

# Конструкционная информационная система управления производством (CMIS - Construction Management Information System) в ОИЯИ

С. Себаллос Санчес,<sup>1,a</sup> А. А. Коложвари,<sup>1,b</sup> А. Г. Долбилов,<sup>1,c</sup>

Р. Н. Семенов,<sup>1,d</sup> Е. А. Цапулина,<sup>1,e</sup> А. Родригес Альварес,<sup>1,f</sup>

А. Д. Шереметьев,<sup>1,g</sup> и Ю. А. Мурин для коллаборации MPD-ITS<sup>1,h</sup>

<sup>1</sup>Объединённый Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

<sup>2</sup> Центр технологических приложений и ядерных разработок, Гавана, Куба.

<sup>a</sup>e-mail: ceballos@jinr.ru

<sup>b</sup>e-mail: kolozhvari@jinr.ru

<sup>c</sup>e-mail: dolbilov@jinr.ru

<sup>d</sup>e-mail: roman@jinr.ru

<sup>e</sup>e-mail: tsapulina@jinr.ru

<sup>f</sup>e-mail: arodriguez@jinr.ru

<sup>g</sup>e-mail: sheremetev@jinr.ru

<sup>h</sup>e-mail: murin@jinr.ru

## Аннотация

В Объединённом Институте Ядерных Исследований (ОИЯИ) в результате совместной работы Лаборатории Физики Высоких Энергий (ЛФВЭ) и Лаборатории Информационных Технологий (ЛИТ) недавно было завершено внедрение и адаптация конструкционной информационной системы управления производством (CMIS). Система CMIS особенно полезна для детального контроля и непрерывной обратной связи при производстве сложно-составных объектов, таких как подсистемы детекторов, входящих в эксперименты на ионном коллайдере на базе нуклотрона (NICA) в ЛФВЭ ОИЯИ. В настоящее время CMIS используется для производства двух кремниевых детекторов-трекеров в ЛФВЭ, хотя система также может использоваться в любых других проектах по производству оборудования, относящихся к ОИЯИ, имеющих высокую сложность и требования к качеству производимой продукции и плану графику.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Кремниевые трековые системы для двух основных экспериментов проекта NICA в ОИЯИ, многоцелевого детектора MPD [1] и вершинного детектора установки BM@N[2], создаются в отделе кремниевых трековых систем ЛФВЭ ОИЯИ,

соответственно данные проекты называются MPD-ITS и VM@N-STC. Это сложные системы, состоящие из сотен технологически сложных в изготовлении элементов, модулей и супермодулей, требующие организации точного рабочего процесса производства компонентов, многоступенчатой сборки и испытаний, которые должны быть скоординированы между несколькими географически удаленными учреждениями [3, 4]. По этой причине для обоих проектов было решено внедрить в ОИЯИ конструкционную информационную систему управления производством (CMIS), что позволило бы осуществлять синхронизованно управление производственным процессом для своевременного достижения целей данных проектов. Система содержит Веб-приложение, установленное на сервере приложений, доступ к которому программные клиенты получают через Интернет. Данное приложение связано с базой данных Oracle. Оно включает в себя пользовательский веб-интерфейс, а также набор веб-API, что позволяет осуществлять прямое взаимодействие оборудования с базой данных. Как показано на Рис. 1, доступ к системе возможен как из ОИЯИ, так и из любой точки мира. Для хранения больших файлов используется распределенная файловая система EOS [5], доступ к которой возможен по защищенному протоколу ssh. Аутентификация пользователей в системе веб-интерфейса осуществляется через систему единого входа (SSO) ОИЯИ в рамках схемы прав доступа на основе ролей пользователей в проекте. Для конкретного программного обеспечения, связанного с оборудованием, используемым в процессе контроля качества собираемых узлов, доступ основан на учетных данных Kerberos, которые автоматически обновляются. Последнее гарантирует безопасный непрерывный поток информации между оборудованием для сборки/тестирования и базой данных без необходимости вмешательства человека в работу системы.

