

# НОВОЕ ПОКОЛЕНИЕ МАЛОГАБАРИТНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ ТИПА ARSA И «АРГУМЕНТ»

## NEW GENERATION OF SMALL-SIZED PULSED ELECTRON ACCELERATORS OF ARSA AND ARGUMENT TYPES

*Н. В. Завьялов, С. М. Лашманов, Д. П. Николаев, А. Ф. Поколев, Г. А. Полиенко, С. П. Пухов,  
А. В. Родигин, П. С. Самородов, А. В. Тельнов, С. Л. Эльяш, А. Л. Юрьев, Ю. Ф. Глазкова  
N. V. Zavyalov, S. M. Lashmanov, D. P. Nikolaev, A. F. Pokolev, G. A. Polienko, S. P. Pukhov,  
A. V. Rodigin, P. S. Samorodov, A. V. Tel'nov, S. L. Elyash, A. L. Yuriev, Yu. F. Glazkova*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental  
Physics (RFNC-VNIIEF)

В РФЯЦ-ВНИИЭФ завершена разработка автоматизированного рабочего места на базе малогабаритных импульсных ускорителей (МИУ) электронов для проведения радиационных испытаний электронной компонентной базы. В рамках выполненной работы созданы МИУ нового поколения типа ARSA и «Аргумент». Ускорители этого класса отличаются высокой производительностью при небольших массогабаритных параметрах, относительно низкой стоимостью, транспортабельностью, достаточно низким уровнем электромагнитного излучения. Использование современной элементной базы и применение автоматизированных методов расчета позволило создать приборы с техническими характеристиками, существенно превосходящими их прототипы.

RFNC-VNIIEF has finished development of a workstation on the basis of small-sized pulsed electron accelerators (MIU) meant for ECB radiation testing. Within the frames of the work fulfilled a new generation MIU of ARSA and «Argument» type have been developed. Accelerators of this category are remarkable for their high performance at small mass-dimension parameters, relatively low cost, transportability, rather a low level of electromagnetic radiation (ER). Employment of modern radio-electronic componentry and application of automated computation methods allowed development of devices with specifications, which significantly surpass their prototypes.

### Введение

Широкое применение в составе радиоэлектронной аппаратуры специального назначения разнообразных изделий ЭКБ выдвигает требование обеспечения их высокой надежности, в частности, радиационной стойкости. Рост номенклатуры исследуемых ЭКБ и соответственно объемов испытаний заставляет экспериментаторов искать пути увеличения производительности, снижения издержек и упрощения проведения работ. Одним из путей решения этих задач является автоматизация проведения экспериментов с помощью создания автоматизированных рабочих мест (АРМ), в том числе на базе МИУ. Разработанные в РФЯЦ-ВНИИЭФ МИУ нового поколения типа ARSA [1-2] и «Аргумент» [3] отличаются высокой производительностью, небольшими мас-

согабаритными параметрами и относительно низкой стоимостью.

### Малогабаритный импульсный ускоритель «Аргумент»

МИУ «Аргумент» – ускоритель электронов прямого действия с максимальной энергией квантов 1 МэВ. Высоковольтный блок МИУ «Аргумент» создан на основе коаксиальной двойной формирующей линии (ДФЛ) [4-5] с газовой изоляцией, заряжаемой резонансным импульсным трансформатором с разомкнутым сердечником. Принципиальная схема высоковольтного блока представлена на рисунке 1.

Традиционно в качестве основного диэлектрика в высоковольтном блоке МИУ и рентгенов-

ских аппаратов используется минеральное трансформаторное масло. Но разработка 1-МэВ ускорителя на основе принципиальной схемы, показанной на рис. 1, с масляной изоляцией высоковольтного блока представляется проблематичной, так как требует применения отпаянного разрядника в качестве обострителя FV2 на напряжение 1 МВ. Диаметр такого разрядника составляет порядка 200 мм, длина до 350 мм, масса от 7 до 10 кг. Высоковольтный блок ускорителя на основе такого разрядника имел бы весьма существенные массу и габариты. Поэтому в высоковольтном блоке МИУ «Аргумент» нового поколения применена газовая изоляция на основе SF<sub>6</sub> и N<sub>2</sub>. Такое техническое решение позволяет отказаться от отпаянного разрядника-обострителя и заменить его разрядным промежутком, расположенным непосредственно в среде газового диэлектрика [6-8]. Это существенно упростило конструкцию высоковольтного блока.

