

# **МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ ПОГРАНИЧНОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ С ДВУМЯ ИНТЕРНЕТ-ПРОВАЙДЕРАМИ**

## **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.

Здесь 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 Интернет. 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 автором статьи был проведен ряд исследований в области надежности современных систем хранения, передачи и обработки данных [5, 6, 7]. С учетом практического опыта внедрения отказоустойчивой маршрутизации в сетях предприятий автором 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 и математического моделирования, или специализированного математического программного обеспечения.

В рамках данной статьи рассматривается предлагаемая автором 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).

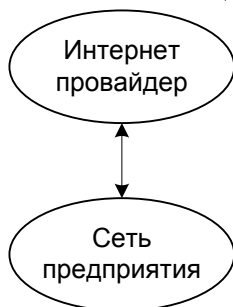


Рис. 1. Схема маршрутизации с одним провайдером.

С точки зрения модели надежности провайдера упрощенно можно рассматривать как восстанавливаемый элемент: он может отказывать с некоторой интенсивностью  $\lambda$  и восстанавливаться с некоторой интенсивностью  $\mu$ . 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 (синхронизации) 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.

Тогда с учетом вышесказанного введем понятие **активации** – процедуры перехода работоспособного провайдера из **пассивного** (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  $\gamma$ .

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 отказывает и переходит в неработоспособное состояние с интенсивностью  $\lambda$ , восстанавливается и переходит в работоспособное пассивное состояние с интенсивностью  $\mu$ , и, наконец, с интенсивностью  $\gamma$  переходит из пассивного работоспособного состояния в активное состояние, в котором пользователям сети конкретного предприятия фактически уже доступны ресурсы Интернет.

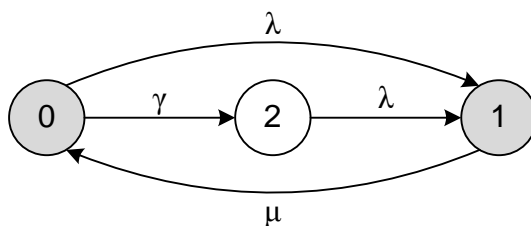


Рис. 2. Марковская модель надежности маршрутизации с одним провайдером.

Тогда математическая модель (система уравнений Колмогорова-Чепмена):

$$\begin{cases} P_0(0) = 1; & P_1(0) = 0; & P_2(0) = 0; \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1; \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \gamma)P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda P_0(t) - \mu P_1(t) + \lambda P_2(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \gamma P_0(t) - \lambda P_2(t); \end{cases}$$

Решая систему, получаем функции вероятностей:

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

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

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

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

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

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

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

$$K_{ISP} = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} \quad (2)$$

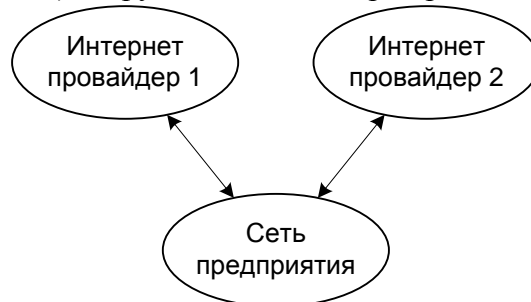
Пример. Предприятие подключено к единственному провайдеру. Интенсивность отказов  $\lambda = 1/1440$  (отказы в среднем раз в два месяца), интенсивность восстановления  $\mu = 1$  (восстановление в среднем в течение одного часа) и интенсивность активации  $\gamma = 20$  (активация в среднем в течение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

