

Научная статья

УДК 621.396.4

DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-26-40

 CC BY 4.0

# Протоколы сетей сбора данных на основе радиоканалов стандарта IEEE 802.15.4 для комплексов защиты подземных металлических сооружений от электрохимической коррозии

 Александр Юрьевич Бухинник, buhinnik.au@sut.ru

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

**Аннотация:** Рассматриваются системы радиосвязи в комплексах телеметрии и телемеханики систем активной электрохимзащиты подземных металлосооружений. Сформулированы требования к системам радиообмена для сетей сбора данных с выносных контрольно-измерительных пунктов станций катодной защиты. Анализ применимости известных протоколов обмена, основанных на спецификациях стандарта IEEE 802.15.4, и его программных надстроек для подобных сетей показал необходимость разработки специализированных протоколов прикладного, сетевого и канального уровней. Представлены результаты разработки специализированных сетевых протоколов прикладного, сетевого и канального уровней, которые реализуют режимы обмена данными, требуемые для рассматриваемых сетей сбора данных при минимизации энергозатрат.

**Ключевые слова:** радиосвязь, стандарт IEEE 802.15.4, телеметрия, телемеханика, катодная защита, контрольно-измерительный пункт, ретрансляция, протоколы обмена

**Ссылка для цитирования:** Бухинник А.Ю. Протоколы сетей сбора данных на основе радиоканалов стандарта IEEE 802.15.4 для комплексов защиты подземных металлических сооружений от электрохимической коррозии // Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 1. С. 26–40. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-26-40. EDN:OXWOGH

## Protocols of Data Collection Networks Based on IEEE 802.15.4 Radio Channels in Complexes for the Protection of Underground Metal Structures from Electrochemical Corrosion

 Buhinnick Alexandre, buhinnik.au@sut.ru

The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

**Abstract:** Radio communication systems in telemetry and telemechanics systems of active electrochemical protection of underground metal structures are considered. The requirements for radio exchange systems for data collection networks from remote control and measuring points of cathodic protection stations are formulated. The analysis of

the applicability of known exchange protocols based on the specifications of the IEEE 802.15.4 standard and its software add-ons for such networks is carried out and the need for the development of specialized network and channel layer protocols is justified. The results of the development of specialized network protocols of the application, network and channel levels that implement data exchange modes required for the collection networks under consideration while minimizing energy consumption are presented.

**Keywords:** radio communication, IEEE 802.15.4 standard, telemetry, telemechanics, cathodic protection, control and measuring point, retransmission, exchange protocols

**For citation:** Buhinnick A. Protocols of data collection networks based on IEEE 802.15.4 radio channels in complexes for the protection of underground metal structures from electrochemical corrosion. *Proceedings of Telecommun. Univ.* 2024;10(1):26–40. DOI:10.31854/1813-324X-2024-10-1-26-40. EDN:OXWOGH

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время успехи в области компонентной базы радиотехнических устройств позволяют производить дешевые и малогабаритные модули радио приемо-передатчиков (РПП) для широкого спектра радиочастот, включая частоты дециметрового и сантиметрового диапазонов. Это явилось основой для внедрения каналов радиосвязи в тех областях применения, где ранее использовались исключительно каналы проводной связи, в том числе в локальные информационные сети промышленного и бытового назначения.

Подавляющее большинство разработок систем радиосвязи для локальных информационных сетей основывается на стандартах IEEE серии 802: 802.11, 802.15.1 (Bluetooth), 802.15.3, IEEE 802.15.4, 802.15.16 и др. [1]. Среди этой серии выделяется стандарт IEEE 802.15.4 [2] (далее по тексту – Стандарт). И если остальные стандарты серии предусматривают высокие скорости обмена данными от единиц Мбит/с до единиц Гбит/с, то Стандарт ориентирован на применения, не требующие высоких скоростей передачи данных, но критичные по энергопотреблению оборудования, габаритам и стоимости.

Весьма широкой областью применения Стандарта являются системы автоматизации и сбора данных, в частности системы для сетей сбора информации с беспроводных датчиков. Такие сети выделились в отдельную категорию с названием сенсорные сети (*от англ. Sensor Networks*) [3, 4]. Сенсорные сети характеризуются разветвленной топологией, малыми объемами передаваемой информации и, как следствие, невысокими требованиями к скоростям передачи (не более десятков кбит/с), но критичностью к энергопотреблению беспроводных сенсоров с батарейным питанием. Протоколом предполагаются небольшие дальности радиообмена – в пределах 10 м в помещении, однако реально в открытом пространстве при мощности передачи 100 мВт (максимально допустимая не лицензируемая мощность) и применении направленных антенн она может достигать величин порядка нескольких километров.

В настоящее время модули радиомодемов, соответствующих Стандарту, поставляются широким кругом производителей, включая фирмы Microchip, Texas Instruments, Silicon Labs, Freescale Semiconductor и др. [5, 6].

Стандарт описывает два нижних уровня иерархии протоколов взаимодействия открытых систем: физический (Phy, *аббр. от англ. Physical Layer*) и канальный (MAC, *от англ. Media Access Control*) уровни. В дальнейшем появился целый ряд надстроек над ним, определяющих стек протоколов между прикладным и канальными уровнями [7–10]. Среди этих надстроек наибольшее распространение получил стек протоколов под названием ZigBee [7].

Спецификации ZigBee определяют такой стек протоколов и ориентированы на создание разветвленных сетей ячеистой (mesh) структуры с механизмами гибкой конфигурации маршрутов доставки сообщений и с возможностью быстрого подключения к сети новых устройств. Поддерживаются режимы малого энергопотребления, при котором устройства сети основное время находятся в спящем режиме и включаются для передачи сообщений лишь на короткое время. Программная реализация протокола требует нескольких десятков килобайт памяти контроллеров и в готовом виде поставляется рядом фирм. Предложены также модификации протоколов ZigBee, имеющие целью снижение энергопотребления и повышение надежности доставки сообщений [8–10].

Однако для ряда применений известные протоколы-надстройки над Стандартом не представляются оптимальными, что обуславливает перспективность разработки новых протоколов обмена. Одной из таких областей представляются системы активной электрохимзащиты (ЭХЗ) протяженных металлооборудований: трубопроводов, кабелей связи и других подземных коммуникаций [11–16]. В настоящей работе представлены результаты разработки оригинальных специализированных протоколов обмена данными на базе Стандарта применительно к системам ЭХЗ на участках контрольный пункт (КП) – контрольно-измерительные пункты (КИП).

### Анализ протоколов обмена на основе стандарта IEEE 802.15.4 применительно к сетям сбора данных систем ЭХЗ

Типовая схема участка активной ЭХЗ подземного металлического газопровода показана на рисунке 1. Защита обеспечивается станциями катодной защиты (СКЗ), установленными на определенных дистанциях друг от друга (обычно порядка 10–15 км) по длине защищаемой коммуникации. Принцип защиты состоит в катодной поляризации, т. е. создании катодной защиты отрицательного потенциала относительно земли в пределах от  $-3,5$  до  $-0,9$  В (по нормам ГОСТ Р 51164-98) на поверхности защищаемого металлооборудования. Более высокие потенциалы не обеспечивают достаточную защиту, а более низкие приводят к излишним энергозатратам [14]. Для поддержания защитного потенциала в допустимых пределах на СКЗ имеется КП, который постоянно измеряет параметры защитного потенциала, тока защиты и регулируемого выходного напряжения установки. По результатам измерений автоматически или по командам из диспетчерского пункта (ДП) устанавливается выходное напряжение СКЗ [15, 16]. СКЗ связаны с диспетчерскими центрами ЭХЗ каналами радиосвязи УКВ-диапазона либо каналами мобильной связи GSM.

Однако опыт эксплуатации установок ЭХЗ показал, что измерение параметров защиты в одной точке установки СКЗ не гарантирует надежную защиту металлооборудования по всей длине участка. В связи с этим современные СКЗ комплектуются выносными установками КИП линейных (КИП-Л), которые распределяются по всей длине защищаемого участка с интервалами порядка 150–200 м и передают в СКЗ параметры защиты [16]. При этом общая длина контролируемого таким образом участка может достигать порядка нескольких километров.

В настоящее время КИП-Л соединяются с СКЗ в основном по проводным линиям связи. С учетом малого энергопотребления оборудования КИП-Л замена кабельных линий на радиоканалы с переводом КИП-Л на автономное батарейное электропитание представляется перспективной. При этом, естественно, наибольший интерес представляют маломощные системы радиосвязи, работающие в

нелицензируемом диапазоне частот с автоматическим выбором частотного канала. Этим требованиям вполне соответствуют радиосистемы на основе Стандарта.

