

УДК 004.052.3 + 004.738.5

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ ПОГРАНИЧНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ С ДВУМЯ ИНТЕРНЕТ-ПРОВАЙДЕРАМИ

П. А. РАХМАН¹, А. И. КАЯШЕВ², М. И. ШАРИПОВ³

¹pavelar@yandex.ru, ³sharipovm@mail.ru

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной технический университет» (УГНТУ)
Филиал в г. Стерлитамаке

Поступила в редакцию 6 июня 2014 г.

Аннотация. Рассматриваются математическая модель отказоустойчивой маршрутизации с двумя провайдерами и аналитическая формула для расчета коэффициента готовности. Также рассматриваются пример расчета коэффициента готовности для различных вариантов политик маршрутизации и особенности практической реализации отказоустойчивой маршрутизации на примере маршрутизации с двумя провайдерами по схеме основной/резервный провайдер.

Ключевые слова: протокол пограничной маршрутизации; коэффициент готовности.

ВВЕДЕНИЕ

В последние три десятилетия наблюдается бурное развитие информационных технологий и их внедрение в самые различные сферы деятельности человека, и сети передачи данных стали неотъемлемой частью жизни людей, без которой немислим информационный обмен. Особое место в современном мире занимает глобальная сеть Интернет, которая стала ключевой частью повседневной жизни людей и работы подавляющего большинства предприятий [1].

Помимо таких технических характеристик локальных сетей предприятия, как: производительность, латентность, масштабируемость, степень прозрачности для конечных пользователей, также крайне важными характеристиками являются комплексные показатели надежности, в частности, коэффициент готовности. От показателей надежности зависит доступность информационных ресурсов и сервисов для пользователей, а это косвенно также определяет безопасность и эффективность бизнес-процессов предприятия.

Особое место в такой ситуации занимает доступность ресурсов интернет, и специалисты современных предприятий внедряют различные отказоустойчивые схемы маршрутизации сети с несколькими интернет-провайдерами, в частности с двумя [2]. В такой ситуации анализ коэффициента готовности (доступности) ресурсов

интернет для конкретного предприятия является достаточно актуальной задачей.

Следует отметить, что в отечественной литературе по теории надежности [3, 4] достаточно глубоко рассматриваются теоретические аспекты, однако, примеры и задачи, приводимые в них, как правило, очень далеки от технологий и средств, используемых в схемах отказоустойчивой маршрутизации в интернете. В такой ситуации возникает глубокий научный и академический «пробел» между теоретическими моделями и современными информационными технологиями. В конечном итоге это приводит либо к фактическому игнорированию теоретических аспектов надежности современными специалистами по проектированию и эксплуатации локальных сетей предприятий, вынуждая их в основном полагаться на практический опыт и интуицию, либо к применению слишком упрощенных расчетных формул, дающих значительно завышенные значения коэффициента готовности.

В последние годы авторами был проведен ряд исследований в области надежности современных систем хранения, передачи и обработки данных [5–7]. С учетом практического опыта внедрения отказоустойчивой маршрутизации в сетях предприятий авторами была поставлена научная задача разработки математической модели и выведения аналитической формулы для расчета коэффициента готовности отказоустойчивой маршрутизации с двумя провайдерами.

Особый упор был сделан на выведение аналитической формулы так, чтобы она легко могла применяться специалистами, не требуя специальных знаний в области математики, математического моделирования или математического программного обеспечения.

В статье рассматривается математическая модель отказоустойчивой маршрутизации с двумя провайдерами, и выведенная итоговая аналитическая формула для расчета коэффициента готовности. Также приведен пример расчета коэффициента готовности для различных вариантов политик маршрутизации и рассмотрены особенности практической реализации отказоустойчивой маршрутизации на примере маршрутизации с двумя провайдерами по схеме основной/резервный провайдер.

1. МАРШРУТИЗАЦИЯ С ОДНИМ ПРОВАЙДЕРОМ

При маршрутизации с одним провайдером, доступность ресурсов интернета для сети предприятия целиком зависит от работоспособности единственного провайдера (рис. 1).



Рис. 1. Маршрутизация с одним провайдером

С точки зрения модели надежности провайдера упрощенно можно рассматривать как восстанавливаемый элемент: он может отказываться с некоторой интенсивностью λ и восстанавливаться с некоторой интенсивностью μ . Однако, в такой модели не учитывается крайне важный момент – в реальных сетях передачи данных при отказах коммутационного оборудования или каналов связи переключение на другие, если таковые имеются, происходит не сразу, и требуется определенное время конвергенции протоколов и таблиц коммутации. Аналогично, при восстановлении коммутационного оборудования или каналов связи также требуется время конвергенции, если они назначены в качестве основных (приоритетных) или являются единственными доступными.

