

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

Вестник СибГУТИ № 1 (45) 2019

Выпускается ежеквартально, выходит с 2007 г.

Председатель редакционного совета В. Г. Беленький, к.т.н., доц.

Заместитель председателя редакционного совета А. Н. Фионов, д.т.н., проф.

Редакционный совет:

| | |
|---|---|
| В. П. Бакалов, д.т.н., проф. | В. И. Носов, д.т.н., проф. |
| В. Б. Барахнин, д.т.н., доц. | В. П. Петров, д.т.н., проф. |
| В. Ю. Васильев, д.х.н. | С. В. Поршнева, д.т.н., проф. |
| В. Н. Васюков, д.т.н., проф. | А. С. Родионов, д.т.н., с.н.с. |
| Н. И. Горлов, д.т.н., проф. | А. И. Романенко, д.ф.-м.н., проф. |
| Н. Л. Казначеева, д.э.н., доц. | Б. Я. Рябко, д.т.н., проф. |
| В. С. Канев, д.т.н., доц. | И. И. Рябцев, д.ф.-м.н. |
| А. И. Карпович, д.э.н., проф. | Э. Сименс, д.т.н. |
| Б. И. Крук, к.т.н., проф. | О. В. Стукач, д.т.н., проф. |
| В. В. Лебедев, д.т.н., проф. | В. К. Трофимов, д.т.н., проф. |
| А. В. Лихачёв, д.т.н. | А. И. Фалько, д.т.н., проф. |
| С. Н. Мамоиленко, д.т.н., доц. | С. В. Федоренко, д.т.н., доц. |
| В. Г. Мартынец, д.ф.-м.н. | А. М. Федотов, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН |
| А. Б. Мархасин, д.т.н., проф. | А. Г. Черевко, к.ф.-м.н., доц. |
| О. Г. Мелентьев, д.т.н., проф. | С. В. Шилдовский, д.т.н. |
| Р. В. Мещеряков, д.т.н., проф. | Ю. И. Шокин, д.ф.-м.н., акад. РАН |
| И. Г. Неизвестный, д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН | В. П. Шувалов, д.т.н., проф. |

Редакция:

А. Н. Фионов (главный редактор), М. Ю. Галкина (заведующая редакцией),
Н. А. Двуреченская (технический и литературный редактор, компьютерная вёрстка),
Т. А. Алфёрова (лингвист-корректор), Е. Л. Грозовская (секретарь)

Адрес редакции

630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86

e-mail: vestnik@sibsutis.ru

Информация о журнале доступна в сети Internet по адресу <http://vestnik.sibsutis.ru>.

Журнал включён в Перечень ВАК российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёных степеней доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-25835 от 29.09.2006. ISSN 1998-6920. Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» – 82519.

Отпечатано в издательском центре СибГУТИ. Бумага офсетная, формат А4. Тираж 300 экз.

© СибГУТИ, 2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Б. П. Зеленцов, Е. П. Ионикова, В. П. Шувалов Модели элементов оптической сети доступа в условиях резервирования и учета недостоверного контроля их технического состояния | 3 |
| Н. А. Филимонова Методология расчета трафика в локальных сетях ЭВМ на основе экспериментально-численного моделирования | 16 |
| И. В. Богачков, Н. И. Горлов Обнаружение механически напряжённых участков оптических волокон в оптических кабелях с помощью бриллюэновских рефлектометров | 32 |
| Л. Ф. Данилова, Н. Ю. Захаров, В. С. Канев, А. В. Никифорова, М. В. Облахова, А. Н. Полетайкин, Ю. В. Шевцова Комплексная методика оценивания компетентности сотрудников отрасли связи на основе личностных и профессиональных характеристик | 42 |
| Б. П. Зеленцов, А. С. Трофимов Исследование влияния способа задания периодичности проверок на надежность объекта | 62 |
| М. В. Ушакова, Ю. А. Ушаков, А. Л. Коннов, Д. В. Горбачев Модель распределенной самоорганизующейся сети сенсоров IoT | 70 |
| Д. А. Казначеев, Б. И. Крук, Е. В. Метелёва, С. Е. Плакидина Исследование роли самооценки результатов обучения в формировании предпринимательских компетенций у студентов СибГУТИ | 79 |
| В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора | 92 |

Модели элементов оптической сети доступа в условиях резервирования и учета недостовверного контроля их технического состояния

Б. П. Зеленцов, Е. П. Ионикова, В. П. Шувалов

В статье приведены модели функционирования в непрерывном времени оптических элементов пассивной оптической сети доступа. Рассматриваются несколько вариантов: без резервирования, с резервированием 1:1 и с резервированием 1+1. В качестве причины нарушения работоспособности элементов рассматриваются скрытые отказы. В моделях учтены проверки технического состояния основного и резервного элемента и восстановление работоспособности после обнаружения отказа. На основе предельных вероятностей состояний произведён расчёт стационарного коэффициента готовности и коэффициента технического использования с учётом ошибок контроля I и II рода.

Ключевые слова: пассивная оптическая сеть, оптический линейный терминал, магистральный кабель, сплиттер, стационарный коэффициент готовности, скрытые отказы, ошибки контроля I и II рода, нелинейность шкалы рефлектометра.

1. Введение

Классическая пассивная оптическая сеть доступа состоит из следующих элементов: центрального станционного устройства, на котором размещено оптическое линейное устройство, фидерного волокна, распределительной оптической сети, оконечных абонентских устройств. К такой сети предъявляются довольно жесткие требования по надежности, методы обеспечения которых прописаны в рекомендациях G.983 МСЭ-Т. Выход из строя различных элементов сети доступа по-разному сказывается на имидже оператора. Так, выход из строя OLT или фидерного волокна приводит к потере связи со всеми оптическими сетевыми устройствами, подключенными к OLT по фидерному волокну, и снижению доверия со стороны потребителей со всеми вытекающими отсюда последствиями. Именно поэтому особое внимание следует уделять надежности OLT и фидерного волокна, а также ее повышению за счет резервирования.

С целью выполнения соглашения об уровне обслуживания (SLA) и, соответственно, уменьшения эксплуатационных затрат оператор стремится уменьшить время, требуемое на восстановление после отказов. В свою очередь, время восстановления напрямую зависит от времени обнаружения и локализации отказа. Одним из основных эксплуатационных факторов, позволяющих прогнозировать ухудшение характеристик оптических волокон, доступность оптических компонентов и обеспечивать требуемый уровень надежности, является непрерывный мониторинг системы.

Сбои в работе PON могут возникнуть как на физическом уровне (неисправность элемента, физического интерфейса), так и на прикладном уровне (нарушение работы логического интерфейса). Большинство традиционных подходов к управлению отказами в оптических сетях построено на диагностике в более высоких слоях на основе отчетов о состоянии сигналов, собранных с различных контрольных точек. Такая система мониторинга производит пе-

риодическое сканирование доступности устройств для системы управления по протоколу SNMP. Однако использование такого метода может привести к большим расходам на сетевое управление. Более того, протокол верхнего уровня часто требует более длительного времени обнаружения отказа, чем техника физического уровня [1]. Мониторинг работы компонентов PON физического уровня основан на принципах оптической рефлектометрии, оптического кодирования, спектрального анализа. Подобные методы мониторинга рассмотрены в [1–8].

В настоящей работе рассматриваются вопросы оценки надежности в условиях недостоверного контроля при резервировании одного из элементов системы доступа по схемам 1:1 и 1+1. Это потребовало разработки соответствующих математических моделей с использованием матричных методов математического моделирования, предложенных в работах [9, 10].

Методика математического моделирования, предложенная в [9, 10], ранее применялась в работах [11, 12]. Так, в [11] рассмотрена модель функционирования линии связи в условиях недостоверного контроля ее технического состояния при отсутствии резервирования. В [12] выполнена оценка влияния ошибок контроля на показатели надежности системы с многопутевой маршрутизацией.

В соответствии с документом [13] контроль работоспособности сети доступа должен осуществляться в трех точках. Точка 1 является ближайшей к OLT. Она находится на коммутационной панели, т.е. при этом оценивается работоспособность OLT, магистрального кабеля (МК) и сплиттера. Именно выход из строя этих элементов приводит к отказу в обслуживании большого числа абонентских устройств. Из перечисленных выше устройств наименее надежным является магистральный кабель. Для диагностического контроля магистрального кабеля используются рефлектометры. При этом ошибки контроля I и II рода возникают из-за нелинейности вертикальной шкалы рефлектометра и переотражения импульсов света в волокне [14].

Абсолютная достоверность результатов контроля определяется выражением

$$D = 1 - P_{ош} = 1 - (\alpha + \beta),$$

где α – вероятность ошибки контроля I рода (работоспособная система признается неработоспособной);

β – вероятность ошибки контроля II рода (неработоспособную систему признают работоспособной).

Будем рассматривать систему, в которой резервирование 1+1 или 1:1 применяется только для магистрального кабеля, который характеризуется наименьшим значением коэффициента готовности.

Для элементов сети доступа – OLT и сплиттера – определим коэффициенты готовности. Коэффициент готовности цепочки OLT – сплиттер равен произведению коэффициентов готовности. Будем полагать, что α и β для элементов этой цепочки равны нулю.

В качестве характеристики процесса восстановления выступает такой параметр, как интенсивность восстановления $\mu_в$.

Значения λ и $\mu_в$ OLT, магистрального кабеля и сплиттера в соответствии с [15] приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики элементов сети

| Параметры элемента | Значение параметра для элементов | | |
|--------------------|----------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| | OLT | магистрального кабеля (50 км) | сплиттера |
| λ , 1/час | $3.5 \cdot 10^{-5}$ | $1.4 \cdot 10^{-4}$ | $2.4 \cdot 10^{-6}$ |
| $\mu_в$, 1/час | 0.2 | 0.07 | 0.083 |

Диапазоны α и β для магистрального кабеля рассчитываются с использованием [16]. Результирующее значение коэффициента неготовности ($K_{H.G}$) при контроле в точке 1 определим, учитывая независимость отказов элементов цепочки OLT – МК – сплиттер после определения коэффициентов неготовности МК:

$$K_{H.G} = \sum_{i=1}^2 K_{H.G}^{(i)},$$

где $K_{H.G}^{(1)}$ – коэффициент неготовности цепочки OLT – сплиттер, $K_{H.G}^{(2)}$ – коэффициенты неготовности для МК, определяемые при отсутствии резервирования и резервировании вида 1:1 и 1+1.

2. Функционирование системы

Анализируемая система без резервирования представляет собой совокупность OLT, оптического магистрального кабеля, сплиттера, системы контроля, периодически проверяющей работоспособность функционирующего элемента, и системы восстановления (рис. 1). В качестве системы мониторинга используется оптический импульсный рефлектометр ФТВ-7400Е. Система является работоспособной до того момента, пока элемент не откажет. При обнаружении отказа он поступает на восстановление, после которого вновь становится работоспособным.

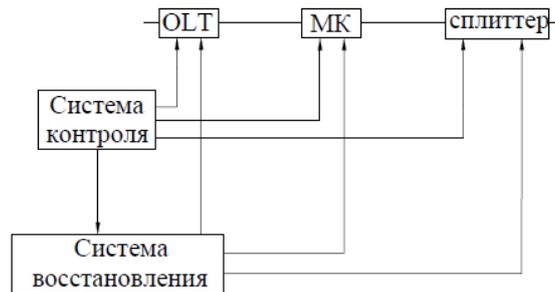


Рис. 1. Исследуемая система без резервирования

Система с резервированием магистрального кабеля представляет собой совокупность OLT, основного и резервного оптического кабеля (далее – элементов), сплиттера. Помимо этих элементов система включает систему контроля, периодически проверяющую работоспособность функционирующего элемента, и систему восстановления (рис. 2). Различают резервирование двух видов: 1:1 и 1+1 [17].

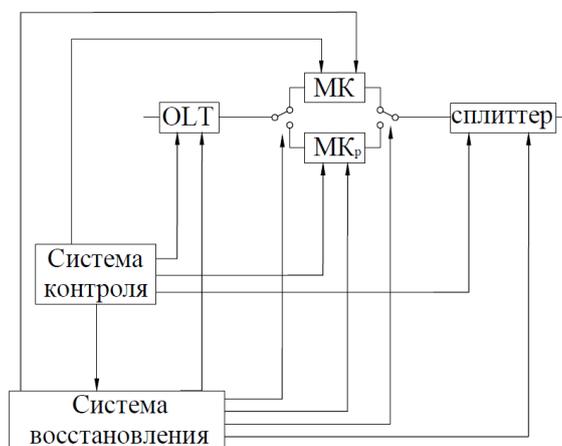


Рис. 2. Исследуемая система с резервированием

Функционирование системы по схеме резервирования кабеля 1:1 происходит следующим образом. При отказе элемента система переключается на резервный элемент, находящийся до этого времени в ненагруженном резерве, и весь трафик передается через него. Отказавший элемент поступает на восстановление, после которого вновь становится работоспособным и способным передавать данные. Система считается работоспособной, если работоспособен хотя бы один элемент (основной или резервный), и отказывает, если оба неработоспособны.

Отличие системы со схемой резервирования 1+1 заключается в том, что резервный элемент находится в нагруженном резерве. При отказе одного из функционирующих элементов система функционирует с использованием другого элемента, а отказавший поступает на восстановление.

Полагаем, что в рассмотренных системах основной и резервный элементы имеют одинаковую интенсивность отказов, обозначенную через λ , все события происходят в случайные моменты времени, время нахождения процесса в любом состоянии является случайным и распределено по показательному закону.

В исследовании учитываются только скрытые отказы, то есть те, которые могут быть обнаружены системой контроля благодаря периодическим проверкам. Проверка всех элементов проводится в случайные моменты времени (зачастую в моменты наименьшей загрузки сети). Таким образом, система контроля во всех случаях характеризуется интенсивностью начала периодической проверки γ и интенсивностью завершения периодической проверки μ_n . Числовые значения этих параметров взяты в соответствии с [18].

В системе без резервирования восстановление элемента требует ремонта или его замены. В системе с резервированием 1:1 при восстановлении отказавшего основного элемента происходит переключение трафика на резервный элемент. Во всех трех системах восстановление OLT и сплиттера требует ремонта или замены.

Предполагается, что брак восстановления отсутствует.

Введем следующие условия:

1. Отказы элементов независимы и случайны.
2. В каждый момент времени может произойти только один отказ.
3. Работоспособный элемент функционирует, пока по результатам проверки не будет признан неработоспособным.
4. Только функционирующий элемент подвергается проверке.
5. В один момент времени может восстановиться только один элемент.
6. Элемент отправляется на восстановление только по результатам периодической проверки.

Рассматриваемые системы относятся к системам длительного использования и поэтому их характеристики могут быть получены в стационарном режиме.

3. Графы состояний дублированной системы и системы без резервирования

Состояния элементов систем обозначаются одной буквой для системы без резервирования и двумя буквами для дублированной системы. Первая буква в обозначении состояния дублированной системы обозначает состояние основного элемента, вторая – резервного.

Р – элемент работоспособен и функционирует;

Х – элемент работоспособен и не функционирует (находится в ненагруженном (холодном) резерве);

Г – элемент работоспособен и функционирует (находится в нагруженном (горячем) резерве);

Н – элемент неработоспособен и функционирует;

В – элемент восстанавливается;

Б – элемент заблокирован.

В соответствии с [19, 20] состояния системы можно разбить на три подмножества:

1) подмножество работоспособных состояний U ;

2) подмножество неработоспособных состояний V ;

3) подмножество состояний, в которых применение рассматриваемой системы по назначению не предусмотрено ввиду технического обслуживания и ремонта S .

Граф состояний, характерный для OLT и сплиттера во всех трех системах и для магистрального кабеля в системе без резервирования, представлен на рис. 3.

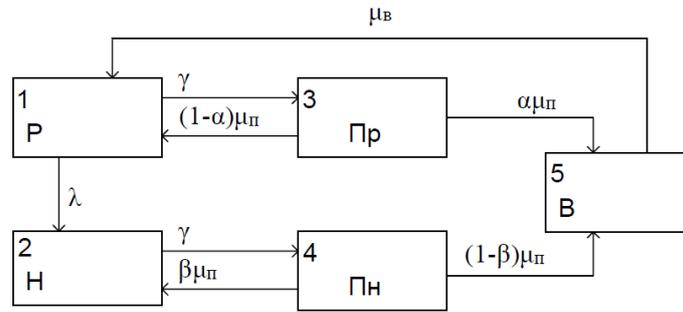


Рис. 3. Граф состояний системы без резервирования

На графе (рис. 3) используются следующие обозначения:

1. Р – элемент работоспособен и функционирует.
2. Н – элемент неработоспособен и функционирует.
3. Пр – периодический опрос работоспособного элемента.
4. Пн – периодический опрос неработоспособного элемента.
5. В – элемент восстанавливается.

Соответственно, три подмножества для системы без резервирования: $U = \{1\}$, $V = \{2; 5\}$, $S = \{3; 4\}$.

Граф состояний, характерный для дублированной системы кабелей 1:1, представлен на рис. 4.

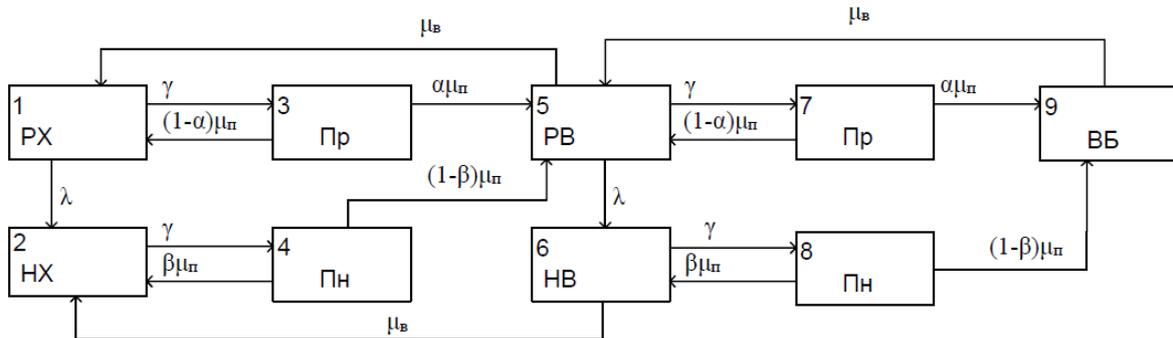


Рис. 4. Граф состояний дублированной системы 1:1

На графе (рис. 4) используются следующие обозначения:

1. РХ – основной элемент работоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в ненагруженном резерве.
2. НХ – основной элемент неработоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в ненагруженном резерве.
3. Пр – периодический опрос работоспособного основного элемента в том случае, когда резервный элемент находится в ненагруженном резерве.
4. Пн – периодический опрос неработоспособного основного элемента в том случае, когда резервный элемент находится в ненагруженном резерве.

5. РВ – один элемент работоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
6. НВ – один элемент неработоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
7. Пр – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
8. Пн – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
9. ВБ – один элемент неработоспособен и заблокирован, а другой восстанавливается.

Соответственно, три подмножества для системы с резервированием 1:1: $U = \{1; 5\}$, $V = \{2; 6; 9\}$, $S = \{3; 4; 7; 8\}$.

Граф состояний, характерный для дублированной системы кабелей 1+1, представлен на рис. 5.

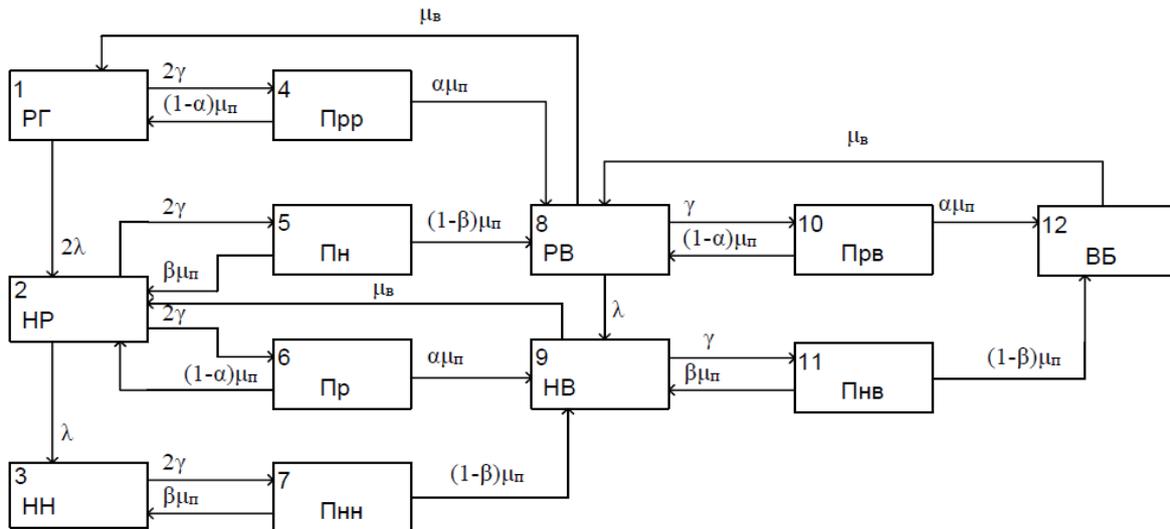


Рис. 5. Граф состояний дублированной системы 1+1

На графе (рис. 5) используются следующие обозначения:

1. РГ – основной элемент работоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в нагруженном резерве.
2. НР – основной элемент неработоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в нагруженном резерве.
3. НН – оба элемента функционируют и неработоспособны.
4. Прр – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда оба работоспособны.
5. Пн – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда второй элемент работоспособен.
6. Пр – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда второй элемент неработоспособен.
7. Пнн – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда оба неработоспособны.
8. РВ – один элемент работоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
9. НВ – один элемент неработоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
10. Прв – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
11. Пнв – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
12. ВБ – один элемент неработоспособен и заблокирован, а другой восстанавливается.

Соответственно, три подмножества для системы с резервированием 1:1: $U = \{1; 2; 8\}$, $V = \{3; 9; 12\}$, $S = \{4; 5; 6; 7; 10; 11\}$.

4. Математическая модель

Математические модели основаны на теории однородных марковских процессов в непрерывном времени. Переходы между состояниями описываются постоянными интенсивностями. Математическое описание рассматриваемых систем производится матричными методами [9, 10]. Матричные методы привлекательны ввиду их компактности, простоты матричных преобразований и возможности расчетов с помощью современных средств.

Исходные характеристики представлены в виде квазистохастической матрицы, которую мы будем называть матрицей интенсивностей $\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$, где λ_{ij} ($i \neq j$) – интенсивность непосредственного перехода из i -го состояния в j -е в непрерывном времени; $\lambda_{ii} = -\sum_{j, j \neq i} \lambda_{ij}$.

Матрицы интенсивностей для систем без резервирования и дублированных систем 1:1 и 1+1 имеют вид:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -(\lambda + \gamma) & \lambda & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & \gamma & 0 \\ (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} \\ 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} \\ \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\text{B}} \end{pmatrix},$$

$$\Lambda_{(1:1)} = \begin{pmatrix} -(\lambda + \gamma) & \lambda & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -(\lambda + \gamma + \mu_{\text{B}}) & \lambda & \gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -(\gamma + \mu_{\text{B}}) & 0 & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\text{B}} \end{pmatrix},$$

$$\Lambda_{(1+1)} = \begin{pmatrix} -2(\lambda + \gamma) & 2\lambda & 0 & 2\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\lambda + 4\gamma) & \lambda & 0 & 2\gamma & 2\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\lambda & 0 & 0 & 0 & 2\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & 0 & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda + \gamma + \mu_{\text{B}}) & \lambda & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{\text{B}} + \gamma) & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\text{B}} \end{pmatrix}.$$

Процесс переходов от состояния к состоянию является эргодическим, поэтому предельные вероятности состояний существуют. Матрицы интенсивностей Λ , $\Lambda_{(1:1)}$ и $\Lambda_{(1+1)}$ являются достаточными для нахождения предельных вероятностей состояний.

Предельные вероятности состояний могут быть вычислены по формулам двух типов [9, 10]:

1) на основе определителей:

$$\pi_i = \frac{|\Lambda_i|}{\Delta};$$

2) на основе обращения матриц:

$$\pi_i = \frac{1}{1 - \bar{\lambda}_i \cdot (\Lambda_i)^{-1} \cdot \dot{e}},$$

где π_i – предельная вероятность i -го состояния;

Λ_i – матрица, полученная из исходной матрицы Λ удалением i -й строки и i -го столбца;

$|\Lambda_i|$ – определитель матрицы Λ_i ;

$\Delta = \sum_{i=1}^n |\Lambda_i|$ – сумма определителей по всем состояниям;

$\bar{\lambda}_i$ – i -я строка матрицы Λ без элемента λ_{ii} ;

n – число состояний системы;

\dot{e} – столбец, все элементы которого равны 1.

Математические модели реализованы в числовом виде, что позволяет использовать полученные результаты непосредственно в процессе моделирования.

В соответствии с [19] при определении стационарных коэффициентов готовности и неготовности могут быть исключены планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Поэтому эти показатели вычисляются через предельные вероятности подмножеств U и V , то есть предельная вероятность подмножества S исключается. Аналогично в коэффициенте технического использования учитывается время пребывания объекта в работоспособном состоянии и время простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом. В соответствии с этим показатели надёжности системы вычисляются следующим образом:

1) стационарный коэффициент готовности: $K_G = \frac{\pi_U}{\pi_U + \pi_V}$;

2) стационарный коэффициент неготовности: $K_H = \frac{\pi_V}{\pi_U + \pi_V}$;

3) коэффициент технического использования: $K_{ТИ} = \frac{\pi_U}{\pi_U + \pi_S}$,

где π_U , π_V , π_S – предельные вероятности подмножеств U , V , S :

$$\pi_U = \sum_{i \in U} \pi_i; \quad \pi_V = \sum_{i \in V} \pi_i; \quad \pi_S = \sum_{i \in S} \pi_i.$$

5. Проверочные процедуры

Следует отметить, что вычисление промежуточных и выходных характеристик системы целесообразно сопровождать проверочными процедурами для проверки правильности проведенных вычислений. Проверочные процедуры могут быть необходимыми или достаточными и применяться на разных этапах алгоритма. Одни и те же промежуточные характеристики целесообразно производить разными методами. Вычисление предельных вероятностей по разным алгоритмам можно считать достаточной процедурой оценки правильности их вычисления. Кроме того, в число проверочных процедур целесообразно включить условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^n \pi_i = 1.$$

Можно отметить необходимые процедуры проверки правильности сформированной матрицы интенсивностей эргодического множества состояний, что особенно актуально при большом числе состояний [9]:

$$\text{а) } |\Lambda| = 0; \text{ б) } \Lambda \cdot \dot{e} = \dot{o},$$

где \dot{e} – столбец, все элементы которого равны 1;

\dot{o} – столбец, все элементы которого равны 0.

6. Результаты исследования

В результате моделирования функционирования систем без резервирования, с резервированием 1:1 и 1+1 в непрерывном времени получены значения, показывающие зависимость коэффициента неготовности (K_H) от вероятностей ошибок контроля I (α) и II рода (β) (табл. 2–4).

Таблица 2. Влияние вероятностей ошибок I и II рода на коэффициент неготовности системы без резервирования

| Вероятность ошибки II рода | При вероятности ошибки I рода | | | | |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | $\alpha = 0$ | $\alpha = 0.00001$ | $\alpha = 0.0001$ | $\alpha = 0.001$ | $\alpha = 0.0057$ |
| $\beta = 0$ | $2.24 \cdot 10^{-3}$ | $3.08 \cdot 10^{-3}$ | 0.01 | 0.08 | 0.33 |
| $\beta = 0.00001$ | $2.24 \cdot 10^{-3}$ | $3.08 \cdot 10^{-3}$ | 0.01 | 0.08 | 0.33 |
| $\beta = 0.0001$ | $2.24 \cdot 10^{-3}$ | $3.08 \cdot 10^{-3}$ | 0.01 | 0.08 | 0.33 |
| $\beta = 0.001$ | $2.24 \cdot 10^{-3}$ | $3.08 \cdot 10^{-3}$ | 0.01 | 0.08 | 0.33 |
| $\beta = 0.0053$ | $2.24 \cdot 10^{-3}$ | $3.08 \cdot 10^{-3}$ | 0.01 | 0.08 | 0.33 |

Таблица 3. Влияние вероятностей ошибок I и II рода на коэффициент неготовности системы с резервированием 1:1

| Вероятность ошибки II рода | При вероятности ошибки I рода | | | | |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| | $\alpha = 0$ | $\alpha = 0.00001$ | $\alpha = 0.0001$ | $\alpha = 0.001$ | $\alpha = 0.0057$ |
| $\beta = 0$ | $2.43 \cdot 10^{-4}$ | $2.47 \cdot 10^{-4}$ | $3.50 \cdot 10^{-4}$ | $7.27 \cdot 10^{-3}$ | 0.14 |
| $\beta = 0.00001$ | $2.43 \cdot 10^{-4}$ | $2.47 \cdot 10^{-4}$ | $3.50 \cdot 10^{-4}$ | $7.27 \cdot 10^{-3}$ | 0.14 |
| $\beta = 0.0001$ | $2.43 \cdot 10^{-4}$ | $2.47 \cdot 10^{-4}$ | $3.50 \cdot 10^{-4}$ | $7.27 \cdot 10^{-3}$ | 0.14 |
| $\beta = 0.001$ | $2.43 \cdot 10^{-4}$ | $2.47 \cdot 10^{-4}$ | $3.50 \cdot 10^{-4}$ | $7.27 \cdot 10^{-3}$ | 0.14 |
| $\beta = 0.0053$ | $2.43 \cdot 10^{-4}$ | $2.47 \cdot 10^{-4}$ | $3.50 \cdot 10^{-4}$ | $7.27 \cdot 10^{-3}$ | 0.14 |

Таблица 4. Влияние вероятностей ошибок I и II рода на коэффициент неготовности системы с резервированием 1+1

| Вероятность ошибки II рода | При вероятности ошибки I рода | | | | |
|----------------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | $\alpha = 0$ | $\alpha = 0.00001$ | $\alpha = 0.0001$ | $\alpha = 0.001$ | $\alpha = 0.0057$ |
| $\beta = 0$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.19 \cdot 10^{-4}$ | $2.28 \cdot 10^{-4}$ |
| $\beta = 0.00001$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.19 \cdot 10^{-4}$ | $2.28 \cdot 10^{-4}$ |
| $\beta = 0.0001$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.19 \cdot 10^{-4}$ | $2.28 \cdot 10^{-4}$ |
| $\beta = 0.001$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.19 \cdot 10^{-4}$ | $2.28 \cdot 10^{-4}$ |
| $\beta = 0.0053$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.16 \cdot 10^{-4}$ | $2.20 \cdot 10^{-4}$ | $2.28 \cdot 10^{-4}$ |

Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятностей ошибок контроля I и II рода для различных схем резервирования представлены на рис. 6–8.

Когда вероятность ошибки контроля I рода изменяется от 0 до 0.0057, коэффициент неготовности изменяется на несколько порядков. При использовании систем без защиты или с защитой 1:1 увеличение ошибки I рода критично, в то время как при использовании системы с защитой 1+1 коэффициент неготовности хоть и растет, но даже при больших значениях α остается малым, что позволяет сохранить работоспособность системы при любых значениях α .

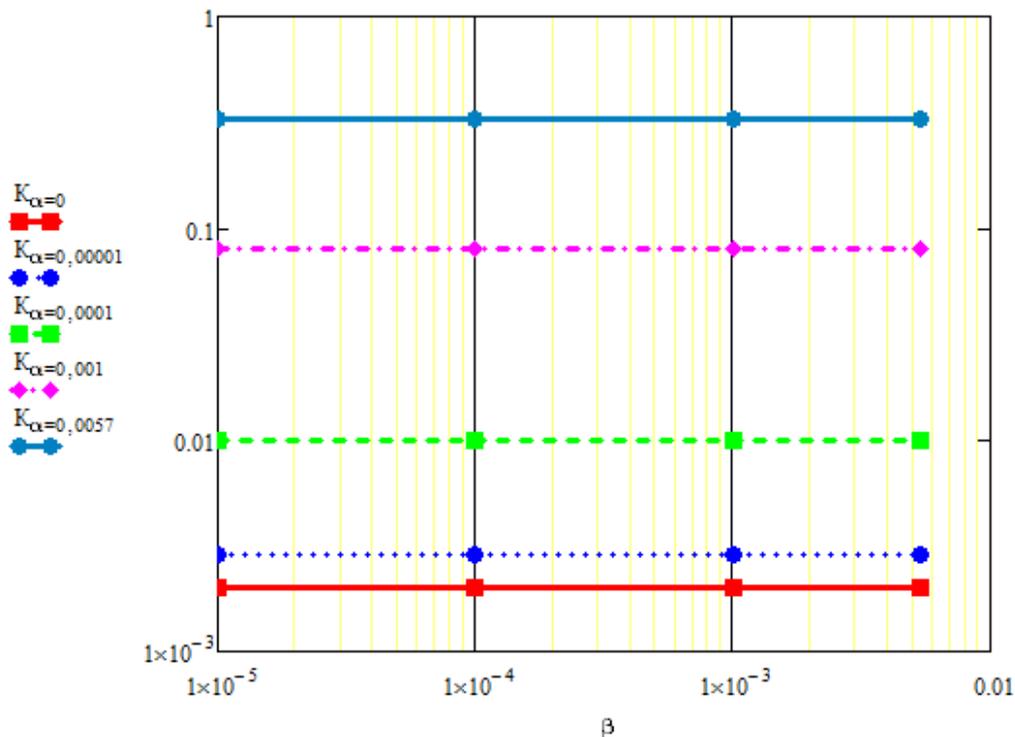


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятности ошибки контроля II рода при фиксированных значениях вероятности ошибки контроля I рода для системы без резервирования

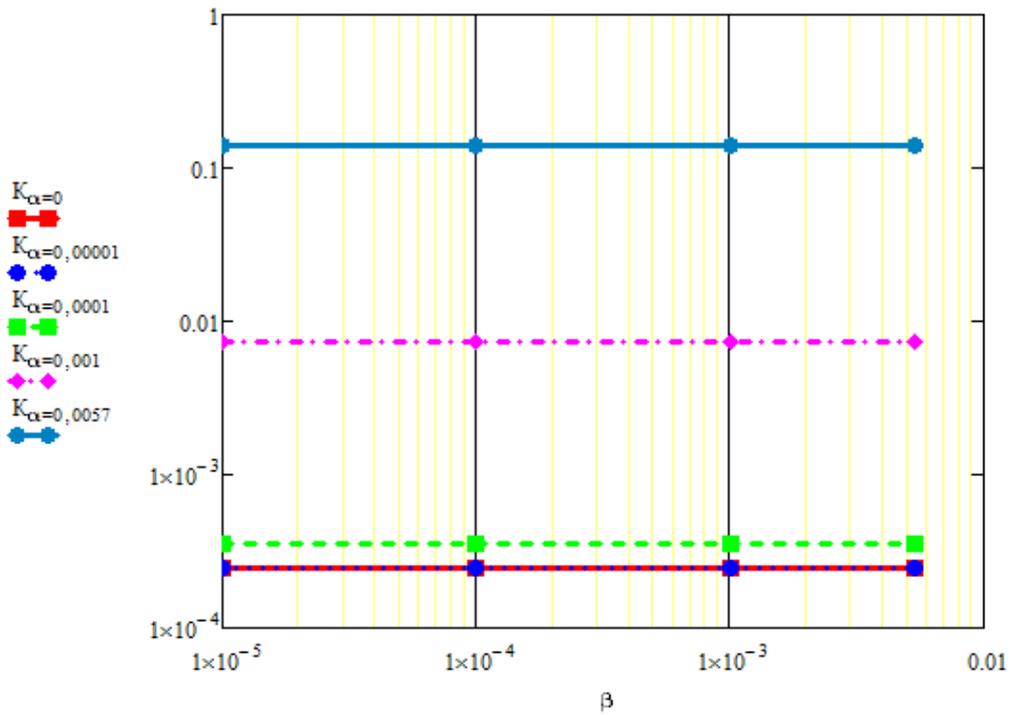


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятности ошибки контроля II рода при фиксированных значениях вероятности ошибки контроля I рода для системы с резервированием 1:1

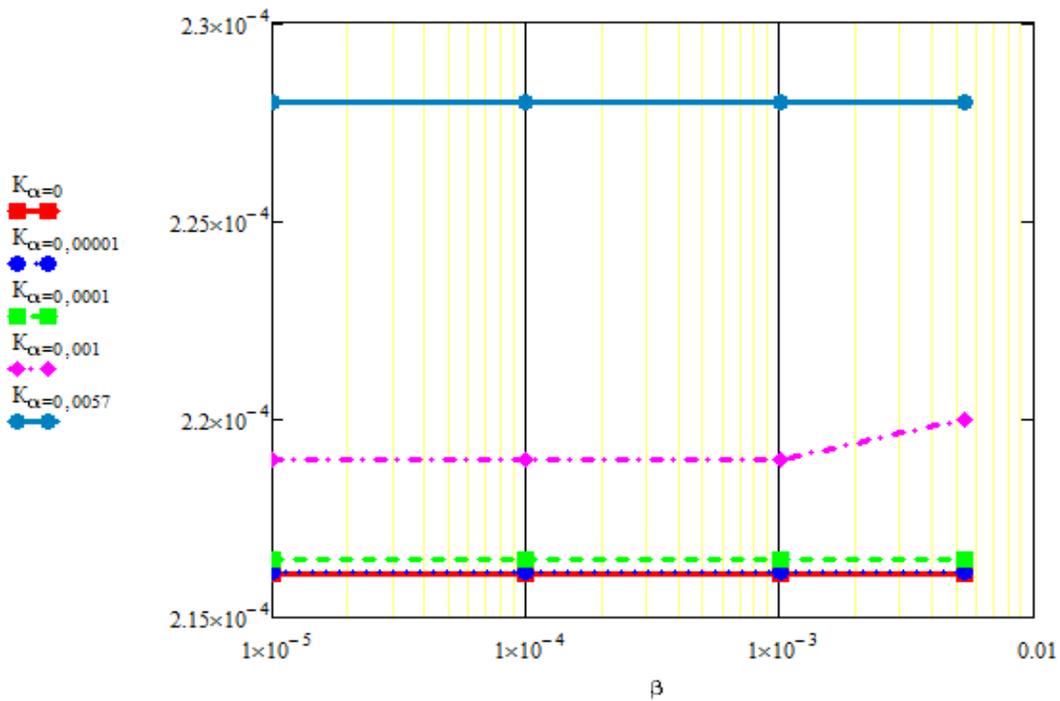


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятности ошибки контроля II рода при фиксированных значениях вероятности ошибки контроля I рода для системы с резервированием 1+1

Коэффициент неготовности с увеличением вероятности ошибки контроля II рода от 0 до 0.0053 для всех исследуемых систем практически не изменяется. Слабая зависимость коэффициента неготовности от β в сравнении с зависимостью от α связана с тем, что ошибки элементов являются редкими событиями и, соответственно, ошибки контроля отказавших элементов появляются реже, чем события ошибок работоспособных элементов.