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

## 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.

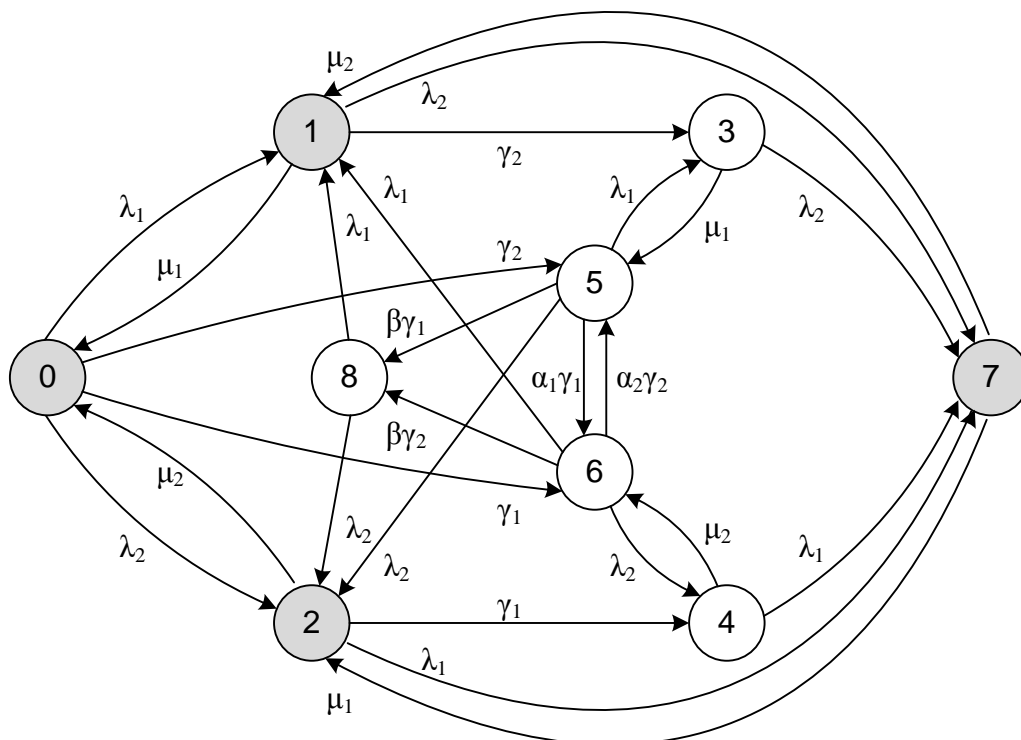
Также введем три булевых параметра, определяющих политики маршрутизации:

- Параметр  $\beta$ . 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  $\alpha_1$ . Если равен  $\alpha_1 = 1$ , то приоритетным является первый провайдер, и он всегда выбирается основным при работоспособности обоих провайдеров.
- Параметр  $\alpha_2$ . Если равен  $\alpha_2 = 1$ , то приоритетным является второй провайдер, и он всегда выбирается основным при работоспособности обоих провайдеров.

Тогда, очевидно, всего возможно пять режимов отказоустойчивой маршрутизации:

- $\beta = 1$ : активное использование обоих провайдеров с некоторым распределением трафика, значения параметров  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  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.

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



**Рис. 4.** Марковская модель надежности маршрутизации с двумя провайдерами.

Тогда математическая модель (система уравнений Колмогорова-Чепмена):

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

В общем случае значения вероятностей для заданного момента времени  $t \geq 0$  можно находить, решая 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. Однако, даже в этом случае имеется некоторая сложность с выводом аналитических формул для вероятностей.

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:

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

Тогда, получаем следующую в итоге систему уравнений:

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

Данная система достаточно 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  $K_4 = M_4/D$ .

Где, коэффициенты  $M_3$ ,  $M_4$  и  $D$  определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} D = & (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)(\lambda_1(\lambda_2 + \gamma_2) + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\lambda_2 + \beta\gamma_1))(\lambda_2(\lambda_1 + \gamma_1) + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2)) + \\ & + (\mu_1 \lambda_1 \gamma_2 + \alpha_1 \gamma_1 (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2))(\lambda_2(\lambda_1 + \gamma_1) + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2)) + \\ & + (\mu_2 \lambda_2 \gamma_1 + \alpha_2 \gamma_2 (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2))(\lambda_1(\lambda_2 + \gamma_2) + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\lambda_2 + \beta\gamma_1)) + \\ & + (\gamma_1 + \gamma_2)(\alpha_1 \gamma_1 (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2) \mu_2 \lambda_2 + \alpha_2 \gamma_2 (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1) \mu_1 \lambda_1); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_3 = & (\lambda_2(\lambda_1 + \gamma_1) + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2))(\mu_1 \lambda_1 \gamma_2 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2) \gamma_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_1 \gamma_1 + \beta\gamma_1)) + \\ & + \alpha_2 \gamma_2 (\mu_1 \lambda_2 \gamma_1 (\lambda_1 + \lambda_2) + (\mu_2 + \lambda_1 + \gamma_1)(\mu_1(\lambda_1 + \lambda_2)(\gamma_1 + \gamma_2) + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2) \gamma_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_1))) + \\ & + \mu_2 \lambda_2 \gamma_2 (\alpha_1 \gamma_1 (\gamma_1 + \gamma_2) + \gamma_1 (\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_1)) + \mu_1 \lambda_2 \gamma_2 (\lambda_1 \lambda_2 + (\mu_2 + \lambda_1)(\lambda_1 + \beta\gamma_2)); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_4 = & (\lambda_1(\lambda_2 + \gamma_2) + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\lambda_2 + \beta\gamma_1))(\mu_2 \lambda_2 \gamma_1 + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2) \gamma_1 (\lambda_1 + \lambda_2 + \alpha_2 \gamma_2 + \beta\gamma_2)) + \\ & + \alpha_1 \gamma_1 (\mu_2 \lambda_1 \gamma_2 (\lambda_1 + \lambda_2) + (\mu_1 + \lambda_2 + \gamma_2)(\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2)(\gamma_1 + \gamma_2) + (\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2) \gamma_1 (\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_2))) + \\ & + \mu_1 \lambda_1 \gamma_1 (\alpha_2 \gamma_2 (\gamma_1 + \gamma_2) + \gamma_2 (\lambda_1 + \lambda_2 + \beta\gamma_2)) + \mu_2 \lambda_1 \gamma_1 (\lambda_1 \lambda_2 + (\mu_1 + \lambda_2)(\lambda_2 + \beta\gamma_1)). \end{aligned}$$

