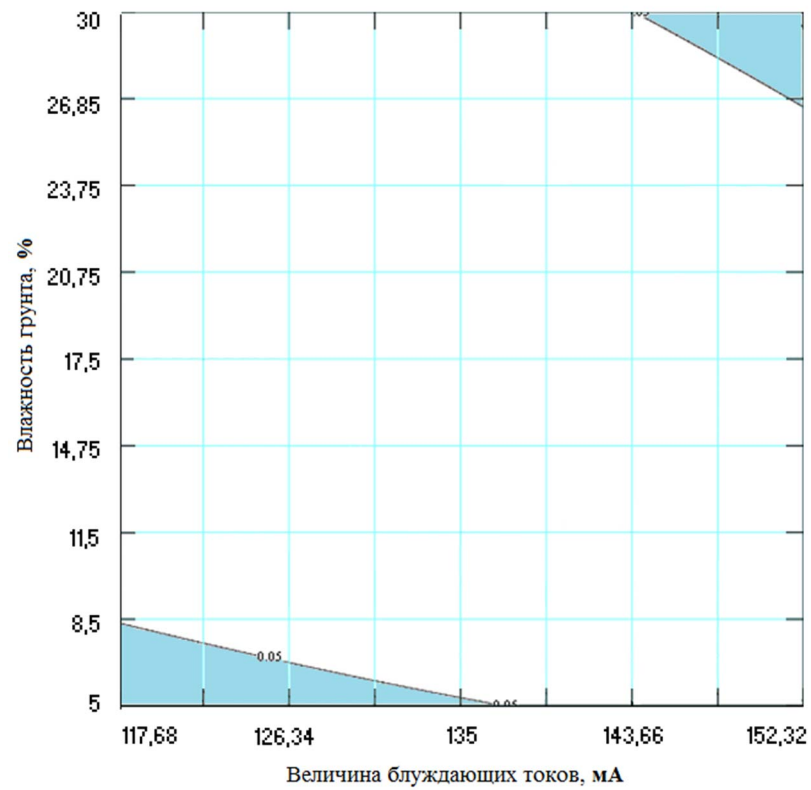


Рисунок А.32 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,05 % массы электродов ЗУ

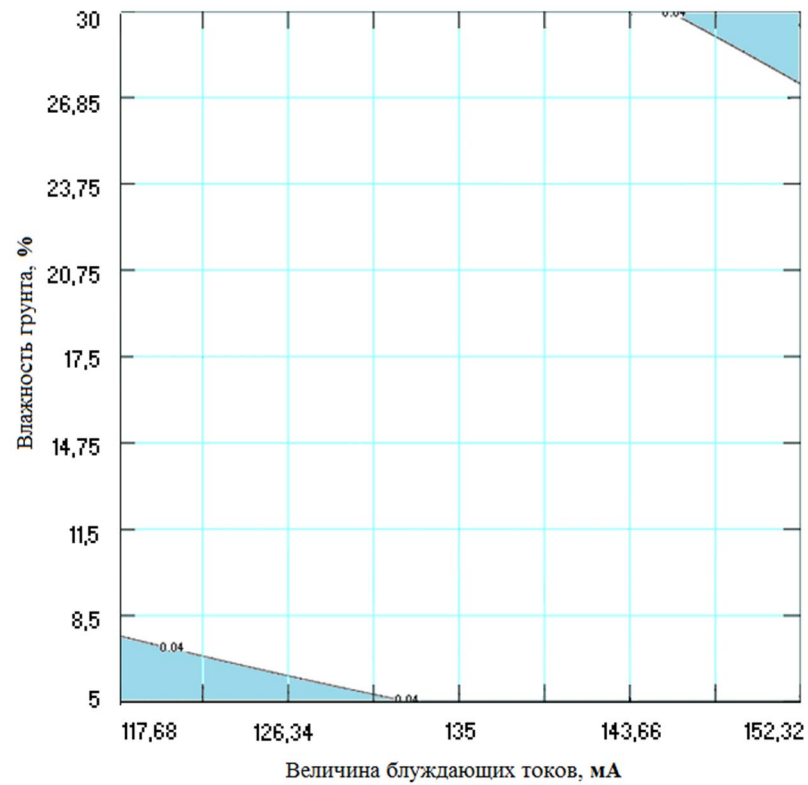


Рисунок А.33 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,04 % массы электродов ЗУ

