

МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ДВУХУЗЛОВОГО КЛАСТЕРА ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается бурное развитие информационных технологий и их внедрение в самые различные сферы деятельности человека. С информацией человек имеет дело ежедневно – создает, хранит и обрабатывает, передает ее, используя персональные компьютеры и мобильные устройства. На предприятиях используются специализированные системы хранения и обработки данных, на базе которых функционируют информационные системы, обеспечивающие те или иные бизнес-процессы предприятия.

Помимо таких технических характеристик систем хранения и обработки данных, как: производительность и время обработки запросов, емкость хранилищ, масштабируемость и безопасность, также крайне важными характеристиками являются показатели надежности, в частности, коэффициент готовности. От показателей надежности зависит доступность информационных систем для пользователей предприятия, а это косвенно также определяет безопасность и эффективность бизнес-процессов предприятия.

Особое место в современном мире занимают распределенные системы обработки и хранения данных [1], в частности, кластеры высокой готовности для систем управления базами данных [2], обеспечивающие отказоустойчивое хранение и обработку данных. Для таких систем важно знать их показатели надежности для оценки рисков для бизнес-процессов и степени снижения этих рисков за счет применения отказоустойчивых технологий. В такой ситуации разработка моделей надежности и анализ показателей надежности кластеров высокой готовности является достаточно актуальной задачей.

На сегодняшний день существует множество обобщенных моделей надежности и методов расчетов показателей надежности, изложенных в отечественной литературе [3, 4], и ряд упрощенных моделей для вычислительных систем и сетей, изложенных в зарубежной литературе [5, 6]. Однако эти модели, в основном базируются на модели восстанавливаемых элементов и не учитывают специфику кластеров высокой готовности, различную интенсивность отказов в различных режимах работы узлов, конечное время подключения резервного узла, особенности хранилищ данных и дисковых массивов. В такой ситуации возникает необходимость в разработке специализированной модели надежности кластера высокой готовности и выведении расчетных формул для показателей надежности.

В рамках одной статьи не было возможности рассмотреть всевозможные варианты построения кластеров и различные конфигурации построения хранилища данных, и автор ограничился рассмотрением типового отказоустойчивого кластера, состоящего из двух идентичных узлов, и дискового хранилища с одним RAID-массивом (избыточный массив недорогих дисков). Подобный кластер чаще всего применяется предприятиями в качестве программно-аппаратной платформы для систем управления базами данных, на базе которых функционируют информационные системы предприятия.

Автором рассмотрены модели надежности отдельного узла обработки данных с тремя состояниями (пассивное, активное и неработоспособное состояние), дублированной системы с двумя идентичными независимыми узлами и дублированной системы с одним основным и одним резервным узлом с учетом конечного времени подключения резерва, и различной интенсивности отказов в активном и пассивном режиме узлов. Также рассмотрена модель надежности внешнего хранилища данных с двухдисковым массивом RAID-1 на базе моделей полученных автором ранее [7]. Выведены формулы для расчета коэффициентов готовности.

Также приведен пример расчета коэффициента готовности отдельного узла с внешним хранилищем данных, дублированной системы с независимыми узлами, и дублированной системы с одним основным и одним резервным узлом с внешним хранилищем данных.

1. ОПИСАНИЕ ДВУХУЗЛОВОГО КЛАСТЕРА ВЫСОКОЙ ГОТОВНОСТИ

Кластер – множество компьютеров, связанных высокоскоростными каналами связи, функционирующих совместно как единая система. По существу кластер образуется из отдельных компьютеров, имеющих процессор, память (оперативную и дисковую), подсистему ввода / вывода, операционную систему и т.п. При объединении компьютеров чаще всего поддерживаются прямые межкомпьютерные коммуникации, осуществляемые посредством передачи сообщений. Коммуникации могут быть как на основе традиционных технологий локальных сетей Gigabit Ethernet, так и специализированных сетей, таких как Scalable Coherent Interface. Возможно также использование и нескольких независимых сетей. Компьютеры, входящие в состав кластера, принято называть узлами кластера. В общем случае в кластере могут применяться как однородные узлы, так и неоднородные узлы, хотя на сегодняшний день чаще встречаются кластеры, состоящие из однородных узлов.

По функциональному назначению различают два основных типа кластеров:

- Высокопроизводительные вычислительные кластеры, предназначенные для объединения мощностей вычислительных ресурсов узлов кластера.
- Кластеры высокой готовности, предназначенные для обеспечения высокой отказоустойчивости обслуживания запросов пользователей.

По способу организации дисковой подсистемы кластера также различают:

- Кластеры с разделяемыми дисками.
- Кластеры без разделяемых дисков.

Мы ограничимся рассмотрением кластера высокой готовности с двумя идентичными узлами, широко применяемого для построения отказоустойчивых СУБД на предприятиях.

В качестве узлов кластера, как правило, применяются высоконадежные серверные платформы (например, Hewlett-Packard Proliant DL380) с резервным блоком питания, 1-2 многоядерными процессорами, высокоскоростной оперативной памятью, с 2-4 сетевыми интерфейсами Gigabit Ethernet, со встроенными в системную плату контроллерами дисковых массивов и высоконадежным дисковым массивом для операционной системы. Кроме того, на узлы устанавливаются контроллеры для подключения внешних хранилищ данных или для подключения к сети хранения данных.

На обоих узлах устанавливается серверная операционная система (например, Microsoft Windows Server 2008 Enterprise Edition), программное обеспечение для кластеризации (например, Microsoft Cluster Services) и серверная часть системы управления базами данных (например, Microsoft SQL Server 2008).

Оба узла подключаются к локальной сети для обработки запросов пользователей к СУБД. Кроме того, для обмена сообщениями служб кластеризации и контроля состояния друг друга (heartbeat control) узлы также связываются внутренней служебной сетью. Подключение к локальной сети и служебная сеть в большинстве случаев базируются на основе технологии Gigabit Ethernet.

Для обеспечения непротиворечивости и целостности базы данных в кластерах высокой готовности, как правило, применяется общее хранилище данных (quorum storage), подключенное к обоим узлам, и в каждый момент времени только один из узлов имеет доступ к нему, и он считается активным (основным нагруженным) узлом. Другой узел находится в пассивном состоянии (горячем ненагруженном резерве). В хранилище данных размещаются базы данных и журналы транзакций. Что касается организации подсистемы хранения данных, здесь возможны следующие варианты:

- Одно хранилище данных с интерфейсом SCSI (системный интерфейс малых ЭВМ), подключаемое непосредственно к узлам кластера.
- Одно хранилище данных с интерфейсом Fiber Channel (оптоволоконный канал), подключаемое непосредственно к узлам кластера.
- Множество хранилищ данных, подключаемых через SAN (сеть хранения данных) с использованием Fiber Channel коммутаторов.

