

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 621.397.2

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ
ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВЕЩАНИЯ СТАНДАРТА DVB-T2
НА ТИПОВОЙ ПЕРЕДАЮЩЕЙ СТАНЦИИ

© 2020 г. О. В. Тиссен^{а, *}, А. И. Ливашвили^б

^аРоссийская телевизионная и радиовещательная сеть,
ул. Павловича, 7а, Хабаровск, 680000 Российская Федерация

^бДальневосточный университет путей сообщения,
ул. Серышева, 47, Хабаровск, 680000 Российская Федерация

*E-mail: kuharskaya_olga_1991@mail.ru

Поступила в редакцию 25.10.2019 г.

После доработки 03.02.2020 г.

Принята к публикации 08.02.2020 г.

Выполнено моделирование системы цифрового вещания DVB-T2 на типовой передающей станции в режиме регионализации контента с использованием методики многослойных графов с целью определения параметров надежности. Одна из представленных моделей характеризует состояния системы вещания при использовании только локальной врезки контента согласно ETSI TS 102773. Вторая модель, также выполненная в виде многослойного графа, характеризует состояния системы при каскадном включении устройств регионализации. На основании предложенных выражений для вероятности безотказной работы каждой системы вещания произведен расчет значений, который показал, что система с каскадной врезкой имеет коэффициент готовности на 3.28% выше, чем схема с врезкой контента путем замещения каналов физического уровня, при этом прямое резервирование каскадной схемы повышает ее надежность на 9.77%.

DOI: 10.31857/S003384942007013X

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время сеть цифрового эфирного телевизионного вещания в России эксплуатируется в режиме модификации оригинального контента с целью предоставления абонентам местного рекламно-информационного содержания телепрограмм. Модификация цифрового потока формата T2-MI (Terrestrial 2 Modulator Interface) может быть осуществлена двумя основными путями:

1) с применением устройства врезки локального контента путем замены каналов физического уровня согласно ETSI TS 102773;

2) с применением синхронного сплайсера, выполняющего врезку в определенный телевизионный сервис, при этом в качестве материала для врезки может использоваться как видеофайл конечной длительности, так и трансляция в режиме онлайн в формате транспортного потока.

Типовая передающая станция эфирного телевизионного вещания стандарта DVB-T2 (Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2) может быть оснащена как оборудованием одного типа врезки контента, так и обоими типами одновременно, при этом осуществляется последовательное включение модифицирующих устройств. Внесение до-

полнительных блоков в систему формирования сигнала DVB-T2 на станции усложняет схему и снижает общую надежность всего комплекса оборудования. Под термином надежность мы понимаем, согласно [1], свойство оборудования сохранять в течение заданного времени в пределах установленных норм значения функциональных параметров при определенных условиях. Если рассматривать показатели надежности отдельно блока оборудования, абстрагировав его относительно внешних условий работы, то основными факторами, влияющими на безотказность устройства, будут характеристики используемой элементной базы, с помощью которой реализовано устройство, особенности программного обеспечения, его безопасности и целесообразности и прочие факторы, влияющие на стабильность работы устройства. При определении надежности системы, состоящей из некоторого количества оборудования, взаимосвязанного между собой с помощью физико-логических интерфейсов, основными факторами, влияющими на показатели надежности, будут следующие:

– характеристики элементной базы каждого устройства в отдельности;

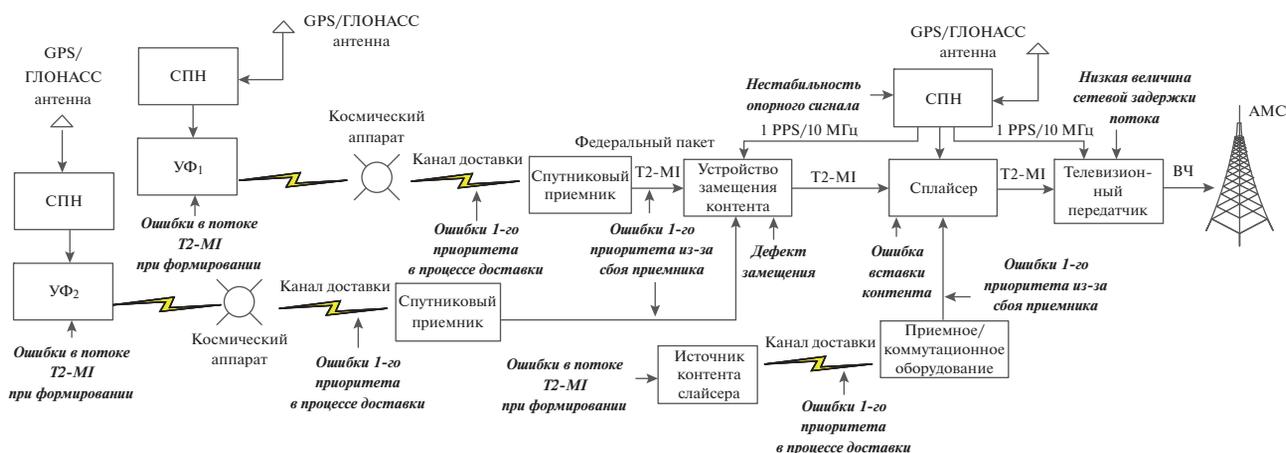


Рис. 1. Схема организации вещания при последовательном включении модифицирующих устройств: УФ₁ и УФ₂ – устройства формирования федерального и локального потока T2-MI соответственно; СПН – спутниковый навигационный приемник.

– характеристики интерфейсов обмена информацией;

– внешние условия, которые могут воздействовать на характеристики оборудования.