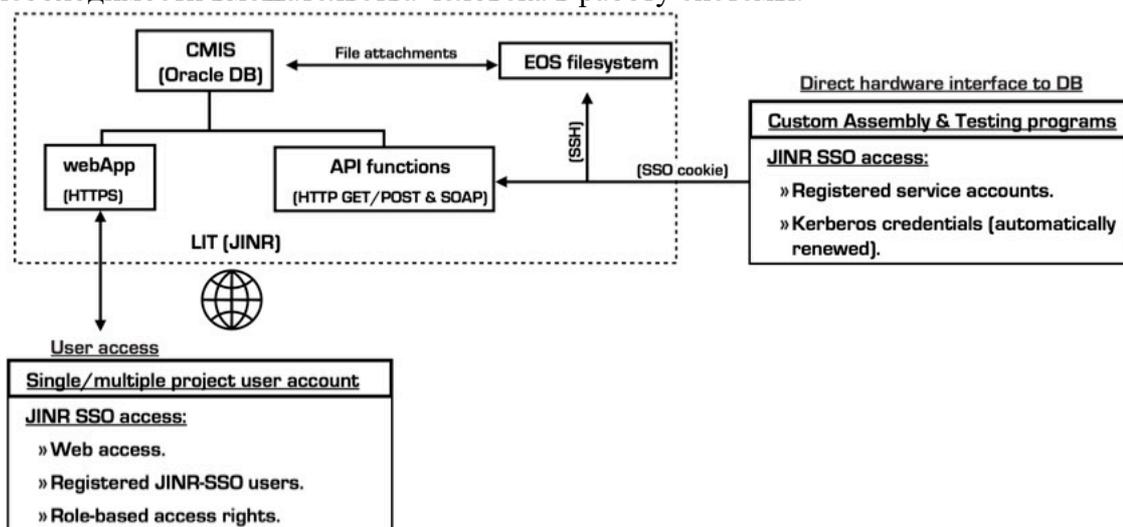


Рис. 1. Внедрение CMIS в ЛИТ ОИЯИ

Серверная часть инфраструктуры CMIS состоит из двух физических серверов: веб-сервера и сервера для системы управления базами данных (DBMS). Оба сервера расположены в центре обработки и хранения данных в ЛИТ ОИЯИ. Веб-сервер основан на процессорной архитектуре x86-64 от Microsoft. В качестве операционной системы установлен стандарт Windows Server 2019. Сервер взаимодействует с внешними клиентами через информационные службы Microsoft Internet Information Services (IIS), программный пакет которых входит в состав дистрибутива Windows. По соображениям безопасности передача данных осуществляется через протокол HTTPS. Резервное копирование сервера осуществляется с использованием системы UtBackup с открытым исходным кодом. Распределенная файловая система EOS, содержащая данные по проекту CMIS, не имеет необходимых протоколов для обмена данными с ОС Windows. Это ограничение было устранено путем установки дополнительного шлюза для

передачи файлов с веб-сервера на EOS по протоколу SAMBA. Сервер DBMS также основан на процессорной архитектуре x86-64 и выступает в качестве основного объектно-реляционного хранилища данных с использованием базы данных версии Oracle 19c. Oracle Linux 7 была выбрана в качестве серверной операционной системы за ее полную совместимость с продуктами Oracle. Резервное копирование осуществляется с использованием встроенных механизмов базы данных Oracle, а также системы UrBackup с открытым исходным кодом.

Это первый случай, когда подобная многокомпонентная конструкционная информационная система управления производством была развернута в рамках инфраструктуры ЛИТ ОИЯИ, интегрирующей веб-интерфейс пользователя с независимо доступным веб-API, подключенным к базе данных Oracle и общей файловой системе EOS, гарантирующей безопасный доступ по требованию для отдельных пользователей (SSO) и непрерывный доступ к файлу сборки (SSH). Для этого два сервера были оснащены сетевыми интерфейсами Ethernet со скоростью 10 Гбит/с с возможностью дальнейшего увеличения этой пропускной способности. Поскольку инфраструктура ЛИТ имеет единую пользовательскую базу данных, которая взаимодействует с другими службами с использованием протоколов Kerberos и OAuth2, доступ к веб-компонентам CMIS был настроен по протоколу OAuth2, в то время как остальные компоненты на базе ОС Linux были подключены по протоколу Kerberos, включая доступ к файловой системе EOS. Такой подход позволяет предложить тот же уровень возможностей и расширенного доступа, что и эквивалентная система, развернутая в ЦЕРН.