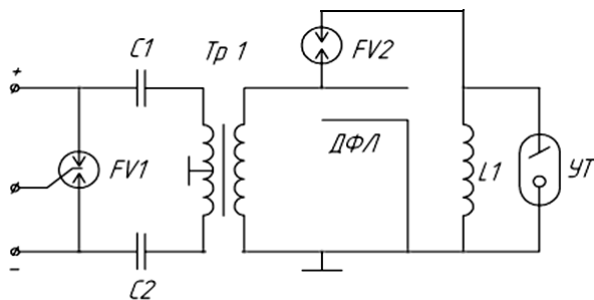


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема высоковольтного блока МИУ «Аргумент»

Первичный контур резонансного трансформатора состоит из первичной обмотки, конденсаторов C1-C2 и управляемого разрядника FV1. Конденсаторы C1-C2 заряжаются разнополярно. При подаче на разрядник FV1 (см. рисунок 1) пускового импульса происходит его срабатывание, и в обмотках трансформатора Tr1 возникают электромагнитные колебания. Импульс высокого напряжения во вторичной обмотке трансформатора заряжает ДФЛ до напряжения 1 МВ, при котором происходит пробой обострителя FV2. В результате на электродах ускорительной трубки УТ возникает короткий импульс ускоряющего напряжения и происходит генерирование тормозного излучения (ТИ).

ДФЛ с газовой изоляцией, заряжаемая высоковольтным резонансным трансформатором, способна обеспечить генерацию короткого (несколько нс) высоковольтного импульса. ДФЛ имеет следующие параметры: волновое сопротивление

наружной линии 20 Ом, электрическая емкость 60 пФ; волновое сопротивление внутренней линии 32 Ом, емкость 40 пФ. Нагрузкой ДФЛ служит отпаянная ускорительная трубка, отделенная от основного объема высоковольтного блока разделительным изолятором. Ускорительная трубка шунтируется катушкой индуктивности L1 (см. рисунок 1).

Для зарядки ДФЛ применен резонансный трансформатор с разомкнутым сердечником [9-10], коэффициент связи которого составляет примерно 0,6. Полная передача энергии реализуется на второй полуволне. Такие трансформаторы надежны в работе, просты и технологичны в изготовлении и настройке, способны обеспечивать работу с высокой частотой повторения импульсов.

Ускорительная трубка МИУ «Аргумент», получившая название ОНИКС-М, разработана на базе рентгеновской трубки аппарата Аргумент-700 [11]. Следует отметить, что края катода трубки ОНИКС-М отформованы специальным образом с помощью изготовленной пресс-формы. Это позволило стабилизировать работу ускорительной трубки и увеличить срок службы катода за счет более равномерного распределения эмиссии электронов вдоль его рабочей поверхности. Эксперименты с ускорительной трубкой ОНИКС-М показали, что благодаря применению новой конструкции катодного узла, а также замене материала электродов с вольфрама на тантал, удалось повысить ресурс ускорительной трубки с 200 до ~1500 импульсов. Внешний вид ускорительной трубки ОНИКС-М представлен на рис. 2.

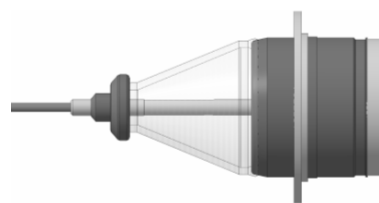


Рис. 2. Внешний вид ускорительной трубки ОНИКС-М

Основной задачей при разработке зарядного устройства для МИУ «Аргумент» нового поколения было максимальное упрощение прибора и за счет этого, повышение его надежности.