Введем понятие **активации** – процедуры перехода работоспособного провайдера из пас-

сивного (незадействованного) состояния с точки зрения сети конкретного предприятия в **активное** (задействованное) состояние. Соответственно, также введем дополнительный параметр для модели надежности – **интенсивность активации** и будем его обозначать символом γ .

Следует особо отметить, что понятие «активный» недопустимо путать с понятием из теории надежности «нагруженный». К провайдеру обычно подключено множество потребителей услуг интернет, он может быть нагруженным в целом, но при этом пассивным с точки зрения сети конкретного предприятия. По этой же причине мы упрощенно будем считать, что интенсивность отказов работоспособного провайдера не зависит от того, является ли он активным или пассивным с точки зрения сети конкретного предприятия.

Тогда с учетом всего сказанного можно рассмотреть следующую упрощенную модель (рис. 2) надежности маршрутизации с одним провайдером, используя марковскую модель с тремя состояниями: 0 – провайдер работоспособен и пассивен с точки зрения сети конкретного предприятия, 1 – неработоспособен, 2 – работоспособен и активен. Провайдер из работоспособного активного или пассивного состояния отказывается и переходит в неработоспособное состояние с интенсивностью λ , восстанавливается и переходит в работоспособное пассивное состояние с интенсивностью μ , и, наконец, с интенсивностью γ переходит из пассивного работоспособного состояния в активное состояние, в котором пользователям сети конкретного предприятия фактически уже доступны ресурсы интернет.

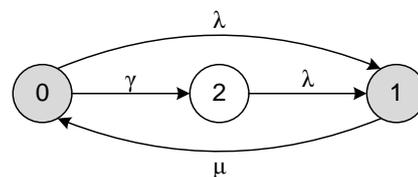


Рис. 2. Марковская модель надежности маршрутизации с одним провайдером

Тогда математическая модель (система уравнений Колмогорова–Чепмена):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(0) = 1; \quad P_1(0) = 0; \quad P_2(0) = 0; \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1; \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \gamma)P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) + \lambda P_2(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \gamma P_0(t) - \lambda P_2(t). \end{array} \right.$$

Решая систему, получаем функции вероятностей для всех состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(t) = \frac{\mu\lambda}{(\lambda + \mu)(\lambda + \gamma)} \left(1 + \frac{\gamma}{\lambda} e^{-(\lambda + \gamma)t} \right) + \\ + \frac{\mu\lambda}{(\lambda + \mu)(\mu - \gamma)} \left(e^{-(\lambda + \mu)t} - \frac{\gamma}{\mu} e^{-(\lambda + \gamma)t} \right); \\ P_1(t) = \frac{\lambda(1 - e^{-(\lambda + \mu)t})}{(\lambda + \mu)}; \\ P_2(t) = \frac{\mu\gamma(1 - e^{-(\lambda + \gamma)t})}{(\lambda + \mu)(\lambda + \gamma)} - \\ - \frac{\lambda\gamma(e^{-(\lambda + \mu)t} - e^{-(\lambda + \gamma)t})}{(\lambda + \mu)(\mu - \gamma)}. \end{array} \right.$$

При $t \rightarrow \infty$ марковский процесс становится установившимся, и вероятности уже не меняются с течением времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(\infty) = \frac{\mu\lambda}{(\lambda + \mu)(\lambda + \gamma)}; \\ P_1(\infty) = \frac{\lambda}{(\lambda + \mu)}; \\ P_2(\infty) = \frac{\mu\gamma}{(\lambda + \mu)(\lambda + \gamma)}. \end{array} \right.$$

Соответственно, стационарный коэффициент готовности, с учетом того, что нас интересует работоспособное активное состояние:

$$K_{\text{net}} = P_2(\infty) = \frac{\mu\gamma}{(\lambda + \mu)(\lambda + \gamma)}. \quad (1)$$

Предельный случай 1. При $\gamma = 0$ коэффициент готовности $K_{\text{ISP}} = 0$.

Предельный случай 2. При $\gamma \rightarrow \infty$ коэффициент готовности

$$K_{\text{net}} = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)}. \quad (2)$$

Пример. Предприятие подключено к единственному провайдеру. Интенсивность отказов

$\lambda = 1/1440$ (отказы в среднем раз в два месяца), интенсивность восстановления $\mu = 1$ (восстановление в среднем в течение одного часа) и интенсивность активации $\gamma = 20$ (активация в среднем в течение трех минут). Рассчитать коэффициент готовности.

Решение. По формуле 1 имеем $K_{\text{net}} \approx 0,999271$. Заметим, что если бы мы проигнорировали время, требуемое на активацию, приняв $\gamma \rightarrow \infty$, то по формуле 2 получили завышенное значение коэффициента готовности $K_{\text{net}} \approx 0,999306$.

