ISSN 2413-8665

Международный научный семинар им. Ю.Н. Руденко

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЁЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

Надёжность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации

ВЫПУСК 71

КНИГА 3

ИРКУТСК
2020 г.

Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева
(ИСЭМ) СО РАН

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ

Выпуск 71

Надежность энергоснабжения потребителей
в условиях их цифровизации

Книга 3

Ответственный редактор:
член-корреспондент РАН Воропай Н.И.

г. Иркутск

2020 г.

УДК 621.311.1
М54

Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 71. Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации. В 3-х книгах. / Книга 3 / Отв. ред. Н.И. Воропай. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2020, 364 с.

ISSN 2413-8665

В сборнике рассматривается широкий круг вопросов, связанных с надежностью энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации: трансформация систем энергетики и проблемы их надежности; надежность систем энергетики, включающих АЭС; требования к надежности систем энергетики в условиях цифровизации потребителей; надежность энергоснабжения активных потребителей; интеллектуальные технологии в обеспечении надежности систем энергетики; методы анализа и обеспечения надежности систем энергетики в условиях их цифровизации; новые технологии обеспечения надежности цифровых систем энергетики; качество энергии в проблеме обеспечения надежности энергоснабжения цифровых потребителей; эксплуатация оборудования систем теплоснабжения, ТЭС и ЖКХ; электромеханические устройства и электрические аппараты в системах энергоснабжения.

Материалы сборника могут быть полезны для работников научно-исследовательских, проектных и эксплуатационных организаций, преподавателей, аспирантов и магистрантов вузов, занимающихся проблемами исследования и обеспечения надежности систем энергетики.

Редакционная коллегия:

д.т.н.	И.Г. Ахметова
член-корр. РАН	Н.И. Воропай,
к.т.н.	Д.Н. Ефимов
к.т.н.	П.В. Илюшин
д.т.н.	И.Н. Колосок
к.т.н.	Д.С. Крупенёв
д.т.н.	А.Л. Куликов,
д.т.н.	В.Г. Курбацкий
к.т.н.	И.В. Постников
д.т.н.	С.М. Сендеров,

Утверждено к печати Институтом систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН

Все статьи, включенные в сборник, прошли рецензирование и получили положительную оценку.

ISSN 2413-8665

© ИСЭМ СО РАН

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ …….. 8

Колосок И.Н., Коркина Е.С. ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АГРЕГАТОРА СПРОСА МЕТОДОМ АНАЛИЗА ИЕРАРХИИ …… 9

Постников И.В. АНАЛИЗ НАДЕЖНОСТИ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ОТ ГИБРИДНОГО ЭНЕРГОИСТОЧНИКА НА БАЗЕ ВЭС И ТЭЦ … 19

Медникова Е.Е., Постников И.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАДИУСА ЭФФЕКТИВНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ТСС С УЧЕТОМ НАДЕЖНОСТИ …….. 27

Ахметова И.Г., Лапин К.В., Ахметов Т.Р., Бальзамова Е.Ю. ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ПОСТАВЛЯЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ …….. 39

Назаров С.Г., Рахимов М.Р., Хекимов Г.Х. ОБ ОПТИМАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ …… 48

Назаров С.Г., Рахимов М.Р., Хекимов Г.Х. О ЛИНЕАРИЗАЦИИ УРАВНЕНИЙ НАВЬЕ-СТОКСА …… 56

Иванов Д.А., Галиева Т.Г. Садыков М.Ф., Голенищев-Кутузов А.В. МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ …… 66

Буякова Н.В, Крюков А.В., Середкин Д.А., Лэ Ван Тхао КОМПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ …… 73

Павлов П.П., Фандеев В.П., Бутаков В.М., Баймеева Д.Р., Сафиуллина В.М. ДИАГНОСТИКА ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ …… 83

Чахирев Л.В., Плотников В.В., Плотникова Л.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ И СТРУКТУРОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ …… 90

Плохов И.В., Савраев И.Е., Ильин А.В., Козырева О.И., Логинов С.Ю. ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЁМА ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ ……. 100

Малышев А.В., Карнаух Л.В., Будик А.Н. СОВРЕМЕННЫЙ КОМПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ ВЛ 220-500 кВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕНСИВНЫХ ГОЛОЛЕДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ …….....…….. 110

Короткевич М.А., Стелькин Ф.В. ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ …… 120

Шарыгин М.В., Вуколов В.Ю., Обалин М.Д., Петров А.А. ИНТЕГРАЦИЯ НОВЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСЕТЯХ 6-35 КВ ……. 126

Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Обалин М.Д., Папков Б.В. ПОВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ИГР …….. 136

Драко М.А., Барайшук С.М., Ерусланов В.Л. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРАКТИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ …… 144

Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А. О ВЛИЯНИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТОЧНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ …….. 154

Коверникова Л.И., Буй Х.Н., Войтов О.Н., Семенова Л.В. ОПТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОЩНОСТИ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ …… 164