Цель данной работы – определить коэффициент готовности комплекса вещательного оборудования типовой телевизионной передающей станции, осуществляющей эфирное вещание цифрового сигнала в стандарте DVB-T2.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для того чтобы определить степень влияния дооснащения станций на вероятность безотказной работы системы, необходимо выполнить следующие задачи:

– определить факторы, влияющие на характеристики системы;

– определить показатели надежности схемы вещания как с применением только устройства врезки локального контента, так и при последовательном его включении со сплайсером.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На рис. 1 представлена схема организации вещания на передающей станции при последовательном включении устройств врезки. Исходя из рис. 1, видно, что практически на каждом этапе обработки информационного потока существуют причины снижения надежности системы, которые обозначены полужирным курсивным шрифтом.

2.1. Модель для схемы с локальной врезкой контента

На основании указанных выше факторов снижения надежности в целях универсализации, конкретизации и удобства анализа сформирован многослойный граф состояний системы организации вещания на передающей станции, представленный на рис. 2. Данный граф составлен на основе методики проектирования телекоммуникационных сетей с помощью многослойного графа, предложенной Д.В. Агеевым в работе [3]. Предложенный автором алгоритм переработан с учетом требований к графу состояний для определения надежности системы. Граф на рис. 2 представлен для схемы вещания с использованием только устройства врезки локального контента и без применения сплайсера.

Многослойный граф включает в себя три уровня: уровень топологии схемы, уровень состояний относительно топологии схемы и уровень состояний каждого звена или блока оборудования. В табл. 1 приведено описание каждой вершины рассматриваемого графа.

На самом верхнем уровне представлена логическая схема организации вещания на станции с использованием устройства врезки контента, согласно рис. 1. У каждого элемента существует связь с вершиной графа более низкого уровня, которые соответствуют общим состояниям блоков, приведенных на уровне топологии схемы. Так, узлы U1 и U2 являются логическими блоками приема сигнала на станции, а на уровне состояний к этим узлам будут относиться состояние канала доставки, с помощью которого осуществляется прием сигнала в заданной точке, и состояние самого приемного оборудования.

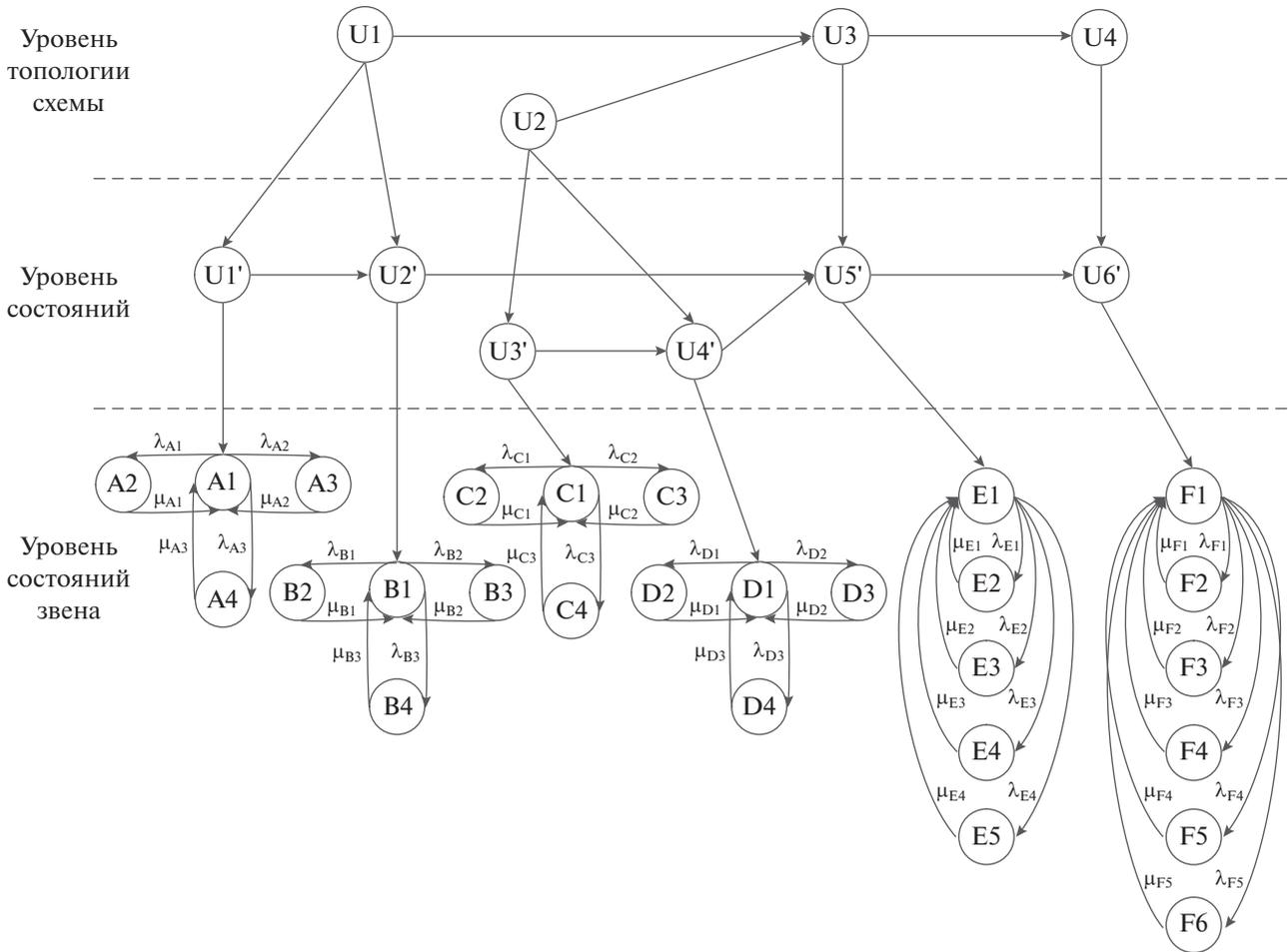


Рис. 2. Граф для расчета надежности схемы с врезкой контента путем замены каналов физического уровня.