2. ОТКАЗОУСТОЙЧИВАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ С ДВУМЯ ПРОВАЙДЕРАМИ

В случае отказоустойчивой маршрутизации сети предприятия с двумя провайдерами (рис. 3) модель надежности существенно усложняется, поскольку каждый из провайдеров может находиться в одном из трех состояний (неработоспособен, работоспособен и пассивен, работоспособен и активен) с точки зрения сети предприятия. Соответственно, общее количество состояний возрастает до девяти, тем более, что интенсивности отказов, восстановления и активации у них могут быть различными: $\lambda_1, \mu_1, \gamma_1$ и $\lambda_2, \mu_2, \gamma_2$.

Кроме того, сеть предприятия может реализовывать различные политики отказоустойчивой маршрутизации: одновременное использование обоих провайдеров с распределением сетевого трафика между ними или использование одного провайдера в качестве основного (активного), а другого – в качестве резервного (пассивного) провайдера.

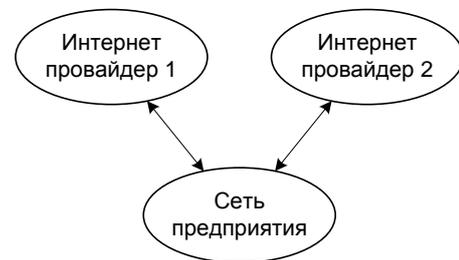


Рис. 3. Схема отказоустойчивой маршрутизации с двумя провайдерами.

Введем следующее множество состояний:

- Состояние 0 – оба провайдера работоспособны и оба пассивны с точки зрения сети предприятия, и сеть реконфигурируется для активации одного из провайдеров.

• Состояние 1 – первый провайдер неработоспособен, второй – работоспособен, и сеть предприятия реконфигурируется для его активации в качестве основного провайдера.

• Состояние 2 – второй провайдер неработоспособен, первый – работоспособен, и сеть предприятия реконфигурируется для его активации в качестве основного провайдера.

• Состояние 3 – первый провайдер неработоспособен, второй – работоспособен, и сеть предприятия активно использует его в качестве основного провайдера.

• Состояние 4 – второй провайдер неработоспособен, первый – работоспособен, и сеть предприятия активно использует его в качестве основного провайдера.

• Состояние 5 – оба провайдера работоспособны, но сеть предприятия активно использует второй провайдер в качестве основного в силу того, что второй является приоритетным провайдером, либо приоритетным является первый, но его активация после восстановления еще не завершена, либо должны использоваться оба провайдера с распределением трафика, но активация первого провайдера еще не завершена.

• Состояние 6 – оба провайдера работоспособны, но сеть предприятия активно использует первый провайдер в качестве основного в силу того, что первый является приоритетным провайдером, либо приоритетным является второй, но его активация после восстановления еще не завершена, либо должны использоваться оба провайдера с распределением трафика, но активация второго провайдера еще не завершена.

• Состояние 7 – оба провайдера неработоспособны.

• Состояние 8 – оба провайдера работоспособны, и в силу политики маршрутизации оба активно используются. Но следует отметить, что они не обслуживают одновременно один и тот же трафик, а используют распределение трафика между провайдерами. Часть сетевого трафика (части пользователей предприятия) проходит через один провайдер, а другая часть – через другой провайдер. По этой же причине при отказе одного из провайдеров часть пользователей теряет доступ в интернет, и в этом случае требуется дополнительная перестройка сети – активация оставшегося провайдера.

Также введем три булевых параметра, определяющих политики маршрутизации:

• Параметр β . Если $\beta = 1$, то назначается режим одновременного использования обоих провайдеров (active/active) с распределением трафика между ними (load balancing). Если

$\beta = 0$, то назначается режим основной/резервный (active/passive), один провайдер должен быть в качестве основного, а другой – в качестве резервного.

• Параметр α_1 . Если равен $\alpha_1 = 1$, то приоритетным является первый провайдер, и он всегда выбирается основным при работоспособности обоих провайдеров.

• Параметр α_2 . Если равен $\alpha_2 = 1$, то приоритетным является второй провайдер, и он всегда выбирается основным при работоспособности обоих провайдеров.

Тогда с учетом всего вышесказанного предлагается следующая марковская модель надежности отказоустойчивой маршрутизации с двумя провайдерами (рис. 4).

