

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С ЦЕЛЬЮ АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ**М. В. Жуков, В. В. Золотухин (Красноярск)**

Спутниковая связь представляет собой особый вид беспроводной связи, доступный даже в тех регионах Российской Федерации, где отсутствует возможность прокладки кабелей связи, а других операторов услуг беспроводной связи поблизости нет. Особенно актуальным является использование систем спутниковой связи в северных регионах, а также в труднодоступной местности, где подобные системы остаются единственным видом связи. Естественно, в таких случаях следует уделять особое внимание качеству функционирования подобных систем, в частности их устойчивости, живучести и надежности.

Согласно ГОСТ Р 53111 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки» функционирование систем связи определяется таким комплексным свойством, как устойчивость, под которой подразумевается способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия внутренних и внешних дестабилизирующих факторов. При этом свойство устойчивости можно разделить на два более простых свойства – надежность и живучесть. Под надежностью понимается способность сети связи сохранять способность выполнять требуемые функции в условиях воздействия внутренних дестабилизирующих факторов, а под живучестью – в условиях воздействия внешних дестабилизирующих факторов.

Сеть спутниковой связи включает в себя наземную и спутниковую часть: наземная часть представляет собой оборудование на стороне провайдера и множество абонентских спутниковых станций, а спутниковая часть представлена одним из спутников, находящихся на геостационарной орбите (рис. 1). В состав абонентской спутниковой станции входят: антенная система, передатчик, приемник (малошумящий усилитель – МШУ), модем, мультиплексор и оборудование клиента.

В процессе обработки собранной статистики по отказам оборудования систем спутниковой связи авторами данной работы были выделены следующие основные причины отказов в предоставлении услуг связи:

- отказ аппаратной части оборудования;
- зависание оборудования (отказ программного обеспечения);
- плохие погодные условия;
- другие причины.

Отказ аппаратного и программного обеспечения, а также отключение электропитания можно отнести к внутренним дестабилизирующим факторам, в то время как плохие погодные условия – к внешним. Плохие погодные условия влияют на уровень сигнала (работоспособное состояние сохраняется до тех пор, пока отношение сигнал/шум составляет не менее 3–4 дБ), а также в некоторых случаях способны «увести антенну». Категория «другие причины отказов» представляет собой достаточно обширную группу, включающую в себя такие причины отказов, как проблемы на стороне абонента, проблемы со стороны провайдера или транзитных операторов и др.

Для дальнейшего упрощения изложения в качестве комплексного понятия будем использовать термин «надежность» как более привычный для понимания, подразумевая при этом воздействие как внешних, так и внутренних дестабилизирующих факторов.

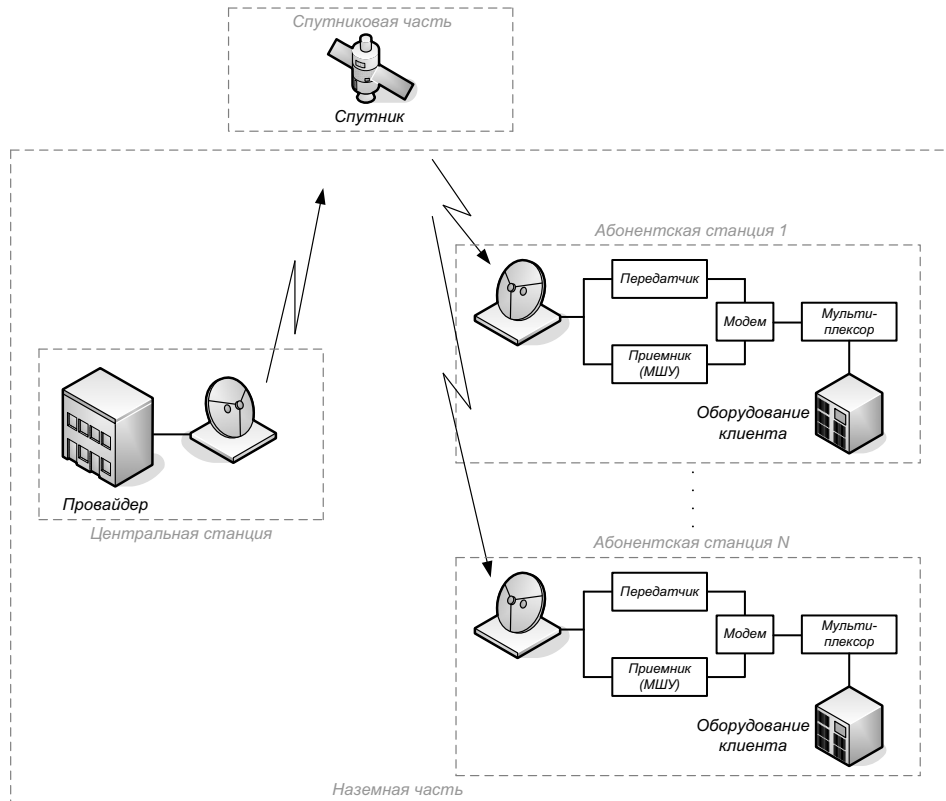


Рис. 1. Структурная схема сети спутниковой связи

В результате проведенного анализа была предложена математическая модель функционирования системы спутниковой связи в виде диаграммы состояний (state chart) (рис. 2).