Зарядное устройство разработано на основе схемы с единым двухтактным преобразователем [11] с одним выходным трансформатором промышленного изготовления, используемым в телевизионных приемниках цветного изображения, и отдельными умножителями напряжения для каждой полярности выходного напряжения. Такое решение позволило избежать изготовления специ-

ального высоковольтного трансформатора. Зарядное устройство размещено в пластмассовом, серийно изготавливаемом корпусе RZ-15.

Конструктивно МИУ «Аргумент» выполнен в виде переносной конструкции, состоящей из двух частей: высоковольтного блока и зарядного устройства, соединяющихся при помощи комплекта кабелей. Масса высоковольтного блока и зарядного устройства МИУ «Аргумент» равны 50 кг и 2,5 кг соответственно. Внешний вид МИУ «Аргумент» представлен на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид МИУ «Аргумент»

### Малогабаритный импульсный ускоритель АРСА

МИУ АРСА нового поколения – ускоритель электронов прямого действия на напряжение 1,1 МВ с масляной изоляцией высоковольтного блока. Внешний вид МИУ АРСА представлен на рисунке 4. Он изготовлен в виде переносной конструкции, состоящей из трех отдельных блоков. Блочный принцип, положенный в основу конструкции обеспечивает его мобильность, упрощает ремонт и обслуживание, снижает влияние сопутствующего электромагнитного излучения на низковольтные цепи управления. Масса высоковольтного блока и зарядного устройства МИУ АРСА равны 80 кг и 16 кг соответственно.

С зарядного устройства ЗУ по команде с пульта управления ПУ ускорителя на первичную обмотку трансформатора ИТ1 подается импульс напряжения амплитудой около 10 кВ. Источником высокого импульсного напряжения, подаваемого на ускорительную трубку, является 10-каскадный генератор импульсов напряжения (ГИН), выполненный по схеме Аркадьева-Маркса [12]. Коммутация тока в каскадах ГИН осуществляется при помощи металлокерамических разрядников Р1 высокого давления. В результате накопительные конденсаторы С1 оказываются соединенными по-

следовательно, и на выходе ГИН формируется импульс высокого напряжения амплитудой более 1,1 МВ. Нагрузкой ГИН является отпаянная ускорительная трубка (вакуумный диод с холодным катодом и анодом прострельного типа). Ускорительная трубка служит для преобразования высоковольтных импульсов напряжения в электронное излучение.

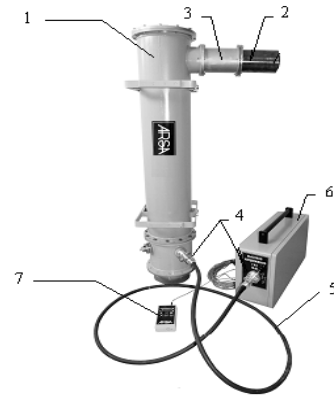


Рис. 4. Внешний вид МИУ АРСА: 1 – высоковольтный блок; 2 – ускорительная трубка; 3 – формирующий LC-контур; 4 – высоковольтный разъем РВИ-10; 5 – соединительный силовой кабель; 6 – зарядное устройство; 7 – пульт управления

На рис. 5 приведена электрическая схема МИУ АРСА.

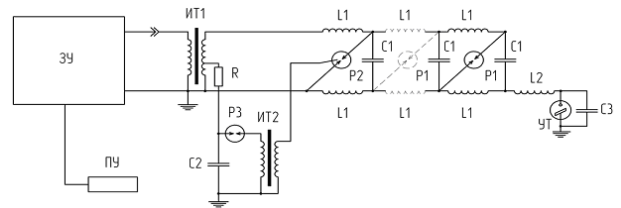
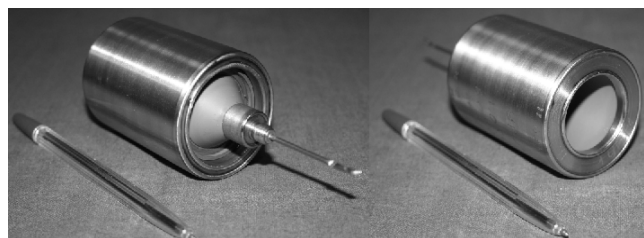


Рис. 5. Схема МИУ АРСА

Одной из схемных особенностей МИУ АРСА нового поколения является применение в первом каскаде ГИН управляемого разрядника Р2, что позволило улучшить стабильность дозы электронного или тормозного излучения. В качестве разрядника Р2 разработан и применен металлокерамический разрядник тригatronного типа УРИМ-200. Внешний вид разрядника УРИМ-200 представлен на рисунке 6 (а).