Тогда математическая модель (система уравнений Колмогорова–Чепмена):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(0) = 1; \quad P_1(0) = 0; \quad \dots \quad P_8(0) = 0; \\ P_0(t) + \dots + P_8(t) = 1; \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)P_0(t) + \mu_1 P_1(t) + \mu_2 P_2(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)P_1(t) + \lambda_1 P_6(t) + \lambda_1 P_8(t) + \mu_2 P_7(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_0(t) - (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)P_2(t) + \lambda_2 P_5(t) + \lambda_2 P_8(t) + \mu_1 P_7(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \gamma_2 P_1(t) - (\mu_1 + \lambda_2)P_3(t) + \lambda_1 P_5(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \gamma_1 P_2(t) - (\mu_2 + \lambda_1)P_4(t) + \lambda_2 P_6(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \gamma_2 P_0(t) + \mu_1 P_3(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_1 + \alpha_1\gamma_1)P_5(t) + \alpha_2\gamma_2 P_6(t); \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \gamma_1 P_0(t) + \mu_2 P_4(t) - (\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_2 + \alpha_2\gamma_2)P_6(t) + \alpha_1\gamma_1 P_5(t); \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) + \lambda_1 P_2(t) + \lambda_2 P_3(t) + \lambda_1 P_4(t) - (\mu_1 + \mu_2)P_7(t); \\ \frac{dP_8(t)}{dt} = \beta\gamma_1 P_5(t) + \beta\gamma_2 P_6(t) - (\lambda_1 + \lambda_2)P_8(t). \end{array} \right.$$

Всего возможно пять режимов отказоустойчивой маршрутизации, и математическая модель охватывает всех их:

• $\beta = 1$: активное использование обоих провайдеров с некоторым распределением тра-

фика, значения параметров α_1 и α_2 в этом случае неважно.

- $\beta = 0, \alpha_1 = 0, \alpha_2 = 0$: активное использование одного из провайдеров, причем без приоритетного вытеснения роли активного. Если, например, первый провайдер был основным, а затем в силу отказа первого провайдера основным стал второй, то после восстановления первого провайдера, второй так и останется основным.

- $\beta = 0, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$: активное использование одного из провайдеров, причем приоритетным является первый провайдер, и в случае работоспособности обоих провайдеров первый провайдер всегда забирает роль основного себе.

- $\beta = 0, \alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$: активное использование одного из провайдеров, причем приоритетным является второй провайдер, и в случае работоспособности обоих провайдеров второй провайдер всегда забирает роль основного себе.

- $\beta = 0, \alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1$: активное использование одного из провайдеров, и оба являются приоритетными. Это вызывает конфликт, поэтому такой режим нежелателен.

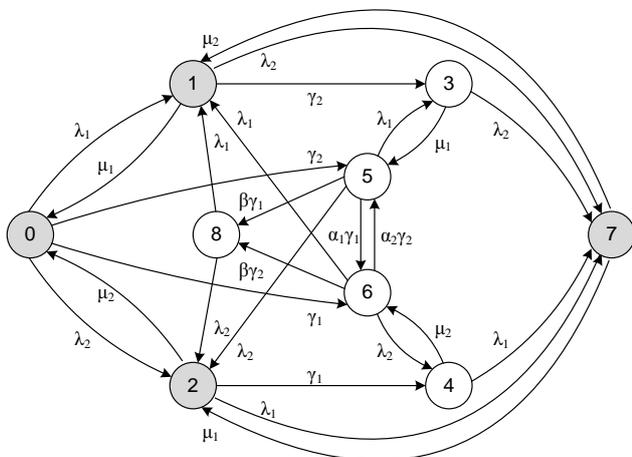


Рис. 4. Марковская модель надежности маршрутизации с двумя провайдерами

В общем случае значения вероятностей для заданного момента времени $t \geq 0$ можно найти, решив систему дифференциальных уравнений численными методами. Мы же ограничимся выводом аналитического решения для стационарного случая при $t \rightarrow \infty$, когда марковский процесс становится установившимся, вероятности уже не меняются с течением времени и, соответственно, производные вероятностей по времени стремятся к нулю. В стационарном случае

мы имеем систему линейных алгебраических уравнений с нулевыми левыми частями.

Существенное упрощение при решении системы дает следующий подход: сложим 0-е, 5-е, 6-е и 8-е уравнение, сложим 1-е и 3-е уравнение, сложим 2-е и 4-е уравнение, а 7-е уравнение оставим неизменным. После этого введем следующие обозначения:

$$\begin{cases} Z_0 = P_0 + P_5 + P_6 + P_8; \\ Z_1 = P_1 + P_3; \\ Z_2 = P_2 + P_4; \\ Z_7 = P_7. \end{cases}$$

Тогда, получаем следующую в итоге систему уравнений:

$$\begin{cases} Z_0 + Z_1 + Z_2 + Z_7 = 1; \\ 0 = -(\lambda_1 + \lambda_2)Z_0 + \mu_1 Z_1 + \mu_2 Z_2; \\ 0 = \lambda_1 Z_0 - (\mu_1 + \lambda_2)Z_1 + \mu_2 Z_7; \\ 0 = \lambda_2 Z_0 - (\mu_2 + \lambda_1)Z_2 + \mu_1 Z_7; \\ 0 = \lambda_2 Z_1 + \lambda_1 Z_2 - (\mu_1 + \mu_2)Z_7. \end{cases}$$

