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 c.

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 АГ- РЕГАТОРА 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 ЭФ- ФЕКТИВНОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ В ТСС С УЧЕТОМ НАДЕЖ-

НОСТИ 27

**Ахметова И.Г., Лапин К.В., Ахметов Т.Р., Бальзамова Е.Ю.** ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА КАЧЕСТВА ПО- СТАВЛЯЕМОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ПОТРЕБИТЕЛЯМ 39

**Назаров С.Г., Рахимов М.Р., Хекимов Г.Х.** ОБ ОПТИМАЛЬНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕ-

МОЙ 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 ДИЭЛЕК- ТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ОСНОВЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТ-

НОГО ИЗЛУЧЕНИЯ 66

**Буякова Н.В, Крюков А.В., Середкин Д.А., Лэ Ван Тхао** КОМ- ПЬЮТЕРНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРО-

МАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ 73

**Павлов П.П., Фандеев В.П., Бутаков В.М., Баймеева Д.Р., Са- фиуллина В.М.** ДИАГНОСТИКА ЦИФРОВЫХ ПРИБОРОВ И УСТРОЙСТВ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 83

**Чахирев Л.В., Плотников В.В., Плотникова Л.В.** ИСПОЛЬЗОВА- НИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМНОГО АНА- ЛИЗА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬЮ И СТРУКТУРОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 90

**Плохов И.В., Савраев И.Е., Ильин А.В., Козырева О.И., Логи- нов С.Ю.** ДИАГНОСТИКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕ- СКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЁМА ТУР-

БОГЕНЕРАТОРОВ 100

**Малышев А.В., Карнаух Л.В., Будик А.Н.** СОВРЕМЕННЫЙ КОМ- ПЛЕКС ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ РАБОТЫ ВЛ 220-500 кВ В УСЛОВИЯХ ИНТЕН- СИВНЫХ ГОЛОЛЕДНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ 110

**Короткевич М.А., Стелькин Ф.В.** ДИАГНОСТИКА КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 10 кВ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯ-

ДОВ 120

**Шарыгин М.В., Вуколов В.Ю., Обалин М.Д., Петров А.А.** ИНТЕ- ГРАЦИЯ НОВЫХ И ТРАДИЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕК-

ТРОСЕТЯХ 6-35 КВ ………………………………………………. 126

**Вуколов В.Ю., Колесников А.А., Обалин М.Д., Папков Б.В.** ПО- ВЫШЕНИЕ НАДЁЖНОСТИ ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ РЕ- ЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ ИГР 136

**Драко М.А., Барайшук С.М., Ерусланов В.Л.** ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРАКТИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЗА- ЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК БЕЛОРУС-

СКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ 144

**Вагин Г.Я., Куликов А.Л., Севостьянов А.А.** О ВЛИЯНИИ ПОКА- ЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ТОЧ- НОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ЭЛЕК-

ТРОСНАБЖЕНИЯ 154

**Коверникова Л.И., Буй Х.Н., Войтов О.Н., Семенова Л.В.** ОП- ТИМИЗАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МОЩНОСТИ

АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ 164

**Бандурин И.И., Иванов В.А., Козырев И.Н., Коробов В.М., Мар- тиросян А.А., Тращенков С.В., Хаймин А.Ю.** ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫБОРА СЕЧЕНИЙ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ С УЧЁ- ТОМ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ 174

**Булатов Ю.Н., Крюков А.В., Шуманский Э.К.** ВЛИЯНИЕ АСИН- ХРОНИЗИРОВАННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ НА АВАРИЙНЫЕ РЕ- ЖИМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ПОНИЖЕННЫМ КАЧЕ-

СТВОМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ 184

**Саитов С.Р., Чичирова Н.Д.** ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И ПРИ- ЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ НА МЕМБРАНАХ ОБРАТ-

НОГО ОСМОСА 194

**Гильфанов Б.А., Чичиров А.А., Филимонова А.А.** АНАЛИЗ ВЫ- СОКОМИНЕРАЛИЗОВАННЫХ 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 ЭЛЕ- МЕНТОВ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БО- КОВОГО ТЕПЛОВОГО ПОТОКА, ТЕПЛООБМЕНА И ПОВЕРХ-

НОСТНОЙ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ 217

**Желтухина Е.С., Павлова М.В., Зиганшин М.Г.** ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО И ТВЕР- ДОГО 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.** ИСПОЛЬЗОВА- НИЕ МАЗУТНОГО НЕФТЕШЛАМА И ДРЕВЕСНЫХ ЛЕСОПИЛЬ-

НЫХ ОТХОДОВ В МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ 250

**Захарова В.Е., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е.** МАТЕМАТИ- ЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ДИАГНОСТИ- ЧЕСКИХ ВИБРАЦИОННО-АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ЛИ- НЕЙНО-ПРОТЯЖЕННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ЖКХ 257

**Марьин Г.Е., Менделеев Д.И., Осипов Б.М.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОП- ТИМАЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ

ГЛУБОКОЙ РАЗГРУЗКЕ 264

**Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В.** ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СИ- СТЕМ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ С УЧЕ- ТОМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ В

ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ 270

**Шакурова Р.З., Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е.** К ВОПРОСУ ИНЕРЦИАЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ НИЗ- КОЧАСТОТНЫХ ВИБРАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ТРУБОПРО-

ВОДАХ ЖКХ 276

**Ибадов А.А., Кондратьев А.Е., Гапоненко С.О.** ИССЛЕДОВА- НИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФАЗОВОЙ СКОРОСТИ ВОЛН ЛЭМБА ОТ

ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРУБОПРОВОДОВ ЖКХ 283

**Бабаходжаев Р.П., Ташбаев Н.Т., Мирзаев Д.А.** ИСПОЛЬЗОВА- НИЕ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ДЛЯ ВИБ- РАЦИИ ЛОКАЛЬНЫХ ТУРБУЛИЗАТОРОВ В ТРУБЧАТЫХ ТЕП-

ЛООБМЕННИКАХ 288

**Хуснутдинова Э.М., Николаева Л.А.** ОЧИСТКА ДЫМОВЫХ ГА-

ЗОВ ТЭС МОДИФИЦИРОВАННЫМ ШЛАМОМ 298

**Власова А.Ю., Власов С.М.** ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕ- СКОЙ УСТАНОВКИ УТИЛИЗАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД ПОСЛЕ РЕГЕ- НЕРАЦИИ Н - КАТИОНИТОВЫХ ФИЛЬТРОВ 305

**Романова В.В., Хромов С.В., Суслов К.В.** МНОГОФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭКСПЛУАТА- ЦИОННУЮ 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 ВВОД-

НЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ 0,4 КВ 319

**Савельев В.А., Мельникова О.С., Батаева В.В.** ВЛИЯНИЕ МЕХАНИ- ЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ НА РИСК ОТКАЗОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМА-

ТОРОВ 328

**Ахметбаев Д.С., Джандигулов А.Р., Быстрова С.В.** СИСТЕМ- НЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТРАНСФОР-

МАЦИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ 338

**Ахметбаев Д.С., Джандигулов А.Р., Бердыгожин А.С.** ТОПО- ЛОГИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ МОЩНОСТИ КОМ- ПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕК-

ТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 347

**Ваньков Ю.В., Запольская И.Н.** ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ДО ПОТРЕБИТЕ- ЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МОДЕРНИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ГОРЯЧЕГО ВО-

ДОСНАБЖЕНИЯ 355