Хранилище данных само по себе является специализированной ЭВМ, имеющее множество интерфейсов для подключения жестких дисков и несколько интерфейсов для подключения к узлам кластера или сети хранения данных. Хранилище поддерживает различные технологии объединения дисков в массивы (например, RAID – избыточный массив недорогих дисков) и позволяет использовать множество массивов одновременно.

Мы ограничимся рассмотрением хранилища данных, подключаемого по интерфейсу Fiber Channel напрямую к узлам кластера, с одним RAID-массивом.

Ниже на рисунке 1 представлена типовая схема кластера высокой готовности с двумя узлами и общим дисковым хранилищем, подключенного напрямую к узлам кластера.

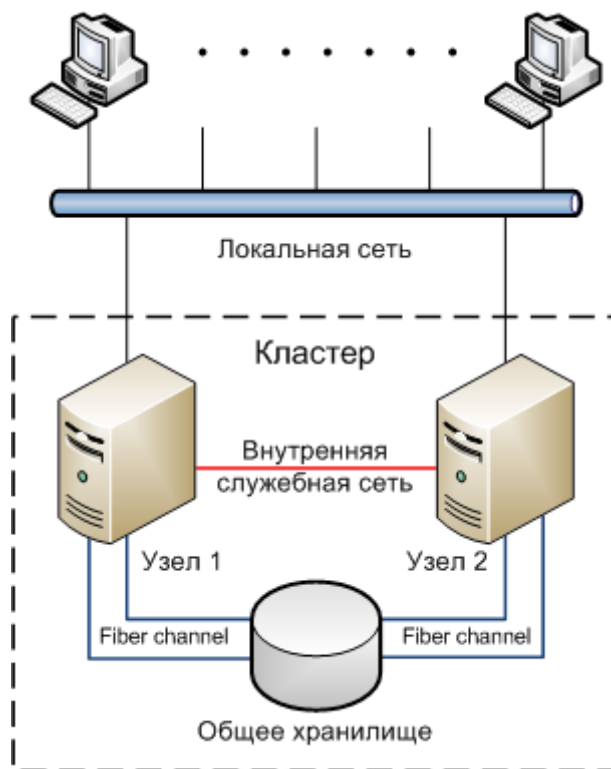


Рис. 1. Структурная схема кластера высокой готовности с двумя узлами.

Для построения математической модели надежности кластера будем использовать математический аппарат цепей Маркова, позволяющий моделировать достаточно сложные системы с учетом специфических условий: различные интенсивности отказов в различных режимах работы узлов, конечное время перехода в активный режим обслуживания запросов пользователей, дублирование функции обслуживания или горячее резервирование и т.п.

С целью упрощения разработки модели надежности будем исследовать подсистему узлов обработки данных и подсистему хранения данных по отдельности, считая их независимыми с точки зрения надежности. Тогда, соответственно, коэффициент готовности системы хранения и обработки данных можно будет рассчитывать как произведение коэффициентов готовности подсистемы обработки и подсистемы хранения.

Для моделирования подсистемы узлов обработки данных в качестве базовой модели узла обработки данных будем использовать не традиционную модель восстанавливаемого элемента, а специальную модель с тремя состояниями, позволяющую более адекватно учитывать специфику современных кластеров высокой готовности. Далее, на базе нее построим модель дублированной системы с независимыми узлами, а также дублированной системы с основным и резервным узлами.

Наконец, для моделирования подсистемы хранения данных будем использовать специальную модель надежности, учитывающую надежность контроллера хранилища, специфику работы отказоустойчивых RAID-массивов и жестких дисков.

2. МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА С ТРЕМЯ СОСТОЯНИЯМИ

Введем следующее множество состояний для отдельного узла:

- Состояние 0 – узел работоспособен, но пассивен (не обрабатывает запросы пользователей). Из этого состояния узел с интенсивностью γ_N (активация и начало обработки запросов) может перейти в состояние 1, либо с интенсивностью λ_P (отказ в пассивном состоянии) перейти в состояние 2.
- Состояние 1 – узел работоспособен и активен. Из этого состояния узел с интенсивностью λ_A (отказ в активном состоянии) может перейти в состояние 2.
- Состояние 2 – узел неработоспособен. Из этого состояния узел с интенсивностью μ_N (восстановление узла) может перейти в состояние 0.

Тогда, с учетом вышесказанного имеем следующий граф состояний (рисунок 2):

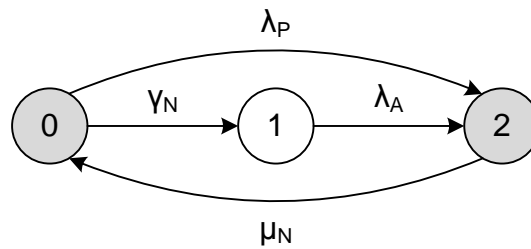


Рис. 2. Марковская модель надежности отдельного узла.

Математическая модель (система уравнений Колмогорова-Чепмена):

$$\begin{cases} P_0(0) = 1; & P_1(0) = 0; & P_2(0) = 0; \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) = 1; \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda_P + \gamma_N)P_0(t) + \mu_N P_2(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \gamma_N P_0(t) - \lambda_A P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_P P_0(t) + \lambda_A P_1(t) - \mu_N P_2(t). \end{cases}$$

Где, λ_A - интенсивность отказов узла в активном состоянии, λ_P - интенсивность отказов в пассивном состоянии, μ_N - интенсивность восстановления, и γ_N - интенсивность активации (перехода из пассивного состояния в активное состояние).

Мы ограничимся выводом аналитического решения для стационарного случая при $t \rightarrow \infty$, когда марковский процесс становится установившимся, и производные вероятностей по времени стремятся к нулю. Тогда мы имеем дело с системой алгебраических уравнений, и, решая ее, получаем формулы для стационарных вероятностей всех состояний:

$$\begin{cases} P_0(\infty) = \frac{\mu_N \lambda_A}{\mu_N (\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A (\gamma_N + \lambda_P)}; \\ P_1(\infty) = \frac{\mu_N \gamma_N}{\mu_N (\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A (\gamma_N + \lambda_P)}; \\ P_2(\infty) = \frac{\lambda_A (\gamma_N + \lambda_P)}{\mu_N (\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A (\gamma_N + \lambda_P)}. \end{cases}$$

Соответственно, стационарный коэффициент готовности отдельного узла, с учетом того, что только в состоянии 1 узел работоспособен и активен:

$$K_N = P_1(\infty) = \frac{\mu_N \gamma_N}{\mu_N (\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A (\gamma_N + \lambda_P)}. \quad (1)$$

Примечание. При $\gamma_N \rightarrow \infty$, коэффициент готовности $K_N \rightarrow \mu_N / (\mu_N + \lambda_A)$.