Для МИУ АРСА нового поколения была разработана новая отпаянная ускорительная трубка ТСН-1200 прострельного типа. В этой трубке с коническим изолятором из электротехнического стекла, по сравнению с ее прототипом ТКН-1000

увеличены габариты изолятора и применены экраны для защиты большого и малого оснований изолятора, что позволило добиться увеличения электропрочности трубки примерно в два раза. Эксперименты с ускорительной трубкой ТСН-1200 показали, что применение новой конструкции позволило повысить величину предельного ускоряющего напряжения с 1 МВ до 1,5 МВ. Внешний вид ускорительной трубки ТСН-1200 представлен на рис. 6 (б).



а



б

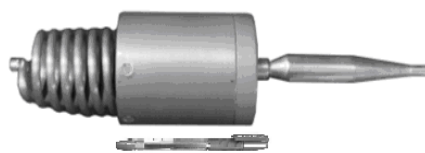
Рис. 6. а – внешний вид разрядника УРИМ-200, б – внешний вид ускорительной трубки ТСН-1200

Для генерации ТИ на наружную поверхность окна трубки устанавливается мишень из танталовой фольги толщиной 90 мкм и алюминиевый фильтр для поглощения электронов толщиной 2,5 мм.

Для коррекции формы и увеличения длительности импульса ТИ последовательно с ускорительной трубкой включен формирующий LC-контур. Контур является Г-образным фильтром, подавляющим прохождение токов высокой частоты и таким образом, формирующим на ускорительной трубке импульс напряжения большей длительности. Подстраивая значения  $L_2$  и  $C_3$  (см. рис. 5), можно регулировать длительность импульса излучения ускорителя на полувысоте в пределах от 3 до 10 нс. Внешний вид LC-контура представлен на рис. 7 (а).

В ускорителях серии АРСА для соединения высоковольтного блока с зарядным устройством использовались разъемы типа АФА. Они предназначены для коммутации высоковольтных, но сла-

боточных цепей и поэтому не удовлетворяют требованиям надежности работы МИУ АРСА нового поколения. Разъем должен иметь электропрочность не менее 10 кВ и обеспечивать надежное электрическое соединение при амплитуде тока до 5 кА. С целью повышения надежности соединения высоковольтного блока с зарядным устройством был разработан и изготовлен высоковольтный сильноточный разъем РВИ-10, внешний вид которого представлен на рисунке 7 (б). Испытания разъема РВИ-10 на испытательном стенде показали, что электропрочность разъема превышает 40 кВ. Разъем выдержал 1000 включений с амплитудой тока 15 кА без каких-либо признаков нарушения контакта.



а



б

Рис. 7. а – внешний вид LC-контура, б – внешний вид разъема РВИ-10

В каскадах ГИН МИУ АРСА в качестве емкостных накопителей энергии применены керамические конденсаторы типа UHV-12A (1700 пФ, 50 кВ) фирмы TDK, что позволило увеличить энергозапас ускорителя АРСА нового поколения не менее чем в 2 раза по сравнению с прототипом [1].

При разработке зарядного устройства входящего в состав МИУ АРСА были приняты схемотехнические меры для обеспечения устойчивости зарядного устройства к электромагнитным помехам, возникающим при срабатывании высоковольтного блока ускорителя. В межплатные соединения была введена оптронная и трансформаторная гальванические развязки. В плате силового преобразователя использован развязывающий трансформатор силовых ключей по постоянному току МИТ-4, использована помехоустойчивая элементная база (хорошо зарекомендовавший себя контроллер силовых ключей TL494 фирмы Texas Instruments).

