

ВЫВОД ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ БЕТАТРОНА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Часть II

ВЫБОР РОДА НАПРЯЖЕНИЯ НА ПЛАСТИНАХ ОТКЛОНЯЮЩЕГО КОНДЕНСАТОРА

Б. А. Кононов

(Представлено профессором, доктором А. А. Воробьевым)

На отклоняющем конденсаторе в конце ускорительного цикла должно быть напряжение, обеспечивающее вывод электронов из камеры бетатрона. В литературе нет никаких сведений о том, какое напряжение — постоянное, переменное или импульсное — подается на пластины отклоняющего конденсатора. Удобнее использовать постоянное напряжение ввиду двух важных преимуществ перед импульсным. Во-первых, просто получения постоянного высокого напряжения порядка 30—50 кВ по сравнению с импульсным и удобство в эксплуатации, так как в какой бы момент времени ни были сброшены электроны на конденсатор (в случае если энергия электронов задается изменением фазы расширения электронной орбиты), на нем всегда имеется требуемое напряжение. При импульсном питании отклоняющего конденсатора необходима подстройка фазы напряжения на пластинах с фазой сброса электронов. Во-вторых, импульсное питание конденсатора потребует синхронизации импульса напряжения на пластинах и импульса сброса электронов, что также усложняет электрические схемы бетатрона. Однако питание постоянным напряжением имеет существенный недостаток, а именно тот, что в момент инжекции электронов в ускорительной камере будет сильное электрическое поле рассеяния конденсатора, которое должно влиять на движение электронов с энергией 20—30 кэВ, тем более, что инжектор и конденсатор располагаются почти на одинаковых радиусах. $R_{инж} = 157—159$ мм, $R_{конд} = 160—163$ мм. Необходимо поэтому выяснить, насколько сильно влияние напряжения на конденсаторе в момент инжекции.

На рис. 1 представлена схема опытов по исследованию влияния электрического поля конденсатора на процесс инжекции. Ускоренные электроны сбрасываются в конце цикла на конденсатор и частично на инжектор, рентгеновское излучение контролируется наперстковой ионизационной камерой, установленной в максимуме розы излучения.

На рис. 2 представлена зависимость интенсивности излучения от напряжения на отклоняющем конденсаторе (кривая 1). Излучение резко уменьшается с ростом напряжения и пропадает полностью, хотя до рабочей величины напряжения ~ 30 кВ еще далеко. Причиной резкого уменьшения излучения является сброс выходящих из инжектора электронов сильным электрическим полем рассеяния конденсатора, расположенного вблизи инжектора. Действительно, через некоторое время работы на серебряном слое ускорительной камеры появилось размытое темное пятно диаметром 40 мм, расположенное позади конденсатора и обусловленное бомбардировкой неускоренными электронами.

Увеличивая ток эмиссии J_e инжектора (см. таблицу и рис. 2),

можно несколько поднять величину излучения (рис. 2, кривая 2), очевидно, несмотря на сброс электронов полем конденсатора, большее число электронов захватывается в ускорение, так как большее и вбрасывается. Но этот эффект имеет место лишь при малом напряжении. При напряжении больше 10 кВ излучение едва заметно и практически интереса не представляет.

Несколько слабее влияние электрического поля конденсатора на интенсивность излучения при установке его позади инжектора. Зависи-

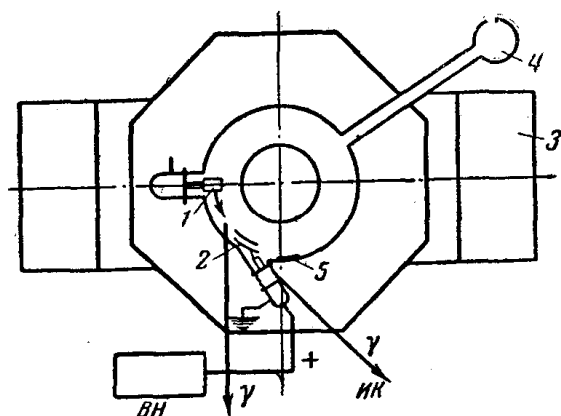


Рис. 1. Исследование влияния напряжения на конденсаторе на процесс инжекции (схема опыта).