На самом низшем уровне многослойного графа представлены возможные состояния каждого элемента при рассмотрении его как отдельной цельной системы. Так, например, состояние канала доставки основного потока U1' может быть нормой (состояние A1), также на надежность канала передачи могут влиять аварийные ситуации, возникающие на передающей и транзитной сторонах (состояния A2 и A3), а также воздействие помех различного характера (состояние A4), которые способствуют возникновению ошибок в потоке в процессе передачи.

Состояния других блоков описаны в табл. 1.

Граф нижнего уровня содержит обозначения интенсивностей отказов λ_{ij} и восстановления μ_{ij} ,

где i – буквенное обозначение элемента системы, j – номер состояния элемента.

Ниже приведена система уравнений вероятности нахождения системы в каждом состоянии для блока состояния канала связи:

$$\begin{aligned}
 P_{A1}(t) &= -\lambda_{A1}P_{A1}(t) - \lambda_{A2}P_{A1}(t) - \\
 &- \lambda_{A3}P_{A1}(t) + \mu_{A1}P_{A2}(t) + \mu_{A2}P_{A3}(t) + \mu_{A3}P_{A4}(t), \\
 P_{A2}(t) &= \lambda_{A1}P_{A1}(t) - \mu_{A1}P_{A2}(t), \\
 P_{A3}(t) &= \lambda_{A2}P_{A1}(t) - \mu_{A2}P_{A3}(t), \\
 P_{A4}(t) &= \lambda_{A3}P_{A1}(t) - \mu_{A3}P_{A4}(t).
 \end{aligned}$$

В результате применения прямого преобразования Лапласа вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии (A1) определится по формуле

$$P_{A1}(s) = \left[s + \lambda_{A1} + \lambda_{A2} + \lambda_{A3} - \frac{\mu_{A1}\lambda_{A1}}{s + \mu_{A1}} - \frac{\mu_{A2}\lambda_{A2}}{s + \mu_{A2}} - \frac{\mu_{A3}\lambda_{A3}}{s + \mu_{A3}} \right]^{-1}.$$

Таблица 1. Описание вершин графа на рис. 2

Название узла	Описание	Название узла	Описание
U1	Приемная часть основного потока	C1	Состояние “норма” канала доставки локального потока
U2	Приемная часть регионального потока	D1	Состояние “норма” приемника регионального потока
U3	Блок врезки контента	E1	Состояние “норма” устройства врезки контента
U4	Блок излучения в эфир (передатчик DVB-T2)	F1	Состояние “норма” передатчика DVB-T2
U1'	Состояние канала связи основного потока	A2, C2	Авария на передающей стороне
U2'	Состояние приемной части основного потока на станции	A3, C3	Авария на транзитном участке
U3'	Состояние канала связи регионального потока	A4, C4	Влияние помех/погодных условий
U4'	Состояние приемной части регионального потока на станции	B2, D2, E2, F2	Сбой аппаратного обеспечения
U5'	Состояние устройства врезки	B3, D3, E3, F3	Сбой программного обеспечения
U6'	Состояние передающего устройства	B4, D4, E4, F4	Ошибки в сигнале
A1	Состояние “норма” канала доставки основного потока	E5, F5	Сбой синхронизации оборудования
B1	Состояние “норма” приемника основных данных	F6	Некорректно указанная величина сетевой задержки

При подстановке числовых значений интенсивностей отказов и восстановления и дальнейшего обратного преобразования Лапласа будет иметь место функция готовности системы на заданном временном отрезке. Коэффициент готовности является основной характеристикой надежности восстанавливаемой телекоммуникационной системы и является равным вероятности нормальной работы оборудования на бесконечно большом интервале времени:

$$K_{ri} = P_{il}(\infty).$$

Поскольку подграфы нижнего уровня для таких элементов системы как канал доставки и приемное оборудование состоят из четырех вершин и шести ребер, т.е. графически являются одинаковыми, то справедливо будет полагать, что коэффициент готовности и вероятность нахождения системы в работоспособном состоянии перечисленных блоков будут определяться по одинаковой формуле. Тогда:

$$P_{B1}(s) = \left[s + \lambda_{B1} + \lambda_{B2} + \lambda_{B3} - \frac{\mu_{B1}\lambda_{B1}}{s + \mu_{B1}} - \frac{\mu_{B2}\lambda_{B2}}{s + \mu_{B2}} - \frac{\mu_{B3}\lambda_{B3}}{s + \mu_{B3}} \right]^{-1},$$

$$P_{C1}(s) = \left[s + \lambda_{C1} + \lambda_{C2} + \lambda_{C3} - \frac{\mu_{C1}\lambda_{C1}}{s + \mu_{C1}} - \frac{\mu_{C2}\lambda_{C2}}{s + \mu_{C2}} - \frac{\mu_{C3}\lambda_{C3}}{s + \mu_{C3}} \right]^{-1},$$

$$P_{D1}(s) = \left[s + \lambda_{D1} + \lambda_{D2} + \lambda_{D3} - \frac{\mu_{D1}\lambda_{D1}}{s + \mu_{D1}} - \frac{\mu_{D2}\lambda_{D2}}{s + \mu_{D2}} - \frac{\mu_{D3}\lambda_{D3}}{s + \mu_{D3}} \right]^{-1}.$$