Так как вероятность ошибки I рода оказывает значительное влияние на параметры, необходимо предъявить определенные требования к системе контроля, а именно, к такой характеристике системы, как нелинейность вертикальной шкалы рефлектометра. При невозможности обеспечить требуемую надежность только уменьшением коэффициента нелинейности необходимо предусматривать систему с резервированием с учетом компромисса между высокими показателями коэффициента готовности сети и капитальными и эксплуатационными расходами.

7. Заключение

Разработанные модели позволили рассчитать и спрогнозировать такие показатели, как коэффициенты готовности и неготовности и коэффициент технического использования. Модели позволили учесть в системах скрытые отказы, вероятности ошибок проверки I и II рода, а также исследовать зависимость показателей надёжности от различных влияющих факторов.

Приведённый подход позволяет совершенствовать систему сбора и обработки информации об эксплуатации линий связи, ведь в зависимости от условий, в которых функционирует сеть, а также от задаваемых параметров надежности ошибки контроля могут быть достаточно критичными в тех или иных случаях. Предложенные модели могут быть дополнены и усовершенствованы при учёте других факторов и за счёт усложнения условий.

Достоинством представленных моделей является возможность их реализации средствами компьютерного моделирования на основе таких систем, как Mathcad и MATLAB.

Литература

1. *Esmail M. A., Fathallah H.* Optical Coding for Next-Generation Survivable Long-Reach Passive Optical Networks // *J. Opt. Commun. Netw.* 2012. V. 4, № 12. P. 1062–1074.
2. *Sivakami S., Ramprabu G., Hemamalini V., Veronica K., Thirupoorani C.* Fiber Fault Localization in FTTH Using Online Monitoring // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering.* 2015. V. 3, Is. 3. P. 1763–1768.
3. *Wong E., Mas Machuca C., Wosinska L.* Survivable Hybrid Passive Optical Converged Network (HPCAN) Architectures Based on Reflective Monitoring // *Journal of Lightwave Technology.* 2016. 34 (18):1–1.
4. *Premadi A., Effendi A., Antonov B.* Optical Managing Project – Effectively Survivability and Monitoring System // *Int. J. of Future Computer and Commun.* 2016. V. 5, № 1. P. 66–69.
5. *Rad M. M., Fouli K., Fathallah H. A., Rusch L. A., Maier M.* Passive Optical Network Monitoring: Challenges and Requirements // *IEEE Communications Magazine.* 2011. P. 45–52.
6. *Premadi As., Syuhaimi Ab. Rahman M., Najib Moh. Saupé M., Jumari K.* Access Control System: Monitoring Tool for Fiber to the Home Passive Optical Network // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering.* 2009. V. 3, № 2. P. 142–147.
7. *Rad M. M., Fathallah H., Rusch L. A.* Fiber Fault Monitoring for Passive Optical Networks Using Hybrid 1-D/2-D Coding // *IEEE Photonics Tech. Let.* 2008. V. 20, № 24. P. 2054–2056.
8. *Esmail M. A., Fathallah H.* Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials.* 2013.
9. *Зеленцов Б. П.* Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017.
10. *Зеленцов Б. П.* Матричные модели функционирования оборудования систем связи // *Вестник СибГУТИ.* 2015. № 4. С. 62–73.
11. *Зеленцов Б. П., Максимов В. П., Шувалов В. П.* Модель функционирования линии связи в условиях недостоверного контроля технического состояния // *Вестник СибГУТИ.* 2015. № 3. С. 35–43.

12. *Shuvalov V. P., Varaksina I. Yu.* Estimation of Control Errors Influence on Availability of Multipath Routing System // Proc. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2014. P. 420–425.
13. FTTH handbook. Edition 8 D&O committee. Revision date: 13.02.2018.
14. *Листвин А. В., Листвин В. Н.* Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАРпт, 2005. 208 с.
15. Recommendations ITU-T G-series – Supplement 51 (2012). Passive optical network protection considerations.
16. P 50-609-40-01. Рекомендации. Технологическое проектирование технического контроля.
17. Recommendations ITU-T G.983.5 (2012). A broadband optical access system with enhanced survivability.
18. OTDR. Оптический импульсный рефлектометр. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]. URL: https://fibertop.ru/files/category_14538/instr_c14538_2.pdf.
19. ГОСТ 27.002-15. Надёжность в технике. Термины и определения.
20. ГОСТ Р 53480-2009. Надёжность в технике. Термины и определения.

*Статья поступила в редакцию 25.05.2018;
переработанный вариант – 28.11.2018.*

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: zelentsovb@mail.ru.

Ионикова Елена Петровна

аспирант, кафедра передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ, e-mail: ionikova.lena@mail.ru.

Шувалов Вячеслав Петрович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ, e-mail: shvp04@mail.ru.

Models of optical access network elements in the conditions of redundancy and accounting of unreliable control of their technical condition

B. P. Zelentsov, E. P. Ionikov, V. P. Shuvalov

The paper presents functioning models in continuous time of optical elements of a passive optical access network. Several options are being considered: without reservation, with reservation 1:1 and with reservation 1+1. Covert failures are considered to be the reason for the malfunction of the elements. The models take into account technical condition checks of the main and backup elements and the recovery of working capacity after a failure detection. Based on the limiting probabilities of the states, the stationary availability factor and the technical utilization factor were calculated taking into account control errors of I and II type.

Keywords: passive optical network, optical linear terminal, trunk cable, splitter, steady state availability, latent fault, check-out errors of the first and second kind, non-linearity of the reflectometer scale.

Методология расчета трафика в локальных сетях ЭВМ на основе экспериментально-численного моделирования

Н. А. Филимонова

Экспериментально-численный подход основан на численном моделировании процесса, при котором существенная часть данных, используемых в модели, берется непосредственно из результатов натурного эксперимента (экспериментов). Подход применяется в различных областях науки и техники. В данной статье описывается методология расчета трафика в локальных сетях ЭВМ на основе экспериментально-численного моделирования на примере расчета трафика от одной Интернет-службы – электронной почты.

Ключевые слова: трафик, Интернет, моделирование.

1. Введение

Расчет (прогнозирование, оценка) трафика в телекоммуникационных сетях является классической задачей, которой посвящено множество работ, начиная с классических по теории телетрафика [1–7]. Изменение технологий передачи данных формировало запросы на изменение методов расчета трафика. Так, если классическая теория телетрафика в значительной степени использовала методы теории массового обслуживания [8–10], то впоследствии возросла роль теории случайных процессов и теории графов (в самых широких ее применениях) [11–14]. Возросла роль различного типа моделирования [15–19], что было связано с тем, что развитие математических методов анализа передачи данных не всегда успевало за развитием технической базы связи, а с другой стороны – с появлением, а затем и широкой доступностью ЭВМ, сделавшими методы моделирования практически доступными для широкого круга специалистов в области связи.

Из широкого круга проблем расчета трафика выделяется задача расчета трафика в сетях ЭВМ. Быстрый (можно сказать, взрывной) рост числа ЭВМ и их объединение в различного рода сети [20, 21] делают задачу расчета трафика в сетях ЭВМ актуальной.

Различие масштабов (размеров) сетей оказывает естественное влияние на проблематику задачи расчета трафика в этих сетях. Имея в виду рассмотрение потоков данных, порождаемых службами Интернет, мы коснемся только задач расчета трафика в сетях ЭВМ.

Исторически сложилось, что наибольшее внимание уделялось задаче расчета суммарного трафика в сетях глобального или регионального уровней или больших корпоративных сетях, когда трафик является результатом активности многих тысяч пользователей, а масштаб времени измеряется сутками, неделями и месяцами [22, 23]. Спецификой суммарного трафика в таких сетях является то, что вопрос о вкладе в него той или иной службы Интернет не может быть поставлен в связи с «перемешиванием» (эргодичностью [24]) вкладов от единичных служб при несопоставимости объемов суммарного трафика и трафиков от единичных служб (единичных пользователей). Это приводит как к специальным моделям трафика, так и к специальным задачам и методам изучения трафика на глобальном уровне. Эти задачи и методы являются основными в данное время. С примерами моделей, задач и методов этого

типа можно ознакомиться в [25, 26] (см. там же ссылки на другие работы, общее число которых в настоящее время велико).

Автор рассматривает вопрос об объеме трафика в локальных сетях ЭВМ.

Вопрос о передаче данных в локальных сетях первоначально возник как актуальный во время первых опытов объединения ЭВМ в сети и был связан с несовершенством сетевого оборудования, точнее, практическим отсутствием стандартного сетевого оборудования и методов построения сетей. Затем этот вопрос практически не возникал, поскольку разработанные технические решения позволяли производить обмен достаточно ограниченными объемами данных на уровне локальных сетей без возникновения проблем. Вопрос об ограниченности ресурсов локальных сетей стал вновь возникать в последнее время в связи с ростом объема данных, передаваемых в локальных сетях, например, технологии Wi-Fi [27] и т.п.

Для автора вопрос моделирования потоков данных локальных сетей имеет, помимо прикладного, научный интерес. Все данные в сети Интернет имеют источник – пользователя, понимаемого в широком смысле, но зачастую – физическое лицо, и исследование потоков данных «у источника» представляется имеющим научный интерес. Изучение текущих источников литературы показало, что вопрос практически не изучен. Рассмотрение вопроса в предыдущих работах автора [29, 30] показало, что рассмотрение потоков данных в локальной сети приводит к возникновению самостоятельной модели генерирования данных, не тождественной ни моделям СМО [31], ни классическим моделям теории случайных процессов [32], ни имитационному моделированию генерирования пакетов [33]. Возникновение такой модели было основано на экспериментально обнаруженном и статистически обоснованном факте, что каждая служба Интернет создает (генерирует) специфический поток данных. Эти потоки являются случайными, но как таковые они четко идентифицируются и могут быть промоделированы, что было сделано для ряда Интернет-служб в работах автора.

В работе представлена методология применения экспериментально-численного подхода применительно к расчету трафика в локальных сетях ЭВМ, возникающего в результате использования Интернет-служб.

В настоящее время этот тип трафика является основным в сетях ЭВМ для массового пользователя, в связи с чем тема является актуальной.

Имея в виду изложение методологии, автор ограничился рассмотрением трафика, возникающего при использовании только одной службы Интернета – электронной почты. Рассмотрение общего случая производится по той же схеме [29, 30]. При этом (при необходимости) следует провести натурные эксперименты и получить модели элементарного потока – потока данных, создаваемого данной Интернет-службой. Хотя совместная работа нескольких служб является типичной ситуацией, автор не рассматривал этот случай, поскольку имеющиеся предварительные расчеты показывают, что изложение составило бы несколько статей как в связи с объемом, так и в связи с необходимостью излагать вопросы суммирования случайных потоков. Кроме того, вопрос осложнился бы междисциплинарным характером задачи. Именно, поток данных создается как работой Интернет-службы, так и работой пользователя. Если изучение работы служб Интернета относится прямо к компетенции автора, то изучение режима работы пользователей – сотрудников предприятия (учреждения) или частных лиц – относится к компетенции таких дисциплин, как организация и нормирование труда и социология [34]. Это требует изучения вопроса совместно с соответствующими специалистами.

2. Натурный эксперимент

2.1. Характеристика сети

Эксперименты по измерению трафика проводились на базе локальных компьютерных сетей 1-го корпуса Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ). Данные о локальной сети взяты с сайта СибГУТИ (sibsutis.ru). Сеть построена по древовидной топологии с вершиной в Отделе информационных технологий. Коммутаторы ядра объединены в 20-гигабитный аппаратный стек. Характеристики локальной вычислительной сети СибГУТИ (ЛВС): гигабитные магистральные каналы; оптоволоконные линии связи; 100 компьютерных классов. Локальная сеть СибГУТИ объединяет подразделения университета, общежития СибГУТИ и подключена к сети Интернет по выделенным линиям.

Более 95 % персональных компьютеров и сетевой периферийной техники СибГУТИ подключены к ЛВС СибГУТИ с возможностью выхода в Интернет со скоростью до 300 Мбит/с. Все центральные и промежуточные узлы связи соединены между собой высокоскоростными оптическими линиями связи (1 Гбит/с.). Подключение ЛВС СибГУТИ к сети Интернет проходит по двум независимым магистральным каналам, предоставляемым разными операторами связи, что повышает надёжность и отказоустойчивость подключения и обеспечивает непрерывность бизнес-процессов. Общее число терминалов, имеющих доступ в Интернет, – 956.

2.2. Характеристика эксперимента

Экспериментальная составляющая описываемого метода основана на результатах элементарного исследования трафика, создаваемого различными Интернет-службами, и последующей статистической обработке этих результатов [29].

Элементарный поток, соответствующий работе электронной почты, имеет характерный вид. Сначала идет набор коротких дискретных импульсов (длительность большинства импульсов составляет 2 с). Завершается элементарный поток практически непрерывным потоком, имеющим длительность до 90 секунд и практически детерминированным. От сеанса к сеансу наблюдались незначительные случайные колебания скорости передачи в заключительном фрагменте потока.

В работе [29] получены статистические характеристики указанного элементарного потока. Они таковы: скорость передачи данных в импульсах меняется от 400 до 7500 байт/с.

Скорости передачи данных в пределах одного сеанса набора письма имеют тенденцию к росту. Тенденция роста может быть в первом приближении смоделирована путем задания приращения скоростей: **скорость в данном импульсе = скорость в предыдущем импульсе + приращение скорости.**

В таком случае скорости в соседних импульсах зависимы, кроме того, скорости во всех последующих импульсах зависят от скорости передачи данных в самом первом импульсе в самом наборе письма.

Параметры модели, характеризующие набор и отправку письма по электронной почте, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры элементарного потока

| Название параметра | Значение параметра |
|--|--------------------|
| Скорости в заключительном импульсе | 0.1 – 8.81 Кб |
| Начальная скорость для первого импульса | 1.2 – 2.9 Кб |
| Интервал времени между импульсами при наборе | 64 – 68 с |
| Длительность импульса | 0 – 2 с |

В рамках математического описания элементарный поток почты является потоком с последствием.

3. Организация экспериментально-численного моделирования

3.1. Организация эксперимента

Программа для ЭВМ написана на языке С с последующей статистической обработкой. При этом при программном генерировании трафика использовался трафик, полученный из натурального эксперимента с указанными в табл. 1 параметрами.

На рис. 1 и 2 приведены трафик, измеренный экспериментально, и трафик, сгенерированный программой ЭВМ на основе модели, полученной путем обработки экспериментальных данных по измерению трафика Интернет-служб (подробности приведены в [29]). По оси абсцисс указано время в секундах, по оси ординат – скорость передачи, байт/с (количество переданных байт). В программе Tmeter время идет справа налево (рисунок с экрана ЭВМ, программа Tmeter), и время на рис. 1 обозначено справа налево. Для удобства сравнения на рис. 2 время тоже идет справа налево (в модели направление времени может задаваться произвольно, далее используется нормальное направление времени – слева направо).

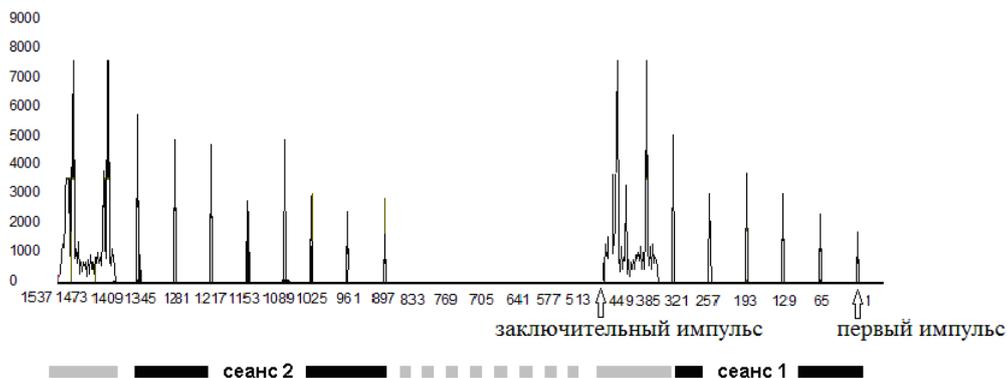


Рис. 1. Трафик «набор двух электронных писем». Экспериментальные данные

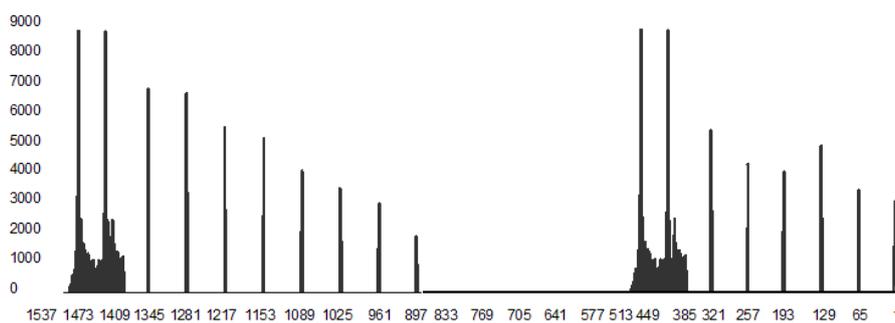


Рис. 2. Трафик «набор двух электронных писем», представленных на рис. 1, сгенерированный программой для ЭВМ

3.2. Результаты численного эксперимента

Эксперимент по измерению потока данных, создаваемого службой Интернета – электронной почтой, был проведен для числа пользователей от 1 до 2000. Суммарный поток – трафик – определяется двумя факторами – элементарными потоками, создаваемыми службами (в данном случае почтовой службой Интернета) и активностью пользователей. Характе-

ристики элементарного потока, создаваемого почтовой службой Интернета, приведены в табл. 1.

Вопрос изучения и получения параметров активности пользователей является предметом изучения социально-экономических наук, а сам вопрос определения трафика, как мы видим, является междисциплинарным вопросом, который должен базироваться на методах как технических, так и социально-экономических наук. Имея в виду методологический характер данной работы, мы провели расчеты, используя данные для частных случаев – экспериментов по набору типового электронного письма в студенческих группах СибГУТИ в рамках поведения занятий по курсу «Метрология, стандартизация и сертификация». Данные приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры работы пользователей

| Название параметра | Значение параметра |
|---|--------------------|
| Интервал времени между наборами писем | 10 минут |
| Время набора письма одним пользователем | 6–7 минут |

В численном эксперименте время непрерывной работы пользователей в указанном режиме взято равным 4 часам (половина рабочего дня).

Число пользователей в численном эксперименте варьировалось от 2 до 2000. Реальное максимальное число пользователей локальной сети, по-видимому, следует принять порядка 1000. Эту оценку можно обосновать тем, что число рабочих станций (компьютеров конечных пользователей), подключаемых к сети Ethernet, зависит от конфигурации сети. Максимальное количество станций, подключаемых к сети Ethernet, равно 1024 [28].

Ниже приводятся результаты статистической обработки данных экспериментов. Выделяются несколько этапов перестроения графика эмпирической плотности распределения скорости передачи данных.

На рис. 3–7 для количества пользователей от 1 до 10 представлены графики функций эмпирической плотности распределения скорости передачи данных. По оси абсцисс указаны суммарные скорости передачи данных в Кб, по оси ординат – их вероятности.

Этап 1. Один пользователь.

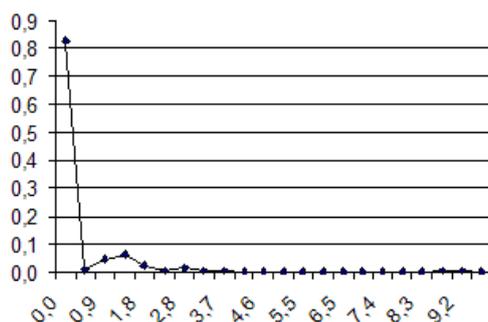


Рис. 3. Эмпирическая плотность распределения скорости передачи данных. 1 пользователь. Набор и отправление электронного письма

Этап 2. Бимодальная плотность распределения скорости передачи данных. Левый пик у графика соответствует случаям незанятости канала (трафик = 0). По оси абсцисс указаны скорости передачи данных в Кб, по оси ординат – их вероятности.

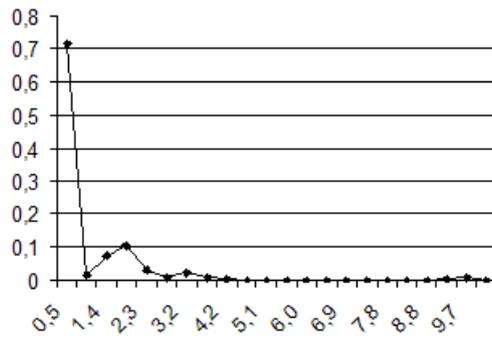


Рис. 4. Эмпирическая плотность распределения скорости передачи данных. 2 пользователя. Набор и отправление электронного письма

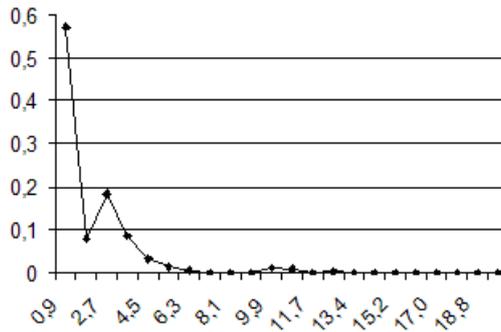


Рис. 5. Эмпирическая плотность распределения скорости передачи данных. 4 пользователя. Набор и отправление электронного письма

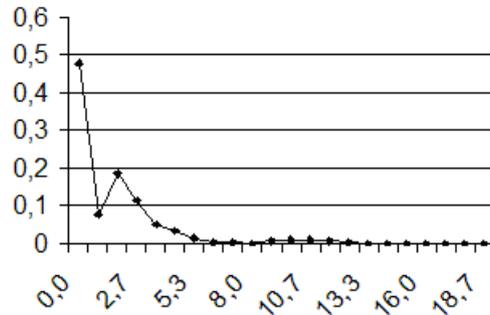


Рис. 6. Эмпирическая плотность распределения скорости передачи данных. 5 пользователей. Набор и отправление электронного письма

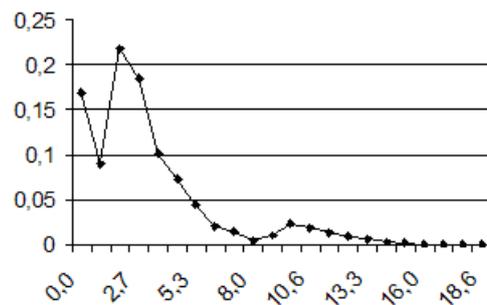


Рис. 7. Эмпирическая плотность распределения скорости передачи данных. 10 пользователей. Набор и отправление электронного письма

Этап 3. При числе пользователей, равном 20, прекращается незанятость канала и исчезает бимодальность в графике эмпирической плотности распределения скорости передачи данных. Исчезает пик эмпирической плотности распределения, соответствующий незанятости канала. Это происходит за счет того, что при числе пользователей менее 20 ненулевые фрагменты трафика отдельных пользователей (элементарных потоков почтовой службы) достаточно часто попадают «друг между другом» (рис. 8). При увеличении числа пользователей ненулевые фрагменты трафика отдельных пользователей начинают все в большей мере накладываться друг на друга (рис. 9). На рисунках по оси абсцисс указано время в секундах, по оси ординат – скорость передачи Кб/с (количество переданных Кб). На рис. 8, 9 показаны друг под другом три последовательных временных фрагмента каждый длительностью $\frac{1}{2}$ часа.

Этап 3 является основным для локальных сетей, поскольку число пользователей таких сетей составляет от нескольких десятков до нескольких сотен. Выяснение типа трафика в этом случае, типа соответствующего распределения скорости передачи данных и его параметров составляет основное содержание данной работы.

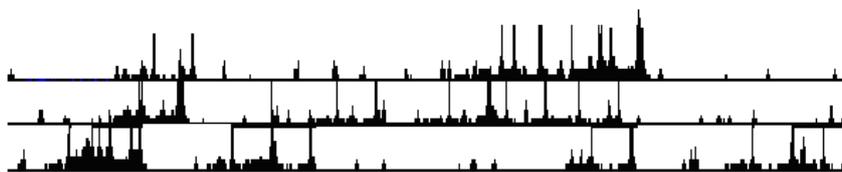


Рис. 8. Трафик при 5 пользователях. Результат компьютерного моделирования. Фрагмент вывода на экран ЭВМ. Около 50 % времени трафик – нулевой (канал «пуст»)

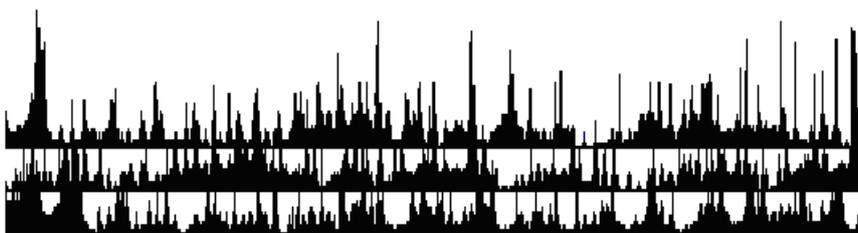


Рис. 9. Трафик при 20 пользователях. Результат компьютерного моделирования. Фрагмент вывода на экран ЭВМ. Канал практически все время используется

Этап 4. При количестве пользователей более 1000 начинается перестроение (изменение вида) графика эмпирической плотности распределения скорости передачи данных в направлении к нормальному закону. Однако это перестроение идет настолько медленно, что для числа пользователей, соответствующего реальным значениям числа пользователей локальных сетей, она не достигается. Как отмечено выше, максимальное число станций, подключаемых к сети Ethernet, – 1024.

Как показано далее, для реальных значений числа пользователей локальных сетей, которые находятся в интервале 10–1000, хорошей аппроксимацией эмпирической плотности распределения скорости передачи данных является гамма-распределение с показателями, зависящими от числа пользователей.

4. Построение функции распределения скоростей передачи данных

Подбор типа распределения и его параметров

На рис. 10–18 представлены графики эмпирических функций распределения для количества пользователей в интервале от 20 до 2000.

Для формулировки гипотезы о виде распределения были подсчитаны асимметрия:

$$\frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \text{ и эксцесс: } \left\{ \frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \right\} - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \text{ эмпи-}$$

рических функций распределения (s – стандартное отклонение выборки). Полученные данные приведены в табл. 3 и 4.

Таблица 3. Асимметрия и эксцесс эмпирических функций распределения

| | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Количество пользователей | 20 | 30 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 |
| Асимметрия | 1.669 | 1.324 | 1.047 | 0.727 | 1.150 | 0.990 | 1.245 |
| Эксцесс | 1.622 | 0.818 | -0.411 | -1.081 | -0.003 | -0.559 | 0.054 |

Таблица 4. Асимметрия и эксцесс эмпирических функций распределения

| | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Количество пользователей | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 2000 |
| Асимметрия | 1.245 | 1.568 | 1.502 | 1.564 | 1.722 | 1.564 | 1.850 |
| Эксцесс | 0.054 | 1.276 | 0.918 | 1.099 | 2.087 | 1.234 | 2.396 |

Из таблиц следует, что подбор теоретического распределения должен производиться среди асимметричных распределений. Функции эмпирических функций распределения имеют характерный вид, сходный с графиками функций плотности распределения гамма-распределения. В связи с чем была сформулирована гипотеза о распределении полученных данных по гамма-распределению.

Функция плотности гамма-распределения задается формулой

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x \geq 0,$$

где α и β – параметры функции распределения [35].

Подбор параметров гамма-распределения проводился методом перебора, критерием выбора параметров являлось наименьшее среднее квадратичное уклонение эмпирических функций распределения от графика функции $f(x; \alpha, \beta)$.

Подобранные значения параметров представлены в табл. 5.

Таблица 5. Количество пользователей и параметры гамма-распределения

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|------|-----|-----|------|------|
| Количество пользователей | 20 | 30 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 2000 |
| α | 3 | 3.8 | 4 | 9.9 | 19 | 25 | 25.4 | 27.2 | 49 | 56.9 | 60 | 64 | 71 | 90 |
| β | 1.8 | 2.3 | 3.7 | 3 | 3 | 3.6 | 4.6 | 4.3 | 3.6 | 3.6 | 4 | 4.2 | 4.1 | 6.5 |

Графики функции $f(x; \alpha, \beta)$ при указанных в табл. 5 значениях параметров приведены на рис. 10–18. Визуально наблюдается хорошее совпадение между графиками эмпирических функций распределения и графиками функций плотности распределения гамма-распределения. По оси абсцисс указаны скорости передачи данных в Кб, по оси ординат – их вероятности.

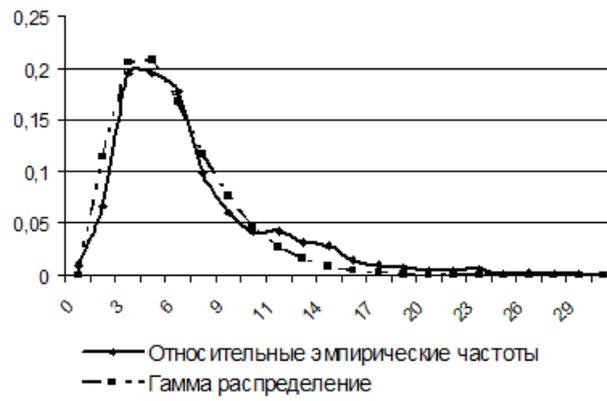


Рис. 10. Количество пользователей – 20



Рис. 11. Количество пользователей – 50



Рис. 12. Количество пользователей – 100



Рис. 13. Количество пользователей – 200



Рис. 14. Количество пользователей – 500

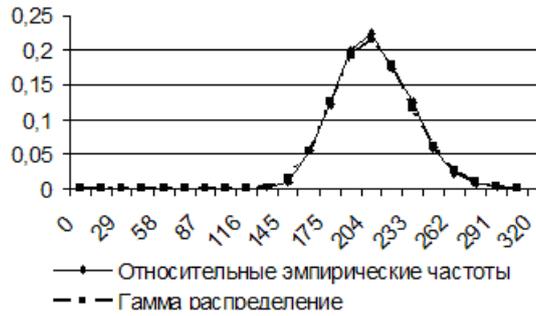


Рис. 15. Количество пользователей – 700



Рис. 16. Количество пользователей – 900

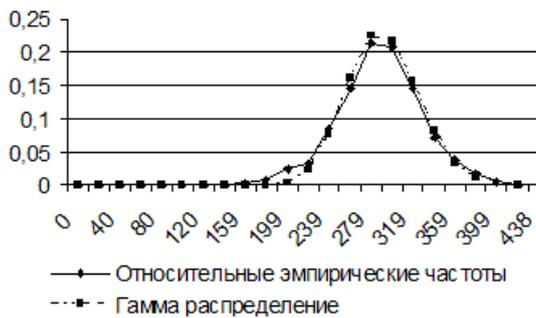


Рис. 17. Количество пользователей – 1000



Рис. 18. Количество пользователей – 2000

5. Проверка гипотезы о согласованности выборочных распределений с гамма-распределением

Проверка гипотезы. Для оценки степени согласованности теоретического и статистического распределений применялся критерий А. Н. Колмогорова, состоящий в следующем: в качестве меры расхождения между теоретическим и статистическим распределениями рассматривается максимальное значение модуля разности между статистической функцией распределения $F^*(x)$ и соответствующей теоретической функцией распределения $F(x)$:

$$D = \max |F^*(x) - F(x)|.$$

Критическое значение критерия Колмогорова вычислялось по формуле: $\lambda = D\sqrt{n}$, где n – количество относительных эмпирических частот. Вероятность распределения $P(\lambda)$ определялась по таблице [36]. $P(\lambda)$ – вероятность того, что за счет чисто случайных причин максимальное расхождение между $F^*(x)$ и $F(x)$ будет не меньше, чем фактически наблюдаемое [36].

Если значение вероятности $P(\lambda)$ близко к 1, то принимается гипотеза о гамма-распределении эмпирических частот выборочных значений скорости передачи данных при работе с электронной почтой. При значении вероятности $P(\lambda)$, близком к нулевому, данная гипотеза отвергается.

Гипотеза: выборка произведена из генеральной совокупности, имеющей гамма-распределение с параметрами, указанными в табл. 5.

Полученные значения λ и $P(\lambda)$ включены в табл. 6.

Таблица 6. Критическое значение критерия Колмогорова λ и значения вероятностей распределения $P(\lambda)$

| Количество пользователей | 20 | 30 | 50 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 | 1000 | 2000 |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| λ | 0.741 | 0.567 | 0.665 | 0.277 | 0.634 | 0.375 | 0.553 | 0.525 | 0.518 | 0.535 | 0.531 | 0.497 | 0.423 | 0.772 |
| $P(\lambda)$ | 0.711 | 0.964 | 0.864 | 1 | 0.864 | 1 | 0.964 | 0.964 | 0.964 | 0.964 | 0.964 | 0.997 | 0.997 | 0.711 |

Т.к. значения вероятностей $P(\lambda)$ из табл. 6 близки к 1, то согласно критерию Колмогорова принимаем гипотезу о гамма-распределении эмпирических частот.

6. Влияние характеристик работы пользователей на величину трафика в локальной сети

Во введении отмечалась зависимость потока данных от специфики работы пользователя. Проиллюстрируем это влияние на примере зависимости характеристик трафика от типа распределения характеристик работы пользователя.

Одной из характеристик работы пользователей является время между окончанием очередного сеанса работы с почтовой службой (точка T_K) и началом следующего сеанса работы с почтовой службой (точка T_H). Величина $T_H - T_K$ является случайной. В рассмотренных моделях работы пользователя она предполагалась равномерно распределенной на заданном отрезке (в представленных расчетах – на отрезке длительностью 10 минут, см. табл. 2). Математическое ожидание $T_H - T_K$ в этом случае равно $\frac{T_H - T_K}{2}$.

Широко используемым при моделировании интервалов между очередными «активностями» пользователя является показательный закон распределения [37]. Приведем результаты экспериментально-численного моделирования для этого случая.

Элементарный поток, создаваемый почтовой Интернет-службой, при изменении активности пользователя не меняется, он определяется характеристиками самой службы. А закон распределения величины $T_H - T_K$ заменим с равномерно распределенного на показательный с тем же математическим ожиданием.

Результаты расчетов для 20 и 100 пользователей приведены на рис. 19 и 20. По оси абсцисс указаны суммарные скорости передачи данных в Кб, по оси ординат – их вероятности.



Рис. 19. Эмпирическая плотность распределения скорости передачи данных. Набор и отправление электронного письма 20 пользователей.



Рис. 20. Эмпирическая плотность распределения скорости передачи данных. Набор и отправление электронного письма 100 пользователей.

Параметры гамма-распределения для количества пользователей 20 и 100 при показательном распределении интервалов времени между сеансами работы пользователей представлены в табл. 7.

Таблица 7. Параметры функции гамма-распределения интервалов времени между сеансами работы

| Количество пользователей | 20 | | 100 | |
|--------------------------|---------------|-------------|---------------|-------------|
| | показательный | равномерный | показательный | равномерный |
| α | 4.4 | 3 | 15.1 | 9.9 |
| β | 2 | 1.8 | 3.4 | 3 |

Коэффициенты асимметрии и эксцесса эмпирических функций распределения при показательном распределении интервалов времени между сеансами работы пользователей показаны в табл. 8.

Таблица 8. Коэффициенты асимметрии и эксцесса для показательного распределения интервалов времени между сеансами работы

| Количество пользователей | 20 | 100 |
|--------------------------|------------|-------------|
| Асимметрия | 1.20044341 | 0.86264644 |
| Эксцесс | 0.57141566 | -0.74605307 |

Как и для равномерно распределенных $T_n - T_k$, объем трафика имеет вид гамма-распределения. Параметры гамма-распределения приведены в табл. 8. В табл. 9 приведено значение λ и значения вероятностей $P(\lambda)$, обосновывающие принятие гипотезы о гамма-распределении объема трафика.

Таблица 9. Критическое значение критерия λ и $P(\lambda)$ для показательного распределения интервалов времени между сеансами работы

| Количество пользователей | 20 | 100 |
|--------------------------|-------|-------|
| λ | 0.46 | 0.51 |
| $P(\lambda)$ | 0.997 | 0.964 |

7. Выводы

Экспериментально-численное моделирование является эффективным способом расчета трафика в локальных сетях ЭВМ. Его применение к расчету трафика, возникающего при использовании почтовой Интернет-службы, показало высокую статистическую надежность (достоверность) получаемых на его основе функций распределения трафика. В рассмотренных случаях критические вероятности, рассчитанные по критерию Колмогорова при выборе гамма-распределения с надлежащими значениями параметров, принимали значения на уровне 0.99–0.96.

