

**НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ПО АВТОМАТИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И УПРАВЛЕНИЮ  
В БЕТАТРОННЫХ УСТАНОВКАХ**

В. М. РАЗИН

Бетатронная установка имеет в своем составе несколько отдельных узлов, правильное взаимодействие которых обеспечивает достаточно эффективную работоспособность ускорителя как источника электронов с энергией порядка нескольких десятков Мэв. Как известно [1], этими узлами являются электромагнит бетатрона и его система силового питания, системы инжекции и смещения, вакуумная система и т. д. Здесь рассматриваются вопросы, связанные с разработкой и исследованием главным образом систем инжекции и смещения и отчасти систем питания электромагнита, в которых автор принимал непосредственное участие в 1954—1968 гг., работая в стенах Томского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института им. С. М. Кирова (ТПИ).

Процесс ускорения электронов в индукционном ускорителе типа бетатрона можно условно разделить на три этапа: ввод, ускорение и вывод или сброс ускоренных электронов на мишень. При питании электромагнита бетатрона от электрической сети промышленного назначения эти этапы определенным образом синхронизируются по отношению к переменному магнитному полю в межполюсном пространстве бетатрона с помощью автоматических систем управления.

В отдельных случаях целесообразным является импульсное питание электромагнита. Поскольку электромагнит бетатрона потребляет, как правило, значительные реактивные мощности, то при этом необходимо коммутировать импульсы тока порядка нескольких десятков килоампер при напряжении порядка десятков киловольт. Один из методов генерации электрических импульсов с подобными параметрами заключается в использовании разряда емкостного накопителя энергии на индуктивность электромагнита через коммутирующие газоразрядные приборы типа игнитронов и тиратронов. При коммутации больших токов требуется обеспечить равномерное распределение нагрузки на параллельно включенные газоразрядные приборы, что может быть достигнуто с помощью уравнительных реакторов, анодных делителей тока и т. п. В нашей работе [2] предложена методика расчета уравнительного реактора, которая обеспечивает защиту от перегрузок одного исправного газоразрядного прибора при выходе из строя второго параллельно включенного прибора. Уменьшение перегрузки в этом случае достигается за счет автоматического увеличения индуктивности в разрядном контуре. Появление обратного напряжения на аноде газоразрядного прибора после перезаряда емкости на индуктивность электромагнита иногда приводит к появлению обратных зажигания и нару-

шению исправного действия коммутатора. В работах [3, 4] рассмотрено решение задачи гашения обратного напряжения на аноде газоразрядного прибора, коммутирующего импульсный ток через обмотки электромагнита. В наших работах [5, 6, 7] совместно с И. П. Чучалиным, В. А. Кочегуровым и др. рассмотрены вопросы исследования, расчета и моделирования других типов импульсных генераторов с емкостными накопителями энергии.

Упомянутые выше процессы ввода инъекции и вывода или сброса электронов в бетатроне обеспечиваются электрическими импульсными схемами инъекции и смещения. Нами была разработана инженерная методика расчета схем инъекции и смещения [8, 9, 10, 11, 12], которая была проверена экспериментально и получила практическое внедрение в целой серии бетатронов, изготовленных в ТПИ.

