

С3450
Ш-35

e+
3450

Швец В.А.



4224/78

Б1-9-11798.

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Б1-9-11798

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 19 78

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Лаборатория нейтронной физики

Б1-9-11798

В.А.Швец

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО
ПУЧКА В СИЛЬНОТОЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ.

Рукопись поступила
в редакцию 25 июля 1978 г.

Общественный институт
ядерных исследований

г. Дубна, 1978 г.

В линейном индукционном ускорителе ЛИУ-30/250 /1/, инжекторе исследовательского импульсного реактора на быстрых нейтронах ИБР-2 /2/, средняя мощность пучка ускоренных электронов составляет 200 кВт при энергии их до 30 МэВ и частоте посылок 50 1/с. В связи с этим недопустимы потери пучка даже на уровне нескольких процентов, приводящие к активированию ускорителя и термическому повреждению его элементов.

В /3/ было отмечено, что одной из основных причин, вызывающих потери ускоряемых электронов в ЛИУ, является некогерентность инжектируемых электронной пушкой частиц. На фронте и спаде импульса инжектируются электроны с энергией от нулевой до номинальной. Электроны же с энергией $\leq (0,8 \pm 0,9) E_{\text{ном}}$ в ускорителе практически полностью теряются. Кроме того, наличие в пучке электронов с энергией, отличающейся от номинальной, существенно затрудняет формирование и проводку пучка по ускорителю.

Один из возможных путей ликвидации потерь ускоряемых электронов в тракте ЛИУ предполагает применение временного селектора (импульсного одновиткового магнитного дефлектора) на выходе электронной пушки /3/. Употребляемый здесь и ранее /3,4,9/ термин "монохроматизация электронного пучка" имеет в виду результат отделения и исключения из процесса ускорения неполноценных частиц на фронте и спаде импульса тока с помощью временного магнитного селектора с крутизной нарастания и спада поля до 10^{11} э/с /3,4/. В работе /3/ была определена связь между геометрическими размерами и физическими свойствами одновитковой цилиндрической сильноточной быстродействующей

магнитной отклоняющей системы (системы монохроматизации) : для электронного пучка с энергией до 600 кэВ, током 250 А, диаметром 2 см в дефлекторе с радиусом полуцилиндров 3 см, отделённых узким (2мм) разрезом длиной 15 см амплитуда импульсов тока монохроматизации должна составить 950 А , длительность фронта и спада этих импульсов должна быть не более 2 нс при длительности их вершины $0,8 \div 1,0$ мкс.

Генерирование импульсов тока в системе монохроматизации осуществляется двухканальным тиратронным генератором, волновое сопротивление малоиндуктивных низкоомных накопителей которого составляет 1,5 Ом ^{/5/}, а длительность импульсов - 2,5 и 1,5 мкс. К выходу каждого канала генератора подключено соответственно по тракту формирования импульсов монохроматизации, состоящих из нелинейных квазикоаксиальных линий для формирования ударных электромагнитных волн ^{/4,6,7,8,9/} на ток 1,2 кА, $Z_{\text{фр}} \leq 10^{-10}$ о, волновое сопротивление $Z_{\text{св}} = 1,5$ Ом, соединительных элементов и широкополосных низкоомных нагрузок ^{/10/}. Тракт формирования первого канала для создания крутого спада импульса тока монохроматизации содержит треугольное разветвление (т.р.), линейное плечо которого подсоединено к выходу генератора и состоит из 32 отрезков кабеля РК-50-2-12 длиной по 100 м; второе (короткозамкнутое) плечо т.р. состоит из 1000 ячеек нелинейной линии, рассчитано на $Z_{\text{задерж.}} = 0,8$ мкс и параллельно с согласованной нагрузкой (третьим плечом) подключено к выходу линейных кабелей ^{/5/}. В третьем плече последовательно с нагрузкой включён первый канал дефлекторной секции ^{/11/}, предназначенный для удаления из ускоряемого пучка электронов, находящихся на фронте импульса. Второй

тракт формирования предназначен для обострения фронта импульса тока второго канала генератора и через второй канал дефлектор-ной секции, который отклоняет электроны на спаде ускоряемого импульса, подключён также к согласованной нагрузке /11/.