3. ДУБЛИРОВАННАЯ СИСТЕМА С НЕЗАВИСИМЫМИ УЗЛАМИ

В дублированной системе с независимыми узлами оба узла могут находиться любым из трех состояний независимо друг от друга, и система считается готовой обслуживать запросы пользователей, когда хотя бы один узел находится в активном состоянии. Более того, следует особо отметить, что одни и те же запросы пользователей могут одновременно обрабатываться на обоих узлах в случае, если оба узла в активном состоянии.

Рассмотрим множество состояний системы:

- Состояние 0 – оба узла работоспособны, но пассивны. Из этого состояния система с интенсивностью $2\gamma_N$ (любой из двух пассивных узлов может переводиться на роль активного) может перейти в состояние 1, либо с интенсивностью $2\lambda_P$ (любой из двух пассивных узлов может отказать) перейти в состояние 2.
- Состояние 1 – оба узла работоспособны, и один из узлов активен, другой – пассивен. Из этого состояния система с интенсивностью λ_A (отказ активного узла) может перейти в состояние 2, либо с интенсивностью λ_P (отказ пассивного узла) перейти в состояние 3, либо с интенсивностью γ_N (активация пассивного узла) может перейти в состояние 5. В состоянии 1 система может обрабатывать запросы пользователей.
- Состояние 2 – один узел неработоспособен, другой работоспособен, но пассивен. Из этого состояния система с интенсивностью γ_N (активация оставшегося пассивного узла) может перейти в состояние 3, либо с интенсивностью λ_P (отказ оставшегося пассивного узла) перейти в состояние 4, либо с интенсивностью μ_N (восстановление неработоспособного узла) перейти в состояние 0.
- Состояние 3 – один узел неработоспособен, другой работоспособен и активен. Из этого состояния система с интенсивностью λ_A (отказ оставшегося активного узла) может перейти в состояние 4, либо с интенсивностью μ_N (восстановление неработоспособного узла) перейти в состояние 1. В состоянии 3 система может обрабатывать запросы пользователей.
- Состояние 4 – оба узла неработоспособны. Из этого состояния система с интенсивностью $2\mu_N$ (любой из двух неработоспособных узлов может восстановиться) может перейти в состояние 2.
- Состояние 5 – оба узла работоспособны и активны. Из этого состояния система с интенсивностью $2\lambda_A$ (любой из двух активных узлов может отказать) может перейти в состояние 2. В состоянии 5 система может обрабатывать запросы пользователей.

Тогда, с учетом вышесказанного имеем следующий граф состояний (рисунок 3):

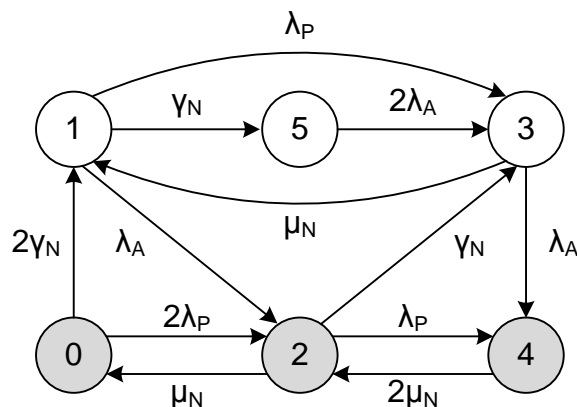


Рис. 3. Марковская модель надежности дублированной системы с независимыми узлами.

Где, λ_A - интенсивность отказов узла в активном состоянии, λ_P - интенсивность отказов в пассивном состоянии, μ_N - интенсивность восстановления, и γ_N - интенсивность активации (перехода из пассивного состояния в активное состояние).

Математическая модель (система уравнений Колмогорова-Чепмена):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(0) = 1; \quad P_1(0) = 0; \quad P_2(0) = 0; \quad P_3(0) = 0; \quad P_4(0) = 0; \quad P_5(0) = 0; \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) = 1; \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -(2\lambda_P + 2\gamma_N)P_0(t) + \mu_N P_2(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = 2\gamma_N P_0(t) - (\gamma_N + \lambda_A + \lambda_P)P_1(t) + \mu_N P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = 2\lambda_P P_0(t) + \lambda_A P_1(t) - (\mu_N + \lambda_P + \gamma_N)P_2(t) + 2\mu_N P_4(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_P P_1(t) + \gamma_N P_2(t) - (\mu_N + \lambda_A)P_3(t) + 2\lambda_A P_5(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_P P_2(t) + \lambda_A P_3(t) - 2\mu_N P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \gamma_N P_1(t) - 2\lambda_A P_5(t). \end{array} \right.$$

Мы ограничимся выводом аналитического решения для стационарного случая при $t \rightarrow \infty$, когда марковский процесс становится установившимся, и производные вероятностей по времени стремятся к нулю. Тогда мы имеем дело с системой алгебраических уравнений, и, решая ее, получаем формулы для стационарных вероятностей всех состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(\infty) = \frac{\mu_N^2 \lambda_A^2}{(\mu_N(\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A(\gamma_N + \lambda_P))^2}; \\ P_1(\infty) = \frac{2\mu_N^2 \lambda_A \gamma_N}{(\mu_N(\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A(\gamma_N + \lambda_P))^2}; \\ P_2(\infty) = \frac{2\mu_N \lambda_A^2 (\gamma_N + \lambda_P)}{(\mu_N(\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A(\gamma_N + \lambda_P))^2}; \\ P_3(\infty) = \frac{2\mu_N \lambda_A \gamma_N (\gamma_N + \lambda_P)}{(\mu_N(\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A(\gamma_N + \lambda_P))^2}; \\ P_4(\infty) = \frac{\lambda_A^2 (\gamma_N + \lambda_P)^2}{(\mu_N(\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A(\gamma_N + \lambda_P))^2}; \\ P_5(\infty) = \frac{\mu_N^2 \gamma_N^2}{(\mu_N(\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A(\gamma_N + \lambda_P))^2}. \end{array} \right.$$

Тогда, с учетом того, что система обрабатывает запросы пользователей только в состояниях 1, 3 и 5, стационарный коэффициент готовности $K_{AA} = P_1(\infty) + P_3(\infty) + P_5(\infty)$:

$$K_{AA} = \frac{\mu_N \gamma_N (\mu_N (\gamma_N + 2\lambda_A) + 2\lambda_A (\gamma_N + \lambda_P))}{(\mu_N (\gamma_N + \lambda_A) + \lambda_A (\gamma_N + \lambda_P))^2}. \quad (2)$$

Примечание. При быстрой активации узлов $\gamma_N \rightarrow \infty$, коэффициент готовности можно оценить по упрощенной формуле: $K_{AA} \rightarrow (\mu_N^2 + 2\mu_N \lambda_A) / (\mu_N + \lambda_A)^2$.

