

Мухин Антон Алексеевич

аспирант кафедры ВМ-1, Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва.

ORCID: 0009-0002-3615-5007

Электронный адрес: antonzuzz@yandex.ru

Anton A. Mukhin

Postgraduate at the Department of VM-1, National Research University “Moscow Institute of Electronic Technology”, Moscow.

ORCID: 0009-0002-3615-5007

E-mail address: antonzuzz@yandex.ru

ОЦЕНКА ГРАНИЦ ПРИМЕНИМОСТИ MEDIA REDUNDANCY
PROTOCOL ДЛЯ ПРОЦЕССОРНОЙ ШИНЫ IEC 61850
С ОГРАНИЧЕНИЕМ ВРЕМЕНИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ≤ 3 МС

Аннотация. Целью исследования является оценка принципиальной достижимости времени восстановления связи в сети не более 3 мс, основанной на протоколе резервирования Media Redundancy Protocol (MRP). Такое время восстановления необходимо для корректной работы протоколов процессорной шины IEC 61850, включая Generic Object-Oriented Substation Event (GOOSE) и Sampled Values (SV). Методология основана на аналитической формуле времени сходимости MRP, приведенной в стандарте IEC 62439-2. Выполняется параметрический анализ влияния числа узлов в кольце, настроек протокола и характеристик оборудования на достигаемое время восстановления. На основе анализа обоснованы новые допустимые границы параметров MRP, обеспечивающие достижение порога в 3 мс. В ходе экспериментов на реальном оборудовании отражено влияние дополнительных задержек от программной составляющей используемого оборудования.

Ключевые слова: цифровая подстанция, IEC 61850, GOOSE, Sampled Values (SV), Media Redundancy Protocol (MRP), сетевое резервирование, время восстановления.

Для цитирования: Мухин А.А. Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2026. № 1. С. 31–45. DOI: 10.18137/RNUV9187.26.01.P31

ASSESSMENT OF THE LIMITS OF APPLICABILITY OF THE MEDIA
REDUNDANCY PROTOCOL FOR THE IEC 61850 PROCESSOR BUS
WITH A RECOVERY TIME LIMIT OF ≤ 3 MS

Abstract. The purpose of this study is to assess the fundamental feasibility of achieving a network recovery time of no more than 3 ms in a network based on the Media Redundancy Protocol (MRP). Such a recovery time is required for the correct operation of IEC 61850 process bus protocols, including Generic Object-

Oriented Substation Event (GOOSE) and Sampled Values (SV). The methodology is based on the analytical MRP convergence time formula specified in IEC 62439-2. A parametric analysis of the influence of the number of nodes in the ring, protocol configuration parameters, and hardware characteristics on the achievable recovery time is performed. Based on the analysis, new permissible limits of MRP parameters are substantiated to ensure compliance with the 3 ms threshold. The experiments on real hardware reflect the impact of additional delays caused by the software component of the equipment used.

Keywords: digital substation, IEC 61850, GOOSE, Sampled Values (SV), Media Redundancy Protocol (MRP), network redundancy, recovery time.

For citation: Mukhin A.A. (2026) Assessment of the limits of applicability of the Media Redundancy Protocol for the IEC 61850 processor bus with a time limit of ≤ 3 ms. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management*. No. 1. Pp. 31–45. DOI: 10.18137/RNU.V9187.26.01.P.31 (In Russian).

Введение

Современные цифровые подстанции, построенные по стандарту IEC 61850, предъявляют жёсткие требования к надёжности сетевой инфраструктуры и времени восстановления связи при отказах. Технологические сообщения процессной шины – GOOSE и Sampled Values (SV) – требуют детерминированной доставки с задержками и временем восстановления не более нескольких миллисекунд, поскольку нарушение их передачи непосредственно влияет на корректность работы релейной защиты и устойчивость энергосистемы.

Для обеспечения отказоустойчивости широко применяются протоколы сетевого резервирования с нулевым временем восстановления. Однако в промышленной автоматизации, включая энергетику, по-прежнему используется и протокол Media Redundancy Protocol (MRP), имеющий не нулевое время перестройки кольца, обычно составляющее от нескольких до десятков миллисекунд. В стандартной конфигурации MRP не гарантирует достижение порога 3 мс, необходимого для передачи трафика GOOSE и SV, что ограничивает его применение на процессной шине цифровых подстанций.

Актуальность исследования заключается в необходимости количественной оценки пределов применимости MRP в IEC 61850, а именно: может ли протокол обеспечить требуемое время восстановления связи при оптимальном подборе параметров и допустимых размерах кольца, учитывая как нормативные ограничения, так и вероятность потерь служебных пакетов. Нужно отметить, что протокол MRP уже может применяться в IEC 61850 для такого протокола, как MMS, поэтому задача унификации и использования единого протокола резервирования имеет большую актуальность¹.

Цель работы – исследовать возможности протокола MRP по обеспечению времени восстановления порядка 3 мс для трафика GOOSE и SV в сетях цифровых подстанций стандарта IEC 61850. Для достижения цели решаются следующие задачи:

¹ IEC 61850-8-1:2020. Communication networks and systems for power utility automation. – Part 8-1: Specific communication service mapping (SCSM) – Mapping to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2020 // GlobalSpec. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14213148/iec-61850-8-1> (дата обращения: 26.11.2025).

Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol
для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс

- проанализировать нормативные требования IEC 61850 к времени доставки и восстановления сообщений;
- охарактеризовать параметры MRP, влияющие на время сходимости, и представить их в инженерно ориентированном виде;
- оценить вероятность потери управляющих пакетов MRP при различных значениях параметров протокола и обосновать допустимость снижения параметров стандарта IEC 62439-2;
- на основе формулы времени восстановления из IEC 62439-2 вывести аналитическое неравенство, связывающее параметры MRP, число узлов и требуемое время восстановления;
- определить диапазоны параметров и максимальные размеры кольцевой топологии, при которых MRP способен удовлетворить ограничение $T_{rec} \leq 3$ мс для трафика GOOSE и SV;
- провести эксперимент на реальном оборудовании, сравнить результат работы аналитической формулы с результатами эксперимента.

Научная новизна исследования состоит в разработке метода оценки применимости MRP для сетей с определенными требованиями к времени восстановления, а также в количественной оценке вероятности потери служебных пакетов при сниженных значениях параметров протокола. Также показано, что аналитическая формула времени восстановления MRP, приведённая в стандарте IEC 62439-2, фактически определяет нижнюю теоретическую границу времени восстановления сети, тогда как в реальных устройствах существенное влияние оказывают дополнительные задержки программной реализации протокола.

Практическая значимость заключается в формировании инженерных рекомендаций по настройке параметров MRP и выбору предельных размеров кольцевых сетей, при которых протокол может быть безопасно использован на стационарном уровне цифровой подстанции с соблюдением требований по надежности и быстродействию.

В IEC 61850, а именно в протоколах GOOSE и SV, предъявляются жесткие требования к времени доставки/отклика, которое в ряде режимов и классов сообщений должно составлять порядка 3 мс. В случае аварийной ситуации передача таких сообщений может прерываться до восстановления связности сети. Поэтому в данной работе значение $T_{target} = 3$ мс принимается как максимальная длительность перерыва доставки (времени недоступности сервиса) при одиночном отказе. Если доставка прерывается на более длительное время, то это нарушит работу GOOSE/SV [1; 2].

В практике цифровых подстанций широко применяются протоколы абсолютного резервирования, такие как Parallel Redundancy Protocol (PRP) и High-availability Seamless Redundancy (HSR). Эти технологии обеспечивают практически мгновенное переключение и околонулевое время восстановления в передаче трафика при аварии. Это позволяет удовлетворять жестким требованиям к времени восстановления для GOOSE и SV².

² IEC 62439-3:2021. Industrial Communication Networks – High Availability Automation Networks – Part 3: Parallel Redundancy Protocol (PRP) and High-Availability Seamless Redundancy (HSR). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2021 // GlobalSpec. URL: <https://standards.globalspec.com/std/14485579/62439-3> (дата обращения: 26.11.2025).

Media Redundancy Protocol (MRP), определенный в стандарте IEC 62439-2, обеспечивает автоматическое восстановление передачи трафика при разрыве кольца, однако его предельное время восстановления в ряде профилей типично составляет 10 мс. Реализация PRP и HSR, как правило, требует более сложной сетевой топологии, специализированного оборудования и, как следствие, высокой стоимости при создании и поддержке такой сети. В сравнении с ними MRP является более экономичным и простым решением: топология кольца, недорогие коммутационные устройства и простота настройки³.

Однако ограничения по времени восстановления в реализации MRP, описанные в стандарте IEC 62439-2, не позволяют обеспечить выполнения требования времени схожимости 3 мс⁴.

Характеризация параметров MRP и их влияние на время восстановления сети

Процесс восстановления связности в кольце MRP при возникновении разрыва происходит в несколько этапов.

1. *Детектирование разрыва кольца.* Менеджер кольца периодически отправляет тестовые пакеты MRP_{testT} . Если в течение $MRP_{testMAX}$ интервалов подтверждение не получено, фиксируется нарушение целостности кольца. Данный этап формирует первое слагаемое формулы (1).

2. *Передача служебных сообщений по кольцу.* После обнаружения разрыва управляющий пакет распространяется по всем узлам кольца. На каждом узле возникает задержка обработки и коммутации пакета, определяемая параметрами T_{switch} , T_{bit} , T_{queue} и T_{line} . Суммарная задержка зависит от числа устройств N и формирует второе слагаемое формулы (1).

3. *Обновление таблиц коммутации.* После изменения топологии устройства должны обновить MAC-таблицы, что требует времени T_{FDB} . Данный этап соответствует третьему слагаемому формулы (1).

4. *Рассылка уведомлений о смене топологии.* Для завершения процедуры восстановления узлы передают уведомления о смене топологии с интервалом MRP_{chgT} . Общее число таких сообщений определяется параметром MRP_{chgMAX} . Этот процесс формирует четвертое слагаемое формулы (1).

$$T_{rec} = MRP_{testT} \times MRP_{testMAX} + 2N(T_{switch} + T_{queue} + T_{bit} + T_{line}) + T_{FDB} + MRP_{chgT} \times MRP_{chgMAX}. \quad (1)$$

Здесь T_{rec} – время восстановления сети при отказе. Во всех слагаемых формулы (1) время выражено в миллисекундах. Все параметры формулы характеризуются в Таблице 1.

³ ISO/IEC 11801-1:2017. Information technology – Generic cabling for customer premises – Part 1: General requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. // ISO. URL: <https://www.iso.org/standard/66182.html> (дата обращения: 15.11.2025).

⁴ IEC 62439-2:2022. Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 2: Media Redundancy Protocol (MRP). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022. // GlobalSpec. URL: <https://standards.globalspec.com/std/10001077/IEC%2062439-2> (дата обращения: 26.11.2025).

Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol
для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс

Таблица 1

Параметры формулы для вычисления T_{rec} и их характеристика

Параметр	Название	Описание и диапазон значений	Чем регулируется
MRP_{testT}	Интервал тестовых пакетов	Период между пакетами контроля целостности кольца, типично 1... 50 мс (по умолчанию 20 мс) ⁵	Задается профилем стандарта
$MRP_{testMAX}$	Макс. число пропусков тестовых пакетов	Количество подряд потерянных тестовых пакетов до фиксации обрыва (3 пакета по умолчанию) ⁶	Задается профилем стандарта
N	Количество узлов кольца	Общее число устройств в кольце не более 50 ⁷	Определяется топологией сети. Ограничивается стандартом
T_{switch}	Задержка коммутации	Задержка прохождения пакета через коммутатор (0,01 мс) ⁸	Определяется оборудованием
T_{queue}	Очередь передачи	Время задержки при переполнении очереди; для MRP должно быть ≈ 0 мкс ⁹	Определяется приоритетом пакетов
T_{bit}	Передача одного бита	Время передачи одного MRP пакета при 100 Мбит/с ($\approx 5,12$ мкс) ¹⁰	Определяется скоростью линии
T_{line}	Задержка распространения	Время распространения сигнала в медном кабеле ($\approx 0,5$ мкс на 100 м) ¹¹	Определяется длиной кабеля
T_{FDB}	Обновление MAC-таблицы	Время обновления таблицы коммутации после смены топологии (0,5 мс) ¹²	Определяется аппаратной реализацией устройства
MRP_{chgT}	Задержка уведомления о смене топологии	Минимальное время ожидания после смены топологии (0,5... 20 мс) ¹³	Задается профилем стандарта
MRP_{chgMAX}	Количество уведомлений о смене топологии	Число уведомлений о смене топологии до завершения восстановления (3 пакета по умолчанию) ¹⁴	Задается профилем стандарта

Источник: здесь и далее таблицы составлены автором.

⁵ Там же.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

⁸ Siemens AG. Network Concepts for Industrial Automation Networks. Frankfurt am Main: Siemens Industry Online Support, 2025. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109802750> (дата обращения: 15.11.2025).

⁹ IEC 62439-2:2022. Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 2: Media Redundancy Protocol (MRP). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022. // GlobalSpec. URL: <https://standards.globalspec.com/std/10001077/IEC%2062439-2> (дата обращения: 26.11.2025).

¹⁰ Там же; Dordal P.L. 2.3: 100 Mbps (Fast) Ethernet // LibreTexts. 2020. URL: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Computer_Science/Networks/An_Introduction_to_Computer_Networks_\(Dordal\)/02%3A_Ethernet/2.03%3A_100_Mbps_\(Fast\)_Ethernet](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Computer_Science/Networks/An_Introduction_to_Computer_Networks_(Dordal)/02%3A_Ethernet/2.03%3A_100_Mbps_(Fast)_Ethernet) (дата обращения: 15.11.2025).

¹¹ ISO/IEC 11801-1:2017. Information technology – Generic cabling for customer premises – Part 1: General requirements. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2017. // ISO. URL: <https://www.iso.org/standard/66182.html> (дата обращения: 15.11.2025).

¹² IEC 62439-2:2022. Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 2: Media Redundancy Protocol (MRP). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022. // GlobalSpec. URL: <https://standards.globalspec.com/std/10001077/IEC%2062439-2> (дата обращения: 26.11.2025).

¹³ Там же.

¹⁴ Там же.

Часть параметров задается стандартом MRP, часть – топологией сети и характеристиками оборудования. В данной статье особый интерес представляют именно те параметры, которые задаются профилем стандарта, а не определяются строго физикой процессов.

Следует отметить, что выражение (1) описывает время восстановления, исходя из параметров протокола и аппаратных характеристик оборудования (задержки коммутации, передачи и распространения сигнала). При этом формула не учитывает дополнительные задержки, возникающие в программной реализации протокола в сетевых устройствах, такие как планирование задач операционной системы, обработка событий и джиттер программных таймеров. В реальных устройствах данные факторы могут вносить дополнительную задержку, особенно заметную при малых значениях целевого времени восстановления.

Определение значений параметров метода, обеспечивающего требуемое время восстановления кольца в MRP

Для оценки минимально возможного времени T_{rec} необходимо определить минимально допустимые значения параметров, задающихся профилем стандарта MRP. На основе выводов проведенной выше характеристики в статье рассматривается минимизация следующих параметров: MRP_{chgMAX} , $MRP_{testMAX}$, MRP_{chgT} , MRP_{testT} .

MRP_{chgT} и MRP_{testT} – это интервалы отправки пакетов. В стандарте IEC 62439-2 минимально допустимые интервалы отправки пакетов 0,5 мс, поэтому вполне адекватно ограничить снизу эти параметры до 0,5 мс. Использование меньших интервалов требует дополнительных исследований¹⁵.

Параметры MRP_{chgMAX} и $MRP_{testMAX}$ определяют, соответственно, число уведомлений о смене топологии и число последовательных пропущенных тестовых пакетов, после которых фиксируется разрыв. Уменьшение этих параметров уменьшает вклад соответствующих слагаемых в выражение для T_{rec} , однако повышает риск ложного срабатывания при потере служебных пакетов. Для анализа этого риска рассмотрим вероятность потери пакетов при их передаче.

Вероятность потери управляющих пакетов в MRP

Обычно потери пакетов в сети связаны с переполнением буферов сетевых устройств. Протокол MRP подразумевает приоритизацию управляющего трафика, поэтому для него рассматриваются только ошибки во время передачи пакетов по линии. Остальные ошибки передачи трафика не должны касаться пакетов MRP из-за их высокой приоритизации в сети.

