

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ**

УДК 681.518

**ОБНОВЛЕНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЧ-СИСТЕМЫ
ВЭПП-2000¹**

© 2024 г. Э. А. Эминов^{a,b,*}, А. И. Сенченко^{a,**}, Ю. А. Роговский^{a,b},
А. П. Лысенко^a

^a *Институт ядерной физики имени Г.И. Будкера* Сибирского отделения
Российской академии наук

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11

^b *Новосибирский государственный университет*

Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

**e-mail: e.a.eminov@inp.nsk.su*

***e-mail: a.i.senchenko@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 11.12.2022 г.

После доработки 05.03.2024 г.

Принята к публикации 01.04.2024 г.

ВЧ-система ВЭПП-2000 успешно работает с момента ввода в эксплуатацию ускорительного комплекса в 2009 году. За это время в систему было внесено несколько доработок. Последнее обновление показало, что некоторые компоненты программного обеспечения не поддерживаются в актуальном состоянии, что в будущем может потребовать дополнительных усилий по актуализации программного обеспечения со стороны команды разработчиков систем управления ВЭПП-2000. В качестве основного решения рассматривалась разработка с нуля с использованием современных программных технологий. Несколько лет назад было принято решение о переводе

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

программного обеспечения ВЧ-системы на Tango Controls. В статье описывается архитектура новой программной системы и текущий статус.

~~Ключевые слова: ВЭПП-2000, ВЧ-система, автоматизация, Tango Controls~~

1. ВВЕДЕНИЕ

В ИЯФ СО РАН на ускорительном комплексе ВЭПП-2000 проводятся эксперименты по исследованию процессов электрон-позитронной аннигиляции в широком диапазоне энергий: $2E = 0.3\text{--}2$ ГэВ в системе центра масс [1]. Комплекс ВЭПП-2000 включает в себя бустерный синхротрон БЭП и электрон-позитронный коллайдер ВЭПП-2000. Каждое из колец оборудовано высокочастотной системой (ВЧ-системой) ускорения электронов и позитронов, что позволяет осуществлять ускорение пучка вплоть до 1 ГэВ [2, 3]. Используемые системы ускорения пучков разработаны в ИЯФ СО РАН [2–7].

Во время запуска комплекса ВЭПП-2000 было разработано и внедрено инженерное программное обеспечение для управления ВЧ-системами, которое позволяет управлять в ручном режиме, т.е. когда оператор большинство манипуляций осуществляет вручную или в полуавтоматическом режиме. Используемые на момент запуска комплекса ВЭПП-2000 программные библиотеки и компоненты за последние 15 лет устарели и перестали получать регулярную поддержку и обновления. Кроме этого, за многолетний опыт работы коллектива операторов комплекса были выработаны и прошли проверку временем стандартные процедуры и последовательности действий, требующие внедрения в программный комплекс для управления ВЧ-системами. В частности, автоматизированное включение ВЧ-систем, проведение дегазации вакуумных камер колец БЭП и ВЭПП-2000, изменение напряжения резонатора по произвольно заданной кривой при переходах между режимами работы комплекса.

Модификация кодовой базы существующего программного комплекса для управления ВЧ-системами видится неэффективной ввиду отсутствия поддержки программных библиотек, используемых в его работе, со стороны современных версий операционных систем семейства Linux, а также используемого подхода единого, монолитного приложения, где совмещаются логика работы и представление данных.

Новый программный комплекс должен быть создан с применением современной программной базы и модульного подхода на основе распределенной системы управления Tango Controls.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ

Ускорительный комплекс имеет 4 режима работы: накопление электронов в БЭП, ускорение накопленных электронов с последующим перепуском в кольцо ВЭПП-2000, накопление позитронов в БЭП, ускорение накопленных позитронов с последующим перепуском в кольцо ВЭПП-2000. Разрабатываемое ПО должно поддерживать хранение и модификацию параметров работы ВЧ-системы для каждого из режимов, а также настройку типа перехода между режимами накопления и ускорения: линейный или по заранее заданной кривой (waveform).

При переходах между режимами работы комплекса от ВЧ-системы БЭП требуется:

1. Обеспечение согласованности частоты напряжения в резонаторе БЭП с частотой напряжения в накопителе-охладителе инжекционного комплекса в режимах накопления сгустков для обеспечения возможности захвата частиц в БЭП.

