

**ХХV межвузовская молодежная научная школа-конференция имени Б.С. Ишханова:**  
**Концентрированные потоки энергии в космической технике,**  
**электронике, экологии и медицине**  
**Секция «Радиационные технологии. Синхротронные, нейтронные и ядерно-физические**  
**методы диагностики и модификации материалов»**

**Стенд для диагностики и калибровки тракта СВЧ низкого уровня мощности**  
**односекционного линейного ускорителя электронов**

В. К. Басати,<sup>1\*</sup> А. Н. Ермаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скobelцына  
Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 15.04.2025; подписана в печать 17.04.2025)

При проведении пуско-наладочных работ систем СВЧ питания электронных ускорителей, разрабатываемых НИИЯФ МГУ и построенных на основе клистронов КИУ-168, КИУ-271 возникает необходимость в проверке и калибровке тракта СВЧ низкого уровня мощности, который формирует входной сигнал клистрона в форме прямоугольного импульса регулируемой скважности, заполненного высокочастотными колебаниями. Задача калибровки тракта СВЧ низкого уровня мощности заключается в получении зависимости выходной импульсной мощности СВЧ от управляющего напряжения  $p$ - $I$ - $n$  аттенюатора в виде графика и таблицы. Для этого был построен стенд диагностики и калибровки. Затем была проведена автоматизация процесса калибровки с помощью программного обеспечения, разработанного на основе Matlab.

PACS: 29.20.Ej

УДК: 621.384.6, 621.3.072.

Ключевые слова: линейные ускорители электронов, системы СВЧ.

## ВВЕДЕНИЕ

НИИЯФ МГУ разрабатывает прототипы линейных ускорителей для медицины, дефектоскопии, стерилизации и различных технологических процессов в промышленности [1, 2]. Целью этой статьи является описание стенда калибровки СВЧ тракта низкого уровня мощности импульсных линейных ускорителей электронов, работающих в составе инспекционно-досмотровых комплексов (ИДК) [3]. Принцип действия комплексов на основе ускорителей основан на сканировании контролируемых объектов узким пучком тормозного излучения, направленного на детекторную линейку, с регистрацией полученного теневого изображения [4]. Использование клистрона в качестве источника СВЧ энергии для возбуждения электромагнитного поля в ускоряющей структуре позволяет производить переключение значения верхней границы спектра тормозного излучения от импульса к импульсу [5].

## 1. ТРАКТ СВЧ НИЗКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ

Система СВЧ питания ускорителя построена на базе многолучевого импульсного клистрона [6]. Клистрон по принципу работы является усилителем и требует наличия входного сигнала для функционирования. По форме сигнал представляет собой прямоугольный импульс мощности, заполненный высокочастотными колебаниями. Такой сигнал вырабатывает тракт СВЧ низкого уровня мощности, блок-схема которого представлена на рис. 1.

Высокостабильный синтезатор HMC833 (2) тракта низкого уровня мощности СВЧ, управляемый через интерфейс SPI [7], формирует сигнал мощностью 1 мВт на частоте 2856 МГц или 0,25 мВт на частоте 5712 МГц. Предварительный (3) и оконечный (6) усилители позволяют обеспечить уровень сигнала возбуждения клистрона до 60 Вт импульсной мощности.  $p$ - $I$ - $n$  аттенюатор (4) позволяет изменять выходной сигнал тракта низкого уровня мощности СВЧ в диапазоне 30 дБ. Ферритовые вентили (5) служат для развязывания по отраженной волне выходов усилителей. Коеффициент ослабления ферритового вентиля в прямом направлении — 0,1 дБ, в обратном — 20 дБ. Управляющее напряжение  $p$ - $I$ - $n$  аттенюатора поступает с СВЧ контроллера (1, b).