Таким образом, мы получили формулу для коэффициента готовности дублированной системы с независимыми узлами. Следует особо отметить, что в реальных системах запросы пользователей обрабатываются, как правило, только одним конкретным узлом (основным узлом, если используется один основной и один резервный узлы, или одним из узлов, если используется несколько равноправных узлов с распределением нагрузки между ними).

Мы рассмотрим дублированную систему с основным и резервным узлом.

4. ДУБЛИРОВАННАЯ СИСТЕМА С ОСНОВНЫМ И РЕЗЕРВНЫМ УЗЛАМИ

В дублированной системе с одним основным и одним резервным узлом, в каждый момент времени только один узел может быть активным (иметь доступ к общей базе данных и обрабатывать запросы пользователей). Соответственно, если оба узла находятся в работоспособном пассивном состоянии, то только один из них переводится в активное состояние. Что касается отказов и восстановлений узлов, для упрощения модели будем считать, что узлы независимы по отказам и восстановлениям.

Тогда, множество состояний для дублированной системы с основным и резервным узлом получается таким же, как для дублированной системы с независимыми узлами, с той лишь разницей, что исключается состояние 5 (активность обоих узлов), а переход из состояние 0 (пассивность обоих узлов) в состояние 1 (один активный и другой пассивный) имеет интенсивность γ_N , так как только один узел может переходить в активное состояние.

Тогда, с учетом вышесказанного имеем следующий граф состояний (рисунок 4):

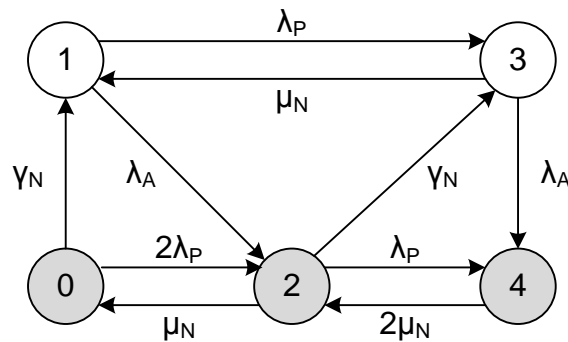


Рис. 4. Марковская модель надежности системы с основным и резервным узлом.

Где, λ_A - интенсивность отказов узла в активном состоянии, λ_P - интенсивность отказов в пассивном состоянии, μ_N - интенсивность восстановления, и γ_N - интенсивность активации (перехода из пассивного состояния в активное состояние).

Математическая модель (система уравнений Колмогорова-Чепмена):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(0) = 1; \quad P_1(0) = 0; \quad P_2(0) = 0; \quad P_3(0) = 0; \quad P_4(0) = 0; \\ P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) = 1; \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -(2\lambda_P + \gamma_N)P_0(t) + \mu_N P_2(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \gamma_N P_0(t) - (\lambda_A + \lambda_P)P_1(t) + \mu_N P_3(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = 2\lambda_P P_0(t) + \lambda_A P_1(t) - (\mu_N + \lambda_P + \gamma_N)P_2(t) + 2\mu_N P_4(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_P P_1(t) + \gamma_N P_2(t) - (\mu_N + \lambda_A)P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_P P_2(t) + \lambda_A P_3(t) - 2\mu_N P_4(t). \end{array} \right.$$

Мы ограничимся выводом аналитического решения для стационарного случая при $t \rightarrow \infty$, когда марковский процесс становится установившимся, и производные вероятностей по времени стремятся к нулю. Тогда мы имеем дело с системой алгебраических уравнений, и, решая ее, получаем формулы для стационарных вероятностей всех состояний:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0(\infty) = 2\mu_N^2 \lambda_A (\mu_N + \lambda_A + \lambda_P) \frac{1}{\Psi}; \\ P_1(\infty) = 2\mu_N^2 \gamma_N (\mu_N + \gamma_N + 2\lambda_P + \lambda_A) \frac{1}{\Psi}; \\ P_2(\infty) = 2\mu_N \lambda_A (\gamma_N + 2\lambda_P) (\mu_N + \lambda_A + \lambda_P) \frac{1}{\Psi}; \\ P_3(\infty) = 2\mu_N \gamma_N (\mu_N \lambda_P + (\gamma_N + 2\lambda_P) (\lambda_A + \lambda_P)) \frac{1}{\Psi}; \\ P_4(\infty) = \lambda_A (\gamma_N + \lambda_P) (2\mu_N \lambda_P + (\gamma_N + 2\lambda_P) (\lambda_A + \lambda_P)) \frac{1}{\Psi}; \\ \Psi = 2\mu_N (\gamma_N + \lambda_A) (\mu_N + \gamma_N + 2\lambda_P) (\mu_N + \lambda_A + \lambda_P) + \\ + \lambda_A (\gamma_N + \lambda_P) (2\mu_N \lambda_P + (\gamma_N + 2\lambda_P) (\lambda_A + \lambda_P)). \end{array} \right.$$

Тогда, с учетом того, что система обрабатывает запросы пользователей только в состояниях 1 и 3, получаем стационарный коэффициент готовности $K_{AP} = P_1(\infty) + P_3(\infty)$:

$$K_{AP} = \frac{\gamma_N}{(\gamma_N + \lambda_A) \left(1 + \frac{\lambda_A (\gamma_N + \lambda_P) (2\mu_N \lambda_P + (\gamma_N + 2\lambda_P) (\lambda_A + \lambda_P))}{2\mu_N (\gamma_N + \lambda_A) (\mu_N + \gamma_N + 2\lambda_P) (\mu_N + \lambda_A + \lambda_P)} \right)}. \quad (3)$$

Примечание. При быстрой активации узлов $\gamma_N \rightarrow \infty$, коэффициент готовности:

$$K_{AP} \rightarrow \frac{2\mu_N (\mu_N + \lambda_A + \lambda_P)}{2\mu_N (\mu_N + \lambda_A + \lambda_P) + \lambda_A (\lambda_A + \lambda_P)}.$$

5. МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ДИСКОВОГО ХРАНИЛИЩА

В настоящее время существует множество вариантов построения дисковых хранилищ с применением одного или нескольких дисковых массивов по той или иной технологии RAID (избыточный массив недорогих дисков), причем как классических (RAID-0, RAID-1, RAID-5, RAID-6), так и каскадных (RAID-10, RAID-50, RAID-60, RAID-51, RAID-61), матричных (Intel Matrix Storage) и других специализированных видов.