Рассмотрим виды сеансов обмена данными, которые необходимо поддерживать между КП (СКЗ) и совокупностью КИП-Л. Как отмечалось выше, основным назначением КИП-Л являются периодические измерения поляризационного потенциала в точке его установки. Естественным является наличие в КИП-Л охранного датчика вскрытия его корпуса с автоматической передачей сигнала охранной тревоги в СКЗ и далее в ДП.

Кроме этого, важным для ЭХЗ является анализ блуждающих токов, наводимых на поверхности металла защищаемой коммуникации. Для этого КИП-Л должен иметь функцию архивирования результатов измерений с привязкой по времени и передачи накопленных архивов в КП и далее в центральный ДП. Важным обстоятельством является существенно более высокая частота замеров при измерениях блуждающих токов относительно периодических замеров поляризационного потенциала (ПП), проводимых для установки требуемого защитного напряжения СКЗ. Действительно, даже с учетом изменения температуры и влажности в продолжение суток трудно ожидать существенного изменения электрических характеристик металлоконструкции в течение нескольких часов.

Таким образом, вполне достаточно можно считать замеры и считывание их результатов с КИП-Л два или четыре раза в сутки. С другой стороны, для регистрации опасных с точки зрения ЭХЗ блуждающих токов промышленной частоты 50–100 Гц замеры должны делаться с интервалами не более 5...10 мс. Причем с учетом случайного характера наводимых токов потребное время анализа может составлять десятки минут, что дает возможные размеры накопленных архивов порядка сотен кбайт и единиц Мбайт. Кроме больших размеров архивов режим регистрации блуждающих токов затратен с точки зрения энергопотребления КИП-Л. Поэтому данный режим не должен поддерживаться постоянно, а включаться только по командам из ДП на заданное время.

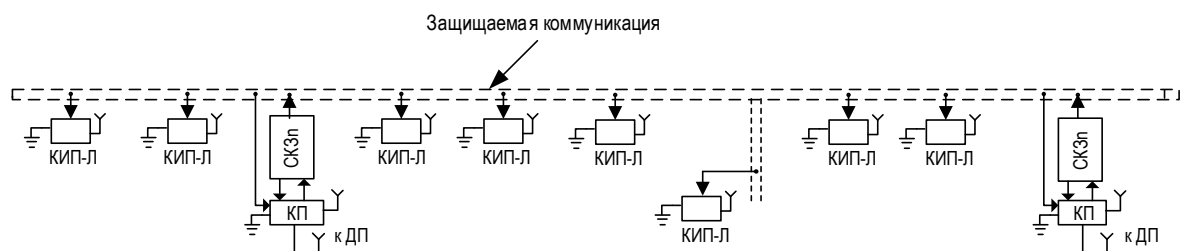


Рис. 1. Структура участка активной ЭХЗ, оборудованного выносными КИП

Fig. 1. Structure of an Active Electrochemical Protection Section Equipped with Remote Instrumentation

Исходя из вышеизложенного, на участках радиосвязи КП–КИП–Л должны быть обеспечены следующие виды сеансов обмена:

1) регулярные автоматические сеансы считывания текущего уровня поляризационного потенциала из всех КИП–Л в КП;

2) адресное считывание результатов измерений из выбранного КИП–Л по команде из ДП;

3) автоматическая передача из КИП–Л в КП сигнала срабатывания охранного датчика и, возможно, аварийного сигнала выхода поляризационного потенциала в анодную зону (спорадический режим связи);

4) передача в выбранную группу КИП–Л команды включения режима архивирования с указанием его длительности;

5) считывание с КИП–Л накопленных архивов по окончании заданного времени архивирования либо по команде из ДП;

6) передача в КИП–Л команд конфигурирования.

Очевидно, что реализация перечисленных выше режимов, кроме команд конфигурирования, должна быть обеспечена протоколами прикладного уровня сетевого взаимодействия. Режим конфигурирования частично относится к процедурам прикладного уровня, частично – сетевого и транспортного, в том, что касается конфигурирования сетевой топологии.

Рассмотрим требования к системе радиосвязи с точки зрения сетевой топологии. Сеть обмена на участке КП–КИП–Л имеет явно выраженную линейную топологию (см. рисунок 1). Исключения составляют только участки с ответвлением коммуникации, где один из КИП–Л будет играть роль корня сетевого дерева. Сеть является стационарной и не требует оперативного реконфигурирования маршрутов и оперативного автоматического подключения новых узлов. Оценочная предельная дальность связи маломощных радиомодемов без дополнительных усилителей при мощности передатчика на предельно допустимом уровне +20 дБм составляет не более 200–300 м, а с усилителями может быть увеличена до километра [8]. Таким образом, в зоне уверенного приема каждого из узлов сети данного вида оказываются только ближайšie к нему по линии узлы и, в некоторых случаях, узлы через один. В этой связи каждый из КИП–Л должен обладать функцией сетевого ретранслятора. Карта маршрутов, хранящаяся в памяти контроллеров КИП–Л, является весьма простой и должна включать адреса одного основного оконечного пункта, т. е. КИП–Л следующего по цепочке от КП и одного аварийного оконечного пункта в случае аварии основного: КИП–Л последующего за основным оконечным. Карта узлового пункта должна, кроме этого, содержать адреса основного и аварийного КИП–Л на ответвлении сети. Карты маршрутов могут составляться в центральном ДП и передаваться оттуда в

СКЗ и далее – в КИП–Л. Таким образом, в составе программного обеспечения КП и КИП–Л не требуются специальные процедуры маршрутизации.

Для КИП–Л с батарейным питанием важнейшим параметром является энергопотребление оборудования. Как показывает анализ технической документации в области микроконтроллеров и маломощных радиомодемов [5–8], основным энергоемким устройством в нем являются радиомодем при его работе в активном режиме. Быстодействующим микроконтроллерам отсутствие в программном обеспечении КИП–Л процедур, требующих высоких скоростей, позволяет работать на пониженных тактовых частотах, при которых ток потребления от батарейного источника питания в активном режиме не превышает единиц мА, а в спящем режиме – единицы мкА. В то же время, типовые значения тока потребления радиомодема составляют 20–40 мА при мощности излучения на уровне 0...+3 дБм, причем потребление в режимах приема и передачи различаются не более, чем на 10...15 мА. Тогда как в спящем режиме ток потребления модема уменьшается до величин порядка единиц мкА. Поэтому в перерывах между сеансами связи радиомодемы КИП–Л должны работать в спящем режиме с периодическими и кратковременными переходами в режим прослушивания радиоэфира для приема и ретрансляции команд и спорадических сообщений.

Оценим максимально возможный временной интервал  $T_{\text{max}}$  между сеансами прослушивания радиоэфира и минимально допустимое время прослушивания  $T_{\text{впmin}}$  в каждом сеансе. Поскольку, как отмечалось выше, плановые сеансы обмена для считывания текущих результатов измерений являются достаточно редкими, то величина  $T_{\text{max}}$  будет определяться как наименьшая величина из допустимого времени ожидания ответа на адресные запросы КИП–Л и допустимого времени реакции на аварийные события, прежде всего, на охранные тревоги. И то и другое значение будут определяться требованиями потребителя. В качестве первоначальной оценки можно предположить порядок этих величин в несколько минут и положить  $T_{\text{max}} = 5$  мин.

Для оценки времени  $T_{\text{впmin}}$  нужно задаться следующими характеристиками:

- максимальным количеством КИП–Л в цепочке  $N_{\text{кпmax}}$ ;
- максимальным временем, требуемым радиомодему для регистрации начала приема  $T_{\text{рпmax}}$ ;
- длительностью команды, переводящей КИП–Л в режим сеанса связи  $T_{\text{дк}}$ ;
- длительностью спорадического сообщения  $T_{\text{сс}}$ ;
- максимальной относительной погрешностью хода электронных часов КИП–Л  $\delta T_{\text{ч}}$ ;
- интервалом передачи команд корректировки часов на КИП–Л  $T_{\text{кч}}$ ;

– максимальной задержкой начала передачи в эфир относительно команды включения передатчика, посланной от контроллера к радиомодему.

Тогда значение  $T_{вп\min}$  можно рассчитать по выражению:

$$T_{вп\min} = (N_{кп\max} - 1) * (T_{вп\max} + T_{дк} + T_{сс} + \delta T_{ч} * T_{кч} + T_{кч} * 2). \quad (1)$$

В (1) предполагается, что для минимизации  $T_{вп\min}$  каждый из КИП-Л переходит в режим прослушивания с задержкой, кратной его номеру в цепочке, а спорадические сообщения передаются сразу по получении команды перевода в режим сеанса связи.

