

SELF–HEALING БАЗЫ ДАННЫХ: КОНЦЕПЦИЯ САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ

В.И. Куницын, В.С. Лучников, Е.С. Ильин, А.О. Карташов

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический
университет имени Г.Ф. Морозова»

Аннотация. С ростом объёмов данных и усложнением цифровых инфраструктур всё более актуальной становится проблема надёжности и бесперебойности работы систем управления базами данных (СУБД). Классические подходы, основанные на репликации и резервном копировании, не всегда способны обеспечить требуемую устойчивость в условиях динамических нагрузок и киберугроз. Одним из перспективных направлений развития является концепция self-healing баз данных — систем, обладающих способностью к автоматическому восстановлению после сбоев без участия администратора.

Ключевые слова: self-healing базы данных, самовосстановление, faulttolerance, автоматизация восстановления, СУБД, распределённые системы, отказоустойчивость.

SELF–HEALING DATABASES: THE CONCEPT OF AUTONOMOUS RECOVERY STORAGE SYSTEMS

V.I. Kunitsyn, V.S. Luchnikov, E.S. Ilyin, A.O. Kartashov

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

Abstract. With the growth of data volumes and the increasing complexity of digital infrastructures, the problem of reliability and uninterrupted operation of database management systems (DBMS) is becoming ever more relevant. Traditional approaches based on replication and backup are not always sufficient to ensure the required resilience under dynamic workloads and cyber threats. One promising direction of development is the concept of self-healing databases – systems capable of automatically recovering from failures without administrator intervention.

Keywords: self-healing databases, autonomous recovery, fault tolerance, recovery automation, DBMS, distributed systems, high availability.

Теоретические основы self-healing систем

Первые системы управления базами данных (СУБД) разрабатывались в условиях, когда объёмы информации были относительно невелики, а отказоустойчивость решалась преимущественно резервным копированием и восстановлением данных из бэкапов. Такой подход работал в эпоху централизованных вычислительных центров, однако по мере роста распределённых систем и объёма хранимой информации его эффективность стала снижаться. Постепенно стало очевидно, что классические механизмы не могут гарантировать непрерывность работы, особенно в условиях глобальных сетей и облачных инфраструктур.

В начале XXI века внимание исследователей привлекли так называемые self-healing системы, изначально применявшиеся в телекоммуникациях и встроенных устройствах. Их идея заключалась в том, чтобы минимизировать вмешательство человека и передать функции обнаружения и устранения ошибок самой системе. Применение этих принципов к базам данных стало логичным шагом, учитывая критическую роль хранения информации в современных цифровых платформах [1].

Самовосстанавливающаяся база данных (self-healing database) – это СУБД, обладающая встроенными механизмами автоматического выявления сбоев и их устранения без необходимости ручного вмешательства администратора. В отличие от традиционных решений, где администратор анализирует логи и применяет корректирующие действия, здесь цикл «обнаружение → анализ → коррекция → восстановление» выполняется самой системой.

Ключевыми свойствами таких решений считаются:

1. **Автономность.** Система должна действовать без постоянного контроля со стороны человека.
2. **Превентивность.** Ошибка устраняется на раннем этапе, до того, как приведёт к отказу или повреждению данных.
3. **Адаптивность.** Механизмы корректировки должны учитывать динамику нагрузки, архитектурные изменения и непредвиденные ситуации.
4. **Обучаемость.** Многие современные self-healing решения включают элементы машинного обучения для прогнозирования будущих проблем.

Архитектура самовосстанавливающихся СУБД обычно строится вокруг трёх ключевых модулей:

1. **Мониторинг**— постоянное отслеживание состояния базы, запросов, производительности и сетевых взаимодействий.
2. **Аналитический блок**— сопоставление текущих метрик с эталонными значениями, выявление аномалий и потенциальных угроз.
3. **Исполнительный модуль**— применение корректирующих действий: от перезапуска узлов к перераспределению нагрузки или восстановлению повреждённых данных [2].

