

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ В БЕТАТРОННОЕ УСКОРЕНИЕ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМАХ ИМПУЛЬСА НАПРЯЖЕНИЯ ИНЖЕКЦИИ

И. П. ЧУЧАЛИН

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

До настоящего времени не имеется общепринятой теории, объясняющей механизм захвата электронов в бетатронное ускорение, имеются только отдельные попытки объяснить обход электронами пушки [1,2,3,4,5,].

На процесс захвата электронов в ускорение оказывает влияние фазовая неоднородность магнитного поля по азимуту и радиусу [6, 7 и 8].

Убедительных опытных данных, подтверждающих ту или иную теоретическую предпосылку, пока еще не имеется. Поэтому полезно накопление экспериментального материала.

В нашу задачу не входит рассмотрение теоретических объяснений механизма захвата электронов. Здесь мы приведем только некоторые экспериментальные результаты, которые могут помочь в создании единой теории захвата.

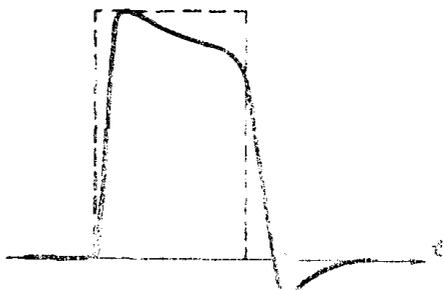


Рис. 1

У большинства современных бетатронов и синхротронов для создания импульса напряжения на электродах электронной пушки используется разряд предварительно заряженной искусственной формирующей линии на импульсный трансформатор.

При разряде формирующей линии на согласованную нагрузку импульсного трансформатора в первичной обмотке его образуется прямоугольный импульс напряжения. Вследствие наличия у им-

пульсного трансформатора индуктивности рассеяния и распределенной емкости обмоток, во вторичной обмотке создается искаженный импульс напряжения (рис. 1.) Назовем эту форму импульса „естественной формой“.

При вводе электронов в ускорение энергия их должна соответствовать значению напряженности магнитного поля. Необходимое напряжение на пушке должно удовлетворять соотношению:

$$U_{необх} = \frac{1}{2} \frac{e}{m_0} (r_0 H_0)^2, \quad (1)$$

где e — заряд электрона, m_0 — масса покоя электрона, r_0 — радиус равновесной орбиты, H_0 — напряженность магнитного поля на равновесной орбите.

Для обеспечения максимальной длительности интервала впуска электронов на пушку необходимо подавать „идеальный“ импульс напряжения (рис. 2). Высказывалось предположение, что при этом будет и максимальный выход рентгеновского излучения.

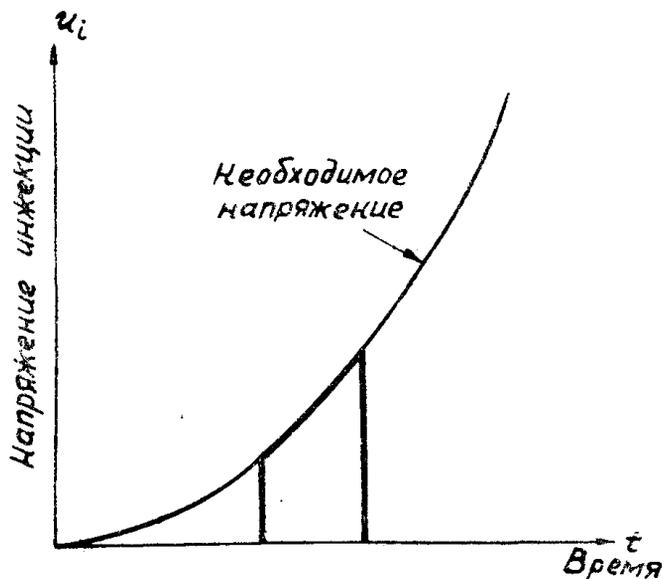


Рис. 2

Практически сформировать импульс напряжения точно такой формы затруднительно, однако, более или менее хорошее приближение получить возможно. В заметке [9] указывается на попытку приближения к идеальной форме путем создания импульса ступенчатой формы. Испытывались импульсы с одной, двумя и тремя ступеньками. Авторы сообщают об увеличении интенсивности излучения приблизительно на 15% на каждую ступеньку.

В статье [10] указывается, что при импульсе напряжения инжекции, имеющем форму нарастающего напряжения, интенсивность излучения увеличивается в пять раз по сравнению с интенсивностью при импульсе с плоской вершиной. Форма импульса напряжения и метод его получения в статье не указываются.

Изучением зависимости интенсивности излучения от формы импульса напряжения инжекции занимался Разин В. М. [11]. Он формировал и подавал на пушку импульс напряжения, близкий по форме к „идеальному“ (рис. 3). Такой импульс получался с помощью емкости определенной величины, подключаемой ко вторичной обмотке импульсного трансформатора.

Увеличение интервала впуска электронов при подаче на пушку импульса напряжения, по форме близкого к „идеальному“, при оптимальной эмиссии пушки не привело к ожидаемому увеличению интенсивности излучения. Только при пониженном накале пушки по отношению к оптимальному наблюдалось увеличение интенсивности излучения.