В литературе используется понятие BER (bit error rate) – вероятность искажения бита при передаче. В нормативных документах IEEE он принимается за 10^{-12} [3].

Предположим независимые битовые ошибки при передаче данных по линии связи. Тогда для пакета длиной L бит вероятность того, что в нём возникнет хотя бы одна битовая ошибка (и, следовательно, пакет будет отброшен),

$$Pferr = 1 - (1 - BER)^L \approx BER \cdot L.$$

¹⁵ Там же.

Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol
для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс

Значение верно, поскольку $BER = 10^{-12}$, а L для управляющих MRP пакетов имеет равный 512 бит¹⁶. Если пакет проходит путь через N независимых линий, то вероятность его потери

$$P_{fpath}(N) = 1 - (1 - Pferr)^N = 1 - (1 - BER \cdot L)^N \approx N \cdot BER \cdot L.$$

В статье [4] исследовалось влияние дубликатов на вероятность потерь пакетов. Если одно и то же сообщение передается несколько раз и считается успешно доставленным при получении хотя бы одной копии, то вероятность логической потери сообщения определяется как вероятность потери всех дублей:

$$P_{loss}(m) = (P_{path}(N))^m,$$

где m – число дубликатов.

В протоколе MRP дублирование служебных пакетов происходит в двух формах. Во-первых, каждый служебный пакет отправляется одновременно в двух противоположных направлениях кольца MRP. Это обеспечивает две независимые копии сообщения. Во-вторых, стандарт задает параметры MRP_{chgMAX} и $MRP_{testMAX}$ определяющие число повторов служебного пакета¹⁷.

Таким образом, логическое сообщение передается $2k$ раз, где k – количество дублей согласно параметрам стандарта, а множитель 2 отражает два направления в кольце. Отсюда итоговая вероятность логической потери служебного сообщения

$$P_{mrp_{loss}}(k) = (P_{fpath}(N))^{2k}.$$

Для инженерных расчётов важно оценивать не саму вероятность единичной ошибки, а среднее время до возникновения такой ошибки. Среднее время до аварии (Mean Time Between Failures) в секундах

$$T_{2k} = \frac{1}{f \cdot (P_{fpath}(N))^{2k}}. \tag{2}$$

Проведем оценку среднего времени до потери служебного сообщения на основании формулы (2). Стандарт IEC-62439-2 ограничивает размер кольца значением $N = 50$. Частота $f = 2000$ для интервала отправки пакетов 0,5 мс, выбранного ранее.

Выполним расчет для трех характерных значений, соответствующих практической настройке MRP, и покажем в Таблице 2.

Таблица 2

Зависимость среднего времени до потери MRP пакета от числа копий

k	Число копий ($2k$)	T , сек.	T , лет
1	2	$7,6 \cdot 10^{11}$	$2,4 \cdot 10^4$
2	4	$1,2 \cdot 10^{27}$	$3,7 \cdot 10^{19}$
3	6	$1,8 \cdot 10^{42}$	$5,6 \cdot 10^{34}$

Даже минимальное значение $k = 1$ обеспечивает среднее время до потери служебного сообщения, значительно превышающее срок эксплуатации оборудования. При $k = 2$ и $k = 3$ вероятность аварии практически исчезает.

¹⁶ Там же.

¹⁷ Там же.

Таким образом, значения параметров MRP_{chgT} и MRP_{testT} ограничены временем 0,5 мс. А для MRP_{chgMAX} и $MRP_{testMAX}$ обоснована допустимость снижения их до 1...2.

Пример расчета времени восстановления по формуле (1)

В качестве иллюстрации расчета времени восстановления по формуле (1) рассмотрим малое кольцо на $N = 5$ узлов и выберем минимальные или близкие к ним значения параметров, допускаемые стандартом IEC 62439-2 и типичные для современного оборудования: $MRP_{testT} = 1$ мс, $MRP_{testMAX} = 3$, $T_{switch} = 0,01$ мс, $T_{queue} = 0$, $T_{bit} = 0,005$ мс, $T_{line} = 0,0005$ мс, $T_{FDB} = 0,5$ мс, $MRP_{chgT} = 0,5$ мс, $MRP_{chgMAX} = 3^{18}$.

$$\begin{aligned} T_{rec} &= 1 \cdot 3 + 2 \cdot 5 \cdot (0,01 + 0 + 0,005 + 0,0005) + 0,5 + 0,5 \cdot 3 = \\ &= 3 + 10 \cdot 0,0155 + 0,5 + 1,5 = 3 + 0,155 + 0,5 + 1,5 = 5,155 \text{ мс.} \end{aligned}$$

Видим, что даже при выборе минимально допустимых значений параметров конфигурации MRP и малом числе узлов кольца время восстановления T_{rec} оказывается порядка 5 мс, что превышает целевое ограничение 3 мс для трафика GOOSE и SV в соответствии с IEC 61850. Это означает, что обеспечить выполнение требований процессной шины исключительно за счёт значений параметров MRP, допускаемых стандартом, проблематично даже на простых топологиях, как, например, кольцо из 5 устройств.

В дальнейшем в работе рассматривается возможность уменьшения параметров $MRP_{testMAX}$ и MRP_{chgMAX} а также интервалов отправки служебных пакетов до минимально допустимых значений стандарта IEC 62439-2. Это позволяет оценить предельные границы применимости протокола MRP и определить условия, при которых возможно достижение целевого времени восстановления $T_{target} \leq 3$ мс.

