

УДК 33

DOI: 10.34670/AR.2026.36.47.049

Экономическая эффективность применения CRC-кодов в цифровой инфраструктуре информационной безопасности

Грушицын Александр Степанович

Преподаватель кафедры информационной безопасности,
Университет «Синергия»,
125190, Российская Федерация, Москва, Ленинградский просп., 80, корп. Г;
e-mail: nicifor@bk.ru

Аннотация

В статье исследуется экономическая роль циклических избыточных кодов (CRC) в обеспечении целостности и достоверности данных в современных цифровых системах. Рассматривается механизм работы CRC как экономически эффективного превентивного инструмента, основанного на алгоритме полиномиального деления с минимальными вычислительными затратами. Подчёркивается, что низкая капиталоемкость и операционные издержки внедрения CRC контрастируют с высоким уровнем предотвращаемых финансовых рисков, связанных с ошибками передачи и хранения информации. Детально анализируются ключевые каналы формирования экономической ценности технологии: снижение издержек за счёт аппаратной оптимизации, минимизация рисков операционных простоев в критических отраслях и предотвращение каскадных сбоев. На примерах промышленной автоматизации, систем хранения данных, энергетики и встроенных систем демонстрируется, как применение CRC способствует повышению надёжности технологических процессов, сокращению затрат на обслуживание и обеспечению устойчивости бизнес-процессов. Делается вывод о трансформации CRC из технического стандарта в стратегический актив управления экономическими рисками, необходимый для обеспечения конкурентоспособности и операционной непрерывности в условиях цифровой трансформации экономики. Исследование обосновывает необходимость учёта экономического эффекта от внедрения базовых технологий контроля целостности данных при проектировании комплексных систем информационной безопасности и цифровой инфраструктуры предприятий.

Для цитирования в научных исследованиях

Грушицын А.С. Экономическая эффективность применения CRC-кодов в цифровой инфраструктуре информационной безопасности // Экономика: вчера, сегодня, завтра. 2025. Том 15. № 12А. С. 603-610. DOI: 10.34670/AR.2026.36.47.049

Ключевые слова

Циклические избыточные коды (CRC), экономическая эффективность, управление рисками, целостность данных, операционные издержки, цифровая экономика, промышленная автоматизация, надёжность систем, информационная безопасность, затраты на внедрение.

Введение

Современная экономическая деятельность, от глобальных финансовых транзакций до управления критической промышленной инфраструктурой, необратимо зависит от бесперебойного и точного функционирования цифровых систем. В этом контексте целостность данных трансформируется из сугубо технического параметра в фундаментальный экономический фактор, напрямую влияющий на рентабельность, конкурентоспособность и устойчивость предприятий. Сбои в передаче или хранении цифровой информации могут спровоцировать каскад негативных последствий: от локальных ошибок в учёте ресурсов до полномасштабных остановок производственных линий, масштабных финансовых потерь и ущерба репутации. В свете этого задача обеспечения достоверности данных требует не только технологических, но и экономически обоснованных решений, где соотношение затрат на внедрение и потенциальной выгоды от предотвращения потерь является ключевым критерием выбора. Именно здесь циклические избыточные коды (CRC) утвердились в качестве одного из наиболее экономически эффективных и повсеместно применяемых механизмов верификации целостности данных. Их повсеместная интеграция в коммуникационные протоколы, системы хранения и промышленные интерфейсы демонстрирует, как элегантная математическая модель, отличающаяся низкой вычислительной сложностью, способна генерировать существенную экономическую ценность, минимизируя издержки, связанные с ошибками передачи, порчей информации и необходимостью ресурсоёмких повторных операций.

Основная часть

Экономическая логика использования CRC-кодов коренится в их алгоритмической природе и особенностях реализации. CRC представляет собой алгоритм вычисления контрольной суммы, основанный на принципах полиномиального деления в конечных полях. Данные, рассматриваемые как длинная битовая последовательность, интерпретируются как коэффициенты полинома, который делится на заранее выбранный стандартизированный полином-генератор. Остаток от этого деления, собственно, и формирует CRC-код, который передаётся или хранится вместе с исходными данными. Последующая проверка, выполняемая получателем или при чтении, позволяет с высокой вероятностью обнаружить случайные искажения битов, вызванные помехами в каналах связи, сбоями аппаратного обеспечения или ошибками при копировании. Ключевым с экономической точки зрения является тот факт, что, несмотря на математическую глубину, лежащую в основе алгоритма, его практическая реализация достигла крайней степени оптимизации. Затраты на внедрение CRC-кодов, будь то в программном обеспечении или, что особенно показательным, на уровне аппаратного обеспечения (ASIC, FPGA, специализированные блоки в сетевых контроллерах и микроконтроллерах), пренебрежимо малы. Эта низкая капиталоемкость технологии контрастирует с масштабом финансовых рисков, которые она помогает нивелировать, делая CRC классическим примером высокорентабельного превентивного решения.