Обобщая полученные результаты, Разин пришел к выводу, что форма импульса напряжения инжекции при оптимальном накале пушки не влияет на максимальное значение интенсивности излучения при данной амплитуде напряжения в импульсе.

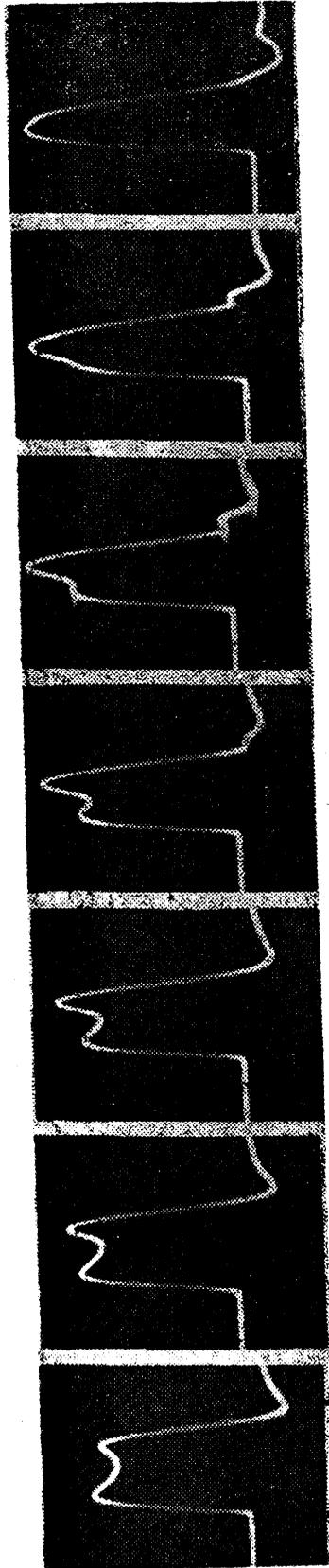


FIG. 6

Исследуя работу искусственной формирующей линии, мы нашли другой метод изменения формы импульса напряжения инжекции. На рис. 4 приведена фотография „естественной“ формы импульса, получаемого в наших опытах. Формирующая линия состояла из 10 звеньев (10 катушек и 10 конденсаторов).

При замыкании одной или нескольких катушек формирующей линии „естественная“ форма импульса искажается. На рис. 5 представлены формы импульсов при замыкании от двух до восьми катушек. Из рис. 5 видно, что форму импульса напряжения инжекции можно более или менее плавно изменять.

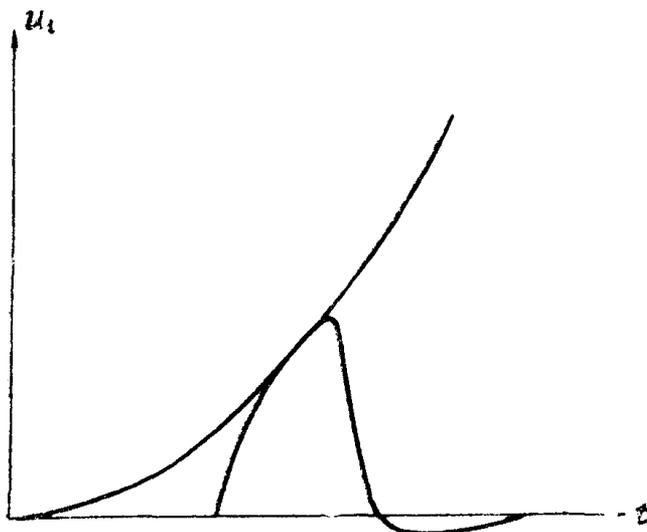


Рис. 3

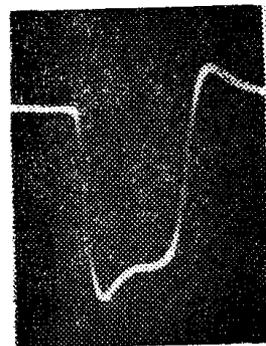


Рис. 4

Особый интерес представляют „двухпиковые“ импульсы (так мы будем в дальнейшем их называть), у которых второй пик напряжения выше первого. Возникла мысль, нельзя ли удвоить интенсивность излучения, располагая пики импульса приблизительно на одной кривой необходимого напряжения инжекции.

При экспериментальной проверке наше предположение подтвердилось. Действительно, подавая на электронную пушку 15 Мэв бетатрона „двухпиковый“ импульс напряжения, мы получили максимальную интенсивность излучения приблизительно в два раза больше по сравнению с максимальной интенсивностью, получаемой с „естественной“ формой импульса. Эмиссия пушки в обоих случаях была равной и оптимальной, амплитуды импульсов напряжения инжекции были также равны.

Увеличение амплитуды импульса напряжения инжекции сопровождалось соответствующим увеличением интенсивности излучения. На рис. 6 представлены зависимости максимальной интенсивности излучения от напряжения на пушке для „естественной“ формы импульса и для одного из „двухпиковых“ импульсов.

Интенсивность излучения зависит от соотношения высоты пиков, т. е. от формы импульса напряжения инжекции. В табл. 1 представлена зависимость интенсивности излучения от формы импульса. Во время данных опытов напряжение инжекции (амплитудное значение) было равно 40 кВ, средний ток на слой 220 мкА.