Для снижения уровня помех от зарядного устройства, а также помех от высоковольтного блока, проникающих в зарядное устройство, использован литой алюминиевый корпус HALP-316018 с лабиринтной крышкой.

### Основные параметры малогабаритных импульсных ускорителей АРСА и «Аргумент»

Измерения экспозиционной дозы рентгеновского излучения проводились с помощью стандартных детекторов ПСТ на основе стекла ИС-7 в стандартных контейнерах для экспериментальных работ и измерительного прибора – дозиметра гамма-излучения ИКС-А.

Измерения поглощенной дозы электронного излучения проводилось с помощью Государственного стандартного образца (ГСО) поглощенной дозы фотонного и электронного излучений (сополимер с феназиновым красителем) «СО ПД(Ф)Р-5/50».

Осциллограммы импульсов тормозного излучения МИУ АРСА и «Аргумент», зарегистрированные с помощью алмазного дозиметра САД1М (чувствительность –  $2,2 \cdot 10^{-10}$  Кл/Р, временное разрешение не хуже 0,3 нс) и осциллографа LeCroy Wave Pro 715Zi (полоса пропускания 1,5 ГГц), приведены на рис. 8.

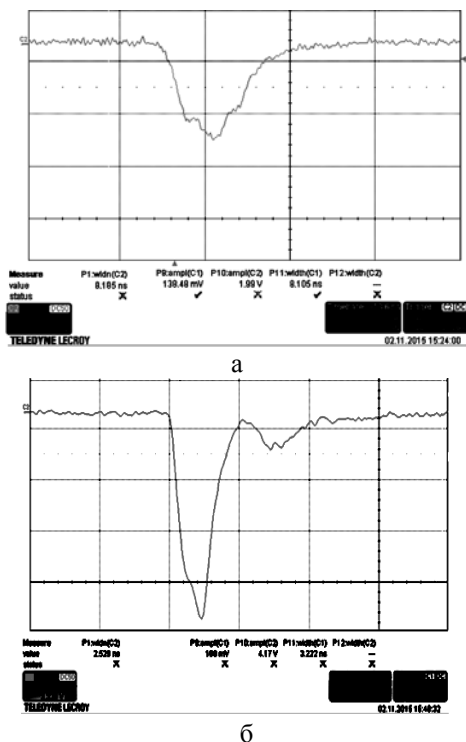


Рис. 8. Осциллограммы импульсов тормозного излучения МИУ: а – АРСА (развертка – 10 нс на клетку) и б – «Аргумент» (развертка – 5 нс на клетку)

Длительность импульсов ТИ на полувысоте амплитуды МИУ АРСА и «Аргумент» составила  $\sim 7,2$  нс и  $\sim 2,5$  нс, а эффективная длительность импульсов – 8 нс и 3,2 нс соответственно.

Мощность экспозиционной дозы ТИ в каждом импульсе определялись как отношение экспозиционной дозы ТИ в импульсе к эффективной длительности импульса.

Максимальные значения дозы и мощности дозы ТИ вблизи выходного окна ускорительной трубки в пятне диаметром 1 см МИУ АРСА и «Аргумент» составили:

- АРСА –  $D\gamma = 400$  Р,  $P\gamma = 5 \cdot 10^{10}$  Р/с;
- «Аргумент» –  $D\gamma = 220$  Р,  $P\gamma = 7 \cdot 10^{10}$  Р/с.

Стабильность дозы тормозного излучения за импульс МИУ АРСА и «Аргумент» составляет  $\pm 4,4$  % и  $\pm 2,7$  % соответственно.

Без мишени и поглощающего фильтра на выходном окне ускорительной трубки мощность поглощенной дозы электронного излучения вблизи выходного окна в пятне диаметром 1 см МИУ АРСА составляет  $\sim 1 \cdot 10^{13}$  Гр/с.

### Заключение

Для оснащения АРМ, предназначенного для проведения радиационных исследований, были разработаны и изготовлены МИУ нового поколения типа АРСА и «Аргумент».

