

ИТ-ТЕХНОЛОГИИ, ЭНЕРГЕТИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

DOI: <https://www.doi.org/10.53002/119>

DEVELOPMENT OF A UNIFIED SCADA/OPC UA PLATFORM FOR SPACECRAFT CONTROL

*Kutsev M.A., Kogay G.D., *Kalinin A.A.*

Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

** Corresponding author email: a.kalinin@ktu.edu.kz*

Author information:

M.A. Kutsev - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Kogai G.D. - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Kalinin A.A. - Abylkas Saginov Karaganda Technical University, Karaganda, Kazakhstan, e-mail: a.kalinin@ktu.edu.kz

Abstract. This article presents a unified automated control system for the KazSat-2 and KazSat-3 communication satellites, developed using OPC UA and SCADA technologies. The current operation of these two satellites relies on separate, vendor-specific control complexes, which increases operator workload and raises the risk of errors. To address these challenges, the proposed system integrates widely used industrial automation tools: a SCADA software platform interacting with custom OPC UA server modules. The SCADA/OPC-based solution unifies telemetry processing, limit monitoring, and command execution for both satellites. A pilot project is described, demonstrating improved reliability, simplified maintenance and modernization, and reduced operational costs. The results confirm the potential of the proposed unified system to enhance current satellite operations and provide a flexible foundation for future expansion and upgrades.

Keywords: unified automated system, spacecraft control, SCADA, OPC UA, spacecraft telemetry, command and measurement station, unified data stream, scalability.

ҒАРЫШ АППАРАТТАРЫН БАСҚАРУҒА АРНАЛҒАН БІРЫҢҒАЙ SCADA/OPC UA ПЛАТФОРМАСЫН ӘЗІРЛЕУ

*Куцев М.А., Когай Г.Д., *Калинин А.А.*

Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

** Автор-корреспондент e-mail: a.kalinin@ktu.edu.kz*

Авторлар туралы ақпарат:

Куцев М.А. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

Когай Г.Д. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан

Калинин А.А. - Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті, Қарағанды, Қазақстан, e-mail: a.kalinin@ktu.edu.kz

Аңдатпа. Бұл мақалада KazSat-2 және KazSat-3 байланыс спутниктерін басқаруға арналған OPC UA және SCADA технологиялары негізінде жасалған бірыңғай автоматтандырылған басқару жүйесі ұсынылады. Қазіргі уақытта бұл екі спутник әртүрлі өндірушілер әзірлеген жеке басқару кешендері арқылы басқарылады, бұл операторларға түсетін жүктемені арттырып, қателік тәуекелін көбейтеді. Осы мәселелерді шешу үшін ұсынылған жүйе өнеркәсіптік автоматтандыруда кеңінен қолданылатын құралдарды біріктіреді: SCADA бағдарламалық платформасы арнайы OPC UA серверлік модульдерімен өзара әрекеттеседі. SCADA/OPC негізіндегі шешім екі спутник үшін телеметриялық деректерді өңдеуді, шекті мәндерді бақылауды және командаларды жіберуді біріктіреді. Мақалада жүйенің сенімділігін арттыруды, қызмет көрсетуді және жаңғыртуды жеңілдетуді, сондай-ақ пайдалану шығындарын азайтуды көрсететін пилоттық жоба сипатталған. Нәтижелер ұсынылып отырған бірыңғай жүйенің спутниктерді басқарудың ағымдағы тиімділігін арттыруға және болашақ кеңейту мен жаңғыртуға икемді негіз қамтамасыз етуге қабілетті екенін растайды.

Түйін сөздер: бірыңғай автоматтандырылған жүйе, ғарыш аппараттарын ба сқару, SCADA, OPC UA, ғарыш аппараттарының телеметриясы, командалық-өлшеу станциясы, бірыңғай деректер ағыны, масштабталу.

РАЗРАБОТКА ЕДИНОЙ SCADA/OPC UA-ПЛАТФОРМЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

*Куцев М.А., Когай Г.Д., *Калинин А.А.*

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

** Автор-корреспондент e-mail: a.kalinin@ktu.edu.kz*

Информация об авторах:

Куцев М.А. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганды, Казахстан

Когай Г.Д. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганда, Казахстан

Калинин А.А. - Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова, Караганды, Казахстан, e-mail: a.kalinin@ktu.edu.kz

Аннотация. В данной статье представлена единая автоматизированная система управления спутниками связи KazSat-2 и KazSat-3, созданная с использованием технологий OPC UA и SCADA. Текущая эксплуатация этих двух спутников основана на использовании отдельных комплексов управления собственной разработки, что приводит к увеличению нагрузки на оператора и повышению риска ошибок. Для решения этих проблем предлагаемая система объединяет широко используемые средства промышленной автоматизации: программную платформу SCADA, взаимодействующую с пользовательскими серверными модулями OPC UA. Решение на базе SCADA/OPC объединяет обработку телеметрических данных, контроль предельных значений и выдачу команд на обоих спутниках. Описан пилотный проект, демонстрирующий повышение надежности, упрощение обслуживания и модернизации, а также снижение эксплуатационных расходов. Результаты подтверждают потенциал предлагаемой унифицированной системы для улучшения текущей эксплуатации спутников и обеспечения гибкой основы для будущего расширения и модернизации.

Ключевые слова: единая автоматизированная система, управление космическими аппаратами, SCADA, OPC UA, телеметрия космических аппаратов, командно-измерительная станция, единый поток данных, масштабируемость.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Применение единой платформы управления на основе технологий SCADA и OPC UA позволяет интегрировать разнородные комплексы управления космическими аппаратами KazSat-2 и KazSat-3 в единую стандартизированную систему. Такой подход обеспечивает унификацию обработки телеметрических данных, выполнение команд управления через общий интерфейс, снижение нагрузки на операторов и повышение надежности эксплуатации спутниковой группировки.