Соответственно, вероятности вычисляются по формулам:

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

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

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

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

$$K_{SYS} = \frac{\mu_1\mu_2(\gamma_1 + \gamma_2) + \lambda_1\mu_2(\mu_1 + \lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)(M_3/D) + \lambda_2\mu_1(\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)(M_4/D)}{(\mu_1 + \lambda_1)(\mu_2 + \lambda_2)(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma_1 + \gamma_2)}. \quad (3)$$

Предельный случай 1. При  $\gamma_1 = 0$  и  $\gamma_2 = 0$  дроби  $M_3/D = 0$  и  $M_4/D = 0$ , и 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, соответственно, коэффициент готовности:

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

### 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,  $\beta = 1$ :

$$K_{SYS} \approx 0,999939431$$

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

$$K_{SYS} \approx 0,9999700545$$

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

$$K_{SYS} \approx 0,9999659179$$

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

$$K_{SYS} \approx 0,9999732905$$

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

$$K_{SYS} \approx 0,9999696042$$

Очевидно, что наибольшее значение коэффициента готовности достигается в режиме основной/резервный с приоритетным вторым провайдером:  $K_{SYS} \approx 0,9999732905$ .

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 завышенное значение коэффициента готовности  $K_{SYS} \approx 0,9999998073$ .

Таким образом, выведенная формула позволила получать более реалистичные оценки коэффициента готовности с учетом времени активации провайдеров и особенностей различных 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 исходящей 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 мы на конкретном примере (рис. 5) кратко рассмотрим особенности реализации маршрутизации с двумя провайдерами по схеме основной/резервный провайдер с приоритетом для основного, при использовании протокола маршрутизации BGP.