В результате теоретических расчетов и экспериментальных исследований нами было показано, что для формирования импульсов напряжения инъекции целесообразно использовать методы и схемы, применяющиеся в радиолокации. Источник импульсов высокого напряжения в первоначальных моделях бетатрона в виде «воздушного» трансформатора был заменен нами импульсным трансформатором с железным сердечником. Нами было высказано предположение, что строгая «прямоугольность» напряжения, как это требуется в радиолокационных генераторах импульсов, не обязательна, и это значительно ослабило требования к магнитному материалу сердечника импульсного трансформатора. Расчеты показали, что сердечник импульсного трансформатора может быть изготовлен из обычной трансформаторной стали Э4А толщиной 0,35 мм. Опыты подтвердили справедливость этих расчетов [9]. Было изготовлено несколько образцов таких импульсных трансформаторов с двойной повышающей обмоткой, что позволило избежать применения накального трансформатора с высоковольтной изоляцией. Импульсный трансформатор с железным сердечником позволил создать генератор импульсов с малым внутренним сопротивлением, что дало возможность без существенного снижения амплитуды импульсов напряжения обеспечить работу при токах в импульсах, близких к оптимальному. Одновременное повышение напряжения в импульсе при возможности работать с оптимальным током эмиссии катода пушки позволило повысить интенсивность излучения бетатронов на порядок и более по сравнению со схемой инъекции на базе «воздушного» трансформатора. С 1953 г. на всех, без исключения, бетатронах ТПИ стали применяться разработанные нами схемы инъекции на базе использования импульсных трансформаторов с железным сердечником. Нами были изготовлены образцы малогабаритных импульсных трансформаторов с амплитудой напряжения до 100 кВ при длительности импульса 5—10 мксек. Позднее методы расчета и технология изготовления были значительно усовершенствованы и под руководством Н. И. Воробьева и В. А. Москалева в ТПИ были изготовлены импульсные трансформаторы на напряжения 400 кВ и более. Нами также была разработана инженерная методика расчета схемы смещения для различных способов сброса ускоренных электронов на мишень [9, 10], причем были получены расчетные формулы с учетом радиационного торможения электронов в процессе ускорения применительно к ускорителям на большие энергии [11, 12]. Эта методика нашла практическое применение при конструировании схем смещения на многих типах бетатронов, изготовленных в ТПИ.

При наличии значительных по величине случайных изменений напряжения питающей электрической сети в ряде случаев целесообразным является применение автономной стабилизации таких параметров в системе инъекции, как амплитуда импульсного напряжения и ток эмиссии катода инжектора бетатрона. Разработанные нами системы

стабилизации указанных параметров инжекции [13, 14] были исследованы экспериментально, причем коэффициент стабилизации оказался достаточно высоким.

Очень важный вопрос общей стабилизации параметров бетатрона как источника жесткого электромагнитного излучения впервые рассматривался нами в работе [15]. Здесь были установлены главные причины неустойчивости таких выходных параметров бетатронной установки, как интенсивность и энергия излучения, и намечены и исследованы различные способы стабилизации и оптимизации излучения. Позднее в этих исследованиях в качестве вспомогательного оборудования использовался разработанный под руководством автора имитатор бетатрона [16].

Проблема общей стабилизации и оптимизации выходных параметров бетатрона рассматривалась нами с использованием различных подходов. Одна из важнейших статических характеристик бетатрона как объекта регулирования, представляющая зависимость интенсивности излучения от фазы инжекции, имеет ярко выраженный экстремум, т. е. максимальное значение выхода излучения достигается при некоторой строго определенной в данных условиях фазе импульса напряжения инжекции по отношению к переменному магнитному полю в межполюсном пространстве бетатрона. Условия, определяющие оптимальную в смысле обеспечения максимума излучения фазу инжекции, могут случайным образом изменяться под действием различного рода возмущающих сил.

В некоторых случаях использования бетатрона главным является интегральное действие излучения, как, например, в дефектоскопии толстостенных изделий, в медицине и т. д. В этих условиях желательно поддерживать автоматически максимум излучения при наличии случайных изменений возмущающих воздействий. Впервые идея экстремального регулирования интенсивности излучения бетатрона была высказана автором совместно с Е. М. Беловым в 1959 году [17, 18]. В дальнейшем эта идея получила широкое развитие в наших работах [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27] и в работах других авторов. Как известно из области технической кибернетики, существует два принципиально различных способа автоматического регулирования и управления. В разомкнутых системах автоматического управления компенсация возмущающих воздействий обеспечивает высокое быстродействие. Подобного рода устройства разработаны и исследованы нами в двух вариантах. Аналоговый вариант управляющего вычислительного устройства (УВУ) и теория его действия рассмотрены в работах [15, 21, 25]. Аналоговый вариант управляющего вычислительного устройства имеет простое устройство, но диапазон компенсации возмущающих воздействий со стороны напряжения питающей сети оказывается ограниченным в пределах 5—8%. Несколько более сложный цифроаналоговый вариант УВУ [28, 29] является и более совершенным.