1 — инжектор; 2 — отклоняющий конденсатор; 3 — электромагнит бетатрона; 4 — вакуумный насос; 5 — пятно от сброшенных электронов;

ИК — ионизационная камера; γ — направление рентгеновского излучения; ВН — блок высокого напряжения.

При напряжении на конденсаторе около 1,5 кВ наблюдается небольшое возрастание интенсивности излучения. Очевидно, слабое электрическое поле рассеяния конденсатора улучшает условия инжекции, создавая некоторое фокусирующее электрическое поле и очищая объем в вакуумной камере от излишних заряженных частиц.

При отрицательном напряжении на отклоняющем конденсаторе этого эффекта не наблюдается, излучение быстро падает до нуля (рис. 3, кривая 5, $R=162$ мм).

Таким образом, наличие напряжения на отклоняющем конденсаторе в момент инжекции ухудшает условия захвата электронов в ускорение. Интенсивность излучения ускорителя уменьшается, и при необходимом для вывода электронов напряжении $U \approx 30$ кВ излучение исчезает. Следовательно, питание отклоняющего конденсатора постоянным напряжением не может быть использовано для бета-

мощность интенсивности рентгеновского излучения бетатрона от напряжения на конденсаторе представлена на рис. 3. Кривые соответствуют различному положению конденсатора по радиусу: 1 — внутренний край конденсатора расположен на $R=162$ мм; 2 — $R=160$ мм; 3 — $R=158$ мм; 4 — $R=156$ мм. По мере продвижения конденсатора к равновесной орбите крутизна спада кривых растет, т. е. поле конденсатора сильнее влияет на процесс инжекции. На $R=156$ мм конденсатор мешает выпускаемым электронам не только электрическим полем, но и непосредственно электродами; общая интенсивность излучения начинает падать.

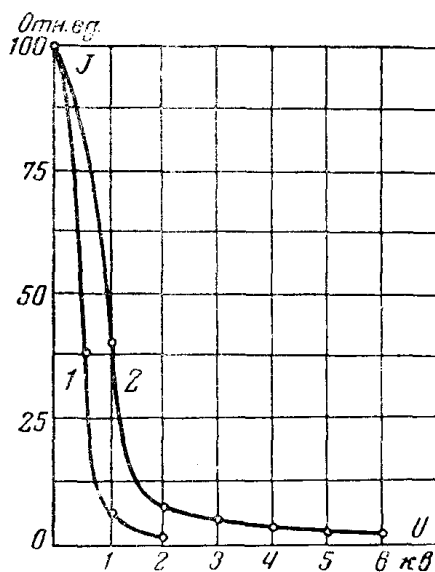


Рис. 2. Зависимость интенсивности излучения J от постоянного напряжения на конденсаторе.

| | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|------|------|-----|
| $U, \text{кВ}$ | 0 | 0,5 | 1,0 | 1,0 | 2,0 | 2,0 | 3,0 | 3,0 | 4,0 | 4,0 | 5,0 | 6 |
| $J, \text{мкА}$ | 19 | 19 | 19 | 24 | 24 | 28,5 | 28,5 | 30 | 30 | 28,5 | 28,5 | 29 |
| $J, \text{отн. ед.}$ | 100 | 37 | 6 | 40 | 1,5 | 6,5 | 4 | 4,5 | 2,5 | 3,0 | 2,5 | 2,0 |

трона, имеющего инжектор с внешней стороны равновесной орбиты. Возможность работы конденсатора на постоянном напряжении при расположении инжектора внутри круга равновесной орбиты не исследовалась ввиду отсутствия инжекторов такой конструкции.