Для состояний устройства врезки контента система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{E1}(t) &= -\lambda_{E1}P_{E1}(t) - \lambda_{E2}P_{E1}(t) - \lambda_{E3}P_{E1}(t) - \\ &- \lambda_{E4}P_{E1}(t) + \mu_{E1}P_{E2}(t) + \mu_{E2}P_{E3}(t) + \\ &+ \mu_{E3}P_{E4}(t) + \mu_{E4}P_{E5}(t), \\ P_{E2}(t) &= \lambda_{E1}P_{E1}(t) - \mu_{E1}P_{E1}(t), \\ P_{E3}(t) &= \lambda_{E2}P_{E1}(t) - \mu_{E2}P_{E3}(t), \\ P_{E4}(t) &= \lambda_{E3}P_{E1}(t) - \mu_{E3}P_{E4}(t), \\ P_{E5}(t) &= \lambda_{E4}P_{E1}(t) - \mu_{E4}P_{E5}(t). \end{aligned}$$

После преобразования Лапласа получим

$$P_{E1}(s) = \left[s + \lambda_{E1} + \lambda_{E2} + \lambda_{E3} + \lambda_{E4} - \frac{\mu_{E1}\lambda_{E1}}{s + \mu_{E1}} - \frac{\mu_{E2}\lambda_{E2}}{s + \mu_{E2}} - \frac{\mu_{E3}\lambda_{E3}}{s + \mu_{E3}} - \frac{\mu_{E4}\lambda_{E4}}{s + \mu_{E4}} \right]^{-1}.$$

Для состояний передающего устройства система уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{F1}(t) &= -\lambda_{F1}P_{F1}(t) - \lambda_{F2}P_{F1}(t) - \lambda_{F3}P_{F1}(t) - \\ &- \lambda_{F4}P_{F1}(t) - \lambda_{F5}P_{F1}(t) + \mu_{F1}P_{F2}(t) + \\ &+ \mu_{F2}P_{F3}(t) + \mu_{F3}P_{F4}(t) + \mu_{F4}P_{F5}(t) + \mu_{F5}P_{F6}(t), \\ P_{F2}(t) &= \lambda_{F1}P_{F1}(t) - \mu_{F1}P_{F2}(t), \\ P_{F3}(t) &= \lambda_{F2}P_{F1}(t) - \mu_{F2}P_{F3}(t), \\ P_{F4}(t) &= \lambda_{F3}P_{F1}(t) - \mu_{F3}P_{F4}(t), \\ P_{F5}(t) &= \lambda_{F4}P_{F1}(t) - \mu_{F4}P_{F5}(t), \\ P_{F6}(t) &= \lambda_{F5}P_{F1}(t) - \mu_{F5}P_{F6}(t). \end{aligned}$$

После преобразования Лапласа имеем

$$P_{F1}(s) = \left[s + \lambda_{F1} + \lambda_{F2} + \lambda_{F3} + \lambda_{F4} + \lambda_{F5} - \frac{\mu_{F1}\lambda_{F1}}{s + \mu_{F1}} - \frac{\mu_{F2}\lambda_{F2}}{s + \mu_{F2}} - \frac{\mu_{F3}\lambda_{F3}}{s + \mu_{F3}} - \frac{\mu_{F4}\lambda_{F4}}{s + \mu_{F4}} - \frac{\mu_{F5}\lambda_{F5}}{s + \mu_{F5}} \right]^{-1}.$$

После подстановки числовых значений и обратного преобразования Лапласа вероятностей каждого элемента системы возможно рассчитать общий коэффициент готовности всего комплекса оборудования станции. Необходимо рассматривать элементы U1' и U2', а также U3' и U4' как простые последовательные системы, однако пары элементов U1'/U2' и U3'/U4' являются параллельно включенными относительно друг друга (рис. 2). Последовательно-параллельная система элементов U1'/U2'/U3'/U4' может рассматриваться как общий блок, включенный последовательно с элементами U5' и U6'.

Согласно [4] расчет коэффициента готовности параллельной системы подразумевает горячее резервирование параллельно включенных элемен-

тов. В данном случае для вычисления параметров надежности имеет смысл рассматривать приемную часть основного и регионального потоков как элементы горячего резерва, поскольку при аварийном полном отсутствии регионального потока устройство врезки резервируется основным потоком, не осуществляя модификацию, согласно техническому руководству на оборудование [5]. При этом в режиме нормальной работы основной и региональные информационные потоки, принимаемые соответствующим оборудованием, не являются резервными относительно друг друга.

На основе правил расчета вероятности безотказной работы последовательно-параллельных систем, приведенных в [4], получена следующая формула суммарной вероятности:

$$P_{\Sigma} = (P_{U1'}(t)P_{U2'}(t) + P_{U3'}(t)P_{U4'}(t) - P_{U1'}(t)P_{U2'}(t)P_{U3'}(t)P_{U4'}(t))P_{U5'}(t)P_{U6'}(t).$$

Или относительно состояний нижнего уровня:

$$P_{\Sigma}(t) = (P_{A1}(t)P_{B1}(t) + P_{C1}(t)P_{D1}(t) - P_{A1}(t)P_{B1}(t)P_{C1}(t)P_{D1}(t))P_{E1}(t)P_{F1}(t).$$

Также справедлива будет следующая формула суммарного коэффициента готовности:

$$K_{r\Sigma} = (K_{rA1}K_{rB1} + K_{rC1}K_{rD1} - K_{rA1}K_{rB1}K_{rC1}K_{rD1})K_{rE1}K_{rF1},$$

где K_{rA1} и K_{rB1} – коэффициенты готовности канала доставки и приемника основного потока T2-MI соответственно; K_{rC1} и K_{rD1} – коэффициенты готовности канала доставки и приемника модифицирующего потока; K_{rE1} и K_{rF1} – коэффициенты готовности устройства врезки контента и датчика DVB-T2.