Данная система легко решается:

$$\begin{cases} Z_0 = \frac{\mu_1 \mu_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)}; \\ Z_1 = \frac{\lambda_1 \mu_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)}; \\ Z_2 = \frac{\mu_1 \lambda_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)}; \\ Z_7 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)}. \end{cases}$$

Далее, введя следующие обозначения $P_3 = Z_1 K_3$ и $P_4 = Z_2 K_4$, и, соответственно, $P_1 = Z_1(1 - K_3)$ и $P_2 = Z_2(1 - K_4)$, а также выражая из 0-го уравнения

$$P_0 = \frac{\mu_1 P_1 + \mu_2 P_2}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)}$$

исходной системы уравнения, из 3-го уравнения

$$P_5 = \frac{(\mu_1 + \lambda_2)P_3 - \gamma_2 P_1}{\lambda_1},$$

из 4-го уравнения

$$P_6 = \frac{(\mu_2 + \lambda_1)P_4 - \gamma_1 P_2}{\lambda_2},$$

и подставляя их в 5-е и

6-е уравнение, получаем систему из двух уравнений с двумя неизвестными K_3 и K_4 . Решив систему, получаем решение в виде дробей вида $K_3 = M_3/D$ и $K_4 = M_4/D$.

Здесь коэффициенты M_3 , M_4 и D определяются по следующим формулам:

$$M_3 = (\lambda_2(\lambda_1 + \gamma_1) + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2)) \times \\ \times (\mu_1\lambda_1\gamma_2 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)\gamma_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \\ + \alpha_1\gamma_1 + \beta\gamma_1)) + \alpha_2\gamma_2(\mu_1\lambda_2\gamma_1(\lambda_1 + \lambda_2) + \\ + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\mu_1(\lambda_1 + \lambda_2)(\gamma_1 + \gamma_2) + \\ + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)\gamma_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_1))) + \\ + \mu_2\lambda_2\gamma_2(\alpha_1\gamma_1(\gamma_1 + \gamma_2) + \gamma_1(\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_1)) + \\ + \mu_1\lambda_2\gamma_2(\lambda_1\lambda_2 + (\mu_2 + \lambda_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2));$$

$$M_4 = (\lambda_1(\lambda_2 + \gamma_2) + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\lambda_2 + \beta\gamma_1)) \times \\ \times (\mu_2\lambda_2\gamma_1 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)\gamma_1(\lambda_1 + \lambda_2 + \\ + \alpha_2\gamma_2 + \beta\gamma_2)) + \alpha_1\gamma_1(\mu_2\lambda_1\gamma_2(\lambda_1 + \lambda_2) + \\ + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2)(\gamma_1 + \gamma_2) + \\ + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)\gamma_1(\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_2))) + \\ + \mu_1\lambda_1\gamma_1(\alpha_2\gamma_2(\gamma_1 + \gamma_2) + \gamma_2(\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_2)) + \\ + \mu_2\lambda_1\gamma_1(\lambda_1\lambda_2 + (\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_2 + \beta\gamma_1));$$

$$D = (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)(\lambda_1(\lambda_2 + \gamma_2) + \\ + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\lambda_2 + \beta\gamma_1))(\lambda_2(\lambda_1 + \gamma_1) + \\ + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2)) + (\mu_1\lambda_1\gamma_2 + \\ + \alpha_1\gamma_1(\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)) \times \\ \times (\lambda_2(\lambda_1 + \gamma_1) + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2)) + \\ + (\mu_2\lambda_2\gamma_1 + \alpha_2\gamma_2(\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \lambda_2 + \\ + \gamma_1 + \gamma_2))(\lambda_1(\lambda_2 + \gamma_2) + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2) \times \\ \times (\lambda_2 + \beta\gamma_1)) + (\gamma_1 + \gamma_2)(\alpha_1\gamma_1(\mu_1 + \lambda_2 + \\ + \gamma_2)\mu_2\lambda_2 + \alpha_2\gamma_2(\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)\mu_1\lambda_1).$$

Соответственно, вероятности всех состояний вычисляются по формулам:

$$P_0 = Z_0 \left(\frac{\lambda_1(1 - M_3/D) + \lambda_2(1 - M_4/D)}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)} \right); \\ P_1 = Z_1(1 - M_3/D); \quad P_3 = Z_1(M_3/D); \\ P_2 = Z_2(1 - M_4/D); \quad P_4 = Z_2(M_4/D); \\ P_5 = \frac{Z_0}{\mu_1} ((\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(M_3/D) - \gamma_2); \\ P_6 = \frac{Z_0}{\mu_2} ((\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(M_4/D) - \gamma_1); \\ P_7 = Z_7; \quad P_8 = Z_0 - P_0 - P_5 - P_6.$$