Обозначив  $P_{пд}$  и  $P_{пр}$  как мощности потребления радиомодема при передаче и при приеме, соответственно,  $P_{мк}$  – мощность потребления микроконтроллера КИП-Л,  $T_{пи}$  – время, требуемое микроконтроллеру для выполнения плановых измерений,  $T_{пс}$  – интервал плановых передач результатов измерений,  $T_{из}$  – длительность плановой передачи, получим выражение для оценки энергии  $E_{с}$  потребления КИП-Л за время  $T$  в минимальном режиме без адресных запросов КИП-Л, режимов изменения блуждающих токов и аварийный событий:

$$E_{с} = \frac{T}{T_{и\max}} * ((T_{вп\min} - T_{дк}) * P_{пр} + T_{дк} * (P_{пд} + P_{мк}) + P_{мк} * T_{пи} + \frac{T}{T_{пс}} * T_{пд} * T_{из}). \quad (2)$$

В (2) предполагается, что микроконтроллер в промежутках времени между плановыми измерениями и сеансами обмена находится в спящем режиме, а энергопотреблением спящего режима микроконтроллера и модема можно пренебречь.

Формулы (1 и 2) при известной емкости батарей электропитания КИП-Л дают численную оценку одного из важнейших параметров системы – времени работы до замены батарей и составляют критерии для программно-аппаратной реализации протоколов обмена.

Вышеизложенные соображения дают критерии для анализа применимости известных протоколов радиообмена в сетях сбора данных с КИП-Л. С точки зрения этих критериев рассмотрим спецификации известного стандарта IEEE 802.15.4.

Стандарт определяет два типа устройств в сети радиообмена – полнофункциональные (FFD, аббр. от англ. Full-Function Device) и с ограниченными функциями (RFD, аббр. от англ. Reduced-Function Device). Устройства обоих типов работают через один частотный канал. FFD-устройства могут выполнять функции сетевого или PAN-координатора (аббр. от англ. Personal Area Network), RFD-координатора и оконечного устройства. RFD-устройство может работать только в качестве оконечного и об-

мениваться данными только с FFD-координатором, но не с другими оконечными устройствами. Стандарт требует, чтобы в сети был по крайней мере один сетевой координатор.

Из вышеизложенного следует, что для сети сбора данных с КИП-Л, реализованной на основе данного стандарта, где каждый КИП-Л должен выполнять функции ретранслятора, возможно применение только полнофункциональных устройств.

Стандарт поддерживает две сетевые топологии: звезда и каждый с каждым (от англ. Peer-to-Peer). На основе последней может быть организована сеть со структурой кластерных деревьев, вырожденным случаем которой является сеть с линейной топологией, которая состоит из одного единственного кластера.

Каждому устройству в сети присваивается уникальный 64-разрядный двоичный адрес, который далее после инициализации устройства может быть заменен сетевым координатором на более короткий 16-разрядный, что для передачи коротких команд и блоков данных небольшого размера представляется немаловажным.

Стандарт позволяет организовать обмен данными в сети на основе последовательных суперкадров (от англ. Superframe). Суперкадр генерируется координатором. Каждый суперкадр разделяется на 16 одинаковых временных слотов. В первом слоте всегда передается так называемый маячок (от англ. Beacon), который служит для синхронизации подчиненных узлов и определяет структуру сверхцикла. Из остальных 15 слотов может быть образована зона случайного доступа и ряд каналов гарантированного доступа. Суперкадры разделяются пассивными паузами, во время которых сетевые устройства могут пребывать в спящем режиме.

Распределение слотов в суперкадре между зонами, количество каналов гарантированного доступа и количество слотов в каждом из каналов, длительности временных слотов и период следования суперкадров задаются процедурами сетевого уровня.

Стандарт также допускает полностью асинхронную работу без формирования суперкадров. При асинхронной работе доступ к каналу осуществляется на основе механизма случайного доступа с контролем конфликтов (CSMA-CA). В этом режиме все устройства, имеющие возможность приема данных, должны постоянно прослушивать эфир.

Физический уровень Стандарта описывает два вида сервиса: передачи данных и административный сервис. Основными функциями физического уровня являются активизация и деактивизация радиопередатчика, передача и прием пакетов через физический канал связи, контроль мощности (ED) передаваемого и принимаемого сигнала в канале,

оценка качества канала и контроль коллизий случайного доступа. В спецификациях физического уровня оговаривается максимальное время переключения с приема на передачу и обратно – не более 12 символов, т. е. 48 тактов исходного сигнала. Оговариваются требования по разбросу уровней излученной мощности.

Спецификации Стандарта возлагают на канальный уровень следующие задачи:

- генерацию сверхциклов обмена в случае работы устройства в качестве координатора;
- синхронизацию обмена по принятым маячкам;
- поддержку функций сетевого координатора;
- поддержку функций безопасности обмена;
- реализацию механизмов случайного доступа с контролем конфликтов для передачи в радиоканал;
- поддержку механизма гарантированных временных слотов;
- поддержку связи между MAC-уровнями устройств одного типа.

MAC-уровень взаимодействует с уровнями над ним через два программных интерфейса: интерфейс обмена данными и служебной информации. Для обоих интерфейсов описаны два варианта сеансов взаимодействия: сеанс запрос–ответ (*от англ. Request–Confirm*), в котором запрос всегда поступает от протокола верхнего уровня, и сеанс извещения (*от англ. Indication*) со стороны MAC-уровня наверх.

Анализ спецификаций MAC-уровня применительно к сетям сбора данных с КИП-Л позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, суперкадровая структура сеансов обмена, которую реализует MAC-уровень, малоприменима к топологии длинной цепочки ретрансляторов. Действительно, каждый последующий ретранслятор в цепочке может начинать передачу только по окончании приема от предыдущего, а каждая из передач занимает один слот. Тогда при числе ретрансляций больше семи для организации сеанса обмена типа запрос–ответ необходимо генерировать временные слоты для передачи за пределами суперкадра, что не поддерживается примитивами MAC-уровня Стандарта, либо после передачи каждого суперкадра переводить устройство в асинхронный режим обмена.

Во-вторых, максимальный период следования суперкадров составляет 251 с; определен стандартом и вполне соответствует соображениям по выбору временных интервалов активности, обоснованных выше.

В-третьих, процедуры MAC-уровня по привязке устройств к координаторам могут, в принципе, быть использованы в целях автоматического назначения ретрансляторов для последующих по цепочке устройств. Однако в рассматриваемой

сети, когда многие устройства могут оказаться в зонах неуверенного приема от удаленных по цепочке устройств, такое автоматическое назначение нельзя признать надежным и устойчивым. Гораздо более надежным представляется жесткое назначение ретрансляторов из центра.

В-четвертых, метод случайного доступа к каналу в рассматриваемой системе, где большинство сеансов обмена заключается в считывании данных с КИП-Л по инициативе КП СКЗ, не эффективен по критерию энергозатрат. Действительно, метод случайного доступа предполагает, что приемники устройств должны постоянно работать в режиме прослушивания эфира, потребляя значительный ток. Таким образом, весь суперкадр обмена должен быть отведен под каналы гарантированного доступа.

В-пятых, поскольку в рассматриваемой сети фактически не требуются РАН-координаторы, то длина передаваемых пакетов может быть уменьшена за счет исключения из заголовков их идентификаторов. Адресация устройств вполне обеспечивается укороченным 16-разрядным форматом.

В-шестых, для передачи данных в направлении от КП к КИП-Л достаточно только одних маячков без использования временных слотов данных. Все параметры запроса вполне помещаются в поле данных маячка.

Стек протоколов ZegBee был разработан как надстройка над MAC-уровнем Стандарта и ориентирован на создание разветвленных иерархических сетей с гибко изменяемой топологией и оперативным поиском маршрутов доставки данных [9, 10]. Кроме стека ZegBee, в настоящее время предложен ряд его модификаций и альтернативных протоколов [11–13]. Однако, как показывает их анализ, ни один из них не устраняет приведенных выше недостатков для применения в сетях сбора данных ЭХЗ.

Анализ функций стека ZegBee применительно к рассматриваемой нами области использования позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, такие свойства протоколов ZegBee, как поддержка иерархической древовидной структуры сети, таблиц маршрутов и ретрансляции данных обуславливают возможность его применения для организации сети сбора информации с удаленных КИП.