В следующих разделах будет представлена структура CMIS, за которой последует краткое описание текущей реализации данной системы для проектов по созданию кремниевых трекеров для экспериментов MPD и BM@N.

## II. Краткое описание CMIS

CMIS - это универсальная система баз данных управления проектами на базе Oracle, которая позволяет организовать и контролировать каждый аспект проекта по производству сложных многокомпонентных детекторных систем. Изначально CMIS была разработана и обслуживалась компанией KYBERNETIKA s.r.o в г. Кошице Словацкой Республики, и была основана на аналогичном продукте, который эта компания разработала для модернизации внутренней трековой системы ALICE в ЦЕРН. CMIS позволяет управлять человеческими ресурсами, организацией и планированием проекта, а также отслеживать текущее состояние и историю результатов тестирования каждого компонента детектора по ходу его интеграции в систему, при этом поддерживается прямое подключение аппаратного/программного обеспечения оборудования, используемого при контроле качества и тестирования собираемых узлов к конструкционной базе данных. Таким образом, информация, начиная от текущего местоположения компонента при транспортировке на место сборки и обратно и заканчивая конечным положением отдельного чипа внутри детектора, а также результатами и историей испытаний каждого компонента в процессе сборки, может быть легко сохранена и с ней можно ознакомиться в случае, если возникли проблемы отказа отдельных частей окончательно собранной детекторной системы. Это модульная система, которая может содержать несколько проектов параллельно с независимым доступом на основе выделенных ролей пользователей различных проектов, контролируемых CMIS.

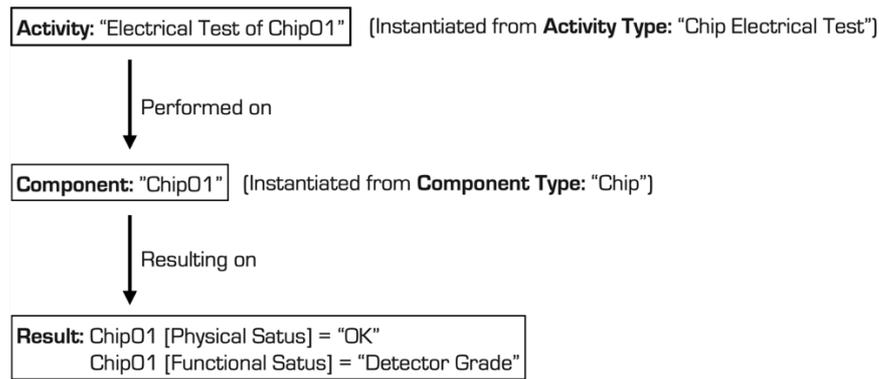


Рис. 2. Схематическое изображение возможных действий, выполняемых над “Компонентом”, и их конечный результат