Наконец, коэффициент готовности, учитывая то, что нас интересуют состояния, при котором один или оба провайдера работоспособны и активны, вычисляется по формуле:

$$K_{net} = P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_8 = \\ = Z_0 \left(\frac{\lambda_1(M_3/D) + \lambda_2(M_4/D) + \gamma_1 + \gamma_2}{(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)} \right) + \\ + Z_1(M_3/D) + Z_2(M_4/D).$$

Подставляя полученные выше выражения для Z_0 , Z_1 и Z_2 , окончательно получаем:

$$K_{net} = P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_8 = \\ = \frac{\mu_1\mu_2(\gamma_1 + \gamma_2)}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)} + \\ + \frac{\lambda_1\mu_2(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)(M_3/D)}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)} + \\ + \frac{\lambda_2\mu_1(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)(M_4/D)}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (3)$$

Предельный случай 1. При $\gamma_1 = 0$ и $\gamma_2 = 0$ дроби $M_3/D = 0$ и $M_4/D = 0$, тогда, соответственно, коэффициент готовности $K_{SYS} = 0$.

Предельный случай 2. При $\gamma_1 \rightarrow \infty$ и $\gamma_2 \rightarrow \infty$ дроби $M_3/D \rightarrow 1$ и $M_4/D \rightarrow 1$, и тогда, коэффициент готовности:

$$K_{net} = \frac{\mu_1\mu_2 + \lambda_1\mu_2 + \lambda_2\mu_1}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)}. \quad (4)$$

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ

Предприятие подключено к двум провайдерам. Интенсивность отказов первого провайдера $\lambda_1 = 1/1440$ (отказы в среднем раз в два месяца), интенсивность восстановления $\mu_1 = 1$ (восстановление в среднем в течение одного часа) и интенсивность активации $\gamma_1 = 20$ (активация в среднем в течение трех минут). Интенсивность отказов второго провайдера $\lambda_2 = 1/1800$ (отказы в среднем раз в два с половиной месяца), интенсивность восстановления $\mu_2 = 2$ (восстановление в среднем в течение получаса) и интенсивность активации $\gamma_2 = 20$ (активация в среднем в течение трех минут). Рассчитать коэффициенты готовности при различных политиках маршрутизации.

По формуле 3 для различных вариантов политик маршрутизации имеем:

- В режиме распределения трафика между двумя провайдерами, $\beta = 1$:

$$K_{net} \approx 0,999939431 .$$

- В режиме основной/резервный провайдер без приоритетов, $\beta = 0$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 0$:

$$K_{\text{net}} \approx 0,9999700545 .$$

- В режиме основной/резервный с приоритетным первым, $\beta = 0$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 0$:

$$K_{\text{net}} \approx 0,9999659179 .$$

- В режиме основной/резервный с приоритетным вторым, $\beta = 0$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_2 = 1$:

$$K_{\text{net}} \approx 0,9999732905 .$$

- В режиме основной/резервный с конфликтом приоритетов, $\beta = 0$, $\alpha_1 = 1$, $\alpha_2 = 1$:

$$K_{\text{net}} \approx 0,9999696042 .$$

Очевидно, что наибольшее значение коэффициента готовности достигается в режиме основной/резервный с приоритетным вторым провайдером: $K_{\text{net}} \approx 0,9999732905$. Рассчитанный коэффициент готовности соответствует среднему времени недоступности интернета в год: ~ 14 минут.

Также заметим, что если бы мы проигнорировали время, требуемое на активацию, приняв $\gamma_1 \rightarrow \infty$ и $\gamma_2 \rightarrow \infty$, то по формуле 4 получили бы значительно завышенный коэффициент готовности $K_{\text{net}} \approx 0,999998073$, который соответствует среднему времени недоступности интернета в год: ~ 6 секунд.

Таким образом, выведенная формула позволяет получать более реалистичные оценки коэффициента готовности с учетом времени активации провайдеров и особенностей политик отказоустойчивой маршрутизации.

4. ОСОБЕННОСТИ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ МАРШРУТИЗАЦИИ С ДВУМЯ ПРОВАЙДЕРАМИ ПО СХЕМЕ ОСНОВНОЙ/РЕЗЕРВНЫЙ ПРОВАЙДЕР

В современном мире основным протоколом маршрутизации в глобальной сети Интернет является протокол пограничного шлюза BGP (border gateway protocol), позволяющий реализовывать самые гибкие и сложные схемы маршрутизации между провайдерами, а также провайдерами и конечными потребителями ресурсов интернет [1]. С точки зрения протокола сети провайдеров и конечных потребителей рассматриваются как автономные системы AS (autonomous system), закрепленные за одним или несколькими юридическими лицами, и реализующие свою самостоятельную политику маршрутизации. Политики реализуются при помощи множества правил фильтрации входящей и ис-

ходящей маршрутной информации, выстраивания оптимальных путей для входящего и исходящего трафика и других механизмов протокола BGP. Также следует отметить, что конкретный производитель сетевого оборудования и программного обеспечения предоставляет свой пользовательский интерфейс и набор функциональных возможностей для конфигурирования протокола BGP, и они описываются в специальной литературе [2].

