

DOI: 10.15593/2499-9873/2019.1.05

УДК 519.714.2

**С.С. Гусев**

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
Москва, Россия

## **СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ПРИ ДОСТИЖЕНИИ МАКСИМАЛЬНЫХ РАБОЧИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Целью данной работы является разработка программных и технических средств, их дальнейшее внедрение в систему как отдельного узла всей системы, и в конечном итоге – проведение физических экспериментов на ускорителе на каскадном генераторе КГ-2,5 с регистрацией основных параметров в режиме реального времени.

Разработка программных средств на языке Turbo Pascal 7.1 и внедрение в систему IBM PC дает возможность перевода системы на частичный автоматический режим работы ускорителя, а дальнейшее усовершенствование системы позволит полностью перевести ее на полный автоматический режим.

**Ключевые слова:** линейный ускоритель, каскадный генератор, эксперименты, алгоритм, система регистрации параметров.

**S.S. Gusev**

V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences  
of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow, Russian Federation

## **THE SYSTEM OF REGISTRATION OF PARAMETERS OF HIGH-VOLTAGE ACCELERATORS WHEN THE MAXIMUM OPERATING VOLTAGE**

The purpose of this work is the development of software and hardware, their further implementation into the system as a separate component of the whole system, and ultimately – the conduct of physical experiments on the accelerator on the cascade generator KG-2.5 with the registration of the main parameters in real time.

Development of software in the language Turbo Pascal 7.1 and the introduction of IBM PC into the system makes it possible to transfer the system to a partial automatic mode of the accelerator, and then further improvement of the system will completely transfer it to full automatic mode.

**Keywords:** linear accelerator, cascade generator, experiments, algorithm, parameters registration system.

**Введение.** Рассмотрим систему управления, предназначенную для регистрации показаний основных параметров ускорителя на каскадном генераторе (КГ-2,5) в автоматическом режиме с датчиков для дальнейшего контроля и управления системой.

Система управления предназначена для проведения физических экспериментов в области ядерной физики, для чего необходимо обеспечивать высокую точность и надежность при проведении эксперимента. Для организации непрерывного проведения таких экспериментов необходимы многоканальные установки, которые имеют схему с полностью автономными элементами каждого измерительного канала. Неисправность одного или нескольких измерительных каналов не приводит к выходу из строя всей установки, которая характеризуется высоким уровнем надежности.

Современные системы контроля на ускорителе имеют следующие особенности:

- применение ЭВМ для сбора и обработки информации,
- вывод информации на показывающие и самопишущие приборы,
- табло световой сигнализации и устройства звуковой сигнализации,
- быстрое отслеживание любых изменений на ускорителе при помощи ЭВМ,
- легкость в управлении системой.

Наличие таких систем дает возможность не только регистрировать параметры, но и создавать условия, обеспечивающие безопасность персонала, безаварийную работу, прогнозирование возможных неисправностей оборудования. Все это также сводит к минимуму вероятность аварии и ее последствий и тем самым обеспечивает нормальные условия эксплуатации. Система управления стремится к большей автоматизации, где основные задачи находятся под контролем ЭВМ. Кроме того, ЭВМ применяют большинство физиков в физических экспериментах, где крайне важно отслеживать физические параметры в реальном времени.

Использование ЭВМ позволяет с высоким качеством реализовать повышенные требования к точности условий эксперимента; позволяет легко корректировать или изменять алгоритмы управления, поскольку изменения не требуют новых технических средств, а сводятся к замене программы; позволяет существенно уменьшить время и ошибки при сборе и обработке информации, уменьшить габаритные размеры системы контрольно-измерительных приборов и автоматики.

Наша статья рассматривает разработку, установку и отладку системы регистрации основных параметров на ускорителе КГ-2,5. Предварительно установлено, что система сбора, накопления и обработки информации является достаточно эффективной, что дает возможность усовершенствовать эту систему и перевести ее на полный автоматический режим управления ускорителем.