Это позволяет рекомендовать предложенную методологию экспериментально-численного моделирования для расчета трафика в локальных сетях ЭВМ при использовании разнообразных Интернет-служб. В данной работе предложенная методика реализована для одного класса элементарных потоков, соответствующих электронной почте. Практически трафик является результатом работ многих Интернет-служб. Элементарные потоки для основных Интернет-служб: просмотр веб-страниц, пересылка файлов, Skype (аудио- и ви-

деорежимы) с их моделями и значениями параметров моделей описаны в [29]. Суперпозиция (сложение) потоков данных, возникающих в результате работы Интернет-служб данной локальной сети, происходит в маршрутизаторе, через который произведено подключение данной локальной сети к сетям более высокого уровня. При этом возникает вопрос об аддитивности суперпозиции. Вопрос является нетривиальным (например, процедуры сжатия данных очевидным образом нарушают принцип суперпозиции). В то же время для ряда широко используемых сетей, как следует из экспериментов автора [30], аддитивность имеет место с достаточной для инженерных расчетов точностью. Основным вопросом является суммирование возникающих потоков данных, которые являются случайными потоками с выраженным последствием. Рассмотрение указанного вопроса может быть произведено как аналитическими методами, так и путем численного анализа, но в любом случае требует отдельной статьи.

Проведенные расчеты указывают, что трафик зависит как от работы собственно Интернет-служб – элементарных потоков Интернет-служб, так и от режима работы пользователей. То есть задача расчета трафика в локальных сетях ЭВМ является существенно междисциплинарной. Для корректного моделирования трафика в локальных сетях ЭВМ необходимо располагать как характеристиками элементарных потоков Интернет-служб, так и статистическими характеристиками активности пользователей.

Выражение благодарности

Автор выражает благодарность за научные консультации при проведении экспериментов и написании статьи доктору физико-математических наук А. Г. Колпакову.

Автор выражает благодарность рецензенту за полезные замечания и указания на библиографические материалы.

Литература

1. Erlang A. K. Probability and telephone calls // *Nyt Tidsskrift for Matematik* B. 1909. V.20.
2. Erlang A. K. Losning af nogle Problemer fra Sandsynlighedsregningen af Betydning for de automatiske Telefoncentraler // *Elektroteknikerens*. 1917. V.13.
3. Харкевич А. Д. А. К. Эрланг – основоположник теории телетрафика. Методы развития теории телетрафика. М.: Наука, 1979.
4. Юрьев М. Ю. Определение числа соединительных линий между районными телефонными станциями // *Жизнь и техника связи*. 1925. № 5.
5. Базилевич К. В., Говорков В. А. Трафик и работа приборов соединения автоматических телефонных станций. М.: Связьиздат, 1933. 176 с.
6. Башарин Г. П., Бочаров П. П., Коган Я. А. Анализ очередей в вычислительных сетях. Теория и методы расчета. М.: Наука, 1989.
7. Башарин Г. П., Харкевич А. Д., Шнепс М. А. Массовое обслуживание в телефонии. М.: Наука, 1968. 247 с.
8. Коваленко И. Н. Теория массового обслуживания, Итоги науки. Сер. Теор. вероятн. 1963, ВИНТИ, М., 1965, С. 73–125.
9. Боровков А. А. Вероятностные процессы в теории массового обслуживания. М.: Наука, 1972. 368 с.
10. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1968. 355 с.
11. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: Наука, 1966.
12. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями. М.: Мир, 1973. 660 с.
13. Бенеш В. Э. Математические основы теории телефонных сообщений. М.: Связь, 1968.

14. *Григелионис Б. И.* О сходимости сумм ступенчатых случайных процессов к пуассоновскому // Теория вероятности и ее применение. 1963. Т. 8, В. 2. С. 189–194.
15. *Pollaczek F.* Über eine Aufgabe der Wahrscheinlichkeitstheorie. *Mathematische Zeitschrift* 32:64–100. 1930.
16. *Khintchine A. Y.* Mathematical theory of a stationary queue // *Matematicheskii Sbornik*. 1932. № 39 (4). P. 73–84.
17. *Лившиц Б. С., Пиеничников А. П., Харкевич А. Д.* Теория телетрафика. М.: Связь, 1979.
18. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания. М.: Машиностроение, 1979. 432 с.
19. *Зелигер Н. Б., Чугреев О. С., Яновский Г. Г.* Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений. М.: Радио и связь, 1984. 177 с.
20. *Олифер В., Олифер Н.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 2е изд. Питер, 2003.
21. *Шварц М.* Сети связи: протоколы, моделирование и анализ: в 2-х ч. Ч. 1: Пер. с англ. М.: Наука, 1992. 336 с.
22. *Murizah Kassim, Mahamod Ismail and Mat Ikram Yusof.* Statistical analysis and modeling of internet traffic IP-based network for teletraffic engineering // *ARPN Journal of Engineering and Applied Science*. 2015. V. 10, № 3.
23. *Симаков Д. В., Кучин А. А.* Анализ статистических характеристик Интернет-трафика в магистральном канале // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. 2015. Т. 9, № 5. С. 31–35
24. *Боровков А.* Эргодичность и устойчивость случайных процессов. М.: Эдиториал, УРСС, 1999. 440 с.
25. *Белов С. Д., Ломакин С. В., Огородников В. А., Пригарин С. М., Родионов А. С., Чубаров Л. Б.* Анализ и моделирование трафика в высокопроизводительных компьютерных сетях // *Вестник НГУ. Серия: Информатика*. 2008. Т. 6, В. 2. С. 41–49.
26. *Огородников В. А., Пригарин С. М., Родионов А. С.* Квазигауссовская модель сетевого трафика // *Автоматика и телемеханика*. 2010. № 3. С. 117–130.
27. *Пролетарский А. В., Баскаков И. В., Федотов Р. А. и др.* Беспроводные сети Wi-Fi. 2-е изд. М.: НОУ «ИНТУИТ», 2016. 284 с.
28. *Хелд Г.* Технология передачи данных. СПб.: Питер, 2003. 720 с.
29. *Филимонова Н. А.* Модель элементарного потока данных в Интернете // *Вестник СибГУТИ*. 2013. № 2. С. 54–68.
30. *Филимонова Н. А.* Анализ сумм потоков данных, генерируемых Skype // *Материалы РНТК «Современные проблемы телекоммуникации», СибГУТИ*, 2015. С. 131–138.
31. *Шнепс М. А.* Системы распределения информации. Методы расчета. М.: Связь, 1979. 344 с.
32. *Свешников А. А.* Прикладные методы теории вероятностей. Изд. Лань, 2012. 480 с.
33. *Кельтон Д., Аверилл М.* Имитационное моделирование. Питер, 3-е изд., 2004.
34. Организация и нормирование труда: учебник / В. Б. Бычин, С. В. Малинин, Е. В. Шубенкова; под ред. Ю. Г. Одегова. М.: РУСАЙНС, 2017. 272 с.
35. *Королюк В. С.* Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.
36. Теория вероятностей: учебник для вузов / Е. С. Вентцель. М.: Высшая школа, 1999. 576 с.
37. *Овчаров Л. А.* Прикладные задачи теории массового обслуживания. М.: Издательство «Машиностроение», 1968. 325 с.

*Статья поступила в редакцию 05.06.2018;
переработанный вариант – 23.12.2018.*

Филимонова Нина Анатольевна

ст. преподаватель кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств
СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: `filipok@mail.ru`.

**A method for traffic calculation in a local computer network
based on experimental numerical simulation**

N. A. Filimonova

The main approach is based on numerical simulation of the process, by which a substantial part of the data used in the model is taken directly from full-scale real-time experiments. This approach can be applied in various fields of science and technology. This article describes the methodology for traffic calculation in local computer networks based on experiments and numerical simulation using as an example the Internet traffic originated from a single Internet service, namely, an e-mail agent.

Keywords: Internet traffic, local computer networks, Internet services, modeling.

Обнаружение механически напряжённых участков оптических волокон в оптических кабелях с помощью бриллюэновских рефлектометров

И. В. Богачков, Н. И. Горлов

В статье приведены результаты исследований натяжений оптических волокон и оптических кабелей, находящихся под действием механических нагрузок при различных производственных процессах, с помощью бриллюэновских оптических импульсных рефлектометров. Результаты исследований подтвердили преимущество метода бриллюэновской рефлектометрии для ранней диагностики и обнаружения локальных механически напряжённых участков оптических волокон. Для определения общего удлинения оптических волокон эффективно использовать метод измерения фазового сдвига.

Ключевые слова: оптическое волокно, натяжение, оптический кабель, ранняя диагностика, бриллюэновский рефлектометр.

1. Введение

Важной задачей ранней диагностики оптических волокон (ОВ) является своевременное обнаружение и устранение механически напряжённых участков в ОВ, находящихся в оптических кабелях (ОК) [1–7].

В процессе изготовления ОВ могут возникать локальные неоднородности кварца (в том числе микротрещины), создающие внутренние напряжения, которые делают ОВ уязвимым к изгибам или вибрациям. В результате разрывная прочность ОВ снижается [1–4, 7].

Повышенное натяжение ОВ в проложенных ОК влияет на долговечность ОК. По данным фирм Fujikura и Corning, при продольном натяжении более 0.3 % вместо ожидаемых 25 лет срок службы ОВ при данном натяжении снижается до 5–10 лет, а при натяжении порядка 1 % составит менее года [1–4].

Для обнаружения подобных «проблемных» участков ОВ применяется метод бриллюэновской рефлектометрии или метод фазового сдвига [1–4]. Метод бриллюэновской рефлектометрии положен в основу работы бриллюэновских рефлектометров (BOTDR – Brillouin Optical Time Domain Reflectometer) и анализаторов (BOTDA – Brillouin Optical Time Domain Analyzer), которые способны предоставить точную информацию о распределении степени натяжения ОВ вдоль его длины, а на основе этой информации позволяют прогнозировать деградацию и обрыв ОВ [1–5, 8].

Опыт последних лет заставил производителей ОВ и ОК предусмотреть меры, которые минимизируют влияние изгибов и деформаций ОК на натяжение ОВ и повышают надёжность ОК в целом.

Для выявления дефектов ОВ на производстве применяют контрольную перемотку ОВ под нагрузкой [3, 4, 7], что позволяет выявить явные «хрупкие» участки.

При производстве ОК ОВ в нем должны укладываться с некоторой свободой (с избыточной длиной ОВ), чтобы при изгибах ОК был определен запас по их натяжению, что реа-

лизуются производителями ОК в модульных конструкциях. Невыполнение этого условия может привести к опасным уровням натяжения.

В процессе производства ОК необходимо на разных этапах контролировать характеристики ОВ в нем, в том числе такие, как натяжение (удлинение) ОВ.

2. Сведения из теории

Световой сигнал в ОВ, находящихся в условиях повышенного продольного натяжения, вызывает «раскачивание» микротрещин, которые неизбежно возникают при кристаллизации кварцевого стекла в процессе производства ОВ [5, 6]. Это и приводит в итоге к росту этих микротрещин в процессе эксплуатации ОК (медленному – при продольном натяжении около 0.2 % или быстрому – при натяжении более 1 %), а в конечном результате – к деградации ОВ и его преждевременному разрушению [2–5].

Для стандартного одномодового ОВ (Рекомендация МСЭ-Т G.652) характер зависимости срока службы от его натяжения по типовым данным фирмы Fujikura позволяет выделить безопасный диапазон натяжений – менее 0.2 %, недопустимый – более 0.6 %, промежуточный диапазон значений натяжений, требующий дополнительного анализа [1–4] также следует отнести к недопустимым для ОВ в проложенных ОК, так как долговечность ОК в этом случае сокращается [1–6]. Для обеспечения гарантийного срока службы ОК длительностью 25 лет натяжение ОВ не должно превышать 0.26 %. При увеличении натяжения ОВ до 0.45 % появляется 50-процентная вероятность обрыва ОВ в течение срока эксплуатации [3–4].

Хотя в этих оценках не учитывался ряд факторов (дополнительные микроповреждения ОВ или проникновение влаги к поверхности ОВ), из них следует, что даже незначительное увеличение продольного натяжения ОВ может приводить к многократному уменьшению его срока службы [2].

Так как ОВ, материалы модулей, защитные элементы и оболочки ОК имеют различные коэффициенты удлинения и теплового расширения, то в случае изменения температуры могут возникать существенные напряжения внутри ОВ из-за неравномерного расширения соприкасающихся материалов [6, 8].

Контроль механических натяжений ОВ с возможностью пространственной локализации «проблемных» участков ОВ является одним из важнейших достоинств метода бриллюэновской рефлектометрии.

Даже при стендовых испытаниях ОК в лабораторных (производственных) условиях эта способность полезна, поскольку удлинение ОВ на отдельных его участках может значительно превышать предельно допустимую величину, хотя усредненное значение, получаемое с использованием методов МЭК 60794-1, таких как метод измерения приращений затухания и метод измерения фазового сдвига, может оставаться в допустимых пределах [2–4].

Метод фазового сдвига основан на измерении (контроле) сдвига фазы оптического сигнала относительно сформированного опорного канала, что позволяет по приращению фазы получить значение удлинения ОВ [3, 5, 7, 11].

В процессе производства ОВ и ОК несложно получить доступ к обоим концам ОВ. Это позволяет применять метод измерения фазового сдвига или BOTDA. BOTDR достаточно подключить к одному концу ОВ, что очень важно для измерений, необходимых при строительстве и эксплуатации ОК [1–6].

В основу работы BOTDR положен метод бриллюэновской рефлектометрии, основанный на анализе спектра рассеяния Мандельштама–Бриллюэна (СРМБ) в световоде, которое наблюдается при введении в ОВ излучения повышенной мощности.

Компоненты СРМБ имеют частотный сдвиг на величину, пропорциональную натяжению ОВ и его температуре. Определив распределение СРМБ вдоль световода и вычислив бриллюэновский сдвиг частоты (так называется частота максимума СРМБ), можно получить кар-

тину распределения натяжений в ОВ, найти их характеристики и проанализировать причины, вызвавшие эти изменения СРМБ [2–6].

После обработки рефлектограммы СРМБ BOTDR выводит картину распределения натяжения исследуемого ОВ вдоль продольной координаты.

3. Постановка задачи

С целью изучения особенностей бриллюэновских рефлектограмм ОВ, находящихся в ОК, которые получают дополнительные натяжения из-за воздействия различных факторов, были проведены экспериментальные исследования с помощью BOTDR «Ando AQ 8603» и «ViaviMTS-8000».

4. Результаты экспериментов

В экспериментальных исследованиях, результаты которых представлены ниже, изучались ОК, содержащие стандартные одномодовые ОВ (Рекомендация МСЭ-Т G.652).

У катушек ОВ, изготовленных из одной заготовки, профиль СРМБ, бриллюэновский сдвиг частоты, а значит, и характеристики натяжения практически не отличаются, но для ОВ из разных партий даже у одного производителя наблюдается некоторый разброс этих характеристик [3, 4].

На рис. 1 приведена картина натяжения ОВ, находящегося на катушке, которая получена с помощью BOTDR «Ando AQ 8603».

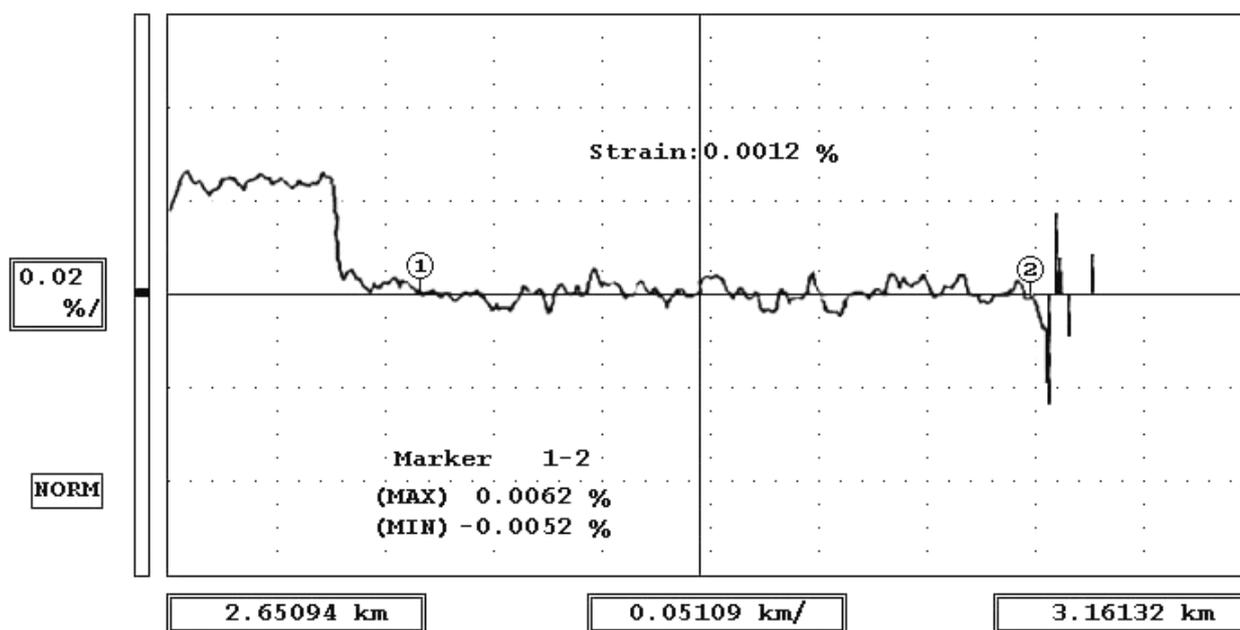


Рис. 1. Картина натяжения ОВ, находящегося на катушке

Хотя натяжение ОВ разных участков (центр или края) и слоёв (внешние или внутренние) незначительно отличается, оно совершенно неопасно для долговечности ОВ. При размотке ОВ в линию (или перемотке ОВ в бухту) картина натяжения между маркерами «1» и «2» превращается почти в прямую линию, проходящую по уровню « -0.002% », поэтому рефлектограмма натяжения ОВ, находящегося на катушке, достаточна для оценки качества ОВ перед следующими стадиями производства ОК.

Для производителей желательна максимально возможная скорость производства ОК. Для ускорения технологических процессов необходимы высокие скорости движения ОВ (при нанесении защитной оболочки (покраске) ОВ – порядка 17 м/с, при формировании оптического модуля – порядка 6 м/с и т.п.), которые требуют приложения дополнительной силы при перематке. В процессе перематки натяжение ОВ повышается, а после завершения перематки из-за «фиксации» некоторых участков ОВ по различным причинам может сохраниться остаточное натяжение [3, 4].

Например, при нанесении защитной оболочки (покраске) ОВ после её отверждения (высыхания) форма ОВ «фиксируется», а значит, сохраняется повышенное удлинение, которое появилось в ОВ в процессе перематки. Кроме того, затвердевание краски происходит неравномерно (неконцентричность покрытия, нестабильность скорости нанесения и высыхания краски), что может усилить этот эффект и даже повысить затухание сигнала в ОВ [2].

В результате натяжение окрашенного ОВ на катушке возрастает в среднем на 0.002...0.005 %, но могут появиться локальные участки с большим натяжением.

В процессе объединения ОВ в оптический модуль возможен перехлест волокон, что также при высоких скоростях протяжки и слишком стремительном охлаждении оболочки модуля может привести к локальным «защемлениям» ОВ, которые могут сохраниться в готовом ОК.

Контроль натяжения ОВ с помощью BOTDR или измерителя фазового сдвига позволяет своевременно выявить подобные проблемы и скорректировать технологический процесс.

Для повышения стойкости ОВ внутри модуля к растягивающим нагрузкам производители закладывают небольшую избыточную длину ОВ. При растягивании оптического модуля в этом случае ОВ внутри него распрямляется, что приводит к тому, что удлинение модуля до 0.1 % практически не влияет на натяжение ОВ. Лишь при больших удлинениях нагрузка начинает прикладываться непосредственно к ОВ, и тогда натяжение ОВ начинает линейно возрастать с удлинением модуля.

На следующем этапе производства ОК осуществляется скрутка оптических модулей, что считается наиболее опасным процессом, который может привести к натяжению ОВ в модуле и даже к приросту затухания [2].

На рис. 2 представлена картина натяжения одного из ОВ ОК при нарушении технологии скручивания оптических модулей, полученная с помощью BOTDR «Ando AQ 8603».

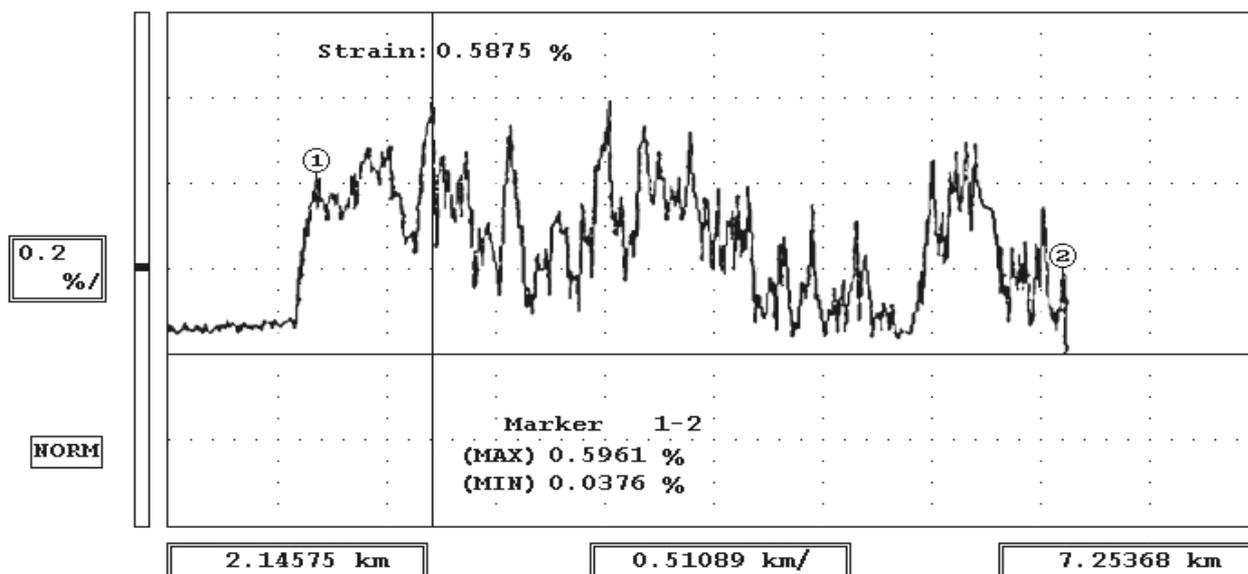


Рис. 2. Картина натяжения ОВ при нарушении технологии скручивания модулей

Подобная картина наблюдается при слишком высоком натяжении оптического модуля в процессе скрутки, например, при слишком высокой скорости протяжки. Всплески на BOTDR-рефлектограмме указывают на места ОВ с повышенным локальным удлинением. Такой ОК использовать нельзя, так как в реальных условиях произойдёт быстрая деградация ОВ.

Для устранения подобных проблем также необходимо закладывать избыточную длину ОВ в модулях (примерно 3...5 м/км), причем желательно, чтобы она была равномерна для всех ОВ (отклонение не более 1 м/км) [1, 2].

Практика показала, что использование стального центрального силового элемента (стальной трос в полиэтиленовой оболочке) также может привести к локальным натяжениям после скрутки модулей с ОВ. Неровности стального троса, продольные и поперечные воздействия на него могут придать ему спиралевидную форму, что в результате приведёт к дополнительным «защемлениям» и дополнительным удлинениям ОВ в ОК, которые сохраняются в готовом изделии. Гораздо меньше проблем с «защемлениями» в ОК с центральным силовым элементом из стеклопластикового прутка [1, 2].

Испытания, проведенные с ОК, используемыми в качестве датчиков натяжения, с BOTDR «ViaviMTS-8000» также показали, что ОВ в ОК с центральным силовым элементом из стеклопластикового прутка удлиняется очень плавно (датчик «1» на рис. 3) по сравнению с ОВ в ОК со стальным центральным силовым элементом (датчик «2» на рис. 3), так как ОВ хорошо скользит по поверхности стеклопластика. Хотя в ОК со стальным элементом натяжение ОВ при постепенном увеличении растягивающей силы повышается медленнее, в датчике появляется сильная неравномерность натяжения соседних участков вдоль ОВ.

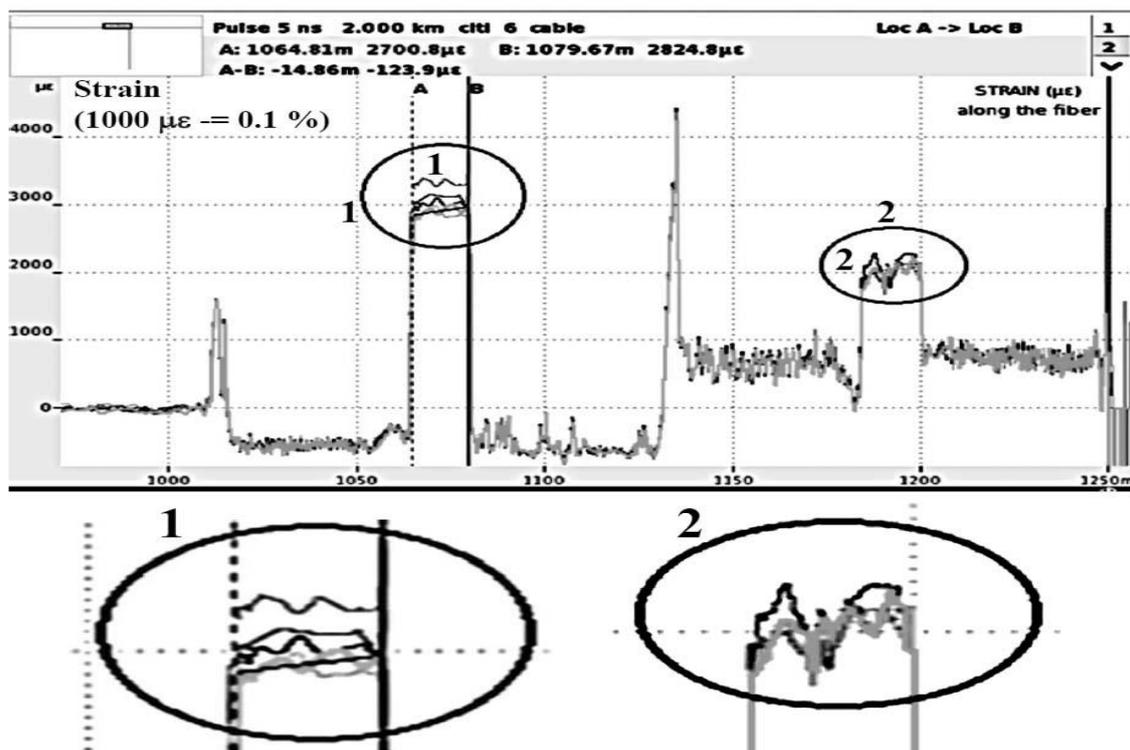


Рис. 3. Картина натяжения ОВ (BOTDR «ViaviMTS-8000») в области двух распределенных датчиков с разной конструкцией центрального силового элемента

Операции нанесения бронепокрова и арамидных нитей при нормальном течении технологического процесса (расположение проволок или нитей и их натяжение должно быть равномерным, не растягивающим заготовку ОК) не приводит к повышению натяжения ОВ [1].

Этап наложения защитной оболочки ОК из-за послеэкструзионной усадки полиэтилена также может вызвать дополнительные натяжения ОВ (порядка 0.04...0.06 %), поскольку в процессе намотки на приёмный барабан условия усадки (и, соответственно, длина оболочки

на участках) отличаются для витков, находящихся на разных уровнях и в разных частях барабана.

На рис. 4 приведена картина натяжения одного ОВ из ОК, намотанного на приёмный барабан после усадки полиэтиленовой защитной оболочки.

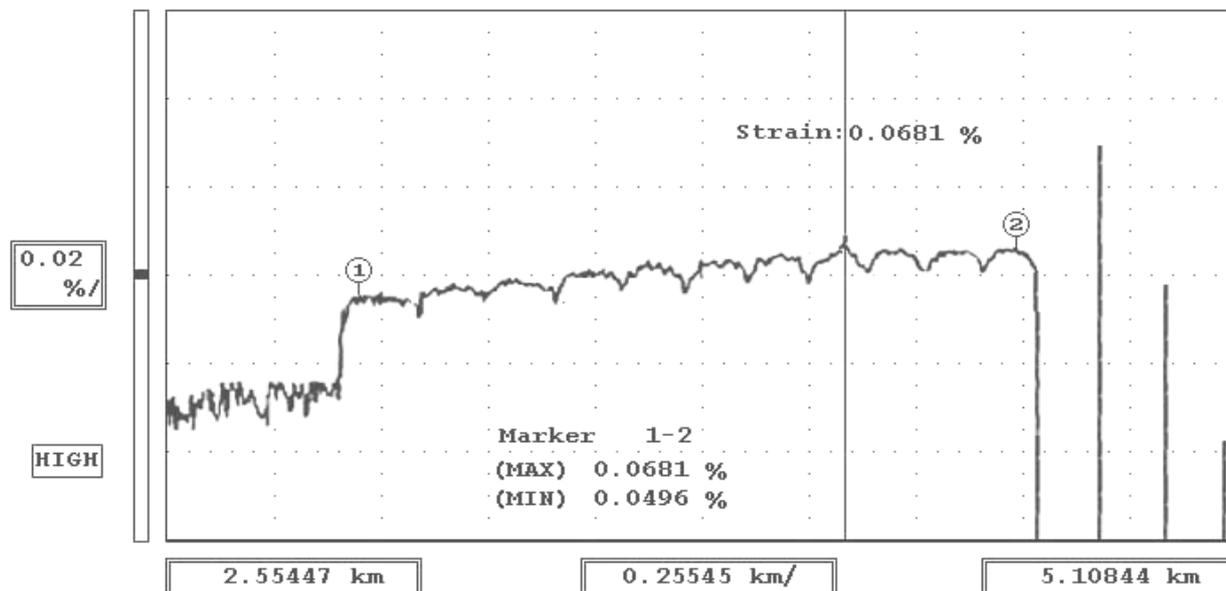


Рис. 4. Картина натяжения ОВ из готового ОК, намотанного на приёмный барабан

На BOTDR-рефлектограмме хорошо видны «полуволны» раскладки ОК (более натяжённые в центре ряда и менее натяжённые по краям ряда), а также различие длин витков внутренних (маркер «2») и внешних (маркер «1») слоёв.

После размотки ОК с барабана картина натяжения «спрямляется».

Для того, чтобы величина натяжения ОВ в ОК оставалась в умеренных пределах, необходимо ограничивать скорость протяжки и охлаждения ОК.

На рис. 5–7 приведены картины натяжения одного ОВ из готового ОК, намотанного на барабан при различных температурах (испытания в климатической камере на стойкость ОК к изменению температуры от -40°C до $+60^{\circ}\text{C}$), которые получены с помощью BOTDR «Ando AQ 8603».

На рис. 5 показана картина натяжения ОВ в ОК при комнатной температуре. Указаны минимальное и максимальное значение натяжения на участке «1» – «2».

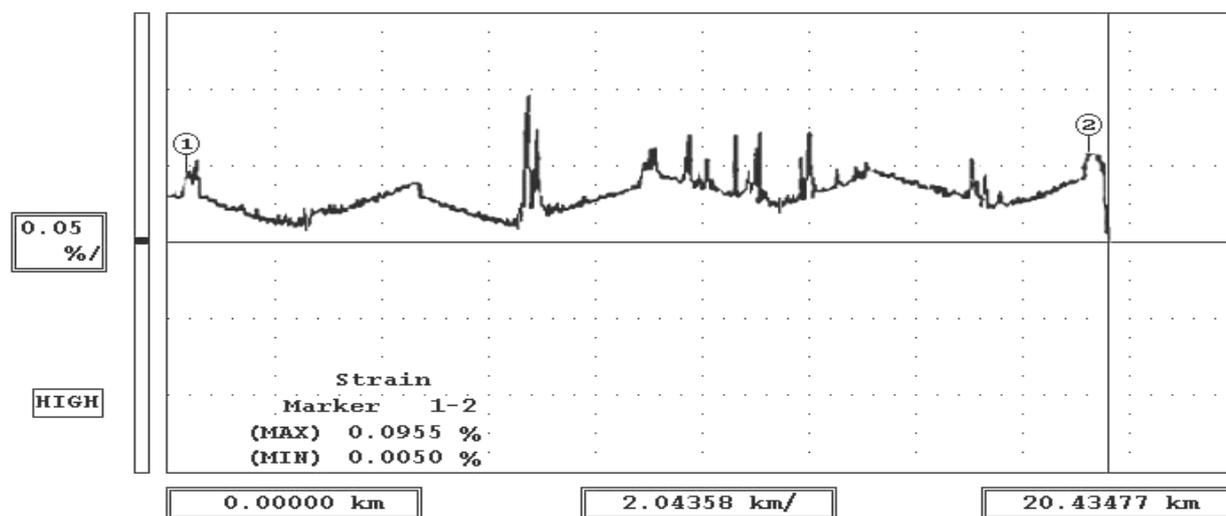


Рис. 5. Картина натяжения ОВ в ОК при комнатной температуре

На рис. 6 представлена картина натяжения ОВ при температуре ОК $+60^{\circ}\text{C}$. Из рисунка видно, что натяжение ОВ повысилось в среднем на 0.05 %. Хотя известно, что зависимость натяжения ОВ от температуры имеет линейный характер [9–13], для ОК на барабане существует множество участков, на которых удлинение ОВ из-за теплового расширения ОК оказалось ограничено «фиксирующими» факторами.

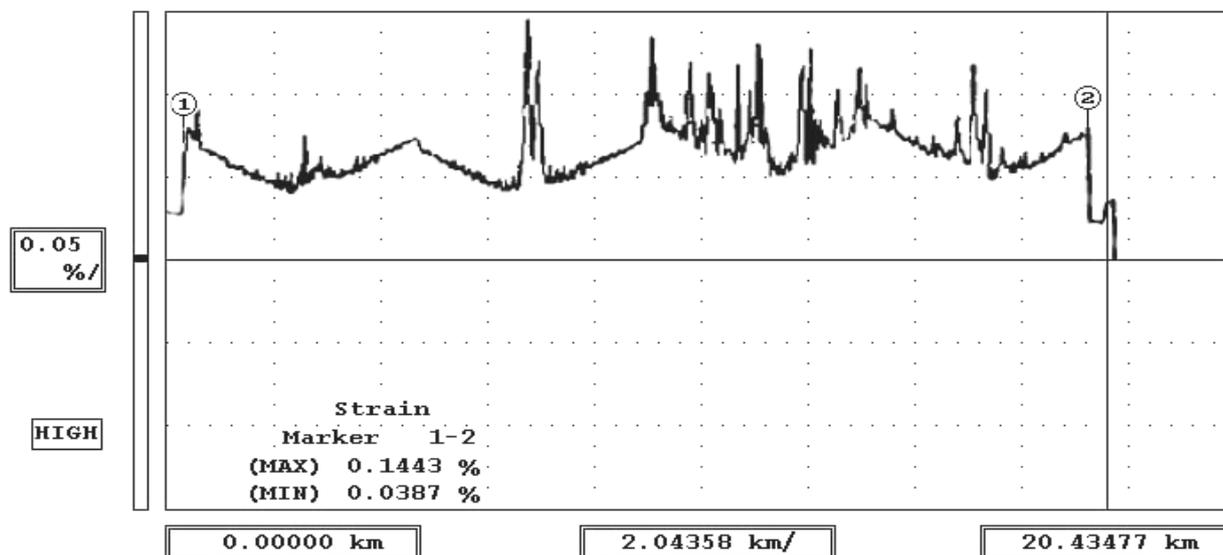


Рис. 6. Картина натяжения ОВ в ОК при высокой температуре

На рис. 7 представлен график натяжения ОВ при температуре ОК -40°C .

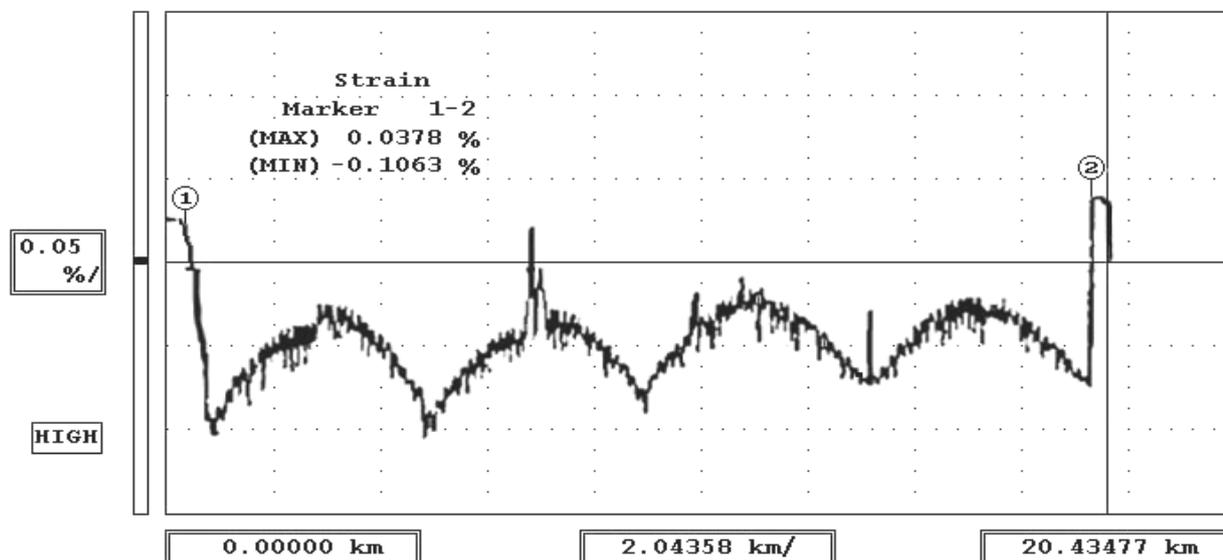


Рис. 7. Картина натяжения ОВ в ОК при низкой температуре

Из рисунка видно, что ОВ сжалось в среднем на 0.07 %. Из-за сжатия ОК «фиксирующие» факторы перераспределились, однако хорошо заметны существенные натяжения ОВ, которые присутствуют на всех трёх графиках на расстояниях 6.9 км (значительное) и 13.5 км (незначительное), которые показывают проблемные участки ОК на барабане.