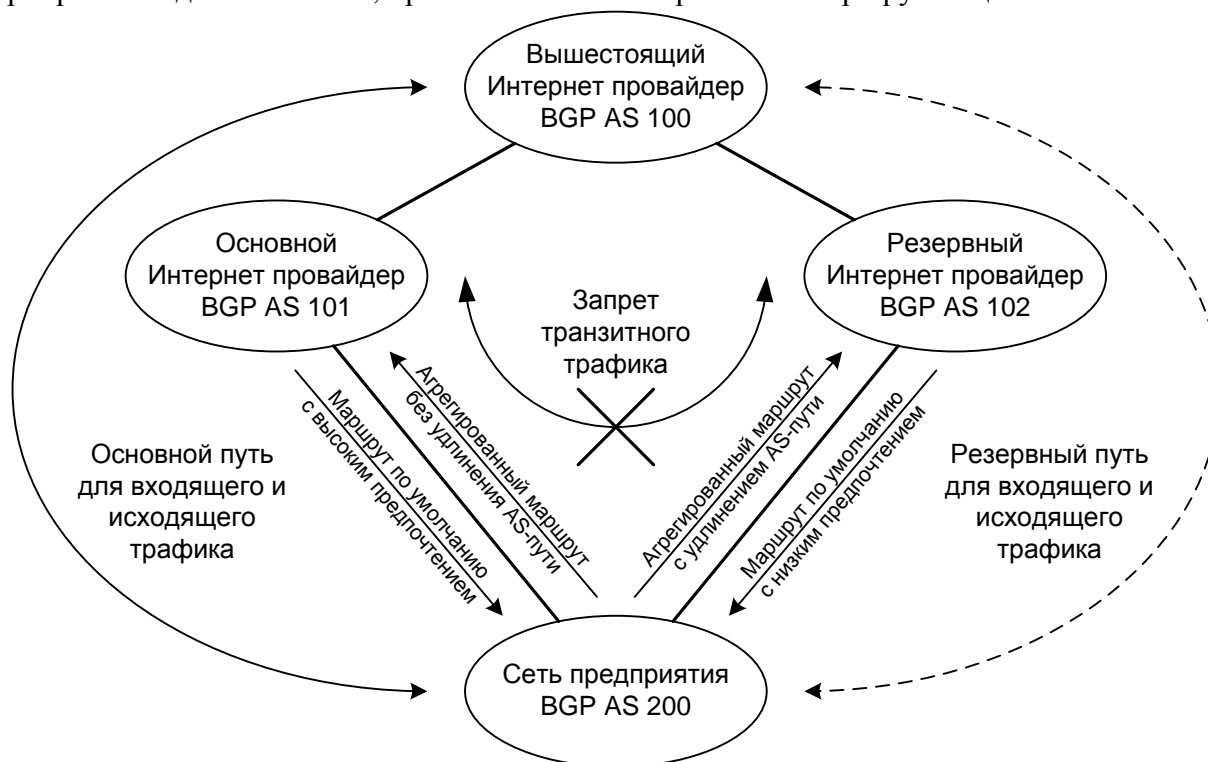


Рис. 5. Схема маршрутизации с двумя провайдерами с использованием протокола BGP.

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. 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

Таким образом, в рамках данной статьи рассмотрена модель отказоустойчивой маршрутизации сети предприятия с двумя провайдерами с учетом времени реконфигурации сети при отказах и восстановлении провайдеров, и особенностей политик отказоустойчивой маршрутизации. Выведена 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.

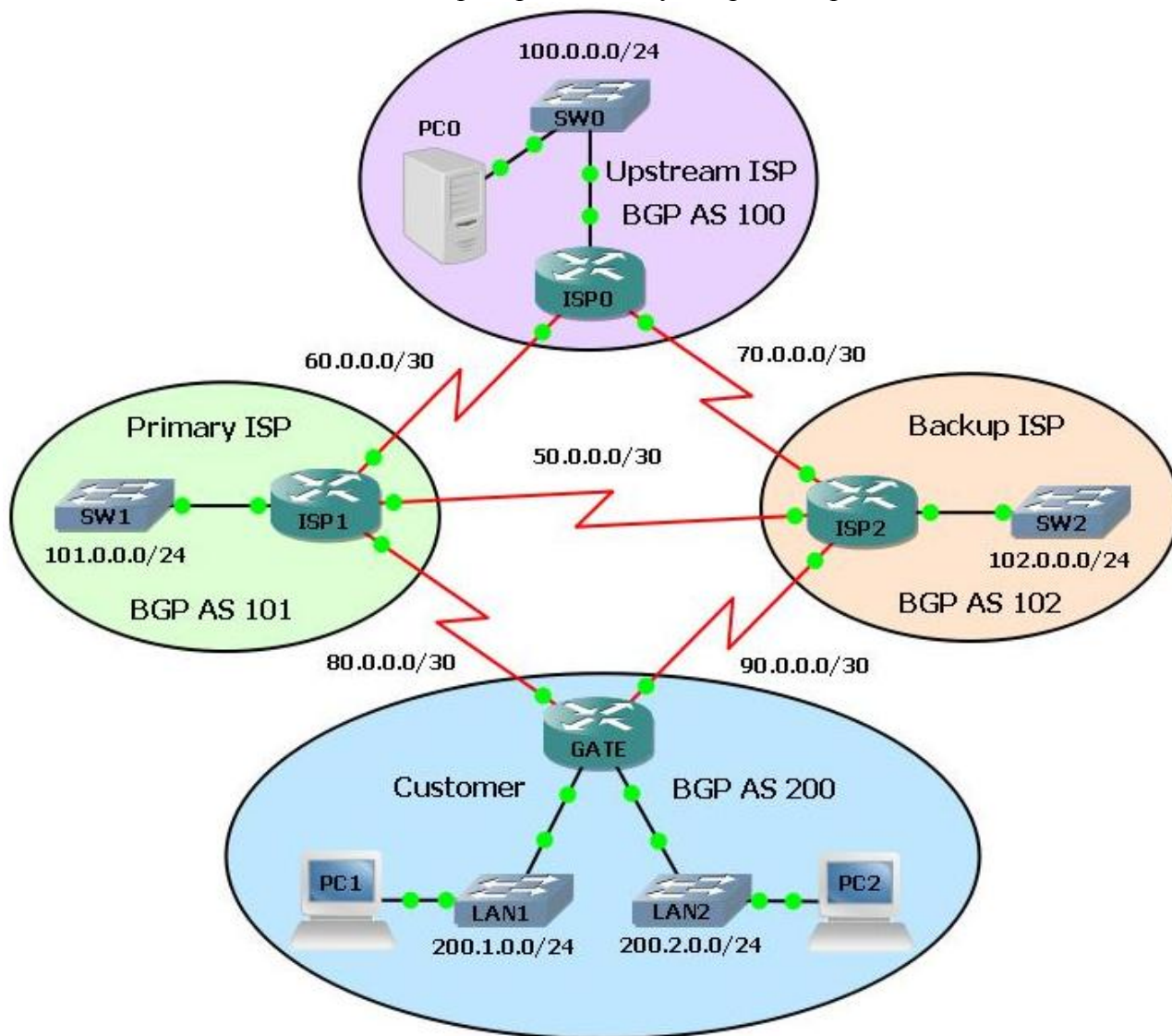
Полученные теоретические результаты использовались в многолетней практике эксплуатации, развития и проектирования сетей среднего масштаба НИУ МЭИ (ТУ), Балаковской АЭС, ОАО «Красный Пролетарий» и ряда других предприятий.