**1. Постановка задачи.** Ускорители на основе каскадных генераторов, собранных на различных схемах умножения, в последние годы получили достаточно широкое распространение в ядерно-физических исследованиях. Пущенный в эксплуатацию в марте 1970 г. в Физико-энергетическом институте им. А.И. Лейпунского (ФЭИ) ускоритель КГ-2,5 используется для измерения ядерно-физических констант, как достаточно мощный источник моноэнергетических быстрых нейтронов. Область энергий нейтронов, представляющая интерес для реакторостроения, охватывает диапазон от 0 до 5 МэВ, и особенно – от 0 до 1–2 МэВ. В этом случае очень важна точность измерения констант, так как ею определяются экономия средств при проектировании и строительстве. Малая эффективность детекторов в ряде случаев препятствует получению достаточно надежных данных, и это тоже вызывает потребность в увеличении потоков нейтронов.

Требования, предъявляемые к ускорителю, предназначенному для определенного круга ядерно-физических исследований, следующие:

- 1) получение нейтронов в необходимом диапазоне энергий,
- 2) высокая интенсивность потока нейтронов,
- 3) стабильность выхода нейтронов,
- 4) продолжительность непрерывной работы,
- 5) малый фон от стен и пола помещения.

Ускоритель КГ-2,5 имеет источник высокого напряжения в виде 12-каскадной симметричной схемы умножения напряжения (рис. 1). Две зарядных и одна фильтровая колонны собраны из конденсаторов емкостью 9000 пФ, рассчитанных на напряжение 250 кВ. Для ограничения токов короткого замыкания конденсаторы снабжены защитными металлическими сопротивлениями, равными 460 Ом в зарядных и 3220 Ом в фильтровой колоннах. Конденсаторы размещены в герметизированных корпусах из эпоксидной смолы, залиты конденсаторным маслом и снабжены сильфонными компенсаторами теплового расширения масла.

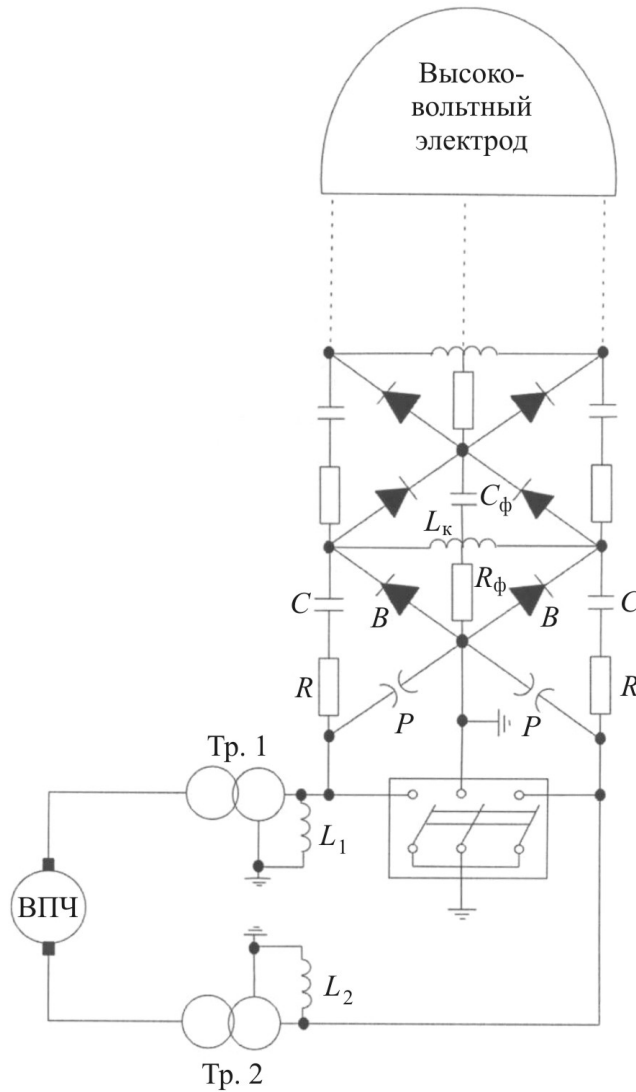


Рис. 1. Принципиальная схема умножения напряжения на ускорителе КГ-2,5 с питающими высоковольтными трансформаторами ОМ-50/90