Механизм отслеживания и записи всей информации, относящейся к выполняемой работе, основан на создании в системе определяемых пользователем шаблонов “Типы компонентов” и “Типы действий”, соответствующих типу действий, выполняемых в реальном мире с реальными типами компонентов. Эти шаблоны затем используются для создания в системе соответствующих конкретных экземпляров класса “Компоненты” и “Действия”. На практике “Действия” отражают действия (например, “Визуальный осмотр”, “Электрические испытания”, “Сборка компонента” и т.д.), выполняемые с “Компонентами”, которые могут привести к изменению либо их “Функционального”, либо “Физического” статуса (или того и другого) в реальном мире, и эти изменения соответственно регистрируются в системе в соответствии с определенными пользователем критериями. На рисунке 2 показан пример того, как электрический тест, который был выполнен на определенном чипе (“Chip01”), представлен в системе и как регистрируется результат теста. В этом случае конкретное действие с названием “Электрический тест Chip01” создается на основе заранее определенного типа действия с именем “Электрический тест Chip”, который содержит все соответствующие атрибуты, такие как, например, название действия, тип компонентов, связанных с этим видом деятельности, местоположение, где это может быть выполнено, и возможные результаты, ожидаемые от этого вида деятельности. Конкретное созданное действие затем выполняется с конкретным компонентом “Chip01”, созданным на основе ранее определенного типа компонента с именем “Chip”. Последняя версия CMIS позволяет назначать соответствующие атрибуты “Компонента”, такие как его название, состав и список определяемых пользователем возможных “Функциональных/Физических состояний”, относящихся к определенному типу компонента. Результат этого действия с данным компонентом записывается в систему путем обновления его “Физического и Функционального состояний” до одного из заранее определенных возможных значений.

Что касается определения типа действия, то оно включает в себя компоненты “Вход” и “Выход”, которые будут частью этого типа действия и могут быть одинаковыми (в случае тестирования) или разными (в случае сборки). Он также включает список определенных пользователем параметров, которые должны быть записаны для данного типа действия, а также список определенных пользователем ожидаемых результатов, каждый из которых представляет собой комбинацию “Функционального и Физического состояния”, ранее определенных для компонента ‘Выход’. Дополнительно, при создании конкретного действия заданного типа к нему можно прикрепить файлы любого типа, которые могут потребоваться. Все действия, выполняемые с одним компонентом, записываются в “Историю” этого компонента, что позволяет осуществлять полное отслеживание и обратную связь в производственном процессе.

### III. ПРИМЕНЕНИЕ CMIS В МЕГА-ПРОЕКТЕ NICA

Ниже приводится краткое описание использования CMIS для управления процессом сборки кремниевых трековых систем двух проектов NICA (MPD-ITS и VM@N-STIS). Следует отметить, что, хотя эти два проекта принципиально отличаются по составу и технологии сборки трековых систем, также как и применяемой технологией сборки и контроля качества их базовых элементов (модулей и супермодулей), модульность и гибкость CMIS позволили реализовать единообразно функциональные конструкционные проекты управления для каждого из них. Кроме того, в обоих случаях реализация записи данных в БД была сделана неотъемлемой частью процесса сборки, так что последующие этапы сборки выполняются с использованием клиентов CMIS с графическими интерфейсами (GUI) или интерфейсами командной строки (CLI), которые обновляют данные и в то же время отслеживают весь многошаговый процесс сборки систем. Это было сделано таким образом, что каждый новый этап сборки/тестирования зависит от правильной записи данных с предыдущего, сводя к минимуму возможность обхода системы для исключения возможности ошибок вследствие “человеческого фактора”.

#### 3.1 Применение CMIS в MPD-ITS

Внутренняя трековая система (ITS) эксперимента MPD будет построена совместными усилиями различных институтов России и Китая с распределением производства между ОИЯИ и, по крайней мере, тремя другими производственными площадками в Китае. Это включает в себя доставку компонентов детектора между производственными площадками, от отдельных микросхем до полнофункциональных стейвов (супермодулей детектора, состоящих из 14 отдельных модулей гибридных интегральных схем (ИС) каждый), а также точное тестирование и определение характеристик каждой детали на различных этапах сборки с целью получения 75%-го выхода при производстве супермодулей (“стейвов”) и 85% при производстве модулей ИС.

Внешний баррель будет состоять из 42 стейвов, вмещающих 588 ИС, что в общей сложности составит 8232 чипов МАРС (~4,3 гигапикселя), расположенных по одной линии с точностью до 5  $\mu\text{m}$ .