\* dzampaeva.vk19@physics.msu.ru

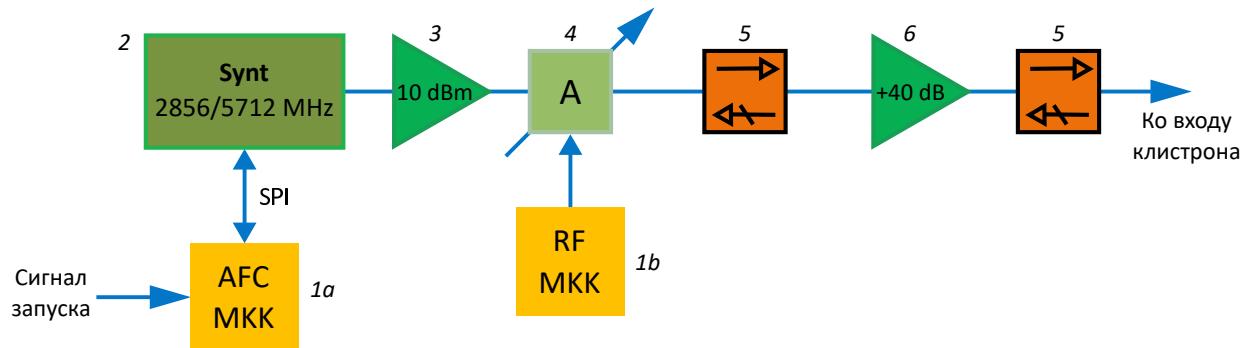


Рис. 1. Схема тракта СВЧ низкого уровня мощности: 1,а — контроллер системы АПЧГ, 1,б — контроллер СВЧ панели, 2 — синтезатор HMC833, 3 — предварительный усилитель, 4 — *p*-I-*n* аттенюатор (0–30 дБ), 5 — ферритовый вентиль, 6 — оконечный импульсный усилитель