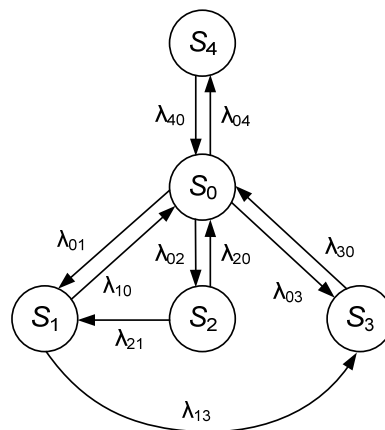


Рис. 2. Диаграмма состояний системы спутниковой связи

На данной диаграмме используются следующие обозначения возможных состояний системы спутниковой связи:

- S_0 – работоспособное состояние системы спутниковой связи;
- S_1 – отключение электричества или «скачки» питающего напряжения;
- S_2 – плохие погодные условия, «увело» антенну;
- S_3 – отказ программного обеспечения («зависание» оборудования);
- S_4 – другое (прочие причины отказа).

Интенсивности перехода между состояниями определялись на основе анализа собранной статистики с помощью программной системы мониторинга состояния сети

Zabbix. Данная система позволяет не только получать данные о времени возникновения и продолжительности отказов, но фиксировать в журнале событий их вид (причину). В частности, интенсивность отказов по причине отключения электропитания (интенсивность переходов λ_{01}) рассчитывалась по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{N_{\text{отк.}}}{S_{\text{станц.}} T}, \quad (1)$$

где $N_{\text{откл.э.п.}}$ – количество случаев отключения электропитания за некоторый период времени T ;

$S_{\text{станц.}}$ – общее количество станций спутниковой связи в исследуемом районе;

T – период времени, в течение которого проводился сбор и анализ статистических данных (8760 ч).

Интенсивности восстановления λ_{10} , λ_{20} , λ_{30} и λ_{40} представляют собой постоянные величины, значение которых определяется временем на выезд ремонтной бригады (если необходимо) и непосредственно устранение неисправности и составляет от 0,25 до 6 ч.

Первоначально математическое моделирование функционирования системы спутниковой связи осуществлялось с использованием математического аппарата цепей Маркова, однако при этом неизбежно возникает ряд ограничений, в частности, результаты, полученные при использовании марковских случайных процессов справедливы только при наличии нескольких ремонтных бригад. В противном случае время ремонта будет в значительной степени зависеть от числа одновременно возникающих отказов, поскольку процесс устранения всех предыдущих отказов оказывает непосредственное влияние на время устранения текущего отказа, и, как следствие, результаты оказываются менее точными. Многие авторы, например [1], утверждают о нецелесообразности использования цепей Маркова с целью анализа надежности современных систем. В случае же имитационного моделирования появляется возможность изменять время обслуживания динамически, в процессе моделирования, в зависимости от ряда факторов.

На основе предложенной математической модели была разработана динамическая дискретно-событийная имитационная модель в среде AnyLogic, представленная на рис. 3. Функционирование данной модели заключается в последовательном переходе из одного состояния в другое в соответствии с математической моделью, приведенной на рис. 2, причем интенсивности перехода определяются либо расчетным путем (в случае исследования показателей надежности для конкретной системы спутниковой связи), либо автоматически в случае оптимизации структурного резервирования системы.

Для хранения изменяющихся числовых значений и сбора статистических данных используются специальные объекты AnyLogic – переменные. В частности, для сбора статистики по коэффициенту готовности системы используется объект типа «переменная», которая изменяется в каждом блоке в зависимости от работоспособности конкретного состояния, после чего новое значение обрабатывается блоком сбора статистики AvailabilityStats:

```
availability = 0;
```

```
AvailabilityStats.add( availability, time() );
```

Помимо исследования показателей надежности функционирования системы спутниковой связи преследовалась цель выбора оптимального варианта резервирования, позволяющего при минимальных затратах на модернизацию сети связи достичь требуемых показателей надежности, а также максимальной прибыли оператора связи.