Бандурин И.И., Иванов В.А., Козырев И.Н., Коробов В.М., Мартиросян А.А., Тращенков С.В., Хаймин А.Ю. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СЕЧЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С УЧЁТОМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ……. 174

Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Шуманский Э.К. ВЛИЯНИЕ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОНИЖЕННЫМ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ …… 184

Саитов С.Р., Чичирова Н.Д. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА МЕМБРАНАХ ОБРАТНОГО ОСМОСА …….. 194

Гильфанов Б.А., Чичиров А.А., Филимонова А.А. АНАЛИЗ ВЫСОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ РАСТВОРОВ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СТУПЕНЕЙ ОБРАБОТКИ ПРОДУВОЧНОЙ ВОДЫ ИСПАРИТЕЛЯ НА УСТАНОВКЕ УТИЛИЗАЦИИ ТЭС …… 201

Филимонова А.А., Чичирова Н.Д., Бускин Р.В., Чичиров А.А. «БЕССТОЧНЫЕ» ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ БАРОМЕМБРАННОЙ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ 207

Чичиров А.А., Чичирова Н.Д., Филимонова А.А., Бобиков О.Е. РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ИОНИТНОЙ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ТЭЦ ….. 211

Ахметов С.М., Кудайкулов А.К., Бижанов Д.Т. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕРЖНЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БОКОВОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА, ТЕПЛООБМЕНА И ПОВЕРХНОСТНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ …….. 217

Желтухина Е.С., Павлова М.В., Зиганшин М.Г. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО И ТВЕРДОГО ТОПЛИВА В ТОПКАХ МЕЛКИХ И КРУПНЫХ КОТЛОВ ДЛЯ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ …….. 223

Зиганшин М.Г., Гиниятуллин Э.Р., Игнатьев К.А. ОПЫТНОЕ И РАСЧЁТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕЩЁННОГО ВОЗДУШНОГО И ВОДЯНОГО ОТОПЛЕНИЯ ОБЩЕСТВЕННОГО ЗДАНИЯ …….. 233

Билалов М.И., Зиганшин М.Г. ОПЫТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ФАКТОРОВ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КОНГЛОМЕРАТЫ ШЕСТИВАЛЕНТНОГО ХРОМА С ОРГАНИЧЕСКИМИ МАТЕРИАЛАМИ ……. 241

Ахметов Э.А., Таймаров М.А., Ахметова Р.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАЗУТНОГО НЕФТЕШЛАМА И ДРЕВЕСНЫХ ЛЕСОПИЛЬНЫХ ОТХОДОВ В МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ …… 250

Захарова В.Е., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЛИНЕЙНО-ПРОТЯЖЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЖКХ .. 257

Марьин Г.Е., Менделеев Д.И., Осипов Б.М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ГЛУБОКОЙ РАЗГРУЗКЕ …… 264

Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ С УЧЕТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ …… 270

Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е. К ВОПРОСУ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТРУБОПРОВОДАХ ЖКХ …… 276

Ибадов А.А., Кондратьев А.Е., Гапоненко С.О. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ ВОЛН ЛЭМБА ОТ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ЖКХ …….. 283

Бабаходжаев Р.П., Ташбаев Н.Т., Мирзаев Д.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ДЛЯ ВИБРАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ТУРБУЛИЗАТОРОВ В ТРУБЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ ……... 288

Хуснутдинова Э.М., Николаева Л.А. ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ТЭС МОДИФИЦИРОВАННЫМ ШЛАМОМ …….. 298

Власова А.Ю., Власов С.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД ПОСЛЕ РЕГЕНЕРАЦИИ Н - КАТИОНИТОВЫХ ФИЛЬТРОВ …… 305

Романова В.В., Хромов С.В., Суслов К.В. МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЁЖНОСТЬ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ …….. 310

Бандурин И.И., Иванов В.А., Какурин А.С., Козырев И.Н., Коробов В.М., Тращенков С.В., Хаймин А.Ю. МЕТОДИКА РАСЧЁТА ВВОДНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 0,4 КВ …….. 319

Савельев В.А., Мельникова О.С., Батаева В.В. ВЛИЯНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА РИСК ОТКАЗОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ …… 328

Ахметбаев Д.С., Джандигулов А.Р., Быстрова С.В. СИСТЕМНЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОРМАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ …….. 338

Ахметбаев Д.С., Джандигулов А.Р., Бердыгожин А.С. ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ……. 347

Ваньков Ю.В., Запольская И.Н. ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДО ПОТРЕБИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ …… 355

Предисловие

В период с 21 по 26 сентября 2020 года в г. Казань состоялось 92-е заседание Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» на тему «Надежность энергоснабжения потребителей в условиях их цифровизации».