## 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. **Sam Halabi, Danny McPherson.** 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. ]

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ С ДВУМЯ ПРОВАЙДЕРАМИ В ГРАФИЧЕСКОМ ЭМУЛЯТОРЕ GNS3

Схема сети предприятия с двумя провайдерами



Исходный текст кода конфигурации маршрутизатора провайдера ISP0

```
!
version 12.4
service timestamps debug datetime msec
service timestamps log datetime msec
no service password-encryption
!
hostname ISP0
!
boot-start-marker
boot-end-marker
!
no aaa new-model
memory-size iomem 5
ip cef
!
no ip domain lookup
!
ip auth-proxy max-nodata-conns 3
ip admission max-nodata-conns 3
```

```
!  
multilink bundle-name authenticated  
!  
archive  
  log config  
  hidekeys  
!  
interface FastEthernet0/0  
  ip address 100.0.0.1 255.255.255.0  
  duplex auto  
  speed auto  
!  
interface Serial1/0  
  no ip address  
  shutdown  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/1  
  ip address 60.0.0.1 255.255.255.252  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/2  
  ip address 70.0.0.1 255.255.255.252  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/3  
  no ip address  
  shutdown  
  serial restart-delay 0  
!  
router bgp 100  
  no synchronization  
  bgp log-neighbor-changes  
  network 60.0.0.0 mask 255.255.255.252  
  network 70.0.0.0 mask 255.255.255.252  
  network 100.0.0.0 mask 255.255.255.0  
  redistribute connected  
  neighbor 60.0.0.2 remote-as 101  
  neighbor 60.0.0.2 prefix-list list1 out  
  neighbor 70.0.0.2 remote-as 102  
  neighbor 70.0.0.2 prefix-list list2 out  
  no auto-summary  
!  
ip forward-protocol nd  
!  
ip http server  
no ip http secure-server  
!  
ip prefix-list list1 seq 5 deny 60.0.0.0/30  
ip prefix-list list1 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32  
!  
ip prefix-list list2 seq 5 deny 70.0.0.0/30  
ip prefix-list list2 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32  
!  
control-plane  
!  
line con 0  
  exec-timeout 1440 0  
  logging synchronous  
line aux 0  
line vty 0 4  
  login  
!  
end
```

