



■ **В.С. Ваганов // V.S. Vaganov**
vaganovv@inbox.ru

канд. физ.-мат. наук, научный консультант ООО НПФ "Гранч", Россия, 630015, г. Новосибирск, ул. Королева, 40 корпус 1
candidate of physical and mathematical sciences, Scientific Consultant in RPC Granch, 40(1), Koroleva Street, Novosibirsk, 630015, Russia



■ **Т.В. Гоффарт // T.V. Goffart**
goffart@granch.ru

начальник научно-технического отделения ООО НПФ «ГРАНЧ», Россия, 630015, г. Новосибирск, ул. Королева, 40 корпус 1
Head of the Scientific and Technical Department in RPC Granch, 40(1), Koroleva Street, Novosibirsk, 630015, Russia



■ **И.С. Дубков // I.S. Dubkov**
dubkov@granch.ru

ведущий инженер-электрони ООО НПФ «ГРАНЧ», Россия, 630015, г. Новосибирск, ул. Королева, 40 корпус 1
Leading Electronic Engineer in RPC Granch, 40(1), Koroleva Street, Novosibirsk, 630015, Russia

УДК 622.864

МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ. ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ И РАЗВИТИЯ MULTISERVICE COMPUTER NETWORKS IN COAL MINES. FEATURES OF IMPLEMENTATION AND DEVELOPMENT

Увеличение функциональных требований к системам безопасности угольных шахт на уровне законодательства привело к использованию многофункциональных и единых систем обеспечения безопасности. Это привело к появлению на рынке множества систем, работающих на различных технологиях, как совершенно новых, так и модернизированных старых. Руководители и технические специалисты горнодобывающих предприятий встали перед проблемой выбора и оценки разных технических решений сложного комплекса оборудования.

В этой статье предлагаются критерии экспертной оценки сложных систем, в частности МФСБ угольных шахт. На основе анализа численных показателей критериев предлагается архитектура оптимальной компьютерной МС-сети с учетом факторов, действующих в угольных шахтах на устройства с Ex-маркировкой RO/PB и, несомненно, определяющих конструкцию узлов связи, мобильных устройств инфраструктурных каналов связи. Даны рекомендации по решению возникающих проблем, рассмотрены возможные направления развития.

The increase in functional requirements for coal mine safety systems at the level of legislation led to the use of multifunctional and unified safety systems. This led to the appearance on the market of many systems operating on various technologies, both completely new and modernized old ones. Leaders and technical specialists of mining companies faced the problem of selecting and evaluating various technical solutions for a complex set of equipment.

In this article, we propose criteria for the expert evaluation of complex systems, in particular the IFSW of coal mines. Based on the analysis of the numerical criteria indicators, the architecture of the optimal computer MS network is proposed taking into account the factors operating in coal mines for devices with Ex marking RO / RV and, undoubtedly, determining the design of communication nodes and mobile devices of infrastructural communication channels. Recommendations for solving emerging problems are given, possible development directions are considered.

Ключевые слова: КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ, ПОДЗЕМНЫЕ ВЫРАБОТКИ, УГОЛЬНЫЕ ШАХТЫ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ БЕЗОПАСНОСТИ, БЕЗОПАСНОСТЬ УГОЛЬНЫХ ШАХТ, МОБИЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА, ИНФРАСТРУКТУРА СВЯЗИ, ГРАНЧ, МУЛЬТИСЕРВИСНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СЕТИ

Key words: COMPUTER NETWORKS, UNDERGROUND DEVELOPMENT, COAL MINES, MULTIFUNCTIONAL SECURITY SYSTEMS, SAFETY OF COAL MINES, MOBILE DEVICES, COMMUNICATION INFRASTRUCTURE, GRANCH, MULTISERVICE COMPUTER NETWORKS

Связь - это передача и прием информации при помощи различных технических средств (почтовая связь, электросвязь и др.) В управлении производством угольных шахт связь играет решающее значение, поскольку обеспечивает безопасность работ и персонала. Именно на основе систем связи конструируются многофунк-

циональные системы безопасности (МФСБ) угольных шахт. В России состав и функции МФСБ регулируются Федеральными нормами и правилами «Правила безопасности в угольных шахтах» (ПБ) [1]. Аналогичные усилия предпринимаются в ведущих странах-производителях угля: Китае, США, Южной Африке, Австралии.

В большинстве случаев современные

системы связи и на поверхности, и под землей реализуются на основе компьютерных сетей, в первую очередь, благодаря развитию концепции мультисервисных сетей. Подробно о решениях в области систем связи под землей можно прочитать в работах [2], [3], [4]. Это происходит, в первую очередь, благодаря развитию концепции мультисервисных сетей. Мультисервисная сеть (МС) - единая сеть, способная передавать голос, видеоизображения и данные с максимальной эффективностью. Современные сети мобильной связи стандарта 4G и 5G, высокоскоростные офисные и производственные сети, интегрированные с облачными сервисами, нейронными сетями и базами данных – вот некоторые примеры таких сетей. МС-сети и системы связи позволяют передавать и коммутировать различные виды трафика (объем информации, передаваемой через компьютерную сеть за определённый период времени) со скоростями до 100 Гбит/с и выше. Известно, что суровые условия эксплуатации компьютерных сетей под землей определяют инженерные решения и архитектуру устройств, на основе которых строятся современные МФСБ и аварийные системы связи и передачи данных.

В этой статье предлагаются критерии экспертной оценки сложных систем, в частности МФСБ угольных шахт. На основе анализа численных показателей критериев предлагается архитектура оптимальной компьютерной МС-сети с учетом факторов, действующих в угольных шахтах на устройства с Ex-маркировкой РО/РВ и, несомненно, определяющих конструкцию узлов связи, мобильных устройств инфраструктурных каналов связи. Даны рекомендации по решению возникающих проблем, рассмотрены возможные направления развития.

Критерии оценки работы МС-сетей.

Системы, по определению, сложное устройства, и для сравнения их между собой нужны критерии оценки. Разные системы используют в своей работе разные технологии, технические решения и архитектуры, а сравнивают, как правило, одинаковые параметры. А существуют ли единые критерии оценки различных систем? Ответ на этот вопрос нужен различным специалистам: управленцам добывающих компаний при принятии решения о приобретении оборудования различных производителей, контролирующим органам для оценки качества получаемых данных, соответствия регламентирующим требованиям и уровней риска, специалистам аварийных служб для оценки возможностей системы во время аварии, техническим

специалистам для оценки работоспособности, ремонтнопригодности узлов системы и пр. Для иллюстрации на рис.1 показаны основные функции МФСБ угольных шахт и основные потребители передаваемой информации.

Основной технологией при построении различных систем управления производством, систем обеспечения безопасности, систем мониторинга и т.п. стали цифровые компьютерные сети (рис. 2). Тем не менее в добывающей промышленности продолжают использоваться различные аналоговые и «полуцифровые» технологии. Значит, критерии оценки должны иметь возможность учитывать и этот аспект. Объективные количественные показатели будут полезны при проектировании и разработке систем для оптимизации её работы, условий применения. Ими удобно пользоваться для выявления «слабых» мест в архитектуре систем безопасности, планирования затрат при расширении функций систем и многого другого [5].