На заседании были рассмотрены следующие вопросы:

1. Трансформация систем энергетики и проблемы их надежности.
2. Надежность систем энергетики, включающих АЭС.
3. Требования к надежности систем энергетики в условиях цифровизации потребителей.
4. Надежность энергоснабжения активных потребителей.
5. Интеллектуальные технологии в обеспечении надежности систем энергетики.
6. Методы анализа и обеспечения надежности систем энергетики в условиях их цифровизации.
7. Новые технологии обеспечения надежности цифровых систем энергетики.
8. Качество энергии в проблеме обеспечения надежности энергоснабжения цифровых потребителей.
9. Эксплуатация оборудования систем теплоснабжения, ТЭС и ЖКХ.
10. Электромеханические устройства и электрические аппараты в системах энергоснабжения.

Работа семинара прошла в смешанном формате: очном и в онлайн-режиме через сервис видеоконференций (https://zoom.us).

На семинаре были заслушаны и обсуждены: 141 доклад, касающийся перечисленных и других проблем надежности систем энергетики, четыре кандидатских диссертации. Принятые к публикации 130 докладов представлены в настоящем сборнике статей в трех книгах.

В работе семинара приняли участие 247 человек: 2 академика (АН Чеченской Республики, НАН Республики Казахстан), 2 чл.-корр. (РАН, НАН Кыргызской Республики), 45 д.т.н., 51 к.т.н., 45 аспирантов.

65 участников приехали из разных городов России, 48 – сотрудники и аспиранты КГЭУ, 134 – онлайн-участники.

Участники были из 8 стран: **Россия** (Ангарск, Архангельск, Братск, Грозный, Десногорск, Екатеринбург, Иваново, Иркутск, Йошкар-Ола, Казань, Княгинино, Красногорск, Москва, Нижний Новгород, Новосибирск, Ноябрьск, Псков, Санкт-Петербург, Севастополь, Сосновый Бор, Тула, Уфа, Чебоксары, Чита); **Азербайджан** (Баку); **Беларусь** (Минск, Орша); **Казахстан (**Нур-Султан, Атырау, Алматы); **Киргизия** (Бишкек); **Таджикистан (**Душанбе); **Туркменистан (**Мары**); Узбекистан** (Ташкент, Фергана).

Н.И.Воропай
Председатель Международного программного комитета семинара
Член-корреспондент РАН

УДК 621.316.99

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРАКТИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК БЕЛОРУССКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Драко[1] М.А., Барайшук С.М., Ерусланов В.Л.

Аннотация

Выделены причины необходимости совершенствования системы проектирования заземляющих устройств. Разработан состав смеси для нормализации (уменьшения) удельного электрического сопротивления грунта. Проведен ряд натурных экспериментов по измерению значений сопротивлений заземляющих устройств экспериментальных контуров, после обработки смесью околоэлектродного объема грунта для оптимизации сопротивления заземлителя.

Ключевые слова: заземляющее устройство, удельное электрическое сопротивление грунта, заземлитель, околоэлектродное пространство.

Введение

Заземление должно удовлетворять требованиям обеспечения безопасности людей и животных, защиты сильноточных и слаботочных электроустановок, а также надежности обеспечения их эксплуатационных режимов работы и грозозащиты [1].

Связь заземляемых частей электроустановок с землёй осуществляется посредством системы неизолированных проводников, находящихся в контакте с землёй и предназначенных для проведения тока в землю − заземлителя. Совокупность заземлителя и заземляющих проводников называется заземляющим устройством (ЗУ).

Конструкция ЗУ электроустановки должна при минимальных затратах на ее сооружение в любое время года обеспечивать нормируемые значения электрических параметров ЗУ в течение нормативного срока службы электроустановки [2].

Наибольшее число ЗУ энергетических систем выполняется в виде соединенных различным образом стержневых элементов. Характерной особенностью таких заземлителей является то, что поперечные размеры отдельных элементов, как правило, существенно меньше их длины. Это позволяет при расчете основных электрических параметров (сопротивление растеканию, распределение потенциала и напряженности поля в среде) пренебречь неравномерностью распределения плотности тока по образующей поперечного сечения элементов [3].

[1] ЭТЛ ОУКЭ РУП "Белэнергосетьпроект", Минск, РБ, drako.mikhail@mail.ru

Горизонтально расположенные электроды из полос или круглой стали применяются для связи вертикальных электродов и как самостоятельные заземлители. Сечение вертикальных электродов ЗУ выбирается только по их механической прочности и коррозионной стойкости [4]. Вопросы коррозии заземлителей электроустановок Белорусской энергосистемы детально рассмотрены в [5]. Опыт обследования металлических конструкций воздушных линий электропередачи и подстанций, изложенный в [6], свидетельствуют о том, что в климатических условиях Беларуси наибольшие коррозионные поражения элементов наблюдаются в уровне земли, а также на участке 0,2 м выше и ниже уровня земли. В целях сохранения работоспособности и долговечности заземляющих проводников электрооборудования необходимо своевременное выполнение мероприятий по их антикоррозийной защите [7].