Маслонаполненные и сухие селеновые выпрямители рассчитаны на номинальное напряжение 250 кВ и средний выпрямленный ток 7,5 мА. Декадный генератор снабжен 12 компенсирующими индуктивностями, размещенными между зарядными колоннами и предназначенными для компенсации емкостных токов. Все вышеперечисленные элементы komponуются в виде колонны с градиентными кольцами,

омическим делителем и высоковольтным электродом. Под высоковольтным электродом на ускорительной трубке размещены высокочастотный ионный источник и система его питания и управления. Высоковольтная структура размещена в стальном баке диаметром 3 м, заполненным газовой смесью, состоящей из азота (75 %) и углекислого газа (25 %), до давления 10–12 атм.

Питание каскадного генератора осуществляется от вертикального преобразователя частоты ВПЧ-50-8000 через два повышающих трансформатора типа ОМ-50/90. В связи с тем, что трансформаторы размещены вне котла, питание на КГ-2,5 с них подается через специальные высоковольтные высокочастотные электровводы.

Ускорение пучка происходит в ускоряющей трубке с равномерным электростатическим полем. Ускоряющая трубка состоит из трех секций. Первая, низкоэнергетичная, секция склеена из фарфоровых изоляторов с коническими электродами из нержавеющей стали. Диаметры апертуры электродов уменьшаются от 150 мм на входе до 60 мм на длине 550 мм в первой секции. На всем остальном протяжении ускоряющей трубки диаметр апертуры электродов остается 60 мм. Секции ускоряющей трубки длиной около 900 мм разделены диафрагмами с встроенными постоянными магнитами. Эти магниты создают в районе диафрагм поперечное магнитное поле для сепарации электронов и вторичных заряженных частиц.

В зависимости от эксперимента режим работы ускорителя может быть непрерывным или циклическим. В исследованиях спектра запаздывающих нейтронов и измерениях их относительных выходов требуется прерывание пучка ионов за время долей секунды, для этого на ионопроводе смонтирован прерыватель, обеспечивающий перекрытие пучка на 0,27 с.

В настоящее время ускоритель оснащен высокочастотным ионным источником, обеспечивающим получение пучков протонов и дейтронов с интенсивностью до 1 мА. Ускоритель КГ-2,5 оснащен соответствующей вакуумной системой, ионопроводом, электромагнитным анализатором и устройствами формирования и диагностики ионных пучков.

При наладке каскадного генератора были экспериментально определены паразитные емкости конструкции установки и отдельных ее узлов.

Известно, что наличие паразитных емкостей конструкции каскадных генераторов существенно влияет на величину холостого хода установки. Одной из мер борьбы с этим эффектом является включение компенсирующих индуктивностей между зарядными колоннами генератора.

Целью данной работы является проведение физических экспериментов на ускорителе на каскадном генераторе КГ-2,5 с регистрацией основных параметров в режиме реального времени.

**2. Алгоритм решения поставленной задачи.** Алгоритм представляет собой модернизацию системы управления ускорителем. В частности, разработка программного обеспечения и разработка принципиальных электрических схем и внедрение их в систему привели к положительным результатам в регистрации параметров ускорителя в реальном времени и дали возможность дальнейшего их усовершенствования. Первоначальное внедрение ЭВМ в систему привело к возможности лишь регистрации параметров, в то время как большинство других электронно-вычислительных машин приведены в систему автоматического управления и являются основным узлом управления всей системой. Таким образом, технические требования к модернизируемой системе на данном этапе высоки.

Блок-схема существующей системы представляет собой блок-схему самого ускорителя. Достоинства и недостатки первоначальной системы следующие.

Достоинством существующей системы является непосредственно ее наличие, так как до ее появления основные параметры, регистрируемые на ускорителе, производились оператором. Сейчас же сбор и обработка информации производится на ЭВМ, причем при заданной частоте опроса датчиков. Программа, заложенная в ЭВМ для регистрации параметров, работает циклически до ее прерывания оператором.