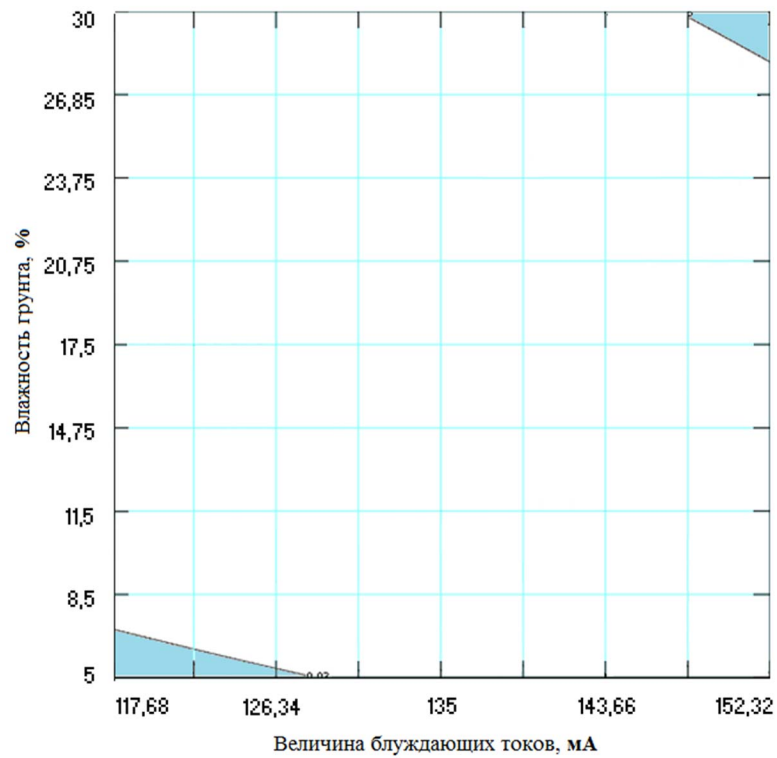


Рисунок А.34 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,03 % массы электродов ЗУ

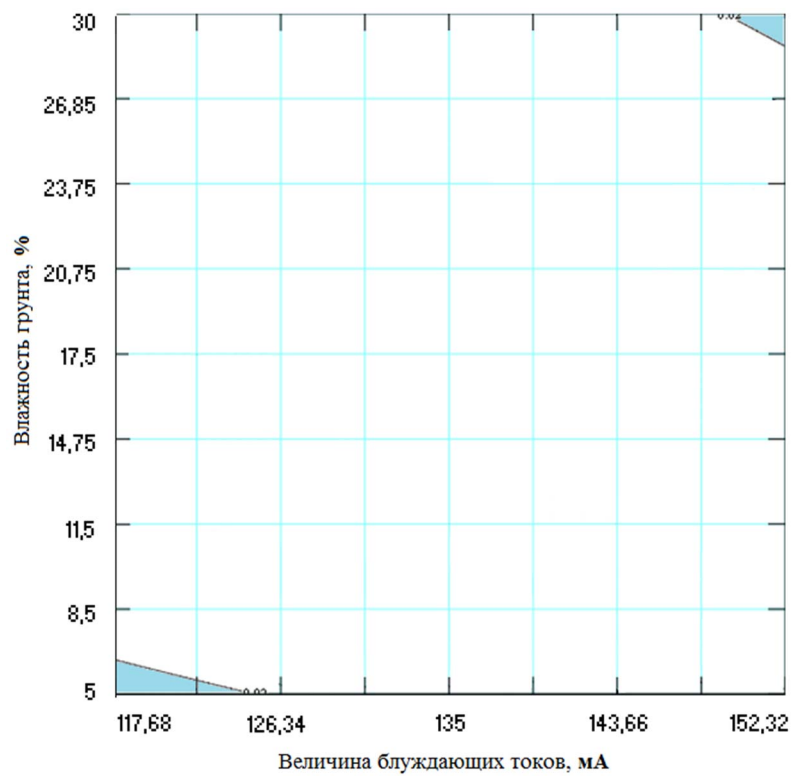


Рисунок А.35 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,02 % массы электродов ЗУ