Особое внимание было обращено на разработку дефлекторной секции, весьма важного узла всего комплекса аппаратуры, управляющего электронным пучком. На первом варианте экспериментальной электронной пушки было установлено, что невозможно расположить дефлектор внутри вакуумной камеры из-за трудностей совмещения в одном элементе функций вакуумного, высоковольтного, водоохлаждаемого и согласованного в наносекундном диапазоне с трактом формирования ввода импульсов тока монохроматизации. Поэтому во втором варианте пушки (ЭЭП-2) /12/ было решено разделить функции отклонения и поглощения частиц между следующими элементами /11/.

Дефлекторная секция состоит из цилиндрической изолированной вакуумной камеры /11/, собственно дефлекторов первого и второго каналов, расположенных на наружной поверхности её /11/ и водоохлаждаемого токоприёмника, поглощающего отклоняемые электроны, который находится внутри вакуумной камеры.

Этот токоприёмник должен без ослабления пропускать внутрь камеры импульсное отклоняющее магнитное поле и одновременно предохранять стенки её от разрушения отклоняемыми частицами, т.к. по условиям монохроматизации все электроны, находящиеся на фронте и спаде ускоряемого импульса, должны быть поглощены в дефлекторной секции.

Боковую цилиндрическую поверхность токоприёмника с на-

ружным и внутренним диаметрами соответственно 60 и 46 мм образуют шесть продольных элементов I в виде двухсторонней "гребёнки" (рис. I), которые попарно вставлены друг в друга со смещением, равным $1/2$ её шага, причём входящие в зазор зубцы гребёнки не касаются оснований соседних. Ширина зубцов гребёнки — 1 мм, высота — 7 мм, а расстояние между зубцами соседних элементов составляет 2 мм, так что вакуумная камера защищена от электронов с углом отклонения до 75° . Одни концы продольных элементов запаиваются на наружной поверхности их трубками водохлаждения 2 объединены общим коллектором 6, на который поступает охлаждающая вода из вакуумноплотного проточного фланца 7, позволяющая снимать мощность нагрева до 2 кВт. Другие концы продольных пластин, на которых трубки 2 закольцованы коллекторами 3, надетыми на эти коллекторы керамическими втулками 4 вставлены в стягивающее кольцо 5, размещаемое в первом фланце дефлекторной секции. Длина продольных элементов токоприёмника 448 мм достаточна для защиты вакуумной камеры длиной 326 мм из молибденового стекла CI-49 /II/ и двух сильфонных развязок; расположенных на её торцах (по 53 мм).

Такое соединение продольных элементов в токоприёмнике не содержит замкнутых контуров для вихревых эдс. При распространении импульса тока по дефлектору в пластинах токоприёмника не возникает вихревых токов, искажающих и ослабляющих магнитное поле. Расстояние между элементами гребёнки и их высота выбираются из соотношения импульсного магнитного поля отклонения и постоянного аксиально-симметричного фокусирующего магнитного поля, предназначенного для проводки через дефлекторную секцию неотклоняемой части дучка (вершины электронного импульса).

Число продольных элементов определяет длину зубцов гребёнки и зависит от мощности осаждающейся части пучка и возможностей охлаждающей системы. Подобная конструкция токоприёмника может быть использована также и в устройствах диагностики, модуляции электронных пучков, расположенных аналогично дефлектору на наружной поверхности изолированной вакуумной камеры.