Позднее, на другом 15 Мэв бетатроне, подавая на пушку такой же „двухпиковый“ импульс напряжения, Разин В. М. также увеличил приблизительно в два раза максимальную интенсивность излучения по сравнению с излучением с „естественной“ формой импульса.

Таблица 1

Форма импульса инъекции	„Естеств.“	Замкн. 1 кат. ф. л.	Замкн. 2 кат. ф. л.	Замкн. 3 кат. ф. л.	Замкн. 4 кат. ф. л.	Замкн. 5 кат. ф. л.	Замкн. 6 кат. ф. л.	Замкн. 7 кат. ф. л.	Замкн. 8 кат. ф. л.	Замкн. 9 кат. ф. л.
Интенсивность излучения в отн. единицах	230	230	270	440	420	390	360	260	230	215

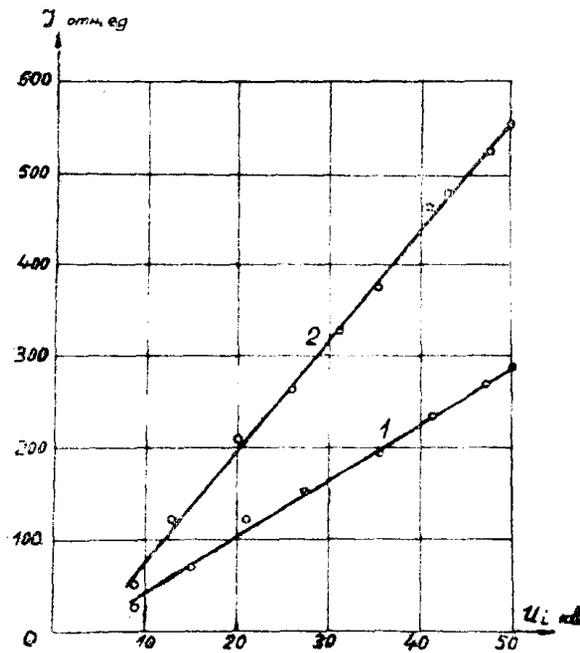


Рис. 6

График зависимости максимальной интенсивности излучения от напряжения на пушке

- 1 — при „естественной“ форме импульса,
2 — при замыкании трех катушек формирующей линии.

Обнаружив зависимость интенсивности излучения от формы импульса напряжения инжекции, мы не могли вначале объяснить причину и характер этой зависимости. Здесь могло быть две причины увеличения интенсивности излучения: или излучение увеличивается за счет наличия двух пиков у импульса, или за счет того, что при некотором соотношении высоты пиков средняя часть импульса в течение большего промежутка времени совпадает с кривой необходимого напряжения.

С целью выяснения причины увеличения интенсивности излучения мы решили исследовать захват электронов в ускорение при различных формах импульса напряжения инжекции. Нам необходимо было знать, в какой по времени части импульса напряжения инжекции происходит захват максимального количества электронов, испускаемых нитью накала пушки.

Впервые определением момента захвата электронов в ускорение занимался Разин В. М. [11] и несколько позднее Мелихов В. С. [5]. В основе метода определения момента захвата электронов в ускорение лежат следующие соображения.

В момент захвата электронов в ускорение в камере образуется круговой электронный ток, создающий свой собственный магнитный поток Φ_e . Величина этого магнитного потока Φ_e прямо пропорциональна величине электронного тока, т. е. величине заряда Q , захваченного в ускорение:

$$\Phi_e = \kappa_1 \cdot Q, \quad (2)$$

где κ_1 — коэффициент пропорциональности.

При изменении величины заряда, циркулирующего в камере, будет изменяться и величина Φ_e , что приведет к возникновению вихревого электрического поля около полюсов бетатрона. Если вблизи камеры поместить охватывающий камеру один или несколько витков провода, то на концах этих витков, кроме основного пятидесятипериодного напряжения (питание электромагнита осуществлялось от сети с частотой 50 *гц*), появится быстроменяющееся напряжение:

$$E = \kappa_2 \frac{d\Phi_e}{dt} = \kappa_1 \kappa_2 \frac{dQ}{dt}. \quad (3)$$

Очевидно, что E будет существовать во время изменения циркулирующего тока, когда $\frac{dQ}{dt} \neq 0$, т. е. при захвате или выходе электронов из процесса ускорения.

Используя разделительную цепь CR , низкочастотное пятидесятипериодное напряжение, можно отфильтровать и выделить интересующее нас высокочастотное напряжение E . Подавая напряжение E на вертикальный усилитель осциллографа и наблюдая за формой кривой $E(t)$, можно проследить за процессом изменения электронного тока в камере.

При практическом определении момента захвата возникает ряд трудностей. Так как процессы, протекающие при вводе электронов, весьма кратковременны (десятые доли микросекунды), усилитель осциллографа должен быть широкополосным (до 2—3 *мгц*). При малой же полосе пропускания усилителя форма кривой $E(t)$ может быть сильно искажена.

Величина напряжения E , индуцируемого в витках при изменении электронного тока, очень мала, поэтому осциллограф должен иметь усилитель с большим коэффициентом усиления.

