Письма в ЭЧАЯ. 2025. Т. 22, № 3(260). С. 501–509

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СИСТЕМЫ ВЧ2 КОЛЛАЙДЕРА NICA

О. И. Бровко, А. Н. Карпук [1], *А. М. Малышев, В. В. Морозова, Д. М. Морозов, Е. М. Сыресин, А. А. Троицкий, М. И. Яблочкин*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты стендовых испытаний на тестовую нагрузку 7 кВт усилителя мощности резонатора ВЧ2 коллайдера NICA, и проведен анализ полученных данных с проектными характеристиками.

The results of bench tests on a test load of 7 kW of the power amplifier of the RF2 resonator of the NICA collider are presented, and an analysis of the obtained data with the design characteristics is carried out.

PACS: 25.75.DW

ВВЕДЕНИЕ

Формирование ионного пучка в коллайдере NICA осуществляется в трех высокочастотных (ВЧ) системах [1]. Система ВЧ1 предназначена для накопления и последующего ускорения ионов с энергиями от 1 до 4,5 ГэВ/нуклон [2]. Система ВЧ2 служит для предварительной группировки ионных пучков. Она генерирует гармоническое напряжение на 22-й гармонике частоты обращения частиц в ускорителе. Резонансная частота резонатора перестраивается в диапазоне от 11 до 13 МГц. Станции ВЧ3 используются для создания гармонического напряжения на 66-й гармонике частоты обращения частиц в ускорителе и группировки плотных ионных сгустков со среднеквадратичной длиной 60 см. Частота резонатора перестраивается в пределах от 34 до 39 МГц в зависимости от энергии эксперимента [3].

УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ РЕЗОНАТОРА ВЧ2

Усилитель мощности ISM.7K.12 ВЧ2 предназначен для работы в непрерывном режиме и обеспечивает номинальную выходную мощность до 7 кВт [3]. Устройство функционирует в диапазоне частот от 11,4 до 13,2 МГц с входной максимальной