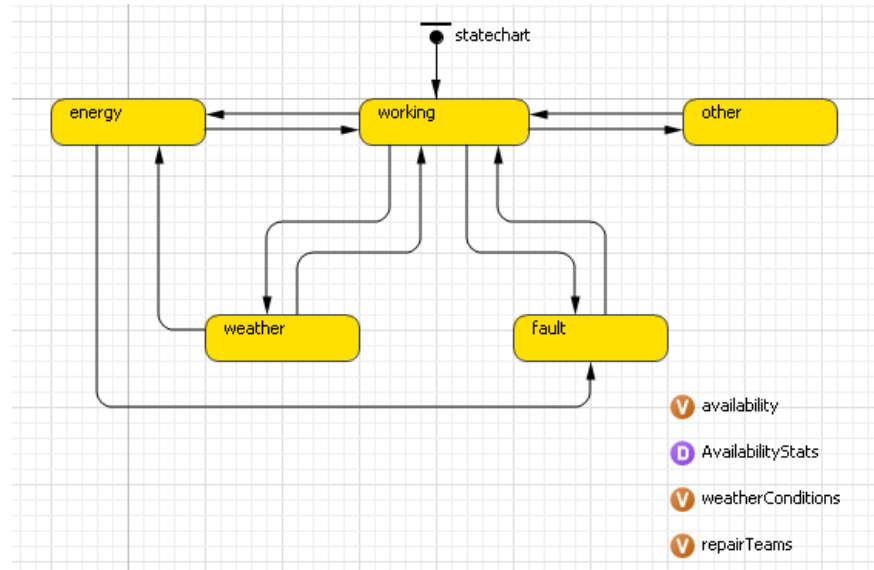


Рис. 3. Имитационная модель функционирования системы спутниковой связи в среде AnyLogic

Оптимизация резервирования проводилась методом перебора различных видов резервирования с целью достижения максимального значения целевой функции вида

$$P = D - C = \sum_{i=0}^{N-1} P_i d_i - \sum_{i=0}^{N-1} k_i c_i, \quad (2)$$

где P – прибыль оператора спутниковой связи;

D – доход оператора спутниковой связи от предоставления услуг;

C – затраты оператора на введение избыточности (структурного резервирования);

p_i – вероятность i -го состояния системы спутниковой связи;

N – общее число состояний системы, в данном случае равно пяти;

d_i – доход оператора связи при нахождении системы в i -м состоянии;

k_j – общее количество основных и резервных j -х элементов системы;

c_j – стоимость j -го элемента системы.

Следует заметить, что работоспособными состояниями системы (спутниковой станции) являются лишь состояния S_0 – «работоспособное состояние» и S_1 – «плохие погодные условия» (с частичным понижением качества предоставляемых услуг, а значит, скорости передачи и дохода).

В качестве вариантов резервирования оборудования было предложено три основных направления:

- резервирование оператора связи (использование услуг связи альтернативного провайдера);

- хранение ЗИП (антенны, передатчики, приемники, модемы, мультиплексоры, кабели, разъемы и др.);

- использование источников бесперебойного питания (ИБП) и дизельных генераторов для поддержания электропитания в случае его отключения в основной сети.

При этом резервирование отдельных элементов системы в конечном счете приводит к изменению интенсивностей перехода λ_{01} , λ_{02} и λ_{03} следующим образом:

$$\Lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i}}, \quad (3)$$

где λ_i – интенсивность отказов исходной, нерезервированной системы;

Λ – интенсивность отказов системы n -кратным с резервированием.

В данном случае предполагается использование ненагруженного («холодного») резервирования, поскольку резервные элементы до отказа основного не используются – представляют собой комплекты запасных частей (ЗИП).

Исследование различных видов резервирования показало, что максимальный коэффициент готовности $0,99993 \div 0,99998$ достигается благодаря использованию всех видов резервирования одновременно, но подобные системы довольно дороги при приобретении и обслуживании, их использование обусловлено необходимостью непрерывной связи на узлах связи, перерывы в работе которых категорически недопустимы. Для всех остальных узлов связи можно использовать резервирование с помощью ИБП и хранения ЗИП на складах.

В заключение следует заметить, что исследование показателей надежности систем спутниковой связи может осуществляться как методами аналитического (использование математического аппарата цепей Маркова), так и имитационного моделирования (с использованием программных сред имитационного моделирования, таких как GPSS и AnyLogic). Авторы данной работы имеют опыт работы с обеими названными системами, при этом для работы была использована система имитационного моделирования AnyLogic. Выбор данной системы объясняется легкостью создания дискретно-событийных имитационных моделей типа диаграммы состояний с помощью визуального графического редактора, встроенного в AnyLogic, а также набором огромного количества объектов библиотек и классов. К недостаткам можно отнести лишь необходимость владения языком программирования Java и отсутствие актуальной литературы на русском языке – учебников и монографий (кроме встроенной справки, которая, в принципе, содержит исчерпывающие сведения обо всех объектах системы и книги [2]), позволяющей легко освоить все возможности последней версии данной системы моделирования.

Литература

1. **Смит Дэвид Дж.** Безотказность, ремонтпригодность и риск. Практические методы для инженеров, включая вопросы оптимизации надежности и систем, связанных с безопасностью. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 432 с.
2. **Карпов Ю.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.