Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования «ОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

БОГАЧКОВ Игорь Викторович

Методы и средства прогнозирования эксплуатационных параметров физических каналов оптических телекоммуникационных систем

Специальность: 05.12.13 - Системы, сети и устройства телекоммуникаций Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор,

Майстренко Василий Андреевич

Омск-2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 5

1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМ ДИАГНОСТИКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ 16

1.1. Основные задачи мониторинга ВОЛС 17

1.2. Основные методы мониторинга 19

1.3. Основные требования к системам мониторинга 24

1.4. Общие принципы построения и функционирования систем мониторинга 25

1.5. Ранняя диагностика и контроль надежности оптических кабелей .... 32

1.6. Обнаружение несанкционированного доступа к ВОЛС 44

Выводы по первой главе 46

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА БРИЛЛЮЭНОВСКОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН 47

2.1. Физические основы метода бриллюэновской рефлектометрии 47

2.2. Математическое описание процессов распространения светового сигнала в оптических волокнах 55

2.3. Определение профиля спектра РМБ в ОВ различных видов 63

2.4. Математическое моделирование распространения света в ОВ

с учетом рассеяния Мандельштама - Бриллюэна 83

2.5. Результаты моделирования напряжённых участков ОВ 89

Выводы по второй главе 96

3. ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА - БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ 98

3.1. Обнаружение «проблемных» мест в оптических волокнах

на разных стадиях изготовления кабелей с помощью BOTDR 98

3.2. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на СРМБ оптических волокон 106

3.3. Экспериментальные исследования РМБ

при поперечных воздействиях на оптические волокна 119

3.4. Экспериментальные исследования влияния изгибов и микроизгибов оптических волокон на характеристики РМБ 124

3.5. Экспериментальные исследования влияния температуры

на спектр РМБ и характеристики оптических волокон 135

3.6. Обнаружение предаварийных участков оптических волокон

в проложенных ВОЛС с помощью BOTDR 145

Выводы по третьей главе 151

4. ИССЛЕДОВАНИЯ РАССЕЯНИЯ МАНДЕЛЬШТАМА - БРИЛЛЮЭНА В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ... 153

4.1. Экспериментальные исследования РМБ в оптических волокнах

со смещённой дисперсией 154

4.2. Экспериментальные исследования спектра РМБ

в оптических волокнах с ненулевой смещённой дисперсией и в оптических волокнах с повышенной устойчивостью к изгибам 160

4.3. Экспериментальные исследования спектра РМБ

в оптическом волокне, легированном эрбием 176

4.4. Экспериментальные исследования спектра РМБ

в оптическом волокне «Panda» 187

4.5. Исследования температурных зависимостей спектра РМБ

в оптических волокнах различных видов 198

4.6. Выявление факторов, вызывающих изменение натяжения оптических волокон, на основании бриллюэновских рефлектограмм 201

Выводы по четвёртой главе 207

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВНЕШНИХ ФАКТОРОВ 209

5.1. Анализ существующих моделей 209

5.2. Модель процессов обслуживания ВОЛС 213

5.3. Описание модели для оценки надёжности 218

5.4. Расчёт параметров надёжности 221

5.5. Оценка влияния температуры на показатели готовности ВОЛС 229

5.6. Определение долговечности ВОЛС в зависимости

от степени натяжения ОВ 232

Выводы по пятой главе 235

6. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРИБОРОВ ДЛЯ АНАЛИЗА МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ 236

6.1. Анализ схем бриллюэновских рефлектометров 236

6.2. Совершенствование алгоритмов определения натяжения волокон

по бриллюэновским рефлектограммам 239

6.3. Совершенствование приборов для ранней диагностики

оптических волокон 246

Выводы по шестой главе 265

7. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ПО ХАРАКТЕРИСТИКАМ СПЕКТРА РМБ 267

7.1. Определения разновидностей оптических волокон

по профилю спектра РМБ 267

7.2. Программы для определения разновидностей

оптических волокон по профилю спектра РМБ 274

7.3. Программы для определения характеристик РМБ оптических волокон, определения их натяжения