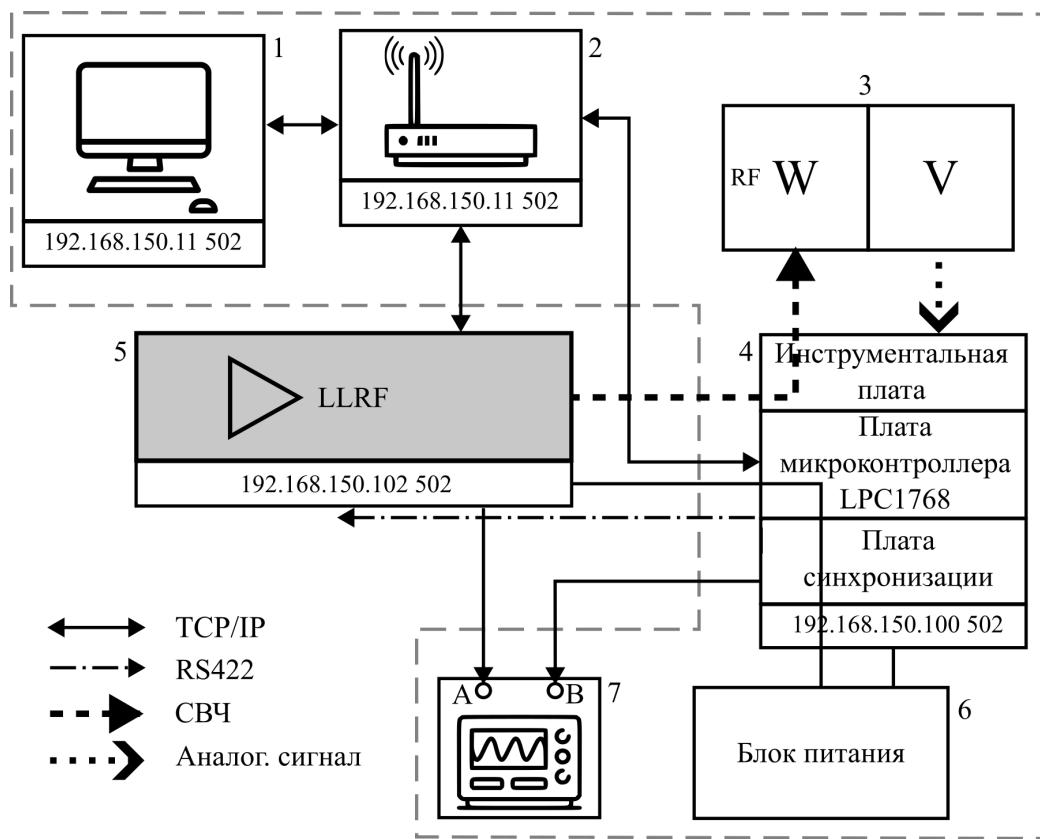


Рис. 2. Блок-схема стенда калибровки: 1 — автоматизированное рабочее место оператора; 2 — маршрутизатор; 3 — ваттметр Я2М-66 с калориметрическим преобразователем; 4 — контроллер измерителя средней выходной мощности калибруемого тракта СВЧ; 5 — калируемый тракт СВЧ низкого уровня мощности; 6 — блок питания; 7 — осциллограф

## 2. СТЕНД КАЛИБРОВКИ ТРАКТА СВЧ НИЗКОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ

Переменный аттенюатор (4) осуществляет варьирование выходной СВЧ мощности. Диапазон коэффициента ослабления составляет  $-40$  дБ при изменении управляющего напряжения от 0 до 5 В. При проведении пуско-наладочных работ требуется зависимость импульсной мощности на выходе тракта от управля-

ющего напряжения аттенюатора, называемой калибровочной кривой. Задача калибровки состоит в получении этой зависимости в виде таблицы и графика. Для этого был сооружен стенд калибровки и диагностики, схема которого представлена на рис. 2.

Стенд включает в себя автоматизированное рабочее место оператора (АРМ) (1), которое представляет собой персональный компьютер установленными ПО Matlab Runtime, программу управления стен-

да GUI\_RF\_Measurements и Microsoft Excel (по возможности). Устройства стенда объединены в локальную сеть посредством маршрутизатора (2). Основным средством измерения стенда является ваттметр поглощаемой мощности Я2М-66 с калориметрическим преобразователем (3). Сигнал постоянного напряжения, величина которого пропорциональна измеряемой ваттметром (3) средней мощности, поступает на аналоговый вход контроллера стенда (4). Контроллер стенда (4) содержит регулируемый по длительности и частоте следования прямоугольных импульсов задающий генератор для синхронизации работы тракта СВЧ. Канал А осциллографа (7) подключается к выходу калибруемого тракта СВЧ (5) для контроля длительности огибающей выходного сигнала. Канал В подключен к плате синхронизации (4) для контроля сигнала запуска. Лабораторный блок питания (6) обеспечивает питание контроллера стенда и калибруемого тракта СВЧ постоянным напряжением +24 В.

### 3. КОНТРОЛЛЕР СТЕНДА

На основе предыдущих проектов была построен контроллер стенда (4), далее именуемый «калибратор», который связывает все компоненты в одну систему. Состоит из инструментальной платы, платы синхронизации и платы микроконтроллера LPC1768. Внешний вид калибратора представлен на рис. 3.

Инструментальная плата калибратора (4) включает в себя прецизионный усилитель постоянного тока, предназначенный для согласования измерительного выхода ваттметра (3) и входа АЦП платы микроконтроллера.

Плата синхронизации формирует импульсы запуска в виде двух дифференциальных сигналов напряжения — сигнала энергии и сигнала триггера — из импульсов ШИМ, приходящих с платы микроконтроллера. Сигнал запуска поступает на калибруемый тракт СВЧ по интерфейсу RS422 [8]. Также плата содержит коаксиальный разъем для передачи сигнала триггера на осциллограф (7).