Как показали измерения отклоняющего магнитного поля внутри вакуумной камеры при наличии токоприёмника в ней и при его отсутствии, величина интеграла $(\bar{c}/300S)(\int_0^{t_{\text{фр}}} g(t) dt)$, определяющая амплитуду поля, в обоих случаях была одинаковой и соответствовала полю 100 Э при амплитуде импульсов тока в дефлекторе 1000 А. Здесь $\bar{c} = 3 \times 10^{10}$ см/с - скорость света, S - площадь одновитковой катушки, $t_{\text{фр}}$ - длительность фронта импульса тока в дефлекторе, t (длительность импульса эдс в катушке), $g(t)$ - эдс, наводимая в витке катушки, В. Длительность импульса эдс также в обоих случаях была одинаковой, т.е. не обнаружено влияние вихревых токов и на фронт импульса поля в камере при наличии в ней токоприёмника.

Эксперименты по формированию монохроматического пучка проводились на электронной пушке ЭЭП-2 /I2/, разрабатываемой в качестве инжектора для ЛИУ-30/250. В этом случае между анодным узлом электронной пушки и блоком анализаторов /I2/ монтировалась дефлекторная секция со схемой формирования импульсов монохроматизации (рис. 2)

Проводка электронного пучка от поверхности катода до анализатора полного тока осуществлялась аксиально-симметричным магнитным полем. Необходимое распределение поля вдоль оси пушки создавалось тремя соленоидами, местоположение которых показано на электронно-оптической схеме (рис. 3)

Оптимальное распределение поля рассчитывалось на ЭВМ. В качестве критерия приемлемости расчёта было принято условие, чтобы отклонение электронного пучка (электронов, располагающихся на вершине ускоряемого импульса и проходящих дефлекторную секцию беспрепятственно) от оси не превосходило 2 см и угловое расхождение пучка на выходе дефлекторной секции было минимальным. Некоторые из результатов расчётов показаны на рис. 3. Радиальные размеры первого соленоида - 5,25 и 8,25 см /12/, он имеет 3500 витков провода ПЭВ-2 ϕ 0,93 мм, охлаждается водой и питается от источника стабилизированного тока на 5 А. Второй и третий соленоиды имеют внутренний и наружный диаметры соответственно 17,6 и 27,2 см, содержат по 510 витков провода ПЭТВП 1,68x3,28 мм² и питаются от регулируемых источников постоянного тока на 50А.

Измерение радиального распределения плотности тока и эмиттанса осуществляется независимо перемещаемыми по двум сопряжённым поперечным направлениям большим (анализатор полного тока (коллиматор)) и малым (анализатор струйки тока) коллекторами /12/.

Энергетический спектр струйки тока электронов измеряется магнитным анализатором с углом поворота 90° и эффективным радиусом поворота 138 мм /12/ при убранном с её пути малом коллекторе.

Первоначально в каждом из экспериментов по формированию монохроматического пучка осуществлялась проводка его по тракту, причём как местоположение второй и третьей линз, так и токи во всех трёх менялись с целью получения максимального тока на коллиматоре II (рис. 2).

В экспериментах по проводке электронного пучка было выяснено, что смещение линз в осевом направлении на ± 1 мм существенно не влияет на качество прохождения пучка, при этом отклонение токов в линзах от рассчитанных не превосходило $\pm 10\%$.

Возможность формирования импульса электронного тока с крутым фронтом на выходе ЭЭП-2 была показана в работе /12/. В этом случае включался первый канал генератора системы монохроматизации и исследовалась возможность синхронной работы ЭЭП-2 и этого канала генератора, условия проводки пучка (оптимальные поля и местоположения линз), стабильность генерирования импульсов тока монохроматизации и полное сложение волн в тройниковом разветвлении его.

При включении обоих каналов генератора системы монохроматизации импульсы тока протекают по соответствующим дефлекторам и замыкаются на нагрузках схемы формирования /11/, их положение на оси времени устанавливается регулированием времени задержки задающих генераторов Г5-27 I-го и II-го каналов относительно опорного генератора Г5-4Б, запускающего тиратрон модулятора ЭЭП-2 и эти генераторы. Запуск тиратронных генератора системы монохроматизации и модулятора ЭЭП-2 осуществляется не непосредственно от генераторов Г5-27 и Г5-4Б, а через каскады предварительного усиления импульса запуска по мощности, выполненных соответственно на тиристорах ИТЛ-59 и маломощном тиратроне ТТИ-35/3, подключенных как к генераторам, так и к сеткам тиратронов через разделительные трансформаторы и использующих разряд длинной линии на нагрузку.