Для получения объективных математических показателей необходимо воспользоваться общетехническим подходом к системе как набору функциональных элементов или блоков, соединенных между собой связями (линиями связи), образующими при этом целостность. В терминах такой модели можно сравнивать практически любые системы, поскольку любую систему можно разбить на функциональную блок-схему и проанализировать. При дальнейшем рассмотрении ограничимся рассмотрением систем на основе компьютерных сетей, поскольку они уже «формализованы» в рамках этой модели и физически, и функционально.

Итак, *во-первых*, необходимо сформулировать критерии эффективности работы сети или системы. Для потребителей важны такие критерии, как производительность и надежность. Надежность – это свойство системы сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных пределах, соответствующих заданным режимам эксплуатации, что позволяет оценить не только работу компьютерной сети, но и системы в целом. Надежность – комплексный параметр, который в зависимости от назначения системы и условий ее эксплуатации может включать в себя безотказность, живучесть, ремонтнопригодность, доступность и т.п. Более того, между показателями производительности и надежности сети существует тесная связь. Ненадежная работа сети приводит к снижению производительности, поскольку сбои и отказы каналов связи и коммуникационного оборудования приводят к потере или



Рисунок 1 – Основные функции МФСБ угольных шахт и потребители передаваемой информации
 Figure 1 – Main functions of the MFSS of coal mines and consumers of transmitted information

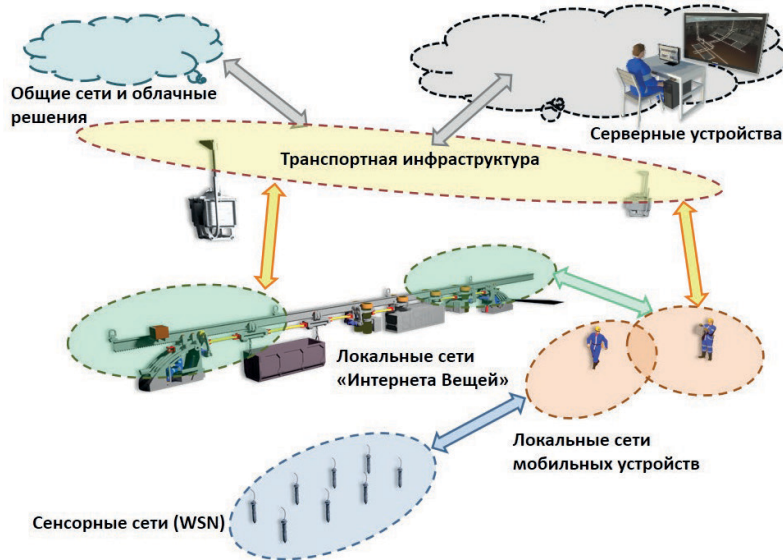


Рисунок 2 – Цифровые компьютерные сети в современной угольной шахте.
 Сети, сочетающие в себе различные технологии связи, носят название гетерогенных
 Figure 2 – Digital computer networks in a modern coal mine.
 Networks that combine various communication technologies are called heterogeneous

искажению части передаваемых пакетов, из-за чего при помощи транспортных протоколов приходится организовывать повторную передачу данных. Специфика систем безопасности угольных шахт, как взрывоопасных и протяжённых объектов, из комплексного критерия надёжности особо выделяет живучесть системы - свойство системы связи сохранять и восстанавливать в установленные сроки свои функциональные возможности (характеристики) в условиях разрушающих воздействий внешней среды. Живучесть системы, способной выдержать взрыв и восстановить функциональность будет выше

живучести системы не способной работать или работать частично, и это можно выразить в количественных вероятностных оценках. Для управления производством также важным оценочным критерием надёжности является доступность системы - соотношение общего времени, когда система находится в работоспособном состоянии, к общему времени эксплуатации. Нередко система с ненадежными элементами, но с возможностью быстрой замены имеют более высокие показатели по этому параметру, чем системы с очень надёжными элементами, но с длительными сроками замены.

Во-вторых, после установления критериев эффективности необходимо определиться с их количественными показателями. Дело в том, что долгое время надежность не измерялась количественно, а для оценки использовались качественные определения – «высокая», «низкая». Это сильно затрудняло объективную оценку систем. С возникновением научных методов в исследовании надежности (теории надежности), стало возможным вычисление и измерение количественных показателей. Появилась возможность объективно оценивать различные системы по единым критериям оптимизировать и контролировать их работу. Так, например, надежность (вероятность отказа системы в целом) линейной сети (рис.3, а) с последовательным соединением узлов связи, каждый из которых имеет одинаковую вероятность отказа (0,95) определяется произведением вероятностей. Численный показатель надёжности такой системы равен 0,86. Ее можно существенно увеличить, если подключить резервный канал параллельно (рис.3, б). Общий показатель надежности увеличится до 0,99.

В-третьих, определить диапазон допустимых изменений показателей, внутри которых выполняются требования работоспособности всех установленных функций системы, и определить алгоритм «удержания» показателей в заданных диапазонах.

Итак, все используемые критерии эффективности работы сети можно разделить на две группы: одна связана с производительностью работы сети, вторая связанная – с надежностью.

Производительность сети, в свою очередь, измеряется с помощью показателей двух типов – временных, оценивающих задержку, вносимую сетью при выполнении обмена данными, и показателей пропускной способности, отражающих количество информации, переданной сетью в единицу времени. Эти два типа показателей являются взаимно обратными, и, зная один из них, можно вычислить другой. Обычно, в качестве временной характеристики производительности сети, используется такой показатель, как время реакции сети (рис. 4). В общем случае, время реакции можно определить как интервал време-

ни между возникновением запроса устройства сети к какому-либо сетевому сервису/устройству и получением ответа на этот запрос. Запрос в данном случае можно трактовать широко: это и запрос на передачу-получение информации, запрос на обслуживание, запрос на выполнение функции и т.п.

Время реакции сети является интегральной характеристикой производительности сети и зависит от загруженности сетевых устройств и каналов связи, времени обработки при помощи программ и устройств, состояния промышленных помех и пр. Именно эту характеристику имеет в виду пользователь, когда говорит, что «сеть работает быстро/медленно». Обычно качество сети характеризуют величинами максимальной задержки передачи и вариацией задержки (англ. jitter).

Весь трафик МС-сетей обычно делят на две основные категории: трафик реального времени (передача голоса, аудио, видео и т.п.), не терпящий задержек в передаче, и трафик передачи данных, не страдающий от задержек. При критических задержках передачи данных, сильных «пульсациях» времени реакции сети «рассыпается картинка» в видео, голосовая связь становится прерывистой и невнятной. При построении МФСБ, с учетом важности практически всех функций системы, подавляющую часть всего трафика можно отнести к трафику реального времени. Так, кроме голосовой и видео связи, необходимо в режиме реального времени передавать местонахождение подземного персонала, оборудования и внутришахтного транспорта (ВШТ). Данные мониторинга газовой обстановки также можно отнести к трафику реального времени, поскольку от оперативности их доставки зависит функция взрывозащиты. Не менее важна оперативность доставки данных мониторинга горных ударов, опасности возникновения эндогенных пожаров, контрольных сигналов оборудования и пр. При этом, деление времени реакции системы на составляющие конечного пользователя не интересует, важен конечный результат. Тем не менее для сетевого специалиста очень важно выделять из общего времени реакции си-