С целью достижения высокой отказоустойчивости (особенно для баз данных), как правило, применяются RAID-1 массивы (также известные как «зеркало»), в котором все диски хранят одни и те же данные, и массив сохраняет работоспособность до тех пор, пока хотя бы один диск работоспособен. В силу высоких накладных расходов (при любом количестве дисков полезная емкость массива всегда равна емкости одного диска), на практике, как правило, используют двухдисковый RAID-1 массив.

Мы ограничимся рассмотрением одного хранилища (рисунок 5), состоящего из контроллера хранилища (специализированной ЭВМ с соответствующим процессором, памятью, системной платой, сетевыми интерфейсами, интерфейсами для подключения дисков и операционной системой) и одного двухдискового массива RAID-1.

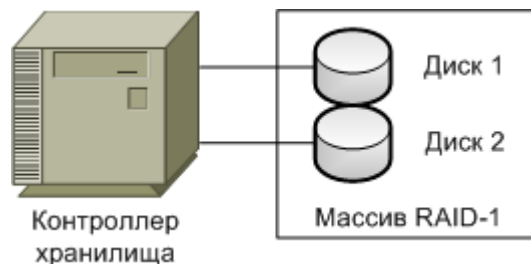


Рис. 5. Структурная схема хранилища с двухдисковым массивом RAID-1.

С целью упрощения модели надежности будем считать контроллер хранилища и двухдисковый RAID-1 массив независимыми по отказам и восстановлениям, и исследуем их по отдельности и выведем для них формулы расчета коэффициента готовности.

Массив RAID-1. Рассмотрим модель надежности двухдискового массив RAID-1 с учетом конечного времени обнаружения и замены вышедшего из строя диска, конечного времени репликации данных (процедура rebuild) на замененном диске, возможности отказа как оставшегося диска, так реплицируемого диска, а также возможности срыва процедуры репликации из-за ошибки чтения данных с оставшегося диска.

Кроме того, поскольку, несмотря на высокую отказоустойчивость массива RAID-1, на нем все же возможна ситуации отказа обоих дисков, или оставшегося диска до завершения репликации на замененном диске, или срыва репликации, приводящие к потере всех данных массива, то будем считать, что имеется резервная копия данных. В случае потери всех данных за некоторое конечное время специалистами выполняется пересоздание массива RAID-1 и восстановление данных массива из резервной копии. Во время восстановления данных из резервной копии диски также могут отказывать.

Введем следующее множество состояний двухдискового массива RAID-1 и условий переходов из одного состояния в другое:

- Состояние 0 (online) – оба диска исправны, данные массива доступны. Из этого состояния массив может с интенсивностью $2\lambda_D$ (отказ любого из исправных дисков) перейти в состояние 1.
- Состояние 1 (degraded) – один диск исправен, другой диск отказал и ожидает замены, данные массива доступны. Из этого состояния массив может с интенсивностью λ_D (отказ исправного диска) перейти в состояние 2, либо с интенсивностью μ_D (замена отказавшего диска) в состояние 3.
- Состояние 2 (offline 2) – оба диска отказали и ожидают замены, массив разрушен и данные массива потеряны. Из этого состояния массив может с интенсивностью $2\mu_D$ (замена любого из отказавших дисков) перейти в состояние 4.
- Состояние 3 (rebuild) – один диск исправен, другой диск заменен, на замененном диске идет репликация данных с исправного диска, данные массива доступны. Из этого состояния массив может с интенсивностью μ_R (завершение репликации данных на замененном диске) перейти в состояние 0, либо с интенсивностью λ_R (отказ реплицируемого диска) в состояние 1, либо с интенсивностью λ_D (отказ исправного диска) в состояние 4, либо с интенсивностью ε_D (критическая ошибка чтения данных исправного диска в процессе репликации) в состояние 5.
- Состояние 4 (offline 1) – один диск заменен, другой диск ожидает замены, массив разрушен и данные массива потеряны. Из этого состояния массив с интенсивностью μ_D (замена отказавшего диска) может перейти в состояние 5.
- Состояние 5 (offline 0) – оба диска заменены (или один диск заменен, а второй исправен), но массив разрушен и данные массива потеряны, выполняются работы по восстановлению данных из резервной копии. Из этого состояния массив может с интенсивностью γ_R (завершение восстановления данных) перейти в состояние 0, либо с интенсивностью $2\lambda_R$ (отказ любого из дисков при восстановлении) в состояние 4.

Где,

λ_D - интенсивность отказов дисков в исправном состоянии.

μ_D - интенсивность замены отказавшего диска.

λ_R - интенсивность отказов при репликации или восстановлении данных на замененный диск (большой объем операций записи).

μ_R - интенсивность восстановления или репликации данных.

ε_D - интенсивность ошибок чтения данных исправного диска при репликации данных на другой диск (большой объем операций чтения).

γ_R - интенсивность восстановления данных после разрушения массива.

Тогда, с учетом вышесказанного имеем следующий граф состояний (рисунок 6):

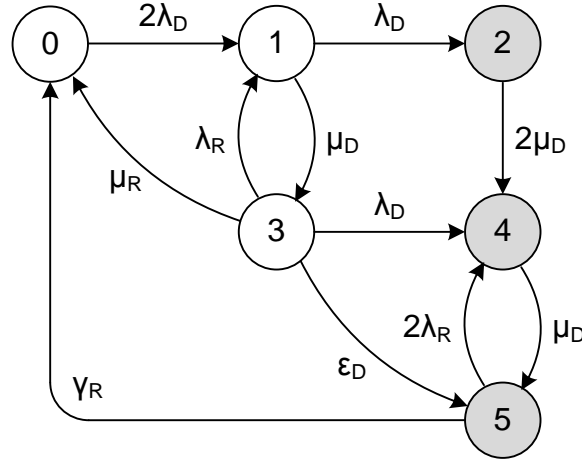


Рис. 6. Марковская модель надежности двухдискового массива RAID-1.