Во всех рассмотренных температурных испытаниях прироста затухания ОВ не наблюдается [11–13].

Таким образом, BOTDR в процессе производства ОК позволяет обнаружить локальные натяжения ОВ и выявить ошибки в технологии изготовления.

Изучение СРМБ ОВ, находящихся в готовых ОК, которые подвергались существенным растягивающим нагрузкам при лабораторных испытаниях, позволило сделать следующие выводы. Из-за силовых элементов ОК, которые защищают его, а значит, и все ОВ внутри его модулей от механических воздействий, а также из-за избыточной длины ОВ в оптических модулях существенных изменений СРМБ при силовых растягивающих нагрузках определённого участка исследуемого ОК может не наблюдаться (если нет явных дефектов и «защемлений») вплоть до критических уровней нагрузки, которые приводят в месте воздействия к разрушению защитных элементов ОК, а затем и к стремительному разрыву ОВ и ОК в целом. Это наблюдалось при действующей на исследуемый ОК продольной растягивающей силе, которая превышала предельно допустимую нагрузку данного ОК [11].

При этом анализ экспериментальных данных, полученных фазовыми методами [3, 5, 11], показал, что эти методы позволяют обнаружить появление удлинения ОВ в целом (из-за продольного натяжения ОВ) при растягивающей силе, которая ещё не превысила предельно допустимую для исследуемого ОК. Так как при этом не происходит разрушения элементов ОК, после снятия нагрузки ОК вернется в нормальное состояние. Однако подобные воздействия приводят к перераспределению натяжений в ОВ, поэтому контроль с помощью BOTDR также желателен для обнаружения мест именно с локальным натяжением.

На рис. 8 представлены результаты измерений удлинений ОВ на основе метода фазового сдвига.

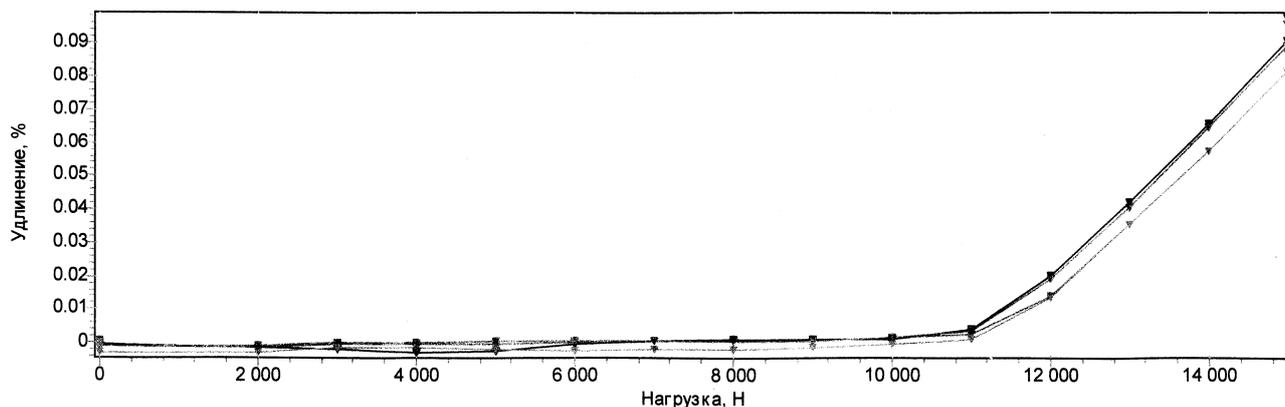


Рис. 8. Анализ удлинения ОВ в ОК при значительных растягивающих нагрузках

Из графиков видно, что изменения удлинения ОВ в ОК относительно опорного канала наблюдаются при растягивающей силе, действующей на ОК, более 11 кН. Учитывая, что место воздействия на ОК в данном случае заранее известно, фазовый метод оказался более предпочтительным.

При прокладке ОК натяжения ОВ будут перераспределяться (при соблюдении правил прокладки все натяжения ОВ вдоль линии будут усредняться к уровню 0 %), но явные дефекты, такие как места с повышенным натяжением, скорее всего, сохранятся, а значит, срок эксплуатации такого ОК может существенно сократиться.

Для ранней диагностики состояния ОВ (своевременного выявления механически напряженных участков, а также участков с изменённой температурой) в ОК, проложенных на реальных трассах, эксплуатирующихся в реальных условиях, самыми эффективными являются измерения с помощью BOTDR, которым (в отличие от BOTDA) достаточно иметь доступ лишь к одному концу ОВ [5, 6, 11–15].

5. Заключение

Современные модульные конструкции ОК имеют определённый запас защиты ОВ от опасного натяжения.

Метод бриллюэновской рефлектометрии позволяет осуществлять раннюю диагностику ОВ и устранять локальные «проблемные» участки в ОВ на ранней стадии.

Для обнаружения мест ОВ с повышенным механическим напряжением и с измененной температурой рекомендуется включать BOTDR в состав системы контроля характеристик ОВ. Это позволит выявлять потенциально опасные участки в ОК на разных стадиях изготовления ОК и совершенствовать технологии, применяемые в производственном процессе.

В процессе производства ОВ и ОК несложно получить доступ к обоим концам ОВ, что позволяет применять фазовые методы или BOTDA. При строительстве и эксплуатации ОК доступ возможен лишь к одному концу ОВ, и это допускает применение только рефлектометрических методов (BOTDR).

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности (проект № 8.9334.2017/8.9).

Авторы благодарят ЗАО «Москабель-Фуджикура» (г. Москва) за содействие в проведении экспериментальных исследований.

Литература

1. Богачков И. В., Горлов Н. И. Экспериментальные исследования влияния продольных растягивающих нагрузок на спектр бриллюэновского рассеяния в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2015. № 3 (31). С. 81–88.
2. Акопов С. Г., Васильев Н. А., Поляков М. А. Использование бриллюэновского рефлектометра при испытаниях оптического кабеля на растяжение // Lightwave. 2006. № 1. С. 23–25.
3. Авдеев Б. В., Барышников Е. Н., Длютров О. В., Стародубцев И. И. Изменение избыточной длины в процессе изготовления ВОК // Кабели и провода. 2002. №3 (274). С. 32–34.
4. Корн В. М., Длютров О. В., Авдеев Б. В., Барышников Е. Н. О применении метода Мандельштам–Бриллюэновского рассеяния для измерений характеристик оптических кабелей // Кабели и провода. 2004. № 5 (288). С. 19–21.
5. Богачков И. В., Горлов Н. И. Поиск предаварийных участков в оптических волокнах с помощью рефлектометров // Вестник СибГУТИ. 2018. № 8 (43). С. 34–44.
6. Богачков И. В., Горлов Н. И. Совместные испытания оптических импульсных рефлектометров различных видов для ранней диагностики и обнаружения «проблемных» участков в оптических волокнах // Вестник СибГУТИ. 2017. № 1 (37). С. 75–82.
7. Марьенков А. А., Гринштейн М. Л., Каменская Е. А., Деков В. Н. Измерение удлинения оптического волокна при испытании оптического кабеля на стойкость к растягивающей нагрузке // Lightwave (Russian Edition). 2003. № 2. С. 38–41.
8. Kurashima T., Horiguchi T., Izumita H., Furukawa S. I., Koyamada Y. Brillouin optical-fiber time domain reflectometry // IEICE Transactions on Communications. 1993. V. E76–B(4). P. 382–390.
9. Horiguchi T., Kurashima T., Koyamada Y. Measurement of temperature and strain distribution by Brillouin frequency shift in silica optical fibers // Distributed and Multiplexed Fiber Optic Sensors. 1992. V. 1797. P. 2–13.

10. *Parker T., Farhadiroushan M., Handerek V., Rogers A.* Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers // *Optics letters*. 1997. V. 26, № 11. P. 787–789.
11. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Обнаружение механически напряженных участков в волоконно-оптических линиях связи на основе анализа спектра бриллюэновского рассеяния // *Телекоммуникации*. 2015. № 11. С. 32–38.
12. *Богачков И. В., Майстренко В. А.* Экспериментальные исследования поперечных деформаций оптических волокон // *Электросвязь*. 2016. № 5. С. 55–59.
13. *Богачков И. В., Горлов Н. И.* Обнаружение участков измененной температурой волоконно-оптических линий связи методом бриллюэновской рефлектометрии // *Вестник СибГУТИ*. 2015. № 4 (32). С. 74–81.
14. *Bogachkov I. V.* A Detection of strained sections in optical fibers on basis of the Brillouin relectometry method // *T-Comm*. 2016. V. 10, № 12. P. 85–91.
15. *Bogachkov I. V., Maistrenko V. A.* Search of mechanical stressed sections in fiber optical communication lines based on Brillouin backscattering spectrum analysis // *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015. V. 8, Is. 7. P. 878–889.

Статья поступила в редакцию 12.12.2018.

Богачков Игорь Викторович

к.т.н., доцент; доцент кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета, IEEE Senior Member, e-mail: bogachkov@mail.ru.

Горлов Николай Ильич

д.т.н., профессор; заведующий кафедрой «Линии связи» Сибирского государственного университета телекоммуникации и информатики (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), действительный член Метрологической академии, e-mail: gorlovnik@yandex.ru.

Mechanical strain places detection of the optical fibers in optical cables using Brillouin time-domain reflectometers

I. V. Bogachkov, N. I. Gorlov

Research results of the optical fiber strain and optical cables being under the influence of mechanical forces in various manufacturing processes, using Brillouin optical time-domain pulse reflectometers are presented in this work.

The research results confirmed the advantage of the Brillouin reflectometry method for early diagnostics and detection of local mechanically stressed places of optical fibers. To determine the total elongation of optical fibers, the phase shift measurement method is effectively used.

Keywords: optical fiber, strain, optical cable, early diagnostics, Brillouin reflectometer.

Комплексная методика оценивания компетентности сотрудников отрасли связи на основе личностных и профессиональных характеристик¹

Л. Ф. Данилова, Н. Ю. Захаров, В. С. Канев, А. В. Никифорова,
М. В. Облахова, А. Н. Полетайкин, Ю. В. Шевцова

Рассматривается задача количественного оценивания уровня компетентности сотрудников, которая предваряет процедуру принятия управленческих решений по развитию персонала. В качестве индикаторов компетентности используются личностные и профессиональные характеристики сотрудников. Для оценивания указанных характеристик используются модифицированные авторские методики оценивания личностных качеств и оценивания компетенций, а также новая методика оценивания показателей эффективности трудовых ресурсов. Решение задачи рассматривается на примере развития персонала в отрасли связи.

Ключевые слова: оценивание компетентности, личностные качества, профессиональные качества, показатели эффективности, комплексная методика оценивания.

1. Введение

В настоящее время рынок труда в России переживает не лучшие времена. В силу неадекватных размеров заработной платы уровню жизни населения во многих отраслях широкое распространение получила трудовая деятельность по совместительству с неполной занятостью в видимых и невидимых формах, распространена занятость в неформальном секторе. Недоиспользование части трудовых ресурсов (ТР) в форме безработицы (явной и потенциальной), видимой неполной занятости сочетается в российской экономике с избыточной трудовой нагрузкой занятой части населения [1]. Такой перекокс негативно сказывается на благосостоянии большинства российских граждан, на экономическом благополучии страны в целом и требует применения срочных мер. Некоторые решения по этому поводу приняты российскими властями. Так, указом Президента России от 13.05.2017 г. № 208 утверждена стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года [2], где к основным угрозам экономической безопасности отнесено, в частности, снижение качества человеческого потенциала, а его развитие объявлено одним из основных направлений государственной политики в этой сфере. В числе задач по реализации данного направления значатся совершенствование системы общего и профессионального образования на основе современных научных и технологических достижений, совершенствование квалификационных требований к ТР, профессиональная ориентация и содействие эффективной занятости граждан. По сути, указанные задачи укладываются в общую концепцию управления развитием трудовых ресурсов, проблематика которой пока еще не нашла достаточного отражения в научной и учебной литературе. Основная часть исследований в области управления персоналом посвящена вопросам отбора персонала, его распределения по рабочим местам, мотива-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда прикладных научных исследований СибГУТИ.

ции и стимулирования. Ряд работ (Н. Л. Казначеевой, В. М. Белова, В. И. Волкова, Т. И. Романовой, С. А. Айвазяна, А. Д. Барбара, Р. М. Нижегородцева, М. А. Афанасьева и др.) содержат подходы к оценке эффективности использования персонала предприятия, в том числе в привязке к осуществлению бизнес-процессов организации в целом. В последние годы появляются исследования применения к вопросам развития персонала компетентностного подхода. Значимость этого подхода неоднократно рассматривалась во многих трудах (см., напр., [3–5]). При этом констатируется, что основным показателем эффективности (ПЭ) ТР должна рассматриваться их *компетентность*, под которой, как правило, понимается комплексная характеристика, отражающая обладание специалиста определенными личностными и профессиональными качествами, проявляющееся в профессиональной деятельности. Понятие «компетентность» можно рассматривать как характеристику специалиста, а указанные качества характеризуют некое базовое качество, овладение которым делает специалиста компетентным [5].

Вместе с тем в силу комплексности характеристики «компетентность» существенно затруднена процедура ее оценивания, так как традиционные методы не дают достаточной точности и обладают значительной степенью субъективизма. Отсутствие комплексного решения данной задачи не позволяет адекватно оценивать все многообразие составляющих компетентности сотрудников, что негативно сказывается на эффективности их трудовой деятельности и затрудняет их профессиональное развитие. Один из удачных вариантов такого решения предложен в [6], апробирован в [7] и основан на ключевых показателях эффективности деятельности (KPI) и результативности (KRI) сотрудников. Данные показатели являются элементом стратегического планирования развития организации и охватывают основные направления работы с персоналом: планирование, привлечение, мотивацию, стимулирование, оценивание. Особо подчеркивается эффективность данной системы как инструмента управления развитием персонала в части оценивания не только результата, но и того, какими способами он был достигнут. Налицо получение динамических характеристик сотрудников, выраженных в оценках их деятельности. Все это позволяет разрабатывать и применять стимулирующие стратегии в области вознаграждений, выявлять сотрудников, не соответствующих требованиям занимаемых ими должностей, что, в свою очередь, не только повышает эффективность управления, но и помогает сотрудникам понять связь между своими конкретными обязанностями и стратегическими целями компании.

Особенно остро эти задачи стоят в условиях формирующегося информационного общества. Информационное пространство России находится сегодня не в лучшем состоянии, и его формирование – важная государственная задача. Современные телекоммуникационные технологии становятся наиболее ярким и востребованным поставщиком информации [8]. Вместе с тем информационные услуги и ресурсы на территории страны распределены неравномерно. Выравнивание информационной структуры и систематизация информационных потоков – первоочередная задача в современных условиях. Необходимы инновационные решения по созданию условий для эффективного и качественного информационного обеспечения решения оперативных задач социально-экономического развития, из которых важнейшее значение имеют задачи обеспечения связи.

Среди компаний связи, занимающихся продажами и оказанием услуг, а значит, работающими с людьми, большую роль играет такой фактор, как компетентность персонала, который тесно связан с высокой интенсивностью технологических изменений в отрасли связи и вытекающей из этого деградацией профессионализма неразвивающихся сотрудников. В случае дефицита данного фактора возникают риски потери клиентов, что напрямую отражается на эффективности работы персонала и компании связи в целом. Компетентный же сотрудник будет создавать хорошее впечатление о компании в глазах клиентов. В условиях жесткой конкуренции на телекоммуникационном рынке России главным ресурсом компании становится именно человеческий ресурс.

Всё вышеперечисленное делает разработку комплексной методики оценивания компетентности сотрудников отрасли связи актуальной научной и социально значимой задачей, имеющей также большое значение для развития системы образования в России.

2. Разработка комплексной модели оценивания компетентности

Итак, компетентность является комплексной характеристикой личности и включает не только наличествующие у сотрудника знания, умения, навыки и личностные качества, но также и динамические характеристики их применения, выражающиеся непосредственно в текущей трудовой деятельности. Рассмотрим комплекс характеристик, системообразующих компетентность сотрудников отрасли связи, на примере специалистов компании, оказывающей телекоммуникационные услуги, а также одну из должностей профессорско-преподавательского состава (ППС) СибГУТИ – отраслевого вуза, осуществляющего подготовку таких специалистов.

2.1. Структурный состав компетентности: статический аспект

При рассмотрении статических профессиональных характеристик в первую очередь следует обратить внимание на профессиональные стандарты (ПС). Необходимость разработки и введения в действие ПС определена Указом Президента РФ «О мероприятиях по реализации государственной социальной политики» [9], входящем в т.н. «майские указы». Также, согласно вступившим в силу с 1 июля 2016 года изменениям в Трудовом кодексе (ТК) РФ об особенностях применения ПС работодатели обязаны применять эти стандарты, если ТК РФ или иными нормативными актами установлены особые требования к квалификации работников. Согласно положениям статьи 195.1 ТК РФ профессиональные стандарты – это характеристика квалификации, необходимой работнику для осуществления определенного вида профессиональной деятельности. ПС включают в себя набор обобщенных трудовых функций, которые, в свою очередь, включают в себя наборы трудовых функций (ТФ).

ТФ, реализуемые отдельными сотрудниками, закреплены их должностными инструкциями. Анализ их содержания позволяет также выделить набор личностных качеств (ЛК), характерных для соответствующей должности. Рассмотрим в качестве примера должность менеджера по бизнес-анализу и планированию продаж компании по оказанию телекоммуникационных услуг, а также должность доцента СибГУТИ, реализующего образовательную деятельность по программам бакалавриата, специалитета, магистратуры и (или) дополнительных профессиональных программ в отрасли связи. Наборы ЛК и ТФ, актуальные для соответствующих должностей в отрасли связи, представлены соответственно в табл. 1 и 2.

Должностная инструкция менеджера разработана в соответствии с профессиональным стандартом 06.029 «Менеджер по продажам информационно-коммуникационных систем (ИКС)», утвержденном приказом Минтруда и соцзащиты РФ от 8 октября 2015 года № 687н.

Должностная инструкция доцента разработана в соответствии с профессиональным стандартом 01.004 «Педагог профессионального обучения, профессионального образования и дополнительного профессионального образования», утвержденном приказом Минтруда и соцзащиты РФ от 8 сентября 2015 года № 608н.

Таблица 1. Распределение личностных характеристик по должностям в отрасли связи

| Должность | Личностные качества | Сквозные результаты |
|--|--|------------------------------------|
| Менеджер по бизнес-анализу и планированию продаж ИКС | аналитические способности, коммуникабельность, оперативность, пунктуальность, скрупулезность | ответственность, инициативность |
| Доцент (категория ППС) | коммуникабельность, нравственность, рефлексия, самосовершенствование, уверенность в себе, честность, толерантность | ответственность, самостоятельность |

В табл. 1 такие ЛК, как ответственность, инициативность, самостоятельность выделены в отдельную категорию как сквозные образовательные результаты, которые обязаны быть достигнуты в ходе образовательного процесса любой направленности [3].

В табл. 2 для каждой ТФ приведена ее мощность, которая равна общему числу компонентов ТФ: необходимых знаний, необходимых умений и трудовых действий. Как будет показано в подразделе 2.3, оценка ТФ рассчитывается как суперпозиция оценок ее компонентов, которые, в свою очередь, должны быть получены посредством проведения контрольных испытаний. Таким образом, мощность ТФ дает некоторое представление о трудоемкости процедуры оценивания ТФ в части подготовки и проведения испытаний.

Таблица 2. Распределение профессиональных характеристик по должностям в отрасли связи

| Должность | Трудовые функции | Мощность |
|--|---|----------|
| Менеджер по бизнес-анализу и планированию продаж ИКС <i>Профстандарт 06.029 Менеджер по продажам ИКС</i> | Измерение результативности, анализ и корректировка работы по продажам инфокоммуникационных систем и/или их составляющих | 13 |
| | Согласование (утверждение) маркетингового плана по продвижению и реализации инфокоммуникационных систем и/или их составляющих | 17 |
| | Разработка конкурентной стратегии организации с целью увеличения продаж инфокоммуникационных систем и/или их составляющих | 15 |
| Доцент (категория ППС) <i>Профстандарт 01.004 «Педагог профессионального обучения, профобразования и дополнительного профобразования»</i> | Преподавание учебных курсов, дисциплин (модулей) или проведение отдельных видов учебных занятий | 27 |
| | Профессиональная поддержка специалистов, участвующих в реализации курируемых учебных курсов, дисциплин (модулей), организации учебно-профессиональной, исследовательской, проектной и иной деятельности обучающихся | 19 |
| | Руководство научно-исследовательской, проектной, учебно-профессиональной и иной деятельностью обучающихся | 25 |
| | Разработка научно-методического обеспечения реализации курируемых учебных курсов, дисциплин (модулей) | 30 |

2.2. Структурный состав компетентности: динамический аспект

Вместе с тем оценивание компетентности сотрудников не является самоцелью, а осуществляется в привязке к достижению целей и решению задач компании, одной из которых является задача развития персонала, естественным результатом чего является повышение компетентности сотрудников. В качестве же критериев эффективности развития персонала можно использовать различные показатели, отражающие в динамике личностные и профессиональные характеристики сотрудников, а также степень их реализации в трудовой деятельности. Поэтому объективная оценка степени реализации личностных и профессиональных качеств сотрудников должна, помимо статического компонента, отражающего степень выполнения сотрудниками своих трудовых функций, напрямую прописанных в должностных инструкциях, также включать и динамический компонент, выражающий эффективность деятельности сотрудников с позиции достижения целей компании. Следует также отметить тесную связь данных компонентов между собой. В идеале должностные инструкции должны быть выстроены так, чтобы их выполнение сотрудником автоматически означало эффективное использование его профессиональных качеств с позиции наилучшего достижения целей компании. Однако это не всегда так.

Рассмотрим некоторые подходы к оцениванию эффективности использования персонала на примере обозначенных выше организаций в отрасли связи. Согласно уставу СибГУТИ цели деятельности университета напрямую связаны с двумя её основными видами: образовательной и научной деятельностью. Поэтому система ПЭ использования ППС должна так или иначе отражать оба этих компонента.

В настоящий момент для оценивания профессиональных качеств ППС и степени их реализации в трудовой деятельности используются системы аттестации и аккредитации ППС, которые с некоторой долей условности можно трактовать как базовый и дополнительный вариант оценивания.

Базовый вариант оценивания – это система аттестации ППС. Согласно Положению о порядке проведения аттестации работников, относящихся к ППС (утв. приказом СибГУТИ №13/50-16 от 21.03.2016 г.), аттестация проводится для сотрудников, занятых на условиях бессрочного трудового договора, один раз в пять лет с целью подтверждения соответствия работников занимаемым должностям на основе оценки их профессиональной деятельности. В Положении выделен ряд показателей – квалификационных характеристик по занимаемой должности, по которым производится оценка профессиональной деятельности сотрудников. В частности, при аттестации ППС должны в динамике оцениваться: результаты педагогической деятельности; личный вклад в повышение качества образования, в развитие науки и решение научных проблем в соответствующей области знаний, участие в развитии методик обучения и воспитания обучающихся, в освоении новых образовательных технологий; повышение профессионального уровня. По сути, речь идёт об оценке степени выполнения ППС своих ТФ, прописанных в должностных инструкциях. В то же время Положение об аттестации не содержит строгих количественных критериев оценки.

Дополнительный вариант оценивания – это система аккредитации ППС, содержащая количественные критерии оценки трудовой деятельности сотрудников, которые можно трактовать в том числе и как вклад того или иного сотрудника в достижение целей организации (университета). Согласно Положению об аккредитации ППС СибГУТИ (утв. приказом СибГУТИ №13/238-15 от 30.12.2015 г.) в общем числе 29-ти показателей аккредитации учитываются следующие компоненты: учебно-методическая и научная работа (11 шт.), научно-исследовательская работа (8 шт.), организационная работа и повышение квалификации (6 шт.), воспитательная работа (4 шт.). Показатели, используемые в системе аккредитации, в первую очередь направлены на стимулирование активности сотрудников и их участия в научно-исследовательской деятельности университета. В то же время они в очень ограниченном объеме и только косвенно учитывают участие сотрудников в образовательной деятельности. Таким образом, система показателей аккредитации дополняет и развивает подходы к оценке эффективности деятельности сотрудников, используемые в рамках аттестации ППС, однако в чистом виде, без корректировки, не может быть использована для такой оценки.

2.2.1. Система показателей эффективности деятельности ППС

Опираясь на систему оценивания деятельности сотрудников, используемую в СибГУТИ, а также опыт других вузов, применяющих систему эффективных контрактов, можно предложить систему из десяти ПЭ, позволяющих оценить эффективность деятельности сотрудника и его вклад в достижение целей организации. Основные данные о ПЭ для должности доцента СибГУТИ сведены в табл. 3.

1. Нормированная среднегодовая ставка учебной нагрузки i -го сотрудника за 5 лет \bar{L}_i рассчитывается как среднее арифметическое нормированных ставок учебной нагрузки i -го сотрудника \bar{L}_{ij} за j -е учебные годы в ретроспективе, начиная от текущего учебного года:

$$\bar{L}_i = \frac{1}{5} \sum_{j=1}^5 \bar{L}_{ij}, \quad (1)$$

$$\bar{L}_{ij} = \begin{cases} L_{ij}, & \text{если } L_{ij} < 1, \\ 1, & \text{если } L_{ij} \geq 1. \end{cases} \quad (2)$$

Нормирование ставки учебной нагрузки за j -й учебный год L_{ij} осуществляется по формуле (2) исходя из того, что нагрузка в объеме больше ставки оценивается как одна ставка (избыточная нагрузка не есть показатель качества работы).

Таблица 3. Перечень профессиональных показателей, характеризующих эффективность деятельности сотрудника, относящегося к категории ППС

| № п/п | Наименование показателя эффективности | Экспертные оценки | Показатели из положения об аттестации/аккредитации ППС |
|---|---|-------------------|---|
| Образовательная деятельность и воспитательная работа | | | |
| 1. | Среднегодовая ставка учебной нагрузки за 5 лет | – | Сведения о педагогической нагрузке за 5 лет |
| 2. | Качество разработанных УМК | e_{ij} | Сведения об образовательной деятельности за 5 лет |
| 3. | Качество работы в ЭИОС | e_{ij} | |
| 4. | Публикационная активность (учебно-методические труды) | a_t и b_t | Число учебно-методических трудов за 5 лет |
| 5. | Организационно-воспитательная активность | a_e и b_e | Сведения о воспитательной работе со студентами |
| Научно-исследовательская деятельность | | | |
| 6. | Публикационная активность (научные труды) | a_s и b_s | Число научных публикаций за 5 лет |
| 7. | Научно-исследовательская активность | a_r и b_r | Список грантов и НИОКР |
| 8. | Научно-организационная активность | a_o и b_o | Сведения о личном участии в научных мероприятиях, советах, редколлегиях |
| 9. | Научно-руководительская активность | a_m и b_m | Руководство НИРС студентов, руководство аспирантами |
| Повышение квалификации | | | |
| 10. | Коэффициент повышения квалификации | a_q и b_q | Повышение квалификации и переподготовка |

2. Качество разработанных УМК i -м сотрудником за 5 лет Q_{Si} определяется как нормированная средняя результативность e_{ij} по всем j -м руководимым дисциплинам в количестве N_s за последние 5 учебных лет в соответствии с матрицей наличия в составе УМК его компонентов, представленной в табл. 4:

$$Q_{Si} = \frac{1}{5N_s} \sum_{j=1}^{N_s} e_{ij}, \quad (3)$$

Таблица 4. Шкала для оценивания результативности разработки УМК учебной дисциплины

| Компонент УМК | Балл e_{ij} | | | | | |
|---|---------------|---|---|---|---|---|
| | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Рабочая программа дисциплины (РПД, наличие и соответствие требованиям) | + | + | + | + | + | |
| Оценочные средства (ОС) по дисциплине (наличие и соответствие требованиям) | + | + | + | + | | |
| Конспекты лекций, презентации и иные учебные материалы (наличие и соответствие РПД) | + | + | + | | | |
| Методические указания к выполнению курсовых/лабораторных работ, рефератов, РГР и пр., задания к ним (наличие и соответствие РПД и ОС) | + | + | | | | |
| Наличие прочих материалов, особо указанных в Положении (например, справки об обеспеченности литературой, рецензии и пр.) | + | | | | | |

Требования к УМК включают такие его характеристики, как комплектность и содержание, установленные Положением об основной профессиональной образовательной программе высшего образования (утв. приказом СибГУТИ №13/235-15 от 29.12.2015 г.), в т.ч. соответствие содержания предмету обучения учебной дисциплины, а также оформление, регламентируемое действующим ГОСТ 2.105-95 по оформлению текстовых документов. Экспертиза соответствия содержания предмету обучения осуществляется компетентным в области данного предмета обучения специалистом. Экспертизу формальных характеристик осуществляют члены учебно-методической комиссии факультета или(и) сотрудники учебно-методического отдела организации.

3. Качество работы в ЭИОС для i -го сотрудника Q_{ESi} определяется за отчетный год аналогично качеству разработанных УМК (показатель 2) с той разницей, что требования к работе с ЭУМК, разрабатываемым в ЭИОС, устанавливаются также инструкцией по работе в ЭИОС на базе виртуальной обучающей среды Moodle:

$$Q_{ESi} = \frac{1}{2N_{ES}} \sum_{j=1}^{N_{ES}} e_{ij}, \quad (4)$$

где N_{ES} – число ЭУМК, разработанных i -м сотрудником за отчетный год, e_{ij} – двухбалльные оценки j -х ЭУМК, разработанных i -м сотрудником, оцененные в соответствии со шкалой, представленной в табл. 5.

Таблица 5. Шкала для оценивания результативности работы в ЭУМК учебной дисциплины

| Качественная характеристика ЭУМК | Балл e_{ij} |
|---|---------------|
| Нет материалов, работа не ведется | 0 |
| Имеются материалы или результаты работы со студентами | 1 |
| Имеются материалы и результаты работы со студентами | 2 |

4. Публикационная активность (учебно-методические труды) для i -го сотрудника P_{Ti} определяется за 5 лет исходя из совокупного числа p_{Ti} публикаций:

$$P_{Ti} = \begin{cases} 0, & \text{если } x_i \leq a^*, \\ \frac{x_i - a^*}{b^* - a^*}, & \text{если } a^* < x_i < b^*, \\ 1, & \text{если } x_i \geq b^*, \end{cases} \quad (5)$$

где $x_i = p_{Ti}$, a^* и b^* – границы экспертно определенного интервала «хороших» значений $[a_i; b_i]^*$, ниже которого находится «плохая» область значений публикационной активности учебно-методического направления, а выше – «идеальная». Графическая интерпретация данной операции нечеткого нормирования в единичный отрезок представлена на рис. 1.

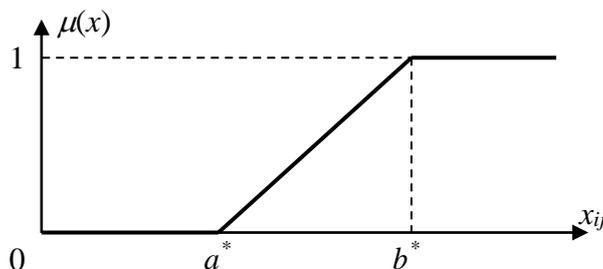


Рис. 1. График S-образной функции нечеткого нормирования $\mu(v)$ значений показателей на основе экспертных оценок границ интервала «хороших» значений $[a; b]^*$

5. Организационно-воспитательная активность i -го сотрудника A_{O_i} представляет собой агрегатный показатель, учитывающий такие виды работы, как кураторство академических групп, профориентацию, организацию студенческих олимпиад, конференций и прочих мероприятий по числу их выполнения i -м сотрудником o_i за отчетный год с учетом интервала «хороших» значений $[a_e; b_e]^*$ вычисляется по формуле (5) при $x_i = o_i$.

6. Публикационная активность (научные труды) для i -го сотрудника P_{S_i} аналогично показателю 4 определяется за 5 лет исходя из общего числа p_{S_i} научных публикаций, скорректированного с учетом их ценности для организации, и нормированного в единичный отрезок согласно экспертно определенному интервала «хороших» значений $[a_s; b_s]^*$ вычисляется по формуле (5) при $x_i = p_{S_i}$. При этом совокупный объем p_{S_i} вычисляется по формуле:

$$p_{S_i} = \sum_{j=1}^m k_{V_j} \cdot q_{ij}, \quad (6)$$

где q_{ij} – число публикаций j -го типа i -го сотрудника за последние 5 лет, k_{V_j} – коэффициент ценности публикации j -го типа. Значения коэффициентов определены в соответствии с Положением об аккредитации ППС СибГУТИ (утв. приказом СибГУТИ №13/238-15 от 30.12.2015 г.) и представлены в табл. 6.

7. Научно-исследовательская активность i -го сотрудника A_{SR_i} вычисляется по формуле (5) по числу x_i участия сотрудника в выполнении НИОКР или грантов, финансируемых через СибГУТИ, за отчетный год с учетом интервала «хороших» значений $[a_r; b_r]^*$.

Таблица 6. Шкала для оценивания ценности научных публикаций

| Тип научной публикации | Коэффициент ценности k_{V_j} |
|--|--------------------------------|
| Монография, за 1 печатный лист | 0.5 |
| Индексация в Web of Science | 2.0 |
| Индексация в Scopus (либо другой наукометрической базе цитирования из списка ВАК) | 1.5 |
| В научном издании из списка ВАК | 1.0 |
| Патенты, свидетельства о государственной регистрации программы / базы данных для ЭВМ | 1.0 |
| Индексация в РИНЦ, статья | 0.5 |
| Индексация в РИНЦ, доклад | 0.2 |
| Прочие публикации, статья | 0.15 |
| Прочие публикации, доклад | 0.05 |
| Прочие публикации, тезисы | 0.02 |

8. Научно-организационная активность i -го сотрудника A_{SO_i} вычисляется по формуле (5), где за x_i принимается суммарное число баллов e_{ij} , $j = \overline{1..n}$, за личное участие сотрудника в n мероприятиях за отчетный год с учетом интервала «хороших» значений $[a_o; b_o]^*$:

$$x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}. \quad (7)$$

Расчет x_i осуществляется на основе справочных значений a_{ij} в соответствии с табл. 7.

Таблица 7. Шкала для оценивания научно-организационной активности сотрудника

| Мероприятие | Балл e_{ij} |
|---|---------------|
| Работа в оргкомитете международной конференции | 1.5 |
| Работа в оргкомитете национальной конференции | 1.0 |
| Работа в оргкомитете региональной конференции | 0.5 |
| Очное участие в международной конференции | 1.0 |
| Очное участие в национальной конференции | 0.7 |
| Очное участие в региональной, внутривузовской конференции | 0.3 |
| Участие в заседании диссертационного совета | 0.5 |
| Участие в заседании ученого совета | 0.3 |
| Участие в заседании учебно-методического совета | 0.3 |
| Участие в заседании научно-технического совета | 0.2 |
| Участие в заседании редакционного совета | 0.2 |
| Участие в заседании какого-либо другого совета или комиссии | 0.1 |

9. Научно-руководительская активность i -го сотрудника A_{SMi} вычисляется по формуле (5), где за x_i принимается суммарное число баллов e_{ij} за j -е руководство, $j = \overline{1..n}$, за отчетный год с учетом интервала «хороших» значений $[a_m; b_m]^*$. Расчет x_i осуществляется на основе справочных значений e_{ij} в соответствии с табл. 8 по формуле (7).

Таблица 8. Шкала для оценивания научно-руководительской активности сотрудника

| Вид (форма) научного руководства | Балл e_{ij} |
|--|---------------|
| Результативное руководство аспирантом (защита за последние 5 лет) | 10.0 |
| Руководство магистрантом | 2.0 |
| Результативное руководство НИРС (научная публикация): | |
| – статьи в журнале из списка ВАК | 5.0 |
| – в издании, индексируемом в РИНЦ | 2.5 |
| – доклада на научной конференции | 0.5 |
| – тезисов доклада на научной конференции | 0.2 |
| Результативное руководство НИРС (занятие призового места, получение диплома, грамоты): | |
| – международный уровень | 5.0 |
| – национальный, региональный уровень | 2.5 |
| – городской уровень | 1.5 |
| – внутривузовский уровень | 0.5 |

10. Коэффициент повышения квалификации i -го сотрудника Q_i вычисляется по формуле (5), где за x_i принимается суммарное число баллов e_{ij} за участие в j -м мероприятии по повышению квалификации, $j = \overline{1..n}$, за последние 3 года с учетом интервала «хороших» значений $[a_q; b_q]^*$. Расчет x_i осуществляется на основе справочных значений e_{ij} в соответствии с табл. 9 по формуле (7).

Таблица 9. Шкала для оценивания коэффициента повышения квалификации сотрудника

| Мероприятие по повышению квалификации | Балл e_{ij} |
|---|---------------|
| Индивидуальное, факультативное повышение квалификации, стажировка (объем не менее 16 часов) | 0.4 |
| Курс переподготовки (объем не менее 100 часов) | 5.0 |
| Обучение в аспирантуре | 0.7 |
| Обучение в докторантуре | 1.5 |
| Утверждение в ученом звании доцента | 5.0 |
| Утверждение в ученом звании профессора | 10.0 |

2.2.2. Система показателей эффективности деятельности менеджера в отрасли связи

Система ПЭ в области менеджмента, бизнес-анализа и планирования продаж разработана на основе приказа руководителя компании о мероприятиях, направленных на повышение эффективности В2В, а также трудового договора с сотрудником, предписывающего обязанности по саморазвитию. Среди последних выделяются слежение за трендами и технологиями на рынке, внедрение и использование их в своей деятельности для достижения целей Компании, обучение по системе мотивации сотрудников продавать те продукты, которые находятся в приоритете у Компании, не реже чем раз в квартал. Формализованы 3 следующих ПЭ, оценивание которых осуществляется на основе данных за отчетный год.

