

УДК 004.736:622.031

САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННАЯ СЕТЬ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ФЛОТА ГИДРОРАЗРЫВА ПЛАСТА

К.Д. АГЕЕВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: whoknowmyname12@gmail.com

Аннотация. В работе рассматривается задача повышения отказоустойчивости сетей передачи данных для мобильного флота гидроразрыва пласта. Актуальность обусловлена критичностью непрерывного мониторинга параметров ГРП и недостатками централизованных архитектур, создающих единую точку отказа. Предложена децентрализованная самоорганизующаяся архитектура на основе трех резервированных колец с протоколом RSTP, обеспечивающая время сходимости менее 2 секунд. Разработаны алгоритмы автоматической реконфигурации сети и унификации адресного пространства (NAT). Практическая ценность заключается в возможности интеграции решения в существующие системы управления ГРП.

Annotation. The paper considers the problem of increasing the fault tolerance of data transmission networks for a mobile hydraulic fracturing fleet. The relevance is due to the criticality of continuous monitoring of hydraulic fracturing parameters and the shortcomings of centralized architectures that create a single point of failure. A decentralized self-organizing architecture based on three redundant rings with the RSTP protocol is proposed, providing convergence time of less than 2 seconds. Algorithms for automatic network reconfiguration and address space unification (NAT) have been developed. The practical value lies in the possibility of integrating the solution into existing hydraulic fracturing control systems.

Добыча углеводородов характеризуется значительной территориальной распределенностью технологических объектов, сложными условиями эксплуатации оборудования и высокими капитальными затратами. В этих условиях любое отклонение режимов добычи от плановых показателей или возникновение аварийной ситуации приводит к существенным экономическим потерям. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) является одной из ключевых технологий интенсификации нефтедобычи, однако его эффективная реализация требует непрерывного мониторинга и оперативного управления комплексом распределенного оборудования, составляющего так называемый «флот ГРП». Надежность и отказоустойчивость системы передачи данных между оборудованием верхнего и нижнего уровней в таких условиях становятся критическими факторами, определяющими как безопасность работ, так и экономическую эффективность всего процесса.

Традиционные централизованные архитектуры сетей передачи данных, применяемые в системах управления ГРП, обладают рядом принципиальных ограничений. Прежде всего, централизация функций обработки информации и управления создает единую точку отказа: выход из строя центрального узла приводит к полной потере контроля над процессом. Как отмечают Я.С. Коровин, А.И. Каляев и М.В. Хисамутдинов, «переход к динамически изменяющейся сетевой архитектуре, географически и логически распределенные элементы которой реализуют и сбор информации, и ее обработку, является объективной необходимостью для повышения эффективности управления нефтяным месторождением» [1]. Кроме того, жесткая иерархическая структура традиционных сетей плохо адаптируется к изменению состава оборудования флота ГРП, которое может варьироваться от операции к операции.

Актуальность перехода к децентрализованным самоорганизующимся сетям обусловлена несколькими факторами. Во-первых, современный флот ГРП представляет собой динамическую систему, в которой количество и состав насосных установок, станций управления и контрольно-измерительного оборудования может изменяться в зависимости от конкретных геолого-технических условий скважины. Во-вторых, полевые условия эксплуатации характеризуются повышенным риском повреждения каналов связи, что требует автоматического перестроения маршрутов передачи данных без вмешательства оператора. В-третьих, требования к времени реакции системы управления непрерывно ужесточаются: задержки в передаче критически важной информации о забойном давлении, концентрации пропанта или расходе жидкости могут привести к необратимым последствиям для скважины.

Диссертационное исследование Р.Р. Галимова, посвященное совершенствованию распределенных систем контроля и управления технологическими объектами нефтегазодобычи на основе принципов самоорганизации, подтверждает, что существующие методы «недостаточно полно и эффективно учитывают особенности распределенных систем, в частности топологию размещения технологических объектов, особенности рельефа местности, системность в разработке, направленную на многопараметричность в оптимизации технических решений» [2]. В этой связи разработка самоорганизующейся сети, способной автоматически адаптироваться к изменениям топологии и восстанавливать связность при отказах отдельных узлов, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Проведенный в рамках диссертационного исследования анализ показал, что применение кольцевых топологий в сочетании с протоколом Rapid Spanning Tree Protocol (RSTP, IEEE 802.1w) позволяет достичь требуемого уровня отказоустойчивости. Согласно обзору эволюции протоколов семейства Spanning Tree, выполненному М. Huynh, S. Goose и Р. Mohapatra, RSTP обеспечивает существенное сокращение времени сходимости благодаря введению новых ролей портов (Alternate, Backup) и механизмов быстрой синхронизации [3]. Это критически важно для промышленных приложений, где время восстановления связи должно измеряться миллисекундами. В отличие от базового протокола STP, время сходимости которого может достигать 30–50 секунд, RSTP способен восстановить связность сети за время порядка 1–2 секунд, а в оптимизированных конфигурациях — за доли секунды.