Математическая модель (система уравнений Колмогорова-Чепмена):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P_0(0) = 1; \quad P_1(0) = 0; \quad P_2(0) = 0; \quad P_3(0) = 0; \quad P_4(0) = 0; \quad P_5(0) = 0; \\
 P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) = 1; \\
 \frac{dP_0(t)}{dt} = -2\lambda_D P_0(t) + \mu_R P_3(t) + \gamma_R P_5(t); \\
 \frac{dP_1(t)}{dt} = 2\lambda_D P_0(t) - (\lambda_D + \mu_D) P_1(t) + \lambda_R P_3(t); \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_D P_1(t) - 2\mu_D P_2(t); \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} = \mu_D P_1(t) - (\lambda_R + \mu_R + \lambda_D + \varepsilon_D) P_3(t); \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} = 2\mu_D P_2(t) + \lambda_D P_3(t) - \mu_D P_4(t) + 2\lambda_R P_5(t); \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} = \varepsilon_D P_3(t) + \mu_D P_4(t) - (2\lambda_R + \gamma_R) P_5(t).
 \end{array} \right.$$

Мы ограничимся выводом аналитического решения для стационарного случая при $t \rightarrow \infty$, когда марковский процесс становится установившимся, и производные вероятностей по времени стремятся к нулю. Тогда мы имеем дело с системой алгебраических уравнений, и, решая ее, получаем формулы для стационарных вероятностей всех состояний.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 P_0(\infty) = \mu_D \gamma_R (\lambda_D \lambda_R + (\lambda_D + \mu_D)(\mu_R + \lambda_D + \varepsilon_D)) \frac{1}{\Psi}; \\
 P_1(\infty) = 2\lambda_D \mu_D \gamma_R (\lambda_R + \mu_R + \lambda_D + \varepsilon_D) \frac{1}{\Psi}; \\
 P_2(\infty) = \lambda_D^2 \gamma_R (\lambda_R + \mu_R + \lambda_D + \varepsilon_D) \frac{1}{\Psi}; \\
 P_3(\infty) = 2\lambda_D \mu_D^2 \gamma_R \frac{1}{\Psi}; \\
 P_4(\infty) = 2\lambda_D (\lambda_D (2\lambda_R + \gamma_R)(\lambda_R + \mu_R + \lambda_D + \varepsilon_D + \mu_D) + 2\lambda_R \varepsilon_D \mu_D) \frac{1}{\Psi}; \\
 P_5(\infty) = 2\lambda_D \mu_D (\lambda_D (\lambda_R + \mu_R) + (\lambda_D + \mu_D)(\lambda_D + \varepsilon_D)) \frac{1}{\Psi}; \\
 \\
 \Psi = \mu_D \gamma_R (\mu_D (\mu_R + 3\lambda_D + \varepsilon_D) + \lambda_D (2\lambda_D + 3\lambda_R + 3\mu_R)) + \\
 + \lambda_D (3\gamma_R + 4\lambda_R + 2\mu_D)(\lambda_D (\lambda_R + \mu_R) + (\lambda_D + \mu_D)(\lambda_D + \varepsilon_D)).
 \end{array} \right.$$

Тогда, учитывая, что только в состояниях 0, 1 и 3 доступны данные массива, получаем коэффициент готовности двухдискового RAID-1 массива $K_R = P_0(\infty) + P_1(\infty) + P_3(\infty)$:

$$K_R = \frac{1}{1 + \frac{\lambda_D^2(3\gamma_R + 4\lambda_R + 2\mu_D)(\lambda_R + \mu_R + \lambda_D + \varepsilon_D) + 2\lambda_D\mu_D(\gamma_R\lambda_D + (2\lambda_R + \mu_D)(\lambda_D + \varepsilon_D))}{\mu_D\gamma_R((\mu_D + 3\lambda_D)(\mu_R + \lambda_D + \varepsilon_D) + \lambda_D(3\lambda_R + 2\mu_D))}}. \quad (4)$$

Примечание. При сравнительно малом времени замены отказавшего диска $\mu_D \rightarrow \infty$ (например, за счет использования дополнительных дисков горячей замены в хранилище данных), коэффициент готовности можно оценить по упрощенной формуле:

$$K_R = \frac{\gamma_R(\mu_R + 3\lambda_D + \varepsilon_D)}{\gamma_R(\mu_R + 3\lambda_D + \varepsilon_D) + 2\lambda_D(\lambda_D + \varepsilon_D)}.$$

Контроллер хранилища. Для анализа коэффициента готовности контроллера мы ограничимся простой моделью восстанавливаемого элемента с двумя состояниями:

- Состояние 0 – контроллер хранилища данных работоспособен и обеспечивает доступ к данным дискового массива. Из этого состояния контроллер может с интенсивностью λ_C отказать и перейти в состояние 1.
- Состояние 1 – контроллер неработоспособен. Из этого состояния контроллер может с интенсивностью μ_C восстановиться и перейти в состояние 0.

Тогда, с учетом вышесказанного имеем следующий граф состояний (рисунок 7):

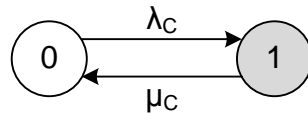


Рис. 7. Марковская модель надежности контроллера хранилища.

Где, λ_C - интенсивность отказов контроллера, μ_C - интенсивность восстановления.

Математическая модель (система уравнений Колмогорова-Чепмена):

$$\begin{cases} P_0(0) = 1; & P_1(0) = 0; \\ P_0(t) + P_1(t) = 1; \\ \frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda_C P_0(t) + \mu_C P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_C P_0(t) - \mu_C P_1(t). \end{cases}$$

Мы ограничимся выводом аналитического решения для стационарного случая при $t \rightarrow \infty$, когда марковский процесс становится установившимся, и производные вероятностей по времени стремятся к нулю. Тогда мы имеем дело с системой алгебраических уравнений, и, решая ее, получаем формулы для стационарных вероятностей всех состояний:

$$\begin{cases} P_0(\infty) = \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C}; \\ P_1(\infty) = \frac{\lambda_C}{\mu_C + \lambda_C}. \end{cases}$$