ВВЕДЕНИЕ

Современные спутники связи играют важнейшую роль в предоставлении услуг связи и вещания. Республиканский центр космической связи (РЦКС) эксплуатирует два спутника связи, «KazSat-2» и «KazSat-3», разработанные разными производителями. Каждый спутник поставлялся со своим собственным аппаратно-программным комплексом управления, адаптированным к потребностям конкретной миссии, что привело к несовместимости систем управления [1]. На практике это означает, что два спутника управляются совершенно разным программным обеспечением управления миссией, несмотря на то, что они работают с одного и того же объекта.

Такая ситуация создала ряд проблем. Операторов необходимо обучать работе с двумя разными системами с разными интерфейсами и процедурами, что увеличивает время обучения и повышает вероятность ошибок при параллельном управлении спутниками. Более того, поскольку эти комплексы управления являются проприетарными, РЦКС зависит от технической поддержки и обновлений оригинальных разработчиков. Строгие ограничения на распространение или модификацию программного обеспечения, предоставленного поставщиком [2], вынуждают оператора полагаться на производителей для любых обновлений или замены оборудования. Такая монополия на поддержку не только увеличивает затраты, но и создает эксплуатационные риски – например, если геополитические условия не позволяют производителю оказывать помощь, исправление проблем с программным обеспечением или обновление устаревшего оборудования может стать невозможным [2]. Эти проблемы подчеркивают необходимость более стандартизированного и независимого подхода к инфраструктуре управления космическими аппаратами. Поэтому в данной работе предлагается разработка единой автоматизированной системы управления для

спутников KazSat-2 и KazSat-3 на основе современных стандартов промышленной автоматизации. Используя программное обеспечение SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) и стандарт OPC UA (Open Platform Communications Unified Architecture), можно интегрировать две разнородные системы в единую платформу. Технологии SCADA и OPC UA широко используются в промышленной автоматизации и предлагают перспективный путь для стандартизации и упрощения эксплуатации спутников [3]. Далее мы подробно рассмотрим существующие проблемы, предлагаемую методологию унификации системы, архитектуру решения, пилотное внедрение, сравнительный анализ возможных конфигураций и преимущества, продемонстрированные единым подходом.

Пробел в исследованиях. Несмотря на широкое применение технологий SCADA и OPC UA в промышленной автоматизации, вопросы их комплексного использования для унификации управления несколькими космическими аппаратами остаются недостаточно изученными. Большинство существующих решений ориентировано на отдельные спутниковые комплексы или специализированные проприетарные системы управления и не рассматривает создание единой масштабируемой платформы, независимой от производителей оборудования.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в разработке архитектуры единой SCADA/OPC UA-платформы для управления несколькими космическими аппаратами, основанной на использовании унифицированного OPC UA-сервера и единой SCADA-системы. Предложенное решение обеспечивает интеграцию разнородных наземных комплексов управления, стандартизацию обработки телеметрической информации и команд управления, а также создает основу для масштабирования системы при подключении новых космических аппаратов.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Эксплуатация KazSat-2 и KazSat-3 с двумя несовместимыми комплексами управления привела к ряду проблем для группы наземных операций:

1. Дублированные комплексы управления – два спутника используют совершенно разные аппаратно-программные комплексы для обработки телеметрических данных и управления. Операторам приходится изучать и поддерживать навыки работы с обеими системами, что увеличивает начальную нагрузку на обучение и усложняет повседневную эксплуатацию.

2. Поскольку каждая система имеет свой пользовательский интерфейс и логику управления и анализа телеметрических данных, одновременное управление обеими системами может привести к путанице. В стрессовых или нештатных ситуациях различия в процедурах повышают риск ошибки оператора при переключении между системами.

3. После истечения гарантийного срока продолжение технической поддержки каждого проприетарного комплекса становится неопределенным. Критические обновления (например, для установки нового компьютерного оборудования или операционных систем) требуют доступа к исходному коду и проектной документации, которые недоступны RCSC. В результате RCSC вынужден запрашивать любые модификации у первоначального поставщика. Монополия разработчика на такую поддержку позволяет ему диктовать высокие цены, а в случае геополитических осложнений поддержка может быть полностью прекращена [2].

4. Закрытость систем означает, что ни один аппаратный компонент не может быть заменен или модернизирован без модификации программного обеспечения поставщика. Даже плановая модернизация (например, замена устаревших рабочих станций) может потребовать изменения программного обеспечения. Это вынуждает оператора либо воздерживаться от обновлений, либо нести непредсказуемые расходы на обновление программного обеспечения поставщиком для любого нового оборудования.

Эти проблемы снижают эффективность работы спутников и увеличивают долгосрочные расходы. Они подчеркивают необходимость в едином решении для управления, независимом от исходных производителей и допускающем будущие расширения. Цель данного исследования – создание единой автоматизированной системы управления спутниками, способной управлять несколькими космическими аппаратами через общую платформу, тем самым устраняя несовместимость и неэффективность существующей системы.

Для решения вышеперечисленных проблем мы предлагаем подход, основанный на широко распространенных технологиях промышленной автоматизации, а именно, реализацию функций наземного управления спутником с использованием SCADA-системы в сочетании с OPC UA-сервером. Эта концепция предполагает замену двух отдельных программных пакетов управления, специфичных для разных производителей, унифицированной системой, построенной на базе готовых промышленных компонентов. Аналогичные идеи внедрения универсальных технологий в управление космическими аппаратами рассматривались в предыдущих работах по повышению управляемости [7]. В нашей реализации в качестве ядра системы управления используется коммерческая SCADA-платформа. Программное обеспечение SCADA предназначено для мониторинга и управления техническими процессами в режиме реального времени и предлагает богатый набор встроенных возможностей. Для пилотного проекта команда выбрала в качестве SCADA-платформы программное обеспечение MasterSCADA 4D [4]. SCADA-системы выполняют ряд задач, необходимых для эксплуатации космических аппаратов:

1. сбор данных в реальном времени с датчиков и устройств;
2. обработка и проверка входящих данных (включая проверку пределов безопасности);
3. выполнение алгоритмов логического управления;
4. отображение телеметрической и статусной информации на пультах оператора в интуитивно понятном графическом виде;
5. регистрация исторических данных в базах данных;
6. генерация сигналов тревоги и обработка предупреждающих сообщений о ненормальных условиях;
7. создание отчетов о состоянии и событиях системы;
8. объединение в сеть нескольких рабочих станций операторов и обеспечение согласованности данных на них;
9. взаимодействие с внешними программами (например, базами данных, электронными таблицами) для обмена данными.