Несмотря на это, собственно система имеет ряд существенных недостатков:

- система не является автоматизированной, что не дает возможности перевести весь контроль управления ускорителем при помощи ЭВМ;
- на данный момент не отлажена полностью система сбора и обработки информации. Некоторые из показателей, выводимых на дисплей, не сходятся с реальным значением (хотя ошибка невелика,  $\pm 5\%$  от реального значения);

– из предыдущего пункта следует, что коэффициенты умножения, заложенные в программе, недостаточно точны.

В целом в ходе изучения автоматизации перед исследователями встали задачи: во-первых, наиболее полно учесть влияние разнообразных ситуаций на физический эксперимент как при нормальной работе ускорителей, так и работы в условиях отказа отдельных устройств, что особенно важно; во-вторых, представить многолетний опыт, накопленный лабораторией, в виде алгоритмов, удобных для дальнейшего анализа.

При таком подходе следует придерживаться нескольких правил, или критериев:

– мелочей при разработке автоматизированной системы управления не может быть. Каждая мелкая работа (функция), не реализованная на объекте автоматизации, приведет рано или поздно к ошибкам всей системы;

– идеалом системного подхода является автоматизированная система, когда оператор является только наблюдателем и вмешивается в работу системы лишь в крайних случаях, во время введения задания на установку начальных условий или данных;

– система должна проектироваться открытой, т.е. позволять вводить новые функции или реализовываться завершёнными этапами;

– система должна учитывать появление новой техники и позволять модернизировать технические средства без полной переделки программного продукта;

– программные средства должны проектироваться по блочно-модульному принципу с использованием всех возможностей операционной среды, а также с использованием полной сервисной, информационной и драйверной поддержки;

– нельзя допускать использование нестандартной и недоработанной техники.

При этом наиболее важным представляется выработка четких критериев оптимальной работы как отдельных систем и устройств, так и ускорителя в целом. Естественно, что общим критерием остается:

– наибольшее время безотказной работы;

– надежность при выполнении заданных условий физического эксперимента;

– быстрое отслеживание любых изменений.

При непрерывном регулировании для поддержания постоянства параметров необходимо учитывать имеющиеся противоречия между достижимой точностью параметров и времени безотказной работы регуляторов.

Целью данной работы является модернизация системы автоматического управления ускорителя КГ-2,5. Для этого осуществляется разработка новой, более усовершенствованной автоматизированной системы, аналогичной по назначению предыдущей. При этом производится упрощение конструкции, а также повышение надежности функционирования за счет внедрения ЭВМ в систему. Разработке подлежат:

- программное обеспечение для сбора и обработки параметров в реальном времени,
- электронная схема устройства для ввода и вывода аналоговой и цифровой информации в ЭВМ,
- электронная схема сопряжения отдельных узлов системы с ЭВМ.