Экономические преимущества CRC-кодов проявляются через несколько взаимосвязанных каналов, формирующих совокупный положительный эффект. Во-первых, это существенное снижение операционных издержек. Вычислительная эффективность алгоритма, особенно в его аппаратной реализации, минимизирует потребление ресурсов центрального процессора и энергопотребление. В отличие от более сложных криптографических хеш-функций, требующих

значительных вычислительных мощностей, CRC может рассчитываться «на лету» с минимальными задержками, что критически важно для систем реального времени. Во-вторых, высокая скорость обработки данных, обеспечиваемая аппаратными ускорителями, позволяет применять проверку целостности в высокоскоростных сетях и шинах передачи данных без создания узких мест в производительности. Например, современные реализации CRC-32 способны поддерживать линии связи со скоростью 10 Гбит/с и выше, что является обязательным условием для таких областей, как высокочастотный трейдинг, обработка больших данных в реальном времени или управление высокоскоростными промышленными роботами. Таким образом, технология не становится экономическим бременем, а органично встраивается в инфраструктуру, не требуя её дорогостоящего апгрейда.

В-третьих, и это, возможно, наиболее весомый экономический аргумент, применение CRC-кодов ведёт к существенному снижению рисков операционных простоев и распространения ошибок. В сложных цифровых экосистемах повреждённый фрагмент данных, будь то команда управляющему устройству, финансовая транзакция или блок файловой системы, может вызвать каскадный сбой. Своевременное обнаружение ошибки на месте её возникновения с помощью CRC позволяет отклонить повреждённый пакет или блок и запросить его повторную передачу, предотвращая проникновение искажённой информации в глубинные бизнес-процессы. Это сокращает время, затрачиваемое на последующую диагностику, отладку и восстановление корректного состояния системы, что напрямую транслируется в сокращение затрат на техническую поддержку и уменьшение потерь от простоя. В некоторых отраслях, таких как автоматизированное производство или энергетика, стоимость одной минуты прохода может исчисляться десятками тысяч долларов, и даже незначительное повышение надёжности передачи данных за счёт CRC приносит ощутимую финансовую выгоду.

Пример расчёта экономической выгоды

Пример использования CRC-32 при оптимизации добычи углеводородов [Кудрявцев, Енгальцев, Кашапов, 2011]:

- Проверка данных с датчиков - CRC-32 используется для контроля передачи информации от скважин, насосов и клапанов по сетям связи (Modbus, CAN и др.).
- Системы измерений нефти CRC-32 помогает проверять корректность данных о количестве и качестве нефти.
- CRC-32 поддерживает целостность больших массивов данных при численном моделировании процессов добычи

Таблица 1 - Сравнение кодов коррекции ошибок при оптимизации добычи углеводородов

Код	Достоинства	Недостатки
CRC	Обнаружение 99% ошибок	Не исправляет ошибки
Хемминга (алгоритм контроля ошибок, который обнаруживает и исправляет один ошибочный бит в данных с помощью добавления контрольных битов.)	Исправляет однократные ошибки	Не обнаруживает множественные ошибки
Рида-Соломона (алгоритм помехоустойчивого кодирования, исправляющий ошибки и потери данных (например, в QR-кодах, CD/DVD, спутниковой связи).	Исправляет байтовые ошибки	Сложная реализация
Файра (для обнаружения и исправления пакетных ошибок (групп искажённых бит подряд) в цифровых системах связи.)	Исправляет пакетные ошибки	Обнаруживает только 70% ошибок