В витках, охватывающих камеру, могут также наводиться паразитные высокочастотные помехи от схемы инжекции. При исследовании момента захвата электронов необходимо по возможности устранить паразитные наводки, обеспечить хорошую и стабильную работу бетатрона, так как при малой интенсивности излучения полезный сигнал также будет очень слабым и нестабильным.

На рис. 7 представлена схема Разина, с помощью которой он исследовал захват электронов в ускорение.

На полюс бетатрона накладывалось 6–10 витков изолированного провода, напряжение с которых через разделительный конденсатор C (несколько пкф) подавалось на вертикальный усилитель осциллографа ЭО-4.

Импульс напряжения от пермаллового датчика ПТ, находящегося в магнитном поле бетатрона, подавался в блок ждущей развертки Ж. Р. и запускал развертку так, что исследуемое явление (момент захвата электронов или импульс напряжения инжекции) воспроизводилось в средней части линии развертки на экране осциллографа. Фаза генерации импульса напряжения в обмотке пермаллового датчика изменялась цепью регулировки фазы инжекции.

При такой регулировке соответственно изменялась и фаза импульса напряжения инжекции. Однако относительное положение во времени начала развертки и момента генерации импульса напряжения инжекции оставалось неизменным.

Таким образом, регулировка фазы импульса инжекции на максимальный выход излучения не изменяла относительного положения изображения импульса напряжения инжекции на экране осциллографа.

Импульс напряжения инжекции подавался на вертикальный вход осциллографа ЭО-4 с реостатно-емкостного делителя D при положении 2 ключа K . Напряжение на делитель поступало непосредственно с катода электронной пушки.

Опыты Разина были недостаточно совершенными. Он заметил только изменения электронного тока, соответствующие различным участкам формы импульса инжекции. Количественной оценки характера изменения электронного тока в камере в момент захвата электронов в ускорение пока еще произвести не представлялось возможным.

Так как витки накладывались на полюс бетатрона, связь их с магнитным потоком, обусловленным изменяющимся электронным током, была слабой; полезный сигнал был также слабым. Кроме того, полезный сигнал искажался, так как усилитель осциллографа ЭО-4, используемого в опытах, не пропускает частоты свыше 200 кГц.

Более совершенными опытами по исследованию захвата электронов в ускорение были опыты Мелихова В. С. [5]. Он витки располагал не на полюсе бетатрона, а в воздушном зазоре над и под камерой. Расположение витков непосредственно около камеры увеличивало их связь с магнитным потоком, связанным с электронным током, в результате полезный сигнал также увеличивался. Вместо осциллографа ЭО-4 Мелихов использовал осциллограф „Орион“, усилитель которого рассчитан на пропускание частот до 5 мГц.

Для отфильтровывания низкочастотной переменной составляющей в цепь был включен разделительный конденсатор емкостью 0,1 мкф; для устранения возможных искажений кабель на конце нагружался на сопротивление $R = 100 \text{ ом}$ (близкое к волновому сопротивлению кабеля $\rho = 75 \text{ ом}$). Постоян-

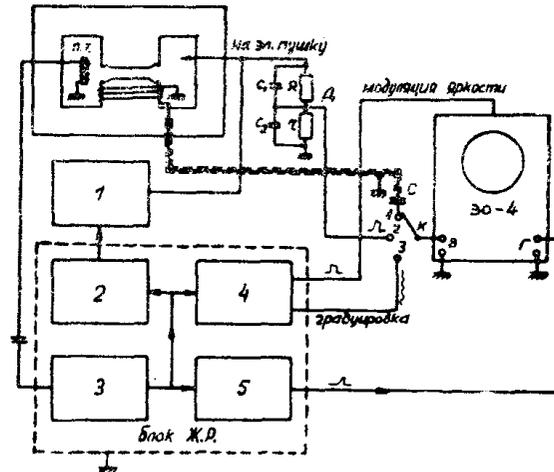


Рис. 7

Блок-схема для измерения момента захвата электронов в ускорение. 1— схема инжекции электронов, 2— генератор поджигающих импульсов, 3— преобразование импульсов и местный генератор, 4— блок модуляции яркости и градуировка, 5— блок развертки.