2.2. Модель для схемы с каскадной врезкой контента

Для сравнения показателей надежности систем вещания только с устройством врезки локального контента и схемы с последовательным включением устройства врезки и сплайсера был составлен многослойный граф для системы вещания с двухступенчатой врезкой по правилам, описанным выше, с сохранением буквенного обозначения (рис. 3).

Как видно, граф, представленный на рис. 2, является подграфом графа на рис. 3. Аналогичные обозначения вершин обоих графов представляют из себя одни и те же узлы системы вещания, описание которых дано в табл. 1. Описание вершин U5, U6, U7', U8', U9', G1...G4, H1...H4 и I1...I4 представлено в табл. 2.

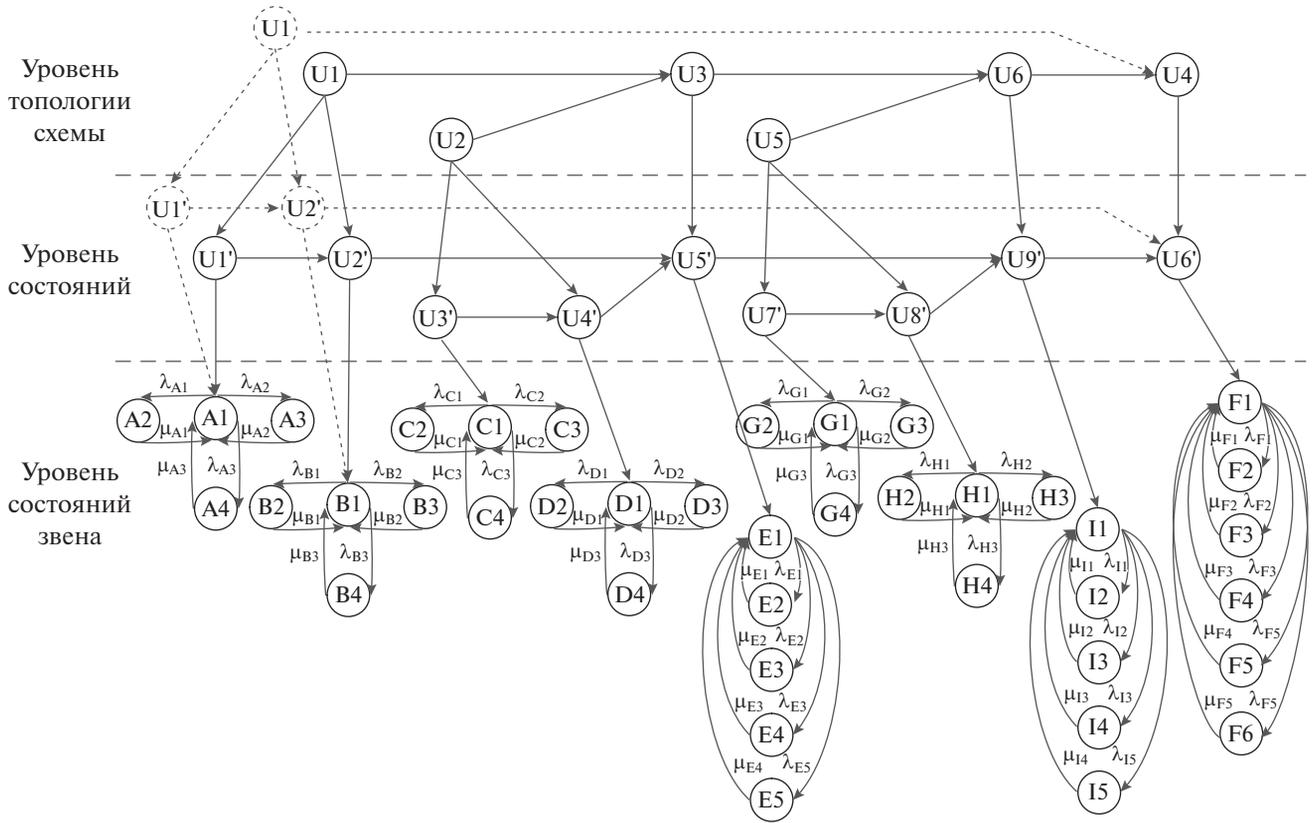


Рис. 3. Многослойный граф для схемы с регионализацией и сплайсингом.

Поскольку вершины графа, относящиеся к приемной части потока T2-MI и к устройству врезки локального контента, одинаковы на обоих графах, то выражения для определения вероятности безотказной работы этих блоков будут идентичны рассмотренным выше. Вероятность безотказной работы для канала доставки потока для сплайсера, приемной его части и самого сплайсера будут иметь следующий вид:

$$P_{G1}(s) = \left[s + \lambda_{G1} + \lambda_{G2} + \lambda_{G3} - \frac{\mu_{G1}\lambda_{G1}}{s + \mu_{G1}} - \frac{\mu_{G2}\lambda_{G2}}{s + \mu_{G2}} - \frac{\mu_{G3}\lambda_{G3}}{s + \mu_{G3}} \right]^{-1},$$

$$P_{H1}(s) = \left[s + \lambda_{H1} + \lambda_{H2} + \lambda_{H3} - \frac{\mu_{H1}\lambda_{H1}}{s + \mu_{H1}} - \frac{\mu_{H2}\lambda_{H2}}{s + \mu_{H2}} - \frac{\mu_{H3}\lambda_{H3}}{s + \mu_{H3}} \right]^{-1},$$

$$P_{I1}(s) = \left[s + \lambda_{I1} + \lambda_{I2} + \lambda_{I3} + \lambda_{I4} - \frac{\mu_{I1}\lambda_{I1}}{s + \mu_{I1}} - \frac{\mu_{I2}\lambda_{I2}}{s + \mu_{I2}} - \frac{\mu_{I3}\lambda_{I3}}{s + \mu_{I3}} - \frac{\mu_{I4}\lambda_{I4}}{s + \mu_{I4}} \right]^{-1}.$$