С части нагрузок (0,25 Ом) I-го и II-го каналов системы монохроматизации импульсы тока подаются на один луч (первый) осциллоскопа Тектроникс 7904 (рис. 4б). На второй луч подаётся сигнал с коллиматора II (импульс электронного тока (рис. 4а). Регулированием времён задержки запуска каналов генератора системы монохроматизации совмещаем крутой спад импульса отклоняющего тока I-го канала с началом вершины электронного импульса, а крутой фронт импульса тока II-го канала - с моментом окончания плоской вершины его (или несколько левее, если вершина по длительности больше 0,5 мкс). Результат совмещения показан на рис. 4в (монохроматический электронный пучок). В экспериментах наблюдалось полное отсутствие электронного тока на коллиматоре II при совмещении крутого спада импульса тока I-го канала и крутого фронта импульса тока II-го канала, т.е. возможно использование системы монохроматизации как быстродействующего затвора в сильноточной электронной пушке (отключение пучка без снятия напряжения на катоде).

Момент полного исчезновения электронов, располагающихся на фронте и спаде импульса пушки, на коллиматоре II устанавливается регулированием амплитуды импульсов отклоняющего поля в соответствующих дефлекторах. При этом на токоприёмнике 6 дефлекторной секции отклоняемые электроны наблюдаются в виде отсекаемых частей от электронного импульса пушки, которые как-бы "дополняют" импульс электронного тока до прежней формы, когда импульсы монохроматизации на него не действуют. При полном исчезновении на коллиматоре II фронта и спада (момент полной монохроматизации)

импульсы на токоприёмнике хорошо совпадают с фронтом и спадом электронного тока по форме (рис. 4г), т.е. выполнено условие монохроматизации, по которому все электроны, находящиеся на фронте и спаде импульса пушки, должны быть поглощены в дефлекторной секции. Токи в дефлекторах, соответствующие этому моменту, сопоставлялись с рассчитанными в работе /3/ для наблюдаемых в экспериментах значений энергии и токов электронов. Результаты сопоставления показаны на рис. 5. Видно, что совпадение рассчитанных условий монохроматизации и экспериментальных данных достаточно хорошее.

С помощью системы монохроматизации оказалось возможным измерить также весь энергетический спектр вышедшего из пушки электронного тока. Методика состоит в следующем. Крутой спад импульса тока монохроматизации I-го канала устанавливается на осциллооскопе одновременно с началом фронта импульса электронного тока, а крутой фронт импульса тока монохроматизации II канала - через 10 или 20 нс в зависимости от желаемой точности. Передвигая последовательно по осциллограмме импульса электронного тока синхронно оба импульса тока монохроматизации, измеряем магнитным анализатором энергию соответствующих выделяемому интервалу времени из электронного импульса струек тока, прошедших сквозь отверстие коллиматора II. Одновременно контролируется в данном интервале амплитуда импульса электронного тока. Таким образом, можно построить полное энергетическое распределение вышедшего из пушки электронного тока либо во временной, либо в амплитудной зависимости.

Аналогично с распределением плотности тока по диаметру пучка $j(r)$, теоретически рассчитанного, экспериментально измеренного и сопоставленных в работе /12/, было проведено соответствующее сопоставление и для монохроматического электронного пучка с целью выяснения беспрепятственного прохождения через дефлекторную секцию вершины электронного импульса, т.е. отсутствие воздействия импульсов тока монохроматизации на электроны, поступающие для дальнейшего ускорения в тракт ЛИУ. Ранее было отмечено /11/, что наличие возмущений даже в несколько процентов на вершине электронного импульса вследствие неполного сложения импульсов в тройниковом разветвлении I-го канала схемы формирования /5/ системы монохроматизации приводит к недопустимым поперечным колебаниям частиц, которые разрушают ламинарный поток электронов, созданный в ЭЭП-2 /12/. В результате измерений распределения плотности тока $j(r)$ при воздействии на электронный пучок импульсов монохроматизации и при отсутствии этого воздействия было выяснено, что распределения плотности тока по диаметру существенно не отличаются, их характер близок к наблюдаемым ранее /12/; это подтверждается также отсутствием послеимпульсов в схеме формирования I-го канала: после крутого спада импульса тока на нагрузке нет отражений (рис. 4б). Измерения распределений плотности тока по диаметру пучка осуществлялось, как и ранее /12/, неподвижным малым коллектором (рис. 2) при перемещении в вертикальной плоскости коллектора.