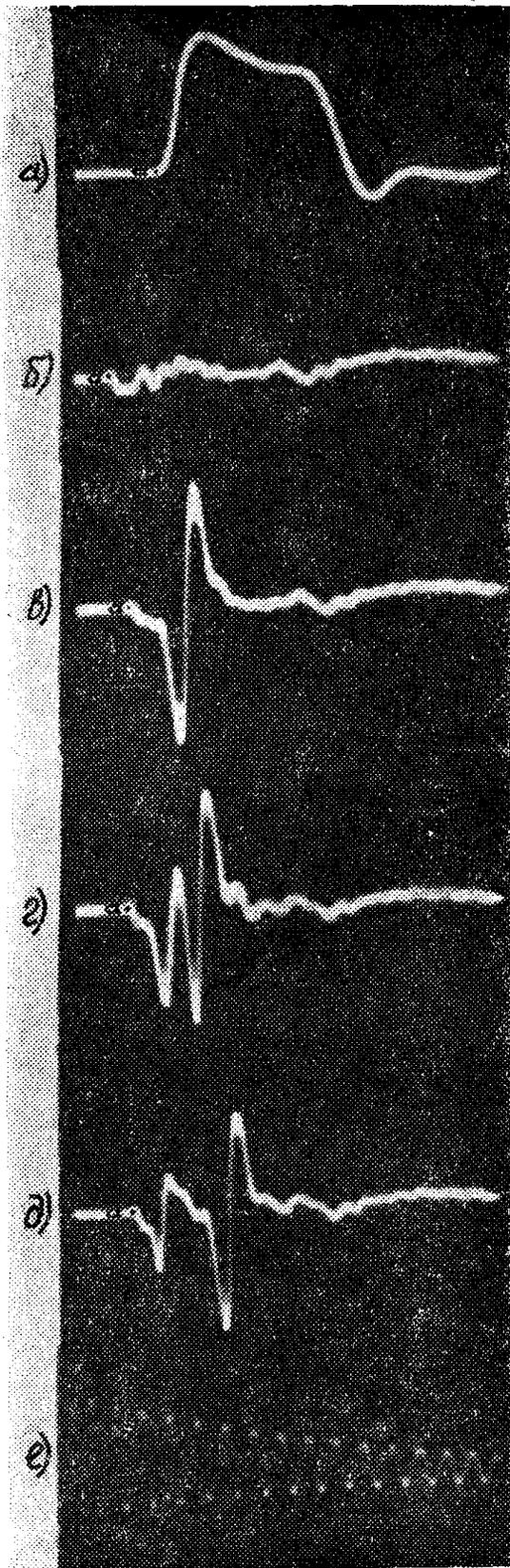


Рис. 8

ная времени цепи $RC = 10$ мксек обеспечивала почти полную фильтрацию переменного напряжения 50 гц, но не вносила заметных искажений формы исследуемых импульсов.

Нами для исследования захвата электронов в ускорение использовалась схема Разина с усовершенствованиями Мелихова. Витки тонкого изолированного провода, с которых снимался полезный сигнал, прикреплялись на наружную стенку камеры.

Связь витков с магнитным потоком, обусловленным изменяющимся электронным током, была еще более сильной, чем в опытах Мелихова, что способствовало увеличению полезного сигнала. Исследуемое напряжение с витков коаксиальным кабелем (с волновым сопротивлением 200 ом) подавалось через разделительный конденсатор емкостью $C = 0,15$ мкф на клеммы вертикального усилителя осциллографа „Орион“. Кабель на конце нагружался на сопротивление $R = 200$ ом. Применение кабеля с повышенным волновым сопротивлением также способствовало увеличению сигнала.

На рис. 8б представлена осциллограмма помех, возникающих в витках при работе схемы инъекции (накал пушки включен). Так как энергия вводимых в камеру электронов не соответствует напряженности магнитного поля на орбите (импульс напряжения инъекции сдвинут по фазе в сторону отставания относительно кривой необходимого напряжения), захвата электронов в ускорение не происходит.

При смещении фазы импульса напряжения инъекции в сторону кривой необходимого напряжения в какой-то момент времени начинает происходить захват электронов в ускорение, на сигнал помех накладывается полезный сигнал от изменения тока в камере, в результате чего форма кривой изменяется (рис. 8 в, г, д).

Полезный сигнал, очевидно, легко выделить при сравнении кривых рис. 8 б и рис. 8 в, г, д.

На рис. 8 а приведена „естественная“ форма импульса напряжения инжекции, используемая в данных опытах. Начала изменений напряжения на осциллограммах (точка „а“ рис. 8 б, в, г, д) соответствуют началу импульса напряжения инжекции (точка „а“ рис. 8 а).

Кривые (рис. 8 б, в, г, д) изображают скорость изменения заряда. В условиях эксперимента отклонение луча осциллографа вниз соответствовало нарастанию тока в камере, отклонение вверх—уменьшению тока. Из выражения (3) можно найти, что

$$Q = \frac{1}{\kappa_1 \cdot \kappa_2} \int E(t) dt. \quad (4)$$

Интеграл $\int E(t) dt$ на графике выражается площадью между кривой $E(t)$ и осью абсцисс. Отсюда следует, что отрицательные площади пропорциональны введенному заряду, а положительные площади—сброшенному заряду.

Из рис. 8 в видно, что при точном согласовании формы импульса инжекции с кривой необходимого напряжения захват электронов происходит однажды (отрицательная площадь одна).

При смещении импульса инжекции по фазе в сторону опережения пересечение его с кривой необходимого напряжения происходит в двух точках. Из рис. 8 г видно, что в этом случае ввод электронов происходит дважды (две отрицательные площади): при нарастании и спадании напряжения инжекции. При еще большем смещении по фазе импульса инжекции в сторону опережения (рис. 8 д) точки пересечения его с кривой необходимого напряжения расходятся, моменты ввода электронов, соответствующие этим точкам пересечения, также отдаляются друг от друга; ввод электронов происходит по-прежнему в двух точках (при нарастании и при спадании напряжения инжекции).

На рис. 8 е приведена осциллограмма градуировочной кривой с частотой 375 кГц, с помощью которой можно определить масштаб времени для осциллограмм (рис. 8 а, б, в, г, д).