Длительные испытания последнего устройства показали, что цифроаналоговое УВУ является надежным и эффективным средством обеспечения оптимальных условий инжекции в бетатроне. При наличии случайных быстрых изменений напряжения сети в пределах до  $\pm 12,5\%$  это устройство обеспечивает повышение среднего значения интенсивности излучения бетатрона приблизительно на 25% по сравнению со всеми другими известными способами стабилизации и оптимизации. Цифроаналоговое УВУ обеспечивает компенсацию по двум параметрам в виде напряжения на обмотках электромагнита бетатрона и амплитуды импульсного напряжения инжекции одновременно.

В замкнутых системах автоматического регулирования и управления используется принцип обратной связи. Подобного рода системы

обеспечивают более точное регулирование и управление, однако вследствие малого быстродействия среднее значение выхода излучения не может быть получено близким к максимальному. Оптимальные решения могут быть получены путем использования комбинированных методов автоматического регулирования и управления. В наших работах [26, 27] рассмотрены основные принципы построения таких комбинированных систем управления применительно к стабилизации и оптимизации интенсивности излучения.

Рассмотренное выше цифроаналоговое УВУ оказалось также применимым и для стабилизации другого главного параметра бетатрона в виде максимальной энергии тормозного излучения [31].

Развитием указанных выше подходов к решению проблемы стабилизации и оптимизации ускорителя заряженных частиц является рассмотрение возможностей более широкого использования идей, методов и средств технической кибернетики в ускорительной технике, изложенное в других работах [27, 31, 32].

Как известно из области технической кибернетики, метод моделирования является наиболее эффективным средством при решении задач анализа и синтеза систем автоматического регулирования и управления в различных областях техники. Поскольку теоретические расчеты экстремальных систем регулирования при наличии существенных нелинейностей являются весьма затруднительными, оказалось целесообразным эти исследования выполнить на аналоговых вычислительных машинах. Проведенные при участии и под руководством автора исследования [21, 25, 27, 33, 34, 35] позволили установить оптимальные соотношения основных параметров экстремальных регуляторов для бетатронных установок наиболее экономным способом и с малыми затратами времени. Методы электронного моделирования оказались также весьма эффективными и при решении задач, связанных с транспортировкой электронных пучков в ускорителях заряженных частиц на большие энергии. Составленная нами математическая модель позволила учесть в этих исследованиях влияние пространственного заряда пучка на траектории крайних электронов, определяющих габариты пучка электронов [36, 37, 38, 39].

Выполненные под руководством и при участии автора исследования показали, что применение современных методов и средств технической кибернетики к бетатронной установке или к любому другому типу ускорителя заряженных частиц дает чрезвычайно плодотворные результаты и способствует созданию экономичных, высоконадежных и достаточно качественных типов ускорителей, пригодных для практического применения в промышленности, медицине и в других областях использования.