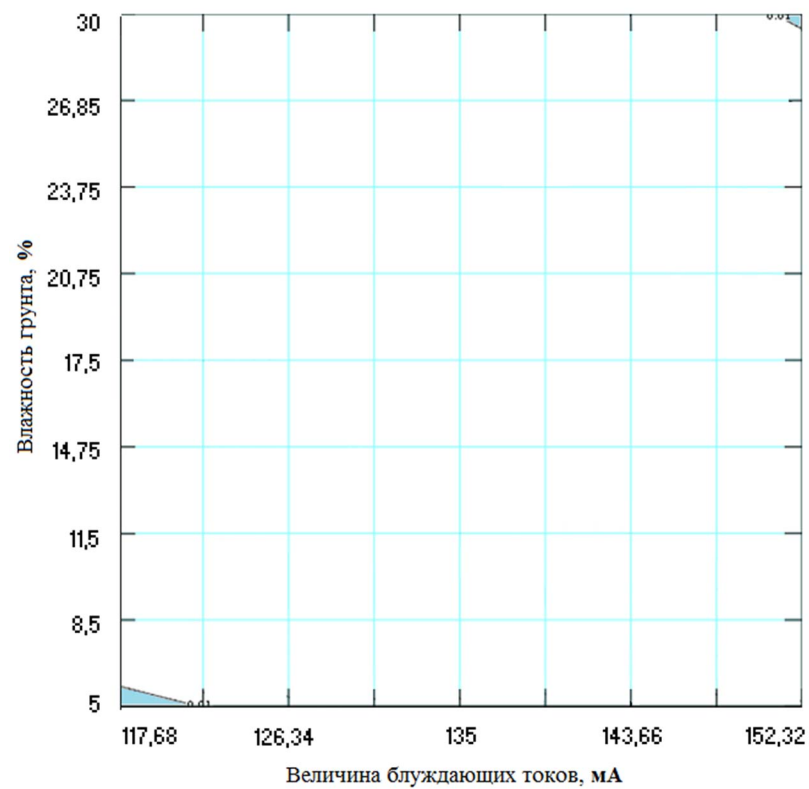


Рисунок А.36 – Номограмма процесса коррозии при потере 0,01 % массы электродов ЗУ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 161812

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ
ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И БЛУЖДАЮЩИХ
ТОКОВ НА ПРОЦЕСС КОРРОЗИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ
УСТРОЙСТВ

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Уральский государственный университет" (национальный исследовательский университет) (ФГБОУ ВПО "ЮУрГУ" (НИУ)) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

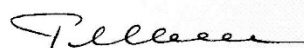
Заявка № 2015145568

Приоритет полезной модели 22 октября 2015 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 15 апреля 2016 г.

Срок действия патента истекает 22 октября 2025 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **161 812** (13) **U1**(51) МПК
G01R 19/145 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**(12) ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОПИСАНИЯ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ**

(21)(22) Заявка: 2015145568/28, 22.10.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
22.10.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 22.10.2015

(45) Опубликовано: 10.05.2016 Бюл. № 13

Адрес для переписки:

454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76,
ЮУрГУ, патентный отдел

(72) Автор(ы):

Абдуллоев Рамазон Толибжонович (RU),
Сидоров Александр Иванович (RU),
Тряпицын Александр Борисович (RU)