В рамках статьи на конкретном примере (рис. 5) кратко рассмотрены особенности реализации маршрутизации с двумя провайдерами по схеме основной/резервный провайдер с приоритетом для основного, при использовании протокола маршрутизации BGP.

При маршрутизации с двумя провайдерами предприятие, являющееся конечным потребителем, для маршрутизации по протоколу BGP должен иметь собственный зарегистрированный номер AS, с которым связаны соответствующие зарегистрированные реальные IP-сети предприятия, выданные одним из провайдеров.

В целях экономии объемов маршрутной информации обоим провайдерам крайне желательно передавать один агрегированный (суммарный) BGP-маршрут, отражающий все IP-сети предприятия. Аналогично, поскольку в каждый конкретный момент времени предприятие использует только один из провайдеров, то сети предприятия нет смысла получать все BGP-маршруты (их более полумиллиона) интернета, и достаточно получать один единственный маршрут по умолчанию от каждого из провайдеров.

Поскольку предприятие является конечным потребителем и не выполняет функций провайдера, то должен быть запрещен транзит BGP-маршрутов и транзитный трафик.

Для обеспечения корректной схемы отказоустойчивой BGP-маршрутизации с одним основным и с другим резервным провайдером, крайне важно добиваться совпадения путей входящего и исходящего трафика, как при работе с основным, так и при работе с резервным провайдером. Одним из известных методов влияния на исходящий путь является задание различных уровней предпочтения в сети предприятия (local preference) для BGP-маршрутов, получаемых от провайдеров. Для маршрута, получаемого от основного провайдера, следует задать более высокий уровень предпочтения.

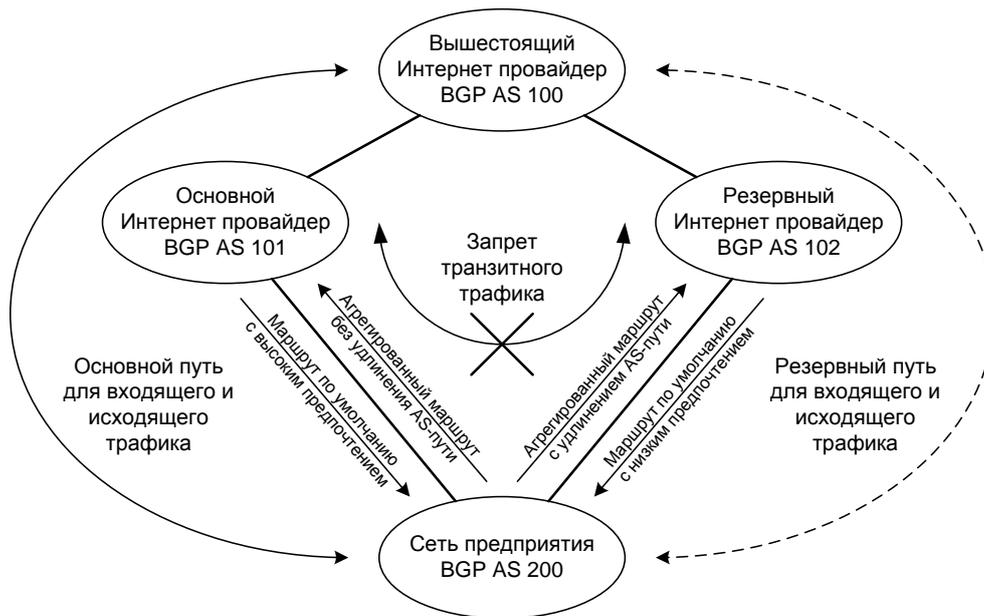


Рис. 5. Схема маршрутизации с двумя провайдерами с использованием протокола BGP

Что же касается, метода влияния на входящий путь, то здесь можно применить технологию удлинения AS-пути для агрегированного BGP-маршрута предприятия, передаваемого резервному провайдеру, и тем самым вынудить других провайдеров интернет выбирать более короткий путь до сети предприятия, лежащий через основного провайдера. Таким образом, обеспечивается отказоустойчивая маршрутизация по схеме основной/резервный провайдер при использовании протокола BGP.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена модель отказоустойчивой маршрутизации сети предприятия с двумя провайдерами с учетом времени реконфигурации сети при отказах и восстановлении провайдеров, и особенностей политик отказоустойчивой маршрутизации и аналитическая формула для расчета коэффициента готовности отказоустойчивой маршрутизации с двумя провайдерами.