1. Результативность i -го сотрудника R_i рассчитывается как нормированная в единичный отрезок оценка e_i по шкале, представленной в табл. 10:

$$R_i = \frac{2}{3} e_i. \quad (8)$$

Таблица 10. Шкала для оценивания результативности сотрудника по результативной реализации бизнес-проектов

| Выполненная работа | Балл e_i |
|---|------------|
| Реализовано не менее 1 проекта с оформленным результатом | 0.25 |
| Реализовано не менее 2–4 проектов с оформленным результатом | 1.00 |
| Реализовано более 4 проектов с оформленным результатом | 1.50 |

2. Коэффициент саморазвития i -го сотрудника A_i рассчитывается аналогично показателю результативности (8) с нормирующим коэффициентом $2/3$ от оценки e_i по шкале, представленной в табл. 11. Возможные действия по саморазвитию: прохождения курса «Компетенции будущего», изучение литературы и просмотр обучающих фильмов из рекомендуемого перечня, освоение экономических инструментальных средств, в т.ч. компьютерных программ.

Таблица 11. Шкала для оценивания коэффициента саморазвития сотрудника

| Выполненная работа по саморазвитию | Балл e_i |
|---|------------|
| Пройден курс или изучен 1 источник литературы | 0.25 |
| Пройден курс и изучен 1 источник литературы | 1.00 |
| Пройден курс и изучено более 1 источника литературы | 1.50 |
| Пройден курс и просмотрен и изучен обучающий фильм | 1.50 |
| Пройден курс и освоен 1 инструмент или программа | 1.50 |

3. Коэффициент обучения по системе мотивации для i -го сотрудника M_i также вычисляется аналогично показателю результативности (8) исходя из нормы, согласно которой

такое обучение сотруднику необходимо проходить 1 раз в квартал. Соответственно, за отчетный год коэффициент составит нормированное число участия в данном обучении с нормирующим коэффициентом 1/4.

Оценивание показателя 2 частично, а показателей 1 и 3 – полностью осуществляется на основании объективных данных о реализованных проектах и пройденных обучающих курсах. Факты изучения рекомендуемых литературы и фильмов, а также освоения инструментов и программ определяются посредством собеседования с сотрудником.

2.2.3. Система неформальных показателей эффективности трудовой деятельности

Наряду с рассмотренными формальными ПЭ на компетентность сотрудников существенное влияние оказывают также неформальные показатели (НП), определяющие, в частности, мотивацию к трудовой деятельности. Исследования, посвященные изучению мотивации, однозначно показывают, что именно неформальные институты, соединяющие контрагентов, наилучшим образом стимулируют выполнение обязательств сотрудников, не формализованных в должностных инструкциях или/и контактах. При этом система неформальных институтов функционирует быстрее и эффективнее, чем формальные рутины и процедуры [10]. Среди неформальных показателей использования ТР можно выделить, например, такие:

- любовь к своей работе (профессии);
- гармония и взаимопонимание в отношениях с другими сотрудниками (руководством);
- согласованность действий сотрудников, синергия трудовой деятельности;
- ценностное отношение к труду в ранжированном множестве ценностных ориентаций; и др.

Другое дело, что оценивание НП, в отличие от формальных ПЭ, является далеко не очевидным и во многом находится в плоскости психологии личности и психологии труда, хотя грубые оценки НП можно получить посредством проведения самоисследования либо экспертного оценивания. При этом необходимо, так же как и в случае оценивания ПЭ, задаться некоторой измерительной вербально-числовой шкалой.

2.3. Формальная модель оценивания компетентности

Оценивание компетентности персонала осуществляется на основе оценок личностных и профессиональных качеств сотрудников. Оценивание личностных качеств осуществляется с применением методики 1 на основе многофакторных методик исследования личности (ММИЛ) и нечеткой логики. В основу оценивания профессиональных качеств положено понятие о трудовых функциях. Для оценивания ТФ может быть применена методика 2 объективного оценивания компетенций на основе системного и энтропийного подходов с применением нечеткой логики. Обе методики на данный момент разработаны и развиваются.

Компетентность K_s s -го сотрудника определяется по формуле:

$$K_s = \frac{k_{\Lambda}}{N_{\Lambda_s}} \sum_{i=1}^{N_{\Lambda_s}} k_{\Lambda_i} \Lambda_{si} + \frac{k_{\Pi}}{N_{\Pi_s}} \sum_{j=1}^{N_{\Pi_s}} k_{\Pi_j} \Pi_{sj} + \frac{k_E}{N_{E_s}} \sum_{l=1}^{N_{E_s}} k_{E_l} E_{sl} + \frac{k_H}{N_{H_s}} \sum_{m=1}^{N_{H_s}} k_{H_m} H_{sm}, \quad (9)$$

где: N_{Λ_s} – число измеряемых ЛК s -го сотрудника, $N_{\Lambda_s} \in \mathbb{Z}$, $N_{\Lambda_s} > 0$;

N_{Π_s} – число измеряемых ТФ, выполняемых s -м сотрудником, $N_{\Pi_s} \in \mathbb{Z}$, $N_{\Pi_s} > 0$;

N_{E_s} – число измеряемых ПЭ s -го сотрудника, $N_{E_s} \in \mathbb{Z}$, $N_{E_s} > 0$;

N_{H_s} – число измеряемых НП s -го сотрудника, $N_{H_s} \in \mathbb{Z}$, $N_{H_s} > 0$;

Λ_{si} – оценка i -го ЛК s -го сотрудника, $\Lambda_{si} \in [0, 1]$, $i = \overline{1..N_{\Lambda_s}}$;

Π_{sj} – оценка j -й ТФ s -го сотрудника, $\Pi_{sj} \in [0, 1]$, $j = \overline{1..N_{\Pi_s}}$;

E_{sl} – оценка l -го ПЭ s -го сотрудника, $E_{sl} \in [0, 1]$, $l = \overline{1..N_{E_s}}$;

H_{sm} – оценка m -го НП s -го сотрудника, $H_{sm} \in [0, 1]$, $m = \overline{1..N_{H_s}}$;

k_{Λ_i} – коэффициент значимости i -го ЛК, $\sum_{i=1}^{N_{\Lambda_s}} k_{\Lambda_i} = k_{\Lambda}$, $k_{\Lambda} \in [0, 1]$;

k_{Π_j} – коэффициент значимости j -й ТФ, $\sum_{j=1}^{N_{\Pi_s}} k_{\Pi_j} = k_{\Pi}$, $k_{\Pi} \in [0, 1]$;

k_{E_l} – коэффициент значимости l -го ПЭ, $\sum_{l=1}^{N_{E_s}} k_{E_l} = k_E$, $k_E \in [0, 1]$;

k_{H_m} – коэффициент значимости m -го НП, $\sum_{m=1}^{N_{H_s}} k_{H_m} = k_H$, $k_H \in [0, 1]$;

k_{Λ} , k_{Π} , k_E , k_H – общие коэффициенты значимости личностного, профессионального статического и профессиональных динамических формального и неформального компонентов, причем $k_{\Lambda} + k_{\Pi} + k_E + k_H = 1$.

На рис. 2 представлена укрупненная структурная схема комплексной методики оценивания компетентности сотрудника.

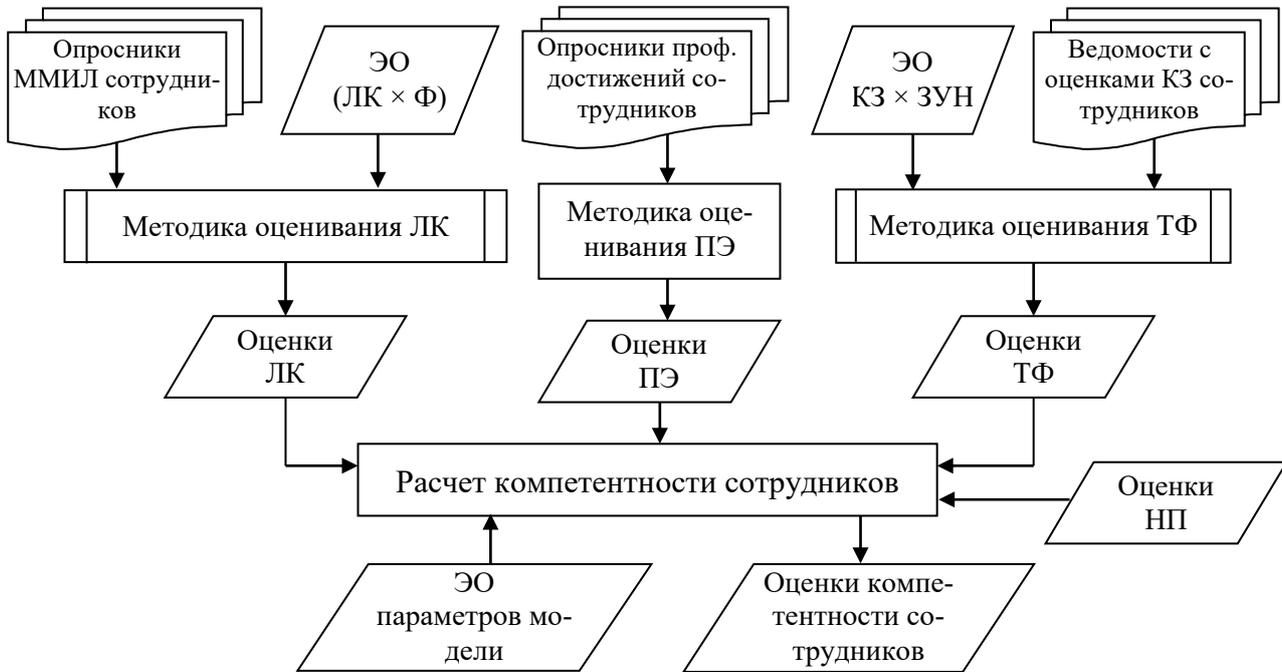


Рис. 2. Блок-схема процедуры комплексного оценивания компетентности сотрудников

Оценки Λ_{si} рассчитываются при помощи методики оценивания ЛК (методика 1, см. выше). Исходными данными являются опросники многофакторных методик, заполненные сотрудниками, а также экспертные оценки, устанавливающие соответствие между ЛК и факторами ММИЛ. Разработка данной методики рассмотрена в статье [11]. Методика позволяет осуществить одновременное оценивание набора из 39 ЛК, которые, по мнению экспертов, в наибольшей степени свойственны специалистам в отрасли связи. При необходимости набор ЛК может быть расширен и оценен экспертами.

Оценки Π_{sj} рассчитываются при помощи методики оценивания компетенций (методика 2, см. выше), адаптированной к данной задаче. Методика описана в статье [12] и основывается на нечетком оценивании знаний, умений и навыков (ЗУН), входящих в состав компетенции. Исходными данными являются оценки контрольных заданий (КЗ), выполненных со-

трудниками, а также экспертные оценки, устанавливающие соответствие между КЗ и ЗУН, входящих в состав ТФ.

Оценки E_{sl} вычисляются в соответствии с методикой, представленной в подразделе 2.2. на основе объективных данных о профессиональной деятельности сотрудников, выражаемых показателями, представленными в табл. 3, и параметризованными экспертными оценками.

Оценки H_{sm} определяются посредством анкетирования сотрудников с применением специальных психологических тестов, а также методом экспертного оценивания.

Все оценки редуцированы к единичному отрезку рациональных чисел и интегрируются в комплексные оценки компетентности сотрудников по формуле (9). Используемые при этом коэффициенты значимости ЛК, ТФ, ПЭ и НП выражают веса компонентов в соответствующей суперпозиции и определяются методом анализа иерархий с привлечением экспертов. Ввиду одноразовости данной процедуры непосредственно коэффициенты выступают как справочные данные и пересчитываются только при добавлении в состав соответствующей компетентности новых компонентов.

Итоговые оценки компетентности могут быть использованы для принятия решений в разных областях, в т.ч. о продлении контрактов с сотрудниками, о премировании сотрудников, а также при планировании переподготовки и повышения квалификации сотрудников. При этом с большим успехом может быть использована вербально-числовая шкала, разработанная на основе методики оценивания коммуникативной компетентности, заимствованной из [13], и представленная в табл. 12. В этой шкале достаточным уровнем компетентности следует считать базовый, ниже которого целесообразно принятие превентивных мер по повышению компетентности сотрудника.

Таблица 12. Вербально-числовая шкала для оценивания компетентности сотрудника

| Уровень компетентности | Интервал оценки | Качественное описание |
|------------------------|-----------------|---|
| Продвинутый | [0.9...1.0] | Высококомпетентный сотрудник, обладающий глубокими знаниями и опытом в области, эксперт |
| Опытный | [0.7...0.9) | Компетентный сотрудник, обладающий в достаточной степени практическими навыками в области |
| Базовый | [0.5...0.7) | В целом компетентный сотрудник, однако имеющий незначительные пробелы знаний и умений в области |
| Минимальный | [0.3...0.5) | Малокомпетентный сотрудник, имеющий фрагментарные знания и незначительный опыт в области |
| Недостаточный | [0.0...0.3) | Некомпетентный сотрудник, знания разрознены и поверхностны, опыт практически отсутствует |

2.4. Экспертиза параметров формальной модели оценивания компетентности

Рассмотренная модель оценивания компетентности предполагает использование экспертных оценок (ЭО), параметризующих модель в части оценивания ПЭ (из табл. 3 видно, что процедура оценивания 9 из 10 показателей включают ЭО), а также общую процедуру интеграции частных оценок в единый показатель компетентности по формуле (9) (коэффициенты значимости). Все ЭО, используемые в модели, можно разделить на 3 группы:

1. Балльные оценки показателей 1 и 2 (см. табл. 3) представлены в выражениях (3) и (4) двухбалльными оценками целого типа.

2. Границы интервалов «хороших» значений a и b (показатели 4–10, см. табл. 3), на которых оцениваемые параметры принимают вещественные значения единичного отрезка, выражаемые функцией нормирования $\mu(v)$ (подробнее см. подраздел 2.2, рис. 1).

3. Частные коэффициенты значимости компонентов модели вещественного типа, задействованные в интегральном выражении (9) определения компетентности сотрудника.

ЭО группы 2 оценивались экспертами в соответствии с опросным листом, структура которого кратко представлена в табл. 13. Каждому эксперту предлагается заполнить колонку «Значение». Интегральные оценки рассчитаны по формуле (10), представленной ниже, в соответствии с коэффициентами компетентности экспертов.

Таблица 13. Частные интервальные экспертные оценки показателей эффективности ТР

| Наименование показателя эффективности | Граничное значение | Значение | Примечание |
|---|--------------------|----------|---|
| Публикационная активность (учебно-методические труды) | Нижняя | 1.00 | Число публикаций за последние 5 лет |
| | Верхняя | 4.04 | |
| Публикационная активность (научные труды) | Нижняя | 0.66 | Число публикаций за последние 5 лет с учетом их ценности для организации |
| | Верхняя | 2.53 | |
| Организационно-воспитательная активность | Нижняя | 2.39 | Число мероприятий за отчетный год |
| | Верхняя | 6.67 | |
| Научно-исследовательская активность | Нижняя | 0.00 | Число участия в НИОКР/грантах на базе организации за отчетный год |
| | Верхняя | 1.70 | |
| Научно-организационная активность | Нижняя | 0.52 | Число баллов за участие в мероприятиях за отчетный год (определяются справочно) |
| | Верхняя | 2.43 | |
| Научно-руководительская активность | Нижняя | 1.06 | Число баллов за результативное руководство за отчетный год (справочно) |
| | Верхняя | 7.59 | |
| Коэффициент повышения квалификации | Нижняя | 0.26 | Число баллов за повышение квалификации за 3 года (справочно) |
| | Верхняя | 4.70 | |

Результатные групповые ЭО x_i , пригодные для использования в модели, вычисляются с учетом коэффициентов компетентности экспертов в данной предметной области по формуле:

$$x_i = \frac{\sum_{j=1}^n q_j x_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_j}, \quad (10)$$

где n – количество экспертов, задействованных в оценивании; x_{ij} – оценки i -х параметров модели j -ми экспертами, скорректированные на весовые коэффициенты компетентности экспертов $q_j \in [0, 1]$, полученных с использованием дифференциального метода, применение которого к процедуре оценивания параметров модели построения компетенций рассмотрено в [14]. Аналогично определяются групповые экспертные оценки для оценивания показателей 1 и 2 из табл. 3. При этом в качестве x_{ij} принимаются частные ЭО, данные j -ми экспертами.

Коэффициенты значимости компонентов модели рассчитываются при помощи экспертного метода анализа иерархий [15]. В построенной двухуровневой иерархии, представленной на рис. 3, отдельными группами во внутригрупповом сравнении были оценены степени превосходства (значимости) 9 ЛК (см. табл. 1), 4 ТФ (см. табл. 2) и 10 ПЭ (см. табл. 3), и далее – степени значимости групп компонентов попарно между собой. Формирование сравнительных экспертных суждений об относительной важности элементов иерархии осуществлялось методом парных сравнений в соответствии с т.н. фундаментальной шкалой в балльных экспертных оценках от 1 до 9, представленной в табл. 14.



Рис. 3. Иерархическая модель компонентов компетентности

Таблица 14. Фундаментальная шкала [15]

| Степень превосходства | Содержательная интерпретация |
|-----------------------|-----------------------------------|
| 1 | Отсутствие превосходства |
| 2 | Слабое (легкое) превосходство |
| 3 | Умеренное (среднее) превосходство |
| 4 | Превосходство чуть выше среднего |
| 5 | Заметное превосходство |
| 6 | Очень заметное превосходство |
| 7 | Сильное (очевидное) превосходство |
| 8 | Очень сильное превосходство |
| 9 | Абсолютное превосходство |

3. Исследование модели оценивания компетентности

Реализация разработанной модели оценивания компетентности осуществлялась в табличном процессоре MS Excel. Рассмотрим ее на примере оценивания компетентности доцентов СибГУТИ. В табл. 15 представлены значения 23 характеристик, описанных в подразделах 2.1 (статические характеристики) и 2.2.1 (динамические ПЭ, табл. 3). Обработка исходных данных из опросников осуществлялась в соответствии со схемой на рис. 2. Оценки ТФ и ЛК получены с выходов соответствующих моделей, реализованных программно, а

оценки ПЭ – посредством обработки данных опросников профессиональных достижений ППС с помощью методики, изложенной в подразделе 2.2.1.

Экспертами в настоящей работе выступили ее авторы, главным образом, вследствие того, что рассматриваемая методика оценивания компетентности является авторской и содержит значительные элементы новизны. Всего в экспертизе при оценивании ППС приняло участие 4 эксперта. Согласованность ЭО приоритетов между собой проверялась с помощью коэффициента конкордации Кендалла, значение которого $W = 0.62$ свидетельствует об относительно высоком и неслучайном уровне согласованности экспертных суждений. Расчеты значений компетентности ТР категории ППС представлены также в табл. 15.

Таблица 15. Результаты комплексного оценивания компетентности сотрудников категории ППС должности «доцент»

| Группа | Характеристика | Вес | Сотрудник 1 | Сотрудник 2 | Сотрудник 3 |
|------------------------------------|---|-------|-------------|-------------|-------------|
| ТФ | 04.001-Н/01.6 | 0.130 | 0.80 | 0.82 | 0.59 |
| ТФ | 04.001-И/02.7 | 0.023 | 0.74 | 0.79 | 0.79 |
| ТФ | 04.001-И/03.7 | 0.067 | 0.83 | 0.88 | 0.66 |
| ТФ | 04.001-И/04.8 | 0.038 | 0.79 | 0.89 | 0.62 |
| ЛК | Коммуникабельность | 0.014 | 0.70 | 0.70 | 0.50 |
| ЛК | Нравственность | 0.032 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| ЛК | Ответственность | 0.032 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| ЛК | Рефлексия | 0.006 | 1.00 | 0.85 | 0.80 |
| ЛК | Самосовершенствование | 0.020 | 1.00 | 1.00 | 0.80 |
| ЛК | Самостоятельность | 0.007 | 0.90 | 1.00 | 1.00 |
| ЛК | Толерантность | 0.018 | 0.70 | 0.50 | 1.00 |
| ЛК | Уверенность в себе | 0.014 | 0.60 | 1.00 | 0.70 |
| ЛК | Честность | 0.046 | 1.00 | 0.95 | 0.80 |
| ПЭ | Нормированная среднегодовая ставка учебной нагрузки | 0.083 | 1.00 | 1.00 | 0.98 |
| ПЭ | Качество разработанных УМК | 0.070 | 1.00 | 0.80 | 0.88 |
| ПЭ | Качество работы в ЭИОС | 0.051 | 1.00 | 0.67 | 0.85 |
| ПЭ | Публикационная активность (учебно-методические труды) | 0.122 | 0.29 | 0.57 | 0.57 |
| ПЭ | Организационно-воспитательная активность | 0.009 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| ПЭ | Публикационная активность (научные труды) | 0.091 | 0.54 | 1.00 | 1.00 |
| ПЭ | Научно-исследовательская активность | 0.058 | 0.50 | 1.00 | 1.00 |
| ПЭ | Научно-организационная активность | 0.013 | 0.13 | 1.00 | 0.00 |
| ПЭ | Научно-руководительская активность | 0.024 | 0.00 | 1.00 | 0.00 |
| ПЭ | Коэффициент повышения квалификации | 0.033 | 0.46 | 1.00 | 0.04 |
| Компетентность равновесная: | | | 0.69 | 0.84 | 0.68 |
| Компетентность взвешенная: | | | 0.71 | 0.85 | 0.73 |

Значения характеристик и расчеты оценок компетентности менеджеров компании связи представлены в табл. 16. Они получены аналогичным образом с тем отличием, что в качестве экспертов к процедурам соотнесения компонентов трудовых функций с проверяющими их контрольными заданиями и взвешивания характеристик компетентности были, помимо авторов работы, привлечены руководящие сотрудники компании связи. Всего в экспертизе приняло участие 6 экспертов. Значение коэффициента конкордации Кендалла составило $W = 0.48$, что свидетельствует о приемлемом и неслучайном уровне согласованности экспертных суждений.

Таблица 16. Результаты комплексного оценивания компетентности сотрудников компании связи должности «Менеджер по бизнес-анализу и планированию продаж ИКС»

| Группа | Характеристика | Вес | Сотрудник 1 | Сотрудник 2 | Сотрудник 3 |
|------------------------------------|---------------------------|-------|-------------|-------------|-------------|
| ТФ | 06.029-F/02.8 | 0.111 | 0.44 | 0.71 | 0.71 |
| ТФ | 06.029-F/03.8 | 0.012 | 0.23 | 0.67 | 0.68 |
| ТФ | 06.029-F/05.8 | 0.083 | 0.34 | 0.52 | 0.58 |
| ЛК | Аналитические способности | 0.025 | 0.83 | 0.81 | 0.89 |
| ЛК | Инициативность | 0.034 | 0.84 | 0.92 | 1.00 |
| ЛК | Коммуникабельность | 0.188 | 0.84 | 0.92 | 1.00 |
| ЛК | Оперативность | 0.139 | 0.79 | 0.90 | 0.95 |
| ЛК | Ответственность | 0.214 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| ЛК | Пунктуальность | 0.062 | 0.97 | 0.88 | 0.88 |
| ЛК | Скрупулезность | 0.025 | 0.92 | 0.86 | 0.91 |
| ПЭ | Результативность | 0.011 | 0.67 | 0.67 | 0.67 |
| ПЭ | Коэффициент саморазвития | 0.082 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| ПЭ | Коэффициент обучения | 0.016 | 0.75 | 1.00 | 1.00 |
| Компетентность равновесная: | | | 0.74 | 0.84 | 0.87 |
| Компетентность взвешенная: | | | 0.80 | 0.88 | 0.91 |

Из таблиц видно, что оценки компетенции, полученные при условии равновесия ее компонентов, заметно ниже оценок, вычисленных с учетом экспертно полученных весовых коэффициентов. Это обстоятельство является аргументом в пользу корректности произведенного взвешивания и целесообразности его применения при оценивании компетентности сотрудников. Так, при равновесном исследовании компетентности несомненно опытных доцентов СибГУТИ, принявших участие в исследовании, были получены оценки, относящиеся двух из трех доцентов (Сотрудник 1 и Сотрудник 3) к уровню «Базовый» по шкале из табл. 12, в то время как при взвешенном оценивании интегральные оценки попали в интервал, соответствующий уровню «Опытный», что, по мнению занятых в исследовании экспертов, является более объективной картиной. Аналогичная ситуация имеет место при оценивании менеджеров, где Сотрудник 3, характеризующийся богатым опытом работы и высоким профессионализмом, при равновесном оценивании компетентности был классифицирован как опытный. При оценивании же с учетом весовых коэффициентов он был отнесен к уровню «Продвинутый» и справедливо классифицирован как эксперт.

Таким образом, полученная комплексная методика оценивания компетентности сотрудников показала свою работоспособность и приемлемую адекватность, которая оценена на субъективном экспертном уровне, имея в виду отсутствие возможности измерения отклика реальной социально-экономической системы, в которую включены исследуемые сотрудники, а также принимая во внимание критически достаточное качественное и разумно необходимое количественное описание объекта моделирования по выбранным характеристикам [16]. Дальнейшее использование методики в других профессиональных областях возможно при условии привлечения экспертов из этих областей, а полученные при этом результаты должны дополнительно укрепить выводы о ее качестве.

4. Заключение

Разработанная методика комплексного оценивания компетентности обеспечивает формирование индивидуального портрета сотрудника в разрезе ее профессиональных устремлений и ориентирована на творческое развитие личности по индивидуальной траектории, взаимную помощь и его поддержку в самообразовании и самосовершенствовании. В отличие от существующих систем оценивания данная методика обеспечивает существенную объективизацию результатных оценок за счет широкого использования экспертных оценок и взвешивания отдельных компонентов компетентности для дифференциации их вклада в интегральную величину.

Комплексность оценивания вытекает из конвергенции различных парадигм образования, реализуется посредством системного подхода к процедуре оценивания на основе элементарных оценок их компонентов и тем самым обеспечивает повышение объективности и достоверности результатных оценок, что, в свою очередь, позволяет сделать достоверное заключение о степени профессиональной пригодности сотрудника, его профессиональной или профессионально-прикладной подготовки, определить необходимость и направленность повышения его квалификации.

Литература

1. *Облаухова М. В., Казначеева Н. Л.* Об эффективности использования трудовых ресурсов в современной российской экономике // Вестн. Том. гос. ун-та. Экономика. 2016. № 1 (33). С. 54–66.
2. Стратегия экономической безопасности Российской Федерации на период до 2030 года. Утв. указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2017 г. № 208. [Электронный ресурс]. URL: <http://kremlin.ru/acts/bank/41921/page/1> (дата обращения: 25.11.2018 г.).
3. *Ильин Д. Ю., Никульчев Е. В., Бубнов Г. Г., Матешук Е. О.* Информационно-аналитический сервис формирования актуальных профессиональных компетенций на основе патентного анализа технологий и выделения профессиональных навыков в вакансиях работодателей // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2017. № 2 (38). С. 71–88.
4. *Крохалева А. Б., Белов В. М.* Технология формирования показателей профессиональной готовности специалистов на современном рынке труда: монография. М.: Горячая линия – Телеком, 2017. 152 с.
5. *Ильина Т. С.* Проблемы формирования коммуникативной компетентности студентов технических вузов // Профессиональное образование в современном мире. 2015. № 1 (16). С. 124–133.
6. *Мялкина Е. В., Седых Е. П., Житкова В. А.* Моделирование системы управления развитием персонала на основе показателей КРІ в педагогическом вузе // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 3. С. 496.
7. *Клочков А. К.* КРІ и мотивация персонала. Полный сборник практических инструментов. Эксмо, 2010. 160 с.
8. *Бегларян М. Е., Пичуренко Е. А.* Проблемы формирования информационно-правового пространства России // Экономика. Право. Печать. Вестник КСЭИ. 2014. № 3–4. С. 68–73.
9. О мероприятиях по реализации государственной социальной политики - Указ Президента Российской Федерации от 7 мая 2012 г. № 597 [Электронный ресурс]. URL: <http://минобрнауки.рф/документы/4716> (дата обращения: 17.11.2018 г.).
10. *Нижегородцев Р. М.* Формирование человеческого капитала в системе неформальных институтов // Материалы II международной научно-практической конференции «Управление инновациями – 2006». Москва, ИПУ РАН. С. 274–276.

11. *Полетайкин А. Н., Ильина Т. С.* Нечеткий подход к оцениванию личностных качеств обучающихся вуза // ИТ-портал, 2016. № 4 (12). URL: <http://itportal.ru/science/tech/nechetkiy-podkhod-k-otsenivaniyu-li/> (дата обращения: 01.11.2018).
12. *Полетайкин А. Н., Ильина Т. С., Данилова Л. Ф.* Подготовка классификационных данных для конструирования профессиональных компетенций // Вестник СибГУТИ. 2018. № 2. С. 89–102.
13. *Lisa M. Schreiber, Gregory D. Paul & Lisa R. Shibley.* The Development and Test of the Public Speaking Competence Rubric // Communication Education. 2012. № 61:3. P. 205–233.
14. *Полетайкин А. Н., Данилова Л. Ф.* Информационная технология экспертного оценивания параметров оптимизации структурного состава компетенций // Вестник СибГУТИ. 2017. № 4. С. 84–96.
15. *Саати Т. Л.* Об измерении неосязаемого. Подход к относительным измерениям на основе собственного вектора матрицы парных сравнений // Cloud of Science. 2015. № 2 (1). С. 5. URL: https://cloudofscience.ru/sites/default/files/pdf/CoS_2_5.pdf (дата обращения: 19.12.2018 г.).
16. *Канев В. С., Полетайкин А. Н.* Адекватное моделирование образовательных систем // Труды XIII Международной Азиатской школы-семинара «Проблемы оптимизации сложных систем», Новосибирск, 2017. С. 604–610.

Статья поступила в редакцию 24.12.2018

Данилова Любовь Филипповна

ст. преподаватель кафедры математического моделирования бизнес-процессов СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-82-78, e-mail: lubermolenko@yandex.ru.

Захаров Никита Юрьевич

территориальный менеджер департамента транспортного обеспечения ПАО Сбербанк, ассистент кафедры математического моделирования бизнес-процессов СибГУТИ.

Никифорова Анжела Владимировна

менеджер по бизнес-анализу и планированию продаж ОАО «ВымпелКом» (компания «Билайн»), ассистент кафедры математического моделирования бизнес-процессов СибГУТИ, тел. (383) 269-82-78, e-mail: angel-niks@mail.ru.

Канев Валерий Семенович

д.т.н., доцент, зав. кафедрой математического моделирования бизнес-процессов СибГУТИ, тел. (383) 269-39-18, e-mail: kanev@ngs.ru.

Облаухова Мария Васильевна

к.э.н., доцент, доцент кафедры экономической теории СибГУТИ, тел. (383) 269-82-84, e-mail: oblauhova@ngs.ru.

Полетайкин Алексей Николаевич

к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий Кубанского государственного университета (350040, Краснодар, ул. Ставропольская, 149), тел. (861) 219-95-77, e-mail: alex.poletaykin@gmail.com.

Шевцова Юлия Владимировна

к.т.н., доцент кафедры математического моделирования бизнес-процессов СибГУТИ, тел. (383) 269-82-78, e-mail: shevcova_yuliya@mail.ru.

Complex methodology for assessing the competence of telecommunication industry employees based on personal and professional qualities

L. Ph. Danilova, N. Yu. Zakharov, V. S. Kanev, A. V. Nikiforova, M. V. Oblaukhova, A. N. Poletaykin, Yu. V. Shevtsova

The issue of quantitative assessment of employees' competence level is considered. It is the first step of personal development. The indicators of competencies are the personal and professional qualities of employees. Modified methods for assessing personal qualities and competences, new technique for assessing labor efficiency indicators have been developed. The research deals with the telecommunication industry.

Keywords: assessment of competencies, indicators of competencies, personal qualities, professional qualities, performance indicators, expert estimation, degree of significance of the qualities, complex method.

Исследование влияния способа задания периодичности проверок на надежность объекта

Б. П. Зеленцов, А. С. Трофимов

Приведена аналитическая модель функционирования одиночного объекта в условиях контроля технического состояния. Рассмотрены два варианта модели: при постоянном периоде между проверками и при периоде, распределенном по показательному закону. Проведено сравнение этих вариантов и сделаны соответствующие выводы о влиянии характера периодического контроля на уровень надёжности.

Ключевые слова: периодический контроль состояния, постоянный период контроля, период контроля, распределенный по показательному закону.

1. Введение

Для обеспечения необходимого уровня надёжности производится контроль состояния, под которым понимают операции, выполняемые автоматически или вручную с целью определения и квалификации состояния объекта [2]. В статье рассматривается функционирование объекта в условиях периодического контроля технического состояния путём проведения проверок. Такой контроль проводится во многих областях деятельности. В качестве примеров можно привести проведение проверок в следующих областях: различные виды медицинского диагностирования, функционирование электронного оборудования, программное обеспечение компьютеров, металлодетекторы, досмотр пассажиров и багажа, биометрическое сканирование, радиолокация, системы противопожарной безопасности, электрические сети, станции и подстанции и др. Результаты конкретных исследований, связанных с периодичностью профилактических мероприятий, достоверностью, полнотой и глубиной контроля приведены, например, в [6, 8].

Целью статьи является исследование способа задания периодичности проверок на надёжность объекта. Проверки технического состояния объекта могут производиться с постоянным, заранее установленным периодом или со случайным периодом. Периодический контроль со случайным периодом зачастую принимается распределенным по показательному закону, в результате обнаружение отказа задерживается на случайное время, распределенное по показательному закону. В статье проведено сравнение этих способов задания периодичности проверок и сделаны соответствующие выводы.

Математическая модель базируется на теории однородных марковских процессов в непрерывном времени. Переходы между состояниями описаны системой дифференциальных уравнений. Такой подход используется многими авторами при составлении моделей надёжности сложных систем (см., напр., [5–9]).

2. Диаграмма состояний

Объект используется по назначению и периодически подвергается проверкам. Между проверками может произойти отказ объекта, в результате чего он переходит из работоспособного состояния в неработоспособное. Объект используется по назначению как в работоспособном, так и в неработоспособном состоянии. Если проверке подвергается работоспособный объект, то после проверки он возвращается на функционирование. Если же проверяется неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого возвращается на функционирование в работоспособное состояние. Диаграмма состояний объекта с такими условиями приведена на рис. 1.

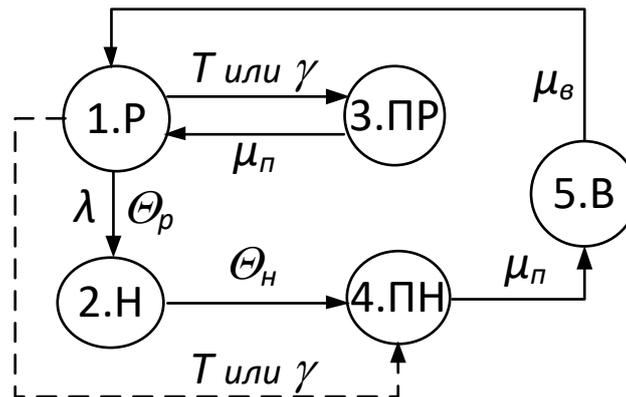


Рис. 1. Диаграмма состояний объекта

На диаграмме обозначено: Р – работоспособное состояние, Н – неработоспособное состояние, ПР – проверка работоспособного объекта, ПН – проверка неработоспособного объекта, В – восстановление объекта, T – постоянный период между проверками, γ – интенсивность начала проверки с периодом, распределённым по показательному закону, λ – интенсивность отказов, μ_v – интенсивность завершения восстановления, μ_p – интенсивность завершения проверки, θ_p – средняя продолжительность работоспособного состояния до отказа объекта, θ_n – средняя продолжительность неработоспособного состояния, то есть среднее время между моментом наступления отказа и началом проверки.

Будем называть периодом интервал времени между двумя последовательными проверками или между завершением восстановления и следующей проверкой. На одном периоде отказ может произойти или не произойти. Если отказ не происходит, то имеет место проверка работоспособного объекта в конце периода (переход $1 \rightarrow 3$). Если же отказ произойдёт, то имеет место переход $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4$, то есть на проверку в конце периода объект попадает в неработоспособном состоянии. Таким образом, целесообразно выделить периоды двух типов: периоды без отказа и периоды с отказом. На диаграмме состояний период с отказом показан пунктирной линией. Видно, что период с отказом состоит из двух частей: нахождение в работоспособном состоянии и нахождение в неработоспособном состоянии. Средние продолжительности этих состояний на периоде с отказом обозначены через θ_p и θ_n .

В течение одного периода объект используется по назначению, находясь в состояниях 1 или 2. Эксплуатацию объекта во времени можно представить в виде циклов. Восстановление, являющееся видом технического обслуживания, прерывает использование объекта по назначению. Циклом эксплуатации объекта будем называть его использование по назначению совместно с проверками и следующее за этим восстановление. В соответствии с этим множество состояний разбивается на два подмножества: $U = \{1, 2, 3, 4\}$; $V = \{5\}$. Таким образом, цикл эксплуатации объекта заключается в нахождении в подмножестве U и следующем за ним нахождении в подмножестве V . Другими словами, цикл эксплуатации состоит из нескольких периодов между двумя восстановлениями и самого восстановления.