По сути, основная роль программы SCADA заключается в сборе информации с различных датчиков (или, в данном контексте, с каналов телеметрии космического аппарата), выполнении первичной обработки и проверки достоверности, визуальном представлении информации

операторам и выдаче команд управления исполнительным механизмам или подсистемам. В частности, программное обеспечение SCADA также позволяет создавать алгоритмы автоматизированного управления, которые могут действовать в зависимости от заданных условий или действий оператора [5]. С точки зрения функциональности современные SCADA-системы охватывают практически все возможности специализированного программного обеспечения для управления спутниками [5]. Это означает, что решение на базе SCADA может удовлетворить те же потребности, что и существующие фирменные системы телеметрического мониторинга и управления космическими аппаратами. Рассматривая космический аппарат как непрерывно работающий производственный процесс, вполне возможно использовать технологию SCADA для управления спутниками. Одно приложение SCADA может контролировать несколько процессов параллельно, что в данном случае позволяет одному экземпляру SCADA управлять несколькими космическими аппаратами одновременно [6]. Развертывая идентичные интерфейсы SCADA для KazSat-2 и KazSat-3, мы сразу же решаем первые три проблемы. Оператору достаточно освоить один унифицированный интерфейс, что значительно сокращает затраты на обучение. Поскольку оба спутника будут управляться одним и тем же программным обеспечением, все операции будут выполняться в единой последовательности, что снижает вероятность ошибок при одновременном выполнении оператором двух миссий. Более того, платформы SCADA используют стандартные интерфейсные соглашения и модульные драйверы; если выбранное программное обеспечение SCADA когда-либо станет неподдерживаемым, его можно будет заменить эквивалентным продуктом другого поставщика с минимальными изменениями в логике управления. Такая взаимозаменяемость защищает систему от привязки к поставщику и устраняет необходимость в использовании оборудования исходных производителей, тем самым снижая риски, связанные с долгосрочной поддержкой.

Однако прямая замена существующих комплексов управления программой SCADA не является простой из-за различий в протоколах передачи данных и связи, используемых наземными системами спутников. Поток телеметрических и командных данных в текущих системах KazSat не соответствует «унифицированным» форматам, ожидаемым от стандартного программного обеспечения

SCADA. В частности, наземные сегменты двух спутников обрабатывают данные по-разному. Командно-измерительная станция (КИС) KazSat-2 формирует единый объединенный поток телеметрических данных, включающий не только телеметрические параметры космического аппарата, но и дополнительную информацию, такую как состояние оборудования наземной станции, измерения дальности и угла спутника (относительно антенны), метеорологические данные с метеостанции, подтверждения команд, отправленных на спутник, и т.д. [8]. Напротив, наземный сегмент KazSat-3 организован по иной философии: функции разделены между отдельными подсистемами. Независимая система мониторинга и управления отвечает за управление оборудованием наземной станции KazSat-3 и антенной, а специализированный блок обработки сигналов (телеметрический и дальномерный блок Safran CORTEX CRT) обеспечивает приём телеметрических сигналов и сигналов слежения космического аппарата [9]. Следовательно, данные, поступающие со станции KazSat-3, распределяются между несколькими источниками (программное обеспечение предоставляет данные о состоянии наземного оборудования и наведении на отдельный пульт оператора, в то время как блок

Cortex обеспечивает телеметрические данные и измерения дальности космического аппарата [9]). Эти различия означают, что программа SCADA не может просто подключиться к существующим потокам данных без адаптации. Более того, многие параметры телеметрии космического аппарата в таких системах не передаются в виде готовых к использованию инженерных значений; вместо этого они кодируются как необработанные отсчёты или закодированные значения, требующие преобразования с использованием калибровочных кривых [10]. Такая практика кодирования телеметрии (распространённая в спутниковых протоколах) экономит полосу пропускания, но приводит к форматам данных, которые стандартная система SCADA не понимает. Если бы пришлось передавать всю телеметрию в единицах непосредственного инженерного анализа, чтобы сделать её совместимой со SCADA, это значительно увеличило бы объём данных по радиоканалу, тем самым расширив требуемую полосу пропускания и снизив помехоустойчивость связи [11]. Такой подход либо нарушил бы ограничения радиоканала, либо потребовал бы использования

более крупных и дорогих наземных антенн для компенсации [11].

Для решения этих проблем наша методология вводит сервер OPC UA в качестве промежуточного уровня интеграции между наземными станциями спутников и программным обеспечением SCADA. OPC UA (унифицированная архитектура открытых платформ связи) - промышленный стандарт связи, который обеспечивает взаимодействие путем определения общей модели данных и интерфейса. На практике сервер OPC действует как универсальный драйвер, который может взаимодействовать с различным оборудованием или программным обеспечением, используя их собственные протоколы, и предоставлять данные в стандартизированном формате любому OPC-совместимому клиенту (например, системе SCADA) [3]. В предлагаемой системе специалисты RCSC разрабатывают собственный сервер OPC UA для взаимодействия с КИС каждого спутника. Сервер OPC получает телеметрические данные и данные о состоянии с наземной станции в исходном формате и преобразует их в формат данных OPC UA, распознаваемый приложением SCADA. Это преобразование включает в себя декодирование входящих кадров телеметрии и перевод необработанных кодов измерений в физические единицы путем применения соответствующих калибровочных характеристик для каждого параметра [12]. Сервер, по сути, отображает телеметрический протокол спутника на набор стандартизированных точек данных OPC, так что с точки зрения SCADA он получает обычные показания датчиков в реальном времени. Сервер OPC UA также обрабатывает обратный поток: любые команды управления, передаваемые через интерфейс SCADA, перехватываются и транслируются в специальный командный протокол, требуемый КИС и космическим аппаратом. Например, если оператор отправляет команду управления космическим аппаратом с консоли SCADA, сервер OPC инкапсулирует эту команду в соответствии с протоколом связи спутника (включая все необходимые заголовки, кодировку и адресацию), прежде чем переслать её на наземную станцию для передачи. Используя этот уровень трансляции на основе OPC, программа SCADA может бесперебойно взаимодействовать как с KazSat-2, так и с KazSat-3, несмотря на различия в форматах данных. Таким образом, технология OPC UA решает последнюю проблему, изолируя зависимости оборудования и протоколов в модульном