## Исходный текст кода конфигурации маршрутизатора провайдера ISP1

```
!  
version 12.4  
service timestamps debug datetime msec  
service timestamps log datetime msec  
no service password-encryption  
!  
hostname ISP1  
!  
boot-start-marker  
boot-end-marker  
!  
no aaa new-model  
memory-size iomem 5  
ip cef  
!  
no ip domain lookup  
ip auth-proxy max-nodata-conns 3  
ip admission max-nodata-conns 3  
!  
multilink bundle-name authenticated  
!  
archive  
  log config  
  hidekeys  
!  
interface FastEthernet0/0  
  ip address 101.0.0.1 255.255.255.0  
  duplex auto  
  speed auto  
!  
interface Serial1/0  
  ip address 60.0.0.2 255.255.255.252  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/1  
  ip address 50.0.0.1 255.255.255.252  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/2  
  ip address 80.0.0.1 255.255.255.252  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/3  
  no ip address  
  shutdown  
  serial restart-delay 0  
!  
router bgp 101  
  no synchronization  
  bgp log-neighbor-changes  
  network 50.0.0.0 mask 255.255.255.252  
  network 60.0.0.0 mask 255.255.255.252  
  network 80.0.0.0 mask 255.255.255.252  
  network 101.0.0.0 mask 255.255.255.0  
  redistribute connected  
  neighbor 50.0.0.2 remote-as 102  
  neighbor 50.0.0.2 prefix-list list0 out  
  neighbor 60.0.0.1 remote-as 100  
  neighbor 60.0.0.1 prefix-list list1 out  
  neighbor 80.0.0.2 remote-as 200  
  neighbor 80.0.0.2 default-originate  
  neighbor 80.0.0.2 prefix-list list2 out  
  no auto-summary
```

```

!
ip forward-protocol nd
!
ip http server
no ip http secure-server
!
ip prefix-list list0 seq 5 deny 50.0.0.0/30
ip prefix-list list0 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32
!
ip prefix-list list1 seq 5 deny 60.0.0.0/30
ip prefix-list list1 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32
!
ip prefix-list list2 seq 5 permit 0.0.0.0/0
!
control-plane
!
line con 0
  exec-timeout 1440 0
  logging synchronous
line aux 0
line vty 0 4
  login
!
end

```

### Исходный текст кода конфигурации маршрутизатора провайдера ISP2

```

!
version 12.4
service timestamps debug datetime msec
service timestamps log datetime msec
no service password-encryption
!
hostname ISP2
!
boot-start-marker
boot-end-marker
!
no aaa new-model
memory-size iomem 5
ip cef
!
no ip domain lookup
ip auth-proxy max-nodata-conns 3
ip admission max-nodata-conns 3
!
multilink bundle-name authenticated
!
archive
  log config
  hidekeys
!
interface FastEthernet0/0
  ip address 102.0.0.1 255.255.255.0
  duplex auto
  speed auto
!
interface Serial1/0
  ip address 70.0.0.2 255.255.255.252
  serial restart-delay 0
!

```

```
interface Serial1/1
 ip address 50.0.0.2 255.255.255.252
 serial restart-delay 0
!
interface Serial1/2
 ip address 90.0.0.1 255.255.255.252
 serial restart-delay 0
!
interface Serial1/3
 no ip address
 shutdown
 serial restart-delay 0
!
router bgp 102
 no synchronization
 bgp log-neighbor-changes
 network 50.0.0.0 mask 255.255.255.252
 network 70.0.0.0 mask 255.255.255.252
 network 90.0.0.0 mask 255.255.255.252
 network 102.0.0.0 mask 255.255.255.0
 redistribute connected
 neighbor 50.0.0.1 remote-as 101
 neighbor 50.0.0.1 prefix-list list0 out
 neighbor 70.0.0.1 remote-as 100
 neighbor 70.0.0.1 prefix-list list1 out
 neighbor 90.0.0.2 remote-as 200
 neighbor 90.0.0.2 default-originate
 neighbor 90.0.0.2 prefix-list list2 out
 no auto-summary
!
ip forward-protocol nd
!
ip http server
no ip http secure-server
!
ip prefix-list list0 seq 5 deny 50.0.0.0/30
ip prefix-list list0 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32
!
ip prefix-list list1 seq 5 deny 70.0.0.0/30
ip prefix-list list1 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32
!
ip prefix-list list2 seq 5 permit 0.0.0.0/0
!
control-plane
!
line con 0
 exec-timeout 1440 0
 logging synchronous
line aux 0
line vty 0 4
 login
!
end
```