Вывод неравенства, оценивающего максимальное число устройств в кольце MRP в зависимости от требуемого времени восстановления и параметров протокола

Вычисляемое время T_{rec} должно быть меньше требуемого времени восстановления T_{target} . Важным параметром, чье значение напрямую влияет на возможность использования протокола, является число устройств в кольце. Остальные обеспечивают выполнение требований этого протокола. Поэтому в первую очередь необходимо смотреть на N – число устройств. Если оно меньше двух, то протокол неприменим, поскольку кольцо менее чем из двух устройств теряет смысл. Все параметры должны быть выбраны так, чтобы выполнялось неравенство $T_{rec} \leq T_{target}$. Подставим выражение из (1) в это неравенство:

$$MRP_{testT} \cdot MRP_{testMAX} + 2N(T_{switch} + T_{queue} + T_{bit} + T_{line}) + T_{FDB} + MRP_{chgT} \cdot MRP_{chgMAX} \leq T_{target}.$$

Вынесем члены, зависящие от N , в одну часть, а остальные параметры – в другую:

$$2N(T_{switch} + T_{queue} + T_{bit} + T_{line}) \leq T_{target} - (MRP_{testT} \cdot MRP_{testMAX} + T_{FDB} + MRP_{chgT} \cdot MRP_{chgMAX}).$$

Разделим обе части неравенства на $2(T_{switch} + T_{queue} + T_{bit} + T_{line})$:

$$N \leq \frac{T_{target} - (MRP_{testT} \cdot MRP_{testMAX} + T_{FDB} + MRP_{chgT} \cdot MRP_{chgMAX})}{(T_{switch} + T_{queue} + T_{bit} + T_{line})}. \quad (3)$$

¹⁸ Там же.

Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс

Таким образом, получено неравенство (3), задающее верхнюю границу числа устройств N в кольце, при которой выполняется условие $T_{rec} \leq T_{target}$.

Границы применимости для параметров MRP, обеспечивающие достаточное время восстановления T_{rec} для удовлетворения требований стандарта IEC 61850

Для нахождения границ применимости протокола MRP воспользуемся неравенством (3). Требуемое время восстановления кольца в рамках данной работы фиксируется как $T_{target} = 3$ мс. Параметр $T_{switch} = 0,01$ мс, $T_{queue} = 0$, $T_{bit} = 0,005$ мс, $T_{line} = 0,0005$ мс, $T_{FDB} = 0,5$ мс. Параметры MRP_{chgMAX} , $MRP_{testMAX}$, MRP_{chgT} , MRP_{testT} можно настраивать. Для визуализации их влияния на неравенство написана программа на языке Python. Пример работы показан на Рисунке 1. Несколько множеств настраиваемых параметров и результатов для них рассчитаны с помощью программы.

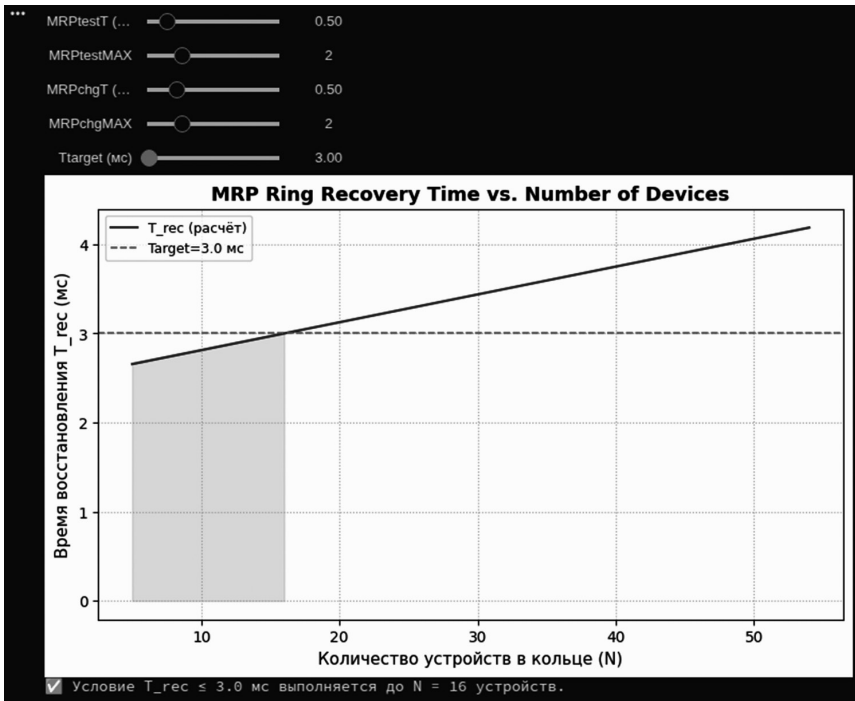


Рисунок 1. График зависимости времени восстановления T_{rec} от числа узлов кольца N
 Источник: здесь и далее рисунки выполнены автором

Результаты показаны в Таблице 3. Минимальные возможные значения обеспечивают до $N = 48$ узлов. Это практически совпадает с ориентировочным пределом в 50 устройств, указанным в стандарте IEC 62439-2. Увеличение любого параметра приводит к линейному сокращению допустимого N . Следует отметить, что увеличение MRP_{chgMAX} , $MRP_{testMAX}$ на единицу равносильно увеличению MRP_{chgT} , MRP_{testT} с 0,5 до 1 мс. Если увеличивать значения дальше, то N становится меньше единицы, как в строке 4 Таблицы 3. Это означает, что такой набор параметров неприменим для стандарта IEC 61850.