Во-вторых, поскольку в рассматриваемом приложении практически все сетевые устройства являются ретрансляторами, то должен использоваться только синхронный вариант организации обмена, так как асинхронный обмен требует постоянной работы ретрансляторов на прием, что влечет неоправданные энергозатраты.

В-третьих, в стационарной сети важнейшие функции стека по гибкой маршрутизации сообщений являются явно избыточными. Также избыточными для сетей сбора данных с контрольно-измерительных приборов (КИП) являются процедуры поддержки безопасности и шифрования данных. При этом программная реализация стека требует достаточно больших ресурсов микроконтроллера КИП: память не менее 32 кбайта.

В-четвертых, для того, чтобы все устройства сети могли работать в качестве ретрансляторов, все они должны быть наделены функциями координаторов. Это потребовало бы постоянной их работы на прием, что для устройств с батарейным питанием представляется недопустимым.

В-пятых, поскольку стек ZegBee предусматривает передачу только коротких пакетов данных, то передача достаточно больших массивов архивных данных с КИП-средствами стека потребовала бы многочисленных сеансов обмена, что неоправданно увеличивает время работы устройств в активном режиме и, следовательно, энергозатраты.

В-шестых, в связи с отмеченной выше малой пригодностью суперкадровой структуры обмена к сетевым топологиям типа длинных цепочек малоэффективным представляется использование и готовых программных решений канального уровня, соответствующих стандарту MAC-уровня.

Вышеизложенное составляет обоснование целесообразности разработки специализированных экономических протоколов канального и сетевого уровней, надстроенных над физическим уровнем Стандарта и специализированных под задачи сбора данных для сетей с топологией цепочки.

### **Специализированные протоколы для сетей сбора данных с выносных КИП-станций катодной защиты**

На основе требований к сетям сбора данных с выносных КИП-станций катодной защиты, сформулированных выше, а также спецификаций физического уровня Стандарта, были разработаны протоколы прикладного, сетевого и канального уровней обмена данными для подобных сетей.

Введем следующую терминологию. Все устройства, оборудованные радиомодемами и составляющие сеть сбора, будем называть станциями (Ст). Станцию, ведущую сбор данных, т. е. КП СКЗ для систем ЭХЗ, будем называть ведущей (ВСт). Совокупность станций, составляющих цепочку последовательных ретрансляций, назовем линией. Станции в линии нумеруются от станции ближайшей к ВСт.

Базовыми принципами разработки явились следующие положения.

1) Физический уровень станций соответствует Стандарту, включая форматы запросов, квитанций

и извещений физического уровня, структуре пакетов и ограничения по временным характеристикам переключений режимов работы РПП.

2) С учетом требований сетей сбора данных телеметрии предполагается, что все обмены осуществляются между ВСт и Ст, обмены между двумя Ст не предусмотрены.

3) В общем случае сеть имеет звездообразную конфигурацию, в которой к ведущей станции подключается ряд линий. Принимается, что ВСт работает с каждой из линий независимо от остальных, выделяя для каждой из них свой временной интервал сеанса обмена.

4) Пространственно-смежные сети сбора работают в разных частотных каналах и не оказывают влияние друг на друга. Возможности переключений станций линии одной СКЗ на линию другой в аварийных ситуациях разрыва одной из них в настоящей версии протокола не рассматривается.

5) Сеть строится по синхронному принципу, подразумевающему синхронизацию станций по моментам приема пакетов от ведущей станции. Эти сигналы имеют фиксированную длину и передаются с заданным постоянным периодом (аналог маячков MAC-уровня Стандарта), который далее будем именовать рабочим циклом. Цикл разбивается на временные слоты (такты) одинаковой длительности. Передачи сообщений синхронизируются по началам слотов. Однако формирование суперкадров фиксированной структуры не предусматривается. В промежутках времени между окончанием очередного сеанса обмена и ожидаемым временем приема следующего синхронизирующего пакета все станции находятся в спящем режиме.

6) Кроме функции синхронизации станций, маячки исполняют роль запросов-зондов, по ответам станций на которые принимаются решения об исправности линии и наличии в станциях аварийных сообщений.

7) В сети используется укороченная 16-разрядная адресация. Адресация является сквозной по всем линиям и произвольной относительно порядка станций в линиях. Не допускается перекрытие адресов в пространственно-смежных сетях. Предполагается, что адреса записываются в энергонезависимую память станций на этапе их пуска/наладки. В процессе эксплуатации допускается их изменение процедурами конфигурирования станций.

### **Прикладной уровень**

Сетевая процедура прикладного уровня в головной станции получает исходные данные от процедуры связи с ДП и обеспечивает организацию сеансов обмена, включая:

– сеансы периодического сбора текущих данных с выносных КИП;

- сеансы опроса выбранного КИП по запросу ДП;
- запуск процедуры архивирования данных на выбранном КИП по заявке ДП;
- считывание данных из архива выбранного КИП по заявке ДП;
- конфигурирование станций.

Исходными данными для процедуры являются следующие параметры:

- количество подключенных линий  $N_{пл}$ ;
- количество станций в каждой из линий  $N_{ст(1)} \dots N_{ст(N_{пл})}$ ;
- адреса станций (АСт) в линиях в порядке от ВСт вниз;
- период регламентного опроса станций в часах  $T_{рос}$ ;
- временной интервал цикла обмена со станциями (рабочего цикла)  $T_{се}$  в секундах.

Спецификациями прикладного уровня вводятся следующие ограничения:

- максимальное количество подключенных линий 64;
- максимальное количество станций в линии 64;
- АСт 16-разрядные двоичные;
- максимальная величина  $T_{се} = 30$  мин.

Сетевая процедура прикладного уровня в станциях обрабатывает пакеты станций, полученные от ведущей станции, и формирует ответные пакеты для передачи на ВСт.

Процедуры прикладного уровня взаимодействуют с сетевым уровнем посредством обмена сообщениями. Подобно спецификациям Стандарта сообщения разделяются на команды (запросы), квитанции и извещения. Команды передаются вниз с прикладного уровня на сетевой, квитанции и извещения – вверх.

Используется следующая семантика команд:

$ML\_Имя$  команды(список параметров).cmd и квитанций:

$ML\_Имя$  команды(результат).cnf и извещений:  
 $ML\_Имя$  извещения(список параметров).ind.

Список команд, квитанций и уведомлений интерфейса канального и прикладного уровня представлен в таблице 1.

Команда  $ML\_Trsm(Tp,NL,Adr,DLn,Data).cmd$  подает на канальный уровень запрос передачи блока данных  $Data$  размером  $DLn$  на станцию с адресом  $Adr$  в линии  $NL$ . Параметр  $Trp$  определяет тип сообщения:

- запрос текущих данных (ВСт);
- передача данных конфигурации прикладного уровня (ВСт);
- считывание данных конфигурации прикладного уровня (ВСт);
- считывание архива (ВСт);
- передача данных конфигурации сетевого уровня (ВСт);
- ответ на команду синхронизации (Ст);

- ответ на запрос текущих данных (Ст);
- квитанция данных конфигурации прикладного уровня (Ст);
- данные конфигурации прикладного уровня (Ст);
- данные архива.

**ТАБЛИЦА 1. Сообщения интерфейса канального и прикладного уровня**

TABLE 1. Link and Application Layer Interface Messages

Имя сообщения	Тип	Список параметров	Действие
$ML\_Trsm.cmd$	Кмд	$Trp,NbL,Adr,DLn,Data$	передача сообщения $Data$ длиной $DLn$ байт с типом $Trp$ в станцию $Adr$ линии $NbL$ в предстоящем цикле обмена
$ML\_Trsm.cnf$	Квт	$Trp,NbL,Adr,Result$	квитанция команды $ML\_Trsm.cmd$
$ML\_Rsv.ind$	Изв	$NbL,DLn,Data,EvnRec,LQ$	уведомление о приеме данных $Data$ длиной $DLn$ байт с линии $NbL$ и с записью флагов событий $EvnRec$
$ML\_SetNtwCnfg.cmd$	Кмд*	$NPL,MNST,MAAdr$	установка данных конфигурации сети: количество линий $NPL$ , массив $MNST$ количества станций в каждой из линий и массив $MAAdr$ АСт
$ML\_SetNtwCnfg.cnf$	Квт*	$Result$	квитанция команды $ML\_SetNtwCnfg.cmd$
$ML\_GetNtwCnfg.cmd$	Кмд	нет	запрос данных конфигурации сети
$ML\_GetNtwCnfg.cnf$	Квт	$NPL,MNST,MAAdr$	ответ на команду $ML\_GetNtwCnfg.cmd$
$ML\_SetTmParam.cmd$	Кмд*	$Tce,Tts$	установка временных параметров периода синхронизации $Tce$ и длительности временного кванта $Tts$
$ML\_SetTmParam.cnf$	Квт*	$Result$	квитанция команды $ML\_SetTmParam.cmd$
$ML\_GetTmParam.cmd$	Кмд	нет	запрос временных параметров
$ML\_GetTmParam.cnf$	Квт	$Tce,Tts$	ответ на команду $ML\_GetTmParam.cmd$
$ML\_Connect.ind$	Изв	$NbL,Adr,Connect$	уведомление об установлении и потере связи со станцией $Adr$ линии $NbL$