Тогда вероятность безотказной работы для блоков А–Е определится в виде

$$P_{A-E}(t) = (P_{U1'}(t)P_{U2'}(t) + P_{U3'}(t)P_{U4'}(t) - P_{U1'}(t)P_{U2'}(t)P_{U3'}(t)P_{U4'}(t))P_{U5'}(t),$$

Суммарная вероятность нормального состояния всей схемы вещания:

$$P_{\Sigma'} = (P_{A-E}(t) + P_{U7'}(t)P_{U8'}(t) - P_{U7'}(t)P_{U8'}(t)P_{U9'}(t)P_{U6'})P_{U9'}(t).$$

Заменяя $P_{A-E}(t)$ и обозначения среднего слоя графа на обозначения нижнего, получим общую формулу суммарного коэффициента готовности для схемы с последовательным включением устройств модификации:

$$K_{\Gamma\Sigma} = [(K_{\Gamma A1} K_{\Gamma B1} + K_{\Gamma C1} K_{\Gamma D1} - K_{\Gamma A1} K_{\Gamma B1} K_{\Gamma C1} K_{\Gamma D1}) \times K_{\Gamma E1} + K_{\Gamma G1} K_{\Gamma H1} - (K_{\Gamma A1} K_{\Gamma B1} + K_{\Gamma C1} K_{\Gamma D1} - K_{\Gamma A1} K_{\Gamma B1} K_{\Gamma C1} K_{\Gamma D1}) K_{\Gamma E1} K_{\Gamma G1} K_{\Gamma H1}] K_{\Gamma I1} K_{\Gamma F1}.$$

Преобразование полученной формулы через коэффициент $K_{\Gamma\Sigma}$, рассчитанный для предыдущего многослойного графа, позволило получить следующее выражение:

Таблица 2. Описание вершин графа на рис. 3

Название узла	Описание	Название узла	Описание
U5	Приемная часть контента для сплайсинга	H1	Состояние “норма” оборудования приема контента для сплайсера
U6	Сплайсер	H2	Аппаратный сбой оборудования приема контента для сплайсера
U7'	Состояние канала доставки информационного потока до сплайсера	H3	Программный сбой оборудования приема контента для сплайсера
U8'	Состояние приемно-коммутационного оборудования	H4	Ошибки в сигнале
U9'	Состояние оборудования сплайсера	I1	Состояние “норма” сплайсера
G1	Состояние “норма” канала доставки контента для сплайсера	I2	Сбой аппаратного обеспечения сплайсера
G2	Авария на передающей стороне	I3	Сбой программного обеспечения сплайсера
G3	Авария на транзитном участке	I4	Ошибки в сигнале
G4	Влияние помех/погодных условий	I5	Сбой синхронизации сплайсера

$$K_{r\Sigma'} = \left(\frac{K_{r\Sigma}}{K_{rF1}} + K_{rG1}K_{rH1} - \frac{K_{r\Sigma}}{K_{rF1}} K_{rG1}K_{rH1} \right) K_{rI1}K_{rF1} =$$

$$= K_{rI1}K_{r\Sigma} + K_{rI1}K_{rF1}K_{rG1}K_{rH1} - K_{rG1}K_{rH1}K_{r\Sigma}K_{rI1}.$$

Очевидно, что зависимость суммарной вероятности, а, следовательно, коэффициента готовности схемы с двухступенчатой регионализацией от суммарной вероятности работоспособного состояния предыдущей рассматриваемой схемы, будет носить линейный характер.

3. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГОТОВНОСТИ

При наличии данных об интенсивностях отказа и восстановления оборудования возможно получить действительные численные результаты расчета коэффициентов готовности и сделать вывод о степени влияния на надежность системы формирования и передачи сигнала дополнительного оборудования, т.е. устройств модификации контента. Поскольку оборудование, используемое в организации вещания с модификацией контента, может быть от различных производителей, иметь разные дополнительные функции и возможные неисправности, то интенсивности отказов и восстановления будут иметь различное значение в зависимости от множества факторов. В связи с тем, что ввод в эксплуатацию оборудования модификации осуществлялся постепенно в течение последних пяти лет, полноценной статистики по отказам оборудования на данный момент еще нет. Для того чтобы определить наиболее объективные теоретические значения интенсивностей отказа и восстановления, был произведен анализ всех возможных событий (аварий и предупреждений)

используемого в настоящее время оборудования вещания. В качестве такого оборудования были приняты следующие профессиональные устройства, руководства по эксплуатации которых находятся в открытом доступе в сети Интернет: спутниковый приемник DVB-S/S2 CISCO D9854, устройство вставки локального контента TTV-PLP-SW-0401, эфирный передатчик DVB-T/T2 ProTelevision PT-2000, сплайсер Qualittec TTL-2012. Результаты анализа всех возможных сообщений оборудования и сортировки относительно принадлежности к определенному состоянию нижнего слоя многослойных графов, представленных на рис. 2 и 3, позволили рассчитать интенсивности отказов и восстановления за годовой интервал времени соответственно по формулам:

$$\lambda = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp}\Delta t}, \quad \mu = \frac{n_b(\Delta t)}{N_{ncp}\Delta t},$$

где $n(\Delta t)$ – количество элементов (объектов), отказавших за рассматриваемый интервал времени; N_{cp} – среднее количество элементов, работавших безотказно;

Δt – рассматриваемый интервал времени; $n_b(\Delta t)$ – количество восстановленных однотипных объектов за интервал Δt ; N_{ncp} – среднее количество невосстановленных элементов (объектов).