[1] E-mail: karpuk@jinr.ru

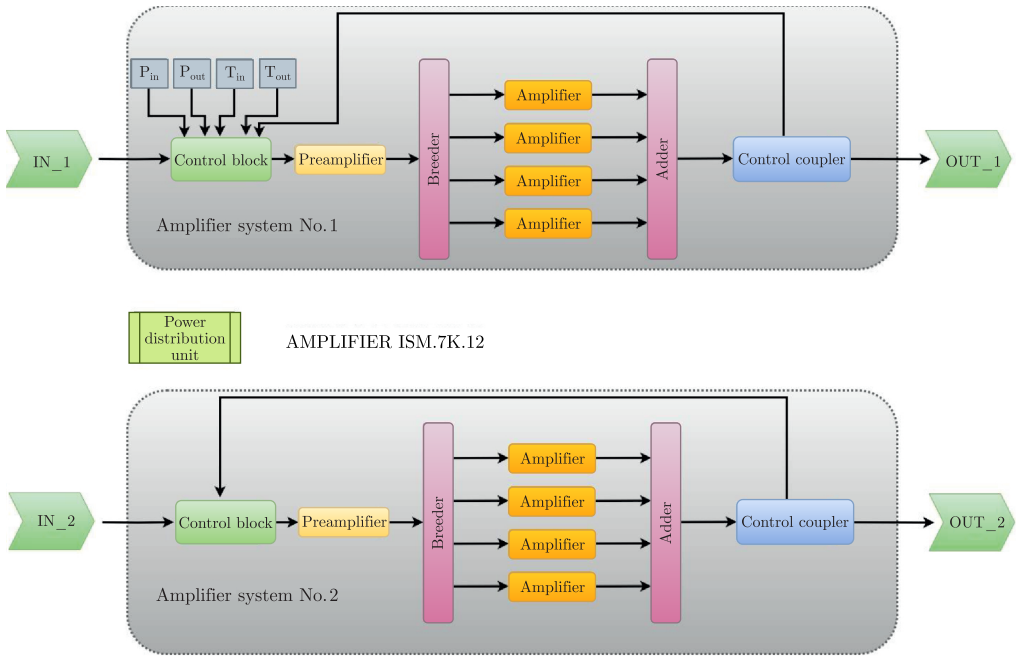

Рис. 1. Структурная схема усилительного комплекса ВЧ2

мощностью до 2 Вт. Линейность усилителя составляет менее 3 дБ в диапазоне мощности от 10 до 90 % от максимального значения, что гарантирует стабильное усиление без значительных искажений. Этот усилитель включает в себя следующие модули и компоненты: блок управления, делитель, входной и выходной коллекторы жидкостного охлаждения, рефлектометр, сетевой блок, сетевой коммутатор, предварительный усилитель, сумматор и усилители оконечного каскада (рис.1).

В каждом усилительном комплексе установлены два усилителя ISM.7K.12 (один усилительный комплекс ВЧ2 будет «нагружен» двумя резонаторами, рис. 2). Блок управления усилителя отображает на дисплее следующие параметры: выходная и отраженная мощности, уровни мощности балластных нагрузок [3].

Входной сигнал поступает на ВЧ-разъем SMA 50-Ом блока управления усилителя мощности, где осуществляется проверка состояния систем и наличия сигнала разрешения работы. Далее сигнал передается на предварительный усилитель. При возникновении аварийной ситуации сигнал автоматически перенаправляется на согласованную нагрузку для предотвращения повреждений.

На этапе деления сигнала формируются равные по уровню сигналы с необходимыми фазами для последующего их суммирования. Далее эти сигналы через кабельные перемычки поступают на входы усилителей мощности ISM.2K.12, где каждый сигнал распределяется между четырьмя транзисторами оконечного каскада. Усиленные транзисторами сигналы объединяются и передаются через рефлектометр на выходной разъем усилителя $3 + 1/8''$ FastLine. Система защиты, используя данные с рефлектометра, контролирует выходную и отраженную мощности, отображая их на передней панели устройства.

Рис. 2. Усилитель ISM.7K.12, вид спереди и сзади

Усиленный сигнал с выходного разъема направляется на сумматор, который оснащен балластными нагрузками для обеспечения стабильной работы. На выходе сумматора установлен дополнительный рефлектометр, обеспечивающий регистрацию уровней выходной и отраженной мощностей. Этот рефлектометр также передает сигналы обратной связи в систему управления ускорителем, обеспечивая контроль над работой усилителя.

Все усилители оснащены светодиодной индикацией для отображения наличия вторичного питания и статуса системы защиты. На дисплеях блоков отображаются ключевые параметры: выходная и отраженная мощности, потребляемый ток, температура, напряжение питания [4].

УСИЛИТЕЛЬНЫЕ КАССЕТЫ КОМПЛЕКСОВ ВЧ2–ВЧ3

Усилительные комплексы ВЧ2 и ВЧ3 формируют итоговую выходную мощность с помощью усилительных кассет, что обуславливает необходимость точной настройки не только всего комплекса в целом, но и каждой отдельной кассеты.

Кассеты (рис. 3) предназначены для непрерывного режима работы и функционируют в различных диапазонах выходной мощности. Кассета ВЧ2 обеспечивает выходную мощность до 2000 Вт при входной мощности до 20 Вт и охватывает диапазон рабочих частот от 10 до 14 МГц с номинальным усилением 20 дБ. ВЧ3-кассета, в свою очередь, предназначена для работы с выходной мощностью до 4000 Вт при входной мощности до 10 Вт и имеет диапазон частот от 34 до 39 МГц, обеспечивая номинальное усиление в 26 дБ.