Усл. обозначения: Кмд – Команда; Квт – Квитанция; Изв – Извещение; \* – только для ведущей станции

Извещение  $ML\_Rsv(NbL,DLn,Data,EvnRec,LQ).ind$  передает на прикладной уровень данные  $Data$  длиной  $DLn$  байт, принятые с линии  $NbL$ . Принятые данные содержат информацию, полученную от всех станций линии в текущем сеансе обмена (см. ниже). Параметр  $EvnRec$  содержит флаги событий (см. ниже), а  $LQ$  – показатель качества канала связи от радиомодема.



Команда *ML\_SetNtwCnfg(NPL,MNST,MAdr).cmd* на ВСт передает на сетевой уровень данные сетевой конфигурации: байтовый параметр *NPL* – количество подключенных линий, байтовый массив *MNST* – количество станций в каждой из линий и массив слов *MAdr* [1...4, 1...64] – адреса станций. Команда *ML\_GetNtwCnfg.cmd* считывает данные сетевой конфигурации.

Команда *ML\_SetTmParam(Tce,Tts).cmd* на ведущей станции передает на сетевой уровень два параметра, определяющих временные характеристики циклов обмена. Значение *Tce* = 1...1800 в секундах задает временной интервал сеансов обмена по линии. Параметр *Tts* = 10...100 – длительность временного слота в десятых долях мс. Команда *ML\_GetTmParam.cmd* считывает данные сетевой конфигурации.

Извещение *ML\_Connect.ind(NbL,Adr,Connect).inf* информирует прикладной уровень об установлении (*Connect=true*) и о потере (*Connect=false*) связи со станцией *Adr* на линии *NbL*. Последний параметр имеет значение только в ведущей станции. Если ВСт обнаруживает потерю связи со всеми станциями линии, начиная с некоторого номера, то это свидетельствует о выходе из строя станции с номером, следующим за последней ответившей станцией. В этой ситуации ВСт автоматически или по команде из ДП осуществляет переконфигурацию линии с обходом неисправного ретранслятора. Для того, чтобы такие обходы были возможны, каждый из ретрансляторов должен иметь в своей зоне приема по крайней мере по две станции с каждой стороны линии.

### Сетевой уровень

Процедуры сетевого уровня выполняют следующие функции:

- разделение данных, полученных от прикладного уровня для передачи по линии, на пакеты и передача сформированных пакетов на канальный уровень;
- прием пакетов данных с канального уровня, объединение прикладных данных из принятых пакетов и их пересылка на прикладной уровень;
- контроль связи по линиям и извещение прикладного уровня о пропадании и о восстановлении связи;
- синхронизация процессов передачи и приема данных по времени относительно рабочих циклов;
- управление включением и выключением радиоприемников.

В ВСт процедура сетевого уровня дополнительно формирует структуру рабочих циклов, формирует и передает в каждую из линий пакеты синхронизации. Рассмотрим структуру циклов обмена данными, которая формируется сетевым уровнем. Процедурой сетевого уровня создаются программные таймеры по числу линий, подключенных к ВСт.

Каждой  $i$ -й линии ( $i = 1 \dots N_{\text{пл}}$ ) в пределах интервала *Tce* выделяется время работы *Tлр(i)* кратно числу станций в линии. Все таймеры установлены на длительность *Tce* цикла обмена, но с временным сдвигом на *Tлр(i)* один относительно другого. Таймеры отсчитывают интервалы времени в единицах длительности *Tts* временного слота (о выборе величины *Tts* см. ниже). Если время *Tce* не кратно *Tts*, то оно округляется до ближайшего кратного значения. По окончании счета  $i$ -го таймера запускается процедура обмена со станциями  $i$ -й линии. На канальный уровень выдается команда включения передатчика. Если к этому моменту времени не поступили данные на передачу от прикладного уровня, начинается сеанс синхронизации станций. В линию передается сформированный пакет синхронизации.

Пакет синхронизации имеет фиксированную длину 14 байт и разделяется на поля типа запроса, 16-разрядного адреса ретранслятора, где передается первый АСт из массива адресов для данной линии, общего количества станций в линии, счетчика ретрансляций, длины блока данных прикладного уровня (БДПУ) и самого БДПУ. В пакете синхронизации длина БДПУ – 8 байт. В первом байте БДПУ передается длительность слота *Tts*, во втором и третьем – длительность рабочего цикла, в байтах 4...7 – текущие дата и время в упакованном BCD-формате (аббр. от англ. Binary-Coded Decimal), последний 8-й байт – резерв.

Запросы данных и ответы на запросы в зависимости от размера БДПУ могут содержать от одного до 6 пакетов, передаваемых подряд. Первый (головной) пакет имеет те же поля, что и пакет синхронизации. В поле типа запроса, кроме кода типа (старшие 5 бит), передается количество присоединенных пакетов данных (3 младших бита). Длина БДПУ – до 118 байт. В присоединенных пакетах имеется поле порядкового номера пакета, длины БДПУ (до 123 байт) и сам БДПУ. Таким образом, за один сеанс обмена от головной станции может быть передано до 856 байт прикладных данных.

Ответ станций на запрос синхронизации имеет фиксированную длину – 19 байт. В нем в поле адреса ретранслятора передается адрес предыдущей станции линии, который хранится в памяти станции. Далее следуют поле ответивших станций и поле событий длиной по 8 байт. В поле событий каждая из станций, передающих ответ, добавляет флаг в битовой позиции соответственно своему порядковому номеру в линии. В поле событий отвечающая станция выставляет флаг, если за период времени от предыдущего запроса в ней были зарегистрированы какие-либо аварийные события, например, срабатывание охранного датчика.

Головной пакет ответа станций на запрос прикладного уровня в поле типа ответа содержит код типа ответа (старшие 5 бит) и количество присоединенных пакетов данных (3 младших бита). Дополнительно пакет содержит поле длины БДПУ и сам БДПУ. Структура дополнительных пакетов такая же, как в запросе. За один сеанс считывания данных в ВСт может быть передано до 843 байт прикладных данных.

На рисунке 2а показаны временные диаграммы сеанса синхронизации. ВСт с началом первого временного слота периода  $T_{се}$  передает пакет синхронизации на станцию ближайшую по линии, затем выключает передатчик и устанавливает таймер ожидания начала приема на время, необходимое для последовательной передачи запроса на все станции и на получение от них ответа. По окончании счета времени ожидания подается команда включения приемника и принимается ответ.

Станция, получив пакет синхронизации и проверив совпадение содержащегося в нем адреса с собственным, устанавливает по нему свои таймеры, которые считают длительность временного слота и  $T_{се}$ . Таймер временного слота устанавливается на расчетный момент начала приема пакета, а таймер  $T_{се}$  – на начало следующего временного слота.

Далее станция заменяет собственный адрес в пакете на адрес следующей по порядку станции, инкрементирует счетчик ретрансляций и с началом следующего временного слота передает пакет синхронизации дальше. По окончании передачи приемопередатчик переходит в спящий режим до истечения расчетного времени  $T_{зпр}$ , когда на станцию должен поступить ответ от его соседа дальше по линии. Через время  $T_{зпр}$  дается команда включения приемника для приема ответа. В принятом ответе собственный адрес заменяется на адрес предыдущей станции линии (0 – если предшествующей является ВСт), на позиции соответственно своему порядковому номеру выставляются флажок ответившей станции.

Если на станции за период времени после предшествующего сеанса имели место какие-либо события, определенные в прикладных процедурах (например, срабатывания охранного датчика), выставляется флажок в позиции поля событий соответственно номеру станции. С началом очередного временного слота ответный пакет передается дальше. На станции с порядковым номером  $k$  время  $T_{зпр}(k)$  вычисляется по известным  $k$ , количеству станций в линии  $N_{ст}$  и длительности слота  $T_{ts}$ :

$$T_{зпр}(k) = (N_{ст} - k - 1) * T_{ts} * 2 - t_{заш}, \quad k < N_{ст},$$

где требуемое время  $t_{заш}$ , учитывает неточность счета таймеров, временной разброс приема пакетов синхронизации и время включения приемника.