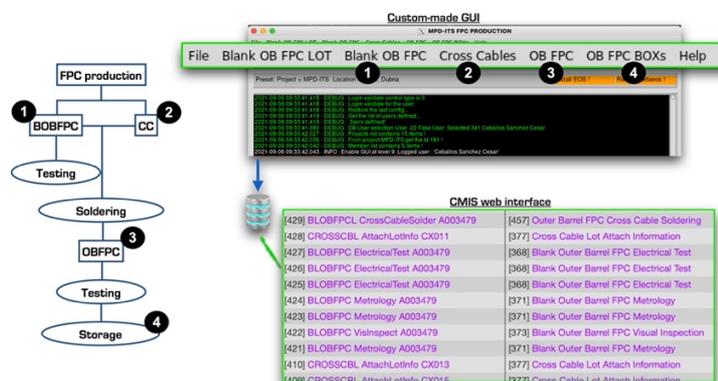


Рис. 3. (Левая панель) Рабочий процесс сборки FPC и (правая панель) соответствующий пользовательский интерфейс для отслеживания процесса и записи действий в CMIS.

Конструкция этого детектора включает в себя производство, транспортировку, тестирование и сборку компонентов различной сложности, начиная от отдельных сенсорных чипов и заканчивая большими супермодулями, требующими высокого

уровня контроля и непрерывной обратной связи. Полный рабочий процесс производства и тестирования на всех уровнях был реализован внутри CMIS, для чего в ОИЯИ было получено и адаптировано разнообразное программное обеспечение, по техническим условиям заказчика, от скриптов до полноценных графических пользовательских интерфейсов (любезно предоставленных коллаборацией ALICE) для отслеживания всего производственного процесса изготовления MPD-ITS. На рисунке 3 показан пример выполнения работ по сборке гибкой печатной платы (FPC), к которой впоследствии будут подключены сенсоры. Все начинается с электрического испытания заготовки внешнего барреля FPC (BOBFPC), к которому затем припаивается набор “поперечных” кабелей питания (CC), в результате чего получается новый внешний баррель FPC (OBFPC), который впоследствии будет протестирован и сохранен. Как можно видеть, программный клиент CMIS с графическим интерфейсом был разработан на Python, чтобы отразить рабочий процесс этого процесса сборки вплоть до хранения FPC с соответствующим созданием действий в базе данных для каждого из задействованных компонентов. Набор всех клиентов CMIS, разработанный для всего проекта конструкции детектора, обеспечивает как взаимодействие человека с базой данных, так и автоматическое и непрерывное сопряжение базы данных с тестирующим оборудованием на всех уровнях производства детектора. В приведенном примере физические действия для процесса сборки и тестирования FPC объединяются через выделенного клиента CMIS с графическим интерфейсом, показанным на рис. 3 (верхняя правая панель), откуда оператор получает соответствующую информацию для выбора доступных компонентов, которые будут использоваться на каждом этапе, в то время, как обновленные данные, сгенерированные в процессе сборки, автоматически записываются в базу данных.

### *3.2. Применение CMIS при производстве VM@N-STS*

Детектор VM@N-STS в целом будет включать 292 модуля с двусторонними микростриповыми кремниевыми детекторами, имеющими по 2048 электронных каналов в каждом. Хотя кремниевый трекер эксперимента VM@N основан на технологии, полностью отличной от MPD, он в равной степени требует точной и последовательной сборки различных структур. Рабочий процесс, осуществленный коллаборацией ALICE и использованный для MPD ITS, в данном случае не мог быть использован и адаптирован, поэтому автоматизацию процесса сборки для кремниевого трекера VM@N с помощью инструмента CMIS следовало выполнять с нуля. Первоначально процесс сборки был в основном ручным (за исключением некоторых этапов, связанных с электрическим тестированием компонентов) и требовал от технических специалистов выполнения следующих действий: точно выполнять несколько этапов сборки и записывать промежуточные результаты с помощью специальных документов журнала сборки, что привело к напряженному и подверженному ошибкам процессу. Поэтому первым шагом к внедрению конструкционной информационной системы управления производством стала оценка существующего процесса сборки с целью его систематизации, понимания существующих проблем процесса и формулирования целей улучшения, таких как организация данных сборки (промежуточных и окончательных) в структурированной базе данных, к которой можно легко получить доступ и проанализировать, минимизировать риск человеческих ошибок, ускорить процесс и т.д.