Все описанные выше осциллограммы показывают изменение напряжения $E(t)$, наводимого в витках магнитным потоком, обусловленным изменяющимся электронным током. Напряжение $E(t)$, согласно (3), пропорционально скорости изменения заряда, циркулирующего в камере бетатрона. Очевидно, что процесс изменения заряда в камере был бы более нагляден, если осциллографировать не скорость изменения заряда, а непосредственно само изменение заряда. Для этого необходимо, очевидно, проинтегрировать напряжение $E(t)$. Это можно сделать с помощью простейшей электрической интегрирующей цепи RC . Однако использовать только такую простейшую интегрирующую цепь невозможно, так как при интегрировании резко уменьшается полезный сигнал и чувствительность осциллографа окажется недостаточной.

Для обеспечения возможности наблюдения непосредственного изменения заряда в камере Мелихов [5] использовал схему однокаскадного усилителя с интегрирующей ячейкой в анодной цепи (рис. 9).

Лампа 6С2 имеет внутреннее сопротивление около 7 ком, поэтому постоянная времени интегрирующей цепи при $R_a = 100$ ком и $C_a = 0,01$ мкф приблизительно равна 65 мксек, т. е. в 20—30 раз превышает длительность процессов, происходящих при вводе электронов в камеру. Этого вполне достаточно для получения необходимой точности интегрирования.

Нами для исследования захвата электронов при различных формах импульсов была использована такая же схема интегрирования. Отличие состояло только в том, что напряжение с витков подавалось коаксиальным кабелем с волновым сопротивлением $\rho = 200 \text{ ом}$, разделительный конденсатор имел емкость $C = 0,15 \text{ мкф}$, кабель на конце нагружался на сопротивление $R = 200 \text{ ом}$.

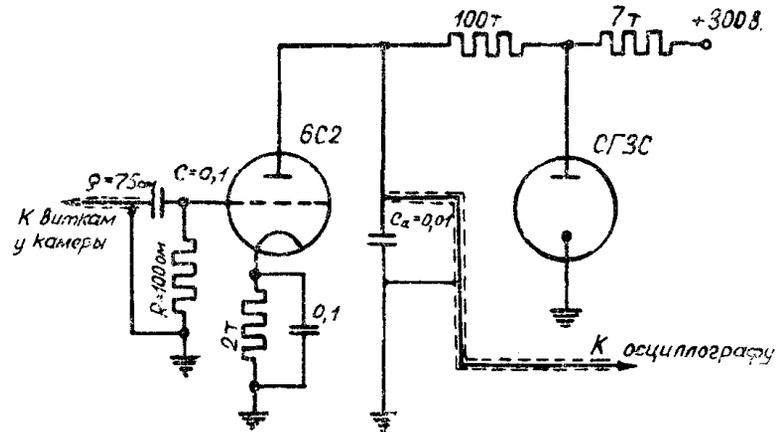


Рис. 9

На рис. 10 приведены кривые изменения заряда в камере при „естественной“ форме импульса. Осциллограмма *а* изображает форму импульса; осциллограмма *б* представляет сигнал помех; осциллограммы *в*, *г*, *д* представляют суммарные сигналы при наличии ввода электронов в камеру для трех разных значений фазы инжекции. На фотографии *е* осциллограммы *б* и *в* совмещены для выделения полезного сигнала.

На рис. 11 показаны полезные сигналы, выделенные в результате анализа осциллограмм (рис. 10). Кривая *в* соответствует точному согласованию импульса напряжения инжекции с кривой необходимого напряжения, кривая *г* соответствует опережающей фазе и кривая *д* — еще более опережающей фазе инжекции.

На рис. 12 представлены полезные сигналы, выделенные при анализе осциллограмм от двухпикового импульса. Кривая *в* соответствует точному согласованию импульса напряжения инжекции с кривой необходимого напряжения. Как видно, захват вначале начинается от второго, более высокого пика. Кривые *г*, *д*, *е* соответствуют опережающим фазам инжекции.

Рис. 13 представляет полезные сигналы, выделенные при анализе осциллограмм от другого двухпикового импульса.

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы.

1. Подавая на электроды электронной пушки вместо полусинусоидального или прямоугольного импульса напряжения „двухпиковый“ импульс, можно почти удвоить количество захватываемых в ускорение электронов, т. е. удвоить интенсивность γ -излучения от бетатрона или синхротрона с бетатронным впуском.

2. Формирование „двухпикового“ импульса напряжения достигается очень просто: для этого требуется закортить несколько катушек искусственной формирующей линии (рис. 14).