серверном компоненте. Если в будущем какая-либо часть наземного оборудования будет заменена или будет внедрен новый протокол связи, достаточно будет обновить OPC-сервер (или его конфигурацию для нового протокола), при этом уровень SCADA останется неизменным. Доступ к исходному коду OPC-сервера позволяет легко вносить такие изменения, не нарушая общую функциональность системы управления.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Используя описанную выше методологию, мы разработали новую архитектуру центра управления полетами, интегрирующую компоненты SCADA и OPC UA. Было рассмотрено несколько конфигураций для развертывания системы на базе SCADA-OPC, различающихся количеством OPC-серверов, используемых для управления несколькими космическими аппаратами. На рисунке 1 показана

первая конфигурация, представляющая собой простейший случай: программа SCADA, подключенная через сервер OPC UA к наземной станции одного космического аппарата. В этой схеме один OPC-сервер взаимодействует с командно-измерительной станцией спутника (KazSat-2 или KazSat-3) и транслирует все телеметрические и командные данные, как описано ранее. Программное обеспечение SCADA взаимодействует с этим OPC-сервером для получения телеметрических данных (в формате OPC) и отправки команд. Система включает в себя необходимые вспомогательные компоненты, такие как база данных для регистрации телеметрических данных, модули анализа орбиты и формирования планов полета, ввода метеорологических данных и рабочие станции операторов для управления и мониторинга.

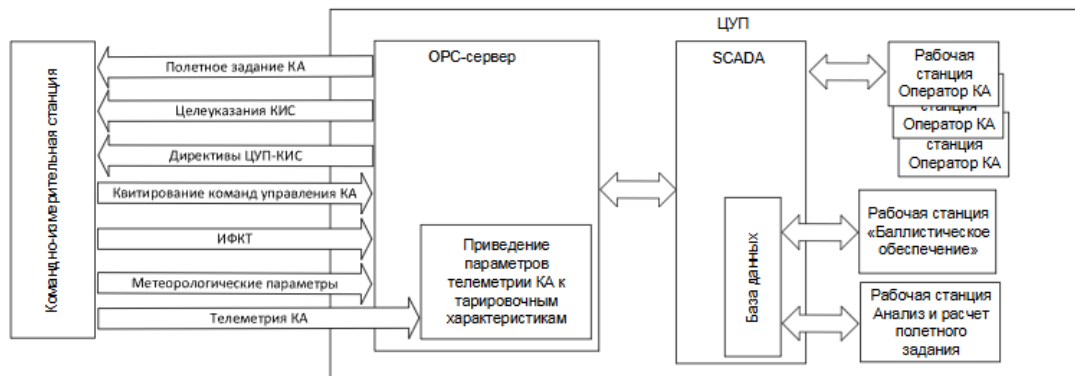


Рисунок 1 – Архитектура центра управления на основе программы SCADA и сервера OPC UA для управления одним космическим аппаратом

Главное преимущество односпутниковой конфигурации - её простота. Она легко реализуется и управляется для одного космического аппарата и требует минимальных изменений в существующей конфигурации наземной станции этого спутника. Все потоки данных для этого спутника обрабатываются одним OPC-сервером, а SCADA предоставляет унифицированный интерфейс для операторов. Однако масштабируемость такой конфигурации ограничена. При добавлении второго космического аппарата потребуется дополнительный OPC-сервер и отдельный экземпляр SCADA (или значительно расширенный экземпляр), что фактически дублирует систему. Это увеличивает сложность и требования к оборудованию при масштабировании до нескольких спутников.

На рисунке 2 показана более расширенная конфигурация для управления двумя спутниками

с подходом SCADA-OPC. В этой конфигурации имеется одна программа SCADA, взаимодействующая с двумя отдельными серверами OPC UA, по одному на спутник. Каждый сервер OPC обрабатывает телеметрию и преобразование команд для соответствующей наземной станции космического аппарата (один для КИС KazSat-2 и один для КИС KazSat-3). Приложение SCADA взаимодействует с обоими серверами OPC, интегрируя данные с обоих спутников в один интерфейс. Архитектура включает два параллельных потока телеметрических данных (по одному с каждого сервера OPC в SCADA) и при необходимости поддерживает две независимые базы данных для спутников. Помимо дублирования серверов OPC и потоков данных, остальная часть инфраструктуры управления полетами аналогична рис. 1, включая инструменты анализа орбиты, метеорологические входные данные и

рабочие станции операторов, которые теперь расширены для обеспечения мониторинга обоих космических аппаратов. Конфигурация с двумя OPC обеспечивает независимую обработку данных каждого космического аппарата. Канал связи каждого спутника обрабатывается собственным OPC-сервером, что повышает надежность и локализацию сбоев: проблема с потоком данных или OPC-сервером одного спутника с меньшей вероятностью повлияет на другой. Операторы по-прежнему получают преимущества от унифицированного интерфейса SCADA, но внутри системы выполняются два параллельных процесса трансляции OPC. Независимость OPC-серверов также позволяет распределять вычислительную нагрузку и потенциально может работать на отдельном обо-

рудовании для обеспечения резервирования. Однако такая конфигурация имеет ряд недостатков. Она влечет за собой более высокие затраты на оборудование и обслуживание, поскольку используются два OPC-сервера (которые могут быть отдельными физическими серверами или процессами). Координация и синхронизация в приложении SCADA усложняются при работе с двумя источниками данных и двумя базами данных. Администрирование нескольких баз данных и экземпляров OPC увеличивает затраты на администрирование системы. Кроме того, несмотря на унифицированный интерфейс SCADA, операторам и инженерам приходится управлять двумя серверными OPC-серверами, что усложняет настройку и устранение неполадок.