Таблица 3

Допустимое число узлов N в кольце MRP в зависимости от параметров

MRP_{chgT} (мс)	MRP_{chgMAX}	MRP_{testT} (мс)	$MRP_{testMAX}$	Макс. N
0,5	1	0,5	1	48
0,5	1	1,0	1	32
0,5	2	0,5	1	32
1,0	2	0,5	1	< 1
0,5	2	0,5	2	16

Практические испытания

Для проверки корректности полученных аналитических оценок проведено экспериментальное исследование времени восстановления сети MRP.

Экспериментальный стенд состоял из трех промышленных Ethernet-коммутаторов «Корунд-40-8Т» компании «Ангстрем-Телеком»¹⁹, соединенных в кольцевую топологию. Для каждого устройства в качестве портов MRP использовались порты 1 и 2. Разрыв кольца инициировался физическим отключением одного из соединений.

Измерение времени восстановления выполнялось с помощью утилиты convergence-analyzer²⁰, которая фиксирует момент разрыва связи и момент восстановления передачи кадров.

В ходе эксперимента были исследованы два набора параметров протокола MRP:

- стандартный профиль 500, предусмотренный стандартом IEC 62439-2;
- модифицированный профиль, соответствующий параметрам из пятой строки Таблицы 3.

Стандартный профиль 500 настраивался штатными средствами конфигурации коммутатора через интерфейс командной строки операционной системы AngtelOS²¹. Модифицированный профиль не поддерживается стандартной конфигурацией оборудования, поэтому для его реализации была выполнена экспериментальная модификация программного сервиса, реализующего протокол MRP.

Экспериментальные измерения времени восстановления для кольца из трёх устройств при использовании стандартного профиля 500 показали, что значения T_{rec} лежат в диапазоне 3,2... 489 мс, а среднее экспериментальное значение составляет около 191 мс. Распределение времени восстановления показано на Рисунке 2. В то же время теоретическая оценка по формуле (1) дает

$$T_{rec} = 50 \cdot 3 + 3 \cdot (0,01 + 0 + 0,005 + 0,0005) + 0,5 + 50 \cdot 3 = 300,5465 \approx 300,55 \text{ мс.}$$

Экспериментальные измерения времени восстановления для кольца из трёх устройств при параметрах $MRP_{chgT} = 0,5$ мс, $MRP_{chgMAX} = 2$, $MRP_{testT} = 0,5$ мс, $MRP_{testMAX} = 2$ показали

¹⁹ Промышленные коммутаторы серии «Корунд» // Ангстрем-Телеком. URL: https://www.angtel.ru/catalog/industrial_corund (дата обращения: 04.03.2026).

²⁰ Convergence-analyzer (исходный код и описание утилиты измерения времени сходимости/восстановления) // Codeberg. URL: <https://codeberg.org/creasure/convergence-analyzer> (дата обращения: 04.03.2026).

²¹ Программное обеспечение AngtelOS // Ангстрем-Телеком. URL: https://www.angtel.ru/angtelos/index.php?sphrase_id=4698 (дата обращения: 04.03.2026).

Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol
для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс

значения в диапазоне $3,2 \dots 21,2$ мс при среднем значении около $9,7$ мс. Распределение времени восстановления показано на Рисунке 3. Теоретическая оценка по формуле (1) даёт значение

$$T_{rec} = 0,5 \cdot 2 + 3 \cdot (0,01 + 0 + 0,005 + 0,0005) + 0,5 + 0,5 \cdot 2 = 2,5465 \approx 2,55 \text{ мс.}$$

Полученное различие между аналитическими расчетами и экспериментом указывает на то, что в реальных устройствах существенное влияние имеют особенности программной реализации.

Следует отметить, что при использовании стандартного профиля 500 абсолютные значения времени восстановления составляют сотни миллисекунд. В этом случае дополнительные программные задержки, возникающие в реализации протокола на сетевых устройствах, оказывают относительно малое влияние на итоговое значение T_{rec} . Даже задержки порядка нескольких миллисекунд не меняют общий порядок величины времени восстановления.