В заключение следует отметить, что в решении многих рассмотренных выше вопросов принимали непосредственное участие И. П. Чучалин, В. П. Шерстобитов, Е. М. Белов, Н. Я. Макаров, Н. В. Триханова, В. А. Кочегуров, В. Л. Рябухин и многие другие сотрудники Томского политехнического института, которым автор выражает свою искреннюю благодарность. Автор также искренне благодарит заслуженного деятеля науки и техники РСФСР доктора физико-математических наук профессора А. А. Воробьева, являющегося инициатором в постановке целого ряда новых подходов в отношении автоматизации ускорителей и научным консультантом в области ускорительной техники, за постоянное внимание к работе и обсуждение полученных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. М. Ананьев, А. А. Воробьев, В. И. Горбунов. Индукционный ускоритель электронов—бетатрон. М., Госатомиздат, 1961.
2. В. М. Разин. К расчету уравнительного реактора для параллельной работы игнитронов. Известия ТПИ, т. 76, стр. 148—151, 1954.
3. И. П. Чучалин, В. М. Разин. Расчет гашения обратного напряжения в импульсной схеме. Журнал «Электричество», № 9, стр. 39—41, 1957.
4. И. П. Чучалин, В. М. Разин. Расчет гашения обратного напряжения в импульсной схеме. Известия ТПИ, т. 87, стр. 236—246, 1957.
5. И. П. Чучалин, В. М. Разин. О параллельной работе игнитронов в импульсном режиме. Известия ТПИ, т. 87, стр. 247—251, 1957.
6. И. П. Чучалин, В. А. Кочегуров, В. М. Разин. К вопросу о расчете анодных делителей тока. Журнал «Электричество», стр. 54—57, № 8, 1959.
7. В. А. Кочегуров, В. М. Разин, А. А. Терещенко, Н. В. Триханова, П. М. Щанин. Расчет электронно-оптических систем и исследование импульсного генератора с емкостными накопителями энергии с помощью средств аналоговой вычислительной техники. Рукопись депонирована в НИИ ЭИР, М., 1966.
8. В. М. Разин. Расчет элементов схемы инжекции электронов в бетатроне. Известия ТПИ, т. 87, стр. 164—177, 1957.
9. В. М. Разин. Расчет элементов схемы смещения электронов в бетатроне. Известия ТПИ, т. 87, стр. 178—186, 1957.
10. В. М. Разин. Упрощенные схемы инжекции и смещения электронов в бетатроне. Известия ТПИ, т. 87, стр. 193—200, 1957.
11. В. М. Разин. Учет радиационного торможения в расчете смещения на мишень ускоренных в бетатроне электронов. Известия ТПИ, т. 87, стр. 187—192, 1957.
12. В. М. Разин. Учет радиационного торможения в расчете смещения на мишень ускоренных в бетатроне электронов. Журнал технической физики, т. 27, № 8, стр. 1845—1846, 1958.
13. В. М. Разин. Электронный стабилизатор импульсного напряжения на инжекторе бетатрона. Известия ТПИ, т. 87, стр. 216—218, 1957.
14. В. М. Разин. Стабилизатор тока эмиссии. Известия ТПИ, т. 87, стр. 201—205, 1957.
15. В. М. Разин. Стабилизация излучения бетатрона. Известия ТПИ, т. 87, стр. 206—215, 1957.
16. В. М. Разин, В. П. Шерстобитов. Транзисторный имитатор бетатрона. Известия ТПИ, т. 141, стр. 119—121, 1965.
17. Е. М. Белов, В. М. Разин. Экстремальный регулятор интенсивности излучения бетатрона. Известия вузов, «Приборостроение», т. 2, стр. 52—55, 1959.
18. Е. М. Белов, В. М. Разин. Ответ на письмо в редакцию. Известия вузов, «Приборостроение», т. 3, № 3, 1960.
19. В. М. Разин, В. П. Шерстобитов. Некоторые схемные элементы полупроводникового оптимизатора интенсивности гамма-излучения бетатрона. Известия ТПИ, т. 141, стр. 114—118, 1965.
20. В. М. Разин. Некоторые вопросы экстремального регулирования излучения бетатрона. Тезисы докладов I научно-технической конференции факультета автоматизации и вычислительной техники, Томск, ТПИ, стр. 27—28, 1966.
21. В. М. Разин. Некоторые вопросы теории специализированного вычислительного устройства для автоматизации бетатрона и методика электронного моделирования экстремального регулятора интенсивности излучения бетатрона в присутствии помех. Рукопись депонирована в НИИ ЭИР, М., Д-384, 1967.
22. В. П. Шерстобитов, Н. Я. Макаров, В. М. Разин, А. С. Бобровский, В. М. Рейдер. Экстремальный регулятор интенсивности гамма излучения бетатрона на полупроводниковых триодах. Тезисы докладов на V межвузовской конференции по электронным ускорителям 17—21 марта 1964 г., Томск, ТГУ, стр. 24, 1964.
23. А. А. Воробьев, В. М. Разин, Н. Я. Макаров. Об экстремальном регулировании интенсивности излучения бетатронов. Тезисы докладов второго симпозиума по экстремальным задачам 25—28 мая 1965 г. в Риге. Институт электроники и вычислительной техники. АН ССР, Рига, стр. 51, 1965.
24. В. М. Разин. Автоматическая система поиска максимума интенсивности излучения бетатрона. Тезисы докладов третьего симпозиума по экстремальным задачам, Томск, ТГУ, стр. 11—12, 1966.
25. В. М. Разин. Некоторые вопросы теории специализированного аналогового вычислительного устройства для автоматизации бетатрона и методика электронного моделирования экстремального регулятора интенсивности излучения бетатрона в присутствии помех. II Всесоюзная конференция по аналоговой вычислительной технике. Тезисы — аннотации докладов. М., изд-во ВНИИЭМ, стр. 44, 1966.
26. В. М. Разин, Н. Я. Макаров. О некоторых направлениях дальнейшей автоматизации бетатронов. Известия ТПИ, т. 155, стр. 21, 1968.