Уменьшить влияние электрического поля конденсатора на процесс инжекции можно подбором места расположения инжектора и конденсатора. Из сравнения рис. 2 и 3 видно, что электрическое поле конденсатора в первом случае влияет на процесс инжекции гораздо сильнее, чем во втором, когда конденсатор расположен позади инжектора. Следовательно, конденсатор нужно устанавливать позади инжектора. Однако расстояние между инжектором не должно быть большим. Например, нельзя располагать их диаметрально противоположно, так как тогда в момент инжекции нужно обходить два различных препятствия, захват электронов в ускорение ухудшается и интенсивность излучения установки падает.

Постоянное напряжение на отклоняющем конденсаторе мешает инжекции электронов. Нужно снять напряжение на конденсаторе в момент впуска электронов в ускорение, т.е. необходимо создать импульсное питание конденсатора. Идеальной формой импульса напряжения на отклоняющем конденсаторе была бы прямоугольная, причем импульс должен подаваться в конце ускорительного цикла. Тогда в момент инжекции напряжение на конденсаторе равно нулю, а в момент расширения электронной орбиты на конденсаторе будет постоянное напряжение. Этот импульс должен иметь возможность перемещаться синхронно с расширительным импульсом. Амплитуда импульса должна регулироваться, максимальное напряжение должно быть порядка 30—50 кВ. Длительность импульса определяется продолжительностью сброса ускоренных электронов на конденсатор. В наших опытах при использовании симметричной расширительной обмотки, усиливающей поток в центральном сердечнике электромагнита бетатрона, длительность импульса рентгеновского излучения, равная времени сброса электронов на мишень, от которой регистрируется излучение, составляет около 20 мксек.

Получить прямоугольный импульс амплитудой 50 кВ и длительностью свыше 20 мксек довольно трудно. Из-за отсутствия газоразрядных приборов с необходимой характеристикой на такое напряжение импульс придется трансформировать. При этом неизбежно будет искажение прямоугольного импульса — он станет трапецеидальным или даже синусоидальным. Плоский участок на вершине импульса — рабочий участок — уменьшится, следовательно, необходимо заведомо увеличивать длительность импульса напряжения по сравнению с длительностью импульса излучения, что в свою очередь потребует сильноточных газоразрядных приборов и громоздкого импульсного трансформатора.

Для исследования возможности работы отклоняющего конденсатора на импульсном напряжении использована импульсная схема (рис. 4), в которой формирующая линия разряжается через импульсный трансформатор. Вентилем является тиратрон типа ТГ 8/3000, поджигание ко-

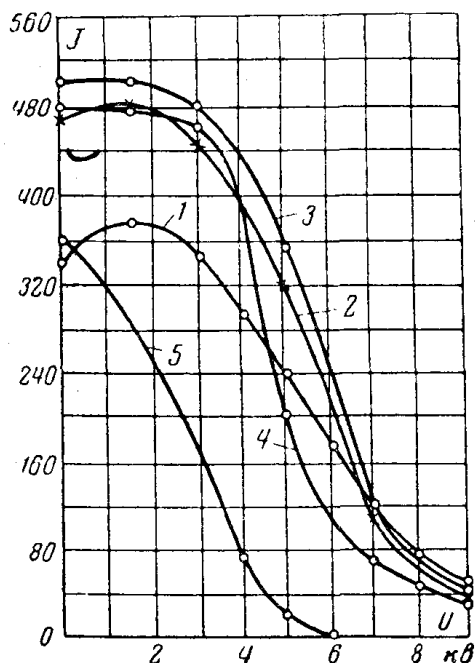


Рис. 3. Влияние напряжения на конденсаторе, расположенном позади инжектора, на интенсивность излучения.

того производится от пикового трансформатора, питающегося от фазовращательного моста, позволяющего изменять момент зажигания тиратрона, чтобы получить импульс напряжения на конденсаторе в любой момент ускорительного цикла. Схема опытов по исследованию влияния импульсного напряжения на процесс инжекции подобна аналогичным опытам на постоянном напряжении (рис. 1).