Для Республики Беларусь нехарактерны грунты с высокой и повышенной коррозийной активностью. Значения удельного электрического сопротивления грунтов идентичных типов во всех областях республики отличаются незначительно и могут быть приняты усредненными. В других грунтах, за исключением песка, ожидаемое удельное электрическое сопротивление не превышает 600 Ом·м [5].

С учетом максимальной глубины промерзания грунта в Беларуси (порядка 1,8 м) при длине вертикального электрода равной, 5 м, его активная часть по отводу в землю тока составляет только 3,2 м. Анализ результатов геоэлектрического разреза верхних слоёв земли на энергетических объектах Белорусской энергосистемы показал, что грунты с повышенной электропроводимостью и удельным электрическими сопротивлением до 100 Ом·м в большинстве случаев располагаются на глубине более 5 м. Поэтому в некоторых случаях для достижения нормированных величин электрических параметров ЗУ требуется большое количество вертикальных электродов и связанная с этим значительная дополнительная площадь под искусственный заземлитель.

Нерациональное использование стали при традиционном выполнении системы заземления, как правило, ведет к излишним капитальным затратам. При этом электробезопасность и защищенность электрооборудования от грозовых и внутренних перенапряжений не увеличиваются.

Указанную проблему, связанную с вертикальными электродами, можно решить путем применения глубинных вертикальных заземлителей (составных или из цельных труб). Согласно [4] целесообразность применения таких заземлителей в электросетевом строительстве обосновывается двумя основными факторами:

- заземлители могут достигать нижележащих слоев земли с низким удельным сопротивлением, что способствует снижению их сопротивления;
- сезонный коэффициент таких заземлителей при их длине 10 м и выше приблизительно равен 1.

Однако в Белорусской энергосистеме отсутствуют типовые проекты по применению глубинных заземлителей, поэтому ввиду индивидуального характера разработки происходит удорожание проектов заземляющих устройств, содержащих глубинные заземлители.

При проектировании, монтаже и обслуживании ЗУ в грунтах, имеющих высокое электрическое сопротивление, для снижения значения сопротивления заземления рекомендуется использовать ряд технических решений, одним из которых является применение обработки грунта веществами и смесями, неагрессивными к материалу заземлителя, для снижения сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве [8, 9]. Для обеспечения необходимого контакта составных глубинных заземлителей с землей по всей его длине в [2] рекомендована заливка глинистым или другим проводящим раствором в процессе погружения электрода, не подлежащим вымыванию в процессе эксплуатации.

Необходимо отметить, что с момента внедрения методических указаний ГПО “Белэнерго” [2, 5], затрагивающих вопросы проектирования и выполнения заземления на электрических станциях и подстанциях напряжением 35-750 кВ, прошло уже тринадцать лет, в связи с чем возникла необходимость в пересмотре и дополнении ТНПА [2, 5], а также рассмотрении возможности регламентированного применения в проектной деятельности новых технических решений, касающихся ЗУ электроустановок Белорусской энергосистемы. Так, например, в Республике Беларусь разработан химико-физический состав минеральной проводящей смеси для нормализации заземления за счет обеспечения низкого сопротивления ЗУ путем дисперсного введения модифицирующих добавок. Некоторые, на взгляд авторов, перспективные направления развития практики проектирования заземляющих устройств электроустановок Белорусской энергосистемы рассмотрены ниже.

Применение специальных проводящих составов

Одним из перспективных методов уменьшения электрического сопротивления грунта на площадке монтажа ЗУ, а значит и сопротивления самого искусственного заземлителя в целом, является обработка грунта путем введения специальных составов с низким удельным сопротивлением, неагрессивных к материалу заземлителя, стабилизирующих влажность [9, 10] непосредственно в околоэлектродном пространстве. В таком случае обеспечивается как уменьшение температуры замерзания воды, находящейся в грунте в несвязанном виде, за счет ее связывания, так и снижение сопротивления грунта, за счет формирования связанных электролитических растворов. Введение проводящих смесей с углеродосодержащими порошками эффективно при снижении высоких удельных электрических сопротивлений грунта (порядка 400–600 Ом·м) и малоэффективно при величинах сопротивлений менее 100 Ом·м, в таком случае он может давать сколь либо заметный эффект только в сочетании с гид-

ростабилизирующими веществами, например гидролизованным полиакрилонитрилом. На основе нормативных документов, принятых в Республике Беларусь, и имеющегося, в том числе Российского и зарубежного опыта авторами проводится ряд исследований влияния таких смесей на сопротивление заземляющих устройств, в сравнении с контрольными значениями.