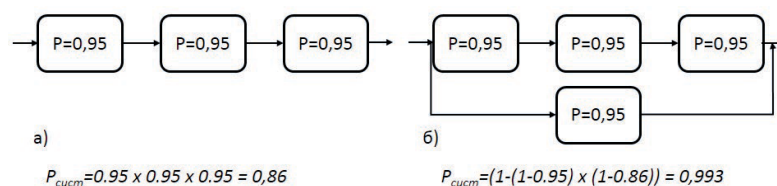


Рисунок 3 – Последовательное соединение элементов системы и резервирование
Figure 3 – Sequential connection of system elements and backup

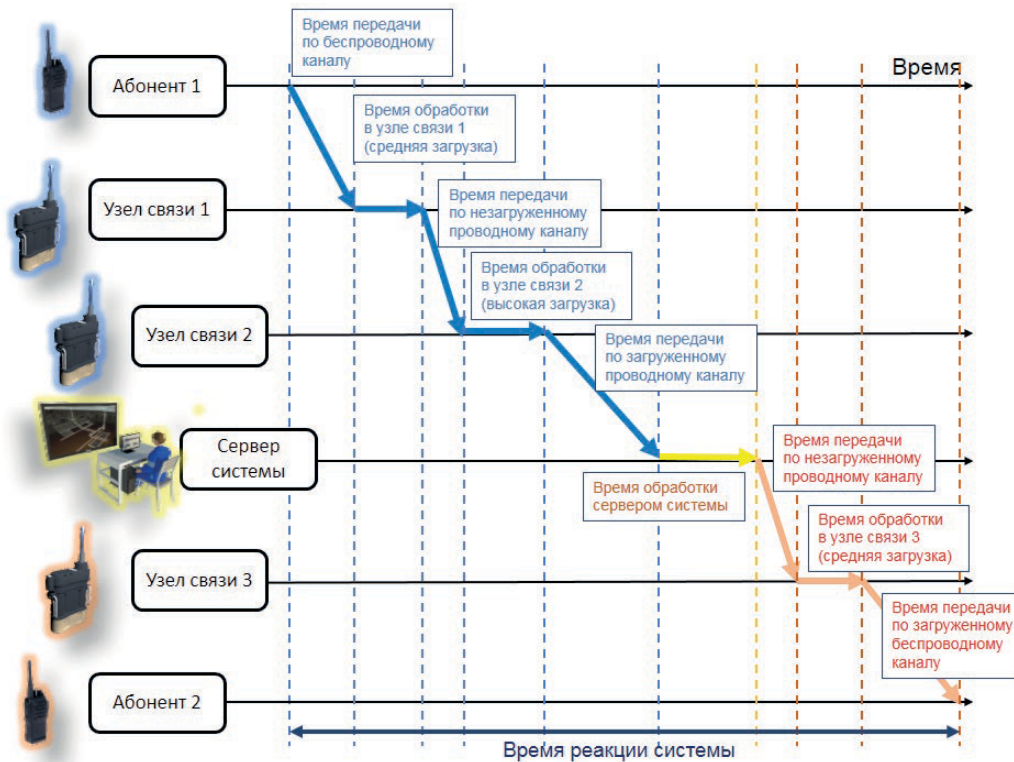


Рисунок 4 – Иллюстрация показателя «время реакции» в МС-сетях
 Figure 4 – Illustration of "reaction time" indicator in MS-networks

стемы все составляющие по этапам сетевой обработки данных: от клиента к серверу через сегменты сети и коммуникационное оборудование. Знание сетевых составляющих времени реакции позволяет оценить производительность отдельных элементов сети, выявить узкие места и при необходимости выполнить модернизацию сети для повышения ее общей производительности.

Основная задача, для решения которой строится любая сеть, - быстрая передача информации между абонентами сети. Поэтому вторым важным показателем производительности сети является пропускная способность, а вернее, скорость передачи данных. Следует отметить, что пропускная способность – это максимально возможная скорость обработки трафика, «теоретически возможная» скорость передачи данных, определенная стандартом технологии, на которой построена сеть и которая отражает максимально возможный объем данных, передаваемый сетью или ее частью в единицу времени. В отличие от времени реакции или скорости передачи данных пропускная способность не зависит от загруженности сети и имеет постоянное значение, определяемое технологиями. Пропускная способность сети зависит от характеристик физической среды передачи (воздушное пространство, медный кабель, оптическое волокно, витая пара) и от принятого

способа передачи данных (протокол Ethernet, Wi-Fi, Bluetooth и т.д.). На разных участках гетерогенной сети, где используется несколько разных технологий, пропускная способность может быть различной. При анализе и проектировании сети необходимо знать пропускную способность отдельных её элементов. Важно заметить, что при последовательной передаче данных различными элементами сети, общая пропускная способность любого составного пути будет равна минимальной из пропускных способностей составляющих элементов маршрута. Для повышения пропускной способности составного пути необходимо в первую очередь обратить внимание на самые медленные элементы.

И скорость передачи данных, и пропускная способность измеряются в пакетах в секунду или в битах в секунду. Это отражение двойного подхода к работе сети. С точки зрения пользователя важно количество переданной информации, с точки зрения сетевых специалистов и производителей коммутационного оборудования удобно измерять производительность сегментов сети в количестве пересланных устройством пакетов, и поэтому важно количество пакетов в секунду. При всем уважении к производителям оборудования, измерение пропускной способности в битах в секунду дает более точную оценку скорости передаваемой информации, чем при

использовании пакетов. Дело в том, что пакеты для разных протоколов имеют разные размеры, в этом случае возникает неопределенность - пакеты какого протокола и какого размера имеются в виду? Кроме этого, в пакете содержится и пользовательская (полезная) и служебная информация. Служебная информация обеспечивает работу самой сети, и её доля в трафике может быть существенна. Поэтому может так оказаться, что более медленная сеть, но несущая больше «полезной» нагрузки сможет конкурировать с быстрыми сетями, сконструированными «ради сети».

Реальная скорость передачи данных зависит от загруженности сети, от топологии (пространственного расположения и канальных соединений) узлов связи, от используемых протоколов передачи данных, от применяемых технологий. При тестировании скорости передачи данных сети на прикладном уровне легче всего измерять как раз пропускную способность по пользовательским данным. Для этого достаточно измерить время передачи файла определенного размера между сервером и клиентом и разделить размер файла на полученное время. При этом получаемые значения пропускной способности будут изменяться при одних и тех же условиях работы сети в зависимости от того, между какими двумя точками сети производятся измерения. Так как в сети одновременно работает большое число пользовательских компьютеров и серверов, то полную характеристику пропускной способности сети дает набор пропускных способностей, измеренных для различных сочетаний взаимодействующих компьютеров - так называемая матрица трафика узлов сети. Существуют специальные средства измерения, которые фиксируют матрицу трафика для каждого узла сети.

Теоретические показатели надежности системы, как правило, получают вычислениями по формулам и методами теории надежности и носят вероятностный характер. Экспериментальные измерения подтверждаются статистикой работы системы и требуют длительного времени. На практике для подтверждения «правильности» выбранного решения пользуются методами имитационного моделирования [6].