3. Так как ввод электронов происходит не только на одну равновесную орбиту, а на область орбит, лежащих внутри вакуумной камеры, существует не одна кривая необходимого напряжения, а целая область необходимых напряжений (рис. 15). Отсюда становится понятным, что для увеличения максимальной интенсивности излучения совсем не обязательно располагать

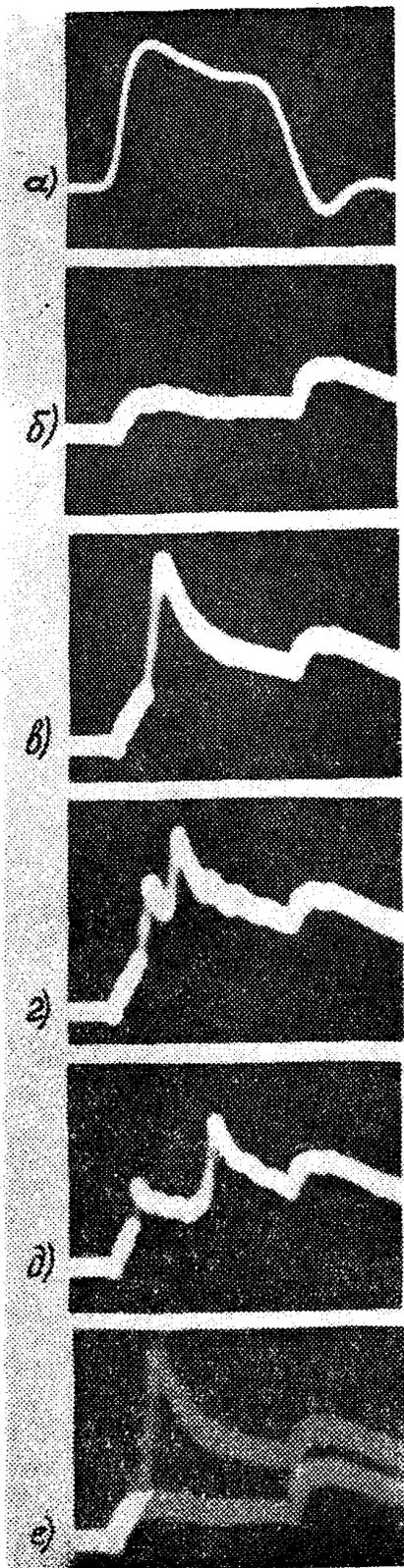


Рис. 10

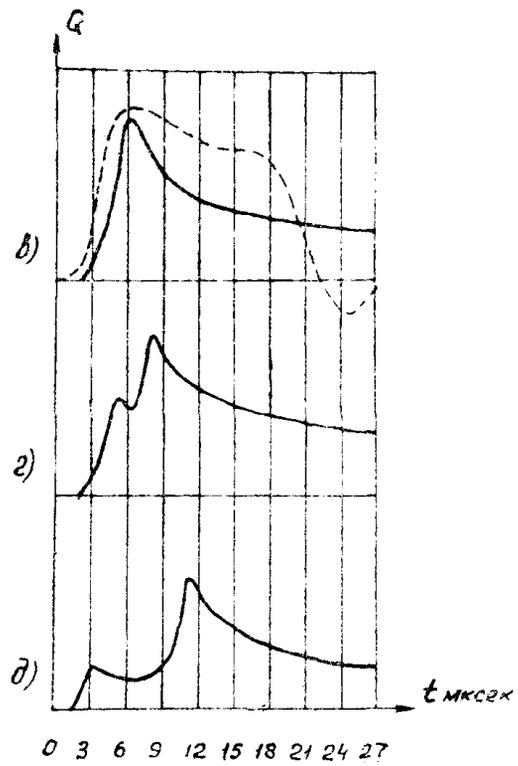


Рис. 11

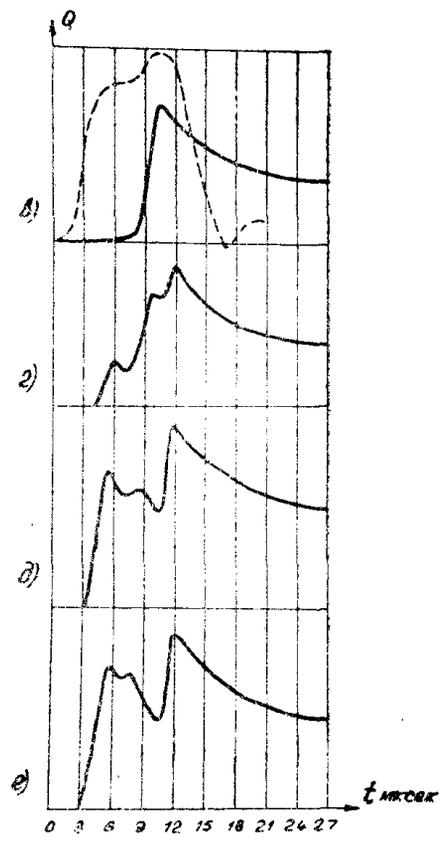


Рис. 12

оба пика импульса на одной кривой необходимого напряжения. Требуется чтобы оба пика попадали в область необходимых напряжений.

4. Захват электронов в ускорение возможен как при нарастании, так и при спадании импульса напряжения инжекции (это видно из всех осциллограмм захвата).