2. Обеспечение согласования частоты и фазы ускоряющего напряжения в резонаторе БЭП с частотой и фазой ускоряющего напряжения в коллайдере ВЭПП-2000 для осуществления перепуска частиц из кольца БЭП в кольцо ВЭПП-2000.

Встречные пучки в коллайдере ВЭПП-2000 сталкиваются на протяжении всего цикла эксперимента при фиксированной энергии. Поэтому при переходах между режимами работы комплекса мощность и частота ВЧ-системы кольца ВЭПП-2000 остаются неизменными.

Разрабатываемое программное обеспечение должно поддерживать следующие типы функционирования ускорительного комплекса ВЭПП-2000.

- Коллайдер – основной тип функционирования, при котором проводятся эксперименты со встречными пучками.

- Дегазация БЭП – десорбция молекул остаточного газа со стенок вакуумной камеры кольца БЭП за счет синхротронного излучения, испускаемого накопленным пучком.

- Дегазация ВЭПП-2000 – десорбция молекул остаточного газа со стенок вакуумной камеры кольца ВЭПП-2000 за счет синхротронного излучения, испускаемого накопленным пучком.

Также разрабатываемое ПО должно поддерживать автоматизированное включение и выключение ВЧ-систем колец БЭП и ВЭПП-2000. Это необходимо для увеличения срока службы генераторных ламп в каскадах усилителей мощности. Срок службы генераторных ламп можно увеличить благодаря медленному поднятию их мощности при включении, что

дежурному оператору сделать ручную достаточно затруднительно. Алгоритм включения состоит из следующих шагов:

- задать ограничение по току фидера;
- с заранее заданной скоростью повысить напряжение на резонаторе до напряжения прогрева;
- зафиксировать напряжение прогрева определенное время;
- перейти с напряжения прогрева на рабочее напряжение.

3. СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Управление ВЧ-системами БЭП и ВЭПП-2000 осуществляется управляющей программой, исполняющейся на сервере, связанной с управляемой электроникой. Схема взаимодействия сервера с управляемой электроникой представлена на рис. 1. Желтым цветом выделены устройства, с которыми управляющей программе требуется взаимодействовать для управления параметрами ВЧ-системы. Взаимодействие с этими устройствами осуществляется посредством других устройств, выделенных зеленым цветом. Серым цветом обозначены устройства, с которыми управляющая программа непосредственно не взаимодействует.

Рис. 1. Схема управления ВЧ-системами от ЭВМ.

Системы управления БЭП и ВЭПП-2000 разрабатывались с учетом принципа иерархичности, в котором максимально использован модульный подход, предлагаемый программной платформой Tango Controls. Структура ПО для управления ВЧ-системой БЭП и ВЭПП-2000 схематично представлена на рис. 2.

Рис. 2. Структура программного обеспечения ВЧ-системы управления БЭП и ВЭПП-2000.

Согласно модульному подходу, предлагаемого платформой Tango Controls, для каждого управляемого устройства был разработан и протестирован собственный Tango Device Class. В соответствии с принципом иерархичности непосредственная работа с устройствами, подключенными по общей шине CANBus, а именно CANADC40M, CANDAC16M, CAN-DDS, SLIO24, была вынесена в отдельные библиотеки (драйверы).

Каждая библиотека отвечает за правильное формирование управляющих пакетов по CANBus для команд своего управляемого устройства. Программный интерфейс (API) библиотек представляет собой набор функций, соответствующих поддерживаемым командам

управляемого устройства. В ИЯФ утвержден собственный протокол обмена данными по CANBus. Для упрощения работы с этим протоколом ранее была написана библиотека `can-wrapper` на языке C++, поддерживающая работу с драйверами `SocketCAN` и `Can4linux`. Библиотеки для работы с управляемыми ВЧ-устройствами также были написаны на языке C++ и основаны на библиотеке `can-wrapper`.

Каждый `Tango Device`, представленный на рис. 2, является экземпляром (`instance`) соответствующего ему `Tango Device Class`. Поскольку свойства (`properties`) конкретного экземпляра устройства хранятся в конфигурационной базе данных `Tango`, появляется возможность для одного типа устройства, применяющегося в ВЧ-системе БЭП и ВЭПП-2000 (например, модулятора), создать один `Tango Device Class`, а все различия, которые есть между ними, задавать как параметры запуска конкретного экземпляра через свойства. Все `Tango Device Class` для работы с управляемыми устройствами были написаны на языке C++ с использованием генератора шаблонного кода `Pogo`. Схема взаимодействия `Tango Device` с ВЧ-системами управления представлена на рис. 3.