Соответственно, стационарный коэффициент готовности контроллера, с учетом того, что только в состоянии 0 контроллер работоспособен:

$$K_C = P_0(\infty) = \frac{\mu_C}{\mu_C + \lambda_C}. \quad (5)$$

6. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ, ХРАНИЛИЩА И ДИСКОВ

Интенсивность отказов узлов кластера (серверных систем) можно оценить на основе параметра МТВФ (среднего времени наработки на отказ), предоставленного производителем или полученного из практического опыта эксплуатации (от нескольких тысяч до нескольких десятков тысяч часов). Тогда упрощенно можно полагать, что интенсивность отказов пассивного (ненагруженного) узла равна $1/\text{МТВФ}$, а интенсивность активного (нагруженного) узла равна $3/\text{МТВФ}$. Иными словами:

$$\begin{aligned}\lambda_P &= 1/\text{МТВФ}_{\text{node}}; \\ \lambda_A &= 3/\text{МТВФ}_{\text{node}}.\end{aligned}\tag{6.1}$$

Интенсивность восстановления узла после отказа может быть оценена на основе среднего времени МТТР, полученного из практики (в среднем восстановление занимает от нескольких часов до нескольких суток):

$$\mu_N = 1/\text{МТТР}_{\text{node}}\tag{6.2}$$

Что касается интенсивности активации (перехода узла из пассивного состояния в активное), то ее можно оценить на основе среднего времени активации МТТА, которое во многом зависит от программного обеспечения и служебных протоколов, используемых в кластеризации, и может быть получено из практического опыта эксплуатации (может занимать от нескольких секунд до нескольких минут):

$$\gamma_N = 1/\text{МТТА}_{\text{node}}\tag{6.3}$$

Интенсивность отказов дисков λ_D можно оценить на основе параметра МТВФ (среднего времени наработки на отказ), предоставленного производителем дисков или полученного из практического опыта эксплуатации. Следует отметить, что производители часто завышают МТВФ, указывая более миллиона часов. Практика же показывает, что МТВФ диска лежит в пределах 50-300 тысяч часов.

Что касается интенсивности отказов в режиме репликации (восстановления) данных λ_R , то в силу большого объема операций записи интенсивность отказов реплицируемого диска выше базовой интенсивности. Мы будем упрощенно полагать, что интенсивность реплицируемого диска втрое выше:

$$\begin{aligned}\lambda_D &= 1/\text{МТВФ}_{\text{disk}}; \\ \lambda_R &= 3/\text{МТВФ}_{\text{disk}}.\end{aligned}\tag{6.4}$$

Интенсивность замены диска зависит от того, происходит ли замена автоматически за счет применения дополнительных дисков (помимо основных дисков в массиве) и технологии горячего резерва, или же обнаружения и замена диска осуществляется специалистами. В первом случае замена может занимать несколько минут, во втором – несколько часов. Соответственно, обобщая оба случая можно сказать, что интенсивность замены определяется параметром МТВС (среднее время ожидания замены):

$$\mu_D = 1/\text{МТВС}_{\text{disk}}\tag{6.5}$$

Интенсивность репликации данных μ_R для массивов RAID-1 зависит от емкости диска V (в байтах), средней скорости записи v_{WR} на диск (в байт/с) и средней скорости чтения v_{RD} данных (в байт/с), и может быть оценена следующим образом:

$$\mu_R = \frac{3600 v_{RD} v_{WR}}{V(v_{RD} + v_{WR})}.\tag{6.5}$$

Например, для диска емкости 10^{12} байтов, скорости записи $v_{WR} = 50 \cdot 10^6$ байт/с и скорости чтения $v_{RD} = 80 \cdot 10^6$ байт/с, интенсивность репликации данных составит $\mu_R \sim 1/9$ час⁻¹ (в среднем репликация данных длится 9 часов).

Интенсивность ошибок чтения ε_D диска можно определить на основе параметра P_{UER} (вероятности невозстанавливаемой ошибки чтения бита), предоставленного производителем дисков или полученного из практического опыта эксплуатации, емкости диска V (в байтах) и среднего времени репликации данных, равного $1/\mu_R$ (в часах). Для дисков персональных компьютеров P_{UER} составляет $\sim 10^{-14}$, для дисков серверных систем $\sim 10^{-15}$.

Тогда, учитывая, что при репликации данных в массиве RAID-1 требуется считывать весь диск размером $8V$ битов, то вероятность ошибки чтения $Q = 1 - (1 - P_{UER})^{8V}$. С другой стороны полагая, что время наработки на ошибку – экспоненциально распределенная случайная величина с параметром ε_D , и регенерация длится в течение $1/\mu_R$ часов, имеем равенство $Q = 1 - e^{-\varepsilon/\mu}$. Тогда, из двух тождеств получаем $\varepsilon_D = -8V\mu_R \ln(1 - P_{UER})$. Тогда, учитывая, что P_{UER} очень малая величина, и $\ln(1 - P_{UER}) \sim -P_{UER}$, окончательно получаем:

$$\varepsilon_D = 8V\mu_R P_{UER}. \quad (6.6)$$

Например, для диска емкости $V = 10^{12}$ байтов, интенсивности репликации данных $\mu_R = 1/9$ час $^{-1}$ и вероятности невозстанавливаемой ошибки чтения бита $P_{UER} = 10^{-14}$, интенсивность ошибок чтения составит $\varepsilon_D \approx 1/112$ час $^{-1}$.

Интенсивность восстановления данных из резервной копии после разрушения массива зависит от времени, требуемого для создания дискового массива, размера резервной копии, скорости записи данных в дисковый массив, и также может быть оценена на основе среднего времени MTTR, полученного из практики (от нескольких часов до нескольких суток):

$$\gamma_R = 1/\text{MTTR}_{\text{array}}. \quad (6.7)$$

Интенсивность отказов контроллера дискового хранилища можно оценить на основе параметра MTBF предоставленного производителем контроллера дисков или полученного из практического опыта эксплуатации.

$$\lambda_C = 1/\text{MTBF}_{\text{con}}. \quad (6.8)$$

Что касается интенсивности восстановления контроллера после отказа, то она может быть оценена на основе среднего времени MTTR, полученного из практики:

$$\mu_C = 1/\text{MTTR}_{\text{con}}. \quad (6.9)$$

7. ПРИМЕР РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГОТОВНОСТИ

Имеется два идентичных узла обработки данных со средней наработкой на отказ в пассивном (ненагруженном) режиме $\text{MTBF}_{\text{node}} = 8760$ часов. В активном (нагруженном) режиме интенсивность отказов в среднем утраивается. Среднее время восстановления узла $\text{MTTR}_{\text{node}} = 24$ часа. Среднее время активации узла составляет $\text{MTTA}_{\text{node}} = 1/20$ часа (в среднем в течение трех минут происходит переход в активное состояние).