Процедура ретрансляций повторяется до последней станции в линии. Последняя станция, не обнаружив в памяти адрес следующей за ней станции, немедленно с началом очередного временного слота передает ответ, в котором поля ответов и событий обнулены за исключением ее собственного битового разряда. После этого радиомодем станции переводится в спящий режим до начала следующего цикла обмена.

Таким образом, таймеры счета длительности цикла обмена на станциях линии сдвинуты один относительно другого на длительность одного временного слота. Приемники станций включаются непосредственно перед началом цикла обмена по таймеру с защитным опережением  $t_{заш}$ . До вхождения в синхронизм и, если синхронизация потеряна, приемники станций должны быть включены постоянно, либо включаться периодически через некоторые случайные промежутки времени.

Спецификации протокола предусматривают синхронизацию передачи сообщений по временным слотам. Это упрощает расчеты времен ожидания приема при пересылке запросов и ответов. Длительность временного слота  $T_{ts}$  выбирается таким образом, чтобы в слот поместился запрос синхронизации ведущей станции либо ответ на запрос синхронизации плюс время на включение и выключение передатчика, задержка на обработку принятых данных и формирование пакета для передачи. Минимальная длительность  $T_{ts}$  рассчитывается, исходя из известных длины запроса синхронизации и ответа (22 и 27 байт, соответственно с учетом полей, добавленных на канальном и физическом уровнях), скорости передачи  $V_{л} = 250$  кбит/с и ограниченных спецификациями физического уровня Стандарта временами переключения радиомодема с приема на передачу и обратно – 12 символов (т. е. 6 байт):  $T_{ts\min} = 1,056$  мс. При заданных  $T_{ts}$  и количестве  $N_{ст}$  станций в линии вычисляется суммарное время сеанса синхронизации  $T_{синх}$ :

$$T_{синх} = 2 * T_{ts} * N_{ст}.$$

На рисунке 2б представлены временные диаграммы сеанса сбора данных. Здесь также, как в сеансе синхронизации, запросы последовательно транслируются до последней станции линии. С нее начинается трансляция ответов станций. При трансляции ответа каждая из станций добавляет к прикладным данным, полученным от предыдущей станции, свои собственные данные. При необходимости при этом формируются присоединенные пакеты данных.

Учитывая максимальный размер БДПУ в сообщении с 6 дополнительными пакетами (843 байта), при максимальном количестве станций (64), получим максимальный размер блока прикладных данных от одной станции – 13 байт.

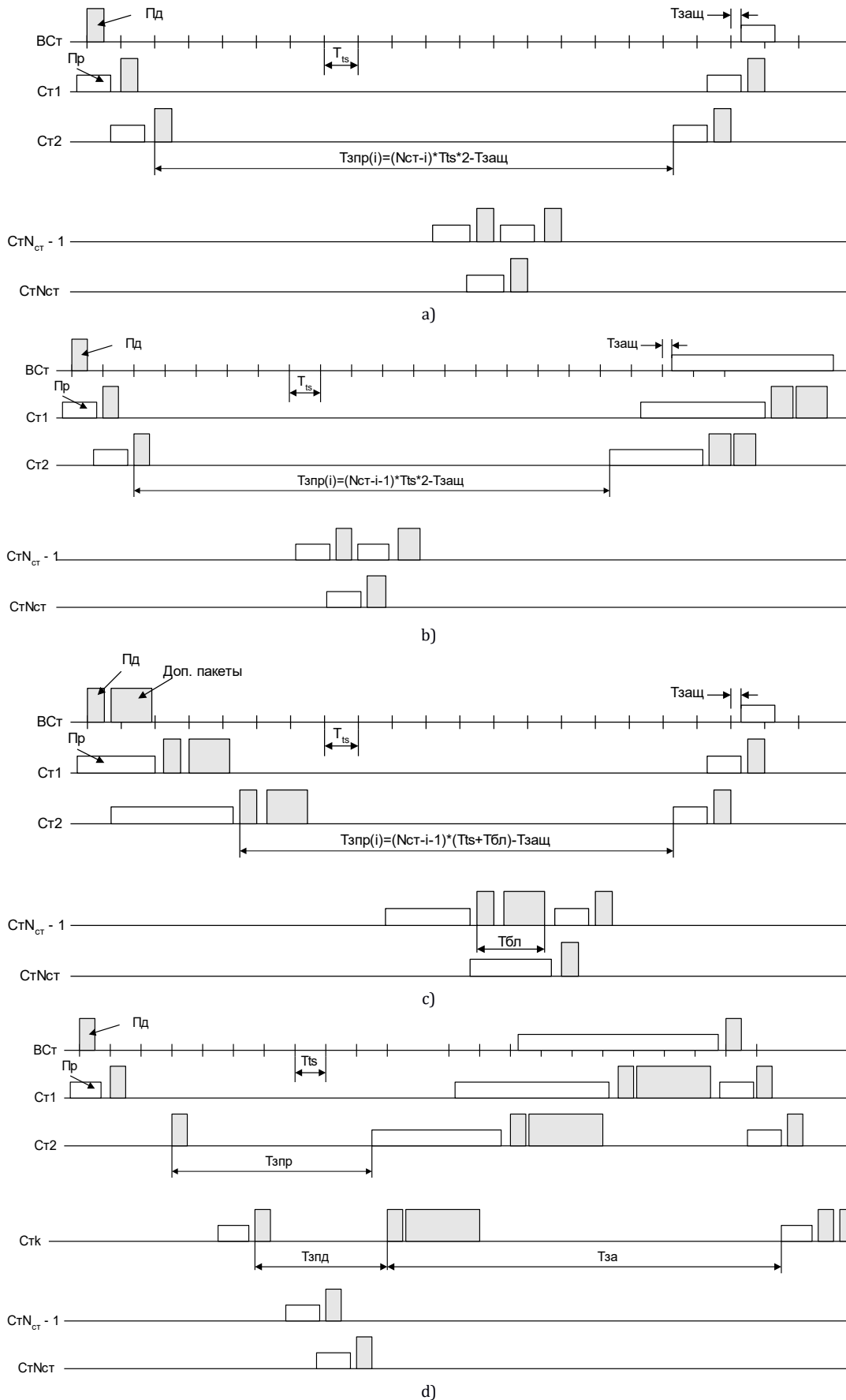


Рис. 2. Временные диаграммы сеанса синхронизации (а), сбора данных (b), конфигурирования (c) и чтения архива (d)  
 Fig. 2. Timing Diagrams of a Synchronization Session (a), Data Collection (b), Configuration (c) and Archive Reading (d)

Для того, чтобы рассчитать длительность сеанса сбора данных с линии из  $N_{СТ}$  станций, обозначим длину пакета прикладного уровня от одной станции  $L_{СТ}$ . Тогда общая длина в байтах БДПУ при передаче от станции с порядковым номером  $k = 1...N_{СТ}$  составит:

$$L_{СУМ}(k) = L_{СТ} * (N_{СТ} - k + 1).$$

Длительность головного пакета  $L_{ГП}$  при этом будет соответствовать:

$$L_{ГП}(k) = \min(L_{СУМ}(k), 105) + 28,$$

а суммарная длина сообщения:

$$L_{сообщ}(k) = \left\{ \begin{array}{ll} L_{ГП} + L_1 * 133 + L_2 + 10 & \text{при } L_2 > 0 \\ L_{ГП} + L_1 * 133 & \text{при } L_2 = 0 \end{array} \right\},$$

где

$$L_1 = L_{СУМ}(k) - 105 \text{ div}123,$$

$$L_2 = L_{СУМ}(k) - 105 \text{ mod}123.$$

При известной длине  $L_{сообщ}(k)$  длительность сеанса сбора рассчитывается по формуле:

$$T_{СБ} = \sum_{k=1}^{N_{СТ}} \{ \{ (L_{сообщ}(k) * \frac{8}{V_L}) \text{ div } T_{ts} + 1 \} + N_{СТ} \} \times T_{ts}. \quad (3)$$

На рисунке 2с показаны временные диаграммы сеанса конфигурации станций. В сообщении конфигурации БДПУ включает таблицу адресов станций линии в порядке их следования, и данные конфигурации непосредственно прикладного уровня. Кроме этого, в данных конфигурациях для каждой из станций могут передаваться таблицы с заранее рассчитанными задержками включения приемника для ретрансляции ответных сообщений в сеансах синхронизации, конфигурации и сбора данных. Из таблицы каждая из станций по своему номеру в линии считывает адреса своих соседей сверху и снизу, а также значения требуемых задержек включения приемника. Сообщение транслируется от станции к станции, затем, начиная с последней станции, транслируется ответная квитанция, которая отличается от ответа на запрос синхронизации только в поле типа ответа. Верхнюю оценку длительности сеанса конфигурации дает формула (3).