Следует отметить, что структурно-усилительная кассета ВЧ2 не отличается от кассеты ВЧ3, и они состоят из платы защиты, передней панели с LCD-индикатором

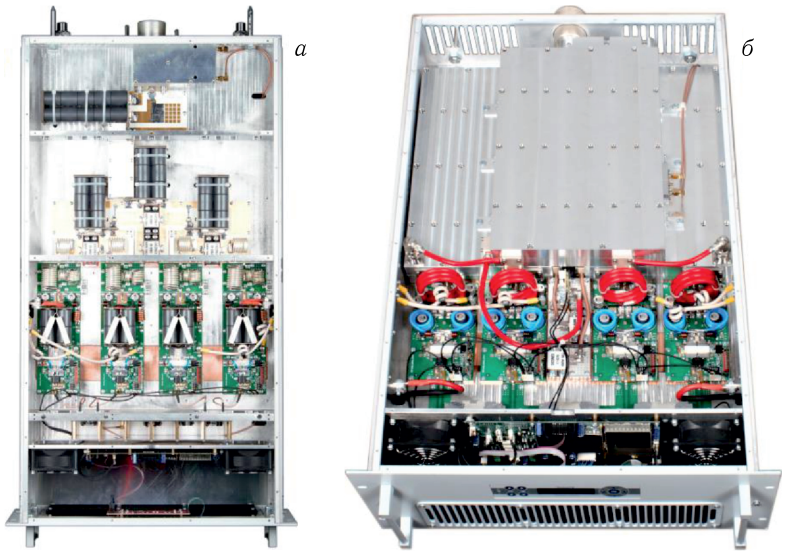

Рис. 3. *а*) Усилительная кассета ВЧ2; *б*) усилительная кассета ВЧ3

и клавиатурой, четырех ячеек усилителей мощности, сумматора мощности, выходного контрольного ответвителя, системы жидкостного охлаждения, двух вентиляторов системы воздушного охлаждения, блока питания системы защиты, блока питания вентиляторов, блока питания усилителя мощности. Но поскольку устройства работают на разную выходную мощность и частотный диапазон, отличия заключаются в исполнении выходных каскадов усилительных ячеек и сумматоров мощности кассет.

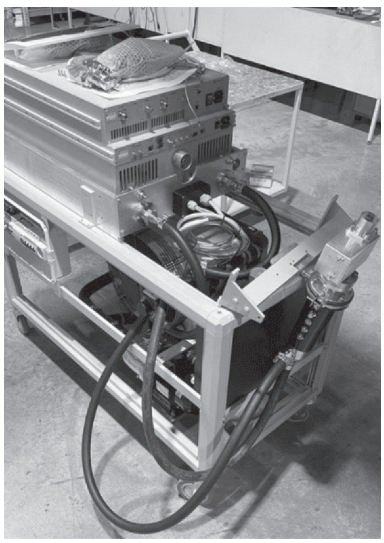

Рис. 4. Стенд настройки и диагностики ВЧ2–ВЧ3

Для выполнения задач и оптимизации процесса диагностики вне штатных стоек был разработан специализированный стенд (рис. 4). Он позволяет в условиях, имитирующих эксплуатацию, контролировать и калибровать усилительные кассеты, что гарантирует точное соответствие рабочих параметров проектным допускам и возможность оперативного устранения выявленных отклонений.

Структура обеспечивает комплексную работу и калибровку усилительных кассет.

Она состоит из нескольких ключевых компонентов: это посадочное место, фиксирующее кассету усилителей ВЧ2 и ВЧ3 для проведения испытаний; выходная фидерная линия, соединенная с рефлектометром для анализа ВЧ-сигналов; стендовая нагрузка, эквивалентная 5 кВт, имитирующая рабочую нагрузку; автономная система охлаждения, которая обеспечивает отвод тепла от кассет и нагрузки; автомат питания, отвечающий за подачу и контроль питания на стенде; предварительный усили-