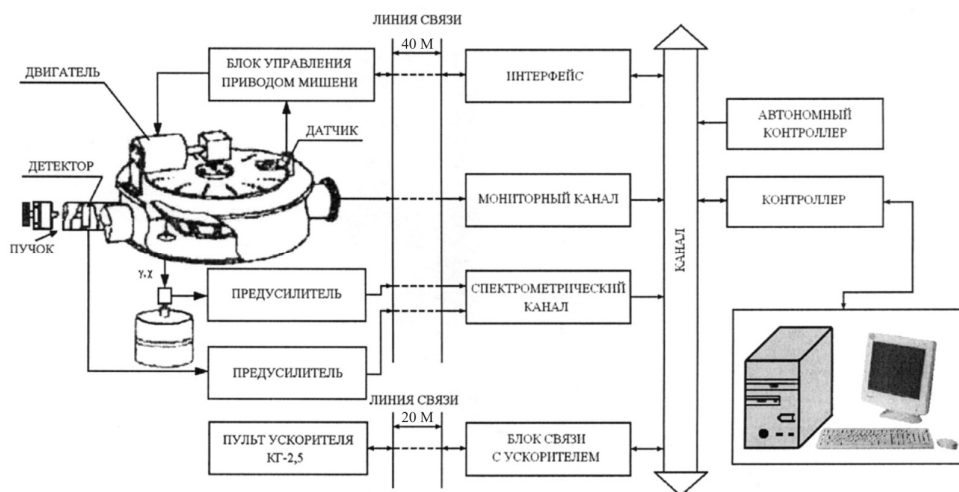


Рис. 2. Блок-схема модернизированной системы

На рис. 2 представлена блок-схема модернизированной системы, но при этом, чтобы не усложнять блок-схему, показан лишь один датчик, с которого производится съем и обработка информации. Так, на ускорителе КГ-2,5 всего установлено 23 датчика.

Система накопления и представления информации должна обеспечивать накопление информации от всех измерительных каналов



в течение заданного времени экспозиции, контроль за ходом накопления и представления результатов измерения в виде графического изображения.

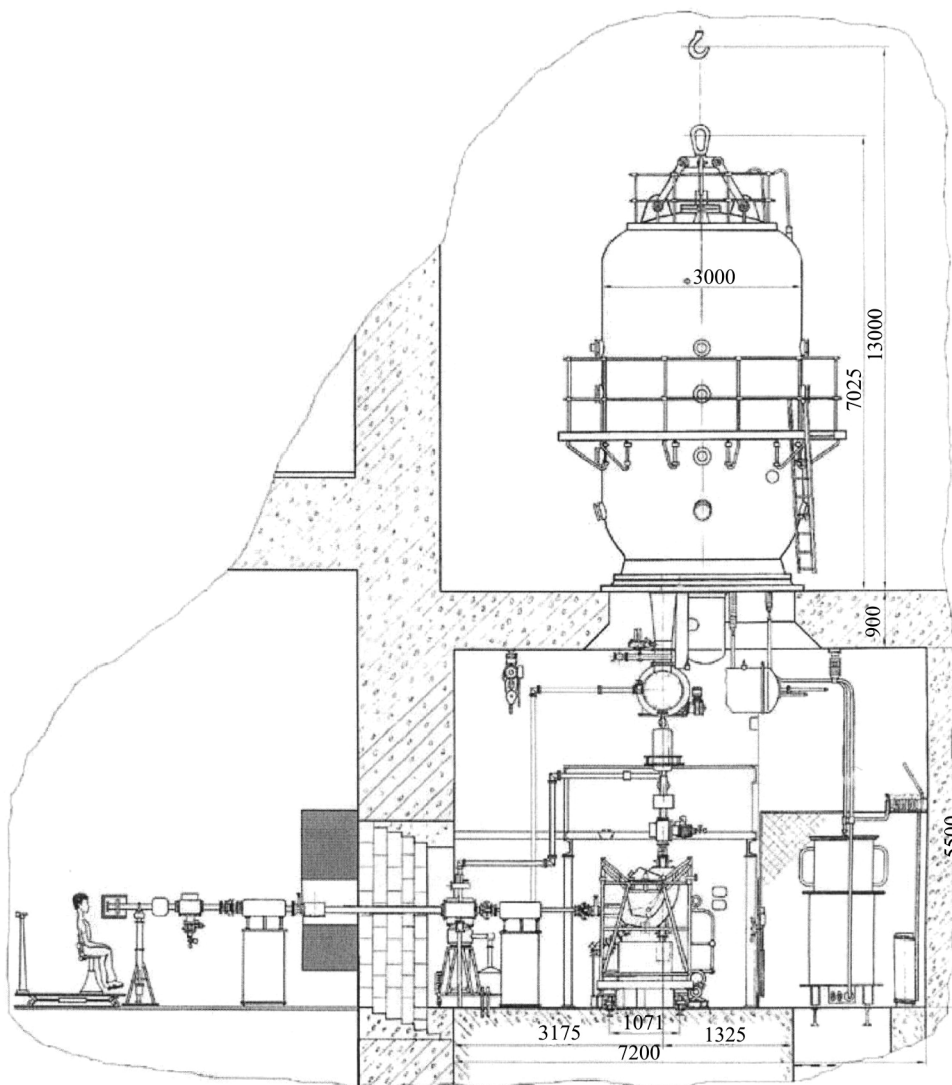


Рис. 3. Структура ионного тракта при работе ускорителя с литевой мишенью на горизонтальном ионопроводе и сепарированном пучке

На рис. 3 представлена структура ионного тракта при работе ускорителя с литевой мишенью.