На рисунке 2d показаны временные диаграммы процедуры считывания архива измерений с выбранной станции. При больших размерах архива эта процедура может потребовать множество сеансов обмена. Непосредственно команды запуска архивирования и чтения архива и считанные данные содержатся в данных прикладного уровня, и их обработка здесь не рассматривается. В первом сеансе считывания пакет запроса транслируется на все станции линии, подтверждая им нормальное состояние связи по линии, однако ответ формируется

только на выбранной станции (станция  $Ст_k$  на рисунке 2d). Эта станция задерживает ответ на время  $T_{зд}$  с таким расчетом, чтобы он передавался во временном интервале, когда включен приемник предшествующей станции. Ответ далее транслируется к головной станции. Если считаны не все архивные данные, запрос повторяется. В этом сеансе станция  $Ст_k$  уже не транслирует запрос дальше, а сразу передает ответ. Станции, транслировавшие ответ на архивный запрос, снова включают свои приемники через время  $T_{за}$ , чтобы иметь возможность принять повторный запрос. Если повторный запрос не поступил, они переводят радиомодем в спящий режим до окончания цикла. В противном случае продолжают работать, транслируя запросы и ответы.

За первым повторным сеансом чтения архива могут последовать и другие, вплоть до истечения времени  $T_{лр}(l)$ , отведенного на работу с данной линией. Верхняя оценка длительности сеанса чтения архива будет получена при условии, что запрашивается последняя станция линии:

$$T_{ЧАmax} = N_{СТ} * T_{ts} \times (1 + ((7448/V_L) \text{ div } T_{ts}) + 1). \quad (4)$$

Формула (4) дает минимальную длительность рабочего цикла  $T_{Семин}$ , при которой реализуются все требуемые режимы обмена.

Тогда, при заданном количестве подключенных линий и времени  $T_{се}$ , получим нижнюю оценку  $N_{AL}$  объема архивных данных, которые могут быть считаны за один рабочий цикл:

$$N_{AL} = \text{trunc} \left( \frac{(T_{се} * N_{СТ} / N_{СТ\Sigma})}{T_{ЧАmax}} \right),$$

где  $N_{СТ\Sigma}$  – суммарное число Ст по всем линиям.

При необходимости считывание архива продолжается в последующих циклах.

Процедура опроса текущего состояния одной выбранной станции происходит по диаграммам 3 с той разницей, что повторные запросы в цикле в этой процедуре не требуются, также как передача присоединенных пакетов.

При приеме данных от станций процедура сетевого уровня анализирует флажки ответивших станций и по результатам анализа информирует прикладной уровень о потерях связи со станциями и восстановлении связи. На прикладной уровень передается содержимое поля флажков событий из принятого пакета. По ним прикладной уровень может принять решение о дополнительных запросах станций, имеющих аварийные события.

Сетевой уровень взаимодействует с канальным уровнем посредством обмена сообщениями, перечисленными в таблице 2.

ТАБЛИЦА 2. Протокол обмена данными канального и сетевого уровня

TABLE 2. Data Exchange Protocol of the Data Link and Network Layers

Имя сообщения и код (Hex) сообщения	Тип	Список параметров	Действие
<i>SL_Trsm.cmd</i>	Кмд	<i>DLn,Data</i>	передача сообщения <i>Data</i> длиной <i>DLn</i> байт
<i>SL_Trsm.cnf</i>	Квт	<i>Result</i>	квитанция команды <i>SL_Trsm.cmd</i>
<i>ML_Rsv.ind</i>	Изв	<i>DLn, Data, Err,LQ</i>	извещение о приеме данных <i>Data</i> длиной <i>DLn</i> байт с ошибками приема ( <i>Err</i> ) и с качеством канала <i>LQ</i>
<i>SL_SetTmParam.cmd</i>	Кмд	<i>Tts</i>	установка длительности временного слота <i>Tts</i>
<i>SL_SetTmParam.cnf</i>	Квт	<i>Result</i>	квитанция команды <i>SL_SetTmParam.cmd</i>
<i>SL_GetTmParam.cmd</i>	Кмд	нет	запрос длительности временного слота <i>Tts</i>
<i>SL_GetTmParam.cnf</i> §79	Квт	<i>Tts</i>	ответ на команду <i>SL_GetTmParam.cmd</i>
<i>SL_RxOnOff.cmd</i>	Кмд	<i>RxOn</i>	включение и выключение радиоприемника
<i>SL_RxOnOff.cnf</i>	Квт	<i>Result</i>	квитанция команды <i>SL_RxOnOff.cmd</i>
<i>SL_SetCsrEn.cmd</i>	Кмд	<i>Value</i>	разрешение формирования и проверки контрольной последовательности <i>CRC</i>
<i>SL_SetCsrEn.cnf</i>	Квт	<i>Result</i>	квитанция команды <i>SL_SetCsrEn.cmd</i>

В таблице 2 логическая переменная *Err* определяет наличие ошибок приема пакета: *false* – нет обнаруженных ошибок, *true* – есть, а параметр *LQ* – показатель качества канала, полученный от модема.

Параметр *Result* в квитанции на команду *SL\_RxOnOff.cmd* принимает значения из ряда: *Success* – успешно; *RxFal* – авария модема; *TxOn* – в настоящее время включен передатчик.

Конфигурирование канального уровня предполагает передачу на него единственного параметра – длительности временного слота *Tts* и команды разрешения или запрещения формирования и проверки контрольной последовательности пакета *CRC*. Запрет *CRC* на программном канальном уровне может быть установлен, если эти функции выполняются непосредственно модемом.

Следует отметить, что представленные здесь спецификации сетевого уровня не поддерживают функции узловых ретрансляторов, что потребует дополнения протокола с целью применения к более разветвленным сетевым топологиям.

## Канальный уровень

Канальный уровень взаимодействует с сетевым уровнем сверху и физическим уровнем снизу. Обмен с физическим уровнем осуществляется в соответствии со спецификациями этого физического протокола Стандарта.

Процедуры канального уровня выполняют следующие функции:

- передачу пакетов данных, полученных от сетевого уровня, с привязкой к временным слотам на физический уровень;
- прием пакетов данных от физического уровня и их пересылку в сетевой уровень;
- управление включениями радиоприемника и радиопередатчика;
- расчет контрольных последовательностей передаваемых и принимаемых пакетов, если он разрешен настройками канального уровня.

Если расчет контрольных последовательностей разрешен, при передаче пакета процедура добавляет к передаваемым данным два байта циклической контрольной последовательности (*CRC*, аббр. от англ. Cyclic Redundancy Check), а при приеме осуществляет проверку *CRC* принятых пакетов. Пакеты, принятые с ошибками, передаются в сетевой уровень, но с уведомлением об ошибке приема.

При приеме пакета на сетевой уровень передается показатель качества канала *LQ*, полученный от радиомодема в уведомлении о приеме.

Канальный уровень имеет таймер, который настраивается на заданную длительность *Tts* временного слота. Команды включения передатчика и передачи пакета посылаются на физический уровень всегда с привязкой к началам слота по этому таймеру.

Как следует из результатов обзора характеристик микросхем для радиомодемов Стандарта [5, 6] в большинстве из них требуемые здесь функции канального уровня могут быть реализованы непосредственно в модеме.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами исследования являются следующие.

Во-первых, на основе анализа особенностей работы систем активной ЭХЗ подземных металлических коммуникаций сформулированы требования к системам радиосвязи для организации сетей сбора данных с выносных беспроводных КИП в СКЗ. Показаны достоинства реализации подобных систем на базе маломощных радиомодемов, работающих в нелицензируемом диапазоне частот и позволяющих минимизировать энергопотребление устройств. Обоснованы перечень режимов связи, которые должны поддерживать программные средства сетевого обмена, включающий режимы регламентного

опроса КИП по времени, адресные запросы, спорадическую передачу информации о событиях и считывание архивов результатов измерений.