В заключение автор благодарит Ю.А.Метёлкина, В.Б.Заббарова, Ю.Н.Комендантова, И.М.Матору за помощь в проведении экспериментов на ЭЭП-2, а также О.А.Стрелину за консультации.

Метёлкин

Литература

1. Ананьев В.Д., Блохинцев Д.И., Букаев П.В., Булкин Ю.М., Вахрушин Ю.П., Виноградов В.В., Доллежалъ Н.А., Жемчужников Г.И., Зубкова И.Д., Кузнецов В.С., Куприн Б.И., Комар Е.Г., Лобанов В.С., Матора И.М., Наврошки А., Назаров В.М., Попов А., Смирнов В.П., Смирнов В.С., Франк И.М., Халёрский А.И., Хрястов Н.А., Шабалин Е.П., Шапиро Ф.Л., Шах О.Я., Язвицкий Ю.С. "Импульсный реактор с инжектором ИБР-2", ОИЯИ, 13-4392, Дубна, 1969.
2. Анацкий А.И., Богданов О.С., Букаев П.В., Вахрушин Ю.П., Малышев И.Ф., Наливайко Г.А., Павлов А.И., Суслов В.А., Хальчицкий Е.П. "Линейный индукционный ускоритель", АЭ, 21, 6, 439, 1966.
3. Швец В.А. "Условия монохроматизации электронного пучка в линейном индукционном ускорителе", ОИЯИ, 13-8844, Дубна, 1975.
4. Швец В.А. "Монохроматизация электронного пучка в линейном индукционном ускорителе", в сб. "Разработка и практическое применение электронных ускорителей" (материалы IX Всесоюзной конференции, г. Томск, 3-5 сентября, 1975 г.), изд-во ТГУ, г. Томск, 1975.
5. Швец В.А. "Формирование импульсов монохроматизации электронного пучка ЛМУ", ОИЯИ, 13-9077, Дубна, 1975.
6. Харьюзов Р.В., Швец В.А. "Нелинейная квазикоаксиальная линия для формирования ударных электромагнитных волн", ОИЯИ, 13-8709, Дубна, 1975.
7. Харьюзов Р.В., Швец В.А. Изобретение "Линия для формирования перепадов напряжения". А.с. № 539372, бюлл. ОИПОТЗ № 46, 1976.
8. Харьюзов Р.В., Швец В.А. Изобретение "Линия для формирования перепадов напряжения". а.с. № 577656, бюлл. ОИПОТЗ, № 39, 1977.
9. Швец В.А. "Перспективы увеличения тока в нелинейных линиях для формирования ударных электромагнитных волн", ОИЯИ, 13-10300, Дубна, 1976.

10. Швец В.А. "Низкоомная широкополосная нагрузка килоамперных импульсных генераторов", ОИЯИ, 13-10302, Дубна, 1976.
11. Швец В.А. "О согласовании дефлекторной секции ЛИУ с трактом формирования импульсов монохроматизации", ОИЯИ, 9-10301, Дубна, 1976.
12. Андупов П.С., Андросов А.В., Божков В.М., Быков В.Н., Журавлёв В.В., Заббаров В.Б., Кладницкий В.С., Комендантов Ю.Н., Матора И.М., Меркулов Л.А., Метёлкин Ю.А., Петренко Ю.Д., Саввин В.А., Стрелина О.А., Харьюзов Р.В., Швец В.А. "Экспериментальная электронная пушка ЭЭП-2", ОИЯИ, Р9-10999, Дубна, 1977.