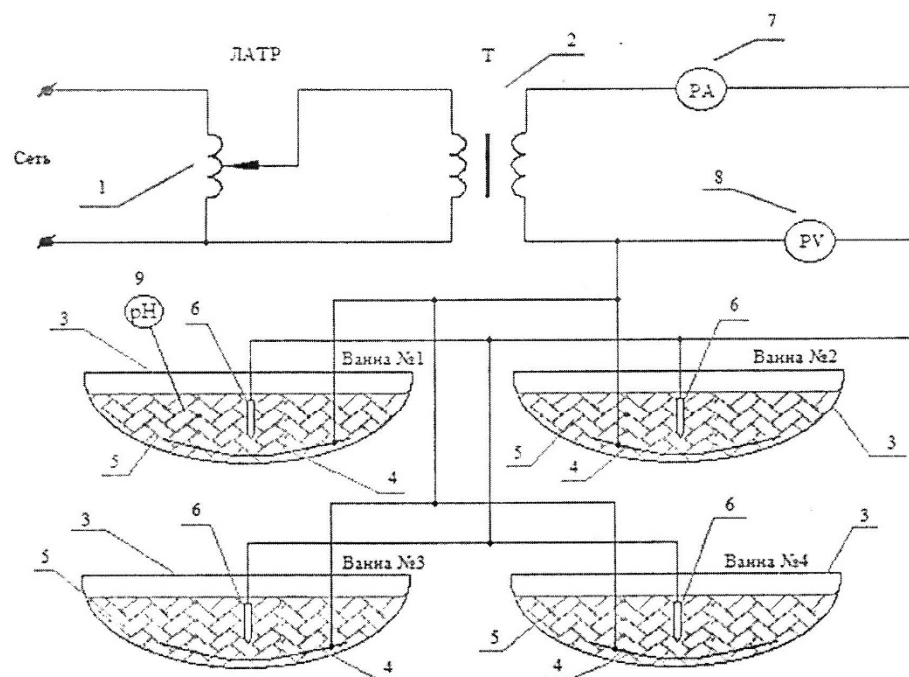
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Южно-
Уральский государственный университет"
(национальный исследовательский
университет) (ФГБОУ ВПО "ЮУрГУ"
(НИУ)) (RU)**(54) УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И
БЛУЖДАЮЩИХ ТОКОВ НА ПРОЦЕСС КОРРОЗИИ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ****(57) Формула полезной модели**

Установка для исследования влияния факторов окружающей среды и блуждающих токов на процесс коррозии заземляющих устройств, содержащая лабораторный авотрансформатор ЛАТР, подключенный к разделительному трансформатору, заземляющие электроды, соединенные последовательно с миллиамперметром и параллельно с вольтметром, и погруженные в грунт, засыпанный в диэлектрические ванны, на дне которых расположена медная фольга, при этом в грунт дополнительно погружены электроды прибора для измерения влажности и кислотности грунта.

RU 161812 U1

RU 161812 U1



RU 161812 U1



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ
ТАДЖИКИСТАН
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ ТАДЖИКИСТАНА

735140, г. Курган-Тюбе, ул. Е.Гафурова- 27, Тел.: 8322222634, Факс: 8322222364, E-mail: nazarov-h2013@mail.ru.



УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Института энергетики Таджикистана.

кандидат технических наук, доцент

Назарзода Х.Х.

2016 г.

СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы

Абдуллоева Рамазона Толибжоновича

«Система оценки состояния заземляющего устройства»

Результаты диссертационной работы Абдуллоева Рамазона Толибжоновича «Система оценки состояния заземляющего устройства» используются в учебном процессе Института энергетики Таджикистана, в частности:

– при изучении студентами энергетического факультета специальности 430103 «Электроснабжение» и 530104-03 «Автоматика и релейная защита электроустановок» дисциплины «Электробезопасность» – обзор существующих методов и средств контроля состояния элементов заземляющих устройств электроустановок.

Заведующий кафедрой

«Электроснабжение и релейная защита»

Рахимов Х.А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе



Таджикского технического университета

имени академика М.С. Осими,

кандидат технических наук, доцент

Гадоев С.А.

«13» 09 2016 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов

диссертационной работы Р.Т. Абдуллоева

«Система оценки состояния заземляющего устройства»

Результаты диссертационной работы Абдуллоева Рамазона Толибжоновича «Система оценки состояния заземляющего устройства» внедрены в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, в частности:

– при изучении студентами направления «Электроэнергетика и электротехника» дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» – анализ существующих методов контроля состояния элементов заземляющих устройств подстанций различного вида и назначения.

Заведующий кафедрой
«Безопасность жизнедеятельности
и экологии» ТТУ им. акад. М.С. Осими,
кандидат технических наук, доцент

Идиев М.Т.