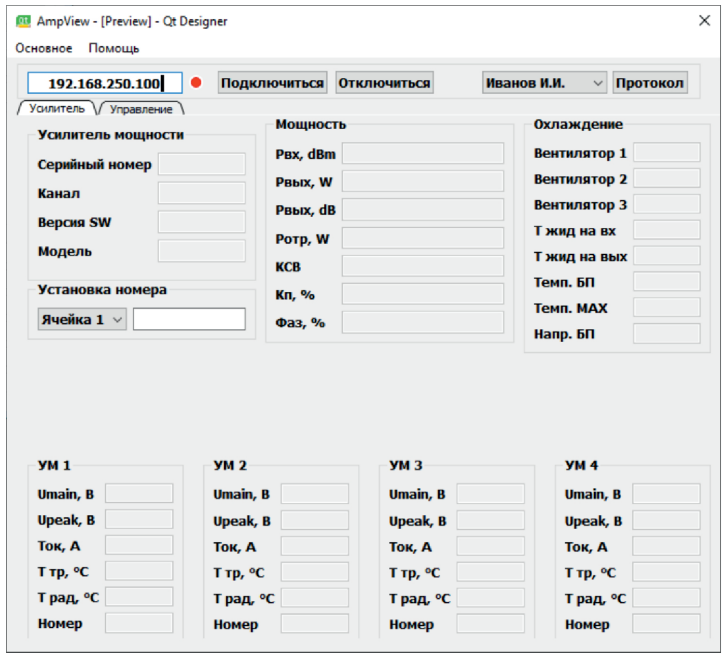

Рис. 5. Окно ПО диагностики кассет ВЧ2–ВЧ3

тель мощности на 50 Вт, усиливающий входные сигналы для подачи на кассету; блок управления, который принимает гармонический сигнал, осуществляет связь с кассетами и управляет процессом калибровки.

Для данного стенда было разработано специализированное программное обеспечение (ПО) рис. 5, которое осуществляет эффективное взаимодействие с блоком управления через протокол TCP/IP. Это взаимодействие позволяет осуществлять передачу управляющих команд и получение данных о состоянии усилительных кассет в реальном времени.

Программное обеспечение включает встроенные референсные значения кассет, что позволяет быстро настраивать и калибровать устройства в зависимости от их характеристик. Кроме того, в ПО реализована функция создания протоколов диагностики, которые составляются на основе результатов проверки работоспособности кассет. Пользователь может настраивать диагностику, выбирая конкретные тесты, а затем анализировать полученные данные для формирования протокола. Такой подход упрощает процесс выявления неисправностей и оптимизирует процедуры обслуживания. Составленные протоколы могут быть сохранены для последующего анализа.

СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ ВЧ2

Для проведения стендовых испытаний, а именно мониторинга параметров усилителей, было разработано специализированное ПО, обеспечивающее комплексный контроль их работы. ПО играет ключевую роль в получении оперативной и точной

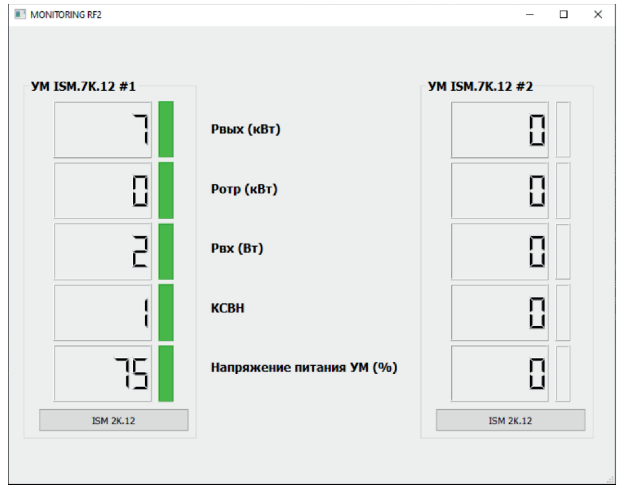

Рис. 6. Рабочее окно ПО контроля параметров усилителей ВЧ2

информации о состоянии усилителей в режиме реального времени, что позволяет эффективно выявлять отклонения, оптимизировать параметры и предотвращать возможные сбои в работе оборудования (рис. 6).

ПО обеспечивает взаимодействие с блоком управления усилителями с использованием внутренней локальной сети (LAN) через протокол TCP/IP. Такой подход гарантирует надежную и стабильную передачу данных, исключая задержки и потери информации. Взаимодействие по LAN позволяет интегрировать ПО в уже существующую сетевую инфраструктуру, что минимизирует затраты на внедрение и снижает сложность настройки системы.