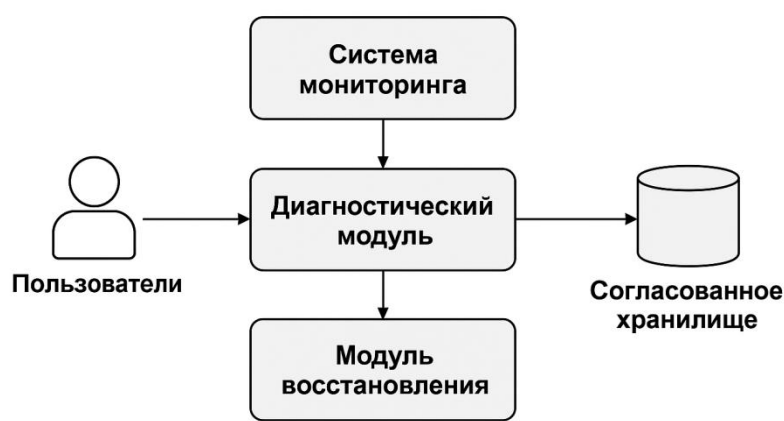


Рисунок 1 –Общая архитектура self–healing базы данных

На представленном рисунке 1 показан упрощённый принцип функционирования самовосстанавливающейся базы данных. Пользователи взаимодействуют с системой через обычные операции чтения и записи, которые становятся исходным источником нагрузки. Параллельно работает мониторинговый контур, фиксирующий текущее состояние базы и параметры её работы. Все данные о происходящем стекаются в диагностический модуль, где они подвергаются анализу: проверяется согласованность транзакций, корректность индексов и отсутствие ошибок. Если система работает штатно, информация передаётся в согласованное хранилище и остаётся доступной для пользователей.

Когда же фиксируется сбой или аномалия, в процесс включается модуль восстановления. Он автоматически запускает заранее настроенные процедуры: повторяет неудавшиеся транзакции, синхронизирует реплики, исправляет повреждённые записи или перераспределяет нагрузку между узлами. После

завершения этих действий данные вновь проходят через диагностику, и цикл продолжается [3].

Таким образом, схема демонстрирует не просто отдельные элементы системы, а их непрерывное взаимодействие. Пользователь получает доступ к базе без заметных перебоев, поскольку большинство ошибок устраняется в автоматическом режиме, ещё до того, как они становятся критичными.

Архитектурные подходы и технологии

Самовосстанавливающиеся базы данных строятся на принципе модульности, где каждый компонент выполняет свою роль, но в то же время связан с другими через общий цикл обратной связи. В основе архитектуры лежит система мониторинга, обеспечивающая постоянный контроль над состоянием базы: отслеживаются метрики производительности, ошибки в транзакциях и потенциальные угрозы целостности данных.

Ключевое место занимает диагностический модуль. Он анализирует поступающую информацию и сопоставляет её с нормами работы. Если фиксируются отклонения – будь то перегрузка узла, нарушение согласованности копий или падение отдельного сервиса, – именно здесь принимается решение о необходимости вмешательства [4].

На следующем этапе работы системы задействуется модуль восстановления. Его функции могут варьироваться от относительно простых действий, например повторной записи транзакции, до более комплексных процедур, связанных с перестройкой индексов, созданием новых реплик или даже временным отключением отдельных узлов, если это необходимо для предотвращения дальнейшего развития сбоя. Принципиально важно, что все эти процессы выполняются автоматически, без непосредственного участия администратора.

После завершения корректирующих операций изменения фиксируются в согласованном хранилище. Это обеспечивает пользователям доступ исключительно к целостной и актуальной информации, даже если внутри системы в данный момент происходило восстановление. Подобный механизм позволяет базе данных оставаться работоспособной даже в условиях неисправностей, скрывая от внешних пользователей внутренние сбои и сохраняя стабильность сервисов.

В итоге архитектуру самовосстанавливающихся баз данных можно рассматривать как единый замкнутый контур, включающий мониторинг,

диагностику и автоматизированное устранение ошибок. Такая организация не только обеспечивает своевременное реагирование на возникающие проблемы, но и способствует повышению общей устойчивости системы, так как она постепенно «учится» на собственных ошибках и адаптируется к изменяющимся условиям эксплуатации.

Применение в современных СУБД

Функционирование self-healing базы данных основано на непрерывном цикле, в котором соединяются процессы наблюдения, диагностики и восстановления. В отличие от традиционных решений, где администратор выявляет и устраняет сбой вручную, здесь весь процесс замыкается внутри самой системы и протекает в автоматическом режиме.

Работа цикла начинается с мониторинга. В реальном времени собираются данные о транзакциях, задержках, распределении нагрузки и других характеристиках. Эти сведения служат базой для анализа. Далее поток информации поступает в диагностический блок, где система выявляет потенциальные отклонения: от временной перегрузки до повреждения данных. Важным моментом является то, что диагностика не только фиксирует факт сбоя, но и определяет его масштаб и возможные последствия.