Результаты расчета интенсивностей и общее количество аварий, соответствующих определенному состоянию на графах, приведены в табл. 3.

На основании полученных значений был произведен расчет коэффициентов готовности для двух рассматриваемых схем модификации контента с использованием программных средств MathCad. Так, выражение для вероятности на-

Таблица 3. Результаты расчета интенсивностей отказа и восстановления

Параметр	n (Δt)	$N_{\text{ср}}$	Значение	Параметр	n (Δt)	Значение	Соответствие состоянию на графах (рис. 2, рис. 3)	Примечания
λ_{A1}	16	166	0.000264	μ_{A1}	16	0.0438	A2	Канал доставки основного потока
λ_{A2}	6	176	0.0000934	μ_{A2}	6	0.0164	A3	
λ_{A3}	12	170	0.000193	μ_{A3}	12	0.03288	A4	
λ_{B1}	23	159	0.0003963	μ_{B1}	23	0.063	B2	Приемник основного потока
λ_{B2}	73	109	0.001835	μ_{B2}	73	0.2	B3	
λ_{B3}	20	162	0.000338	μ_{B3}	20	0.0548	B4	
λ_{C1}	16	166	0.000264	μ_{C1}	16	0.0438	C2	Канал доставки регионального потока
λ_{C2}	6	176	0.0000934	μ_{C2}	6	0.0164	C3	
λ_{C3}	12	170	0.000193	μ_{C3}	12	0.03288	C4	
λ_{D1}	23	159	0.0003963	μ_{D1}	23	0.063	D2	Приемник регионального потока
λ_{D2}	73	109	0.001835	μ_{D2}	73	0.2	D3	
λ_{D3}	20	162	0.000338	μ_{D3}	20	0.0548	D4	
λ_{E1}	8	23	0.000953	μ_{E1}	8	0.0219	E2	Устройство вставки локаль- ного контента
λ_{E2}	6	25	0.000658	μ_{E2}	6	0.016	E3	
λ_{E3}	7	24	0.0008	μ_{E3}	7	0.019	E4	
λ_{E4}	10	21	0.0013	μ_{E4}	10	0.027	E5	
λ_{F1}	12	40	0.000822	μ_{F1}	12	0.03288	F2	Передачик DVB-T2
λ_{F2}	3	49	0.000168	μ_{F2}	3	0.00822	F3	
λ_{F3}	12	40	0.000822	μ_{F3}	12	0.0329	F4	
λ_{F4}	11	41	0.000735	μ_{F4}	11	0.03013	F5	
λ_{F5}	6	46	0.000357	μ_{F5}	6	0.01644	F6	
λ_{G1}	16	166	0.000264	μ_{G1}	16	0.0438	G2	Канал доставки потока до сплайсера
λ_{G2}	6	176	0.0000934	μ_{G2}	6	0.0164	G3	
λ_{G3}	12	170	0.000193	μ_{G3}	12	0.03288	G4	
λ_{H1}	23	159	0.0003963	μ_{H1}	23	0.063	H2	Приемное обо- рудование сплайсера
λ_{H2}	73	109	0.001835	μ_{H2}	73	0.2	H3	
λ_{H3}	20	162	0.000338	μ_{H3}	20	0.0548	H4	
λ_{I1}	12	30	0.0011	μ_{I1}	12	0.033	I2	Сплайсер
λ_{I2}	12	30	0.0011	μ_{I2}	12	0.033	I3	
λ_{I3}	9	33	0.00075	μ_{I3}	9	0.025	I4	
λ_{I4}	1	41	0.000067	μ_{I4}	1	0.0027	I5	

Примечание: $\Delta t = 365$ для всех параметров λ ; $N_{\text{ср}} = 1$ для всех параметров μ .

хождения канала доставки основного информационного потока в работоспособном состоянии будет выглядеть следующим образом:

$$P_{A1}(t) = 0.006243e^{-0.044t} + 0.005428e^{-0.0165t} + 0.0056e^{-0.033t} + 0.982712.$$

На коротком интервале работы системы, т.е. при $t \rightarrow 0$, вероятность исправного состояния, очевидно, будет стремиться к единице $P_{A1}(t) \approx 1$, это свидетельствует о том, что система на малом интервале времени будет находиться в теоретически однозначном исправном состоянии. При использовании канала доставки в течение большого интервала времени, т.е. при $t \rightarrow \infty$, вероятность исправного состояния, а также стационарный коэффициент готовности, согласно методике, предложенной в [4], составят

$$K_{rA1} = P_{A1}(\infty) \approx 0.9827$$

или в процентном выражении $K_{rA1} \approx 98.27\%$.

Тогда для остальных подсистем коэффициенты готовности составят:

– для подсистемы приемника основного потока $K_{rB1} = P_{B1}(\infty) \approx 0.9788$. Для канала доставки и приемного оборудования регионального потока, а также канала и приемника сплайсера значения вероятностей исправного состояния будут соответственно равны рассчитанным;

– для подсистемы устройства врезки $K_{rE1} = P_{E1}(\infty) \approx 0.851$;

– для подсистемы передатчика $K_{rF1} = P_{F1}(\infty) \approx 0.8956$;

– для подсистемы сплайсера $K_{rI1} = P_{I1}(\infty) \approx 0.892$.