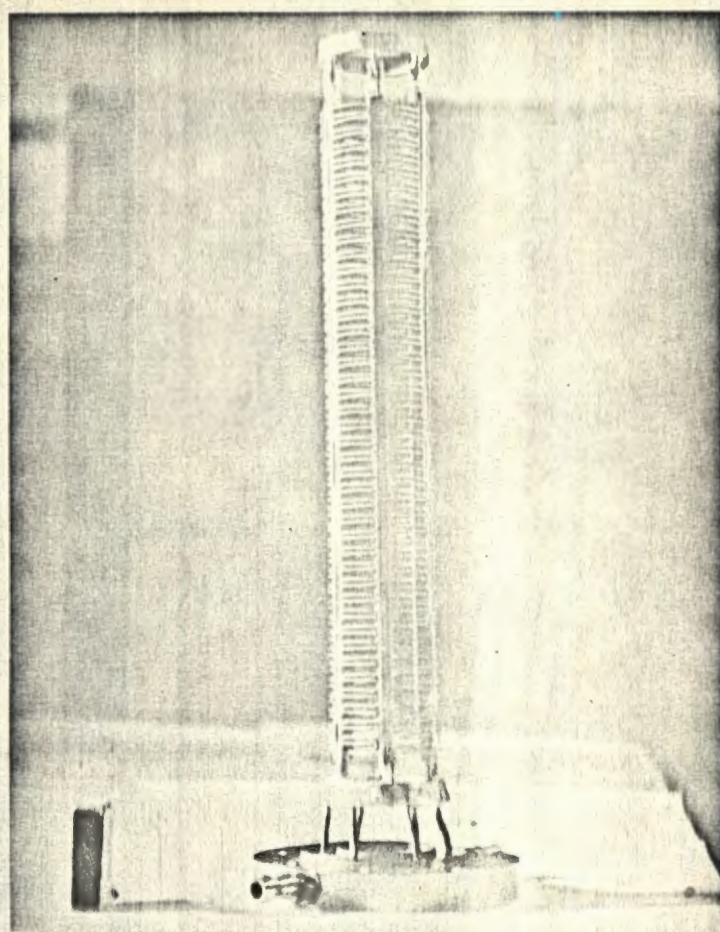


Рис. 1. Токосприёмник дефлекторной секции.

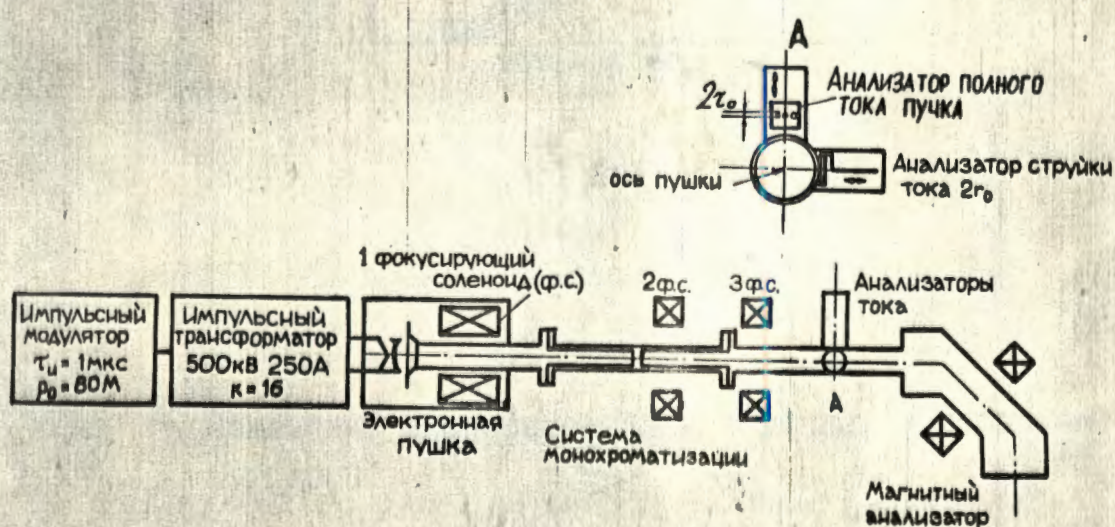


Рис. 2. Схема эксперимента по формированию монохроматического электронного пучка.