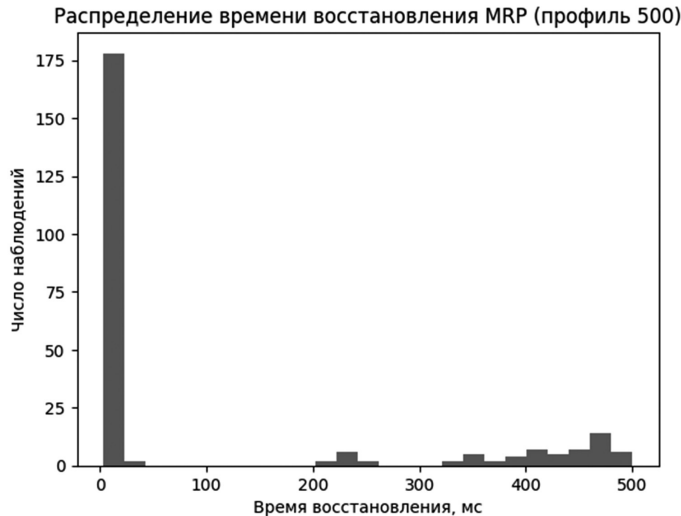


Рисунок 2. Распределение времени восстановления для профиля 500

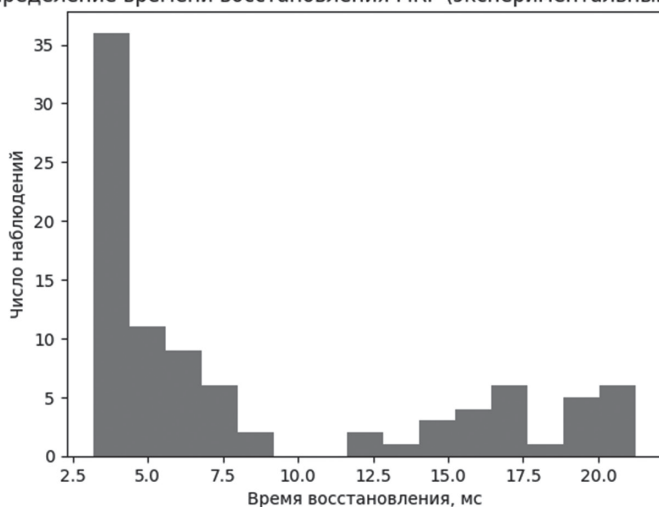
Однако при исследовании режимов с целевым временем восстановления порядка нескольких миллисекунд влияние программных задержек становится существенно более заметным. В этом случае даже дополнительные задержки обработки порядка $1 \dots 5$ мс, возникающие в программной реализации протокола, могут значительно увеличивать итоговое время восстановления и приводить к заметному расхождению между аналитической оценкой и экспериментальными измерениями.

Полученные результаты позволяют уточнить модель времени восстановления для реальных устройств. Фактическое время восстановления можно представить в виде

$$T_{rec_real} = T_{rec} + T_{sw},$$

где T_{rec} — это значение, вычисленное по формуле (1); T_{sw} — это дополнительная программная задержка, обусловленная программной реализацией протокола в сетевом устройстве.

Распределение времени восстановления MRP (экспериментальный профиль)

**Рисунок 3.** Распределение времени восстановления для измененного профиля

В рассматриваемом эксперименте величина T_{sw} для используемых коммутаторов составляет несколько миллисекунд, что не оказывает существенного влияния при стандартных профилях MRP, но становится критичным при попытке достижения времени восстановления порядка 3 мс. Этот вопрос требует дополнительных исследований.

Обсуждение результатов

Полученное неравенство (3) и параметрический анализ позволяют быстро оценивать допустимый размер кольца N и чувствительность T_{rec} к настройкам $MRP_{chgMAX}/MRP_{testMAX}/MRP_{chgT}/MR_{PtestT}$ и задержкам оборудования. Следует отметить ограничения принятых допущений. Минимальные интервалы $MRP_{chgT}/MRP_{testT} = 0,5$ мс допустимы не на любом устройстве: реализуемость зависит от конкретного оборудования. Численные границы применимости MRP зависят от принятых оценок задержек оборудования (T_{switch} , $TFDB$, T_{queue} и др.). Поэтому Таблицу 3 следует рассматривать как основу для сравнения сценариев, а не как универсальное значение для любых реализаций. Но в целом предложенная модель и неравенство (3) формируют удобный аналитический аппарат, который требует экспериментальной проверки на конкретных коммутаторах и уточнения для условий промышленной эксплуатации.

Для оценки реалистичности принятых в расчетах параметров целесообразно сопоставлять их с характеристиками промышленного сетевого оборудования, применяемого на цифровых подстанциях. В качестве типичных устройств, поддерживающих протокол MRP, можно привести промышленные Ethernet-коммутаторы Siemens SCALANCE X204/X300, Hirschmann RSP/RSPM, Муха EDS-4000/EDS-G4000, а также серию «Корунд» от компании «Ангстрем-Телеком»²². Подобные коммутаторы широко использу-

²² Промышленные коммутаторы серии «Корунд» // Ангстрем-Телеком. URL: https://www.angtel.ru/catalog/industrial_corund (дата обращения: 04.03.2026).

Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol
для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс

ются в сетях промышленной автоматизации и энергетики и поддерживают механизмы резервирования, предусмотренные стандартом IEC 62439-2²³.

Согласно технической документации производителей промышленного сетевого оборудования задержка коммутации Ethernet-кадра в современных промышленных коммутаторах составляет единицы микросекунд. Например, для коммутаторов Siemens SCALANCE X-200 в спецификации указана задержка коммутации порядка 5 μ s при использовании режима store-and-forward²⁴. Это соответствует принятой в работе оценке из стандарта $T_{\text{switch}} \approx 0,01$.

Проведенные эксперименты позволяют предположить, что основное расхождение между аналитическими расчётами и экспериментальными измерениями связано с дополнительными задержками программной обработки в сетевых устройствах. Формула (1), приведённая в стандарте IEC 62439-2, фактически описывает нижнюю границу достижимого времени восстановления, поскольку учитывает только аппаратные задержки передачи и обработки кадров. В используемых для эксперимента реальных устройствах реализация протокола MRP выполняется программными средствами, что приводит к дополнительным задержкам обработки событий. При больших значениях T_{rec} (например, для профиля 500) влияние этих задержек незначительно, однако при попытке достижения времени восстановления порядка нескольких миллисекунд их вклад становится доминирующим.

Заключение

В работе выполнена аналитическая оценка принципиальной достижимости целевого времени восстановления связи $T_{\text{target}} = 3$ мс для трафика GOOSE и SV в сетях IEC 61850 при использовании протокола MRP. На основе формулы времени восстановления T_{rec} из IEC 62439-2 проведена характеристика параметров протокола и оборудования, влияющих на время сходимости кольца. Показано, что даже при малом размере кольца $N = 5$ и выборе минимальных (или близких к минимальным) значений параметров, допускаемых стандартом, T_{rec} остается порядка 5 мс, то есть превышает порог 3 мс.