Таким образом, при экспертной оценке работы различных моделей МФСБ угольных шахт следует пользоваться общими научными подходами, используемыми при анализе сложных систем. Поскольку современные МФСБ в основном используют технологии цифровых компьютерных сетей, то для сравнения их показателей

необходимо пользоваться четкими критериями эффективности работы сетей, разделенных на две группы: производительность и надежность. Каждый критерий из этих групп имеет однозначные численные показатели, которые можно получить, как прямыми измерениями, так и при помощи численного моделирования. В итоге, задачи выбора и оценки сложных систем сводятся к простому сравнению цифр.

Ограничивающие факторы угольных шахт

Данные внутри системы передаются по линиям связи, которые могут отличаться физической средой, используемой для передачи информации. Физическая среда передачи данных представляет собой либо набор проводников, по которым передаются сигналы, либо атмосферу. В первом случае среда передачи будет проводная, во втором – беспроводная. Качество среды передачи на поверхности и в угольных шахтах сильно отличаются. Кроме этого, существует ряд косвенных ограничений, которые также влияют на производительность системы в целом. Основные факторы, характерные для угольных шахт, которые значительно ограничивают физические возможности электросвязи, перечислены далее.

Ограничения по мощности электропитания. Для устройств с Ex-маркировкой РО/РВ действует ограничение на передаваемую электрическую мощность, а также емкость батарей для автономных источников питания устройств. Разрешено передавать энергию по проводным линиям связи суммарной мощностью не более 10...12 Вт, поскольку электрическая искра такой мощности не способна воспламенить газовую смесь. В противном случае линия питания должна контролироваться специальным защитным барьером, который гарантированно обесточит линию в случае возникновения короткого замыкания (КЗ) до возникновения искры. Это требование ограничивает протяженность линий питания для стационарных узлов сети, увеличивает вес оборудования связи, появляются многочисленные вспомогательные блоки. Ограниченный режим использования электрической энергии заставляет максимально эффективно использовать энергию за счет оптимизации регламента работы радиоканалов, концентрации излучаемой мощности беспроводных устройств за счет антенных систем.

Длинные, вытянутые топологии сетей. Поскольку узлы связи устанавливаются вдоль шахтных выработок, которые представляют из

себя сеть длинных вытянутых тоннелей различного диаметра, то в результате топология сети повторяет гипсометрию (геометрическую форму) шахты. Это приводит к тому, что топология МС-сетей представляет собой древовидную структуру из длинных последовательных цепочек, что негативно сказывается на использовании MESH-маршрутизации (уменьшается количество резервных маршрутов), сильно снижает производительность сети при использовании беспроводных каналов связи (аналогично многопрыжковому распространению, англ. multi-hop), снижает общую живучесть системы связи (за счет появления критических узлов топологии) [7].

Ограничения на распространение электромагнитных(ЭМ)-волн. Обзор исследований по распространению ЭМ-волн в шахтах [8] показал, что распространение высокочастотных(ВЧ)-сигналов в беспроводной среде угольных шахт, из-за эффектов множественного распространения ограничено расстояниями 250...300 м. Металлические препятствия, громоздкое оборудование, резкие повороты в подземных горных выработках еще сильнее снижают эффективное расстояние распространения ЭМ-волн. Изменяются и межканальные характеристики, уменьшается количество каналов при использовании ММО-решений [9].

Частые обрывы проводов питания и линий связи штатно и в результате аварии. В шахте нередки обрывы проводов питания или линий связи в результате движения ВШТ и оборудования. Провода могут быть нарушены и в результате обрушения кровли, иных инцидентов. При аварии проводные линии страдают в первую очередь, что делает невозможной работу системы связи во время аварийно-восстановительных работ. Только использование каналов беспроводной передачи данных и резервирование питания поможет решить эту задачу.

Влажность, температура, запыленность. Эти факторы заставляют увеличивать степень пыле- и влагозащиты, что также снижает характеристики беспроводных каналов и увеличивает стоимость системы связи.

Эффективные методы сочетания проводной и беспроводной инфраструктуры, использование различных технологий для передачи трафика реального времени, использование высокопроизводительных абонентских устройств и синхронная работа сетей различной архитектуры позволяет решить большинство задач, возникающих при создании МФСБ угольных шахт.

Выбор технологии решения при создании МФСБ угольных шахт на основе МС-сети.

В рамках статьи проиллюстрируем методику выбора технологии решения при создании МФСБ угольных шахт на основе МС-сети. Несомненно, определяющим является список функций, которые будут обеспечиваться проектируемой системой (рис. 1). Этот список можно разделить на обязательную и необязательную части. В обязательную часть списка попадут функции, обеспечивающие безопасность. Обязательность их использования устанавливается регламентирующими документами, а качество исполнения строго контролируется государством. Необязательные функции, как правило, нужны для оптимизации управленческих процессов внутри предприятия.

К примеру, оценим необходимый объем трафика, который нужно обеспечить для небольшой шахты в США. Угольная отрасль США по количеству инцидентов считается относительно безопасной, и поэтому требования там минимальные. Тем не менее, по итогам расследования ряда аварий, Управление по безопасности и охране труда при добыче полезных ископаемых (англ. MSHA) ввело в действие так называемый Miner Act [10], аналог российского ПБ [1]. Во-первых, в соответствии с этим документом в технической части обеспечения безопасности все шахты должны иметь систему определения местонахождения персонала (англ. Indoor Positioning System). Система IPS должна:

- иметь минимальную точность 60...96 м относительно неподвижной точки;
- частоту обновления измерений не менее одного раза в 60 сек.;
- использоваться для максимально возможного количества людей, включая посетителей, которые могут находиться внутри выработки.

До этого в подавляющем большинстве шахт США использовались в лучшем случае, системы контроля и управления доступом (СКУД, англ. PACS - Physical Access Control System) по зонам, а, в худшем, доска с жетонами для учета подземного персонала (англ. Tag-in/Tag-out Board). Результаты расследования аварий и варианты предотвращения возможных последствий привели законодателей к выводу, что большинство трагедий можно было избежать, если бы спасатели заранее знали, где искать пострадавших. Помимо этого, диспетчеру шахты в Центре Обработки Данных (ЦОД), расположенном на поверхности, важно было знать во время штатной работы местонахождение конкретного

человека (мастера, технического специалиста) для быстрого устранения внезапных неполадок. Во-вторых, Miner Act обязал иметь надежную систему связи между ЦОД и подземным персоналом, позволяющую передать оповещение об опасности и получить ответ. Регламент сообщения не нормировался.