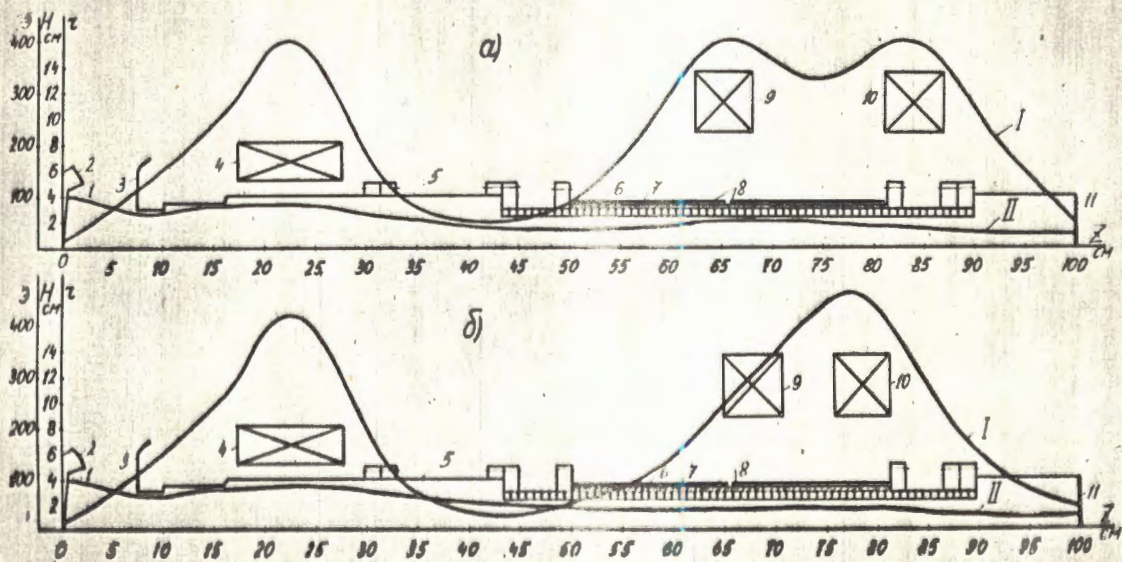


Рис. 3. Электронно-оптическая схема ЭЭП-2 с системой монохроматизации; распределение фокусирующего магнитного поля вдоль оси пушки (I) и траектория огибающей электронного пучка (II):

а) вариант 130 А 364 кэВ;

б) вариант 250 А 500 кэВ;

I - эмиттер, 2 - катод, 3 - анод, 4 - первый фокусирующий соленоид, 5 - проставочный патрубок, 6 - токоприёмник дефлекторной секции, 7 - вакуумная камера дефлекторной секции, 8 - дефлекторы, 9 - второй соленоид, 10 - третий соленоид, II - анализатор полного тока (коллиматор).