Также приведен пример расчета коэффициента готовности для различных вариантов политик маршрутизации и рассмотрены особенности практической реализации отказоустойчивой маршрутизации на примере маршрутизации с двумя провайдерами по схеме основной / резервный провайдер.

Полученные теоретические результаты использовались авторами в многолетней практике эксплуатации, развития и проектирования сетей среднего масштаба НИУ МЭИ (ТУ), Балаков-

ской АЭС, ОАО «Красный Пролетарий» и ряда других предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Олифер В. Г., Олифер Н. А.** Компьютерные сети. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. [[V. G. Olifer and N. A. Olifer, *Computer Networks*, (in Russian). Saint-Petersburg: Piter, 2010.]]
2. **Halabi S., McPherson D.** Internet Routing Architectures. Cisco Press, 2000. [[Sam Halabi, Danny McPherson, *Internet Routing Architectures*, Cisco Press, 2000.]]
3. **Черкесов Г. Н.** Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб.: Питер, 2005. [[G. N. Cherkesov, *Reliability of Hardware and Software Systems*, (in Russian). Saint-Petersburg: Piter, 2005.]]
4. **Половко А. М., Гуров С. В.** Основы теории надежности. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. [[A. M. Polovko and S. V. Gurov, *Basis of Reliability Theory*, (in Russian). Saint-Petersburg: BHV-Petersburg, 2006.]]
5. **Каяшев А. И., Рахман П. А., Шарипов М. И.** Анализ показателей надежности избыточных дисковых массивов // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 2 (55). С. 163-170. [[A. I. Kayashev, P. A. Rahman, M. I. Sharipov, "Reliability analysis of redundant disk arrays," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 2 (55), pp. 163-170, 2013.]]
6. **Каяшев А. И., Рахман П. А., Шарипов М. И.** Анализ показателей надежности локальных компьютерных сетей // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 5 (58). С. 140-149. [[A. I. Kayashev, P. A. Rahman, M. I. Sharipov, "Reliability analysis of local area networks," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 5 (58), pp. 140-149, 2013.]]
7. **Каяшев А. И., Рахман П. А., Шарипов М. И.** Анализ показателей надежности двухуровневых магистральных сетей // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 197-207. [[A. I. Kayashev, P. A. Rahman, M. I. Sharipov, "Reliability analysis of two-level backbone networks," (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 18, no. 2 (63), pp. 197-207, 2014.]]

ОБ АВТОРАХ

РАХМАН Павел Азизурович, доц. каф. автоматизир. технол. и информ. систем. М-р техн. и технол. по информатике и выч. технике (МЭИ, 2000). Канд. техн. наук по телеком. системам и комп. сетям (МЭИ, 2005). Иссл. в обл. телекоммуникационных систем и компьютерных сетей.

КАЯШЕВ Александр Игнатьевич, проф., зав. каф. автоматизир. технол. и информ. систем. Дипл. инж. (Рязанск. радиотехн. ин-т, 1967). Д-р техн. наук (МГТУ «Станкин», 1996). Иссл. в обл. управления технол. объектами с распр. параметрами.

ШАРИПОВ Марсель Ильгизович, доц. каф. автоматизир. технол. и информ. систем. Дипл. инженер (УГНТУ, 2006). Канд. техн. наук (УГНТУ, 2010). Иссл. в обл. машин, агрегатов и процессов в нефтегазовой отрасли.

METADATA

Title: Reliability model of fault-tolerant border routing with two Internet service providers.

Authors: P. A. Rahman¹, A. I. Kayashev², M. I. Sharipov³.

Affiliation: Sterlitamak branch of Ufa State Petroleum Technological University, Russia.

E-mail: pavelar@yandex.ru¹, sharipovm@mail.ru³

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 262-270, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: Mathematical model of fault-tolerant border routing with two Internet Service Providers (ISP) and analytic formula for availability factor are discussed. An example of availability factor calculation for different routing policies and practical implementation of fault-tolerant routing for primary/backup ISP routing scheme are also observed.

Key words: border gateway protocol; availability factor.

About authors:

RAHMAN, Pavel Azizurovich, Associate professor (docent) of Automated Technological and Informational Systems Department, Sterlitamak branch of Ufa State Petroleum Technological University. M.Sc. in Computer Science (Moscow Power Engineering Institute, 2000), Ph.D. in Technical Sciences (Moscow Power Engineering Institute, 2005).

KAYASHEV, Alexander Ignatievich, Head of Automated Technological and Informational Systems Department, Sterlitamak branch of Ufa State Petroleum Technological University. Dr. of Tech. Sci. (Moscow State University of Technology «Stankin», 1996).

SHARIPOV, Marsel Ilgizovich, Associate professor (docent) of Automated Technological and Informational Systems Department, Sterlitamak branch of Ufa State Petroleum Technological University. Ph.D. in Technical Sciences (Ufa State Petroleum Technological University, 2010).