и выявления типа воздействия 285

Выводы по седьмой главе 290

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 291

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 293

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК 298

ПРИЛОЖЕНИЕ 332

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВдиссертационнойработерассмотренызадачиипроблемымониторингаираннейдиагностикисостоянияОВВОЛСРанняядиагностикафизическогосостоянияОВпозволяетзаблаговременновыявитьпотенциальноопасныеучасткивпроложенныхОКкоторыеиззавоздействияповышенныхмеханическихнапряженийилииззасущественныхтемпературныхизмененийстечениемвременимогутпривестикразрушениюОВинарушениюнормальнойработыВОСП

Внаучноквалификационнойработеполученыновыетеоретическиеипрактическиерезультаты

 РазработаныиусовершенствованыматематическиемоделираспространениясигналоввОВсразличнойструктуройраспределенияпоказателяпреломлениясучётомРМБинаихосновесозданыалгоритмыикомпьютерныепрограммыпозволяющиеосуществлятьраннююдиагностикуфизическогосостоянияОВипрогнозироватьнадёжностьфункционированияВОЛСвцелом

 СформированабазаданныхбриллюэновскихрефлектограммихарактеристикРМБНаосновесформированнойврезультатеэкспериментальныхисследованийбазыданныхбриллюэновскихрефлектограммОВразличныхвидовипроизводителейсозданакомпьютернаяпрограммакотораяпозволяетклассифицироватьразновидностиОВ

 РазработаныалгоритмыпозволяющийповыситьэффективностьвычисленияБСЧвсветоводеускоритьпроцессполучениякартиныраспределениянатяжениявдольсветоводаатакжеклассифицироватьпотенциальноопасныйфакторвызвавшийизменениеБСЧипродольногонатяжениявОВ

 ПриведенырезультатыисследованийвлиянийизгибовОВнабриллюэновскиерефлектограммыкоторыепозволяютсистемаммониторингаВОЛСобнаруживатьмакроизгибыОВхарактерныедлямалозаметныхспособовНСД

 РазработанаметодикадлякомплекснойоценкинадёжностиОВВОЛСсучётомразличныхфактороввоздействующихнаОВвОК

 РазработаныструктурныесхемыприборовдляраннейдиагностикисостоянияОВвОКпозволяющиеупроститьпоискпотенциальноненадёжныхучастковивсоставесистеммониторингаВОЛСпрогнозироватьнадёжностьфункционированияоптическихканаловтелекоммуникационныхсистемзасчётпримененияопорныхканаловибазыданныххарактеристикРМБ

ВдиссертационнойработесозданытеоретикоприкладныеосновыраннейдиагностикисостоянияОВВОЛСосновобеспеченияэффективногофункционированияоптическихсистемиустройствтелекоммуникацийсформированыбазыданныхбриллюэновскихрефлектограммихарактеристикРМБОВразличныхтиповипроизводителейсозданыалгоритмыкомплекснойоценкидолговечностиинадёжностифункционированияОВ

ВозможнасущественнаяэкономияресурсовзасчёткомплексногоиспользованияБОИРисовмещениятелекоммуникационныхизмерительныхиуправляющихсистемПриэтомдлядиагностикинесколькихВОЛСдостаточновсистемумониторингавключитьодинБОИРкоторыйсзаданнойпериодичностьювопределённыемоментывременибудеттестироватьвыбранныеучасткиВОСПсформированиемотчётныхрефлектограммисравнениемихпредыдущимиТакжевозможнаинтеграциясистемымониторингаВОЛСсодержащейБОИРссистемамимониторингасостоянияразличныхобъектовсвысокимимеханическиминагрузкамивысотныезданиякрупныеинженерныесооружениямостыитпимеющимивстроенныераспределённыеоптоволоконныедатчикинатяжениямеханическоговоздействияилитемпературыдляпериодическихизмеренийпокаждомуоптическомуканалувзависимостиотустановленныхприоритетов

НаоснованиисформированнойбазыданныхвозможнозаблаговременноевыявлениепотенциальноопасныхучастковвОВклассификацияразновидностейОВвВОЛСопределениетипапотенциальноопасногофакторадляОВиОК

Всёэтопозволяетповыситьэффективностьпрогнозированияэксплуатационныхпараметровфизическихканаловоптическихтелекоммуникационныхсистем