27. В. М. Разин, Н. Я. Макаров. О некоторых вопросах использования принципов технической кибернетики в ускорительной технике. Итоги исследований по кибернетике. К 50-летию Советской власти. Труды межвузовской научной конференции, посвященной 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Томск, изд-во ТГУ, стр. 161—170, 1968.

28. В. М. Разин, В. Л. Рябухин. Преобразователь импульсного и синусоидального напряжения в цифровой код для схем оптимизации излучения бетатрона. Сб. «Современные методы исследований», материалы научной конференции, Томск, вып. 1, стр. 277—280, изд-во ТГУ, 1968.

29. В. М. Разин, В. Л. Рябухин. Специализированное вычислительное устройство для оптимизации условий инжекции в бетатроне. Тезисы докладов межвузовской конференции по теории и принципам построения цифровых моделей и ЦММ, Таганрогский радиотехнический институт, Таганрог, стр. 75—76, 1968.

30. А. А. Воробьев, В. М. Разин. Система регулирования энергией ускоренных в бетатроне электронов по отклонению. Известия ТПИ, т. 156, 1969.

31. А. А. Воробьев, В. М. Разин, Н. Я. Макаров. О применении методов технической кибернетики в ускорительной технике. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, секция «Автометрия, автоматическое управление, вычислительная техника». Ротапринт СО АН СССР, Новосибирск, стр. 38, 1966.

32. А. А. Воробьев, В. М. Разин, Н. Я. Макаров. О некоторых вопросах применения принципов технической кибернетики в ускорительной технике. Труды международного симпозиума по бетатронам 5—10 сентября 1966 г., Институт физики плазмы. АН ЧССР, Прага, стр. 80—82, 1967.

33. В. М. Разин, Н. Я. Макаров, В. П. Шерстобитов. Электронное моделирование экстремального регулятора бетатрона на МН-7. Известия ТПИ, т. 138, стр. 216—219, 1965.

34. Б. И. Балышев, Н. Я. Макаров, В. М. Разин, Е. В. Ярыгин. Об электронном моделировании систем экстремального управления излучением бетатрона. Тезисы докладов на VI межвузовской научной конференции по электронным ускорителям, Томск, изд-во ТГУ, стр. 47, 1966.

35. В. П. Шерстобитов, В. М. Разин, Н. Я. Макаров, М. Самошкин. Исследование работы экстремального регулятора интенсивности гамма-излучения бетатрона на модели МН-7. Тезисы докладов на V межвузовской конференции по электронным ускорителям 17—21 марта 1964 г., Томск, ТГУ, стр. 22, 1964.

36. В. М. Разин, Н. В. Триханов. Расчет протяженных электронных пучков с учетом пространственного заряда на аналоговой вычислительной машине. Журнал «Электронная техника», сер. 1, «Электроника СВЧ», вып. 2, стр. 60—66, 1966.

37. В. М. Разин, Н. В. Триханова. Электронное моделирование протяженных пучков эллиптического сечения с учетом пространственного заряда. «Радиотехника», № 5, стр. 62—66, 1966.

38. В. А. Кочегуров, В. М. Разин, Н. В. Триханова, П. М. Щанин. Расчет электронно-оптических систем с помощью средств аналоговой вычислительной техники. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых ученых и специалистов, секция «Автометрия, автоматическое управление, вычислительная техника». Ротапринт СО АН СССР, Новосибирск, стр. 69, 1966.

39. В. А. Кочегуров, В. М. Разин, Н. В. Триханова, П. М. Щанин. Автоматизация расчетов электронно-оптических систем с помощью средств аналоговой вычислительной техники. Итоги исследований по кибернетике. К 50-летию Советской власти. Труды межвузовской научной конференции, посвященной 50-летию Великой Октябрьской социалистической революции. Томск, изд-во ТГУ, стр. 171—184, 1968.