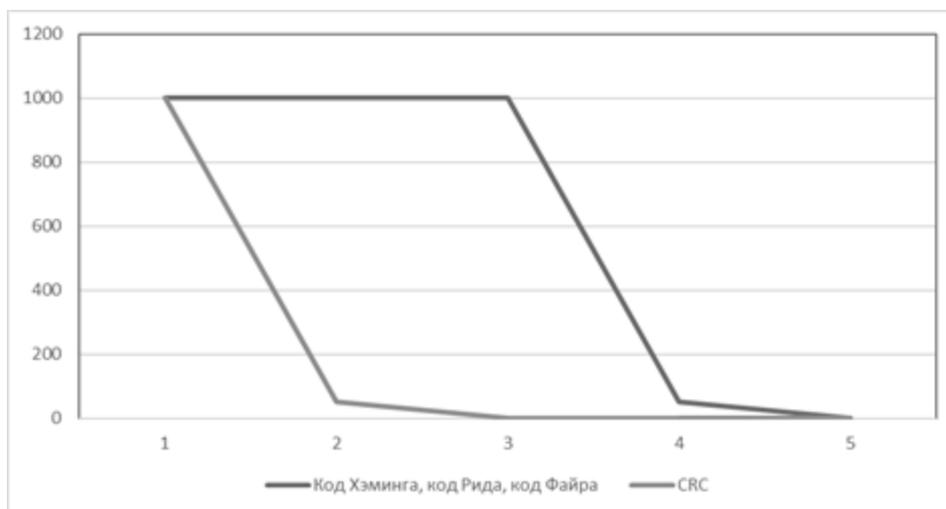


Рисунок 1- CRC-32 при оптимизации добычи углеводородов

Области экономически значимого применения CRC-кодов охватывают практически весь спектр современной индустрии. В промышленной автоматизации, выступающей основой Индустрии 4.0, CRC является неотъемлемой частью таких протоколов, как Modbus RTU/TCP, CAN (Controller Area Network) и Profibus. Эти протоколы обеспечивают обмен данными между датчиками, программируемыми логическими контроллерами (ПЛК) и системами SCADA. Целостность сигналов от датчика давления, температуры или положения механизма напрямую определяет корректность управляющих воздействий. Ошибка в данных может привести к выпуску бракованной продукции, повреждению оборудования или даже к аварийной ситуации, влекущей за собой колоссальные расходы на ремонт, компенсации и приостановку деятельности. CRC выступает в роли экономического страхового механизма, обеспечивающего достоверность этого обмена с минимальными накладными расходами.

В сфере хранения и управления данными экономический эффект от применения CRC проявляется через предотвращение тихих повреждений данных — ситуации, когда информация на диске меняется без ведома системы. Файловые системы нового поколения, такие как ZFS и Vtrfs, используют CRC (или более мощные контрольные суммы на его основе) на уровне каждого блока данных. Это позволяет не только обнаруживать ошибки при чтении, но и точно идентифицировать их источник, осуществляя автоматическое восстановление из избыточных копий или зеркал. С экономической точки зрения это минимизирует риск потери критически важной бизнес-информации, архивных данных или результатов интеллектуального труда, снижая зависимость от частого и дорогостоящего полного резервного копирования и сокращая время восстановления после сбоев носителей. На уровне центров обработки данных это напрямую влияет на показатели доступности сервисов и совокупную стоимость владения инфраструктурой.

Энергетический и нефтегазовый сектор, где учёт ресурсов и контроль над технологическими процессами имеют не только экономическое, но и фискальное значение, также активно полагается на механизмы контроля целостности. Системы коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ) или узлы учёта добычи и транспортировки нефти и газа передают огромные массивы измерительной и телеметрической информации. Искажение даже одного показателя в накладной или отчёте для регулятора может привести к существенным финансовым потерям, штрафам и репутационным издержкам. Применение CRC-32 в каналах

передачи этой информации обеспечивает необходимый уровень доверия к данным, легитимизируя их для использования в биллинговых системах и финансовых расчётах.

Отдельного внимания заслуживает экономика встроенных систем и интернета вещей (IoT). Миллиарды микроконтроллеров, развёрнутых в удалённых и часто труднодоступных местах — от умных счётчиков в домах до датчиков влажности на сельскохозяйственных полях, — работают в условиях ограниченных вычислительных ресурсов, энергопотребления и без постоянного подключения к сети. Для таких устройств сложные протоколы коррекции ошибок или постоянные сеансы перепроверки данных экономически нецелесообразны из-за высоких накладных расходов на передачу и обработку. CRC, с его минимальной вычислительной «следом» и способностью к эффективной аппаратной реализации, становится оптимальным решением по критерию «стоимость — надёжность — энергоэффективность», продлевая срок автономной работы устройств и снижая затраты на их обслуживание.

Циклические избыточные коды представляют собой блестящий пример технологической инновации, чья экономическая эффективность обусловила её повсеместное и часто невидимое для конечного пользователя распространение. Они функционируют как «тихие стражи» цифровой экономики, обеспечивая фундаментальную основу доверия к данным. Низкие капитальные и операционные затраты на их внедрение создают исключительно высокий барьер для выбора альтернатив в подавляющем большинстве приложений, не требующих криптографической стойкости. В условиях растущей зависимости мировой экономики от безупречного функционирования цифровой инфраструктуры, роль таких простых, надёжных и экономичных механизмов обеспечения целостности будет лишь возрастать. Их применение позволяет компаниям и отраслям не только минимизировать прямые убытки от ошибок, но и создавать более устойчивые, предсказуемые и эффективные бизнес-процессы, что в конечном итоге контрибутирует в общую производительность и технологический суверенитет экономических систем. Таким образом, CRC трансцендирует свою первоначальную техническую сущность, становясь значимым инструментом управления экономическими рисками в цифровую эпоху.