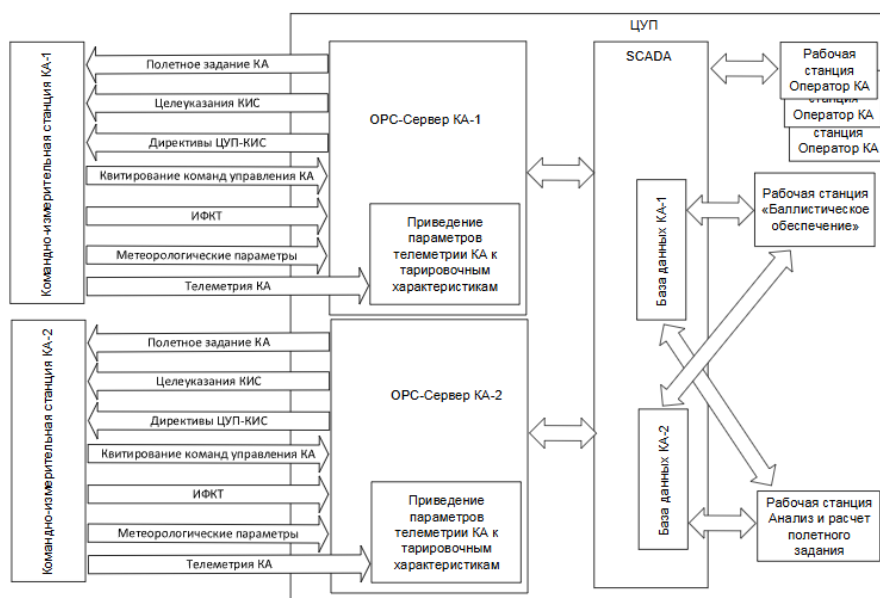


Рисунок 2 – Архитектура центра управления с одной программой SCADA и двумя серверами OPC UA для управления двумя космическими аппаратами

В целях большей унификации и эффективности на рисунке 3 показана третья конфигурация: использование одного сервера OPC UA для управления обоими спутниками. В этой схеме один процесс сервера OPC настроен на взаимодействие с оборудованием КИС KazSat-2 и KazSat-3. Он получает телеметрию с обеих наземных станций (через соответствующие модули связи на сервере OPC) и объединяет потоки данных в один объединенный поток, представленный в SCADA. Таким образом, программа SCADA подключается к этому одному серверу OPC для получения телеметрии для

обоих космических аппаратов и для отправки команд любому из них. Единая интегрированная база данных используется для хранения телеметрии с обоих спутников, что упрощает управление данными. Остальные компоненты системы, такие как анализ плана полета, метеорологические данные, рабочие станции операторов – работают как общий ресурс для обоих спутников в одной среде SCADA. Эта конфигурация объединяет все функции управления и мониторинга для обоих космических аппаратов в одну систему SCADA+OPC.

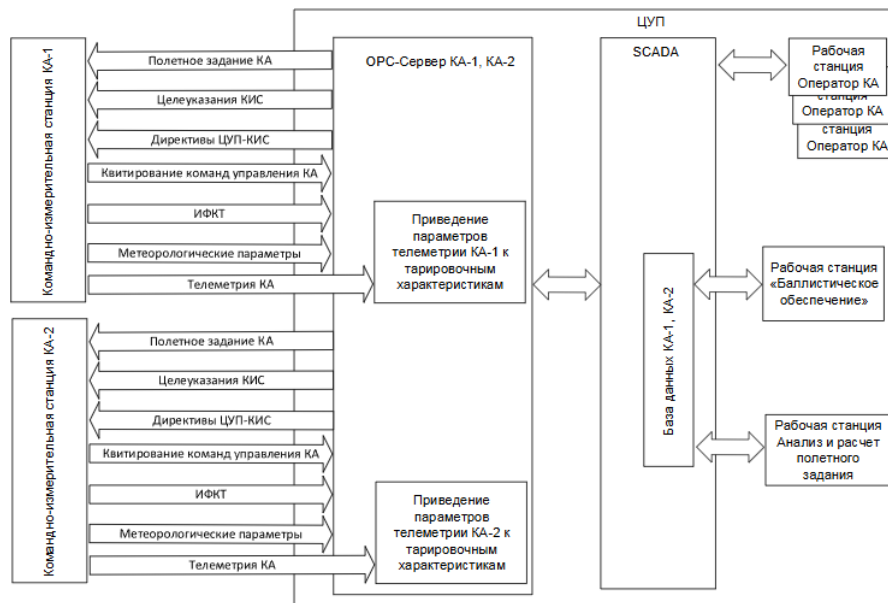


Рисунок 3 – Архитектура центра управления с одной программой SCADA и одним унифицированным сервером OPC UA для управления двумя космическими аппаратами

Такая унифицированная конфигурация обладает рядом неоспоримых преимуществ. Она минимизирует количество необходимого оборудования и отдельных сервисов, тем самым снижая затраты на оборудование и техническую поддержку (обслуживается только один ОПС-сервер вместо двух) и упрощая архитектуру системы. Все данные телеметрии и управления обрабатываются в одном месте, что значительно упрощает мониторинг нескольких космических аппаратов: операторы могут контролировать оба спутника с одних и тех же экранов и журналов данных, не переключаясь между контекстами. Единая база данных и интерфейс также снижают административную нагрузку и упрощают межспутниковый анализ (при необходимости). Нагрузка на оператора дополнительно снижается благодаря централизации всех данных, а обучение персонала упрощается до единой системы. Основным недостатком такого подхода является повышенная нагрузка и критичность одного ОПС-сервера. Поскольку он обрабатывает данные для двух спутников, требования к производительности этого сервера выше, и он становится точкой потенциального отказа для всей многоспутниковой системы управления. Таким образом, такая конфигурация требует высоконадежного и отказоустойчивого ОПС-сервера, а также, возможно, механизмов резервирования или отказоустойчивости для поддержания работы в случае возникновения проблем на сервере. На практике ОПС-сервер (и машина, на которой он работает) должны быть спроектированы с учетом отказоустойчивости,

чтобы избежать потери управления обоими спутниками в случае возникновения проблем.