Плата микроконтроллера LPC1768 содержит модуль интерфейса Ethernet для обмена данными с АРМ, порт для тестирования и прошивки, а также осуществляет разводку питания на две соседние платы. Микроконтроллер содержит систему регистров, управляющих параметрами импульса запуска: частотой повторения, длительностью импульсов, уровнем энергии и др.

### 4. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТЕНДА

Приложение для стенда калибровки GUI\_RF\_Measurements построено в среде Matlab [9] и работает с помощью его сервиса Matlab Runtime, который поддерживает работу отдельных приложений и доступен для Windows и Linux. Передача данных



Рис. 3. 3D модель контроллера стенда калибровки (а) и его внешний вид после изготовления (б)

между компьютером и контроллером стенда происходит посредством протокола ModBus TCP/IP [10].

Основная часть программного кода — функции управления регистрами протокола ModBus TCP/IP. При вызове функции 16-ти битного чтения регистра вывода создается сообщение по формату, определенному протоколом, и отправляется на ведомое устройство в шестнадцатиричном виде. При появлении данных в приемном буфере считывается ответ. В результате обработки ответа функция выдает содержащееся в регистре значение. В случае ошибки передачи осуществляется попытка повторного подключения.

Программа содержит несколько модулей, которые оформлены в виде вкладок: Connection (установка и разрыв TCP/IP-соединения), Wattmeter (калибровка значений ваттметра), PIN (тестовая запись управляющего напряжения аттенюатора), Samples (запуск процесса калибровки), Parameters (параметры перевода мощности и соединения с контроллером тракта). Интерфейс вкладки Connection представлен на рис. 4.

В цикле алгоритма калибровки калибратор задает управляющее напряжение  $p$ - $I$ - $n$  аттенюатора тракта СВЧ  $U$  и передает значения напряжения выходного

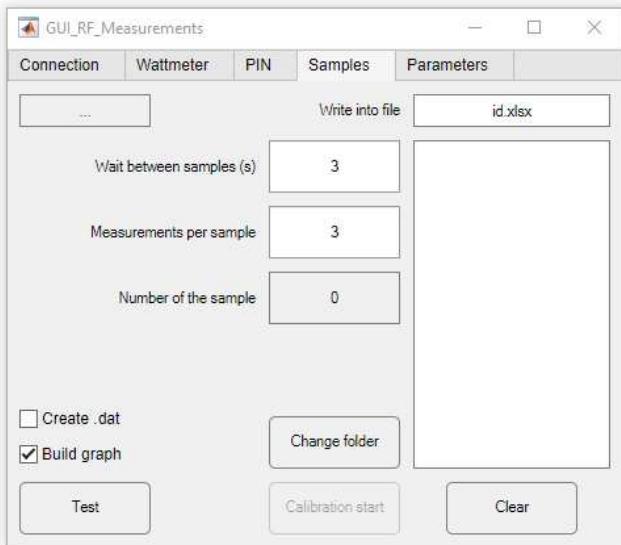


Рис. 4. Интерфейс вкладки Connection программы GUI\_RF\_Measurements

усилителя ваттметра  $U_c$  на АРМ (1). Выходная импульсная мощность  $P_{pulsed}$  калибруемого тракта СВЧ связана с  $U_c$  выражением (1):

$$P_{pulsed}(\text{мВт}) = \frac{b_c + a_c \cdot U_c(\text{мВ})}{\tau_{RF} \cdot f_{rep}}, \quad (1)$$

где  $\tau_{RF}$  — длительность огибающей импульса СВЧ,  $f_{rep}$  — частота повторения импульсов;  $b_c$  и  $a_c$  — калибровочные коэффициенты. Запись производится в файл формата «xlsx» или «dat». Для каждого значения управляющего напряжения  $U$  записывают  $P_{pulsed}$  с погрешностью (при множественном измерении) и  $U_c$ . При записи в файл Excel активируется макрос-графопостроитель для создания графика