Тогда суммарный коэффициент готовности схемы вещания с модификацией контента путем замещения каналов физического уровня составит:

$$\begin{aligned} K_{r\Sigma} &= (K_{rA1}K_{rB1} + K_{rC1}K_{rD1} - \\ &- K_{rA1}K_{rB1}K_{rC1}K_{rD1})K_{rE1}K_{rF1} = \\ &= (0.9827 \times 0.9788 + 0.9827 \times 0.9788 - \\ &- 0.9827 \times 0.9788 \times 0.9827 \times 0.9788) \times \\ &\times 0.851 \times 0.8956 = 0.7612. \end{aligned}$$

Готовность системы вещания с каскадной врезкой составит:

$$\begin{aligned} K_{r\Sigma'} &= \\ &= K_{rI1}K_{r\Sigma} + K_{rI1}K_{rF1}K_{rG1}K_{rH1} - K_{rG1}K_{rH1}K_{r\Sigma}K_{rI1} = \\ &= 0.892 \times 0.7612 + 0.892 \times 0.896 \times \\ &\times 0.9827 \times 0.9788 - 0.9827 \times 0.9788 \times \\ &\times 0.7612 \times 0.892 = 0.794. \end{aligned}$$

Очевидно, что рассчитанные значения коэффициентов готовности являются низкими относительно требуемых значений безотказности работы оборудования, приведенных в государственных стандартах. Во-первых, это связано с тем, что расчет был произведен не на основании статистических опытных данных, а на основании выборки из всех возможных состояний оборудования при худших условиях функционирования. Во-вторых, увеличение надежности каскадной схемы на 3% относительно схемы с замещением можно объяснить с математической и физической точек зрения.

С математической точки зрения при рассмотрении графа на рис. 3, принимая группу элементов U1'...U5' за единый элемент, параллельный группе элементов U7', U8', можно рассматривать систему связи как параллельную с последовательным включением блоков U9' и U6', вероятность безотказной работы которой в целом будет больше, чем вероятность безотказной работы отдельного входящего в нее элемента. Данное правило является следствием общей методики вычисления вероятности безотказной работы параллельной системы, приведенной в различных учебных материалах, в частности в [4];

С точки зрения физической реализации сплайсер – устройство, которое обладает внутренним автоматическим переключением с режима врезки на режим простого транзита цифрового информационного потока при любых нарушениях в процессе подготовки контента для врезки и в процессе самого замещения.

Таким образом, для повышения надежности рассматриваемой схемы с каскадной врезкой возможно использование в качестве крайнего метода поддержания работоспособности передающего устройства и недопущения технической остановки, а тем более, аварии на оборудовании вещания дополнительного непосредственного соединения выхода приемного оборудования и входа передатчика с целью прямой трансляции цифрового потока в эфир. На рис. 3 данное подключение показано в виде соединения блоков U1' и U2', отмеченных пунктирной линией, и блока U6'. Такое соединение может быть рассмотрено как параллельное относительно полноценной схемы с каскадной врезкой. Тогда коэффициент готовности данной схемы определится как:

$$\begin{aligned} K_{r\Sigma''} &= \left(\frac{K_{r\Sigma'}}{K_{rF1}} + K_{rA1}K_{rB1} - \frac{K_{r\Sigma'}}{K_{rF1}} K_{rA1}K_{rB1} \right) K_{rF1} = \\ &= \left(\frac{0.794}{0.8956} + 0.9827 \times 0.9788 - \right. \\ &\left. - \frac{0.794}{0.8956} 0.9827 \times 0.9788 \right) 0.8956 = 0.8917. \end{aligned}$$

Очевидно, что коэффициент готовности системы с дополнительным резервированием на 9.77% выше, чем системы вещания с каскадной врезкой. Таким образом, прямое подключение выхода приемника ко второму физическому входу передатчика позволяет повысить вероятность безотказной работы системы без дополнительных финансовых затрат, однако следует иметь в виду, что “прямой” режим работы является нештатным в связи с отсутствием в эфире сигналов местного регионального наполнения, поэтому требует оперативного восстановления схемы замещения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложена методика расчета коэффициента готовности системы эфирного цифрового телевизионного вещания на типовой передающей станции с применением теории графов. На основании предложенных формул был произведен расчет количественных значений вероятности безотказной работы, который показал, что система с каскадной врезкой имеет коэффи-

циент готовности на 3.28% выше, чем схема с врезкой контента путем замещения каналов физического уровня, при этом прямое резервирование каскадной схемы повышает ее надежность на 9.77%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Боровиков С.М., Цирельчук И.Н., Троян Ф.Д.* Расчет показателей надежности радиоэлектронных средств. Минск: БГУИР, 2010.
2. ETSI TR 101 290 V1.3.1. DVB; Measurement guidelines for DVB systems. Introduction 07-2014. France: European Telecommunications Standards Institute, 2014.
3. *Агеев Д.В.* // Проблемы телекоммуникаций. 2010. № 2. С. 7.
4. *Ефремов А.А.* Теория надежности. Томск: Изд-во Томск. политех. ун-та, 2015.
5. Устройство вставки локального контента TTV-PLPSW-0401. Руководство по эксплуатации. Новосибирск: НПП Триада-ТВ, 2017. https://www.triadatv.ru/upload/iblock/526/PLP-Repleyser-_-Rukovodstvo-po-ekspluatatsii-V3.0.pdf.