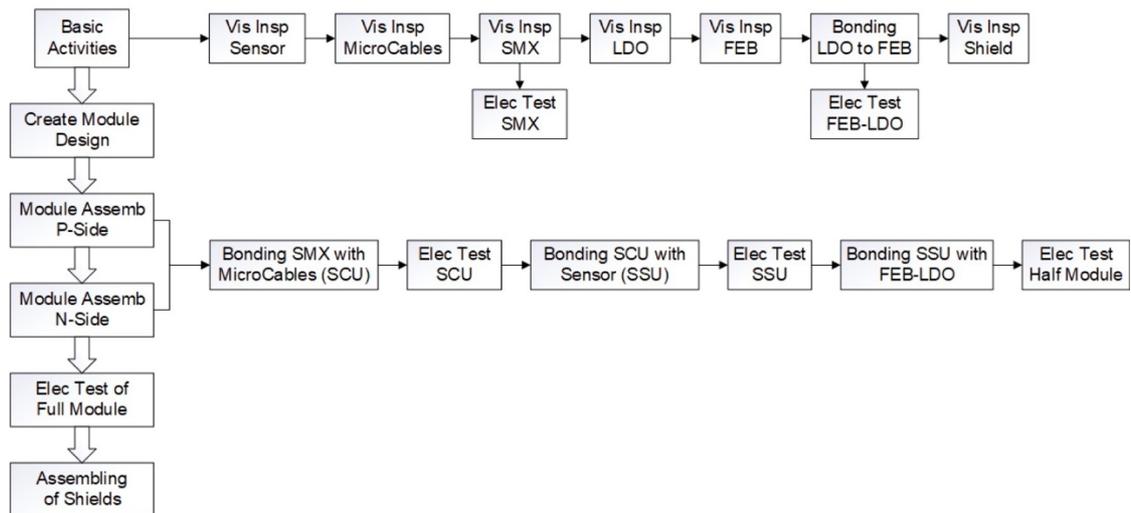


Рис. 4. Рабочий процесс сборки модуля детектора BM@N-STS.

Схема рабочего процесса сборки модулей представлена на рис. 4. Следующим шагом было создание модели базы данных в CMIS, содержащей минимально необходимые типы компонентов и типы действий, которые можно использовать для организации каждого шага процесса и избежания повторных объектов. На этом этапе также началось создание оптимизированного клиентского графического интерфейса для простого и безопасного взаимодействия с базой данных. Первая созданная модель базы данных была итеративно доработана во время работы над реализацией реальных этапов сборки и тестированием до тех пор, пока она полностью не удовлетворяла требованиям операторов. Для взаимодействия с БД программные клиенты также неоднократно адаптировались в соответствии с изменениями модели БД. Результатом завершения этого процесса стало хранение в CMIS ЛИТ ОИЯИ всей информации о процессе сборки и тестирования нескольких /модулей для эксперимента BM@N.

Для разработки пользовательского CMIS использовались языки Python, Labview и C++ Большинство графических интерфейсов пользователей были разработаны с использованием Labview.

Веб-приложение CMIS предоставляет доступ к своим API со следующими протоколами: SOAP 1.1, SOAP 1.2, HTTP GET и HTTP POST. Для поддержки пользовательских интерфейсов CMIS были разработаны соответствующие библиотеки на каждом из трех языков программирования. Структура реализации "Действия" программного клиента CMIS изображена на рис. 4.

Аппаратные интерфейсы пользователей были либо были встроены в программного клиента и использовали аппаратные протоколы связи напрямую, либо были реализованы через синхронизированный обмен файлами с соответствующими независимыми приложениями управления оборудованием, использующими общую файловую систему. В частности, при широко используемых визуальных проверках компонентов, выполняемых после различных операций сборки, файлы изображений высокого разрешения создаются с помощью микроскопа Carl Zeiss приложением ZEN в формате CZI [7]. Было разработано дополнительное приложение для преобразования данных из CZI-файлов в стандартные графические форматы для конкретной конфигурации микроскопа, используются MS Visual C++ и libCZI с открытым доступом [8]. Преобразованные файлы загружаются в CMIS соответствующими программными клиентами.