Отказ объекта происходит на последнем периоде каждого цикла, так как после отказа объект всегда направляется на восстановление. Следует отметить, что число периодов без отказа на одном цикле является случайным, а период с отказом всегда один на одном цикле. Продолжительность периодов без отказа и с отказом остается одной и той же. На периоде с отказом происходит переход в состояние 2 с интенсивностью λ , при этом объект остается в состоянии 2 до проведения очередной проверки, после которой имеет место восстановление. Таким образом, продолжительность периода не зависит от отказа объекта.

Для расчёта надёжности в статье рассмотрены характеристики состояний 1 и 2 как на отдельных периодах, так и на цикле. Из диаграммы видно, что начало отсчёта любого периода начинается с состояния 1.

Рассмотрим периодический контроль, при котором проверки проводятся с постоянным периодом.

3. Периодический контроль с постоянным периодом

Проверки проводятся с постоянным периодом T , который отсчитывается от завершения восстановления или от завершения очередной проверки работоспособного объекта. Таким образом, постоянный период проверок отсчитывается от момента попадания в работоспособное состояние.

При периодическом контроле с постоянным периодом процесс протекает на интервале времени $[0; T]$. На этом интервале объект может находиться в состояниях 1 или 2. Переход в состояние очередной проверки может произойти только в момент времени $t = T$, отсчитываемый от завершения предыдущей проверки. Если на интервале $[0; T]$ отказ не происходит, то в момент времени $t = T$ объект переходит в состояние 3. Если же на интервале $[0; T]$ наступит отказ, то после этого объект остается в состоянии 2 и затем в момент времени $t = T$ переходит в состояние 4. Следует отметить, что как при отсутствии отказа, так и при наступлении отказа на периоде состояние 1 является начальным при $t = 0$. Дифференциальные уравнения равновесия на интервале $[0; T]$:

$$p'_1(t) = -\lambda p_1(t); \quad p'_2(t) = \lambda p_1(t). \quad (1)$$

Решение этих уравнений при начальных условиях $p_1(0) = 1, p_2(0) = 0$ имеет вид:

$$p_1(t) = e^{-\lambda t}; \quad p_2(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \quad (2)$$

Возможны следующие переходы на интервале $[0; T]$:

1) если на этом интервале отказ не произойдет, то в конце интервала при $t = T$ производится проверка работоспособного объекта (переход $1 \rightarrow 3$);

2) если произойдет отказ, то в конце интервала при $t = T$ производится проверка неработоспособного объекта (переход $1 \rightarrow 4$).

Итак, на очередную проверку объект может попасть в момент времени $t = T$, отсчитываемый от завершения восстановления или от завершения очередной проверки. Вероятности этих переходов названы вероятностями проходов полумарковского процесса [3, 4]:

$$p_{13} = p_1(T) = e^{-\lambda T}; \quad p_{14} = p_2(T) = 1 - e^{-\lambda T}. \quad (3)$$

Матрица вероятностей проходов P на множестве состояний и матрица вероятностей проходов P_{UU} на подмножестве U имеют вид:

$$P = \left\| p_{ij} \right\| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & e^{-\lambda T} & 1 - e^{-\lambda T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & e^{-\lambda T} & 1 - e^{-\lambda T} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где p_{ij} – условная вероятность непосредственного перехода из i -го состояния в j -е состояние при условии, что i -е состояние меняется. Вероятности прохождений описывают процесс в момент перемены состояния, поэтому $p_{ii} = 0$ для всех i . Вероятности p_{ij} называют ещё переходными вероятностями вложенной цепи.

По матрице P_{UU} находится матрица относительных частот подмножества U [3, 4]:

$$N_U = \|n_U(i, j)\| = (E - P_{UU})^{-1} = \begin{pmatrix} 1/(1 - e^{-\lambda T}) & 0 & e^{-\lambda T} / (1 - e^{-\lambda T}) & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1/(1 - e^{-\lambda T}) & 0 & 1/(1 - e^{-\lambda T}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где $n_U(i, j)$ – средняя относительная частота j -го состояния, определяемая как среднее число попаданий (вхождений) в j -е состояние до выхода из подмножества U при условии, что i -е состояние является начальным при вхождении в подмножество U ; E – единичная матрица.

Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе $V \rightarrow U$, то средние относительные частоты состояний можно представить одной строкой, которая является первой строкой матрицы N_U :

$$\bar{n}_U = \|n_U(1, j)\| = \|1/(1 - e^{-\lambda T}) \quad 0 \quad e^{-\lambda T} / (1 - e^{-\lambda T}) \quad 1\|. \quad (6)$$

Выразим средние относительные частоты состояний через исходные параметры:

$$n_U(1,1) = \frac{1}{1 - e^{-\lambda T}}; \quad n_U(1,3) = \frac{e^{-\lambda T}}{1 - e^{-\lambda T}}; \quad n_U(1,4) = 1. \quad (7)$$

Для лучшего понимания полученного результата отметим следующее:

- а) на одном цикле имеет место одно попадание в состояние 4;
- б) среднее число попаданий в состояние 1 всегда больше числа проверок работоспособного объекта на одну проверку;
- в) среднее число периодов без отказа равно $n_U(1,3)$;
- г) один цикл эксплуатации объекта содержит в среднем $n_U(1,1)$ периодов;
- д) отказ объекта обнаруживается системой контроля на последнем периоде.

Время нахождения в состоянии 1 на одном цикле состоит из $n_U(1,3)$ периодов без отказа с продолжительностью T плюс время нахождения в этом состоянии на последнем периоде. На последнем периоде средние времена нахождения в состояниях 1 и 2 (соответственно θ_p и θ_n) определяются интегрированием вероятностей в состояниях 1 и 2 на постоянном периоде:

$$\theta_p = \int_0^T p_1(t) dt = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{\lambda}; \quad \theta_n = \int_0^T p_2(t) dt = \frac{\lambda T - (1 - e^{-\lambda T})}{\lambda}. \quad (8)$$

Среднее время нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях на одном цикле (t_p и t_n соответственно) определяются относительными частотами этих состояний и временами θ_p и θ_n :

$$t_p = T \cdot n_U(1,3) + \theta_p = \frac{\lambda T e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})^2}{\lambda(1 - e^{-\lambda T})}; \quad t_n = \theta_n = \frac{\lambda T - (1 - e^{-\lambda T})}{\lambda}. \quad (9)$$

где t_p – среднее время нахождения в состоянии 1 на одном цикле при условии, что состояние 1 является начальным состоянием цикла; t_n – среднее время нахождения в состоянии 2 на одном цикле при условии, что состояние 1 является начальным состоянием цикла.

При расчете коэффициента готовности и коэффициента неготовности могут исключаться планируемые периоды, при которых применение объекта по назначению не предусматривается [1]. В состояниях 3, 4 и 5 применение объекта по назначению не предусматривается. Исключение времени нахождения в этих состояниях в рассматриваемой модели производится с помощью допущения: $\mu_n = \infty$ и $\mu_v = \infty$. Это допущение можно сформулировать следующим равносильным образом: продолжительность состояний проверки и восстановления яв-

ляется пренебрежимо малой по сравнению с продолжительностями состояний 1 и 2. При этом допущении среднее время одного цикла или среднее время нахождения в подмножестве U находится путём суммирования средней продолжительности работоспособного состояния и средней продолжительности неработоспособного состояния:

$$t_{\text{ц}} = t_{\text{р}} + t_{\text{н}} = \frac{T}{1 - e^{-\lambda T}}. \quad (10)$$

Стационарный коэффициент готовности (коэффициент неготовности) выражен как отношение средней продолжительности работоспособного состояния (неработоспособного состояния) к сумме средней продолжительности работоспособного состояния и средней продолжительности неработоспособного состояния [2]:

$$K_{\text{Г}} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{\lambda T e^{-\lambda T} + (1 - e^{-\lambda T})^2}{\lambda T}; \quad K_{\text{Н}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{[\lambda T - (1 - e^{-\lambda T})](1 - e^{-\lambda T})}{\lambda T}. \quad (11)$$

Видно, что $K_{\text{Г}} + K_{\text{Н}} = 1$.

4. Периодический контроль со случайным периодом

Отличительная особенность этого варианта заключается в том, что продолжительность одного периода, то есть время до очередной проверки, распределено по показательному закону с постоянной интенсивностью γ . В математических моделях на основе однородных марковских процессов в непрерывном времени принято, что продолжительность всех состояний распределена по показательному закону с постоянной интенсивностью. Это положение принято в данной модели, при этом время t на одном периоде отсчитывается от момента попадания в состояние 1. Таким образом, переходы между состояниями $1 \rightarrow 3$ и $2 \rightarrow 4$ происходят в непрерывном времени с постоянной интенсивностью γ . Система дифференциальных уравнений на одном периоде имеет вид:

$$p'_1(t) = -(\lambda + \gamma)p_1(t); \quad p'_2(t) = \lambda p_1(t) - \gamma p_2(t); \quad p'_3(t) = \gamma p_1(t); \quad p'_4(t) = \gamma p_2(t). \quad (12)$$

Решение этой системы уравнений при начальных условиях $p_1(0) = 1$:

$$\left. \begin{aligned} p_1(t) &= e^{-(\lambda + \gamma)t}; \quad p_2(t) = (1 - e^{-\lambda t})e^{-\gamma t}; \\ p_3(t) &= \frac{\gamma[1 - e^{-(\lambda + \gamma)t}]}{\lambda + \gamma}; \quad p_4(t) = \frac{\lambda + \gamma e^{-(\lambda + \gamma)t} - (\lambda + \gamma)e^{-\gamma t}}{\lambda + \gamma}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Очевидно, что сумма вероятностей $p_1(t) + p_2(t) + p_3(t) + p_4(t) = 1$.

Вероятности прохождений, или вероятности переходов, $1 \rightarrow 3$ и $1 \rightarrow 4$ принимают значения соответствующих вероятностей на интервале $[0; \infty)$:

$$p_{13} = p_3(\infty) = \frac{\gamma}{\lambda + \gamma}; \quad p_{14} = p_4(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \gamma}. \quad (14)$$

Матрица P вероятностей прохождений на множестве состояний и матрица P_{UU} вероятностей прохождений на подмножестве U формируются аналогично:

$$P = \|p_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma/(\lambda + \gamma) & \lambda/(\lambda + \gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \quad P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma/(\lambda + \gamma) & \lambda/(\lambda + \gamma) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (15)$$

Первая строка матрицы относительных частот $N_U = (E - P_{UU})^{-1}$ имеет вид:

$$\bar{n}_U = \|n_U(1, j)\| = \left\| \begin{pmatrix} \lambda + \gamma & 0 & \gamma & 1 \end{pmatrix} \right\|. \quad (16)$$

Средние относительные частоты состояний вычисляются по формулам:

$$n_U(1,1) = \frac{\lambda + \gamma}{\lambda}; \quad n_U(1,3) = \frac{\gamma}{\lambda}; \quad n_U(1,4) = 1. \quad (17)$$

Видно, что $n_U(1,3) + n_U(1,4) = n_U(1,1)$, то есть на одном цикле всегда одно попадание в состояние 4, а среднее число попаданий в состояние 3 меньше среднего числа попаданий в состояние 1 на одно попадание.

Перейдём к временам нахождения в состояниях на одном периоде.

Среднее время периода с отказом, также равного $1/\gamma$, состоит из двух частей: среднего времени θ_p нахождения в состоянии 1 и среднего времени θ_n нахождения в состоянии 2. Средние времена θ_p и θ_n определяются вероятностями нахождения в состояниях 1 и 2 на последнем периоде:

$$\theta_p = \int_0^{\infty} p_1(t) dt = \frac{1}{\lambda + \gamma}; \quad \theta_n = \int_0^{\infty} p_2(t) dt = \frac{\lambda}{(\lambda + \gamma)\gamma}. \quad (18)$$

Видно, что $\theta_p + \theta_n = 1/\gamma$, то есть сумма средних времён состояний 1 и 2 на последнем периоде равна среднему периоду, который не зависит от того, наступил отказ или не наступил.

Средние времена нахождения в состояниях 1 и 2 на одном цикле, соответственно t_p и t_n , вычисляются по формулам:

$$t_p = n_U(1,3)/\gamma + \theta_p = \frac{2\lambda + \gamma}{\lambda(\lambda + \gamma)}; \quad t_n = \theta_n = \frac{\lambda}{(\lambda + \gamma)\gamma}. \quad (19)$$

Среднее время цикла:

$$t_{\text{ц}} = t_p + t_n = \frac{\lambda + \gamma}{\lambda \cdot \gamma}. \quad (20)$$

Коэффициенты готовности и неготовности:

$$K_{\text{Г}} = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} = \frac{(2\lambda + \gamma)\gamma}{(\lambda + \gamma)^2}; \quad K_{\text{Н}} = \frac{t_n}{t_{\text{ц}}} = \frac{\lambda^2}{(\lambda + \gamma)^2}. \quad (21)$$

Видно, что $K_{\text{Г}} + K_{\text{Н}} = 1$.

Замечание. Среднее время цикла может быть получено также с учётом того, что продолжительность периода не зависит от того, наступил или не наступил отказ:

$$t_{\text{ц}} = n_U(1,1) \cdot (1/\gamma) = \frac{\lambda + \gamma}{\lambda \cdot \gamma}. \quad (22)$$

где $1/\gamma$ – средняя продолжительность периода между проверками.

5. Сравнение способов задания периодичности проверок

Для сравнения способов задания периодичности проверок введём параметр ρ , который назовём приведённой интенсивностью отказов объекта: $\rho = \lambda \cdot T$ для периодического контроля с постоянным периодом и $\rho = \lambda/\gamma$ для периодического контроля со случайным периодом. Смысл этого параметра заключается в следующем: для периодического контроля с постоянным периодом это среднее число отказов объекта за постоянный период, а для периодического контроля со случайным периодом – среднее число отказов объекта за среднее время между проверками. Сравнение способов задания периодичности проверок будем проводить по параметру ρ . При одной и той же интенсивности отказов и при равенстве параметров ρ сравнение происходит при условии, что постоянный период между поверками равен среднему времени между проверками: $T = 1/\gamma$. Формулы для вычисления показателей эксплуатации и надёжности с использованием параметра ρ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Вычисление показателей эксплуатации и надёжности с помощью параметра ρ

| Показатель | Проверки с постоянным периодом ($\rho = \lambda \cdot T$) | Проверки со случайным периодом ($\rho = \lambda/\gamma$) |
|---------------------------------|---|--|
| Коэффициент готовности | $[\rho \cdot e^{-\rho} + (1 - e^{-\rho})^2]/\rho$ | $(1 + 2\rho)/(1 + \rho)^2$ |
| Коэффициент неготовности | $[(\rho - (1 - e^{-\rho}))(1 - e^{-\rho})]/\rho$ | $\rho^2/(1 + \rho)^2$ |
| Среднее время цикла | $T/(1 - e^{-\rho})$ | $(1 + \rho)/(\rho \cdot \gamma)$ |
| Средняя частота восстановлений | $(1 - e^{-\rho})/T$ | $(\rho \cdot \gamma)/(1 + \rho)$ |
| Среднее число проверок на цикле | $1/(1 - e^{-\rho})$ | $(1 + \rho)/\rho$ |
| Средняя частота проверок | $1/T$ | γ |

Следует отметить, что формулы для вычисления показателей эксплуатации и надёжности в табл. 2 приведены при ранее принятом допущении о пренебрежимо малой продолжительности состояний проверки и восстановления. При необходимости могут быть учтены продолжительности этих состояний. Например, при расчёте коэффициента технического использования учитывается время простоев, обусловленных проверками и восстановлением объекта [1].

Приведённые результаты позволяют сравнить модели с разными способами задания периодичности проверок по разным показателям. В частности, значения коэффициента неготовности в зависимости от значения параметра ρ приведены в табл. 2. При случайном периоде коэффициент неготовности несколько больше по сравнению с вариантом с постоянным периодом. Это расхождение объясняется тем, что отказ объекта может быть обнаружен в момент времени $t > 1/\gamma$, то есть этот момент времени может быть больше параметра $1/\gamma$, принятого для сравнения способов задания периодичности проверок. Поэтому при одинаковых частотах проверок ($1/T = \gamma$) среднее время нахождения в неработоспособном состоянии на последнем периоде цикла (θ_n) несколько больше для варианта со случайным периодом.

Таблица 2. Значения коэффициента неготовности при разных значениях параметра ρ

| ρ | Проверки с постоянным периодом | Проверки со случайным периодом |
|-----------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.23 | 0.25 |
| 10^{-1} | $0.5 \cdot 10^{-2}$ | $0.8 \cdot 10^{-2}$ |
| 10^{-2} | $0.5 \cdot 10^{-4}$ | 10^{-4} |
| 10^{-3} | $0.5 \cdot 10^{-6}$ | 10^{-6} |
| 10^{-4} | $0.5 \cdot 10^{-8}$ | 10^{-8} |

6. Заключение

Итак, приведены модели эксплуатации объекта, который подвергается проверкам с постоянным периодом и с периодом, распределённым по показательному закону. Получены формулы для расчёта коэффициентов готовности и неготовности и некоторых других показателей эксплуатации объекта. В этих формулах использован параметр ρ , названный приведённой интенсивностью отказов объекта. Проведённые расчеты показали, что при достаточно малых значениях этого параметра (10^{-2} и меньше) коэффициент неготовности имеет порядок ρ^2 , при этом имеет место двукратное расхождение между значениями коэффициента неготовности при рассмотренных способах задания периодичности проверок.

Литература

1. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения.
3. *Зеленцов Б. П.* Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.
4. *Зеленцов Б. П.* Метод относительных частот моделирования вероятностных систем // Вестник СибГУТИ. 2017. № 2. С. 51–63.
5. *Истомина А. А., Бадеников В. Я., Истомин А. Л.* Управление товарными запасами на основе теории массового обслуживания // Вестник СибГУТИ. 2017. № 3. С. 94–103.
6. *Лубков Н. В., Спиридонов И. Б., Степанянц А. С.* Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. В. 85.
7. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985.
8. *Острейковский В. А.* Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.
9. *Рахман П. А.* Показатели надёжности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9. С. 467–470.

*Статья поступила в редакцию 11.12.2018;
переработанный вариант – 20.01.2019.*

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-39-36, e-mail: zelentsovb@mail.ru.

Трофимов Андрей Сергеевич

к.т.н., доцент кафедры электрических станций НГТУ (630073, Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), тел. (383) 346-13-73, e-mail: as.trofimov@gmail.com.

Investigation of periodic checking conditions on reliability of an item

B. P. Zelentsov, A. S. Trofimov

An analytic model of an item functioning is represented under two types of periodic checking conditions: check-out operations with regular period and with random period distributed exponentially. The state-transition diagram is given for the periodic checking conditions. The model is based on the theory of semimarkov processes using matrix methods for mathematical operations. Consideration of the model reveals the influence of the checking conditions on the reliability level.

Keywords: periodic checking conditions, regular period of check-out operations, random period of check-out operations.

Модель распределенной самоорганизующейся сети сенсоров IoT

М. В. Ушакова, Ю. А. Ушаков, А. Л. Коннов, Д. В. Горбачев¹

Работа направлена на изучение особенностей упрощенной реализации стека протоколов, эффективности маршрутизации и производительности в режиме транзитной передачи данных устройств с приоритетом на максимально долгое время работы от батарей. Решение задачи управления сетевыми устройствами в сети с большим количеством сенсоров (например, сеть Интернета вещей) является актуальной и может быть решена путем создания ячеистой сети типа mesh. Но в таких сетях может возникнуть ситуация, когда из-за выхода из строя одного или нескольких устройств будет нарушена работоспособность всей сети. В связи с чем предлагается для соединений и передачи данных использовать самоорганизующуюся сеть на основе канального уровня Wi-Fi и протокола PainlessMesh. Для исследования возможности применения предлагаемого решения в работе разработана четырехмерная модель Маркова и получены аналитические выражения для оценки параметров функционирования сети. На основе полученных моделей построен вычислительный алгоритм, позволяющий имитировать сценарии работы сети. Адекватность моделей подтверждается путем эмуляции сценария работы кластера датчиков. Основными результатами работы являются: в научном аспекте – разработанные модели оценки параметров работы сети IoT; в практическом аспекте – полученные с помощью имитации графики зависимостей задержки при включении узла сети от количества узлов и скорости «пробуждения» узла. Кроме того, выявлено, что многопротокольные устройства могут работать более эффективно, при этом поддерживая необходимую производительность сети передачи данных.

Ключевые слова: беспроводные сети, Интернет вещей, самоорганизующиеся сети, маршрутизация, сетевой протокол, узел ретрансляции, шлюз.

1. Введение

Работа IoT (Internet of Things, Интернет вещей) в обычных Wi-Fi сетях требует поддержки множества протоколов и стандартов, что приводит к использованию существенной доли ресурсов небольших контроллеров. Использование многопротокольных шлюзов оправдано только в централизованных системах, кроме того, такие шлюзы зачастую имеют совместимость не со всем оборудованием и при этом не имеют возможности вмешиваться в прошивку, управляющую взаимодействием с устройствами.

С увеличением количества устройств становится сложно поддерживать доступность беспроводных сетей из-за увеличения взаимного влияния и помех, поэтому актуальной задачей будет являться создание ячеистых сетей типа mesh – это сеть, где узлы не обязательно должны быть подключены к коммутатору, поскольку они могут подключаться по беспроводной сети между собой. Некоторые узлы такой сети могут предоставлять инфраструктуру для транспортировки трафика одновременно со своей основной функцией. Правильно спроектированные

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00485.

mesh-сети являются надежными и избыточными и их можно расширить, включив в них множество устройств. Однако в концепции IoT простое перемещение сетевого узла или удаление узла может полностью изменить как маршрутизацию, так и радиочастотную обстановку.

Технологии самоорганизующейся сети доступны для самых распространенных протоколов IoT – Wi-Fi, Bluetooth LE, IEEE 802.15.4 (в том числе 6LoWPAN), LoRA. Однако каждый протокол имеет свои реализации, несовместимые с другими протоколами. При использовании в качестве сетевого протокола IPv6, особенно с Link-Local и Anycast, появляется возможность коммутировать пакеты между различными интерфейсами для наилучшей маршрутизации по выбранным критериям.

2. Постановка проблемы

Особой проблемой IoT является энергопотребление – многие устройства должны экономить заряд аккумуляторов, поэтому большую часть времени они находятся в режиме пониженного энергопотребления – Sleep. При включении они выполняют требуемую функцию, а затем, если требуется, передают результаты или другие данные на сервер. Периоды сна и продолжительность работы для каждого устройства могут быть различны и иногда вычисляются по внутренним правилам либо же случайным образом. Это затрудняет как использование таких устройств в качестве транзитных, так и планирование загрузки очередей и буферов передачи информации на узлах ретрансляции. В работе [1] предлагалось создание гибрида сетей CSMA/CA и TDM для планирования временного разделения передачи данных, но проводные технологии TDM почти никак не сказываются на энергосбережении передающих устройств.

Для изучения путей решения проблемы предлагается построить модель работы соединенной и передачи данных самоорганизующейся сети на основе канального уровня Wi-Fi и протокола PainlessMesh для популярнейшей платформы ESP8266 и ESP32. Протокол является заменой традиционной IP-сети и позволяет полностью на программном уровне определять алгоритмы маршрутизации, рассылки, отказоустойчивости, а также иметь несколько шлюзов.

3. Модель работы Wi-Fi Mesh с периодическим включением

Рассмотрим общую структуру беспроводной самоорганизующейся сети, показанную на рис. 1.

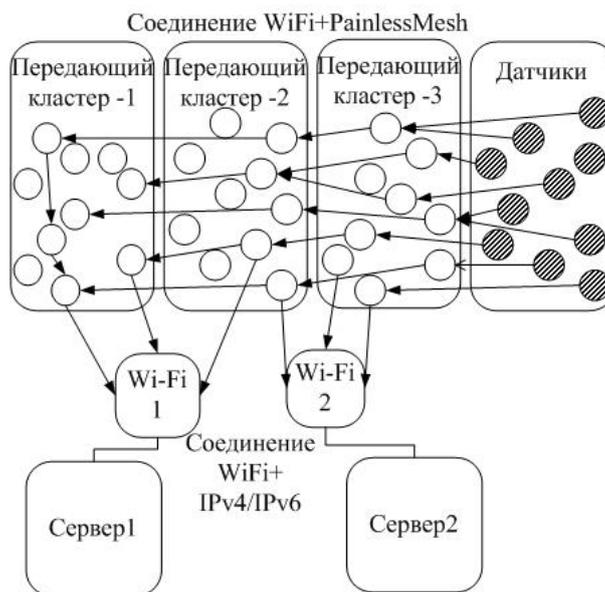


Рис. 1. Общая схема беспроводной сети

Сеть состоит из кластера датчиков, содержащего узлы с Wi-Fi-датчиками, трех передающих кластеров с узлами Wi-Fi-ретрансляции, серверов и шлюзов в обычную сеть Wi-Fi [2]. Внутри кластера и между кластерами в пределах протокола PainlessMesh передача идет только в режиме ad-hoc ближайшим точкам. Кластеры формируются по принципу автономных систем, маршрутизация между кластерами осуществляется на основе информации об известных внешних серверах [3]. Маршрутизация внутри сети будет происходить программно-управляемым способом путем выбора нескольких узлов с максимальным уровнем сигнала к известным Wi-Fi-точкам обычной сети, через которые удалось достичь заданных серверов. Вопрос маршрутизации и выбора шлюзов выходит за рамки данной статьи и будет исследоваться отдельно. Определим датчики в заданной сети как автономные и функционирующие строго по расписанию.

Данные датчиков должны быть направлены в сетевой сервер (например, MQTT) через случайные узлы ретрансляции. Функциональная модель узлов ретрансляции описывается четырьмя состояниями: спящий режим (S_i), режим прослушивания (I_i), режим активного поиска (A_i) и режим передачи данных CSMA/CA (рис. 2).



Рис. 2. Функциональная модель узлов ретрансляции

Введём обозначения: P_x – вероятность перехода узла ретрансляции в следующий слот прослушивания из текущего, если в данном слоте нет входящих пакетов, P_a – вероятность перехода узла ретрансляции в следующий интервал режима активного поиска из текущего, когда в данном интервале нет запроса, $P_{S/I}$ и $P_{S/A}$ – вероятность перехода узла в спящий режим из последнего слота состояний прослушивания и активного поиска соответственно. В спящем режиме узел ретрансляции находится до тех пор, пока не будет достигнуто время пробуждения. В режиме прослушивания узел ретрансляции передает через ad-hoc запрос на соединение в предыдущий кластер для достижения требуемого сервера и дожидается ответа. Так, например, для сервера-1 в кластере-2 предыдущим является кластер-3, где выбирается случайный сосед с наилучшим сигналом из просканированного списка. После успешного получения ответа узел ретрансляции переходит из состояния простоя в состояние активного поиска маршрута и дожидается появления информации из следующего кластера (кластер-1 – следующий для кластера-2) или от шлюза. Временные интервалы между запросами, получаемые узлом в режиме активного поиска, имеют пуассоновское распределение и определяют время ожидания в этом режиме.

Узел ретрансляции, который успешно принял запрос в пределах максимально возможного интервала времени нахождения в режиме активного поиска $L1$, переходит в режим передачи данных CSMA/CA. На рис. 3 показана четырехмерная цепь Маркова, где первое измерение – признак причины выхода, а в качестве других трех измерений используются время ожидания

передачи (M) при изменяющемся размере окна ожидания W, количество срабатываний механизма ожидания передачи (K) и количество коллизий (N) [4, 5]. При этом причина M имеет детализацию: M1 – отказ при ожидании несущей, M2 – при ожидании отсутствия помех.

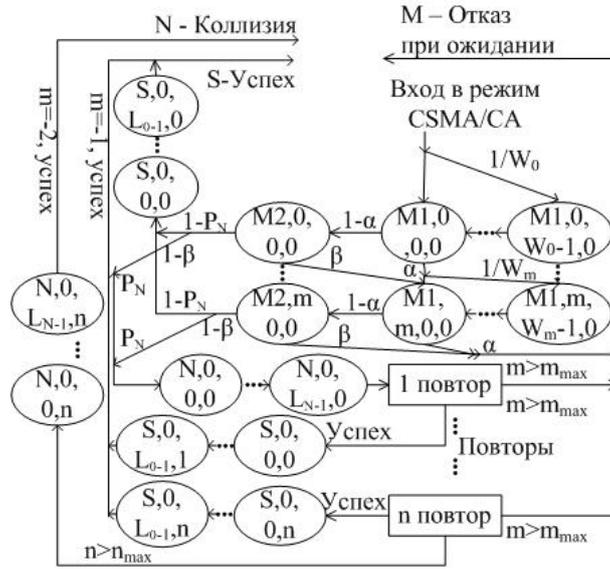


Рис. 3. Четырехмерная модель Маркова

Основное внимание уделяется осуществлению повторных попыток CSMA/CA в сценариях с несколькими промежуточными ретрансляторами. Вероятности загрузки канала α и β в состояниях ССА по стандарту IEEE 802.11-2007 на физическом уровне (обнаружение несущей ССА-CS и обнаружение помех ССА-ED) и вероятность коллизии P_N , показанная на рис. 2, получены с учетом влияния вероятностей спящего режима, режима прослушивания и режима активного поиска наряду с моделью CSMA/CA.

Модель строится в два этапа. На первом этапе получаем вероятности перехода для всех состояний, показанных на рис. 2, а затем на втором этапе строится модель CSMA/CA. Обозначим через μ_ω среднюю скорость пробуждения узла в кластере, состоящем из R узлов, L_1 и L_2 – продолжительность режима активного поиска и режима прослушивания соответственно.

$$P_x = \exp(-\lambda), P_a = \exp(-\lambda_a). \tag{1}$$

В формуле (1) P_x – вероятность перехода узла ретрансляции в следующий слот прослушивания из текущего, если в данном слоте нет входящих пакетов со средним λ пуассоновского потока. P_a указывает вероятность перехода узла ретрансляции в следующий интервал режима активного поиска из текущего, когда в данном интервале нет запроса со средним значением λ_a пуассоновского потока, показанного в (4). Из (1) может быть получена вероятность перехода узла в спящий режим из последнего слота состояний прослушивания ($P_{S/I}$) и активного поиска ($P_{S/A}$), как показано в (2) и (3) соответственно. Наконец, $P_{S/CSMA}$ в (5) указывает вероятность перехода узла из состояния CSMA/CA в первый интервал состояния сна, причем эта вероятность должна всегда равняться единице.

$$P_{S/I} = P_{F/I_1} = P_x^{L_2}, \tag{2}$$

где P_{F/I_1} – вероятность перехода из первого слота режима прослушивания в первый слот спящего режима

$$P_{S/A} = P_{F/A_1} = P_x^{L_1}, \tag{3}$$

$$\lambda_a = \mu_\omega \cdot R, \tag{4}$$

$$P_{S|CSMA} = P_{F|CSMA_m} + P_{F|CSMA_n} + P_{F|CSMA_{ycn}} = 1, \quad (5)$$

$$P_{S_0} = P_{S_0} P_x^{L_2} + P_{S_0} (1 - P_x^{L_2}) P_a^{L_1} + P_{S|CSMA} u_{0,0,0}. \quad (6)$$

В формуле (5) $P_{F|CSMA_m}$ и $P_{F|CSMA_n}$ – вероятности перехода в первый слот спящего режима, когда отправленный пакет отбрасывается в CSMA/CA после превышения максимального m и n соответственно. $P_{F|CSMA_{ycn}}$ – вероятность того, что узел перейдет в первый слот спящего режима после успешной пересылки пакета. Выражение (6) можно упростить, чтобы получить вероятность P_{S_0} того, что узел останется в первом слоте спящего режима в любой данный временной интервал в терминах $u_{0,0,0}$, где $u_{0,0,0}$ – вероятность того, что узел останется в первом интервале CCA-CS модели CSMA/CA (α), а $u_{state,m,k,n}$ – вероятность перехода в состояние $state$ с размером окна задержки m , количеством ожиданий k , количеством коллизий n .

$$P_{CSMA} = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} \sum_{j=0}^n u_{M1,i,k,j} + \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^m u_{M2,i,0,j} + \sum_{j=0}^n \left(\sum_{k=0}^{L_3-1} u_{S,0,k,j} + \sum_{k=0}^{L_C-1} u_{N,0,k,j} \right) = Z_1 \cdot u_{0,0,0}, \quad (7)$$

где L_3 – количество слотов спящего режима, L_C – количество слотов коллизии.

$$P_S + P_I + P_A + P_{CSMA} = 1, \quad (8)$$

$$P_{S_0} \left(L_3 + \sum_{i=1}^{L_2} P_x^{i-1} + (1 - P_x^{L_2}) \sum_{i=1}^{L_1} P_a^{i-1} \right) + Z_1 u_{0,0,0} = 1. \quad (9)$$

Из (7) следует, что вероятность того, что узел находится в состоянии CSMA/CA (P_{CSMA}) в случайно заданный интервал времени представляет собой сумму α , β , вероятности успеха и вероятности отказа. Z_1 – коэффициент пропорциональности после выражения всех вероятностей в (7) через $u_{0,0,0}$. В формуле (8) P_S , P_I , P_A и P_{CSMA} – вероятности того, что узел перейдет в спящий режим, режим прослушивания, режим активного поиска и режим CSMA/CA соответственно в случайно заданный интервал времени. Эти вероятности могут быть выражены через P_{S_0} и $u_{0,0,0}$, как показано в (9).

Пусть $Q_1 = 1 - P_a$, $Q_{L1} = 1 - P_a^{L_1}$, $Q_2 = 1 - P_x$, $Q_{L2} = 1 - P_x^{L_2}$.

Тогда после нормализации (8) получим следующее выражение:

$$u_{0,0,0} = \frac{Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_{L1} \cdot Q_{L2}}{Q_1 \cdot (L_3 Q_2 + L_2 Q_{L2}) + Q_{L2} \cdot Q_{L1} \cdot Q_2 \cdot (L_1 + Z_1 Q_1)}. \quad (10)$$

Получив формулу для $u_{0,0,0}$, аналогичным образом можно вывести α и β .

Общая задержка, вызванная отдельным узлом для успешной пересылки пакета, обусловлена задержкой CSMA/CA и задержкой режима активного поиска. Задержка CSMA/CA может быть вычислена по формуле:

$$D_{csma} = (T_s + D_b) \cdot \left[1 + \frac{y}{1-y} - \frac{(n+1) \cdot y^{n+1}}{1-y^{n+1}} \right], \quad (11)$$

где y – вероятность того, что на текущей итерации в результате коллизии будет повтор даже при освобождении канала.

$$D_b = 2S_b \left[1 + 0,25 \left\{ \frac{1-b}{1-b^{m+1}} \left(2W_0 \frac{1-2b^{m+1}}{1-2b} - \frac{3(m+1)b^{m+1}}{1-b} \right) + \frac{3b}{1-b} - (W_0 + 1) \right\} \right], \quad (12)$$

$$P_{\text{delay|success}} = \frac{P_a^{\text{delay}-1} (1 - P_a)}{1 - P_a^{L_1}}, \quad (13)$$

$$D_{\text{актив}} = \sum_{i=1}^{L_1} (i) \frac{P_a^{i-1} (1 - P_a)}{1 - P_a^{L_1}}, \quad (14)$$

$$D_{\text{общ}} = (D_{\text{csma}} + D_{\text{актив}} S_b) \cdot h. \quad (15)$$

В (11) D_b – задержка срабатывания механизма отката, вычисляемая по (12) с использованием математического ожидания m режима CSMA/CA. Задержка D_{csma} канала может быть получена из расчета средней вероятности успеха после j попыток. T_s и S_b – время передачи пакета и время отклика устройства, b – максимум из $\{\alpha, (1 - \alpha)\beta\}$, W_0 – минимальное окно механизма отката. По формуле (14) определяется среднее число активных слотов ($D_{\text{актив}}$), которое узел ожидает до получения маякового радиосигнала. Наконец, полная задержка, которая представляет собой сумму задержек, вызванных CSMA/CA и активными состояниями, вычисленными по h независимым связям, вычисляется по (15).

Адекватность кластерной аналитической модели подтверждается путем эмуляции сценария, аналогичного сценарию, показанному на рис. 1, при котором сеть имеет четыре кластера с десятью узлами каждый. Введем следующие допущения. Пусть помехи от других пользователей 2.4 ГГц незначительны, а каждый ретранслятор переключается между тремя различными каналами для режимов передачи, приема и маяка для уменьшения помех между соседними узлами разных кластеров.

Рассмотрим влияние количества попыток CSMA/CA (n) на общую задержку. На рис. 4 показан график зависимости $D_{\text{общ}}$ (общей задержки) от μ_w (средней скорости пробуждения узлов) для четырех разных значений n . Для симуляции используются следующие параметры: $m_0 = 3$, $m = 4$, $\lambda = 0.01$, $n \in [0, 3]$, $\mu_w \in [2, 20]$, $L_1 = 100$, $L_2 = 100$, $L_3 = 100$.

С увеличением μ_w наблюдается уменьшение $D_{\text{общ}}$, т.к. среднее время ожидания для приема маякового радиосигнала в активном состоянии уменьшается, а ошибки в активном состоянии из-за активного таймаута снижаются.