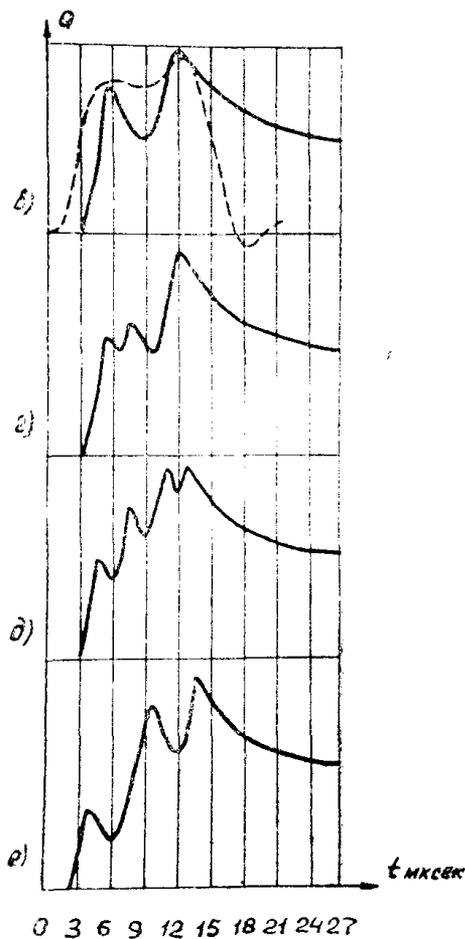


Рис. 13

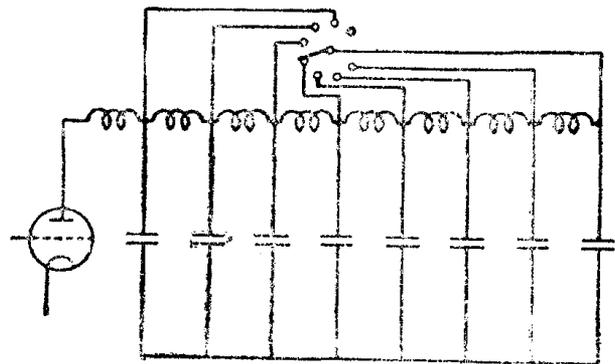


Рис. 14

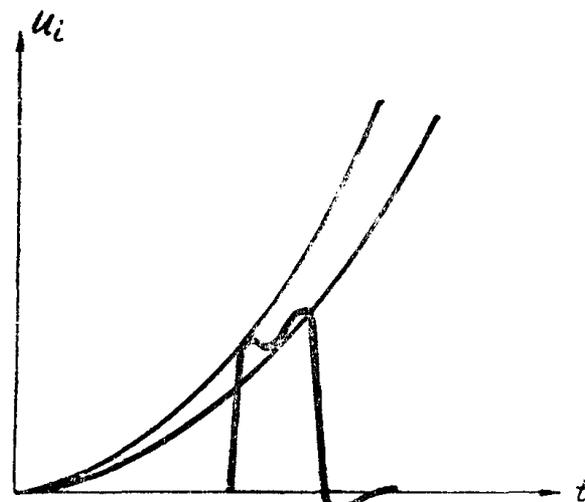


Рис. 15

5. После каждого ввода электронов происходит их сброс, причем сбрасывается значительная часть введенного заряда. Последнее обстоятельство, по-видимому, является решающей причиной обхода пушки остальными электронами.

6. Нами подтверждаются выводы Разина о том, что увеличение интервала впуска электронов в камеру не приводит к увеличению ускоряемого заряда. Увеличить ускоряемый заряд, а следовательно, и интенсивность γ -излучения можно подачей на пушку импульса напряжения, который бы многократно пересекал кривую необходимого напряжения. Эти пересечения должны быть не так частыми; электроны, оставшиеся после первых захватов, должны успеть сформироваться в устойчивые пучки, которым не повредят последующие захватываемые в ускорение заряды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kerst D. W. and Serber R. Электронные орбиты в индукционном ускорителе. Phys. Rev., 60, 53—58, 1941.

2. Kerst D. W., Процесс, помогающий захвату электронов, инжектируемых в бетатрон. *Phys. Rev.*, 74, 503, 1948.
3. Wideroe R., Исследование захвата электронов в бетатроне на 30 Мэв, *J. Appl. Phys.*, 22, 362—363, 1951.
4. Barden S. E., Замечания по резонансному затуханию при инжекции в бетатроне к синхротроне, *Proc. Phys. Soc.*, 64в, 85, 1951.
5. М е л и х о в В. С. Теоретические и экспериментальные исследования процесса захвата электронов в ускорение в бетатроне, Диссертация, Томский политехнический институт, 1954.
6. Fry D. W., Dain J., Wattson H. and Payne H. E., Конструкция и действие 30 Мэв синхротрона, *Proc. Inst. El. Eng.*, 95, 305—319, 1950.
7. Eider F. R., Gurewitsch A. M., Langmuir R. U. and Pollock H. C. 70 Мэв синхротрон. *J. Appl. Phys.*, 18, 810 1947.
8. Gregg E. C., Бетатрон с подмагничиванием и форсировкой поля. *R. S. I.*, 22, 176—182, 1951.
9. Greanias E. C. and Wukasch E. O. Техника впуска электронов в бетатрон. *Phys. Rev.* 70, 797, 1946.
10. Kerst D. W., Adams A. D., Koch A. W. and Robinson C. S. Действие 300 Мэв бетатрона, *Phys. Rev.*, 78, 297, 1950.
11. Р а з и н В. М. Разработка и исследование электрических схем управления бетатроном с целью повышения интенсивности и стабильности его излучения, Диссертация, Томский политехнический институт, 1953.