Принятие этого закона вызвало появление новых инженерных решений для систем безопасности угольных шахт. Некоторые шахты уже использовали системы беспроводной связи на основе технологии, известной как «излучающий кабель» (англ. Leaky Feeder), которые обеспечивали полудуплексный (англ. half-duplex) канал связи между ЦОД и персоналом, а также между горняками внутри шахты. Как правило, такие системы имели СКУД на основе RFID-меток (англ. Radio Frequency Identification, радиочастотная идентификация), местонахождение персонала регистрировалось при перемещении устройства с RFID-меткой внутри рамки с током, расположенной в известном месте. Метка размещалась на одежде, каске, фонарях и самоспасателях. Рамки устанавливали на входах в крупные выработки, и требование точности в 60 м заставило бы увеличить их количество в десятки раз. С другой стороны, в 2006 году, различные беспроводные сети на поверхности земли уже умели определять местоположение абонентских устройств (АУ) с определенной точностью [11]. Для этого были нужны два-три «якорных» узла (англ. anchor node) и беспроводная метка (англ. wireless tag), закрепленная на одежде, каске или мобильном устройстве шахтера. «Якорные» узлы стали размещать в местах с известными координатами выработок шахты, которые обеспечивали непрерывное определение местонахождения меток, а в итоге подземного персонала. «Непрерывность» процесса составляла раз в 30...60 сек., т.е. обновление данных происходило каждые 30...60 сек., что обеспечивало необходимую точность определения координат. В литературе сеанс определения местонахождения меток получил название локация (англ. location), время обновления данных - частота локаций (англ. frequency of locations), а функция определения координат – позиционирование (англ. positioning). В [10] регламентировалась точность определения координат относительно неподвижной точки. На самом деле, точность определения координат (англ. accuracy of positioning) складывается из двух компонент: точности используемого метода (точность относительно неподвижной точки) и расстояния возможного перемещения в течение времени обновления

данных [12]. Если принять во внимание среднюю скорость движения в шахте 1 м/с, то «прибавка» составит 30-60 м. Все эти данные нужно было доставить в ЦОД, записать в базу данных и показать на экране диспетчера. В результате функция позиционирования персонала создала поток трафика реального времени для передачи локаций на поверхность.

Таким образом, в шахте появились две системы: одна занималась связью, другая позиционированием. Это было неудобно и с точки зрения надежности, и с точки зрения обслуживания, и поэтому появилась новая архитектура систем безопасности на основе узлов связи (англ. node communication). Это была хорошо известная на поверхности земли архитектура на основе компьютерной сети. Узлы связи служат проводными маршрутизаторами (англ. router) с функциями беспроводных точек доступа (англ. wireless access point). Узлы связи (англ. node), линии связи и питания составляют т.н. магистральную сеть (англ. backbone network) или подземную инфраструктуру связи. Системы на основе компьютерной сети взяли на себя функцию голосовой и текстовой связи, позиционирования и начали вытеснять системы на технологии «излучающий кабель», появился дополнительный голосовой трафик с использованием аудиокодексов (алгоритмов сжатия) (англ. audio codec) категории трафик реального времени.

Такая длинная историческая справка была необходима для расшифровки источников возникновения данных перед началом оценки величины планируемого трафика МС-сети между Центром Обработки Данных (ЦОД), расположенным на поверхности, и абонентскими устройствами (АУ) в подземных выработках. Типичная архитектура современной МФСБ показана на рис.5.

При оценке общего трафика его необходимо сразу разделить на две категории: трафик реального времени и трафик передачи данных. Известно, что трафик реального времени очень чувствителен к скорости передачи данных (производительности) сети, поэтому предварительная оценка трафика определяет собственно выбор стека протоколов (технологии) связи для подземной инфраструктуры связи. В таблице 1 указаны типичные объемы передаваемой информации для предварительной оценки трафика по функциям МФСБ на основе компьютерной сети (оптимальная величина пакета 128 байт).

При помощи этой таблицы нетрудно оценить общий трафик планируемый для средней шахты в США. Среднее сменное количество

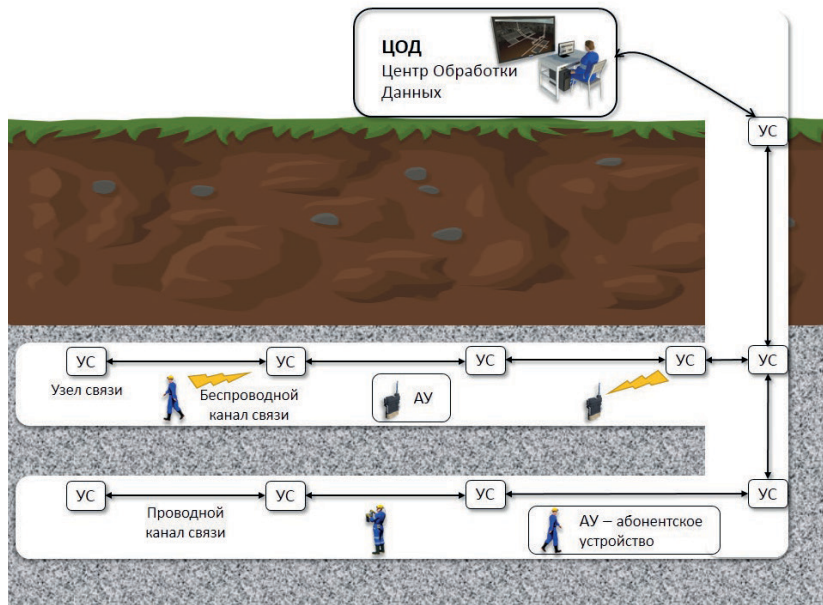


Рисунок 5 – Типичная архитектура МФСБ угольной шахты на основе компьютерной MS-сети
 Figure 5 – Typical architecture of the coal mine MFSS based of a computer MS-network

персонала для такой шахты 40...60 человек. Для связи и оповещения можно использовать текстовый канал связи или 8 полудуплексных каналов телефонной связи с кодеком G.729. Если мы собираемся разговаривать в режиме обычного телефонного разговора (дуплексный канал), то нужно использовать 2 полудуплексных канала для работы одного дуплексного. Таким образом, получается 4 дуплексных:

- один в режиме общей связи ЦОД - весь персонал;
- один для индивидуального вызова ЦОД - персонал;
- один для индивидуального вызова персонал - персонал;
- один в резерв.

Общая производительность системы связи, по стандартам США, должна быть $18+89=110$ Кбит/с. Однако нужно еще учесть, что внутри сети есть расходы на организацию самой сети и размеры этого служебного трафика сравнимы с основным. Не вдаваясь в подробности, можно смело утверждать, что сеть с производительностью 256 Кбит/с обеспечит требуемые функции: связь-оповещение и позиционирование.

Итак, после определения объема трафика можно перейти к выбору технологий связи. Технологии проводных каналов связи на современном этапе стабильно закрепились за Ethernet, а вот для беспроводных каналов есть широкий выбор. Поэтому оценим технологии беспроводной передачи данных как наиболее востребованные в условиях шахт. Очень полезная информация представлена на рисунке 6. По

горизонтали указан важный параметр – «максимальное расстояние между ближайшими узлами связи». Он определяет, насколько далеко друг от друга технология позволяет устанавливать узлы связи сети. Например, этот параметр в проводном Ethernet на медном проводе – 100 м. Появление оптических технологий в проводном сегменте позволило увеличить это расстояние в 10-20 раз.

По информации рис.6, также понятно, что технологии WiMax, LoRa в условиях шахты теряют свои преимущества по расстоянию между узлами связи, поскольку «условия прямой видимости» в горных выработках нарушаются, и максимально возможное расстояние, на которое можно рассчитывать для частот 1-10 ГГц, – это 250-300 м. В лидерах - технологии семейства IEEE 802.11 и широкополосной технологии (UWB). Для них требуется минимальная плотность размещения узлов связи. Остальные технологии требуют более плотной установки точек доступа, что, в первую очередь, ведет к усложнению архитектуры инфраструктуры связи и алгоритмов ее организации, и в результате – к удорожанию системы при низких показателях критериев надежности и производительности.