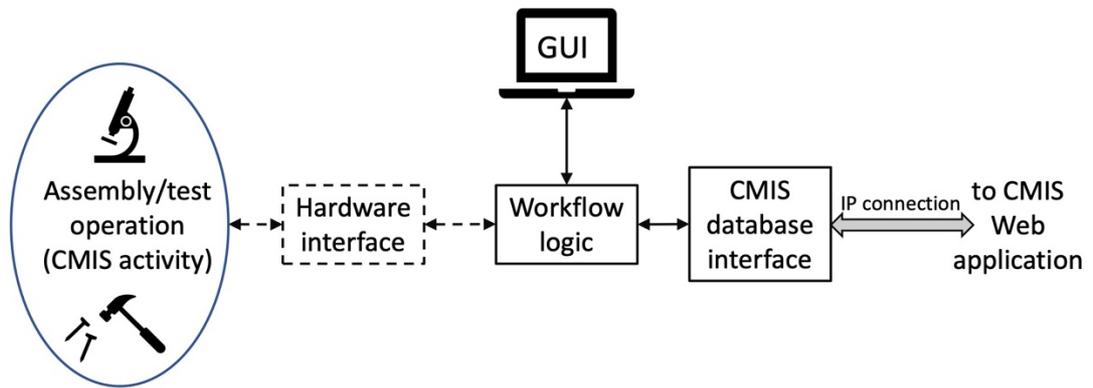


Рис. 5. Структура клиентского программного обеспечения CMIS.

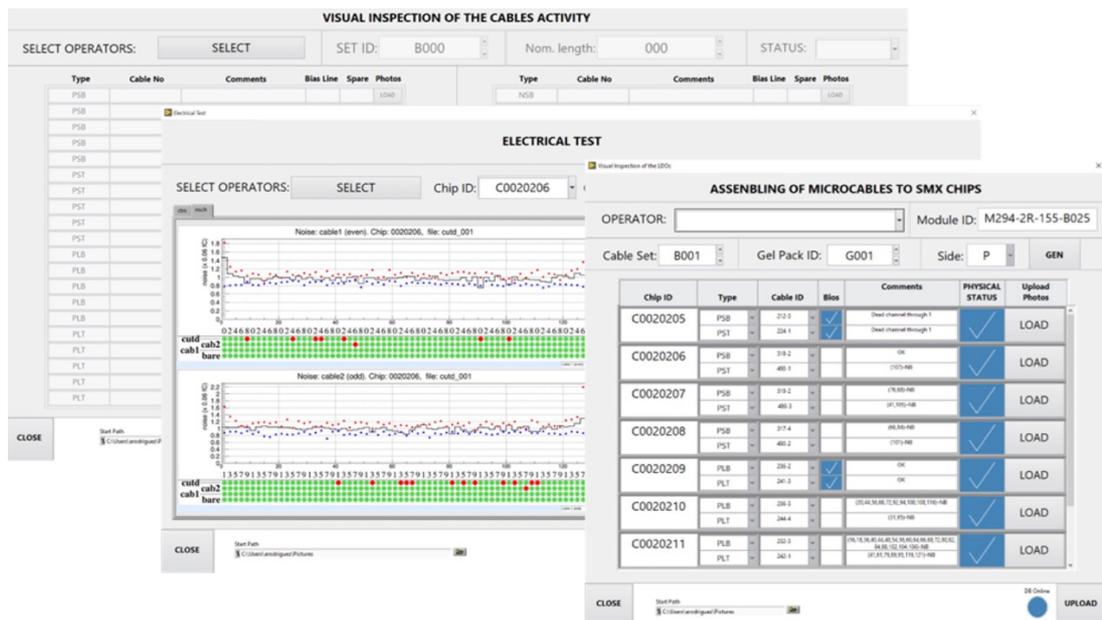


Рис. 6. Пример графического интерфейса на основе LabVIEW для регистрации операций сборки модулей VM@N-STС в CMIS