При проведении натурных экспериментов на супесчаном грунте были смонтированы ЗУ (контуры), представляющие собой вертикальный составной электрод из оцинкованной стали диаметром 16 мм длинной 3 м и горизонтальный фрагмент соединительной полосы 4х50 мм той же длины, без применения каких-либо добавок. В околоэлектродном объеме грунта экспериментальных контуров проведена обработка смесью для оптимизации сопротивления заземлителя, или отдельными ее компонентами. Систематические измерения значений сопротивления ЗУ выполнялись более трех лет четырехпроводным методом при помощи измерителя ИС-10 при разных значениях температуры и влажности окружающей среды и грунта. Кроме того, методом вертикального электрического зондирования проведен цикл измерений удельного электрического сопротивления грунта в месте заложения экспериментальных и контрольных контуров.

Ранее были проведены исследования, в которых анализировалось как влияние смеси на сопротивление ЗУ, так и влияние отдельных ее компонентов [9].

Результаты экспериментальных исследований сопротивления контрольного контура (красная кривая), а также контура с разрабатываемым составом смеси (зеленая кривая) приведены на рис. 1. Также проанализирована динамика измерения сопротивления контура, обработанного единственным компонентом: гидролизованным полиакрилонитрилом [11] (черная кривая), являющимся нетоксичным, незагрязняющим окружающую среду и применяемым даже в сельскохозяйственном производстве веществом. Отметим, что гидролизованный полиакрилонитрил – основной стабилизирующий влажность компонент смеси.

Из полученных результатов измерений можно сделать вывод, что наименьшее значение сопротивления имеет ЗУ, околоэлектродное пространство которого обработано экспериментальной смесью для снижения сопротивления растеканию ЗУ. Применение смесей позволяет не только уменьшить колебания сопротивления растеканию ЗУ но и уменьшить сопротивление ЗУ в сравнении с контрольным контуром.

Комплексное применение смеси снижает температуру замерзания грунта на 4 ^{0}С, что дает возможность использовать более высокие средние многолетние низшие температуры при определении климатической зоны площадки месторасположения проектируемого электрооборудования.