Во-вторых, по результатам анализа современного уровня разработок в области маломощных систем радиосвязи наибольший интерес для реализации сетей сбора данных с КИП ЭХЗ представляют системы, построенные на базе Стандарта, ориентированного на создание систем с низким энергопотреблением. Анализ спецификаций физического и канального уровней данного стандарта и его наиболее развитой программной надстройки стека протоколов ZigBee применительно к рассматриваемому приложению показал, что спецификации канального уровня и имеющиеся программные надстройки в нем малоприменимы, что позволило сделать вывод о целесообразности разработки специализированных протоколов канального и сетевого уровней.

В-третьих, разработаны спецификации протоколов прикладного, сетевого и канального уровней для сетей сбора данных, основанные на спецификациях физического уровня Стандарта и ориентированные на организацию сетей сбора данных с топологией звезды с лучами, составленными длинными цепочками ретрансляций. Разработанные протоколы предусматривают синхронную работу сети, которая позволяет минимизировать энергозатраты оборудования радиомодемов, и обеспечивают требуемые режимы связи для сбора данных с выносных КИП-станций катодной защиты.

Практическая реализация результатов работы требует проведения дополнительных исследований в следующих направлениях, выходящих за рамки настоящей статьи:

- теоретическое исследование информационных и энергетических характеристик беспроводных КИП при учете погрешности и нестабильности времязадающих устройств;
- разработка и обоснование алгоритмов аварийного реконфигурирования при выходе из строя отдельных КИП, выполняющих функции ретрансляторов;
- разработка и обоснование алгоритмов оперативного управления мощностью передатчиков для минимизации энергозатрат;
- доработка протоколов сетевого и канального уровней с учетом реализации процедур аварийного реконфигурирования и управления мощностью передатчика;
- оценка допустимой длины ретрансляционных участков при использовании антенных устройств различного типа и предварительные рекомендации по выбору антенн КИП.

Кроме этого, представляется перспективным исследовать возможности распространения результатов работы на сети сбора данных, основанные на других технологиях радиосвязи, в частности, технологии LoRa.

Перечисленные выше задачи должны стать предметом дальнейших исследований.

#### Список источников

1. Вишневикий В.М., Ляхов А.И., Портной С.Л., Шахнович И.В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. М.: Техносфера, 2005. 592 с. EDN:QMONPT
2. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.15.4™-2011. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.4. Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS). IEEE, 2011. DOI:10.1109/IEEESTD.2011.6012487
3. Gutierrez J.A., Winkel L., Callaway E.H., Jr., Barrett R.L, Jr. Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4. Wiley, 2011. 288 p.
4. Scheers B., Mees W., Lauwens B. Developments on an IEEE 802.15.4-based wireless sensor network // Journal of Telecommunications and Information Technology. 2008. Vol. 2. PP. 46–52.
5. Соколов М., Гришин А. Аппаратные средства реализации беспроводных решений ZigBee/802.15.4 // Современная электроника. 2006. № 9. С. 28–35.
6. Шейкин М. Сетевые технологии ZigBee // Электроника. 2011. № 6. С. 36–40.
7. ZigBee Specification. ZigBee Alliance, 2015. URL: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf> (Accessed 16.01.2024)
8. Баскаков В., Оганов В. Беспроводные сенсорные сети на базе платформы MeshLogic™ // Электронные компоненты. 2006. № 8. С. 65–69.
9. EmberZNet application developer's guide. Boston: Ember Corporation, 2008. URL: [https://www.wless.ru/files/ZigBee/EM260/120-4028-000\\_EmberZNetAppDevGuide.pdf](https://www.wless.ru/files/ZigBee/EM260/120-4028-000_EmberZNetAppDevGuide.pdf) (Accessed 16.01.2024)
10. Сафронов А. Стек протоколов MIWI для беспроводных технологий // Новости электроники. 2007. № 13. С. 29–36.
11. РД 153-39.4-039-99. Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН. М.: ВНИИСТ, 1999. 80 с.
12. Агиней Р.В., Александров Ю.В., Никулин С.А., Исупова Е.В., Исламов Р.Р., Александров О.Ю. и др. Электрохимическая защита нефтегазопроводов. М., Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. 736 с. EDN:BMRYGN
13. Винокурцев Г.Г. Система технологического контроля электрохимической защиты магистральных газопроводов // Газовая промышленность. 1993. № 3. С. 20–21.
14. Салин А.Г. Автоматизация расчетов электрохимзащиты в среде ElectricS ECP // CADMASTER. 2006. № 9(34). С. 60–63. EDN:VKNQVO

15. Барбанель Е.С., Бухинник А.Ю., Точилов В.Н. Внедрение автоматизированной системы диспетчерского контроля и управления параметрами ЭХЗ // Газификация и использование газа. 2004. № 1. С. 34–46.
16. ГОСТ Р 9.606-2021. Единая система защиты от коррозии и старения. Электрохимическая защита. Пункты контрольно-измерительные. Общие технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 63 с.

## References

1. Vishnevsky V.M., Lyakhov A.I., Portnoy S.L., Shakhnovich I.V. *Broadband Wireless Information Transmission Networks*. Moscow: Technospere Publ.; 2005. 592 p. EDN:QMONPT
2. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 802.15.4™-2011. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 15.4. Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*. IEEE; 2011. DOI:10.1109/IEEESTD.2011.6012487
3. Gutierrez J.A., Winkel L., Callaway E.H., Jr., Barrett R.L., Jr. *Low-Rate Wireless Personal Area Networks: Enabling Wireless Sensors with IEEE 802.15.4*. Wiley; 2011. 288 p.
4. Scheers B., Mees W., Lauwens B. Developments on an IEEE 802.15.4-based wireless sensor network. *Journal of Telecommunications and Information Technology*. 2008;2:46–52.
5. Sokolov M., Grishin A. Hardware for Implementing ZigBee/802.15.4 Wireless Solutions. *Sovremennaya elektronika*. 2006;9:28–35
6. Sheykin M. Network technologies ZigBee. *Elektronika*. 2011;6:36–40.
7. *ZigBee Specification*. ZigBee Alliance; 2015. URL: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf> [Accessed 16.01.2024]
8. Baskakov V., Oganov V. Wireless Sensor Networks Based on the MeshLogic Platform. *Elektronnye komponenty*. 2006;8: 65–69.
9. *EmberZNet application developer's guide*. Boston: Ember Corporation; 2008. URL: [https://www.wless.ru/files/ZigBee/EM260/120-4028-000\\_EmberZNetAppDevGuide.pdf](https://www.wless.ru/files/ZigBee/EM260/120-4028-000_EmberZNetAppDevGuide.pdf) [Accessed 16.01.2024]
10. Safronov A. MIWI Protocol Stack for Wireless Technologies. *Novosti elektroniki*. 2007;13:29–36.
11. RD 153-39.4-039-99. *Standards for Designing Electrochemical Protection of Main Pipelines and Oil Pipeline Sites*. Moscow: All-Union Research Institute for Construction, Operation of Pipelines and Fuel and Energy Complex Facilities Publ.; 1999. 80 p.
12. Aginey R.V., Alexandrov Yu.V., Nikulin S.A., Isupova E.V., Islamov R.R., Alexandrov O.Yu., et al. *Electrochemical Protection of Oil and Gas Pipelines*. Moscow, Vologda: Infra-Inzheneriia Publ.; 2020. 736 p. EDN:BMRYGN
13. Vinokurtsev G.G. System for technological control of electrochemical protection of main gas pipelines. *Gazovaya promyshlennost*. 1993;3:20–21.
14. Salin A.G. Automation of Electrochemical Protection Calculations in ElectricCS ECP Environment. *CADMASTER*. 2006;9(34):60–63. EDN:VKNQVO
15. Barbanel E.S., Bukhinnik A.Yu., Tochilov V.N. Introduction of the automated system of the dispatch control and management of the EHS parameters. *Gazifikatsiya i ispolzovanie gaza*. 2004;1:34–46.
16. GOSTP 9.606-2021. *Unified system of corrosion and ageing protection. Electrochemical protection. Control and measuring points. General specifications*. Moscow: Russian Standardization Institute Publ.; 2022. 63 p.


Статья поступила в редакцию 12.12.2023; одобрена после рецензирования 23.01.2024; принята к публикации 24.01.2024.

The article was submitted 12.12.2023; approved after reviewing 23.01.2024; accepted for publication 24.01.2024.

## Информация об авторе:

**БУХИНИК**  
**Александр Юрьевич**

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории систем передачи телеметрической информации Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича

 <https://orcid.org/0009-0009-0571-7493>