## **2.1. Алгоритм работы ускорителя**

Проведенный анализ алгоритмов управления решает только часть задачи, относящуюся к нормальной работе ускорителя. Для определенности алгоритмы рассматриваются на примере управления ускорителем КГ-2,5 в части регистрации основных параметров. На рис. 2, отображающем структурную схему программы-диспетчера для управления рабочими режимами, показан алгоритм работы программы и подпрограмм, реализующих полную автоматизацию системы.

На рис. 4 приведен алгоритм работы программы, разработанной в ФЭИ, для регистрации 6 основных параметров ускорителя [5].

Система математического обеспечения управления ускорителя КГ-2,5 должна обеспечивать:

- сбор, регистрацию и представление на экране дисплея накапливаемой информации в режиме реального времени;
- ввод в ЭВМ изменения частоты опроса датчиков;
- построение в графическом виде накопленных данных.

**3. Практические значения при достижении максимальной энергии пучка.** Рассмотрим график гамма-излучения при достижении энергии пучка 1,96 МэВ. Максимальное значение энергии пучка, которого получилось добиться на практике, составляет около 2 МэВ. По техническим данным из разных источников следует, что для этого типа ускорителя максимальная энергия пучка составляет примерно 2,0–2,2 МэВ. Следовательно, энергия пучка, которая была достигнута на практике, практически совпадает с техническими требованиями.

Диапазон во время регистрации параметров во втором случае, в отличие от первого, при достижении энергии пучка 1,2 МэВ выбран специально таким, что отображает резкий скачок почти всех фиксируемых параметров. Скачок произошел во время отладки системы. Отладка и настройка системы для контроля данных параметров производится и на данном этапе, так как сейчас программа, как говорилось ранее, отображает не все параметры с достаточно высокой точностью. Этот вопрос касается и узлов сопряжения. Вообще, во время работы ускорителя при достижении энергии пучка около 2 МэВ, подобных явлений, отражающих работу ускорителя в реальном времени, не наблюдалось.