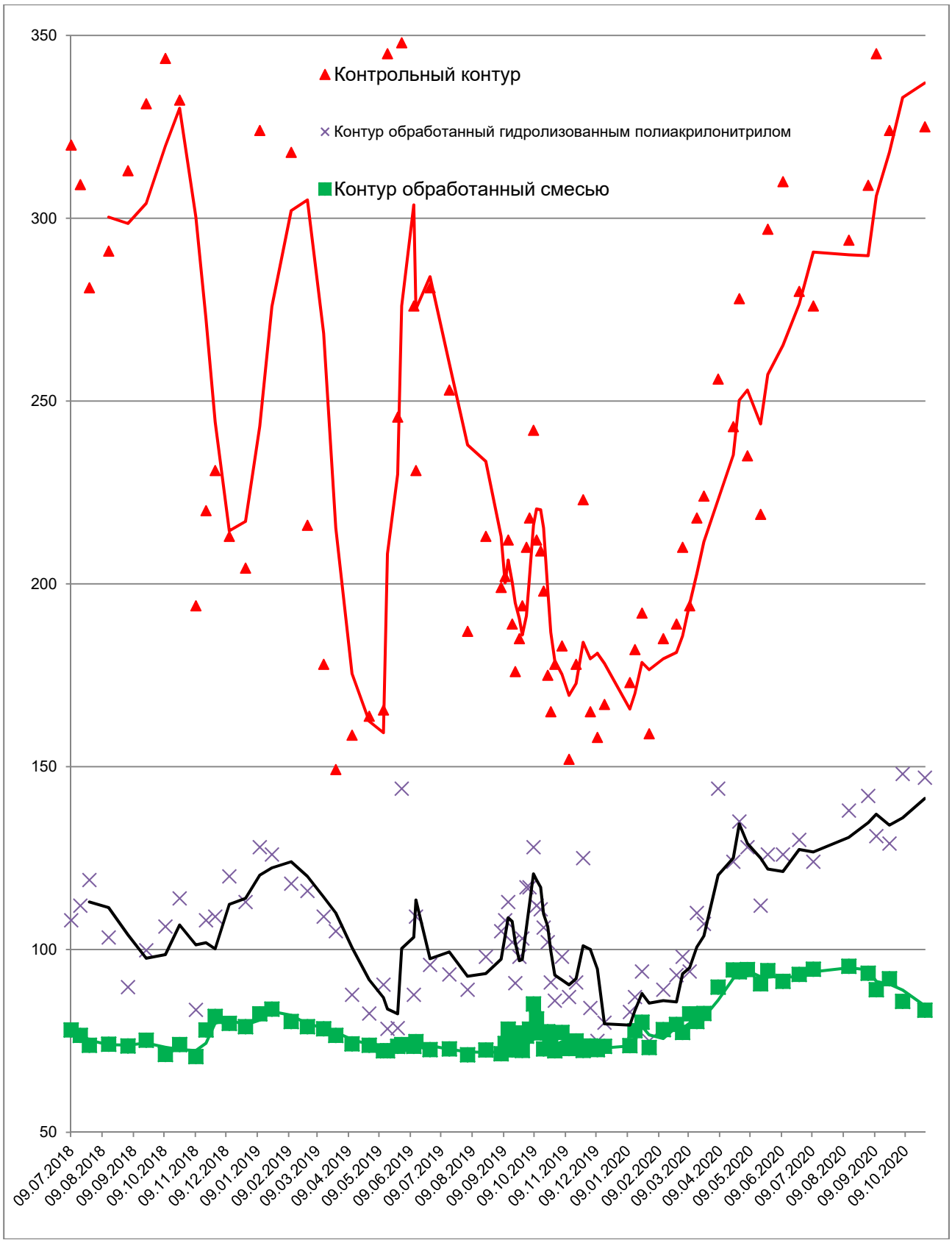

Рис. 1 – График сопротивления контрольного ЗУ (красная кривая), контура, обработанного гидролизованным полиакрилонитрилом (синяя кривая), и контура, обработанного смесью (зеленая кривая).

Исследования [9] показали, что влияние на снижение электрического сопротивления можно разделить на 2 фактора: изменение коэффициента

сезонности и уменьшение удельного сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве, что позволяет внести корректировки в расчеты сопротивления заземлителя при применении смесей при монтаже ЗУ.

В случае применения смесей для оптимизации сопротивления заземления происходит частичная замена исходного грунта в околоэлектродном пространстве на смесь, имеющую в рабочем состоянии значительно меньшее удельное сопротивление. Очевидно, что эффективность такой замены тем выше, чем больше разница удельного электрического сопротивления грунта и смеси, а также чем большее количество грунта заменено в околоэлектродном пространстве. При этом основным параметром, определяющим изменение сопротивления, будет площадь контакта смеси и исходного грунта, а в случае применения её по всей длине электрода – периметр контакта. В таком случае, эффективность замены спадает по экспоненциальному закону, и при значительном периметре контакта (более 1 м), фактически не имеет целесообразности. Экспериментальные данные показывают, что максимально эффективно применение замещающих смесей для создания периметров контакта в диапазоне 0,4–1,0 м, при этом при расчете конфигурации ЗУ необходимо использовать эквивалентное удельное сопротивление грунта вместо измеренного сопротивления исходного грунта.

Эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта с учетом замещения части грунта смесью можно определить, используя аналитическое выражение, полученное на основе экспериментальных данных для однослойного (1) и двухслойного грунта (2):

$$\rho_{экв} = \Psi \cdot (\rho_{грунта} \cdot e^{-1,3/P} + 20 / e^{4/P}), \tag{1}$$

$$\rho_{экв} = \Psi \left(\frac{\rho_{1_{грунта}} \cdot \rho_{2_{грунта}} \cdot l}{\left(\rho_{1_{грунта}} \left(l - H + t_{тр} \right) + \rho_{2_{грунта}} \left(H - t_{тр} \right) \right)} e^{-1,3/\mathrm{P}} + 20 / e^{4/\mathrm{P}} \right), \tag{2}$$

где $\rho_{экв}$ – искомое эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м;

$\rho_{грунта}$ – полученное в результате натурных измерений удельное сопротивление грунта, Ом·м;

ψ – коэффициент сезонности;

H – глубина верхнего слоя грунта, м;

$t_{дд}$ – глубина траншеи, м;

l – длина вертикального заземлителя, м;

P – периметр сечения замещающей смеси, м.

В случае использования вертикального составного заземлителя круглого сечения, заглубленного в грунт (рис. 2) в условиях обработки смесью околоэлектродного пространства, уравнение для расчета сопротивления заземлителя примет вид:

$$Rв = \frac{\rho_{экв}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d_{экв}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l}{4t - l} \right), \tag{3}$$

где $d_{экв}$ – эквивалентный диаметр заземлителя, м, определяемый по (4).

t – расстояние до середины длины вертикального стержня от поверхности грунта, м.

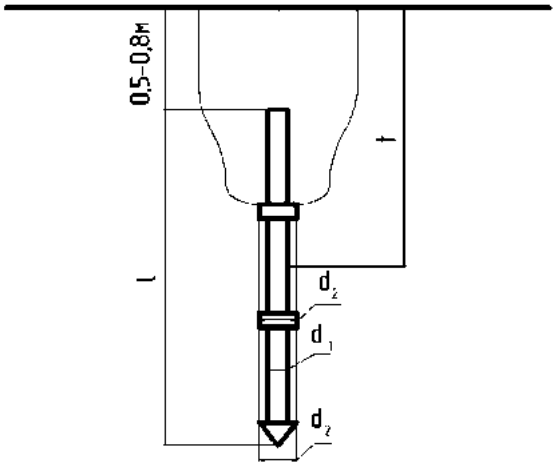

Рис. 2 – Схема размещения в грунте вертикального составного заземлителя.