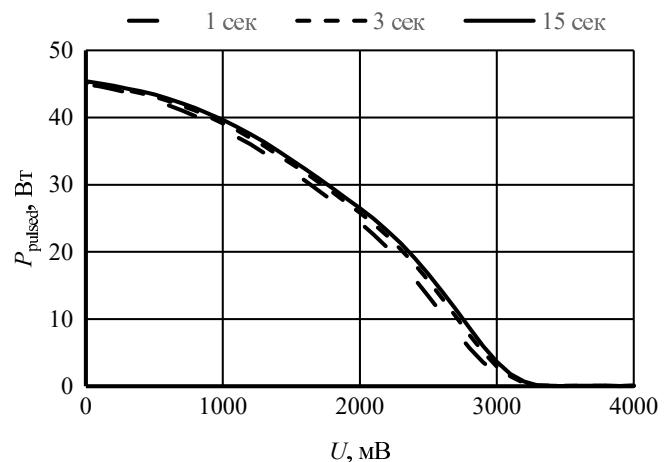


Рис. 5. Калибровочная кривая тракта СВЧ с различными временными интервалами измерения одной точкой

калибровочной кривой. Пример графика показан на рис. 5.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На момент написания статьи стенд калибровки полностью собран и запущен в эксплуатацию. Для приложения обработано большинство ошибок, связанных с TCP/IP соединением и записью данных в файл. Пока нерешенной остается проблема с длительным ожиданием при запуске приложения, которое связано с особенностями работы Matlab Runtime. Также проблемой является большой объем установочной программы.

- 
- [1] Ermakov A.N., Alimov A.S., Ishkhanov B.S., Frejdovich I.A. et al. // Proc. RuPAC'14. 2014. 143 (2014).
  - [2] Ermakov A.N., Alimov A.S., Ovchinnikova L.Yu, Kamanin A.N. et. al. // Proc. of the 29th Linear Accelerator Conference, LINAC 2018. 130 (2018).
  - [3] Shvedunov V.I., Alimov A.S., Ermakov A.N., Kamanin A.N. et. al. // Radiation Physics and Chemistry. 95 (2019).
  - [4] Афонин П.Н. ИЦ Интермедиа, 2017.
  - [5] Огородников С.А., Симочкин С.В., Малышенко Ю.В. // Вестник Российской таможенной академии. № 2. 110 (2016).
  - [6] <https://www.toriy.ru/products/klystrons/>
  - [7] <https://docs.kernel.org/driver-api/spi.html>
  - [8] TIA/EIA-422-B, Electrical Characteristics of Balanced Digital Interface Circuits, Electronic Industries Association Engineering Department. Washington D.C. 1994
  - [9] <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
  - [10] MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b3.

## The test set-up of Electron Linac Low-level RF system

V. K. Basati<sup>1,a</sup>, A. N. Ermakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia*

<sup>2</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University  
Moscow 119191, Russia*

E-mail: <sup>a</sup>*dzampaeva.vk19@physics.msu.ru*

During the commissioning of RF power supply systems for electron accelerators developed by the SINP MSU and built on the basis of KIU-168, KIU-271 klystrons, there is a need to check and calibrate the low-level RF system, which generates the input signal of the klystron in the form of a rectangular pulse of adjustable duty cycle, filled with high-frequency oscillations. The task of calibrating the low-level RF system is to obtain the dependence of the output pulse power on the control voltage of the variable attenuator in the form of a graph and a table. For this purpose, a test set-up was built. Then the calibration process was automated using Matlab-based software.

PACS: 29.20.Ej.

Keywords: electron linacs, RF systems.

Received 15 April 2025.

### Сведения об авторах

1. Басати Виктория Казбековна — студент; e-mail: dzampaeva.vk19@physics.msu.ru.
2. Ермаков Андрей Николаевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник НИИЯФ МГУ; e-mail: a\_ermak1978@mail.ru.