Рисунок 7 наглядно демонстрирует основную тенденцию в беспроводных технологиях: выше пропускная способность – выше потребление энергии. Это утверждение имеет простой физический смысл: каждый сеанс передачи данных сопровождается излучением радиоволн, а это затраты энергии. За один сеанс передается ограниченное количество (пакет) данных. По-

Таблица 1. Общие характеристики трафика для разных функций МФСБ
 Table 1. General characteristics of traffic for different functions of the MFSR

Функция	Тип трафика	Трафик на ед., байт	Оценка скорости сети на ед., бит/с	Кол-во	Оценка общего трафика, Кбит/с	Примечание
Позиционирование $f=1c^{-1}$	Данные со сжатием	128	1 024	100 меток	102,4	Локация 1 раз/с
Позиционирование $f=0,03c^{-1}$	Данные со сжатием	128	342	100 меток	34,2	Локация 1 раз/ 30с
Позиционирование $f=0,017c^{-1}$	Данные со сжатием	128	171	100 меток	17,1	Локация 1 раз/ 60с
Текстовое или кодированное сообщение с подтвержд.	Данные без сжатия	256	2 048	100 меток	204,8	2 пакета 128 байт
Мобильная телефонная связь, кодек G.729 (8 кбит/с)	Аудио со сжатием	28 (20+2+6)	11 200	8 канал	89,6	Качество 3,9, ниже среднего
Мобильная телефонная связь G.711 (64 кбит/с)	Аудио со сжатием	168 (160+2+6)	67 600	8 канал	540,8	Качество 4,1, хорошее
Видеонаблюдение, кодек H.264, 240, 16 Гц, (16 кбит/с)	Видео со сжатием		16 000	4 канал	64,0	Низкое, домофон
Видеоконференция, H.264, 320, 24 Гц, (128—384 кбит/с)	Видео со сжатием		384 000	2 канал	728,0	Среднее, skype
Видеопоток, H.264, 240р, 30 Гц, (400 кбит/с)	Видео со сжатием		400 000	2 канал	800,0	Среднее, YouTube
Видеопоток, H.264, 480р, 30 Гц, (1000 кбит/с)	Видео со сжатием		1 000 000	2 канал	2 000,0	Хорошее, YouTube
Видеопоток, MPEG-2, стандарт TV (3 500 кбит/с)	Видео со сжатием		3 500 000	2 канал	7 000,0	Отличное, YouTube

этому, если надо передать много данных, надо чаще проводить сеанс передачи, а значит, чаще включать передатчик, что и приводит к более быстрому истощению источника питания.

Следует особенно отметить, что при выборе технологии необходимо учитывать, для каких целей создавалась та или иная технология. Так, например, технология LoRa разрабатывалась для сбора данных с сенсорных сетей и поэтому

имеет невысокие показатели пропускной способности, но очень высокую энергоэффективность конечных устройств (сенсоров), способных годами не менять встроенный источник питания. Тоже самое касается технологии Bluetooth. Изначально она была разработана для управления различными «домашними» устройствами с мощного компьютера, отсюда низкая пропускная способность, необходимая только для передачи

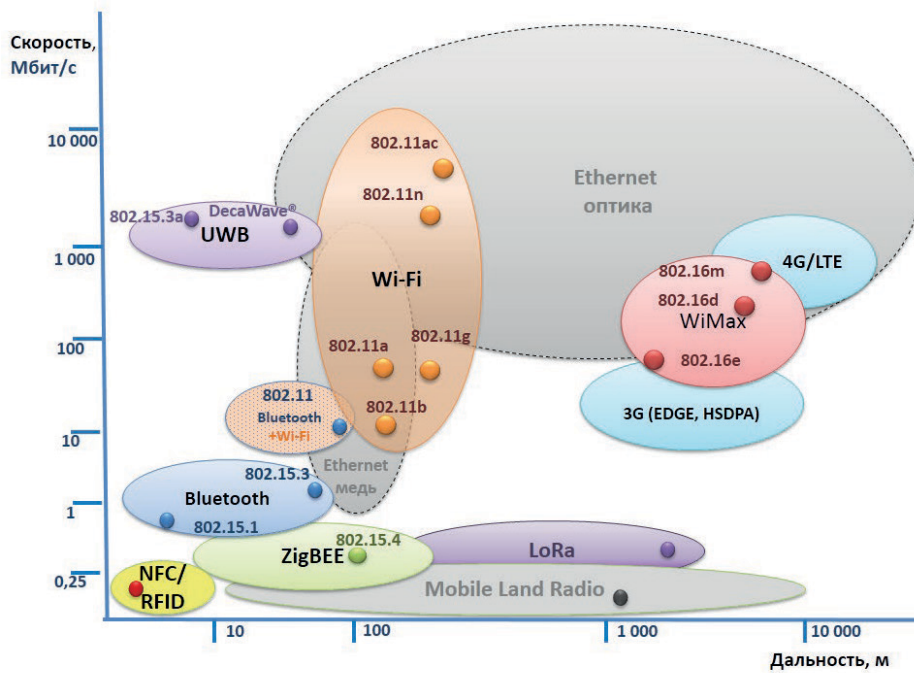


Рисунок 6 – Стандарты технологий связи в координатах: максимальная пропускная способность канала (скорость), максимальное расстояние между ближайшими узлами связи (дальность)
 Figure 6 – Standards of communication technologies in coordinates: the maximum channel capacity (speed), the maximum distance between the nearest communication centers (range)

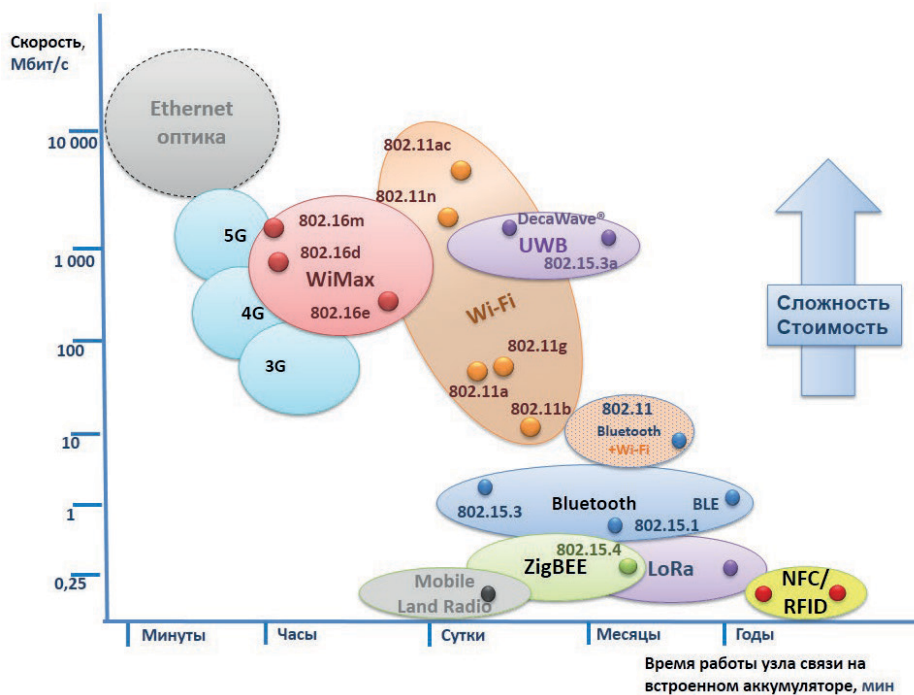


Рисунок 7 – Стандарты технологий связи в координатах: максимальная пропускная способность канала, время работы узла связи на встроенном аккумуляторе
 Figure 7 – Standards of communication technologies in the coordinates: of the maximum channel capacity, the working time of the communication center on the built-in battery

команд и небольших сообщений и ограниченный радиус действия. Технология ZigBee также разрабатывалась для систем «Умного дома» и «Интернета Вещей» и не сможет полноценно выполнять функции магистральной инфраструктуры передачи данных, но имеет технологию mesh (сетка). Тем не менее, разработчики промышленных систем часто пытаются использовать эти технологии не «по назначению», пытаясь «выжать» из них рекордные параметры. Как правило, то, что хорошо работало в лабораторных условиях, отказывается работать в реальных условиях шахт, а про расширение функций системы не может быть и речи.