Данная поправка корректирует вклад изменения удельного электрического сопротивления грунта в околоэлектродном слое (объема возникающего при прохождении соединительных муфт в грунте) при замещения грунта смесью с низким удельным сопротивлением.

$$d_{экв} = d_{зазем}\left(1 + \frac{(d_{муфты} - d_{зазем})}{d_{зазем}} \cdot \frac{\rho_{экв}}{\rho_{грунта_изм}}\right), \quad (4)$$

где $d_{зазем}$ – диаметр стержня составного заземлителя диаметр заземлителя, м;

$d_{муфты}$ – диаметр соединительной муфты, м;

$\rho_{грунта_изм}$ – измеренное удельное сопротивление грунта, Ом·м.

При исследовании влияния смеси на коэффициент сезонности установлено, что при засыпке смесью горизонтальной полосы коэффициент сезонности снижается до 20 % по сравнению с контрольным контуром. А в случае, если при монтаже вертикальных электродов смесью обработано и их околоэлектродное пространство, коэффициент сезонности снижается до 25 % по сравнению с контрольными значениями для необработанного контура.

Заземляющие пластины

В Республике Беларусь при разработке подраздела “Электроснабжение, силовое электрооборудование и электроосвещение” раздела “Инженерное оборудование, сети и системы” архитектурного проекта строительства объектов жилищного и гражданского назначения должно быть дано описание принципиальных решений по системам молниезащиты, заземления и уравнивания потенциалов [12].

Выравнивание потенциалов представляет собой частный случай защитного уравнивания потенциалов, производимого не в объеме, а на поверхности, по которой может передвигаться эксплуатирующий персонал.

Для обеспечения электромагнитной совместимости ЗУ должно прежде всего отвечать требованиям выравнивания потенциала, когда на различных проводящих заземленных частях электроустановки при всех режимах работы, включая аварийный, обеспечивается практически одинаковый потенциал или его значение не превышает допустимое для оборудования и устройств данной электроустановки [13]. Анализ проблемы выноса опасного потенциала в сеть низкого напряжения детально рассмотрены в [14] на примере распределительных кабельно-воздушных линий сети 110/35/6/0,4 кВ и 110/6/0,4 кВ.

В действующих ТНПА [2, 4, 8] при проектировании ЗУ электроустановок Белорусской энергосистемы для выравнивания потенциалов недостаточное внимание уделено применению заземляющих пластин и в частности пластин решетчатых (рис. 3).

Пластины заземляющие представляют собой особенный вид заземлителя, разработанный, прежде всего, для грунтов, где вертикальные заземлители или не дают желаемого эффекта снижения электрического сопротивления при их погружении, или их трудно смонтировать из-за каменистого грунта. Согласно проведенным расчетам по площади электрического контакта пластина заземляющая размером 750x500x4 мм соответствует вертикальному заземлителю из круглой стали Ø 16 мм и длиной 15 м, однако значительно проще монтируется и сокращает объемы земляных работ.

Использование заземляющих пластин является перспективным в случае монтажа их в грунтах, когда верхний слой земли имеет удельное сопротивление, меньшее, чем подстилающие слои (например, значительное увлажнение верхнего слоя в весенние и осенние месяцы).

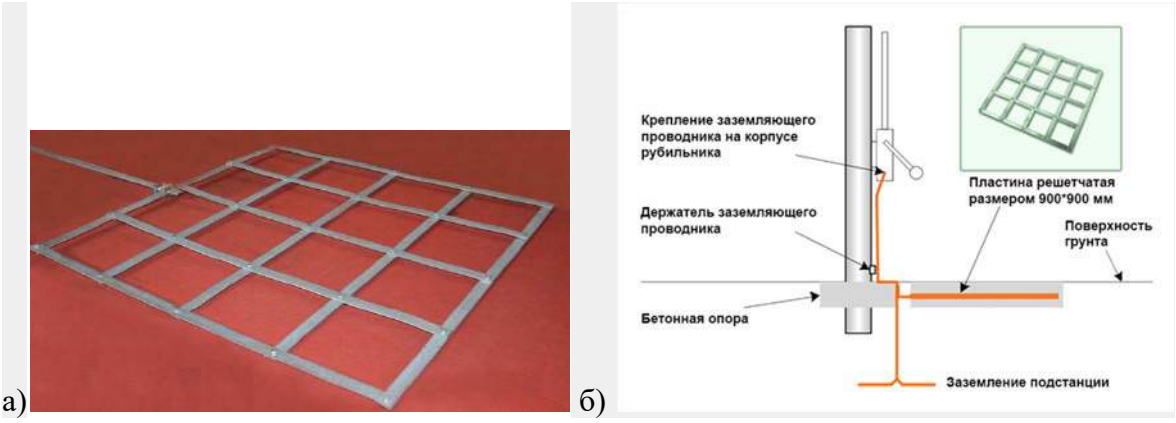

Рис. 3 – Внешний вид (а) и возможный вариант применения (б) пластин решетчатых.