Если импульсы напряжения подается на отклоняющий конденсатор во время, далекое от момента инжекции электронов, то, естественно, условия захвата электронов в ускорение не нарушаются. Это справедливо до тех пор, пока импульс не будет приближен к импульсу инжекции на $5-10^\circ$ (250—500 мксек). При дальнейшем сближении импульсов интенсивность рентгеновского излучения бетатрона уменьшается вначале

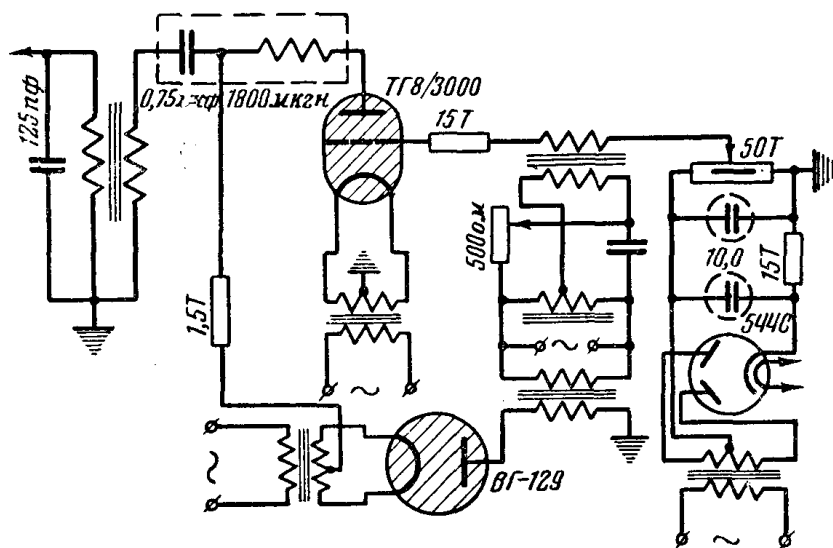


Рис. 4. Принципиальная схема импульсного напряжения.

медленно, затем все быстрее и пропадает полностью при совмещении их. Характер зависимости интенсивности излучения от величины напряжения на конденсаторе при совпадении импульсов подобен зависимости при постоянном напряжении. Этот факт еще раз подтверждает, что напряжение на конденсаторе именно в момент инжекции нарушает условия устойчивого движения электронов по круговой орбите. Если напряжение на конденсатор будет подано после того, как электронный пучок сфокусируется на равновесной орбите и электроны приобретут некоторую скорость (500—1 000 *кв*), электрическое поле рассеяния конденсатора не способно нарушить движения электронов.

Таким образом, импульсное напряжение может быть использовано для питания отклоняющего конденсатора. Возможность вывода электронного пучка из камеры ускорителя при питании отклоняющего конденсатора импульсным напряжением исследовалась нами. Импульсное напряжение получалось от схемы, собранной по рис. 4. Ускоренные электроны были сброшены на стенку вакуумной камеры (камера не имела патрубков для выхода электронного пучка в атмосферу). Сброс электронов был весьма неустойчивым из-за слабой синхронизации импульсов смещения и напряжения на отклоняющем конденсаторе. В частности, нестабильность была обусловлена нечетким запуском тиратронов в обеих схемах, поджигаемых импульсами напряжения от двух различных пиковых трансформаторов, сердечники которых набраны из обычной трансформаторной стали. Фронт поджигаемых импульсов не был достаточно крутым и это вызвало разброс во времени поджигания тиратронов. Чтобы сделать поджигание тиратронов четким, мы отказались от запускающих пиковых трансформаторов. Они были заменены двумя запертыми мультивибраторами, отпирающимися от одного пикера с пер-

малловым сердечником, установленным в магнитном поле ускорителя [1]. Это позволяет сделать поджигание тиратронов более четким. Меняя время задержки импульса в каждом из мультивибраторов, можно совмещать момент запуска тиратронов или задавать любому из импульсов опережение или отставание относительно другого. Это необходимо потому, что сброс электронов на отклоняющий конденсатор начинается не сразу после запуска тиратрона в схеме смещения, а спустя 10—15 мксек, когда ток в расширительной обмотке нарастет до некоторой величины.