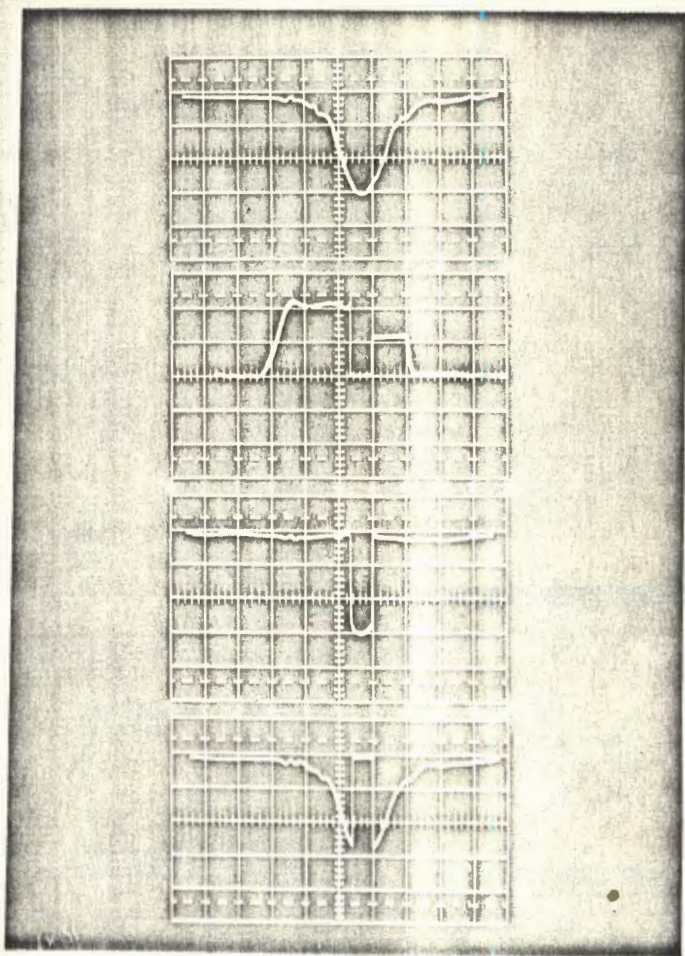


Рис. 4. Осциллограммы импульсов:

- а) невозмущённый электронный пучок,
 - б) импульсы тока монохроматизации на нагрузках I-го и II-го каналов дефлекторной секции,
 - в) импульс тока электронов на коллиматоре II под воздействием отклоняющего поля,
 - г) импульс тока электронов на токоприёмнике 6 дефлекторной секции.
- (Развёртка 1 мкс/см).

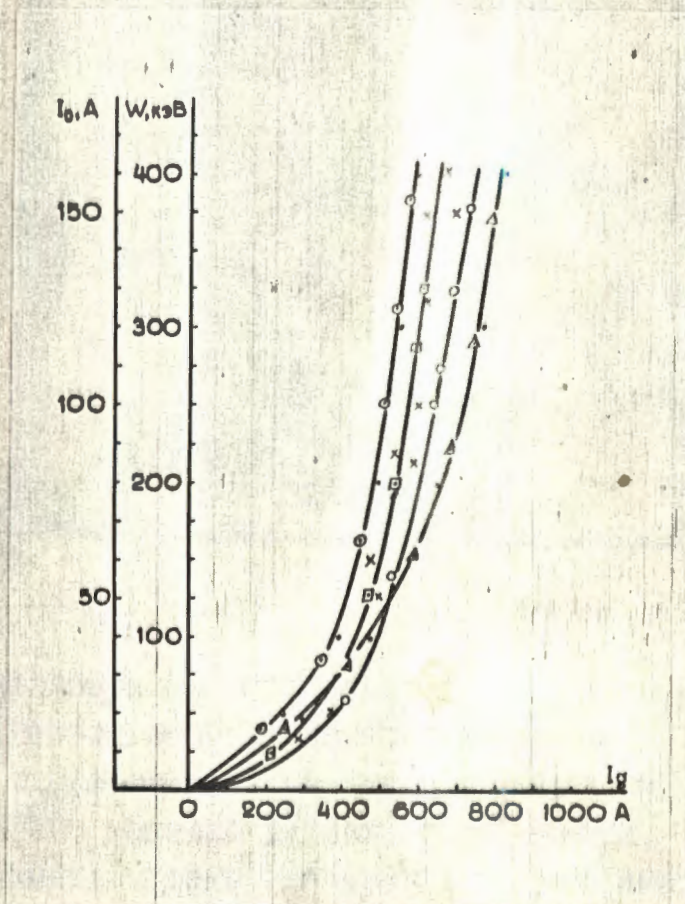


Рис. 5. Сравнение экспериментальных данных с условиями монохроматизации /3/.