В завершение обсуждения, в качестве технологии для нашего примера (средней шахты в США) можно порекомендовать DecaWave, Bluetooth, ZigBee, LoRaWAN, если же учесть еще и стоимость решений, то это скорее Bluetooth или ZigBee.

Современные инженерные решения и архитектура МФСБ угольных шахт

После определения требуемой пропускной способности и технологий, обеспечивающих функциональность, можно перейти к рассмотрению архитектуры системы. Архитектуру системы в данном контексте следует понимать как организацию сети, состав элементов сети, принципы взаимодействия между ними и пр. Большинство вопросов построения сетей рассмотрены в [5], поэтому в этом разделе будет сделан упор на влияние специфических факторов подземных выработок на архитектуру системы.

Для преодоления ограничивающих факторов необходимы современные инженерные решения. Оценивать то или иное решение будем по критериям, описанным в первом разделе статьи. Итак, согласно рис.5 минимальная типичная система состоит из:

- Центра Обработки Данных (ЦОД);
- Узлов Связи (УС);
- Абонентских Устройств (АУ) мобильных и стационарных;
- Линий связи;
- Линий питания.

Архитектура системы, представленная на рис.5, с точки зрения критериев работы сети имеет критическую уязвимость (Рис.8), а именно отсутствие резервных каналов связи

Именно резервирование повышает надежность системы (пример рис.3). Звучит, как прописная истина, но на практике, в реальных МФСБ часто встречаются такие решения. К примеру, питание устройства сети имеет критическое зна-

чение для работы этого оборудования и поэтому требуется резервирование питания автономным источником (батарея, аккумулятор). При этом мы понимаем, что разрыв питания может происходить не только по причине банального отключения питания, но и в результате физического повреждения кабелей питания (оборудованием, обвалом горных пород, взрывом и т.п.). Вот какую схему автономного питания предлагают производители МФСБ (рис.9).

Производитель пытается сэкономить на весе абонентских устройств (узлов связи) и выносит тяжелый автономный источник питания из корпуса устройств. В результате надежность работы сильно падает. Не надо «экономить» на безопасности, только размещение автономного источника питания непосредственно в оборудовании связи обеспечит его надежную работу.

Следующая распространенная ошибка производителей использование «зоопарка» технологий. Эта ошибка, в первую очередь, связана с беспроводными технологиями передачи данных. Нередко в рамках одной системы используется несколько радио-технологий, работающих в одинаковом диапазоне частот (Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi и т.п.). В единую систему объединяются устройства формально с различными протоколами обмена, которые не мешают при работе друг другу, но на практике мощные устройства подавляют слабые, происходит случайное перекрытие каналов связи и т.п. Техническим специалистам шахт бывает очень трудно разобраться в причинах неполадок в таких системах. Вывод простой, следует избегать использования различных беспроводных технологий в одной системе.

Существует большое количество правил организации МФСБ угольных шахт и аварийных систем, однако мы рассуждали о численных критериях работы системы. Как их получить? Общая схема численных оценок, исходя из общих принципов теории надежности, состоит в следующем:

- построение многослойной функциональной модели системы (блок-схемы);
- вычисление параметров надежности для всех сегментов модели;
- оценка и оптимизация.

Современный подход в получении численных оценок надежности работы компьютерных систем состоит в создании имитационных моделей системы с последующим получением результатов моделирования на мощных вычислителях [6]. Методы имитационного моделиро-

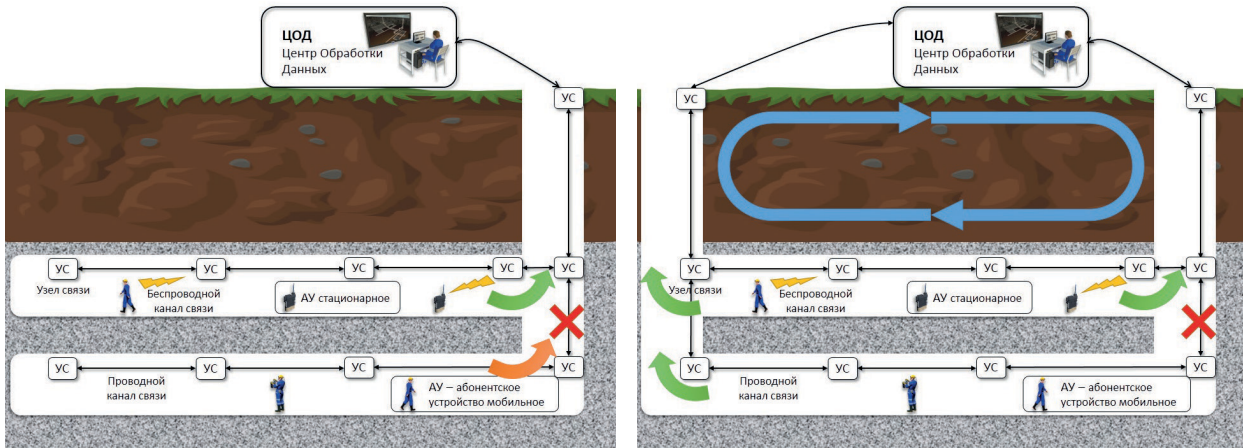


Рисунок 8 – Простое увеличение критериев надежности системы изменением архитектуры сети:
 а) без резервных каналов; б) с резервными каналами
 Figure 8 – The system reliability criteria simple increase
 by changing the network architecture

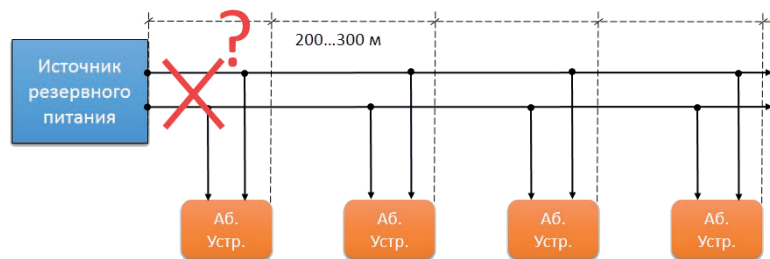


Рисунок 9 – Схема сегментного резервирования питания в существующих МФСБ
 Figure 9 – Power supply segment backup scheme in existing MFSS

вания позволяют отследить и оценить все возможные комбинации факторов и технологий, получить численные показатели оценки надежности работы как для системы в целом, так и для отдельных сегментов, и в конечном счете, оптимизировать архитектуру. Так, например, в результате моделирования одной из МФСБ были выявлены мощные источники трафика, которые могли нарушить работу магистральной инфраструктуры. Были даны рекомендации по миграции вычислительных мощностей к источникам трафика. Это привело к появлению в системе нового типа устройств – локальных серверов обработки данных, что снизило общий магистральный трафик и увеличило надежность системы.