Для проверки концепции и выявления практических соображений была проведена пилотная реализация предлагаемой унифицированной системы управления. В этом пилотном проекте программное обеспечение MasterSCADA было развернуто в качестве интерфейса оператора и приложения управления [4]. Разработан прототип сервера OPC UA с ограниченной функциональностью, сосредоточенной в основном на обработке телеметрических данных со спутника KazSat-3. Этот ОПС-сервер был настроен для подключения к командно-измерительной станции KazSat-3 и преобразования входящих кадров телеметрии в узлы данных OPC UA, доступные для SCADA. Пилотная система успешно установила базовую связь: она могла получать подмножество телеметрии KazSat-3 в реальном времени, декодировать необработанные значения и отображать параметры телеметрии в интерфейсе SCADA в значимых технических единицах. Это продемонстрировало возможность интеграции существующей наземной станции со SCADA через уровень OPC UA. Приложение SCADA также было настроено на выполнение простых проверок предельных значений и визуализаций для получаемых телеметрических данных, что показало, что готовые инструменты SCADA могут эффективно контролировать данные о состоянии спутников.

Следует отметить, что пилотный ОПС-сервер UA не являлся полноценной заменой исходного

комплекса управления. Его функциональность ограничивалась частичным сбором и представлением телеметрии; двусторонняя передача команд и полный охват набора данных в этом первоначальном прототипе ещё не были реализованы. Для перехода к полноценной рабочей системе необходима дополнительная информация от производителей спутников. В частности, необходимо полностью документировать содержание и форматы телеметрических кадров для KazSat-2 и KazSat-3 (т.е. определения всех телеметрических параметров, их кодирование и калибровочные кривые), а также получить протоколы связи между существующим программным обеспечением управления полётом и наземными станциями. Также необходимы калибровочные характеристики для каждого телеметрического параметра (используемые для преобразования необработанных кодовых отсчётов в физические значения), чтобы OPC-сервер мог точно выполнять преобразования для всех параметров. Получение этих технических данных необходимо для расширения возможностей OPC-сервера, чтобы охватить 100% телеметрии и реализовать функцию трансляции команд для обоих спутников. RCSC сотрудничает с разработчиками космических аппаратов для получения необходимой документации по интерфейсу. Получение этой информации позволит команде разработчиков модернизировать сервер OPC UA с пилотного прототипа до полноценного рабочего моста между спутниками и системой SCADA. Несмотря на ограничения, пилотный проект предоставил ценное подтверждение концепции. Он продемонстрировал, что программное обеспечение SCADA может подключаться к спутниковой телеметрии и отображать её в режиме реального времени через специализированный OPC-интерфейс, что подтверждает жизнеспособность подхода SCADA+OPC для данного приложения. Он также помог выявить практические проблемы (такие как обработка данных, синхронизация и разработка графического интерфейса пользователя для управления спутниками), которые будут решаться в следующей версии системы.

Три описанные конфигурации архитектуры (рисунки 1-3) были оценены для определения наиболее подходящего подхода к унификации управления несколькими космическими аппаратами. Сравнительный анализ показывает, что переход к единой интегрированной системе (конфигурация, показанная на рисунке 3) обеспечивает наибольшие преимущества как с

эксплуатационной, так и с экономической точки зрения. Использование одного сервера OPC UA для управления несколькими спутниками обеспечивает высокую степень унификации: все потоки данных и команды управления проходят через один центр, что обеспечивает эффективное использование вычислительных ресурсов и централизованное управление. Такой подход значительно сокращает дублирование оборудования и трудозатрат, что приводит к экономии средств на аппаратное обеспечение и обслуживание. Он также упрощает процесс управления: операторы получают единое целостное представление для всех спутников, что снижает когнитивную нагрузку и вероятность возникновения ошибок, особенно по сравнению с использованием отдельных систем или нескольких интерфейсов OPC. Техническое обслуживание и будущие обновления системы (например, добавление нового спутника) упрощаются в унифицированной структуре, поскольку новые дополнения можно вносить в существующую структуру SCADA/OPC без создания параллельной цепочки управления. В целом, конфигурация с одним OPC оптимизирует операции и обеспечивает контролируемое масштабирование. Однако унифицированный подход требует, чтобы центральный OPC-сервер и поддерживающая сетевая инфраструктура были спроектированы с расчётом на высокую надёжность и отказоустойчивость. Отказ одного OPC-сервера может повлиять на управление обоими космическими аппаратами. Поэтому для снижения этого риска необходимы соответствующее резервирование (например, OPC-сервер горячего резерва) и тщательное тестирование. Унифицированная система должна быть устойчива к одиночным отказам для обеспечения непрерывной безопасной работы. В отличие от этого, конфигурация с двумя OPC-серверами (рис. 2) изначально обеспечивает некоторое разделение задач и может обрабатывать отказы более эффективно (отказ одного OPC-сервера влияет только на один спутник). Тем не менее, дополнительные затраты и сложность этого варианта перевешивают его преимущества, учитывая, что надёжность может быть заложена в конструкцию с одним OPC-сервером. В целом, анализ показывает, что полностью унифицированная система управления с одним OPC-сервером UA, обслуживающим несколько космических аппаратов, является оптимальным решением для нужд RCSC. Такая конфигурация наилучшим образом отвечает целям экономической эффективности, простоты

управления и снижения нагрузки на оператора при условии обеспечения надежности центрального сервера техническими средствами. Внедрение этой унифицированной системы представляет собой перспективную стратегию, которая использует современные технологии автоматизации для преодоления ограничений устаревшего подхода. Примечательно, что этот переход согласуется с более широкими тенденциями в аэрокосмической отрасли, направленными на стандартизацию и интеграцию процессов управления [13].