Рис. 3. Схема взаимодействия `Tango Device` с ВЧ-системами управления.

`Device Class` для модулятора позволяет задавать напряжение резонатора и ограничение по току фидера; отображает текущие значения тока фидера, напряжения резонатора, фазы между током и напряжением, положения сервоприводов; выводит сигнал готовности (блокировки отсутствуют) и сигнал состояния модулятора (включен или выключен); позволяет осуществлять процедуру плавного включения ВЧ-системы по команде от пользователя. Запись значений тока фидера и напряжения резонатора осуществляется через `Tango Device` для `CANDAC16M`, все остальные операции – через `Tango Device` для `CANADC40M`. Для минимизации нагрузки на сеть используется модель издатель-подписчик вместо периодического опроса значений.

`Device Class` для блока сведения частот позволяет задавать направление сведения частоты, осуществлять включение и выключение блока, а также показывать его текущее состояние. Он работает через `Tango Device` для `CANADC40M`.

`Device Class` для генератора импульсов N-сепаратрисы позволяет задавать и отображать текущие значения номера сепаратрисы, а также задержки внутри сепаратрисы.

`Device Class` для частотного детектора позволяет задавать частоту возбудителя БЭП.

Device Class для CAN-DDS позволяет задавать частоту возбудителя ВЭПП-2000, а также шаг и скорость перестройки частоты.

3.1 Управляющая программа

Для управления всеми Tango Device для ВЧ-системы БЭП и ВЭПП-2000 (кроме CANADC40M и CANDAC16M) используется одна управляющая программа. Она состоит из хранителей параметров режимов работы комплекса ВЭПП-2000 (Regime Keeper) и контроллера, который осуществляет переходы между режимами.

Хранитель параметров представляет собой Tango Device, в котором хранятся параметры конкретного режима работы для конкретного кольца, например, параметры ВЧ-системы БЭП для режима накопления электронов. Всего используется 5 экземпляров хранителей – 4 хранителя используются для работы с каждым из режимов в кольце БЭП и 1 хранитель – для кольца ВЭПП-2000. Для ВЭПП-2000 требуется один хранитель, потому что параметры ВЧ-системы ВЭПП-2000 не меняются при переходах между режимами работы комплекса. Хранитель параметров конкретного режима для кольца БЭП хранит в себе напряжение резонатора, ограничение по току фидера, ВЧ-частоту, номер и задержку внутри сепаратрисы. Также в режимах накопления 1 и 3 хранятся параметры для линейного перехода и перехода по кривой, а именно время перехода и вэйвформа соответственно. Хранитель параметров для кольца ВЭПП-2000 хранит в себе: напряжение резонатора, ограничение по току фидера, ВЧ-частоту, номер и задержку внутри сепаратрисы отдельно для инъекции электронов и отдельно для инъекции позитронов. Все параметры, кроме времени перехода и вэйвформы, перед сохранением проходят проверку на корректность. Время перехода и вэйвформа сохраняются в хранителе без проверки на корректность, но эта проверка в дальнейшем осуществляется в контроллере. Вэйвформа задается как список, состоящий из точек с абсолютным значением напряжения и задержек по времени в каждой точке, необходимых для того, чтобы ВЧ-система успела выставить требуемое напряжение в резонаторе.

Контроллер решает несколько задач.

1. Агрегирует в себе данные со всех хранителей режимов по модели издатель-подписчик.
2. Проверяет корректность сохраненных времени перехода и вэйвформы. Для проверки корректности времени перехода вычисляется скорость перехода как

$$\frac{U_{\text{конечное}} - U_{\text{начальное}}}{T_{\text{перехода}}}$$

и сравнивается с максимально допустимой скоростью, заданной в свойствах. Вэйвформа проверяется по нескольким критериям:

- каждая точка напряжения лежит в допустимом диапазоне;
- задержка по времени в каждой точке больше минимального времени, с которым CANDAC16M может выставлять новое значение на линию;
- разница в значениях напряжений между соседними точками вэйвформы не превышает величины мощности, которую ВЧ-система сможет добавить за заданный промежуток времени.