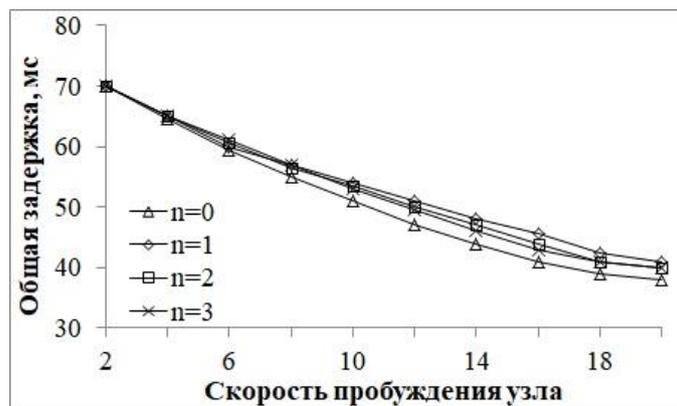


Рис. 4. График зависимости общей задержки от скорости пробуждения узлов для n от 0 до 3

По сравнению со сценарием «без повторений» в сценарии с одиночным повторением после коллизии происходит увеличение $D_{\text{общ}}$. Очевидно, что при n , равном 2 и 3, $D_{\text{общ}}$ меньше, чем при $n = 1$, так как вероятность последовательных коллизий для узла минимальна. Увеличение $D_{\text{общ}}$ наблюдается, когда анализ выполняется путем увеличения количества узлов (R)

для четырех разных λ при $m_0 = 3$, $m = 4$, $\mu_w = 10$, $n = 1$, $L_1 = 100$, $R \in [3,15]$, $\lambda \in [0.01,0.04]$, $L_c = 10$, $L_3 = 100$ и $L_2 = 100$ (рис. 5). Рост задержки ($D_{\text{общ}}$) с увеличением λ обусловлен прежде всего ухудшением D_{CSMA} .

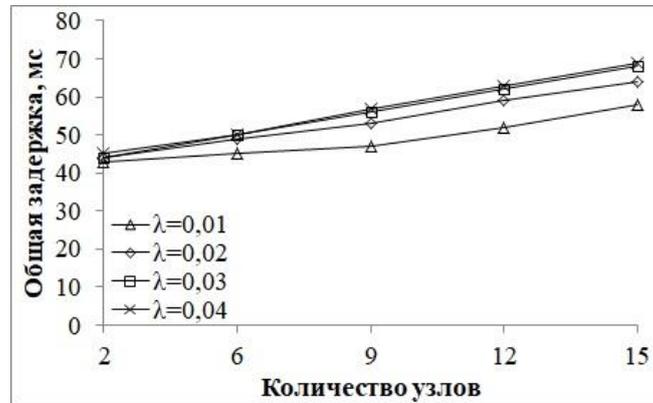


Рис. 5. График зависимости общей задержки от количества узлов для λ от 0.01 до 0.04

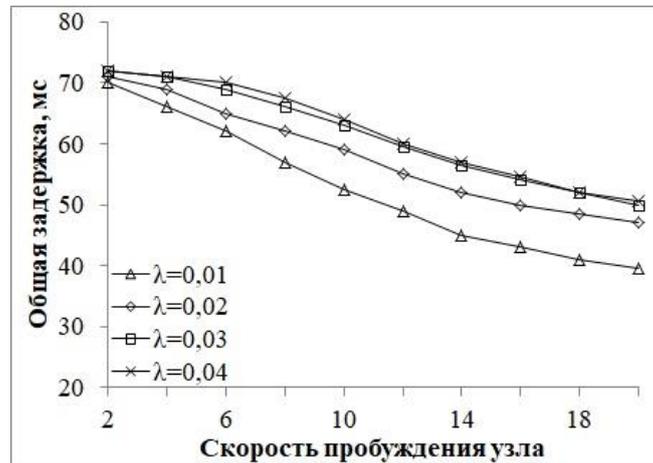


Рис. 6. График зависимости общей задержки от скорости пробуждения для λ от 0.01 до 0.04

На рис. 6 показан график зависимости $D_{\text{общ}}$ от μ_w для четырех разных λ при $m_0 = 3$, $m = 4$, $n = 1$, $L_1 = 100$, $\mu_w \in [2,20]$, $\lambda \in [0.01,0.04]$, $L_c = 10$, $L_3 = 100$ и $L_2 = 100$. Отсюда можно сделать вывод о значимости λ в работе сети. Увеличение μ_w уменьшает среднее время ожидания в режиме активного поиска, и вероятность того, что пакет будет отброшен из-за активного тайм-аута, уменьшается. Увеличение λ приводит к перегрузке канала, что, в свою очередь, инициирует большее количество сбоев пакетов из-за активного тайм-аута и большей задержки из-за механизма отката.

На рис. 7 показан график зависимости $D_{\text{общ}}$ от L_1 для четырех различных λ при $m_0 = 3$, $m = 4$, $n = 1$, $L_1 \in [25,125]$, $\lambda \in [0.01,0.04]$, $\mu_w = 10$; $L_c = 10$, $L_3 = 100$ и $L_2 = 100$. $D_{\text{общ}}$ растет с увеличением L_1 , так как вероятность приема маякового радиосигнала до активного тайм-аута значительно возрастает.

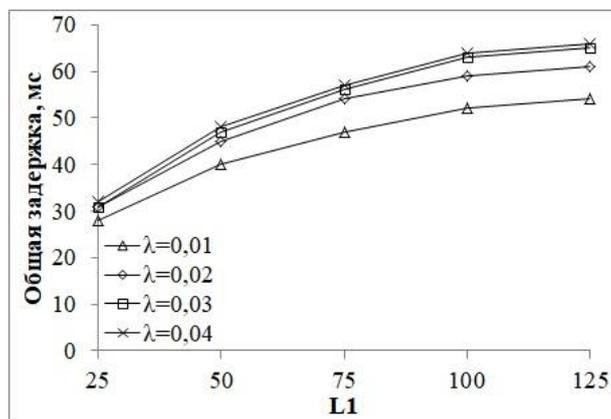


Рис. 7. График зависимости общей задержки от L_1 для λ от 0.01 до 0.04

4. Заключение

В результате исследования выявлено, что многопротокольные устройства могут работать более эффективно, при этом поддерживая необходимую производительность сети передачи данных.

Проанализированы показатели задержки с учетом изменения таких параметров, как повторные попытки CSMA/CA, количество узлов, скорость пробуждения и активное время.

Литература

1. *Jiaqi Cui*. CSMA/CA through put analysis in hybrid CSMA/CA and TDMA networks [Электронный ресурс]. URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3028882&dl=ACM&coll=DL> (дата обращения: 25.05.2018).
2. Analysis of superframe adjustment and beacon transmission for IEEE 802.15.4 cluster tree networks [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/257878023_Analysis_of_superframe_adjustment_and_beacon_transmission_for_IEEE_802154_cluster_tree_networks (дата обращения: 25.05.2018).
3. *Jianping Zhu*. Performance Analyses and Improvements for IEEE 802.15.4 CSMA/CA Scheme in Wireless Multihop Sensor Networks Based on HTC Algorithm [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/275460243_Performance_Analyses_and_Improvements_for_IEEE_802154_CSMACA_Scheme_in_Wireless_Multihop_Sensor_Networks_Based_on_HTC_Algorithm (дата обращения: 25.05.2018).
4. *Hao Wen*. An Improved Markov Model for IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA Mechanism [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11390-009-9240-5> (дата обращения: 23.05.2018).
5. *Shakil Akhtar*. Semi-Markov performance model of CSMA/CD networks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366489901096> (дата обращения: 25.05.2018).
6. *Minyu Fang*. Power Evaluation and Performance. Enhancement of CSMA/CA based WLANs [Электронный ресурс]. URL: https://www.hamilton.ie/publications/minyus_thesis.pdf (дата обращения: 25.05.2018).

Статья поступила в редакцию 21.11.2018.

Ушакова Маргарита Викторовна

ст. преподаватель кафедры геометрии и компьютерных наук ОГУ (460005, Оренбург, ул. Томилинская, 222А), e-mail: m.v.ushakova@mail.ru.

Ушаков Юрий Александрович

к.т.н., доцент кафедры геометрии и компьютерных наук ОГУ, e-mail: unpk@mail.ru.

Коннов Андрей Леонидович

к.т.н., доцент кафедры математических и естественно-научных дисциплин, Оренбургский филиал ПГУТИ (460000, Оренбург, ул. Пролетарская, 249), e-mail: andrey_konnov@mail.ru.

Горбачев Дмитрий Владимирович

к.т.н., доцент кафедры математических и естественно-научных дисциплин, Оренбургский филиал ПГУТИ, e-mail: gordi47@mail.ru.

Model of the distributed self-organizing network of IoT sensors

M. Ushakova, Yu. Ushakov, A. Konnov, D. Gorbachev

The paper considers the features of the simplified implementation of the protocol stack, the efficiency of routing and performance in the transit mode of data transfer devices, with the longest battery life priority. The solution to the problem of network devices in a network with a large number of sensors (for example, network of the Internet of things) is relevant and can be solved by creation of cellular network like mesh. But in such networks, there can be a situation when because of failure of one or several devices the operability of all network is broken. In this connection, it is offered to use for connections and data transmission the self-organized network on the basis of the channel Wi-Fi level and the PainlessMesh protocol. The four-dimensional model of Markov is developed for the research of application possibility of the proposed solution and analytical expressions for parameters assessment of network operation are obtained. Based on the resulting models the computing algorithm allowing to imitate scenarios of network operation is constructed. The models' adequacy is confirmed by scenario emulation of the sensors cluster operation. The main results of the paper are: in the scientific aspect – the developed models of network operation assessment parameters of IoT; in the practical aspect – received by means of simulation, dependences delay schedules including network nodes on the number of nodes and "awakening" nodes' speed. Besides, it is revealed that multiprotocol devices can work more effectively, at the same time supporting the necessary productivity of a data transmission network.

Keywords: wireless networks, Internet of things, self-organizing networks, routing, network protocol, relay node, gateway.

УДК 378.147

Исследование роли самооценки результатов обучения в формировании предпринимательских компетенций у студентов СибГУТИ

Д. А. Казначеев, Б. И. Крук, Е. В. Метелёва, С. Е. Плакидина¹

В статье описывается подход европейского образовательного проекта ERASMUS+ REBUS, в рамках реализации которого в СибГУТИ разработан и преподается курс «Цифровое предпринимательство». По мнению авторов статьи, обучение в электронной образовательной среде Mahara с применением технологий Moodle и LEVEL5 активизирует познавательную деятельность студентов, способствует самостоятельному приобретению знаний, позволяет студентам осуществлять самоконтроль прогресса обучения и самооценку уровня освоения компетенций. Авторы статьи считают, что подход европейского образовательного проекта ERASMUS+ REBUS даёт студентам возможность качественно осваивать новые компетенции. Вместе с тем авторы отмечают недостатки данного подхода, в частности, некоторое несоответствие самооценки студентов реальному уровню освоения компетенций.

Ключевые слова: компетентностная модель, дополнительное профессиональное образование, электронная образовательная среда, самооценка.

1. Введение

В работе [1] описаны этапы внедрения образовательных стандартов профессионального образования в России. После 2011 года в высшее образование были внедрены стандарты высшего профессионального образования (ФГОС ВО) третьего поколения, определяющие результаты обучения в виде компетенций (способностей, функций), которыми должен обладать выпускник: общекультурных, общепрофессиональных, профессиональных. После 2018 года новое поколение ФГОС ВО ввели в качестве результатов обучения универсальные и профессиональные компетенции, которые должны быть тесно увязаны с профессиональными стандартами. Авторы отмечают также, что компетентностная модель обучения учащихся становится более эффективной при смене парадигмы «преподавания» на парадигму «обучения», основу которой составляет стремление обучаемого получить знания, связанные с реальными задачами жизни, стремление учиться преимущественно тому, что он еще не знает и что он еще не умеет делать. Трансформация парадигмы осуществляется через следующие механизмы [1]:

¹ Результаты данной работы получены при поддержке гранта, финансируемого программой Erasmus+ Европейского Союза (проект «REBUS» 5736643-EPP-1-2016-1-BA-EPPKA2-CBHE-JP).

- самостоятельное приобретение знаний обучаемыми;
- активную познавательную деятельность обучаемых;
- интерактивное взаимодействие обучаемых с преподавателем и учебными материалами;
- самоконтроль студентами прогресса обучения и самооценка достигнутого уровня освоения компетенций.

Реализация указанных механизмов осуществима с помощью подхода, предложенного европейским проектом ERASMUS+ REBUS (REady for BUSiness – Готов к Бизнесу). Обучение студентов происходит в электронной среде Mahara, которая дает возможность организовать персональное учебное пространство: личную информацию, прошлые и сегодняшние достижения, задания и проекты, постановку целей на будущее [2, 3]. Фактически эта среда повторяет принципы функционирования социальной сети в образовательном проекте. Электронная среда Mahara оснащена расширяемой архитектурой Moodle [4] и включает модульную систему ePortfolio, позволяющую учитывать результаты, достигнутые обучающимися в различных видах деятельности: учебной, научно-исследовательской, культурно-творческой, спортивной и общественной. Отличительной особенностью электронной среды Mahara является технология оценивания уровня достижения компетенции. В отличие от традиционной оценки уровня достижения компетенции экспертом (преподавателем), в среде Mahara она построена на самооценке этого уровня самими студентами с помощью специального программного инструмента LEVEL5. Последние педагогические исследования российских и зарубежных ученых уделяют внимание самооценке студентами результатов обучения, которое интерпретируется как личностное образование, регулирующее поведение и деятельность учащегося [5–7]. О. А. Соколова отмечает, что «к процессу выявления качества обучения, воспитания и развития будущих специалистов должны быть в органическом единстве подключены процессы самообучения, самовоспитания, саморазвития студентов, обусловленные рефлексией [8, 9]. В условиях реализации компетентного подхода в образовательном процессе вуза самооценка студентом результатов обучения рассматривается как фактор формирования рефлексивного мышления, способствующий эффективности его подготовки к будущей профессиональной деятельности. Е. А. Сорокоумова [10] под самооценкой понимает «оценку личностью самой себя, своих возможностей, способностей, качества и места среди других людей. Самооценка в значительной степени определяет активность, отношение субъекта к себе и другим людям».

В данной статье описан подход европейского образовательного проекта ERASMUS+ REBUS, в рамках реализации которого в СибГУТИ был разработан курс «Цифровое предпринимательство», к использованию в учебном процессе электронной образовательной среды Mahara с применением технологий Moodle и LEVEL5 и проведено исследование, насколько быстро и эффективно он позволяет студентам осваивать выбранные предпринимательские компетенции и получать дополнительное профессиональное образование европейского уровня.

2. Задача и методика исследования

Исследователи отмечают, что, если для когнитивной составляющей компетенции (категории «знания – умения – навыки») достаточно применить традиционные формы аттестации, принятые в вузах (контрольные работы, опросы, зачёты, экзамены и т.д.), то для оценки личностной составляющей компетенции (мотивация, отношение учащегося) данные формы являются недостаточными. Более эффективной оказывается самооценка уровней достижений компетенций – оценка субъектом себя, своих знаний, умений, имеющегося опыта, возможностей, качеств, достоинств, недостатков и места среди других людей. Суть предлагаемой методики самооценки под названием LEVEL5 заключается в следующем. Студенту предлагает-

ся выбрать для самооценки одну из ключевых компетенций, сформулированных Европейской комиссией. Далее предлагаются пять индикаторов достижения компетенции, каждый из которых отражает степень или уровень освоения выбранной ключевой компетенции. Этим индикаторам соответствуют пять уровней. Самый низкий уровень 1 – умение делать, если есть поручение (в знакомых ситуациях); уровень 2 – умение делать, если есть выбор (в знакомых ситуациях); уровень 3 – умение объединить и комбинировать (в знакомых и незнакомых ситуациях); уровень 4 – умение усовершенствовать и применять в дальнейшем; самый высокий уровень 5 – умение объяснить другим, что нужно делать. Каждый из пяти уровней выбирается студентом применительно к одной из трех категорий результатов обучения: категория 1 – знания (табл. 1, 4); категория 2 – умения/навыки (табл. 2, 5); категория 3 – отношение/ощущение (табл. 3, 6).

Таблица 1. Уровни достижения универсальной ключевой компетенции «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» для категории «Знания»

Компетенция: Обладать навыками межкультурного взаимодействия.

| Знания | | |
|----------------|---|--|
| Уровень | Индикатор | Дескриптор |
| 5 | Знаю, где еще применять (могу передать эти знания другим) | Знаю, как улучшить работу в команде в будущем в разных межкультурных группах. Знаю, как помочь другим людям успешно работать в межкультурных командах и распределять конкретные обязанности людям с учетом их соответствующих навыков. |
| 4 | Знаю, когда (косвенное понимание) | Имею существенные знания о том, как и когда присоединиться к команде или сформировать ее. Понимаю, как использовать различные сильные стороны и культурное происхождение членов команды. |
| 3 | Знаю, как | Знаю основную динамику и требования в командной работе. Знаю, как участвовать в скоординированном потоке работы, когда для эффективной работы учитываются навыки каждого участника. |
| 2 | Знаю, почему (отдаленное понимание) | Знаю, что командная работа – это более эффективный способ достижения результатов. Знание этого требует координировать свою работу с учетом индивидуальных компетенций, способностей и культурных свобод. |
| 1 | Знаю, что это (в общих чертах) | Знаю, что командная работа – это взаимодействие с другими людьми для достижения общей цели. Знаю, что разные культуры имеют разные стили работы и общения. |

Таблица 2. Уровни достижения универсальной ключевой компетенции «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» для категории «Умения/навыки»

Компетенция: *Обладать навыками межкультурного взаимодействия.*

| Умения/навыки | | |
|----------------------|--|---|
| Уровень | Индикатор | Дескриптор |
| 5 | Разработка / построение / передача знаний | Могу руководить командой таким образом, чтобы участники могли вносить свой вклад в работу, исходя из своих способностей, культурных традиций и предпочтений. Способен к стратегическому развитию межкультурной команды. |
| 4 | Открываю для себя / действую независимо | Имею возможность ставить и координировать конкретные задачи членам команды, а также распределять роли на основе их (культурных) сильных и слабых сторон. Могу проводить мониторинг процесса работы команды. Стараюсь сам пробовать новые роли. |
| 3 | Принятие решений / подбор | Активно участвую в команде или помогаю сформировать команду. Содействую процессу работы команды в соответствии с собственными сильными сторонами и потребностями для достижения общей цели. Имею возможность применить основные стратегии в межкультурной коммуникации. |
| 2 | Пользуюсь возможностью / действую, глядя на других | Вношу вклад в работу команды при приглашении или поручении. Выполняю заданные задачи в команде, следуя примеру других. Реагирую на различия между членами команды, следуя примеру других. |
| 1 | Воспринимаю | Понимаю, в каких ситуациях командная работа уместна для достижения целей. Признаю разнообразие стилей общения на основе культурных традиций. |

Таблица 3. Уровни достижения универсальной ключевой компетенции «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» для категории «Отношение»

Компетенция: *Обладать навыками межкультурного взаимодействия.*

| Отношение | | |
|------------------|---------------------------------|--|
| Уровень | Индикатор | Дескриптор |
| 5 | Вовлечение / интернализация | Интернализация «культуры» конструктивной межкультурной командной работы и достижение целей путем взаимной поддержки. Стимулирую других улучшить навыки межкультурной работы. |
| 4 | Саморегулирование / определение | Осознаю важность воздержания от собственных предпочтений (например, в отношении порядков, собственных стратегий |

| | | |
|---|-----------------------|---|
| | | решения, методов и т.д.) ради команды и совместной работы. Меня уже ценят как хорошего работника команды. |
| 3 | Мотивация / оценка | Имею позитивное отношение к совместной работе в команде и ценю различия в команде. Считаю, что важно иметь «командный дух». Мотивирован развивать собственную компетентность для успешной работы в команде. |
| 2 | Перспектива / интерес | Заинтересован в возможностях межкультурной командной работы и любопытно узнать больше об этом. |
| 1 | Самоориентировка | Вижу командную работу и международное взаимодействие в командах как нечто позитивное, но не планирую развивать собственную компетентность командной работы. |

Таблица 4. Уровни достижения универсальной ключевой компетенции «Умение распознавать идеи и возможности» для категории «Знания»

Компетенция: Умение распознавать идеи и возможности.

| Знания | | |
|---------------|---|---|
| Уровень | Индикатор | Дескриптор |
| 5 | Знаю, где еще применять (могу передать эти знания другим) | Знаю, как применить навыки создания идей и концепций в других контекстах. Знаю, как помочь другим успешно действовать в различных предпринимательских структурах в этом отношении. |
| 4 | Знаю, когда (косвенное понимание) | Знаю, когда применять правильные инструменты из портфеля различных средств создания идей и прототипов. Знаю, когда использовать определенные идеи и стратегии создания прототипов. |
| 3 | Знаю, как | Знаю различные подходы к созданию идей и макетированию, знаю методы: <ul style="list-style-type: none"> • выявления возможностей; • создания идей; • работы на перспективу; • оценки идей; • проверки устойчивости. Теоретически знаю, как действовать в рамках концепции создания идей и макетирования. |
| 2 | Знаю, почему (отдаленное понимание) | Имею базовые знания о творчестве и инновациях. Знаю, что создание идеи, мультиперспективный взгляд на идею и ее апробирование являются неотъемлемой частью развития продукта/услуг и бизнеса. |
| 1 | Знаю, что это (в общих чертах) | Знаю, что предпринимательство основано на инновациях и создании идей. |

Таблица 5. Уровни достижения универсальной ключевой компетенции
«Умение распознавать идеи и возможности» для категории «Умения/навыки»

Компетенция: Умение распознавать идеи и возможности.

| Умения/навыки | | |
|----------------------|--|--|
| Уровень | Индикатор | Дескриптор |
| 5 | Разработка / построение / передача знаний | Имею возможность применять стратегии создания идей и прототипов в новых бизнес-контекстах. Активно планирую и предпринимаю различные действия в сфере предпринимательства, основанные на создании идей и макетировании. |
| 4 | Открываю для себя / действую независимо | Целенаправленный поиск и подбор подходящих технологий и инструментов для создания идей и прототипов для собственного бизнеса. Разработка и осуществление стратегии создания идей и макетирования в контексте своей профессиональной области. |
| 3 | Принятие решений / подбор | Принимаю участие в создании идей и прототипов только тогда, когда это предлагают сделать другие в «безопасных» контекстах. Выбираю односложные инструменты из портфеля (уже знакомого) средств создания идей и прототипов. |
| 2 | Пользуюсь возможностью / действую, глядя на других | Иногда участвую в неформальных действиях, связанных с созданием идей. Выполняю действия по созданию идей, когда мне дают такое задание. |
| 1 | Воспринимаю | Признаю концепцию создания идей и возможностей без совершения каких-либо дальнейших шагов. |

Таблица 6. Уровни достижения универсальной ключевой компетенции
«Умение распознавать идеи и возможности» для категории «Отношение»

Компетенция: Умение распознавать идеи и возможности.

| Отношение | | |
|------------------|---------------------------------|--|
| Уровень | Индикатор | Дескриптор |
| 5 | Вовлечение / интернализация | Интернализирую создание идей и прототипов в качестве основного личного мышления в предпринимательстве. Являюсь источником вдохновения для других в процессе создания идей и макетирования. |
| 4 | Саморегулирование / определение | Являюсь решительным и активным в использовании и улучшении принципов создания идей и макетирования в собственной профессиональной среде. Считаю, что творчество – неотъемлемая часть этого процесса. |

| | | |
|---|-----------------------|---|
| 3 | Мотивация / оценка | Признаю создание идей и макетирование в целом. Я мотивирован развивать собственные компетенции и взгляды в сфере создания идей и макетирования. |
| 2 | Перспектива / интерес | Мне любопытно и я заинтересован в теме создания идей и выявления возможностей. |
| 1 | Самоориентировка | Воспринимаю концепцию создания идей и возможностей, не связывая ее с самим собой. |

Использование категории «Отношение» еще не получило широкого распространения в отечественной практике, но в практике европейской системы обучения отношение (ощущение) подразумевает субъективное переживание студента по поводу уровня освоения им выбранной компетенции: например, «чувствую себя уверенно», «чувствую себя не вполне уверенно» и т.д. Большое значение для студентов имеет задание конкретных уровней усвоения содержания учебного материала с помощью специальных описаний – дескрипторов. Сведенные в таксономические таблицы (тарификаторы), дескрипторы позволяют более однозначно представлять результаты образования. Система LEVEL5 дает возможность графически представить уровень освоения выбранной компетенции в виде трехмерной модели – куба (рис. 1). С его помощью можно увидеть текущие оценки пользователя и составить визуальное представление о том, насколько пользователь освоил выбранную компетенцию в комплексе.

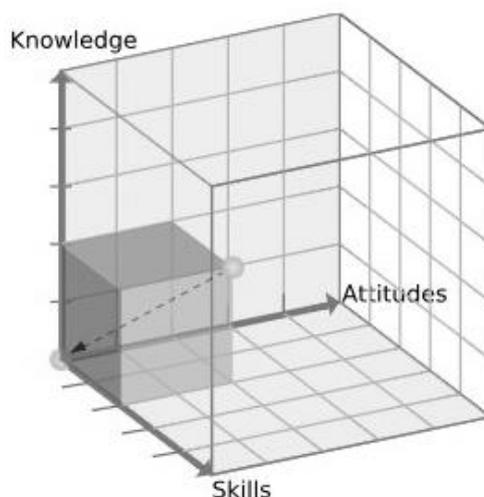


Рис. 1. Трехмерная модель освоения выбранной компетенции в системе LEVEL5

Задача исследования формулируется следующим образом. Используя метод педагогического эксперимента [11], оценить педагогическую целесообразность применения технологии самооценки LEVEL5 при формировании выбранных предпринимательских компетенций. Рассмотрим постановку и реализацию педагогического эксперимента. В рамках реализации проекта ERASMUS+ REBUS в Сибирском государственном университете телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ) был проведен набор 30 студентов на курс дополнительного профессионального образования «Цифровое предпринимательство». Цель курса заключалась в выявлении и развитии межкультурных и предпринимательских компетенций у студентов инфокоммуникационных и телекоммуникационных профилей. Все материалы курса представлялись студентам на английском языке. При разработке курса использовались смешанные технологии обучения (blended learning), а именно: традиционные технологии (face-to-face) и дистанционные технологии (distance learning) [12, 13]. Курс в СибГУТИ имел объем 72 часа и включал в себя следующие темы: «Основы цифрового предпринимательства», «Ин-

струменты цифрового предпринимательства», «Электронная коммерция», «Онлайн-магазины», «Маркетинг в социальных сетях», «Цифровой маркетинг», «Цифровые коммуникации в бизнесе», «Эффективные коммуникации как составляющая предпринимательских компетенций», «Обратная связь в цифровых коммуникациях». Обучение состояло из трех фаз, каждая из которых осуществлялась с использованием различных образовательных технологий. Так, фаза 1 «Введение и теория» подразумевала очные лекции с использованием видеоматериалов, вебинары, дискуссии, групповую работу, работу в электронной информационно-образовательной среде Moodle, сдачу тестов. Фаза 2 «Практическое обучение» включала в себя преимущественно работу с кейсами и примерами в электронной информационно-образовательной среде Moodle, сбор и анализ информации в открытых источниках, просмотр и обсуждение видеоматериалов, выполнение практических заданий, выбор тем проектов, разработку проектов. Фаза 3 «Обратная связь» предполагала презентацию проектов, их обоснование, проверку готовности всех тестов и заданий, финальную оценку и оформление аттестационных документов. Главной составляющей обучения в СибГУТИ стала разработка проектов: приложений, сайтов, моделей организации бизнес-процессов. Предварительное представление проектов осуществлялось с использованием проектных резюме в соответствии со стандартом управления проектами PMI PMBOK. Окончательное представление предполагало использование проектных резюме из комплекта методических материалов проекта REBUS с последующим размещением файлов в Mahara. К презентации допускались только те студенты, которые прошли все теоретические разделы курса, выполнили практические задания и сдали все тесты, а также представили проектные резюме и заполнили профили и портфолио в Mahara. В ходе презентаций проектов студенты показывали конкурентные преимущества своих проектов, их рыночную востребованность и возможные коммерческие выгоды, а также умение оформлять файлы PowerPoint и публично выступать на английском языке.

Квалифицированную оценку проектам дали участники команды REBUS, а также привлеченные специалисты-практики в сфере маркетинга, цифровых технологий, качества жизни. По итогам защит были отобраны 13 лучших студентов, которые продолжили обучение в FH JOANNEUM – Университете прикладных наук в г. Грац, Австрия. Обучение студентов в австрийском университете прошло с 17 по 28 сентября 2018 года. Учебные группы были сформированы из студентов СибГУТИ, а также университетов Австрии, Албании и Косово. Состав групп был смешанным: студенты из Албании, Косово и России объединились со студентами из Австрии. Были разработаны предварительные планы и поставлены задачи командной работы в группах. Руководитель международных проектов FH JOANNEUM пояснил студентам суть их дальнейшей работы с кейсами фирм и компаний. Кейсы представили такие фирмы и компании, как Nuki, EPUmatch и FH Zwickau. В австрийском университете студенты были направлены в экспериментальную лабораторию – Smart Lab of FH JOANNEUM., где они проводили аналитическую работу: в их задачу входило определить перспективы внедрения новейших технологий в традиционные сферы деятельности. Дальнейшая деятельность студентов была посвящена преимущественно групповой работе над кейсами. Результаты групповой работы над кейсами были представлены в программе Mahara. В завершение обучения 28 сентября каждая команда презентовала свои решения по кейсам. Были выбраны команды-победители и состоялось вручение сертификатов.

3. Результаты исследований

Использование методики LEVEL 5 в курсе «Цифровое предпринимательство» в рамках проекта ERASMUS+ REBUS предполагало два этапа самооценки: этап 1 – в начале обучения; этап 2 – в конце обучения, после учебного визита. Для самооценки были выбраны две ключевые компетенции: 1 – работа в межкультурной команде; 2 – распознавание предпринимательских идей и возможностей. Сначала каждый студент персонально отмечал флажками

уровни знаний, навыков и отношения от 1 до 5. Затем он приводил короткие примеры (ситуации) из опыта обучения и стажировки, которые подтверждали бы его уровни знаний, навыков и отношения. После этого сформированный пользователем файл Word отправлялся в систему LEVEL 5 проекта ERASMUS+ REBUS. Итогом самооценки являлась аттестация студента через программный интерфейс системы LEVEL 5 с выдачей сертификата (рис. 2), в котором указаны уровни освоения выбранных компетенций в виде двух кубов: для первого и второго этапов (рис. 3).



Рис. 2. Лицевая страница международного сертификата студентки СибГУТИ Дарья Щ.

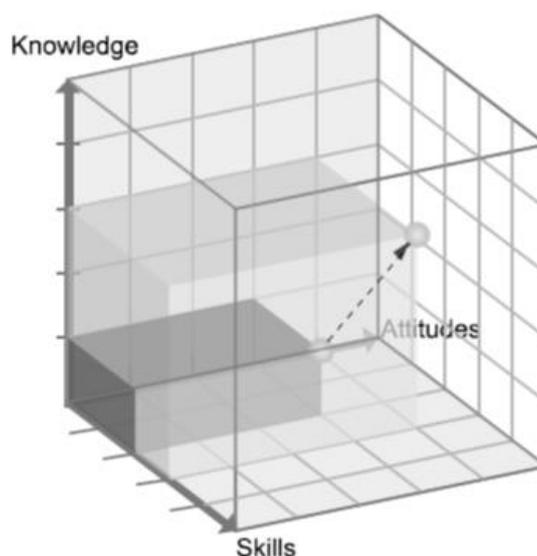


Рис. 3. Изменение самооценки уровней овладения универсальной ключевой компетенцией «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» в начале и в конце обучения на курсе «Цифровое предпринимательство» (студентка СибГУТИ Дарья Щ.)

На рис. 4 для этой же студентки показано изменение самооценки уровней овладения универсальной ключевой компетенцией «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» для всех категорий на первом и втором этапах обучения на курсе «Цифровое предпринимательство» и ее собственные дескрипторы результата обучения.

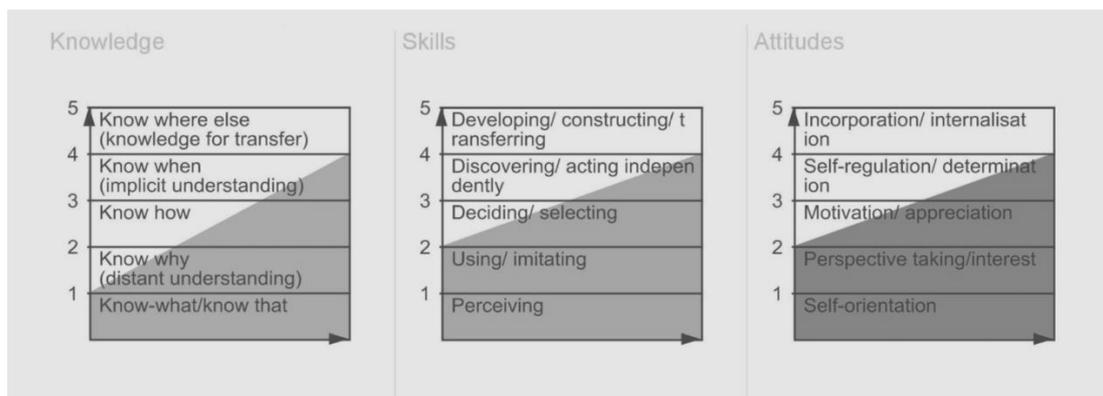


Рис. 4. Изменение самооценки уровней овладения универсальной ключевой компетенцией «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» для всех категорий в начале и в конце обучения на курсе «Цифровое предпринимательство» (студентка СибГУТИ Дарья Щ.)

Студент СибГУТИ Никита М. так оценил результаты своего овладения универсальной ключевой компетенцией «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» за период обучения в университете FH JOANNEUM:

– в категории «Знания»: «Члены нашей команды очень быстро достигли взаимопонимания. Мы помогли друг другу показать наши сильные стороны на основе культурных особенностей каждого. До проекта я не имел представления о том, как работать в интернациональной команде. Теперь я знаю, как применять культурные особенности в целях улучшения работы.»;

– в категории «Навыки»: «Мы провели разделение обязанностей в группе, и благодаря этому каждый сделал значимый вклад в финальный проект. Я также приложил усилия для достижения общей цели. Теперь я чувствую себя гораздо уверенней при принятии решений в командной работе. Теперь я чувствую в себе способность не только принимать участие в команде, но и создать собственную. Я умею применять основные стратегии межкультурной коммуникации»;

– в категории «Отношение»: «Каждый участник команды (включая меня) работал для достижения результата, несмотря на личные предпочтения. Мой вклад был высоко оценен. Теперь я ищу новые возможности для продолжения своего развития в этой сфере. Я буду пытаться найти подобные интернациональные мероприятия. Я испытываю гордость за то, что меня признали отличным участником команды».

В качестве второй ключевой компетенции при изучении курса «Цифровое предпринимательство» была выбрана компетенция «Умение распознать предпринимательские идеи и возможности».

Вот как оценила студентка Дарья Щ. результаты своего обучения в университете FH JOANNEUM:

– в категории «Знания»: «За две недели учебной поездки я изучила много практических инструментов и получила новые навыки – например, подготовка и публичная защита презентации. Теперь я имею четкое представление, как и когда должны применяться стратегии разработки идей»;

– в категории «Навыки»: «Теперь я способна выбирать правильные средства разработки идей. Наша команда создала маркетинговую стратегию для конкретной компании, разработала логотип, слоган, составила рекомендации по разработке веб-сайта»;

– в категории «Отношение»: «Теперь я чувствую большую уверенность в своей бизнес-идее. Благодаря занятиям я поняла, как важна креативность при разработке проектов. В работе мы использовали тактику «мозгового штурма» и значительно усовершенствовали идеи».

Таким образом, опыт преподавания курса «Цифровое предпринимательство» в СибГУТИ в рамках европейского образовательного проекта ERASMUS+ REBUS показал, что обучение студентов в электронной образовательной среде Mahara с применением технологий дистанционного обучения Moodle и самооценки LEVEL5 позволяет студентам сформировать оценочный механизм, необходимый для адекватного восприятия себя в качестве активной творческой личности, выработать критичность и требовательность к себе, оценивать цели и степени их достижения; быстро и эффективно осваивать новые компетенции и получать дополнительное профессиональное образование европейского уровня.

Вместе с тем педагогический эксперимент показал, что методика самооценки уровня овладения компетенцией с помощью программного обеспечения LEVEL 5 имеет определенные недостатки. Во-первых, сам подход, основанный на приоритете самооценки студента над экспертной оценкой преподавателя, можно отнести к пока еще очень спорному в педагогическом сообществе критико-эмансипаторскому направлению в образовании с его «свободой самовыражения в малых группах» [14]. Во-вторых, на практике оказалось, что самооценки студентами уровней овладения компетенциями не всегда являются релевантными. Так, в начале обучения 31 % студентов оценили свои знания на уровне «2», но в то же время 38.5 % из них свои навыки при отсутствии знаний оценили на уровне «3». После обучения эту же оценку сохранили 69.3 % студентов. Когда студенты, оценивая уровень освоения компетенции, предоставляют свои собственные примеры из практики, подтверждающие дескриптор выбранного уровня, то зачастую из-за отсутствия опыта возникает следующая типичная ошибка. Так, например, если студент оценивает свой уровень знаний на «5», а подтверждающий пример соответствует дескриптору уровня «4», то релевантным является оценка уровня «4». Чтобы избежать подобных ошибок студентов, которые впервые работают по методике LEVEL 5, необходима помощь преподавателя, чтобы привести самооценку в соответствие с дескриптором.

4. Заключение

В данной работе проведено исследование роли самооценки студентами результатов обучения в формировании у них предпринимательских компетенций «Обладание навыками межкультурного взаимодействия» и «Умение распознать предпринимательские идеи и возможности». Объектом исследования являлась методика самооценки уровней освоения компетенций на основе программного средства LEVEL5 и использование ее в курсе «Цифровое предпринимательство» в СибГУТИ. Методом исследования был выбран педагогический эксперимент. Исследование показало, что используемый метод самооценки знаний, умений/навыков и отношений/ощущений позволяет оценить личностный компонент формируемых компетенций: повышение самосознания своей личности и личной мотивации в освоении компетенций, рост внутренней уверенности в освоении компетенций. Но вместе с тем применение исследуемого метода самооценки требует совместной деятельности студента и преподавателя по коррекции выбранных студентом уровней освоения компетенций и приведения их в соответствие с дескрипторами компетенций. Не исключается также применение традиционных экспертных оценок результатов обучения преподавателями и приглашенными специалистами.