Кроме того, данное ПО обладает возможностью записи данных, что позволяет сохранять информацию о работе усилителей на протяжении всего периода испытаний. Эти данные могут быть использованы для последующего анализа и выявления закономерностей в работе оборудования, что значительно упрощает процесс диагностики и планирования профилактического обслуживания.

Таким образом, разработанное ПО на основе взаимодействия по протоколу TCP/IP через локальную сеть обеспечивает эффективный мониторинг и управление параметрами усилителей в ходе стендовых испытаний, повышая общую надежность и стабильность работы системы.

Стендовые испытания усилителей № 1 и 2 проводились на одну тестовую нагрузку 7 кВт поочередно.

Ниже описываются параметры, контролируемые во время испытаний.

Коэффициент усиления (КУ) характеризует, насколько усилитель увеличивает амплитуду входного сигнала. Его контроль необходим для оценки эффективности усилителя и предотвращения искажений, возникающих при недостаточном или избыточном усилении.

Выходная мощность ($P_{\text{вых}}$) позволяет удостовериться, что усилитель выдает требуемый уровень мощности на выходе, обеспечивая стабильную работу без перегрева и перегрузок.

Коэффициент стоячей волны (КСВ) отражает степень согласованности между усилителем и нагрузкой. Контроль КСВ важен для минимизации отражений сигнала, которые могут привести к потерям мощности и повреждению оборудования.

Групповое время задержки (ГВЗ) показывает время прохождения сигнала через усилитель, что критично для синхронизации системы и предотвращения фазовых искажений в сложных сигнальных цепях.

Выходной импеданс характеризует значение общего выходного сопротивления усилителя, в соответствии с проектным номиналом, что гарантирует корректное согласование и минимальные потери мощности при работе на нагрузку.

Линейность оценивает способность усилителя поддерживать амплитуду сигнала без искажений по всему диапазону частот, что особенно важно для предотвращения межкаскадных искажений.

Компрессия показывает, насколько усилитель отклоняется от своей идеальной линейной характеристики при увеличении мощности.

Испытания проводились на частотах 11,4, 12,0, 12,5, 13,0 и 13,2 МГц, что охватывает весь рабочий диапазон усилителей. Мониторинг параметров на каждой из этих частот позволяет проверить стабильность работы усилителей в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации.

Полученные значения параметров сравнивались с проектными характеристиками (табл. 1, 2).

Таблица 1. **Измеренные проектные характеристики и данные испытаний усилителя № 1 ВЧ2 на нагрузку 7 кВт**

f, МГц	Коэффициент усиления, дБ (40 дБ)	$P_{вх}$, Вт	$P_{вых}$, кВт	КСВ ($\leqslant$ 2,0)	ГВЗ ($\leqslant$ 1мкс)	Импеданс (50 Ом)
11,4	43,913	0,285	7	1,0364	251,79	50,501
12,0	43,566	0,306	7	1,0405	247,36	51,258
12,5	43,247	0,326	7	1,0428	255,11	51,809
13,0	42,960	0,346	7	1,0432	272,37	52,108
13,2	42,825	0,357	7	1,0425	280,72	52,122

Таблица 2. **Измеренные проектные характеристики и данные испытаний усилителя № 2 ВЧ2 на нагрузку 7 кВт**

f, МГц	Коэффициент усиления, дБ (40 дБ)	$P_{вх}$, Вт	$P_{вых}$, кВт	КСВ ($\leqslant$ 2,0)	ГВЗ ($\leqslant$ 1мкс)	Импеданс (50 Ом)
11,4	43,447	0,317	7	1,0630	224,01	50,248
12,0	43,267	0,330	7	1,0582	214,96	50,984
12,5	42,955	0,354	7	1,0537	217,09	51,620
13,0	42,504	0,393	7	1,0496	237,68	52,181
13,2	42,274	0,415	7	1,0460	265,77	52,364

На основании данных, полученных в ходе испытаний, можно сделать следующие выводы.