После анализа активируется модуль восстановления. В зависимости от ситуации запускаются разные сценарии: повтор транзакции, переключение на резервный сервер, репликация или исправление несогласованных данных. Если ошибка критическая, модуль может временно ограничить доступ к части функций, сохранив при этом общее функционирование системы.

Завершив восстановление, система возвращается в исходное состояние и снова переходит к этапу мониторинга. Таким образом формируется замкнутый цикл, позволяющий не только исправлять сбои, но и предотвращать их накопление.

Подобный подход делает базу данных способной работать стабильно даже в условиях высокой нагрузки и частых ошибок. Пользователь же практически не замечает происходящих внутри процессов, поскольку система поддерживает согласованность и доступность данных автоматически.

Будущее self-healing баз данных

Перспективы развития самовосстанавливающихся баз данных напрямую связаны с ростом сложности информационных систем и возрастающими требованиями к их бесперебойной работе. В ближайшие годы ключевым

направлением станет интеграция таких систем с искусственным интеллектом. Использование машинного обучения позволит не только фиксировать уже случившиеся сбои, но и предсказывать их возникновение на основе анализа накопленных данных. Это откроет возможность перехода от реактивного восстановления к проактивному предотвращению ошибок.

Вторым важным направлением можно назвать развитие облачных и распределённых архитектур. В условиях, когда данные всё чаще хранятся на множестве узлов в разных географических точках, способность системы к самовосстановлению приобретает особую ценность. Здесь self-healing механизмы будут выполнять роль «клея», поддерживающего согласованность и непрерывность доступа, несмотря на сбои в отдельных узлах.

Не менее значимым трендом является усиление требований к безопасности. В будущем самовосстанавливающиеся базы данных должны будут автоматически реагировать не только на технические сбои, но и на попытки несанкционированного доступа или нарушения целостности информации. Это приведёт к появлению гибридных решений, сочетающих традиционные механизмы безопасности с интеллектуальными алгоритмами восстановления.

Кроме того, вероятно появление стандартов и протоколов, обеспечивающих взаимодействие self-healing систем между собой. Это особенно актуально для корпоративных и государственных структур, где различные базы данных объединяются в сложные экосистемы.

Таким образом, будущее self-healing баз данных связано с их превращением в интеллектуальные системы, способные учиться, адаптироваться и обеспечивать не только восстановление, но и устойчивое развитие всей инфраструктуры хранения данных.

На иллюстрации показана концепция самовосстанавливающихся баз данных (self-healing DB), в которой особое внимание уделяется двум основным направлениям — обеспечению безопасности и автоматизации процессов.

Защищённость.

Подобные системы изначально проектируются так, чтобы минимизировать последствия сбоев, ошибок в записях и попыток внешнего вмешательства. Встроенные механизмы позволяют автоматически выявлять нестандартные ситуации: повреждённые транзакции, подозрительные обращения или нарушения прав доступа. После обнаружения отклонений база

данных запускает корректирующие процедуры — от восстановления информации с резервных копий до применения алгоритмов исправления ошибок. Всё это происходит без необходимости ручного вмешательства администратора, что повышает устойчивость и сокращает время простоя.