ВЫВОДЫ

Внедрение единой системы управления космическими аппаратами на базе технологий SCADA и OPC UA является перспективным направлением для решения текущих задач по эксплуатации KazSat-2, KazSat-3 и аналогичных управляемых спутников. Унифицируя и стандартизируя процессы обработки телеметрических данных и выдачи команд, предлагаемая система значительно снижает нагрузку на операторов и снижает вероятность ошибок. Оба спутника могут контролироваться и управляться через единый однородный интерфейс, что упрощает обучение и повседневную работу. Использование платформы SCADA позволяет централизованно контролировать несколько космических аппаратов, упрощая задачи управления и мониторинга, которые ранее требовали использования нескольких разрозненных систем. Замена проприетарных каналов связи на серверы OPC UA в качестве уровня интеграции также обеспечивает системе большую гибкость и масштабируемость. Серверы OPC UA действуют как адаптивные трансляторы, что означает, что новое оборудование или даже новые спутники могут быть интегрированы с минимальными изменениями в общую систему. Если требуется замена какого-либо наземного оборудования или программного обеспечения, это можно сделать путём обновления соответствующего интерфейса или драйвера OPC

без необходимости перестройки всей системы управления. Такая модульность защищает центр управления от устаревания и ограничений, связанных с конкретным поставщиком. По сути, унифицированный подход SCADA/OPC позволяет отделить функции управления полётом от особенностей реализации конкретного поставщика, позволяя РЦКС сохранять контроль над своей инфраструктурой.

Пилотный проект, описанный в данной статье, продемонстрировал жизнеспособность и

преимущества предлагаемой унифицированной системы управления. Даже при частичном внедрении преимущества очевидны: унификация интерфейсов и протоколов передачи данных значительно упрощает обучение операторов и кросс-обучение, а также снижает количество возможных ошибок операторов при управлении спутниками. Предварительная интеграция телеметрических данных KazSat-3 подтвердила, что система SCADA способна бесперебойно отображать данные с космических аппаратов, подтверждая правильность концепции. По мере дальнейшего развития системы ожидается, что она будет полностью повторять (и превосходить) функциональность исходных комплексов управления. Внедрение решения на базе SCADA также повышает удобство обслуживания системы. Стандартные компоненты SCADA и OPC хорошо документированы и поддерживаются широким кругом пользователей, что делает техническую поддержку более доступной. Обновление или миграция программного обеспечения (например, перенос системы управления на новое оборудование или другую операционную систему) могут быть выполнены относительно легко по сравнению с проприетарными системами, поскольку фреймворки SCADA и OPC разработаны с учётом портативности и аппаратной независимости. Кроме того, унифицированная система со временем снижает эксплуатационные расходы. Она устраняет необходимость в избыточном обучении и поддержке для различных платформ и использует стандартное программное обеспечение, которое, как правило, более экономично, чем специализированные решения.

Предлагаемая система управления SCADA+OPC UA представляет собой значительный шаг вперёд в автоматизации и унификации наземного управления спутниками. Новая система не только решает текущие проблемы, возникающие при эксплуатации KazSat-2 и KazSat-3, но и создаёт прочную основу для будущего расширения и совершенствования инфраструктуры управления группировкой спутников. Благодаря такому подходу RCSC может управлять своими космическими аппаратами более надёжно, эффективно и независимо от внешних поставщиков. Прделанная к настоящему времени работа закладывает основу для интеграции дополнительных спутников в ту же систему при необходимости и для постоянного совершенствования возможностей системы [13].

Авторский вклад (таксономия CRediT):
М.А. Куцев – концептуализация исследования,

разработка методологии, разработка архитектуры SCADA/OPC UA, программная реализация прототипа OPC UA-сервера, анализ результатов, подготовка первоначальной версии рукописи. **Г.Д. Когай** – исследование, анализ научной литературы, валидация архитектурных решений, визуализация материалов, редактирование рукописи. **А.А. Калинин** – научное руководство исследованием, формальный анализ, рецензирование и редактирование рукописи, администрирование проекта. Все авторы ознакомились с окончательной версией рукописи и одобрили её к публикации.

Финансирование. Исследование выполнено без привлечения внешнего финансирования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность Карагандинскому техническому университету имени Абылкаса Сагинова за поддержку, оказанную при выполнении исследования.

Авторское право © 2026 принадлежит автору(ам). Данная статья распространяется на условиях открытого доступа в соответствии с лицензией Creative Commons Attribution–ShareAlike 4.0 International (CC BY-SA 4.0). Лицензия разрешает свободное использование, распространение и воспроизведение в любой форме при условии обязательного указания авторства и сохранения той же лицензии для производных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] П. Фортескью, Дж. Старка и Г. Суинерда, Разработка систем космических аппаратов. М.: Альпина Паблишер, 2018.
- [2] Постановление Правительства Российской Федерации от 16 июля 2022 г. № 1288 «Об утверждении списка оборудования, материалов и технологий, которые могут быть использованы при создании ракетного оружия и в отношении которых установлен экспортный контроль», 2022.
- [3] М. Никола, Ч.-И. Никола, М. Дуца и Д. Сачердоану, «Архитектура систем SCADA на основе OPC и веб-серверов и интеграция приложений для управления производственными процессами», Международный журнал по науке и технике управления, т. 8, № 1, с. 13–21, 2018.
- [4] MasterSCADA 4D. [Online]. Available: <https://masterscada.ru/masterscada4d>
- [5] И. А. Елизаров, А. А. Третьяков, А. Н. Пчелинцев и др., Интегрированные системы проектирования и управления: SCADA-системы: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015.
- [6] ISO 15531-1:2004. Системы промышленной автоматизации и интеграция. Данные управления промышленным производством. Часть 1. Общий обзор, 2004.
- [7] И. Н. Пантелеймонов, «Спутниковая система, управляемая по межспутниковой радиолинии», Патент РФ 2690966, МПК B64G1/10, B64G3/00, заявка № 2018125659, 12 июля 2018 г., опубл. 7 июня 2019 г.
- [8] А. А. Медведев, В. А. Меньшиков и В. Л. Иванов, Основы построения и эксплуатации космической системы связи и вещей. Кн. 1. Базовый теоретический курс. М.: МПК СИП РИА, 2005.
- [9] CORTEX CRT / QUANTUM. Руководство пользователя. Документ DTU 100042, версия 5.17. Safran Data Systems.
- [10] Д. В. Дымов и Н. П. Ценникова, «Структура телеметрического сообщения современных космических аппаратов», в Материалах XVI Международной научной конференции «Решетневские чтения», Красноярск, Россия, 7–9 ноября 2012 г.
- [11] И. А. Козинов, В. С. Куликов и С. Н. Святкин, «Оценка эффективности функционирования систем и средств управления космическими аппаратами в условиях радиопомех», в Трудах 76-й Научно-технической конференции Санкт-Петербургского НТО РЭС им. А. С. Попова, Санкт-Петербург, Россия, 2021.
- [12] А. А. Медведев, В. А. Меньшиков и В. Л. Иванов, Основы построения и эксплуатации космической системы связи и вещей. Кн. 2. Специальный теоретический курс. М.: МПК СИП РИА, 2005.
- [13] А. П. Григорьев, А. В. Любимов и Г. Бурлуцкий, «Бортовые телеметрические системы изделий ракетно-космической техники», в Материалах Пятой Международной научной конференции «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», Санкт-Петербург, Россия, 2024.