Сброс ускоренных электронов конденсатором на стенку камеры значительно улучшился, что можно было наблюдать по свечению камеры в месте падения электронного пучка (внутренняя поверхность камеры была посыпана порошком ZnS, светящимся при электронной бомбардировке). Свечение пропадало, если импульс напряжения на конденсаторе опережал во времени импульс смещения электронов или если амплитуда напряжения уменьшалась ниже величины, при которой был сброс электронов.

Сброс пучка ускоренных электронов наблюдался также по сильному рентгеновскому излучению в направлении светящегося пятна. Однако «вывод» электронов (пучок не был выпущен в атмосферу) не мог быть удовлетворительным по двум причинам. Во-первых, длительность импульса напряжения на отклоняющем конденсаторе меньше длительности импульса сброса ускоренных электронов на конденсатор, следовательно, неизбежно должны быть потери электронов. Во-вторых, очень нечетко поджигался игнитрон, хотя напряжение поджигания было 800—1 000 в. Начало импульса излучения колебалось относительно момента поджигания тиратрона в схеме смещения. Колебания достигали 5—10 мксек. Это также уменьшало вывод электронов, так как время перекрытия импульсов уменьшалось. Необходимо было заменить игнитрон мощным водородным тиратроном или значительно увеличить длительность импульса напряжения на конденсаторе. В последнем случае импульсный трансформатор был бы весьма громоздким (при длительности импульса $\tau=50$ мксек вес одного только железа трансформатора составляет свыше 80 кг. Проблему можно решить проще, заменив импульсную схему напряжения, работающую на газоразрядных приборах, одним большим пиковым трансформатором. В этом случае в момент инъекции электронов напряжение на отклоняющем конденсаторе мало (рис. 5), но будет быстро возрастать к концу ускорения электронов. Именно такое напряжение нам и необходимо для вывода электронов. Но питание отклоняющего конденсатора от пикового трансформатора значительно проще схемы импульсного питания. Пиковый трансформатор питается от сети переменного тока (рис. 6). В целях регулировки фазы пика напряжения используется фазовращательный мост, но это ненамного усложняет схему.

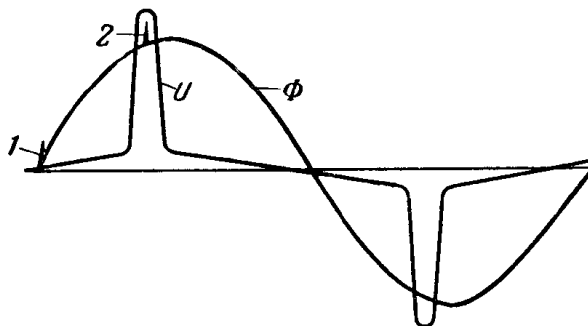


Рис. 5. Взаимное расположение импульса инъекции 1, расширительного импульса 2, напряжения от пикового трансформатора U и магнитного потока бетатрона Φ .

Во-первых, длительность импульса напряжения на отклоняющем конденсаторе меньше длительности импульса сброса ускоренных электронов на конденсатор, следовательно, неизбежно должны быть потери электронов. Во-вторых, очень нечетко поджигался игнитрон, хотя напряжение поджигания было 800—1 000 в. Начало импульса излучения колебалось относительно момента поджигания тиратрона в схеме смещения. Колебания достигали 5—10 мксек. Это также уменьшало вывод электронов, так как время перекрытия импульсов уменьшалось. Необходимо было заменить игнитрон мощным водородным тиратроном или значительно увеличить длительность импульса напряжения на конденсаторе. В последнем случае импульсный трансформатор был бы весьма громоздким (при длительности импульса $\tau=50$ мксек вес одного только железа трансформатора составляет свыше 80 кг. Проблему можно решить проще, заменив импульсную схему напряжения, работающую на газоразрядных приборах, одним большим пиковым трансформатором. В этом случае в момент инъекции электронов напряжение на отклоняющем конденсаторе мало (рис. 5), но будет быстро возрастать к концу ускорения электронов. Именно такое напряжение нам и необходимо для вывода электронов. Но питание отклоняющего конденсатора от пикового трансформатора значительно проще схемы импульсного питания. Пиковый трансформатор питается от сети переменного тока (рис. 6). В целях регулировки фазы пика напряжения используется фазовращательный мост, но это ненамного усложняет схему.