Литература

1. Журавлева О. Б., Крук Б. И., Мамойленко С. Н. Обеспечение качества дистанционных образовательных программ в условиях компетентностного подхода // Открытое и дистанционное образование. 2018. № 4 (72). С. 26–31.
2. Kaznacheev D., Kruk B., Meteleva E., Plakidina S. Experience in forming entrepreneurial competences of students at the Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences within the framework of the European Erasmus+ project "REBUS" // Proc. of 4th International Scientific Conference "Conference on Mechanical Engineering Technologies and Applications" (COMETA), 27–30 Nov. 2018, East Sarajevo – Jahorina. P. 830–835.
3. Казначеев Д. А., Крук Б. И., Метелева Е. В., Плакидина С. Е. Опыт формирования предпринимательских компетенций у студентов сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики в рамках европейского проекта «РЕБУС» // Международный журнал экспериментального образования. 2018. № 12. С. 11–19.
4. Анисимов А. М. Работа в системе дистанционного обучения Moodle: учебное пособие. Харьков: ХНАГХ, 2008. 275 с.
5. Юрловская И. А. Самооценка обучающихся вуза как условие успешности будущей профессиональной деятельности // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. № 4 (23). С. 1–6.
6. Roy M., Michaud N. L'autoévaluation et l'évaluation par les pairs en enseignement supérieur: promesses et défis // Formation et profession. 2018. № 26 (2). P. 54–65.
7. Полетайкин А. Н., Ильина Т. С. Нечеткий подход к оцениванию личностных качеств обучающихся вуза // ИТ-портал. 2016. № 4 (12). URL: <http://itportal.ru/science/tech/nechetkiypodkhodkotsenivaniyuli/> (дата обращения 20.02.2019).
8. Соколова О. А. Самооценка результатов обучения как фактор повышения качества образования // Наука. Искусство. Культура. 2015. № 1 (5). С. 167–172.
9. Казначеев Д. А., Казначеева Н. Л. К вопросу о самооценке студентов дистанционной формы обучения // Компетентностный подход в оценке качества высшего и среднего профессионального образования: материалы 59-й научно-методической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2018. С. 24–27.
10. Сорокоумова Е. П. Педагогическая психология: краткий курс СПб.: Питер, 2009. 208 с.
11. Михайленко О. И. Педагогика (электронный учебник). Нальчик: КБГУ. 2008. URL: http://krip.kbsu.ru/pd/op_lek_2.html (дата обращения 20.02.2019).
12. Kruk B., Zhuravleva O. Modern approaches to engineering education // International Journal of Experimental Education. 2014. № 6. 2013. P. 10–13.
13. Скибицкий Э. Г., Шабанов А. Г. Дистанционное обучение: теоретико-методологические основы. Новосибирск: изд. Сиб. ИФБД, 2004. 224 с.
14. Казначеев Д. А. Критико-рационалистическое и критико-эмансипаторское направления в философии образования // Роль фундаментальных знаний в формировании профессиональных компетенций: материалы 56 (LVI) научно-методической конференции. Новосибирск: СибГУТИ, 2015. С. 103.

Статья поступила в редакцию 13.02.2019;
переработанный вариант – 22.02.2019.

Казначеев Дмитрий Алексеевич

к.э.н., доцент кафедры экономики и менеджмента СибГУТИ, тел. (383) 2-698-284,
e-mail: 3335799@gmail.com.

Крук Борис Иванович

к.т.н., профессор, директор МУЦПС СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86),
тел. (383) 2-698-298, e-mail: kruk@sibsutis.ru.

Метелёва Екатерина Валерьевна

ведущий специалист по международной деятельности СибГУТИ, тел. (383) 2-698-319,
e-mail: meteleva@sibsutis.ru.

Плакидина Софья Евгеньевна

менеджер по международной деятельности МУЦПС СибГУТИ, тел. (383) 2-698-298,
e-mail: soph.pl@sibguti.ru.

Study on the role of self-assessment of learning outcomes in developing entrepreneurial competences of SibSUTIS students

D. Kaznacheev, B. Kruk, E. Meteleva, S. Plakidina

The article describes the approach of the European educational project ERASMUS + REBUS in which the course «Digital Entrepreneurship» is developed and taught at SibSUTIS. According to the opinion of the authors student training in the learning environment Mahara with the use of such tools as Moodle and LEVEL5 intensifies the cognitive activity, facilitates the acquisition of knowledge as well as allows students to self-monitor their learning progress and assess their level of competence development. The authors of the article consider that the approach of the European educational project ERASMUS + REBUS enables students to effectively form new competences. Nevertheless, the authors note the weaknesses of this approach, in particular, a disparity between students' self-assessment and a real level of competence development.

Keywords: competence model, «learning»-based paradigm, additional professional education, learning environment, self-assessment.

О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Рассмотрено влияние геометрических параметров приёмной антенны пеленгатора на точность определения угловых и линейных координат позиционируемых объектов. Получены оценки максимальных погрешностей позиционирования применительно к двум вариантам геометрии пеленгационной антенны.

Ключевые слова: геометрические параметры пеленгационной антенны, погрешности позиционирования.

1. Введение

Системы гидроакустической навигации используются, как правило, для определения местоположения либо неподвижных, находящихся на морском дне, либо движущихся подводных или надводных объектов.

Особое место среди гидроакустических навигационных систем различного назначения занимают системы с ультракороткой базой позиционирования (USBL-системы), поскольку они не требуют специальных донных маяков-ответчиков в зоне обслуживания, имеют самую низкую цену среди известных типов навигационных систем и допускают возможность размещения на любых судах-носителях.

Основные усилия ведущих фирм-разработчиков USBL-систем направлены на увеличение их точности, степени автоматизации, надёжности, срока службы. Так или иначе все эти усилия связаны с разработкой новых малогабаритных приёмных антенн и базируются на совершенствовании алгоритмов позиционирования и средств обработки данных.

В качестве показательного примера, иллюстрирующего указанную тенденцию развития, можно назвать две отечественные разработки, включающие в себя алгоритм позиционирования пеленгатора гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой для обеспечения работы автономных и привязных необитаемых подводных аппаратов [1] и полусферическую гидроакустическую антенную решётку для ультракороткобазисной системы определения местоположения подводных объектов [2].

В контексте современных разработок USBL-систем рассматривается актуальная с позиции практического применения оценка влияния геометрических параметров четырёхэлементной антенны гидроакустического фазового пеленгатора, использующего согласованный с антенной алгоритм позиционирования, на точность определения угловых и линейных координат наблюдаемых подводных объектов.

2. Алгоритмическая база позиционирования фазового пеленгатора

В публикации [3] авторами предложен алгоритм позиционирования, ориентированный на минимально возможное количество приёмных трактов пеленгации и позволяющий определять координаты подводного объекта в трёхмерном пространстве.

В основе алгоритма лежит система четырёх нелинейных уравнений, связывающих декартовы координаты подводного объекта и гидрофонов приёмной антенны пеленгатора, времена распространения навигационного сигнала от антенны подводного объекта до соответствующих гидрофонов приёмной антенны, а также средневзвешенную по глубине скорость распространения звука в акватории наблюдаемого подводного объекта.

Решение указанной системы уравнений относительно координат подводного объекта после ряда преобразований, связанных с переходом в сферическую систему координат и введением фазовых параметров навигационного сигнала, позволяет получить алгоритм позиционирования для заданной полусферы водного пространства следующего функционального состава:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= X_2^* - X_1^*; & A_{12} &= Y_2^* - Y_1^*; & A_{13} &= Z_2^* - Z_1^*; \\
 A_{21} &= X_3^* - X_1^*; & A_{22} &= Y_3^* - Y_1^*; & A_{23} &= Z_3^* - Z_1^*; \\
 A_{31} &= X_4^* - X_1^*; & A_{32} &= Y_4^* - Y_1^*; & A_{33} &= Z_4^* - Z_1^*; \\
 K_1 &= A_{22}A_{33} - A_{23}A_{32}; & K_2 &= A_{13}A_{32} - A_{12}A_{33}; & K_3 &= A_{12}A_{23} - A_{13}A_{22}; \\
 K_4 &= A_{23}A_{31} - A_{21}A_{33}; & K_5 &= A_{11}A_{33} - A_{13}A_{31}; & K_6 &= A_{13}A_{21} - A_{11}A_{23}; \\
 K_7 &= A_{21}A_{32} - A_{22}A_{31}; & K_8 &= A_{12}A_{31} - A_{11}A_{32}; & K_9 &= A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}; \\
 E &= A_{11}(A_{22}A_{33} - A_{23}A_{32}) + A_{12}(A_{23}A_{31} - A_{21}A_{33}) + A_{13}(A_{21}A_{32} - A_{22}A_{31});
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\left\{ \begin{aligned}
 B_1 &= \frac{m(\Delta\psi_{12} + \Delta\nu)}{360f}, B_2 = \frac{m(\Delta\psi_{13} + \Delta\nu)}{360f}, B_3 = \frac{m(\Delta\psi_{14} + \Delta\nu)}{360f}, \\
 m &\text{ – единичный коэффициент размерности } \frac{\mathcal{M}^2}{c}.
 \end{aligned} \right. \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{B_1K_1 + B_2K_2 + B_3K_3}{E}; \\
 \beta &= \frac{B_1K_4 + B_2K_5 + B_3K_6}{E}; \\
 \gamma &= \frac{B_1K_7 + B_2K_8 + B_3K_9}{E};
 \end{aligned} \tag{3}$$

$$\phi = \left\{ \begin{aligned}
 &\frac{180}{\pi} \arccos\left(\frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}\right), \beta \geq 0 \\
 &180 + \frac{180}{\pi} \arccos\left(\frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}\right), \beta < 0
 \end{aligned} \right\} [0^\circ \leq \phi < 360^\circ]; \tag{4}$$

$$\theta = \left\{ \frac{180}{\pi} \arccos\left(\frac{\gamma}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2}}\right) - 90 \right\} [0^\circ < \theta < 90^\circ],$$

где X_1^*, Y_1^*, Z_1^* ; X_2^*, Y_2^*, Z_2^* ; X_3^*, Y_3^*, Z_3^* ; X_4^*, Y_4^*, Z_4^* – инструментально измеренные декартовы координаты (м) четырёх гидрофонов приёмной антенны пеленгатора; $\Delta\psi_{12}, \Delta\psi_{13}, \Delta\psi_{14}$ – инструментально измеряемые разности фаз (град) колебаний навигационного сигнала на выходах трёх пар гидрофонов приёмной антенны; $\Delta\nu$ – абсолютная погрешность инструментального измерения разностей фаз (град); f – частота (Гц) навигационного сигнала; вычисляемые угловые координаты подводного объекта: ϕ – азимут (град) объекта в сферической системе координат приёмной антенны пеленгатора; θ – угол места (град) объекта в заданной полусфере наблюдения, отсчитываемый от горизонтали, соответствующей водной поверхности при вертикальной стабилизации приёмной антенны.

При минимально возможном количестве приёмных трактов пеленгатора пространственное расположение гидрофонов его антенны существенно влияет на точность пеленгования, а декартовы координаты гидрофонов в соотношениях (1) как раз и определяют геометрические параметры приёмной антенны, от которых зависят погрешности позиционирования объектов для выбранной полусферы наблюдения.

3. Геометрические параметры пеленгационной антенны

Предварительные расчёты с использованием соотношений (1)–(4) алгоритма позиционирования фазового пеленгатора показали, что для достижения хорошей эффективности антенны – одинакового характера изменения погрешностей вычисления угловых координат объекта по всем возможным направлениям выбранной полусферы наблюдения – гидрофоны в модуле приёмной антенны пеленгатора должны располагаться в геометрических точках пространства, соответствующих вершинам правильных многогранников.

В антенных модулях из четырёх гидрофонов возможны только две эффективные геометрии их размещения – на основе тетраэдра (треугольной пирамиды) и гексаэдра (куба), причём в последней геометрии пары гидрофонов располагаются в противоположных вершинах параллельных граней с пространственной перпендикулярностью линий, соединяющих пары гидрофонов параллельных граней.

С точки зрения минимизации погрешностей вычисления угловых координат подводного объекта по пространству наблюдения можно также рекомендовать две достаточно общие и эффективные пространственные геометрии приёмной антенны на надводных и подводных объектах, допускающие различные вариации её линейных размеров.

Первая – диаметрально-ортогональная (ДО) геометрия – предполагает размещение гидрофонов в точках пространства, соответствующих вершинам прямого параллелепипеда с ромбическими основаниями, по паре на каждом из оснований в вершинах противоположных углов, чтобы плоскости, проведённые через вершины оснований с гидрофонами и точку пересечения диагоналей параллелепипеда, были взаимно перпендикулярны, а высота параллелепипеда совпадала с вертикальной осью приёмной антенны.

Вторая – пирамидальная геометрия – ориентирована на расположение гидрофонов в точках пространства, соответствующих вершинам правильной треугольной пирамиды, в которой высота совпадает с вертикальной осью приёмной антенны.

На рис. 1 показаны упрощённые эскизы судового антенного модуля с ультракороткой базой расположения сферических гидрофонов для указанных вариантов пространственной геометрии: диаметрально-ортогональной (рис. 1а) и пирамидальной (рис. 1б).

Пространством наблюдения пеленгатора для рассматриваемых геометрий антенного модуля считается область нижней полусферы, ограниченная координатными полуосями: $X, -X, Y, -Y, -Z$.

С точки зрения минимизации размеров антенного модуля пеленгатора и упрощения аппаратной и программной составляющих оборудования USBL-системы задаём максимальные

расстояния между каждой парой гидрофонов в антенном модуле не более половины длины волны используемого навигационного сигнала.

Кроме того, вариации размеров L , $L1$, $L2$, N , H (см. рис. 1) антенного модуля при расчётах погрешностей позиционирования выбираем исходя из предполагаемых возможностей применения данных геометрий на надводных судах, в эксплуатационных конструкциях шахтного (колодезного) или забортного спуска и в автономных необитаемых подводных аппаратах, имеющих специфические технологии размещения пеленгационных антенн.

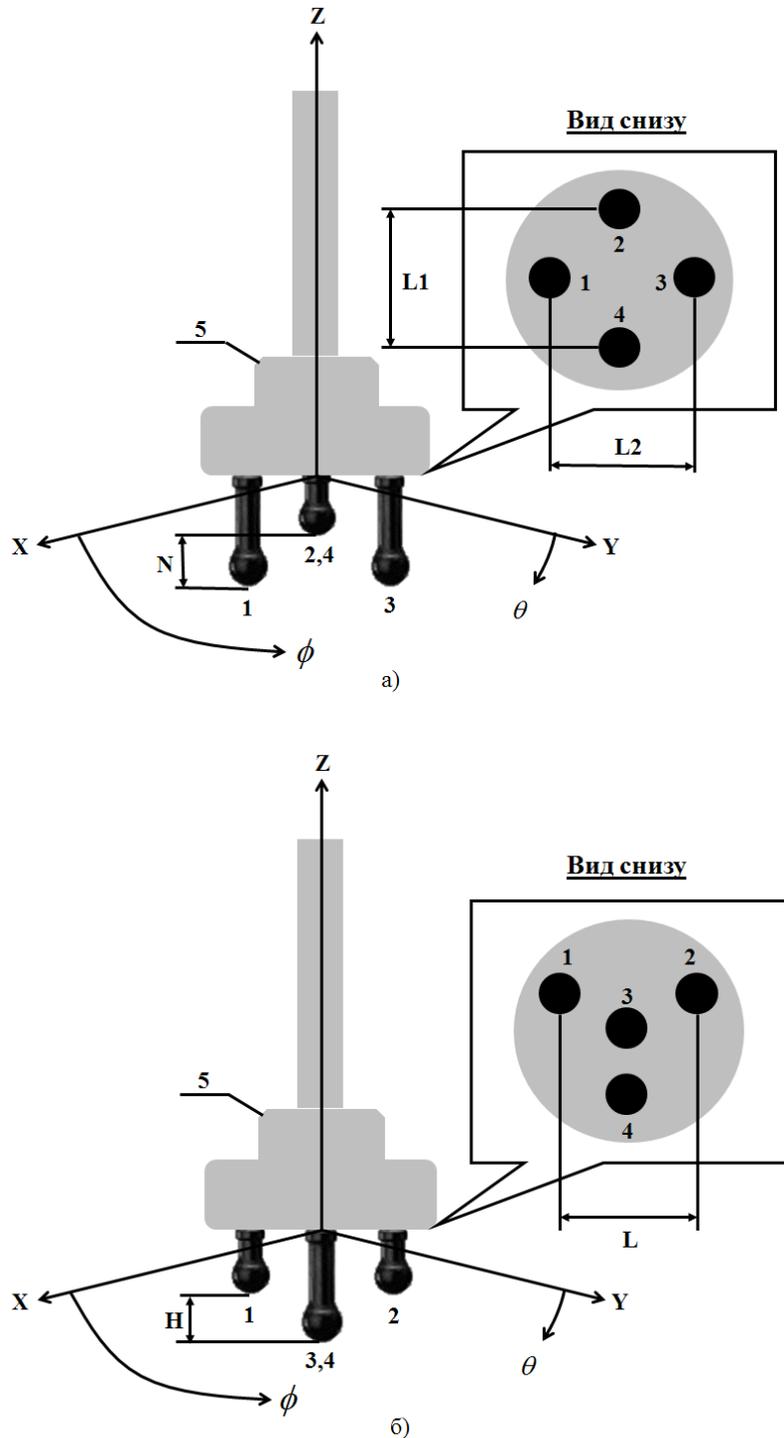


Рис. 1. Эскизное представление двух вариантов судовой антенны с диаметрально-ортогональной (а) и пирамидальной (б) геометрий: 1–4 – сферические приёмные гидрофоны; 5 – элементы конструкции; $L1$, $L2$ – расстояния между парами гидрофонов в горизонтальной плоскости; N – смещение между парами гидрофонов в вертикальной плоскости; L , H – основание и высота пирамиды; Z – вертикальная ось антенны; ϕ – азимутальный угол; θ – угол места

4. Погрешности позиционирования объектов

Погрешности оценок угловых и линейных координат объектов фазовым пеленгатором с указанными выше алгоритмом позиционирования и геометриями антенн определяем в математической среде Mathcad 15 для представляющих практический интерес исходных данных:

- частота навигационного сигнала $f = 5$ кГц – выбрана в соответствии с конструктивными ограничениями на линейные размеры антенного модуля;
- абсолютная погрешность инструментального измерения разностей фаз колебаний навигационного сигнала на выходах трёх пар гидрофонов $\Delta \nu = \pm 0.2^\circ$ – задана на основании современных алгоритмических и аппаратных методов измерения разности фаз [4];
- диапазон изменения углов места наблюдаемого объекта $\theta = 10^\circ \dots 80^\circ$ – ограничен наиболее вероятными сценариями позиционирования;
- диапазон изменения наклонных расстояний до объекта $R = 2$ м ... 500 м – показателен для оценки погрешностей позиционирования в режимах дальнего наблюдения и ближнего причаливания;
- четыре группы параметров антенны диаметрально-ортогональной геометрии: $(L1 = L2 = 0.5\lambda, N = 0.25\lambda)$, $(L1 = L2 = 0.5\lambda, N = 0.07\lambda)$, $(L1 = 0.5\lambda, L2 = 0.25\lambda, N = 0.25\lambda)$, $(L1 = 0.5\lambda, L2 = 0.25\lambda, N = 0.07\lambda)$, где λ – длина волны навигационного сигнала, позволяют проследить динамику изменения погрешностей позиционирования при изменении линейных размеров антенного модуля;
- две группы параметров антенны пирамидальной геометрии: $(L = 0.5\lambda, H = 0.25\lambda)$, $(L = 0.5\lambda, H = 0.07\lambda)$ – интересны с точки зрения возможности размещения элементов антенны непосредственно в корпусе автономного необитаемого подводного аппарата.

Так как тройки абсолютных погрешностей $\Delta \nu$ при инструментальных измерениях разностей фаз могут иметь разные сочетания знаков, то погрешности позиционирования будут находиться в некотором функциональном интервале, ограниченном минимальными и максимальными значениями. С точки зрения практического применения важнее оценки максимальных значений максимальных погрешностей, характеризующие наихудшие условия функционирования фазового пеленгатора, поэтому в проведённых расчётах использовались именно такие показатели.

Для наглядности и удобства интерпретации максимальные абсолютные погрешности оценок азимута $\Delta \phi_{\max}$ и угла места $\Delta \theta_{\max}$ подводного объекта целесообразно рассматривать как функции от φ ($\varphi = 0^\circ \dots 360^\circ$) – всех возможных азимутов наблюдаемого объекта.

На рис. 2 и 3 в качестве иллюстрации характера изменения и порядка величины погрешностей представлены графики вышеуказанных зависимостей: $\Delta \phi_{\max} = f(\varphi)$, $\Delta \theta_{\max} = f(\varphi)$, рассчитанные на основе соотношений (1)–(4) алгоритма позиционирования, для ДО $(L1 = L2 = 0.5\lambda, N = 0.25\lambda)$ и пирамидальной $(L = 0.5\lambda, H = 0.25\lambda)$ геометрий антенны фазового пеленгатора, наклонного расстояния до объекта $R = 500$ м, двух предельных углов места наблюдаемого объекта: минимального $\theta = 10^\circ$ и максимального $\theta = 80^\circ$.

Сравнение погрешностей двух геометрий указывает на более высокую точность (немного более чем в два раза) определения азимута объекта в фазовом пеленгаторе ДО геометрии антенны во всём диапазоне изменения углов места позиционируемого объекта. Зато оценка самого угла места при его малых значениях оказывается примерно во столько же раз точнее в пеленгаторе с пирамидальной геометрией антенны.

Более дифференцированное сравнение геометрий можно получить, рассматривая пределы изменения максимальных значений максимальных погрешностей оценок угловых координат объекта для разных геометрических параметров приёмной антенны пеленгатора. Результаты таких расчётов сведены в табл. 1.

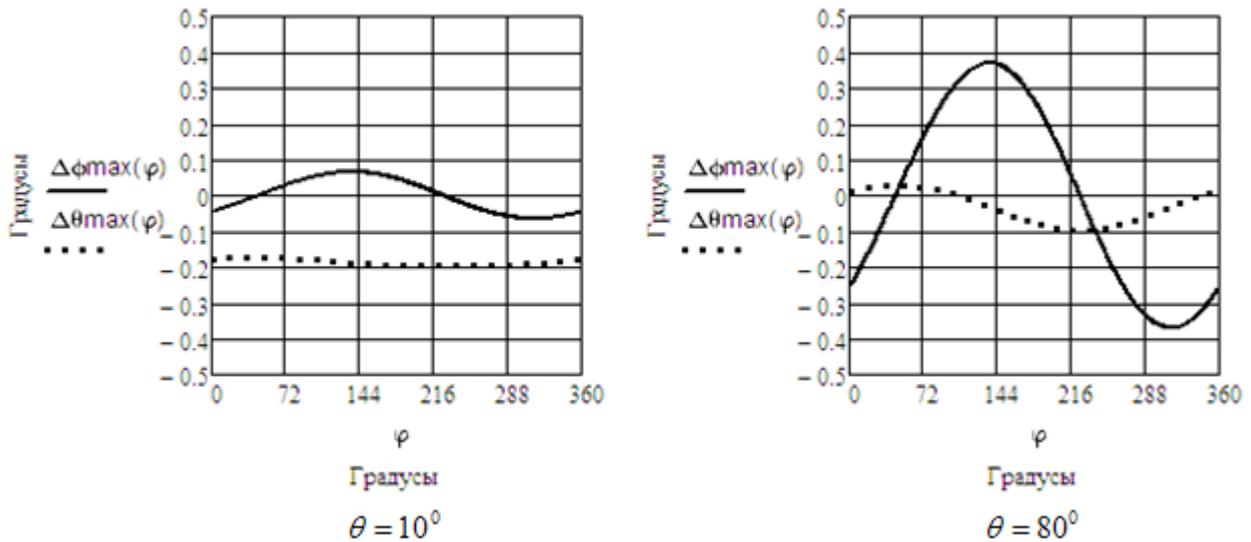


Рис. 2. Оценки угловых координат объекта: пеленгатор ДО геометрии антенны

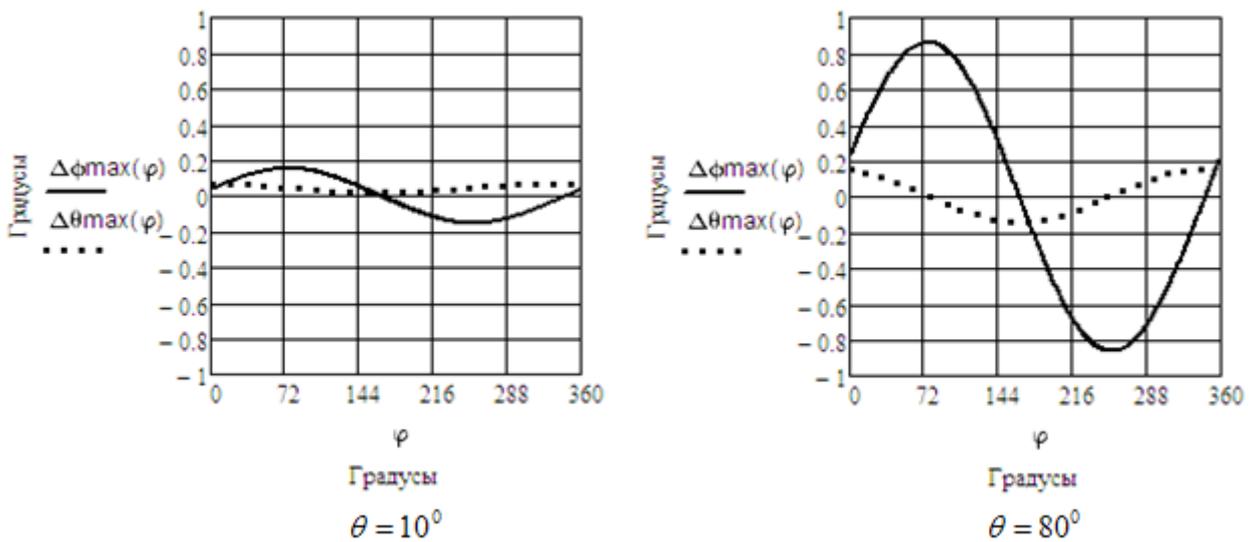


Рис. 3. Оценки угловых координат объекта: пеленгатор пирамидальной геометрии антенны

Таблица 1. Пределы изменения погрешностей оценок угловых координат объекта для разных геометрических параметров антенны пеленгатора

| Параметры антенны пеленгатора | Диапазон изменения углов места объекта: $\theta = 10^{\circ} - 80^{\circ}$ | | | | | |
|--|--|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | Наклонное расстояние: $R = 20$ м | | Наклонное расстояние: $R = 100$ м | | Наклонное расстояние: $R = 500$ м | |
| | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град |
| ДО геометрия: $L1 = L2 = 0.5\lambda$, $N = 0.25\lambda$ | 0.08 – 0.4 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 |
| ДО геометрия: $L1 = L2 = 0.5\lambda$, $N = 0.07\lambda$ | 0.08 – 0.38 | 0.94 – 0.18 | 0.08 – 0.38 | 0.7 – 0.18 | 0.08 – 0.38 | 0.65 – 0.18 |

| Параметры антенны пеленгатора | Диапазон изменения углов места объекта: $\theta = 10^0 - 80^0$ | | | | | |
|--|--|--|--------------------------------------|--|--------------------------------------|--|
| | Наклонное расстояние: $R = 20$ м | | Наклонное расстояние: $R = 100$ м | | Наклонное расстояние: $R = 500$ м | |
| | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | $ \Delta\theta_{\max \max} $, град |
| ДО геометрия: $L1 = 0.5\lambda$, $N = 0.25\lambda$, $L2 = 0.25\lambda$ | 0.08 – 0.4 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 | 0.08 – 0.38 | 0.2 – 0.1 |
| ДО геометрия: $L1 = 0.5\lambda$, $N = 0.07\lambda$, $L2 = 0.25\lambda$ | 0.08 – 0.38 | 1.0 – 0.21 | 0.08 – 0.38 | 0.72 – 0.2 | 0.08 – 0.38 | 0.68 – 0.2 |
| Пирамидальная геометрия: $L = 0.5\lambda$, $H = 0.25\lambda$ | 0.2 – 0.88 | 0.1 – 0.18 | 0.17 – 0.88 | 0.08 – 0.18 | 0.17 – 0.88 | 0.08 – 0.18 |
| Пирамидальная геометрия: $L = 0.5\lambda$, $H = 0.07\lambda$ | 0.2 – 0.88 | 0.08 – 0.2 | 0.17 – 0.88 | 0.12 – 0.18 | 0.17 – 0.88 | 0.18 – 0.18 |

В табл. 1 левая цифра предела изменения каждой погрешности соответствует углу места позиционируемого объекта, равного 10^0 , а правая – 80^0 .

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие основные выводы:

– максимальные погрешности оценок азимута объекта возрастают с увеличением угла места наблюдаемого объекта для обеих геометрий антенны пеленгатора, но значения погрешностей и пределы их изменения оказываются меньшими у ДО геометрии;

– максимальные погрешности определения угла места объекта уменьшаются с его ростом в случае ДО геометрии и увеличиваются при использовании пирамидальной геометрии антенны;

– для ДО геометрии антенны уменьшение расстояния между гидрофонами одной пары в горизонтальной плоскости в два раза и парами гидрофонов в вертикальной плоскости в семь раз не влияет на величину погрешности при вычислении азимута объекта, но увеличивает погрешность оценки угла места с уменьшением наклонного расстояния в пять раз;

– уменьшение в семь раз расстояния между гидрофонами в вертикальной плоскости для пирамидальной геометрии антенны очень слабо влияет на величины погрешностей оценки обоих угловых координат позиционируемого объекта.

Чтобы проследить характерную динамику изменения погрешностей в зависимости от наклонных расстояний при разных углах места в табл. 2 представлены расчётные значения максимальных значений максимальных погрешностей оценок угловых координат для пяти значений угла места объекта, шести значений его наклонного расстояния и ДО геометрии ($L1 = 0.5\lambda$, $N = 0.25\lambda$, $L2 = 0.25\lambda$) антенны пеленгатора.

Характер изменения погрешностей оценок угловых координат в табл. 2 указывает на их уменьшение с увеличением наклонного расстояния для всех углов места позиционируемого объекта в зоне ближнего причаливания ($R \leq 20$ м) и неизменность в зоне дальнего наблюдения ($R > 100$ м), что является хорошим показателем потенциальной применимости рассматриваемого фазового пеленгатора.

В некоторых случаях позиционирования, помимо точности определения угловых координат, требуются ещё и оценки погрешностей линейных координат, таких как дальность объекта и смещение по траверсу – линии, перпендикулярной направлению на объект.

Таблица 2. Погрешности оценок угловых координат для разных параметров позиционирования объекта

| Наклонное расстояние | Погрешности оценок угловых координат | $\theta = 10^0$ | $\theta = 30^0$ | $\theta = 50^0$ | $\theta = 70^0$ | $\theta = 80^0$ |
|----------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $R = 2$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.55 | 0.85 | 1.1 | 1.3 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 1.0 | 0.53 | 0.35 | 0.3 | 0.2 |
| $R = 5$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.12 | 0.25 | 0.4 | 0.52 | 0.69 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.3 | 0.15 | 0.18 | 0.2 | 0.14 |
| $R = 10$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.1 | 0.16 | 0.22 | 0.34 | 0.5 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.15 | 0.17 | 0.16 | 0.11 |
| $R = 20$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.08 | 0.11 | 0.16 | 0.25 | 0.4 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.12 | 0.15 | 0.14 | 0.1 |
| $R = 100$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.08 | 0.08 | 0.11 | 0.2 | 0.38 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.12 | 0.15 | 0.12 | 0.1 |
| $R = 500$ м | По азимуту: $ \Delta\phi_{\max \max} $, град | 0.08 | 0.08 | 0.11 | 0.2 | 0.38 |
| | По углу места: $ \Delta\theta_{\max \max} $, град | 0.2 | 0.12 | 0.15 | 0.12 | 0.1 |

Указанные погрешности можно рассчитать, используя следующие тригонометрические соотношения:

$$\Delta D_{\max \max} = \left| R \left[\cos \frac{\pi\theta}{180} - \cos \frac{\pi(\theta + \Delta\theta_{\max \max})}{180} \right] \right| ; \quad (5)$$

$$\Delta d_{\max \max} = \left| R \cos \left(\frac{\pi\theta}{180} \right) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi\Delta\phi_{\max \max}}{180} \right) \right| ,$$

где $\Delta D_{\max \max}$, $\Delta d_{\max \max}$ – максимальные значения максимальных абсолютных погрешностей оценок дальности и смещения по траверсу (м); θ , $\Delta\theta_{\max \max}$ – угол места объекта и максимальное значение максимальной погрешности его определения (град); $\Delta\phi_{\max \max}$ – максимальное значение максимальной погрешности оценки азимута объекта (град); R – наклонное расстояние (м) до объекта.

Таблица 3. Максимальные погрешности оценок линейных координат объекта

| Наклонное расстояние | Погрешности оценок линейных координат | $\theta = 10^0$ | $\theta = 30^0$ | $\theta = 50^0$ | $\theta = 70^0$ | $\theta = 80^0$ |
|----------------------|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $R = 2$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.007 | 0.017 | 0.019 | 0.013 | 0.008 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.006 | 0.009 | 0.009 | 0.01 | 0.007 |
| $R = 5$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.01 | 0.019 | 0.022 | 0.016 | 0.01 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.005 | 0.007 | 0.012 | 0.016 | 0.012 |
| $R = 10$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.017 | 0.024 | 0.025 | 0.02 | 0.015 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.006 | 0.01 | 0.023 | 0.026 | 0.019 |
| $R = 20$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.028 | 0.033 | 0.036 | 0.03 | 0.024 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.012 | 0.026 | 0.048 | 0.046 | 0.034 |
| $R = 100$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.138 | 0.121 | 0.123 | 0.119 | 0.115 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.061 | 0.175 | 0.24 | 0.2 | 0.172 |
| $R = 500$ м | По траверсу: $ \Delta d_{\max \max} $, м | 0.688 | 0.605 | 0.617 | 0.597 | 0.576 |
| | По дистанции: $ \Delta D_{\max \max} $, м | 0.306 | 0.875 | 1.21 | 0.98 | 0.86 |

В табл. 3 приведены максимальные значения максимальных погрешностей оценок линейных координат объекта для представленных в табл. 2 параметров позиционирования и геометрии антенны, полученные с использованием зависимостей (5), на основе которых также можно оценивать основные функциональные возможности фазового пеленгатора, учитывая характерные результаты расчётов:

- в зоне ближнего причаливания с увеличением наклонного расстояния наблюдается непропорциональный рост абсолютных погрешностей оценок линейных координат во всём диапазоне изменений углов места объекта – имеет место уменьшение относительных погрешностей позиционирования;

- в зоне дальнего наблюдения с увеличением наклонного расстояния обеспечивается пропорциональный рост абсолютных погрешностей оценок линейных координат во всём диапазоне изменений углов места объекта – поддерживается постоянство относительных погрешностей позиционирования;

- максимальные значения максимальных абсолютных погрешностей оценок дистанции в зоне ближнего причаливания во всём диапазоне изменений углов места объекта не превышают 5 см, а смещения по траверсу – 4 см, что позволяет говорить о перспективности использования фазового пеленгатора в различных системах приведения подводных объектов в заданную точку водного пространства;

- максимальные значения максимальных относительных погрешностей оценок дистанции в зоне дальнего наблюдения во всём диапазоне изменений углов места объекта не превышают 1 %, а смещения по траверсу – 0.7%, что соответствует уровню лучших современных систем позиционирования.

5. Заключение

Рассмотренные характеристики фазового пеленгатора, базирующегося на разработанном алгоритме позиционирования, согласованном с четырёхэлементной антенной двух эффективных геометрий, свидетельствуют о возможности его результативного использования при решении комплексных задач наблюдения объектов и управления движением различных подводных аппаратов. При этом по совокупности оцениваемых показателей диаметрально-ортогональная геометрия антенны пеленгатора является более предпочтительной, хотя и пирамидальная геометрия имеет свою область применения, особенно в приложениях, касающихся малогабаритных автономных необитаемых подводных аппаратов.

Литература

1. *Матвиенко Ю. В. и др.* Пеленгатор гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой: Патент 2179730 RU // Б.И. 2002. № 5. С. 15.
2. *Литвиненко С. Л.* Экспериментальные исследования подсистемы пассивной гидролокации гидроакустической навигационной системы с ультракороткой базой // Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. Тематический выпуск. С. 92–101.
3. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультракороткой базой // Вестник СибГУТИ. 2018. № 4. С. 66–75.
4. Фазометр Ф2-34. Основные технические характеристики [Электронный ресурс]. URL: <http://www.pribor-i.ru/f2-34-izmeritel-raznosti-faz?yclid=6421049607832489827> (дата обращения: 01.12.2018).

Статья поступила в редакцию 14.01.2019.

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-938, e-mail: viktor.arsentev.51@mail.ru.

Криволапов Геннадий Илларионович

к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, руководитель научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-942, e-mail: krivolapov@sibsutis.ru.

About influence of geometrical parameters of the antenna characteristics of the hydroacoustic phase direction finder

V. Arsent'ev, G. Krivolapov

Influence of geometrical parameters of the receiving antenna of a direction finder on the accuracy of determination of angular and linear coordinates of the positioned objects is considered. Estimates of the maximum errors of positioning in relation to two variants of geometry of the antenna of a direction finder are received.

Keywords: geometric parameters of the direction finding antenna, positioning errors.