Заключение

Подведем итог. Законодательство увеличило функциональные требования к системам безопасности угольных шахт, заставило использовать многофункциональные и единые системы обеспечения безопасности. Это привело к появлению на рынке множества систем, работающих на различных технологиях как совершенно новых, так и модернизированных старых. Руковод-

ители и технические специалисты горнодобывающих предприятий встали перед проблемой выбора и оценки разных технических решений сложного комплекса оборудования. В этой статье предлагается:

использовать общесистемный подход в оценке сложных систем с точки зрения критериев надежности и пропускной способности. Это поможет получить единые численные показатели для оценки систем и упростить процедуру оценки решений разных производителей;

для получения численных показателей критериев оценки работы МФСБ можно использовать предварительную оценку при помощи формальных методов теории надежности. Точную оценку с рекомендациями по оптимизации можно получить методами имитационного моделирования сложных систем;

при разработке моделей МФСБ следует учитывать ограничивающие факторы подземных выработок, возможности беспроводных технологий в закрытых помещениях, резервирование питания устройств системы, варианты маршрутизации каналов связи, варианты снижения трафика и оптимизации архитектуры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности в угольных шахтах / Федеральные нормы и правила в области промышленной Безопасности. Серия 05. Выпуск 40. М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. 200 с.
2. Ваганов В.С. Многофункциональные системы безопасности, применяемые при производстве горных работ // Горная промышленность. 2014. № 3 (115). С. 25.
3. Ваганов В.С., Урусов Л.В. Анализ способов организации сетей передачи данных для построения современных МФСБ в угольных шахтах // Вестник Научного Центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 3. С. 72.
4. Centers for Disease Control and Prevention, NIOSH, Mining, Advanced Tutorial on Wireless Communication and Electronic Tracking: Electronic Tracking Systems Performance, 3.0 Electronic Tracking Systems Performance. [Электронный ресурс URL: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/emergencymanagementandresponse / commtracking/advcommtrackingtutorial2.html>] 2017 г.
5. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е изд. СПб.: Питер, 2016. 992 с.: ил.
6. Modeling and Tools for Network Simulation / K.Wehrle, M. G`unes, J. Gross (Eds). Springer, 2010, 256 p.
7. Yang Wei, Zhang Yu, Liu Yang. Constructing of wireless emergency communication system for underground coalmine based on WMN technology, Journal Of Coal Science & Engineering (China), Vol.16 No.4 Dec. 2010, pp 441–448
8. Andrej Hrovat, Gorazd Kandus, Toma`z Javornik. A Survey of Radio Propagation Modeling for Tunnels, in IEEE Communications Surveys & Tutorials · Sep. 2013.
9. Mathieu Boutin, Ahmed Benzakour, Charles L. Despines, Sofiène Affes. Radio Wave Characterization and Modeling in Underground Mine Tunnels, IEEE Vehicular Technology Conference, Los Angeles, CA, September 26–29, 2004.
10. S. 2803 (109th): Mine Improvement and New Emergency Response Act of 2006, May 16, 2006, Washington, 109th Congress, 2005 – 2006.
11. Файзулхаков Я.Р., Пыптев С.А. Анализ методов позиционирования узлов беспроводной сенсорной сети // Труды II Международной Научно-Практической Конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование». М., МГУ им. М.В. Ломоносова, факультет ВМК, декабрь 2006 г.
12. Ваганов В.С. Современные технологии и проблемы определения местонахождения персонала в угольных шахтах // Добывающая промышленность. 2018. №2 (10). С. 50.

REFERENCES

1. *Pravila bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh / Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoi Bezopasnosti. Seriya 05. Vypusk 40* [Safety rules in coal mines/Federal rules and regulations in the field of industrial safety. Series 05. Issue 40]. 2014. Moscow: ЗАО «Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoi bezopasnosti» [in Russian].
2. Vaganov, V.S. (2014). *Mnogofunktsionalnye sistemy bezopasnosti, primeniaemye pri proizvodstve gornykh rabot* [Multifunctional safety systems used in mining operations]. *Gornaya promyshlennost – Mining Industry*, 3 (115),25 [in Russian].
3. Vaganov, V.S., & Urusov, L.V. (2016). *Analiz sposobov organizatsii setei peredachi dannykh dlia postroeniia sovremennykh MFSS v ugolnykh shakhtakh* [Analysis of the ways to organize data transmission networks for the construction of modern MFSS in coal mines]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 3, 72 [in Russian].
4. Centers for Disease Control and Prevention, NIOSH, Mining, Advanced Tutorial on Wireless Communication and Electronic Tracking: Electronic Tracking Systems Performance, 3.0 Electronic Tracking Systems Performance. Retrieved from: <https://www.cdc.gov/niosh/mining/content/emergencymanagementandresponse /commtracking/advcommtrackingtutorial2.html> 2017 [in English].
5. Oliner, V., & Oliner, N. (2016). *Kompiuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly: Uchebnik dlya vuzov. 5-e izd* [Computer networks. Principles, technologies, protocols: Textbook for high schools. 5th edition]. St Petersburg: Pitер [in Russian].
6. Wehrle, K., G`unes, M. Gross J. (Eds). (2010). *Modeling and Tools for Network Simulation / Springer* [in English].
7. Yang Wei, Zhang Yu, Liu Yang. (2010). Constructing of wireless emergency communication system for underground coalmine based on WMN technology, *Journal Of Coal Science & Engineering (China)*, Vol.16 No.4, pp 441–448 [in English]
8. Andrej Hrovat, Gorazd Kandus, & Toma`z Javornik. (2013). A Survey of Radio Propagation Modeling for Tunnels, in *IEEE Communications Surveys & Tutorials* [in English].
9. Mathieu Boutin, Ahmed Benzakour, Charles L. Despines, & Sofiène Affes. (2004). Radio Wave Characterization and Modeling in Underground Mine Tunnels. *IEEE Vehicular Technology Conference, Los Angeles, CA, September 26–29*, [in English].
10. S. 2803 (109th): *Mine Improvement and New Emergency Response Act of 2006, May 16, 2006, Washington, 109th Congress, 2005 – 2006*. [in English].
11. Faizulkhakov, Ya.R., & Pyptev, S.A. (2006). *Analiz metodov pozitsionirovaniia uzlov besprovodnoi sensornoi seti* [Wireless sensor network centers positioning methods analysis]. Proceedings of the II International *Scientific and Practical Conference "Modern Information Technologies and IT Education"*. Moscow: Moscow State University named after M.V. Lomonosov [in Russian].
12. Vaganov, V.S. (2018). *Sovremennye tekhnologii i problemy opredeleniia mestonahozhdeniia personala v ugolnykh shakhtakh* [Modern technologies and problems of locating personnel in coal mines]. *Dobывающая промышленность - Mining industry*, 2, 50 [in Russian].