REFERENCES

- [1] P. Fortesk'yu, Dzh. Starka, and G. Suinerda, Razrabotka sistem kosmicheskikh apparatov [Spacecraft Systems Engineering]. Moscow, Russia: Al'pina Publisher, 2018. (In Russian).
- [2] Postanovlenie Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 16 iyulya 2022 g. No. 1288 «Ob utverzhdenii spiska oborudovaniya, materialov i tekhnologiy, kotorye mogut byt' ispol'zovany pri sozdanii raketnogo oruzhiya i v otnoshenii kotorykh ustanovlen eksportnyy kontrol'» [Resolution of the Government of the Russian Federation No. 1288 of July 16,

2022 "On Approval of the List of Equipment, Materials and Technologies That May Be Used in the Development of Missile Weapons and Are Subject to Export Control"], 2022. (In Russian).

[3] M. Nikola, Ch.-I. Nikola, M. Duca, and D. Sacherdotsyanu, "Arkhitektura sistem SCADA na osnove OPC i veb-serverov i integratsiya prilozheniy dlya upravleniya proizvodstvennymi protsessami [Architecture of OPC- and Web Server-Based SCADA Systems and Integration of Manufacturing Process Control Applications]," *Mezhd. Zh. po Nauke i Tekhnike Upravleniya*, vol. 8, no. 1, pp. 13–21, 2018. (In Russian).

[4] MasterSCADA 4D. [Online]. Available: <https://masterscada.ru/masterscada4d> (accessed Nov. 2, 2024).

[5] I. A. Elizarov, A. A. Tret'yakov, A. N. Pchelintsev et al., *Integrirovannye sistemy proektirovaniya i upravleniya: SCADA-sistemy: uchebnoe posobie [Integrated Design and Control Systems: SCADA Systems: Textbook]*. Tambov, Russia: TGTU Publ., 2015. (In Russian).

[6] ISO 15531-1:2004, *Sistemy promyshlennoy avtomatizatsii i integratsiya. Dannye upravleniya promyshlennym proizvodstvom. Chast' 1. Obshchiy obzor [Industrial Automation Systems and Integration – Industrial Manufacturing Management Data – Part 1: General Overview]*, 2004.

[7] I. N. Panteleymonov, "Sputnikovaya sistema, upravlyаемая po mezhsputnikovoy radiolinii [Satellite System Controlled via an Inter-Satellite Radio Link]," Russian Federation Patent 2690966, IPC B64G1/10, B64G3/00, appl. No. 2018125659, Jul. 12, 2018, publ. Jun. 7, 2019. (In Russian).

[8] A. A. Medvedev, V. A. Men'shikov, and V. L. Ivanov, *Osnovy postroeniya i ekspluatatsii kosmicheskoy sistemy svyazi i veshchey. Kn. 1. Bazovyy teoreticheskiy kurs [Fundamentals of the Design and Operation of Space Communication Systems and Networks. Book 1. Basic Theoretical Course]*. Moscow, Russia: MPK SIP RIA, 2005. (In Russian).

[9] CORTEX CRT / QUANTUM. *Rukovodstvo pol'zovatelya [User Manual]*. Document DTU 100042, Version 5.17. Safran Data Systems.

[10] D. V. Dymov and N. P. Tsennikova, "Struktura telemetricheskogo soobshcheniya sovremennykh kosmicheskikh apparatov [Structure of Telemetry Messages of Modern Spacecraft]," in *Proc. XVI Int. Sci. Conf. Reshetnev Readings*, Krasnoyarsk, Russia, Nov. 7–9, 2012. (In Russian).

[11] I. A. Kozinov, V. S. Kulikov, and S. N. Svyatkin, "Otsenka effektivnosti funktsionirovaniya sistem i sredstv upravleniya kosmicheskimi apparatami v usloviyakh radiopomekh [Evaluation of the Efficiency of Spacecraft Control Systems under Radio Interference]," in *Proc. 76th Sci.-Tech. Conf. A. S. Popov St. Petersburg Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications*, St. Petersburg, Russia, 2021. (In Russian).

[12] A. A. Medvedev, V. A. Men'shikov, and V. L. Ivanov, *Osnovy postroeniya i ekspluatatsii kosmicheskoy sistemy svyazi i veshchey. Kn. 2. Spetsial'nyy teoreticheskiy kurs [Fundamentals of the Design and Operation of Space Communication Systems and Networks. Book 2. Advanced Theoretical Course]*. Moscow, Russia: MPK SIP RIA, 2005. (In Russian).

[13] A. P. Grigor'ev, A. V. Lyubimov, and G. Burlutskiy, "Bortovye telemetricheskie sistemy izdeliy raketno-kosmicheskoy tekhniki [Onboard Telemetry Systems for Rocket and Space Technology]," in *Proc. 5th Int. Sci. Conf. Aerospace Instrument Engineering and Operational Technologies*, St. Petersburg, Russia, 2024. (In Russian).