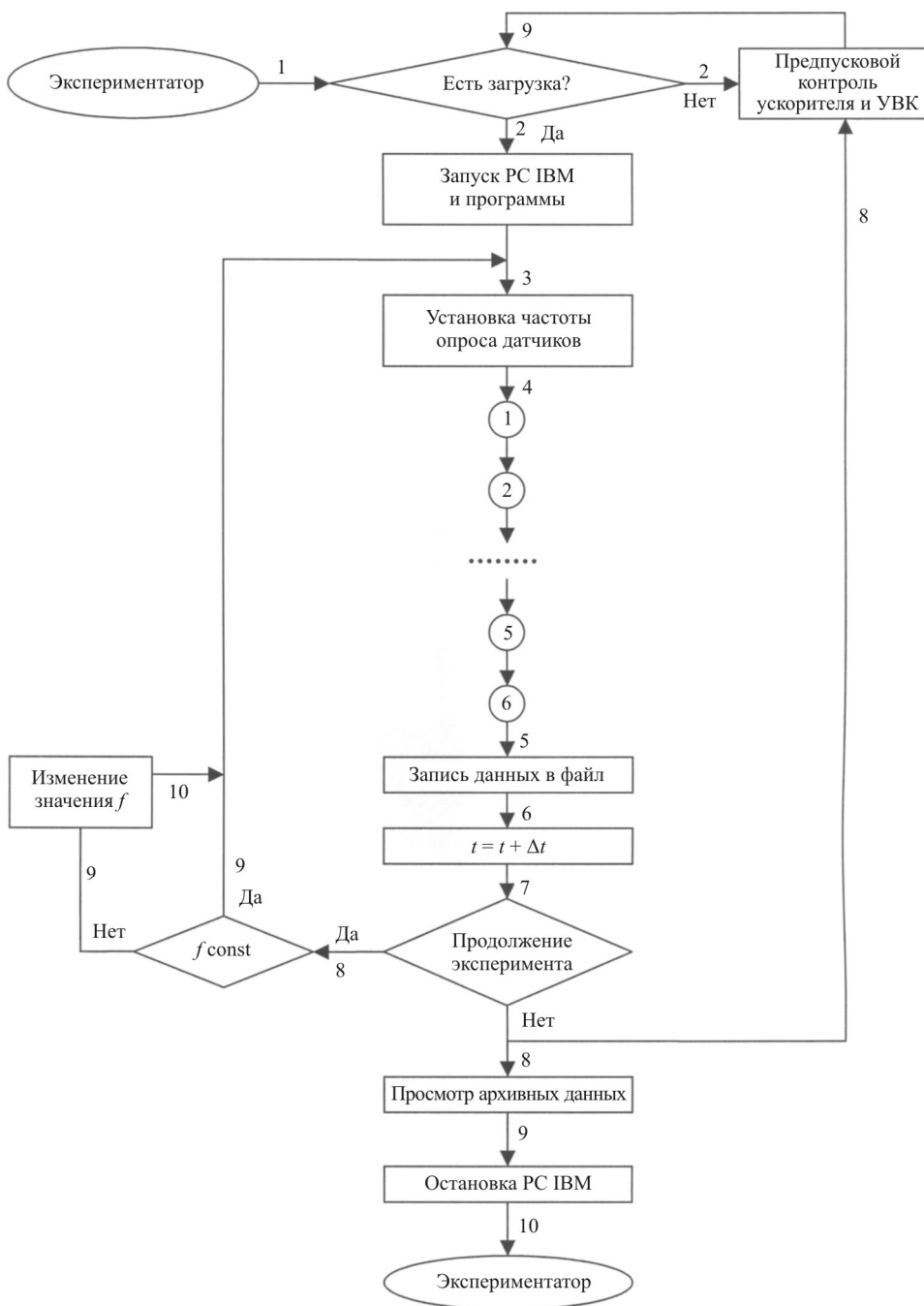


Рис. 4. Алгоритм работы программы

Из всех параметров, фиксируемых на ЭВМ, резкий всплеск касается только гамма-излучения и тока пучка. Изменение остальных параметров во время работы было незначительным. На рис. 5 приведен график зависимости гамма-излучения на уровне высоковольтного электрода от времени во втором случае, когда энергия пучка была достигнута на ускорителе, 1,96 МэВ. Первый случай не рассматривается, так как работа ускорителя была стабильной при достижении энергии пучка 1,2 МэВ.

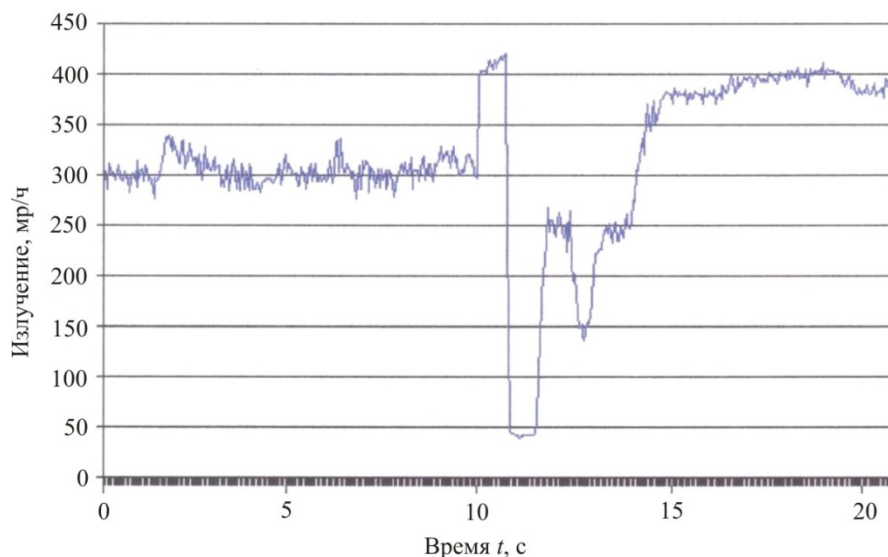


Рис. 5. График зависимости гамма-излучения на уровне высоковольтного электрода от времени