Имеется дисковое хранилище, включающий в себя контроллер и один массив RAID-1 с двумя идентичными дисками.

Диски имеют емкость $V = 10^{12}$ байтов. Среднее время наработки на отказ диска составляет $\text{MTBF}_{\text{disk}} = 120000$ часов. Интенсивность отказов реплицируемого диска втрое выше. Вероятность невозстанавливаемой ошибки чтения бита $P_{UER} = 10^{-14}$. Средняя скорость чтения данных $v_{RD} = 80 \cdot 10^6$ байт/с. Средняя скорость записи данных $v_{WR} = 50 \cdot 10^6$ байт/с. Среднее время замены дисков $\text{MTWS}_{\text{disk}} = 8$ часов (диск заменяется специалистом).

Для предотвращения безвозвратной потери данных в случае разрушения массива выполняется периодическое резервное копирование данных. Среднее время восстановления дискового массива, включая восстановление данных, составляет $\text{MTTR}_{\text{array}} = 48$ часов.

Среднее время наработки на отказ контроллера дискового хранилища составляет $\text{MTBF}_{\text{con}} = 8760$ часов. Среднее время восстановления контроллера $\text{MTTR}_{\text{con}} = 1$ час.

Рассчитаем коэффициент готовности системы с одним узлом и внешним дисковым хранилищем, и кластера с двумя узлами и внешним дисковым хранилищем. Для начала оценим исходные параметры надежности по формулам 6:

Интенсивность отказов ненагруженного узла:

$$\lambda_P = 1/\text{MTBF}_{\text{node}} = 1/8760 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность отказов нагруженного узла:

$$\lambda_A = 3/\text{MTBF}_{\text{node}} = 3/8760 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность восстановления узла:

$$\mu_N = 1/\text{MTTR}_{\text{node}} = 1/24 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность активации узла:

$$\gamma_N = 1/\text{MTTA}_{\text{node}} = 20 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность отказов диска:

$$\lambda_D = 1/\text{MTBF}_{\text{disk}} = 1/120000 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность отказов реплицируемого диска:

$$\lambda_R = 3/\text{MTBF}_{\text{disk}} = 3/120000 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность замены дисков:

$$\mu_D = 1/\text{MTWS}_{\text{disk}} = 1/8 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность репликации данных в дисковом массиве RAID-1:

$$\mu_R = \frac{3600 v_{\text{read}} v_{\text{write}}}{V(v_{\text{read}} + v_{\text{write}})} \sim 1/9 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность ошибок чтения данных диска при репликации замененного диска:

$$\varepsilon_D = 8V\mu_R P_{\text{UER}} \sim 1/112 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность восстановления данных массива из резервной копии:

$$\gamma_R = 1/\text{MTTR}_{\text{array}} = 1/48 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность отказов контроллера хранилища:

$$\lambda_C = 1/\text{MTBF}_{\text{con}} = 1/8760 \text{ час}^{-1}.$$

Интенсивность восстановления контроллера хранилища:

$$\mu_C = 1/\text{MTTR}_{\text{con}} = 1 \text{ час}^{-1}.$$

Теперь по выведенным выше формулам 1, 2, и 3 получаем коэффициенты готовности отдельного узла $K_N \approx 0,991830935$, дублированной системы с независимыми элементами $K_{AA} \approx 0,9999332664$, системы с основным и резервным узлами $K_{AP} \approx 0,9999383782$.

Кроме того, по формулам 4 и 5 получаем коэффициенты готовности двухдискового RAID-1 массива $K_R \approx 0,9999403684$ и контроллера хранилища $K_C \approx 0,9998858578$.

Тогда, коэффициент готовности отдельного узла обработки данных и внешним хранилищем с одним двухдисковым массивом RAID-1:

$$K_N K_R K_C \approx 0,991658587.$$

Соответственно, используя формулу $8760(1 - K)$, также можно оценить среднее время недоступности в год $\sim 73,07$ часов.

Коэффициент готовности дублированной системы с независимыми узлами и общим дисковым хранилищем с одним двухдисковым массивом RAID-1:

$$K_{AA} K_R K_C \approx 0,999759511.$$

Соответственно, среднее время недоступности в год $\sim 2,11$ часов.

Коэффициент готовности дублированной системы с одним основным и другим резервным узлом, и общим дисковым хранилищем с одним двухдисковым массивом RAID-1:

$$K_{AP} K_R K_C \approx 0,999764622.$$

Соответственно, среднее время недоступности в год: $\sim 2,06$ часов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках данной статьи рассмотрены модели надежности отдельного узла обработки данных, дублированной системы с двумя идентичными независимыми узлами и дублированной системы с одним основным и одним резервным узлом, а также внешнего хранилища данных с двухдисковым массивом RAID-1. Выведены формулы для расчета коэффициентов готовности. Также приведен пример расчета коэффициента готовности отдельного узла с внешним хранилищем данных, дублированной системы с независимыми узлами, и дублированной системы с одним основным и одним резервным узлом с внешним хранилищем данных.

Расчет показывает очевидное преимущество дублированной системы перед отдельным узлом обработки данных по показателям надежности. Более того, при высокой интенсивности активации узлов, система с основным и резервным узлом имеет небольшое преимущество по надежности перед дублированной системой с независимыми узлами.

Выведенные формулы и пример расчета коэффициентов готовности могут быть использованы для оценки надежности современных кластеров высокой готовности с двумя узлами и общим хранилищем данных.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Э. Таненбаум, М. ван Стеен.** Распределенные системы. СПб.: Питер, 2003. [Andrew Tanenbaum and Martin van Steen, *Distributed Systems*, (in Russian). Saint-Petersburg: Piter, 2003.]
2. **Jonathan S. Ruffing.** Windows 2008 Server R2 & SQL Server 2008 R2 High Availability Clustering. Scream Publications, 2011. [Jonathan S. Ruffing, *Windows 2008 Server R2 & SQL Server 2008 R2 High Availability Clustering*, Scream Publications, 2011.]
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. **Martin L. Shooman.** Reliability of computer systems and networks. John Wiley & Sons Inc., 2002. [Martin L. Shooman, *Reliability of computer systems and networks*, John Wiley & Sons Inc., 2002.]
6. **Israel Koren, C. Mani Krishna.** Fault-Tolerant Systems. Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007. [Israel Koren, C. Mani Krishna, *Fault-Tolerant Systems*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2007.]
7. **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.]