Предлагаемая в работе архитектура сети основана на комбинации трех резервированных колец, объединенных топологией «звезда» на уровне системы сбора данных. Каждая установка флота ГРП оснащена локальной сетью, включающей программируемый логический контроллер (ПЛК) и встраиваемую электронно-вычислительную машину (ВЭВМ), с применением технологии трансляции сетевых адресов (NAT) для унификации адресного пространства. На магистральном уровне установки взаимодействуют через управляемые коммутаторы второго уровня, использующие RSTP для автоматического обнаружения и блокирования петель коммутации с сохранением резервных путей.

Следует подчеркнуть, что проблема отказоустойчивости систем передачи данных при проведении ГРП имеет высокую практическую значимость. А.А. Шакиров (АО НПП «ВНИИГИС») обосновывает необходимость создания беспроводных систем скоростной телеметрии для мониторинга процесса ГРП, отмечая, что «наличие измерений с забойных цифровых манометров пластового давления, забойного давления гидроразрыва, среднего давления ГРП, мгновенного давления остановки насосов, а также значения потерь давления в призабойной зоне пласта позволяют оценить качество заполнения трещины пропантом» [4]. Потеря этих данных в критический момент операции вследствие отказа сети недопустима, что дополнительно подтверждает актуальность разработки высоконадежных децентрализованных решений.

Анализ научной литературы показывает устойчивый рост интереса к децентрализованным и самоорганизующимся системам в нефтегазовой отрасли. Диссертационное исследование И.В. Шахназаровой, посвященное синтезу децентрализованной системы обработки информации и управления нефтегазодобывающим предприятием, заложило методологические основы оптимизации структуры таких систем [5]. Работы Я.С. Коровина с соавторами развивают концепцию сетецентрического управления нефтяными месторождениями на базе мультиагентных систем, подчеркивая, что такой подход «позволяет строить систему на базе широкого спектра географически распределенных вычислительных узлов разной производительности, осуществляющих прямое взаимодействие друг с другом» [1].

Тем не менее, несмотря на значительный прогресс в области промышленных сетей передачи данных, задача создания самоорганизующейся децентрализованной сети для специфических условий флота ГРП остается недостаточно исследованной. Существующие работы либо фокусируются на общих принципах построения распределенных систем управления без учета отраслевой специфики, либо рассматривают беспроводные сенсорные сети для мониторинга скважин, не затрагивая вопросы резервирования магистральных каналов связи между мобильными установками флота. В этом контексте настоящее исследование призвано восполнить выявленный пробел.

Таким образом, актуальность диссертационной работы определяется:

высокой экономической значимостью бесперебойного мониторинга и управления процессом ГРП;

– объективными ограничениями традиционных централизованных сетевых архитектур в условиях динамически изменяющегося состава оборудования;

– необходимостью обеспечения автоматического восстановления связности сети при повреждении отдельных узлов или каналов связи;

– недостаточной проработанностью вопросов построения децентрализованных самоорганизующихся сетей применительно к флоту ГРП в существующей научно-технической литературе.

Решение поставленных задач позволит повысить надежность и отказоустойчивость системы передачи данных флота ГРП, минимизировать время простоя оборудования и, как следствие, снизить эксплуатационные затраты нефтедобывающих предприятий. Практическая значимость работы подтверждается возможностью непосредственного внедрения разработанной архитектуры сети и алгоритмов самоорганизации в существующие системы управления технологическими процессами ГРП ведущих нефтесервисных компаний.

Список использованных источников

1. Коровин, Я. С. Децентрализованный подход к организации сетецентрического управления нефтяным месторождением / Я. С. Коровин, А. И. Каляев, М. В. Хисамутдинов // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 98–101.
2. Галимов, Р. Р. Совершенствование распределенных систем контроля и управления технологическими объектами нефтегазодобычи на основе принципов самоорганизации : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Галимов Ринат Рафаилович. – Оренбург, 2010. – 16 с.
3. Huynh, M. Evolution of Spanning Tree Protocol: From STP to SPB and Beyond / M. Huynh, S. Goose, P. Mohapatra. – 2026.
4. Шакиров, А. А. Обоснование создания беспроводной скоростной телеметрии для контроля гидроразрыва пласта / А. А. Шакиров // Беспроводные системы для прямого мониторинга пластов – дальнейшее развитие : сборник научных трудов АО НПП «ВНИИГИС». – Октябрьский, 2021. – С. 45–52.
5. Шахназарова, И. В. Синтез децентрализованной системы обработки информации и управления нефтегазодобывающим предприятием : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Шахназарова Ирина Викторовна. – Баку, 1984. – 20 с.