Получено аналитическое неравенство (3), задающее верхнюю границу числа узлов N в кольце, при которой выполняется условие $T_{\text{rec}} \leq T_{\text{target}}$, что позволяет рассчитывать предельный размер кольца при заданных параметрах MRP и характеристиках оборудования.

Показано, что ключевыми настраиваемыми параметрами для минимизации времени восстановления являются MRP_{chgMAX} , MRP_{testMAX} , MRP_{chgT} , MRP_{testT} . Интервалы отправки служебных пакетов MRP_{chgT} и MRP_{testT} в рамках принятых допущений целесообразно ограничивать снизу значением 0,5 мс, а параметры повторов/детектирования MRP_{chgMAX} и MRP_{testMAX} допустимо снижать до 1...2, поскольку оценка среднего времени до потери служебного сообщения при таких настройках существенно превышает срок эксплуатации оборудования.

²³ IEC 62439-2:2022. Industrial communication networks – High availability automation networks – Part 2: Media Redundancy Protocol (MRP). Geneva: International Electrotechnical Commission, 2022 // GlobalSpec. URL: <https://standards.globalspec.com/std/10001077/IEC%2062439-2> (дата обращения: 26.11.2025).

²⁴ Siemens AG. SCALANCE X-200 Industrial Ethernet Switches – Operating Instructions. P 83, table “Switching properties”. URL: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/056/109955056/att_1266072/v1/BA_SCALANCE-X-200-2023_76_en-US.pdf (дата обращения: 04.03.2026).

Расчёты границ применимости показали, что при лучших настройках (минимизация указанных параметров) достижение $T_{rec} \leq 3$ мс возможно вплоть до $N = 48$ узлов, что близко к ограничению порядка 50 устройств, указанному для MRP в стандарте IEC 62439-2.

Экспериментальные результаты показывают, что дополнительная задержка программной реализации протокола в сетевых устройствах может существенно увеличивать фактическое время восстановления при малых значениях целевого времени. Достижение времени восстановления порядка 3 мс в сетях MRP ограничивается не столько параметрами протокола, сколько особенностями программной реализации протокола в сетевых устройствах. Это означает, что при проектировании сетей с требованиями $T_{rec} \leq 3$ мс необходимо учитывать не только параметры протокола, но и программные задержки сетевого оборудования. Альтернативой может являться аппаратное решение, исключающее влияние программного обеспечения, однако такие решения не рассматривались в рамках данной работы.

При учёте вышеописанных ограничений полученные результаты могут быть использованы при проектировании сетевой инфраструктуры цифровых подстанций для выбора параметров MRP и оценки применимости данного протокола в условиях жёстких требований к времени восстановления связи.

Литература

1. Elbez G., Keller H.B., Hagenmeyer V. Authentication of GOOSE Messages under Timing Constraints in IEC 61850 Substations // *Proceedings of the 6th International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research*. Athens, September 10–12, 2019. Pp. 1–12. DOI: 10.14236/ewic/icscsr19.17.
2. Han M. IEEE 1588 Time Synchronisation and Data Flow Assessment for IEC 61850 based Power Transmission Substations : PhD Thesis. Manchester : The University of Manchester, 2020. URL: <https://research.manchester.ac.uk/en/studentTheses/ieee-1588-time-synchronisation-and-data-flow-assessment-for-iec-6/> (дата обращения: 15.11.2025).
3. Cideciyan O. Frame Error Rate // *IEEE 802.3bj Task Force*. Geneva, Switzerland, September 24-26, 2012. URL: https://www.ieee802.org/3/bj/public/sep12/cideciyan_3bj_01a_0912.pdf (дата обращения: 26.11.2025).
4. Vinay Kumar B.R., Kashyap N., Antony R. The Effect of Introducing Redundancy in a Probabilistic Forwarding Protocol // *2018 Twenty Fourth National Conference on Communications (NCC)*. Hyderabad, India, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/NCC.2018.8599936.

References

1. Elbez G., Keller H.B., Hagenmeyer V. (2019) Authentication of GOOSE Messages under Timing Constraints in IEC 61850 Substations. In: *Proceedings of the 6th International Symposium for ICS & SCADA Cyber Security Research*. Athens, September 10–12, 2019. Pp. 1–12. DOI: 10.14236/ewic/icscsr19.17.
2. Han M. (2020) IEEE 1588 Time Synchronisation and Data Flow Assessment for IEC 61850 based Power Transmission Substations : PhD Thesis. Manchester : The University of Manchester. URL: <https://research.manchester.ac.uk/en/studentTheses/ieee-1588-time-synchronisation-and-data-flow-assessment-for-iec-6/> (accessed 15.11.2025).
3. Cideciyan O. (2012) Frame Error Rate. In: *IEEE 802.3bj Task Force*. Geneva, Switzerland, September 24–26, 2012. URL: https://www.ieee802.org/3/bj/public/sep12/cideciyan_3bj_01a_0912.pdf (accessed 26.11.2025).

Оценка границ применимости Media Redundancy Protocol
для процессорной шины IEC 61850 с ограничением времени ≤ 3 мс

4. Vinay Kumar B.R., Kashyap N., Antony R. (2018) The Effect of Introducing Redundancy in a Probabilistic Forwarding Protocol. In: *2018 Twenty Fourth National Conference on Communications (NCC)*. Hyderabad, India, 2018. P. 1–6. DOI: 10.1109/NCC.2018.8599936.

Поступила в редакцию: 18.02.2026

Received: 18.02.2026

Поступила после рецензирования: 03.03.2026

Revised: 03.03.2026

Принята к публикации: 10.03.2026

Accepted: 10.03.2026