Из проведенных экспериментов следует, что ускоритель КГ-2,5 может вполне стабильно работать на максимально допустимых рабочих значениях, т.е. с энергией пучка 2 МэВ. Остается открытым вопрос в отладке системы, а точнее конкретных ее узлов, что, например, касается программной части, приведения системы к стабильному режиму работы и, может быть, через какое-то время — дальнейшего разгона ускорителя, получения большей энергии пучка. Но при этом нельзя забывать об обеспечении стабильности работы ускорителя, пусть даже на чуть более низких энергиях.

**4. Заключение.** В ходе написания статьи были сформулированы и изложены следующие вопросы: устройство и основные характеристики высоковольтного ускорителя под давлением КГ-2,5; принцип

действия и принципиальные схемы основных контрольно-измерительных приборов, применяемых на ускорителе КГ-2,5; структура и назначение измерительного комплекса на базе ЭВМ, используемой в этой установке.

Была разработана структурная схема модернизированной системы, проведены расчеты схем и изготовлено устройство сопряжения измерительных датчиков с ЭВМ.

### **Список литературы**

1. Акоста В., Кован К., Грэм Б. Основы современной физики. – М.: Просвещение, 1981. – 495 с.
2. Фраэнфельдер Г., Хенли Э. Субатомная физика. – М.: Мир, 1979. – 735 с.
3. Индукционный ускоритель электронов – бетатрон / Л.М. Ананьев [и др.]. – М.: Госатомиздат, 1961. – 149 с.
4. Линейные ускорители / О.А. Вальднер [и др.]. – М.: Атомиздат, 1969. – 249 с.
5. Интенсивный направленный источник нейтронов на базе электростатического ускорителя КГ-2,5 для нейтроно-захватной терапии / В.Н. Кононов, М.В. Боховенко, В.И. Регушевский, В.А. Романов // Труды XI совещания; ГНЦ РФ «Физико-энергетический институт». – Обнинск, 1996. – С. 119–122.

### **References**

1. Akosta V., Kovan K., Grehm B. Osnovy sovremennoj fiziki [Fundamentals of modern physics]. Moscow, Prosveshchenie, 1981. 495 p.
2. Fraehnfel'der G., Henli E.H. Subatomnaya fizika [Subatomic physics]. Moscow, Mir. 1979. 735 p.
3. Anan'ev L.M. i dr. Indukcionnyj uskoritel' ehlektronov – betatron [The induction electron accelerator – betatron]. Moscow, Gosatomizdat, 1961, 149 p.
4. Val'dner O.A. i dr. Linejnye uskoriteli [Linear accelerator]. Moscow, Atomizdat, 1969, 249 p.
5. Kononov V.N., Bohovenko M.V., Regushevskij V.I., Romanov V.A. Intensivnyj napravlenyj istochnik nejtronov na baze ehlektrostaticheskogo uskoritelya KG-2,5 dlya nejtrono-zahvatnoj terapii [Intensive directional neutron source based on electrostatic accelerator KG-2.5 for neutron capture therapy]. Trudy XI soveshchaniya, GNC RF Fiziko-ehnergeticheskij institute. Obninsk. 1996, pp. 119–122.

Получено 21.09.2018

### **Об авторе**

**Гусев Сергей Сергеевич** (Москва, Россия) – соискатель, Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65, e-mail: gs-serg@mail.ru).

### **About the author**

**Sergei S. Gusev** (Moscow, Russian Federation) – Ph.D. Student, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences (117997, Moscow, Profsouznaya st., 65, e-mail: gs-serg@mail.ru).