Величина КУ варьируется от 42,274 до 43,447 дБ в диапазоне частот от 11,4 до 13,2 МГц. Все значения превышают проектный номинал 40 дБ, в результате запас по КУ даст возможность более гибкой настройки и корректировки при пусконаладочных работах системы ВЧ2.

Мощность $P_{\text{вых}}$ стабильно составляет 7 кВт при средней входной мощности 0,3 Вт. Это указывает на стабильность усилителя в широком диапазоне входных мощностей, что важно для обеспечения надежной работы системы.

Параметр КСВ варьируется в пределах 1,046–1,063 и остается ниже предельного значения 2,0. Это подтверждает хорошую согласованность усилителя с импедансом нагрузки (50 Ом) и минимизирует потери, связанные с отражением сигнала.

Значение ГВЗ составляет менее 1 мкс, что соответствует требованиям к быстродействию системы. Это важно для обеспечения точности передачи сигналов.

Импеданс усилителя остается на уровне 50 Ом для всех частот, что подтверждает его соответствие стандартным требованиям и обеспечивает минимизацию потерь при передаче сигнала.

Проектный коэффициент усиления составляет $G = 40$ дБ. Отклонения от проектной характеристики рассчитаны для каждого измеренного значения коэффициента усиления. Для этого определена разница между каждым значением и проектной величиной. Отклонения величины генератора № 1 лежат в диапазоне от 2,825 до 3,9 дБ, для генератора № 2 от 2,274 до 3,447 дБ соответственно. Оценка компрессии выражена как разница между максимальным и минимальным значениями коэффициента усиления: $\Delta G_{\max} = G_{\max} - G_{\min}$. Компрессия генератора № 1 равна 1,075 дБ, компрессия генератора № 2 составляет 1,173 дБ. Условие компрессии согласно проекту должно быть менее 5 дБ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ данных показывает, что усилитель в ходе стендовых испытаний демонстрирует стабильные и проектные значения характеристик в диапазоне частот от 11,4 до 13,2 МГц. Усиление устройства, как ключевой параметр, обладает некоторым запасом, который может быть эффективно скорректирован в процессе пусконаладочных работ с ВЧ-резонатором, чтобы достичь требуемых значений. Измеренные амплитудно-частотная характеристика, величины КСВ, ГВЗ, а также импеданс находятся в пределах допуска.

Испытания усилителей на нагрузку резонаторов ВЧ2 планируются в декабре 2024 – январе 2025 г.

Испытания усилителей на нагрузку резонаторов ВЧ2 с пучком запланированы на лето 2025 г.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта ОМУС № 24-101-04.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Trubnikov G., Agapov N., Alexandrov V., Butenko A., Donets E. D., Donets E. E., Eliseev A.* Project of the Nuclotron-Based Ion Collider Facility (NICA) at JINR // RuPAC2008. 2008. V. 5. P. 82–84.

2. *Malyshev A. M., Krasnov A. A., Kruchkov Ya. G., Krutikhin S. A., Kurkin G. Y., Martynovsky A. Yu., Mityanina N. V., Motygin S. V., Murasev A. A., Osipov V. N., Petrov V. M., Pilan A. M., Rotov E., Tarnetsky V. V., Tribendis A. G., Zapryagaev I. A., Zhukov A. A., Brovko O. I., Meshkov I. N., Syresin E. M.* Barrier Station RF1 of the NICA Collider. Design Features and Influence on Beam Dynamics // CERN Proc. 27. Ser. "27th Russ. Part. Accel. Conf. RuPAC2021". 2021. P. 373–375.
3. *Ротов Е. А., Бирючевский Ю. А., Кенжебулатов Е. К., Козлов В. В. и др.* Проект высокочастотной системы коллайдера NICA // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т. 15, № 7(219). С. 914–919.
4. Технический проект ускорительного комплекса NICA / Ред.: И. Н. Мешков, Г. В. Трубников. Дубна: ОИЯИ, 2015.

Получено 9 декабря 2024 г.