Образец некоторых специально разработанных пользовательских интерфейсов для взаимодействия с CMIS через специальные API показаны на рис. 6. Как можно видеть, это также отражает различные этапы процесса сборки. В дополнение к обеспечению безопасного взаимодействия с базой данных, эти графические интерфейсы были разработаны для руководства оператором в процессе сборки, принимая во внимание, что на разных этапах сборки параллельно будут выполняться различные операции сборки. Как и в случае с проектом MPD-ITS, было предусмотрено, что данные будут записываться/считываться либо вручную операторами или непосредственно программным обеспечением, выполняющим тестирование компонентов. Например, электрические испытания Rого pin проводятся на различных этапах процесса сборки с использованием специального оборудования собственного производства C++ standalone application Bonding Test [6], который автоматически взаимодействует с базой данных.

В общей сложности для VM@N-STС были разработаны 21 программных клиента CMIS, шесть из них для загрузки результатов визуального контроля компонентов, еще шесть для записи различных этапов сборки, два для проведения электрических испытаний и загрузки результатов, один для загрузки результатов механических испытаний проводного соединения, три для создания отчетов о состоянии сборки для конкретных модулей, два для организации рабочего процесса и

одно приложение с графическим интерфейсом главного меню для обеспечения легкого доступа в одном месте ко всем программным клиентам.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развертывание конструкционной информационной системы управления производством в инфраструктуре ОИЯИ является нововведением для этого института, поскольку ранее подобная система не использовалась. Несмотря на это, данная система была настроена таким образом, чтобы обеспечивать тот же уровень функциональности, что и аналогичная система в ЦЕРН. CMIS особенно полезна для контроля и непрерывного отслеживания производства сложных составных объектов, таких как подсистемы детекторов, используемые в экспериментах на установке NICA в ЛФВЭ. Это дает возможность создавать полностью настраиваемые интерфейсы с использованием любого основного языка программирования для лучшей адаптации к структуре и требованиям любого проекта подобного типа. В настоящее время данная система используется двумя проектами NICA (MPD-ITS и VM@N-STs), но поскольку централизованно размещена в ЛИТ ОИЯИ, то может быть использована любым другим проектом.

#### ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ

Мы хотели бы поблагодарить доктора Лучиано Музу и команду ALICE-ITS ЦЕРН за их решительную поддержку в передаче технологических разработок CMIS в ОИЯИ. Помимо этого, мы хотели бы выразить признательность руководству ЛФВЭ и ЛИТ ОИЯИ за их поддержку в развертывании и адаптации системы к ИТ-платформе ОИЯИ.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что не имеют конфликта интересов.

#### Литература

- [1] MPD Collab., *Eur. Phys. J. A* **58**, 140 (2022).
- [2] VM@N Collab., *Nucl. Phys. A* **982**, 967-970 (2019).
- [3] Yu. A. Murin and C. Ceballos. *Phys. Part. Nucl.* **52**, 742 (2021).
- [4] A. Sheremetiev, D. Dementyev, V. Elsha, A. Kolozhvari, and Yu. Morin, *Phys. Part. Nucl.* **53**, 377 (2022).
- [5] G. Added and B. Chan, D. Duellmann, X. Espinal, A. Fiorot, J. Iven, L. Janyst, M. Lamanna, L. Mascetti, J. M. Pereira Rocha, A. J. Peters, and E. A. Sindrilaru, *J. Phys.: Conf. Ser.* **608**, 012009, (2015).
- [6] N. Sukhov et al., "Development of bonding quality control for assembly of the silicon microstrip sensor modules," CBM Progress Report (Darmstadt, 2018).
- [7] Software Guide. ZEN 2 (blue edition). <http://www.zeiss.com/microscopy>.
- [8] <https://github.com/zeiss-microscopy/libCZI>.