При разработке [16] на основе анализа и обобщения данных об удельных электрических сопротивлениях грунта, полученных по резуль-

татам многолетних прямых измерений на построенных линиях электропередачи и подстанциях, составлена региональная таблица удельных сопротивлений пород грунта для Республики Беларусь, которой можно пользоваться при отсутствии непосредственных измерений.

Использование решетчатых заземляющих пластин (рис. 3, а) совместно со смесью для нормализации заземления позволяет получить такое же значение электрического сопротивления ЗУ, как и для сплошных металлических пластин, значительно снизив при этом металлоемкость.

Одним из перспективных направлений использования решетчатых заземляющих пластин является их монтаж в качестве потенциаловыравнивающих решеток на рабочих местах электроустановок для обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала.

Заключение

1. Применение смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила наиболее эффективно при использовании совместно с заземлителями, глубина заложения которых меньше глубины промерзания грунта, то есть находящимися в слоях грунта с наибольшими сезонными колебаниями, и будет расти при увеличении площади контакта таких заземлителей с грунтом, обработанным гидролизованным полиакрилонитрилом.

2. Дополнительное уменьшения коэффициента сезонности для вертикальных составных заземлителей, по-видимому, обусловлено влиянием смеси на их части смонтированные вблизи поверхности грунта.

3. Применение комплексных смесей, содержащих, помимо гидростабилизирующих добавок, также и нискодиспергированнные проводящие вещества, позволяет до трех раз уменьшить сопротивление ЗУ в сравнении с контрольными ЗУ, сгладить сезонные колебания сопротивления ЗУ и капитальные затраты на монтаж ЗУ путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются.

4. Применение пластин заземляющих совместно со смесью для нормализации заземления позволяет существенно снизить объемы земляных работ в местах, где применение вертикальных электродов малоэффективно.

5. Необходим пересмотр ТНПА [2, 4, 8] с целью их актуализации.

Литература

1. Титков В.В. Перенапряжения и молниезащита: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011, 222 с.

2. СТП 09110.47.103-07. Методические указания по проектированию заземляющих устройств электрических станций и подстанций напряжением 35–750 кВ. Мн.: ГПО Белэнерго, 2007, 75 с.

3. Ивлиев Е.А. К расчету электрических параметров стержневых заземлителей // Электричество, 1992, № 7, с. 41–44.

4. СТП 09110.47.203-07. Методические указания по выполнению заземления на электрических станциях и подстанциях напряжением

35–750 кВ. Мн.: ГПО Белэнерго, 2007. 48 с.

5. Драко М.А. Коррозия заземлителей электроустановок // Энергетическая стратегия, 2019, № 6 (69), с. 44–48.

6. Осипенко О.В., Драко М.А., Мойсеенко О.А. Анализ дефектов строительных конструкций высоковольтных подстанций и линий электропередачи и меры по недопущению их дальнейшего развития // Энергия и Менеджмент, 2015, № 1 (82), с. 5–9.

7. Колик, В.Р., Драко М.А., Мойсеенко О.А. Актуальность обследования заземляющего устройства и устройств молниезащиты подстанций 35 кВ и выше // Энергетическая стратегия, 2014, № 2, с .23–25.

8. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемосдаточных испытаний: ТКП 339-2011 (02230). Мн.: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2011, 593 с.

9. Барайшук, С.М., Павлович И.А. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажность добавками // Агропанорама, 2020, № 1 (137), с. 20–23.

10. Shi, L., Yang N., Zhang H., Chen L., Tao L., Wei Y., Liu H., Luo Y. A novel poly (glutamic acid) /silk-sericinhydrogel for wound dressing: Synthesis, characterization and biological evaluation // Materials Science and Engineering: C, 2009, Vol. 48 (1), pp. 533–540.

11. Ширинов Ш.Д., Джалилов А.Т. Исследование кинетики набухания синтезированных гидросорберов на основе гидролизованного полиакрилонитрила // Universum: Химия и биология : электрон. научн. журн., 2018, № 3(45).

12. ТКП 45-1.02-295-2014. Строительство Проектная документация Состав и содержание. Мн.: Минстройархитектуры, 2014, 45 с.

13.Борисов Р.К., Жарков Ю.В., Горшков А.В. // Электро, № 1, 2000, с. 30-33.

14. Кузьмин И.А., Магдеев Н.Н., Евдокунин Г.А., Брилинский А.С., Грунина О.И. Вопросы влияния современных тенденций развития городских распределительных сетей на опасность выноса потенциала в сеть низкого напряжения // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017, № 5, с. 84-91.

16. СТП 09110.20.189-12. Методические указания по проектированию и выполнению заземляющих устройств опор ВЛ напряжением
35-750 кВ. Приложение В (рекомендуемое). Типовой альбом заземляющих устройств опор ВЛ. Мн.: ГПО Белэнерго, 2012, 56 с.