В случае, если параметры требуемого типа перехода окажутся некорректными, то переход будет осуществляться по линейному закону со стандартной скоростью перехода, которая хранится в виде свойства .

3. Осуществляет переходы между режимами накопления и ускорения частиц как по требованию пользователя, так и от сигнала через программную шину VCAS собственной разработки [8], использующуюся для обмена данными между программами системы управления комплекса ВЭПП-2000.

4. Позволяет пользователю переключаться между режимами работы со встречными пучками (режим коллайдера), осуществляет дегазацию вакуумной камеры кольца БЭП и дегазацию вакуумной камеры кольца ВЭПП-2000.

5. Отправляет в программную шину VCAS для каждого из колец текущие значения параметров напряжения резонатора, тока фидера, фазы между током фидера и напряжением на резонаторе, номера и задержки сепаратрисы, заданной ВЧ-частоты поля, а также направление сведения частоты.

Device Class для контроллера и хранителя режимов были написаны на языке Python с использованием библиотеки PyTango.

На рис. 4 представлен интерфейс прототипа приложения оператора. Окно приложения разбито на 4 блока: блок режима работы комплекса и типов переходов, блок переключения и индикации текущего режима, блок управления ВЧ-системой БЭП, блок управления ВЧ-кольца ВЭПП-2000. Прототип написан на языке Python с использованием фреймворка Taurus, основанного на библиотеке PyQt5.

Рис. 4. Интерфейс прототипа приложения оператора.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент

- разработана архитектура комплекса программного обеспечения, базирующаяся на программной платформе Tango Controls, которая предлагает максимально использовать модульность и принцип иерархичности для разрабатываемых на ее основе систем;
 - созданы и протестированы библиотеки для работы с управляемыми устройствами по CANBus: CANADC40M, CANDAC16M, SLIO24, CAN-DDS;
 - созданы и протестированы Tango Device Class для каждого управляемого устройства: CANADC40M, CANDAC16M, SLIO24, CAN-DDS, модулятор, блок сведения частот, частотный детектор, генератор импульсов N-сепаратрисы;
 - создана управляющая программа, которая осуществляет согласованную работу отдельных компонент ПО в автоматическом и полуавтоматическом режимах;
 - создан прототип операторского приложения, которое позволяет оператору настраивать как отдельные параметры каждого режима, так и параметры переходов между режимами.
- Тестирование управляющей программы и доработка операторского приложения для комплекса ВЭПП-2000 планируется осуществить в 2023–2024 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Shatunov Yu.M., Evstigneev A.V., Ganyushin D.I. et al.* // Proc. EPAC. Vienna. 2000.
2. *Biryuchevsky Yu.A., Gorniker E.I., Kendjebulatov E.K. et al.* // Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. Kharkiv. 2012.
3. *Volkov V.N., Bushuev A.A., Kendjebulatov E.K. et al.* // Proc. EPAC 2000. Vienna. 2000.
4. *Volkov V.N., Bushuev A.A., Fomin N. et al.* // Proc. APAC'01. Beijing. 2001.
5. *Volkov V.N., Bushuev A.A., Kendjebulatov E.K. et al.* // Proc. EPAC'04. Lucerne. 2004.
6. *Arbuzov V.S., Biryuchevsky Yu.A., Bushuev A.A. et al.* // Proc. RuPAC. Dubna. 2004.
7. *Arbuzov V.S., Biryuchevsky Yu.A., Bushuev A.A. et al.* // Proc. Ru-PAC. Novosibirsk. 2006.
8. *Senchenko A.I., Berkaev D.E., Kasaev A.S. et al.* // Proc. PCaPAC 2012. Kolkata. 2012.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Схема управления ВЧ-системами от ЭВМ.

Рис. 2. Структура программного обеспечения ВЧ-системы управления БЭП и ВЭПП-2000.

Рис. 3. Схема взаимодействия Tango Device с ВЧ-системами управления.

Рис. 4. Интерфейс прототипа приложения оператора.