Трансформатор, дающий импульс до 50 кВ, рассчитывался как обычный низковольтный пиковый трансформатор, поэтому потребовалась экспериментальная подстройка воздушного зазора δ и толщины пакета S_2 для получения расчетной величины напряжения и удовлетворительной формы импульса. Основные размеры трансформатора и его данные представлены на рис. 7. Необходимо отметить, что если не принять особых мер, то во вторичной цепи пикового трансформатора, имеющего большую межвитковую емкость ($W_2=60\,000$) и нагруженного ем-

костью отклоняющего конденсатора, импульс напряжения вызывает колебательный процесс, который затухает недостаточно быстро. Колебания сохраняются до следующего импульса и мешают инжекции электронов, если момент инжекции совпадает с амплитудным значением гармоники. Можно ускорить затухание колебаний напряжения в цепи отклоняющего конденсатора, введя в колебательный контур активное сопротивление. Для целей гашения колебаний может быть использован делитель напряжения (рис. 6), необходимый также для контроля напряжения. Величина сопротивления делителя (5—15 Мом) подбирается

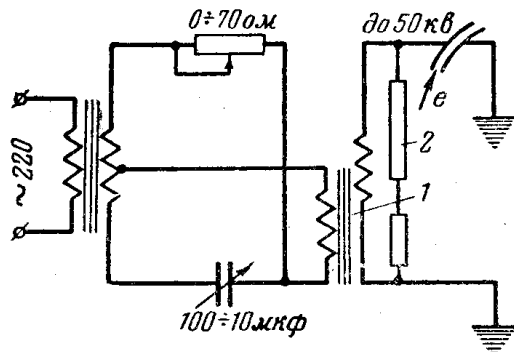


Рис. 6. Принципиальная схема питания отклоняющего конденсатора e от пикового трансформатора.

1 — пиковый трансформатор; 2 — делитель напряжения.

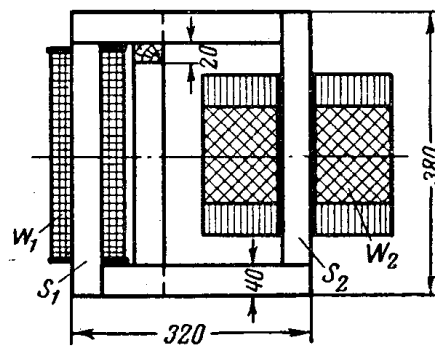


Рис. 7. Пиковый трансформатор. $W_1 = 250$, $W_2 = 60\,000$, $S_1 = 40\text{ см}^2$, $S_2 = 4\text{ см}^2$, $U_1 = 220\text{ в}$, $U_2 = 50\,000\text{ в}$.

из условия быстрого затухания колебаний, но при допустимом уменьшении напряжения, происходящем при включении активной нагрузки в цепь пикового трансформатора.

Для настройки бетатрона на вывод электронов различной энергии пик напряжения на отклоняющем конденсаторе должен перемещаться во времени. В наших опытах это достигается питанием пикового трансформатора от фазовращательного моста (рис. 6). Грубое ступенчатое перемещение пика в пределах 60° осуществляется изменением емкости; плавная подстройка в пределах одной ступени — реостатом [2]. При помощи данной схемы питания отклоняющего конденсатора осуществлен вывод электронов из бетатрона на 15 Мэв.

Автор выражает благодарность профессору Воробьеву А. А., под руководством которого проделана настоящая работа.

Литература

1. Крылов Н. Н., Импульсная техника, Техтеоретиздат, М., 1950.
2. Майоров Ф. В., Электронные регуляторы, Техтеоретиздат, М., 1956.