## Исходный текст кода конфигурации маршрутизатора предприятия GATE

```
!  
version 12.4  
service timestamps debug datetime msec  
service timestamps log datetime msec  
no service password-encryption  
!  
hostname GATE  
!  
boot-start-marker  
boot-end-marker  
!  
no aaa new-model  
memory-size iomem 5  
ip cef  
!  
no ip domain lookup  
ip auth-proxy max-nodata-conns 3  
ip admission max-nodata-conns 3  
!  
multilink bundle-name authenticated  
!  
archive  
  log config  
  hidekeys  
!  
interface FastEthernet0/0  
  ip address 200.1.0.1 255.255.255.0  
  duplex auto  
  speed auto  
!  
interface FastEthernet0/1  
  ip address 200.2.0.1 255.255.255.0  
  duplex auto  
  speed auto  
!  
interface Serial1/0  
  no ip address  
  shutdown  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/1  
  ip address 80.0.0.2 255.255.255.252  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/2  
  ip address 90.0.0.2 255.255.255.252  
  serial restart-delay 0  
!  
interface Serial1/3  
  no ip address  
  shutdown  
  serial restart-delay 0  
!  
router bgp 200  
  no synchronization  
  bgp log-neighbor-changes  
  network 80.0.0.0 mask 255.255.255.252  
  network 90.0.0.0 mask 255.255.255.252  
  network 200.1.0.0  
  network 200.2.0.0  
  aggregate-address 200.0.0.0 255.252.0.0  
  redistribute connected
```



```
neighbor 80.0.0.1 remote-as 101
neighbor 80.0.0.1 route-map setlp1 in
neighbor 80.0.0.1 route-map summap1 out
neighbor 80.0.0.1 filter-list 1 out
neighbor 90.0.0.1 remote-as 102
neighbor 90.0.0.1 route-map setlp2 in
neighbor 90.0.0.1 route-map summap2 out
neighbor 90.0.0.1 filter-list 1 out
no auto-summary
!
ip forward-protocol nd
!
ip as-path access-list 1 permit ^$
!
ip http server
no ip http secure-server
!
ip prefix-list sumlist seq 5 permit 200.0.0.0/14
!
route-map summap2 permit 10
  match ip address prefix-list sumlist
  set as-path prepend 200 200
!
route-map summap1 permit 10
  match ip address prefix-list sumlist
!
route-map setlp2 permit 10
  set local-preference 80
!
route-map setlp1 permit 10
  set local-preference 90
!
control-plane
!
line con 0
  exec-timeout 1440 0
  logging synchronous
line aux 0
line vty 0 4
  login
!
end
```

## Тестирование сети при обоих работоспособных провайдерах

### Таблица BGP на маршрутизаторе Upstream-провайдера ISP0:

ISP0#sh ip bgp

	Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*	50.0.0.0/30	70.0.0.2	0		0	102 i
*>		60.0.0.2	0		0	101 i
*>	60.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*>	70.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*	80.0.0.0/30	70.0.0.2			0	102 101 i
*>		60.0.0.2	0		0	101 i
*	90.0.0.0/30	60.0.0.2			0	101 102 i
*>		70.0.0.2	0		0	102 i
*>	100.0.0.0/24	0.0.0.0	0		32768	i
*	101.0.0.0/24	70.0.0.2			0	102 101 i
*>		60.0.0.2	0		0	101 i
*	102.0.0.0/24	60.0.0.2			0	101 102 i
*>		70.0.0.2	0		0	102 i
*>	200.0.0.0/14	60.0.0.2			0	101 200 i
*		70.0.0.2			0	102 101 200 i

### Таблица BGP на пограничном маршрутизаторе предприятия GATE:

GATE#sh ip bgp

	Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*	0.0.0.0	90.0.0.1	0	80	0	102 i
*>		80.0.0.1	0	90	0	101 i
*>	80.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*>	90.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*>	200.0.0.0/14	0.0.0.0			32768	i
*>	200.1.0.0	0.0.0.0	0		32768	i
*>	200.2.0.0	0.0.0.0	0		32768	i

### Трассировка маршрута от сервера провайдера ISP0 до компьютера предприятия:

PC0>tracert 200.1.0.5

```
tracert to 200.1.0.5, 64 hops max
 1  100.0.0.1  63.000 ms  24.000 ms  37.000 ms
 2  60.0.0.2  115.000 ms  71.000 ms  93.000 ms
 3  80.0.0.2  120.000 ms  188.000 ms  103.000 ms
 4  200.1.0.5  147.000 ms  199.000 ms  163.000 ms
```