В результате проведенной модернизации разработаны МИУ, которые имеют следующие параметры:

– АРСА – при длительности импульса излучения на полувысоте амплитуды  $\sim 7,2$  нс мощность поглощенной дозы электронного излучения в пятне диаметром 10 мм вблизи выходного окна трубки составляет  $\sim 1 \cdot 10^{13}$  Гр (Si) /с, мощность экспозиционной дозы ТИ  $\sim 5 \cdot 10^{10}$  Р/с.

– «Аргумент» – при длительности импульса излучения на полувысоте амплитуды  $\sim 2,5$  нс мощность экспозиционной дозы ТИ в пятне диаметром 10 мм вблизи выходного окна трубки составляет  $\sim 7 \cdot 10^{10}$  Р/с.

Использование таких ускорителей и АРМ на их базе, позволяет:

– проводить исследования радиационного отклика в процессе разработки ЭКБ;

– осуществлять предварительную отработку систем измерений полей нагружения, схем регистрации параметров ЭКБ, а также проводить оценку критических уровней воздействия, приводящих к искажению режима функционирования ЭКБ, для последующих испытаний с использованием мощных стационарных моделирующих установок;

- оперативно выработать рекомендации и проверять решения по повышению радиационной стойкости изделий ЭКБ на стадиях их проектирования и всех технологических этапах изготовления;
- уменьшить затраты на проведение радиационных испытаний ЭКБ.

### Список литературы

1. Эльяш С. Л., Александрин А. И., Донской Е. Н., Калиновская Н. И. и др. Ускоритель АРСА – малогабаритный источник импульсов рентгеновского и электронного излучений. Сборник научных трудов ядерных центров России. 1996. № 5. – Саров. С.229–237.
2. Эльяш С. Л., Профе Л. П. Применение малогабаритного ускорителя АРСА для оперативно-го контроля показателей стойкости элементной базы к воздействию импульсного ионизирующего излучения. // ВАНТ Физика радиационного воздействия на РЭА, выпуск 3, 2002. – С.132–136.
3. Завьялов Н. В., Канунов И. М., Полиенко Г. А., Хорошайло Е. С. Переносные импульсные рентгеновские аппараты “Аргумент-700” и “Аргумент-1000” с газовой изоляцией высоковольтных блоков // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. – Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, выпуск 10, 2005. С 80 – 87.
4. Месяц Г. А., Иванов С. А., Комяк Н. И., Пеликс Е. А. Мощные наносекундные импульсы

рентгеновского излучения. – Москва: Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.

5. Кремнев В. В., Месяц Г. А. Методы умножения и трансформации импульсов в сильноточной электронике. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с.

6. Авилов Э. А., Балтаков Ф. Н., Завьялов Н. В., Канунов И. М., Полиенко Г. А., Пунин В. Т., Хорошайло Е. С., Юрьев А. Л. Портативные импульсные рентгеновские аппараты с газовой изоляцией // Вопросы атомной науки и техники. Украина. – 2001. – № 5. – С. 77–79.

7. Авторское свидетельство 396850 СССР, М. Кл. Н. 05G 1/22. Импульсный рентгеновский аппарат / В. А. Цукерман, Н. В. Белкин, В. И. Колесов и др. – № 1711753/26-25; Заявлено 09.11.71.

8. Авторское свидетельство 576838 СССР, М. Кл. G01VS/00, H05G 1/08. Источник гамма-квантов для гамма-гамма каротажа / Н. В. Белкин, А. П. Грумбков, В. И. Колесов и др. – № 2101792/25; Заявлено 03.02.75.

9. Heise W. Tesla-transformatoren // ETZ. – 1964. – № 1. – S. 7–14.

10. Вассерман С. Б. Трансформатор Тесла в высоковольтных ускорителях заряженных частиц. – Новосибирск: Наука, 1977. – 143 с.

11. Моругин Л. А., Глебович Г. В. Наносекундная импульсная техника. – Москва: Советское радио, 1964. – С. 21–24.

12. Г. А. Месяц, А. С. Насибов, В. В. Кремнев. Формирование наносекундных импульсов высокого напряжения. – Москва: «ЭНЕРГИЯ», 1970. – С. 34–42.