Заключение

Циклические избыточные коды (CRC) представляют собой фундаментальный технологический компонент, органично интегрированный в экономический каркас цифровой эпохи. Их экономическая значимость проистекает не из сложности алгоритма, а, напротив, из его исключительной вычислительной эффективности и низкой стоимости внедрения, что создаёт беспрецедентное соотношение инвестиций к достигаемому снижению рисков. Анализ подтверждает, что CRC функционируют как универсальный и экономически оптимальный механизм управления операционными рисками, связанными с нарушением целостности данных.

Ключевой экономической вывод заключается в том, что CRC минимизируют издержки на нескольких уровнях. На микроуровне они снижают прямые операционные расходы за счёт низкого энергопотребления и минимальной нагрузки на вычислительные ресурсы. На мезоуровне — предотвращают существенные убытки от простоев производств, порчи оборудования и выпуска бракованной продукции, обеспечивая стабильность технологических процессов. На макроуровне — способствуют надёжности критической инфраструктуры (энергетика, транспорт, связь), что является основой для устойчивого экономического роста.

Экономическая устойчивость CRC как решения базируется на его адаптивности: от высокоскоростных центров обработки данных до автономных датчиков с ограниченным ресурсом. Эта универсальность обеспечивает его повсеместное внедрение, создавая невидимый, но крайне важный слой защиты финансовых транзакций, промышленных операций и систем учёта. В отличие от многих дорогостоящих технологий обеспечения надёжности, CRC предлагает стратегию превентивной экономии, где незначительные регулярные затраты на верификацию данных предотвращают катастрофические, хотя и вероятностные, потери.

Следовательно, CRC следует рассматривать не просто как технический стандарт, а как экономический актив, встроенный в цифровые системы. Их роль выходит за рамки обнаружения ошибок; они являются гарантом операционной непрерывности, фактором снижения стоимости владения информационными системами и, в конечном счёте, инструментом повышения общей конкурентоспособности экономических субъектов. В мире, где данные стали новым критическим ресурсом, обеспечение их неизменности с помощью экономически эффективных методов, подобных CRC, остаётся необходимым условием цифровой трансформации и экономической стабильности.

Библиография

1. Назаров Л. Е. -Исследование помехоустойчивости оптимального посимвольного приёма частотно-эффективных сигналов с корректирующим кодированием в недвоичных полях Галуа // «Радиотехника и электроника», 2023, т. 68, №9.
2. Кудрявцев А.В., Енгальчев И.Р., Кашапов А.Р. -Применение помехозащищённого кодирования для повышения целостности информации погружной телеметрии- // Молодой учёный, № 1 (24), 2011.
3. Tanenbaum, A.S., Wetherall, D.J. -Computer Networks-. 5th ed. – Pearson, 2011. (Раздел о контроле ошибок и экономике сетевых протоколов)
4. Stallings, W. -Data and Computer Communications-. 10th ed. – Pearson, 2014. (Оценка затрат на реализацию механизмов контроля данных)
5. Meenan R. T. et al. A cost-effectiveness analysis of a colorectal cancer screening program in safety net clinics //Preventive medicine. – 2019. – Т. 120. – С. 119-125.
6. Opala O. J. An analysis of security, cost-effectiveness, and it compliance factors influencing cloud adoption by it managers : дис. – Capella University, 2012.
7. Xing Q., Gong F., Tang W. Cost-effectiveness analysis of colonoscopy and fecal immunochemical testing for //Population Medicine and Health Economics. – 2024. – С. 53.
8. Cross A. J. et al. Faecal immunochemical tests (FIT) versus colonoscopy for surveillance after screening and polypectomy: a diagnostic accuracy and cost-effectiveness study //Gut. – 2019. – Т. 68. – №. 9. – С. 1642-1652.
9. Barré S. et al. Cost-effectiveness analysis of alternative colon cancer screening strategies in the context of the French national screening program //Therapeutic Advances in Gastroenterology. – 2020. – Т. 13. – С. 1756284820953364.
10. Nasr E. et al. Modernizing Colorectal Cancer Care With Artificial Intelligence: Real-Time Detection, Radiomics, and Digital Pathology //Cureus. – 2025. – Т. 17. – №. 10.