### Трассировка маршрута от компьютера предприятия до сервера провайдера ISP0:

PC1>tracert 100.0.0.5

```
tracert to 100.0.0.5, 64 hops max
 1  200.1.0.1  79.000 ms  49.000 ms  34.000 ms
 2  80.0.0.1  141.000 ms  85.000 ms  53.000 ms
 3  60.0.0.1  141.000 ms  139.000 ms  103.000 ms
 4  100.0.0.5  100.000 ms  112.000 ms  112.000 ms
```

## Тестирование сети при отказе основного провайдера ISP1

**Таблица BGP на маршрутизаторе Upstream-провайдера ISP0:**

```
ISP0#sh ip bgp
```

Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*> 70.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*> 90.0.0.0/30	70.0.0.2	0		0	102 i
*> 100.0.0.0/24	0.0.0.0	0		32768	i
*> 102.0.0.0/24	70.0.0.2	0		0	102 i
*> 200.0.0.0/14	70.0.0.2			0	102 200 200 200 i

**Таблица BGP на пограничном маршрутизаторе предприятия GATE:**

```
GATE#sh ip bgp
```

Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*> 0.0.0.0	90.0.0.1	0	80	0	102 i
*> 90.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*> 200.0.0.0/14	0.0.0.0			32768	i
*> 200.1.0.0	0.0.0.0	0		32768	i
*> 200.2.0.0	0.0.0.0	0		32768	i

**Трассировка маршрута от сервера провайдера ISP0 до компьютера предприятия:**

```
PC0>tracert 200.1.0.5
```

```
tracert to 200.1.0.5, 64 hops max
 1  100.0.0.1  36.000 ms  14.000 ms  29.000 ms
 2  70.0.0.2  107.000 ms  76.000 ms  55.000 ms
 3  90.0.0.2  168.000 ms  62.000 ms  66.000 ms
 4  200.1.0.5  101.000 ms  133.000 ms  96.000 ms
```

**Трассировка маршрута от компьютера предприятия до сервера провайдера ISP0:**

```
PC1>tracert 100.0.0.5
```

```
tracert to 100.0.0.5, 64 hops max
 1  200.1.0.1  60.000 ms  21.000 ms  27.000 ms
 2  90.0.0.1  120.000 ms  144.000 ms  131.000 ms
 3  70.0.0.1  143.000 ms  111.000 ms  89.000 ms
 4  100.0.0.5  116.000 ms  105.000 ms  139.000 ms
```

## Тестирование сети при отказе резервного провайдера ISP2

**Таблица BGP на маршрутизаторе Upstream-провайдера ISP0:**

```
ISP0#sh ip bgp
```

Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*> 60.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*> 80.0.0.0/30	60.0.0.2	0		0	101 i
*> 100.0.0.0/24	0.0.0.0	0		32768	i
*> 101.0.0.0/24	60.0.0.2	0		0	101 i
*> 200.0.0.0/14	60.0.0.2			0	101 200 i

**Таблица BGP на пограничном маршрутизаторе предприятия GATE:**

```
GATE#sh ip bgp
```

Network	Next Hop	Metric	LocPrf	Weight	Path
*> 0.0.0.0	80.0.0.1	0	90	0	101 i
*> 80.0.0.0/30	0.0.0.0	0		32768	i
*> 200.0.0.0/14	0.0.0.0			32768	i
*> 200.1.0.0	0.0.0.0	0		32768	i
*> 200.2.0.0	0.0.0.0	0		32768	i

**Трассировка маршрута от сервера провайдера ISP0 до компьютера предприятия:**

```
PC0>tracert 200.1.0.5
```

```
tracert to 200.1.0.5, 64 hops max
 1  100.0.0.1    51.000 ms  22.000 ms  15.000 ms
 2  60.0.0.2     102.000 ms  74.000 ms  45.000 ms
 3  80.0.0.2     182.000 ms  118.000 ms  79.000 ms
 4  200.1.0.5    150.000 ms  130.000 ms  110.000 ms
```

**Трассировка маршрута от компьютера предприятия до сервера провайдера ISP0:**

```
PC1>tracert 100.0.0.5
```

```
tracert to 100.0.0.5, 64 hops max
 1  200.1.0.1    37.000 ms  8.000 ms  26.000 ms
 2  80.0.0.1     89.000 ms  86.000 ms  47.000 ms
 3  60.0.0.1     131.000 ms  119.000 ms  63.000 ms
 4  100.0.0.5    100.000 ms  80.000 ms  79.000 ms
```