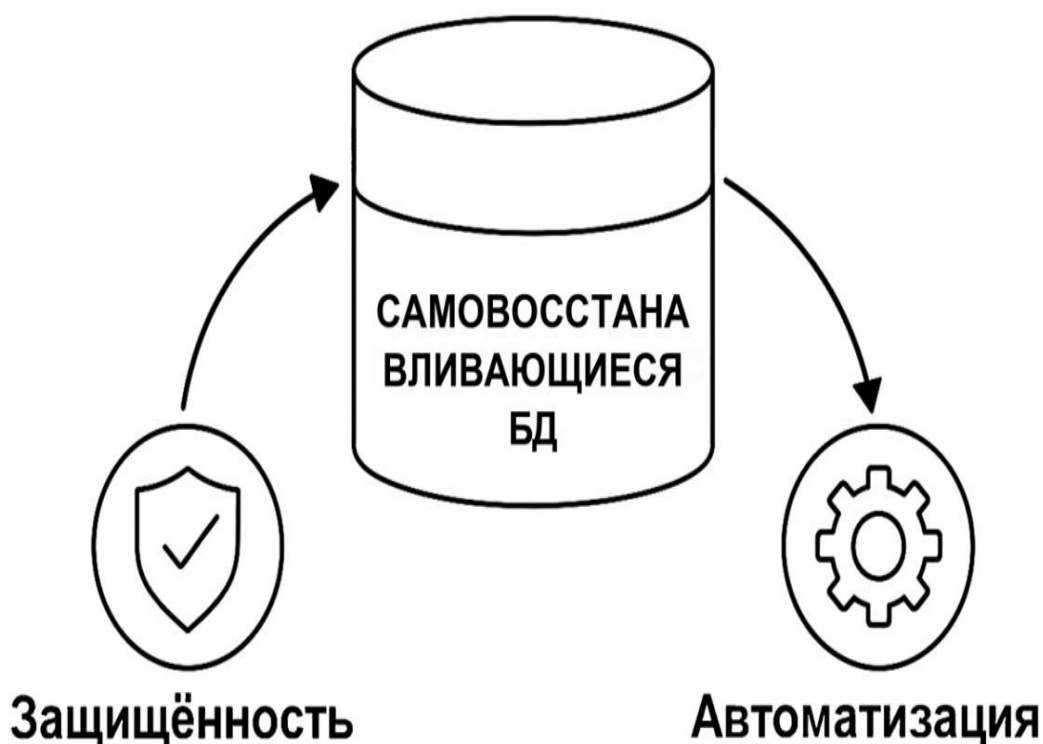


Рисунок 2— Будущее self-healing баз данных

Автоматизация.

Другим ключевым элементом концепции выступает автоматизация. В self-healing системах именно она обеспечивает постоянный контроль: база данных непрерывно отслеживает собственное состояние, анализирует журналы событий, производительность и другие параметры. Это позволяет не только быстро реагировать на возникающие проблемы, но и предупреждать их развитие на ранней стадии.

При обнаружении проблем (например, утечки памяти или замедления запросов) она самостоятельно применяет заранее настроенные сценарии

исправления: перезапускает службы, перераспределяет ресурсы или даже меняет конфигурацию на лету [5].

Как это работает в целом

1. Мониторинг: Система отслеживает работоспособность компонентов БД в реальном времени.

2. Диагностика: используются алгоритмы машинного обучения или правила для выявления отклонений.

3. Реакция: В зависимости от типа проблемы выбирается стратегия восстановления – откат транзакций, переключение на резервный узел и т.д.

4. Верификация: после устранения сбоя проверяется, что данные корректны, а производительность восстановлена.

Такие системы особенно востребованы в облачных средах и распределённых базах данных, где ручное управление затруднено. Их развитие – часть тренда на автономные ИТ-системы, минимизирующие простои и человеческие ошибки.

Self-healing базы данных представляют собой новый шаг в развитии информационных технологий. Их внедрение позволит сократить время простоев, снизить затраты и повысить уровень доверия к цифровым инфраструктурам. Однако для массового распространения необходимо решить ряд технических и организационных задач, включая стандартизацию протоколов, интеграцию с ИИ и повышение энергоэффективности.

Список литературы

1. Stonebraker, M. Readings in Database Systems / M. Stonebraker, J. Hellerstein. – 5th ed. – MIT Press, 2023. – 620 p.
2. Garcia-Molina, H. Database Systems: The Complete Book / H. Garcia-Molina, J. Ullman, J. Widom. – 2nd ed. – Pearson, 2024. – 1248 p.
3. Иванов, Е. П. Самовосстанавливающиеся базы данных: концепции и перспективы / Е. П. Иванов // Информационные технологии. – 2023. – № 4. – С. 45–52. – EDN XCVBNM.
4. Oracle Corporation. Autonomous Database [Electronic resource]. – URL: <https://www.oracle.com/autonomous-database/> (датаобращения: 17.08.2025).
5. Microsoft SQL Server Always On. – URL: <https://learn.microsoft.com/sql/sql-server/> (датаобращения: 17.08.2025).

References

1. Stonebraker, M., & Hellerstein, J. Readings in Database Systems (5th ed.). MIT Press, 2023. – 620 p.
2. Garcia-Molina, H., Ullman, J., & Widom, J. Database Systems: The Complete Book (2nd ed.). Pearson, 2024. – 1248 p.
3. Ivanov, E. P. Self-Recovering Databases: Concepts and Prospects. Information Technologies, 2023, No. 4, pp. 45–52. – EDN XCVBNM.
4. Oracle Corporation. Autonomous Database [Electronic resource]. Available at: <https://www.oracle.com/autonomous-database/> (accessed August 17, 2025).
5. Microsoft. SQL Server Always On. Available at: <https://learn.microsoft.com/sql/sql-server/> (accessed August 17, 2025).