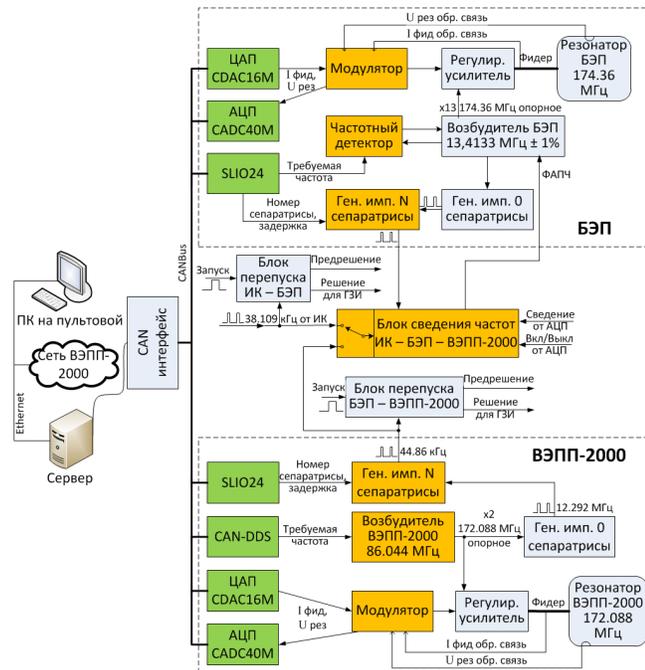


Рис. 1.

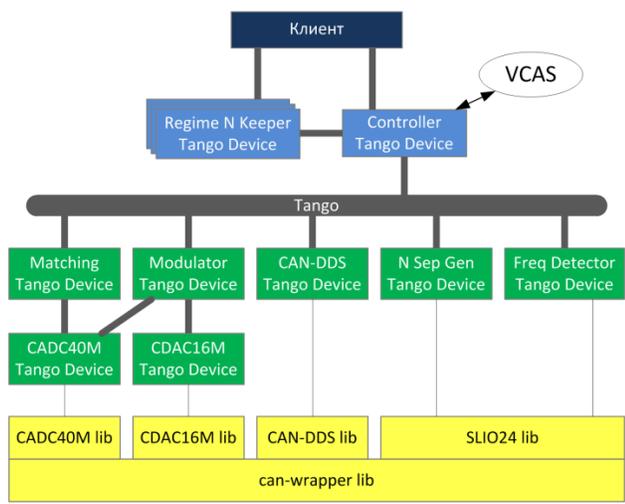


Рис. 2.

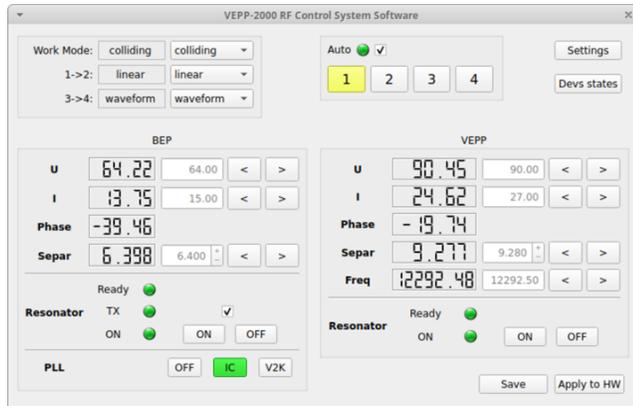


Рис. 4.

Для связи с авторами:

Эминов Эмиль Азер оглы
E-mail: e.a.eminov@inp.nsk.su
Сенченко Александр Игоревич
E-mail: a.i.senchenko@inp.nsk.su

~~Для переводчика:~~

~~Upgrade of software of VEPP-2000 RF Control system~~

~~E. A. Eminov ^{a,b,*}, A. I. Senchenko ^{a,**}, Y. A. Rogovsky ^{a,b}, A. P. Lysenko ^a~~

~~^a Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630090 Russia~~

~~^b Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia~~

~~*e-mail: e.a.eminov@inp.nsk.su~~

~~**e-mail: a.i.senchenko@inp.nsk.su~~

~~**Abstract** VEPP-2000 RF Control system has been successfully operated since commission of accelerator facility in 2009. During this period, several updates were made to the system. Last update has shown that some elements of the software stack are not actively maintained, which may require additional support efforts from control system team. Development from scratch using modern software technologies was considered as the main solution. A few years ago, it was decided to migrate software of the RF Control system to Tango Controls. The paper describes architecture of new system and current status.~~

~~**Keywords:** VEPP-2000, RF-system, automation, Tango Controls~~