Economic Efficiency of Using CRC Codes in the Digital Infrastructure of Information Security

Aleksandr S. Grushitsyn

Lecturer, Department of Information Security,
Synergy University,
125190, 80, bldg. G, Leningradskiy ave., Moscow, Russian Federation;
e-mail: nicifor@bk.ru

Abstract

The article examines the economic role of Cyclic Redundancy Check (CRC) codes in ensuring data integrity and reliability in modern digital systems. The mechanism of CRC operation is considered as a cost-effective preventive tool based on a polynomial division algorithm with minimal computational costs. It is emphasized that the low capital intensity and operational costs of implementing CRC contrast with the high level of preventable financial risks associated with errors in data transmission and storage. Key channels for generating the economic value of the technology are analyzed in detail: cost reduction through hardware optimization, minimizing the risks of operational downtime in critical industries, and preventing cascading failures. Using examples from industrial automation, data storage systems, energy, and embedded systems, it is demonstrated how the use of CRC contributes to increasing the reliability of technological processes, reducing maintenance costs, and ensuring business process resilience. The conclusion is drawn about the transformation of CRC from a technical standard into a strategic asset for managing economic risks, necessary for ensuring competitiveness and operational continuity in the conditions of the digital transformation of the economy. The research substantiates the need to consider the economic effect from implementing basic data integrity control technologies when designing comprehensive information security systems and digital enterprise infrastructure.

For citation

Grushitsyn A.S. (2025) Ekonomicheskaya effektivnost' primeneniya CRC-kodov v tsifrovoy infrastrukture informatsionnoy bezopasnosti [Economic Efficiency of Using CRC Codes in the Digital Infrastructure of Information Security]. *Ekonomika: vchera, segodnya, zavtra* [Economics: Yesterday, Today and Tomorrow], 15 (12A), pp. 603-610. DOI: 10.34670/AR.2026.36.47.049

Keywords

Cyclic Redundancy Check (CRC) codes, economic efficiency, risk management, data integrity, operational costs, digital economy, industrial automation, system reliability, information security, implementation costs.

References

1. Nazarov, L.E. (2023). Issledovanie pomekhoustoichivosti optimal'nogo posimvol'nogo priema chastotno-effektivnykh signalov s korrektruiushchim kodirovaniem v nedvoichnykh poliakh Galua [Study of the noise immunity of optimal symbol-by-symbol reception of frequency-efficient signals with error-correcting coding in non-binary Galois fields]. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 68(9), [page range not provided].
2. Kudriavtsev, A.V., Engalychev, I.R., & Kashapov, A.R. (2011). Primenenie pomekhozashchishchennogo kodirovaniia dlia povysheniia tselostnosti informatsii pogruzhnoi telemekhniki [Application of error-protected coding to enhance data integrity in downhole telemetry]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], (1 (24)), [page range not provided].
3. Tanenbaum, A.S., & Wetherall, D.J. (2011). *Computer networks* (5th ed.). Pearson.
4. Stallings, W. (2014). *Data and computer communications* (10th ed.). Pearson.
5. Meenan, R.T., Anderson, M.L., Chubak, J., Fuller, S., & Green, B.B. (2019). A cost-effectiveness analysis of a colorectal cancer screening program in safety net clinics. *Preventive Medicine*, 120, 119-125.
6. Opala, O.J. (2012). *An analysis of security, cost-effectiveness, and IT compliance factors influencing cloud adoption by IT managers* [Doctoral dissertation, Capella University].
7. Xing, Q., Gong, F., & Tang, W. (2024). Cost-effectiveness analysis of colonoscopy and fecal immunochemical testing. *Population Medicine and Health Economics*, 53.
8. Cross, A.J., Wooldrage, K., Robbins, E.C., Kralj-Hans, I., MacRae, E., Piggott, C., ... & von Wagner, C. (2019). Faecal immunochemical tests (FIT) versus colonoscopy for surveillance after screening and polypectomy: a diagnostic accuracy and cost-effectiveness study. *Gut*, 68(9), 1642-1652.

9. Barré, S., Bouée, S., Armant, O., Tuppin, P., Auvray, L., & Emery, C. (2020). Cost-effectiveness analysis of alternative colon cancer screening strategies in the context of the French national screening program. *Therapeutic Advances in Gastroenterology*, 13. <https://doi.org/10.1177/1756284820953364>
10. Nasr, E., Zhang, Y., Omidiji, O., Konaté, A., & Esquivel, J. (2025) Modernizing colorectal cancer care with artificial intelligence: Real-time detection, radiomics, and digital pathology. *Cureus*, 17(10).