

Безногих Ю.Д. и др.
Б1-9-8460.

+ ✓



ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С345e
Б-399

415/75

Б1-9-8460

ДЕПОНИРОВАННАЯ ПУБЛИКАЦИЯ

Дубна 1975₂

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

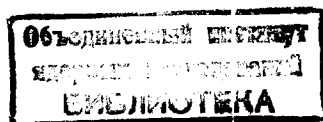
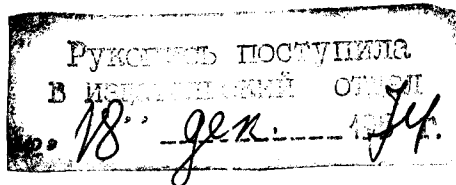
Лаборатория высоких энергий

Б1-9-8460

Безногих Ю.Д., Воеводин М.А., Донец Е.Д., Заболотин В.П.,
Зиновьев Л.П., Исаев А.С., Иссинский И.Б., Казанский Г.С.,
Коруков Н.А., Кулакова Е.М., Макаров Л.Г., Михайлов А.И.,
Михайлов В.А., Мончинский В.А., Перфеев В.Н., Пучков Г.П.,
Семенюшкин И.Н., Смирнов Ю.В., Федуков С.В., Царенкова П.,
Черников В.И., Чехлов К.В., Яловой И.Н.

НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОФАЗОТРОНА ОИЯИ.

(II квартал 1974 г.)



Дубна, 1974 г.

СОДЕРЖАНИЕ

I. Введение.....	2
2. Измерение показателя спада поля в рабочей области ускорителя при различных величинах \dot{V}	3
3. Согласование ЛУ-20 с кольцом синхрофазотрона.....	4
4. Включение новой системы расширения зоны на малых индукциях (РЗМИ-2).....	5.
5. Повышение надёжности систем управления задающей электроники.....	7.
6. Геодезические измерения.....	8.
7. Ионный источник "Крион" на инжекторе ЛУ-9М.....	9.
8. Расчёты движения протонов с учётом деформаций магнита и дипольных коррекций вертикальных орбит.....	9.

I. Введение.

Во втором квартале 1974г. на синхрофазотроне ускорялись протоны. Средняя интенсивность ускоренных протонов составила - $1,9 \times 10^{11}$ прот./цикл.

Было запланировано 832 часа работы ускорителя. Из них на эксперимент было использовано 356 часов. На дальнейшее изучение и совершенствование ускорителя - 398 часов. Эти часы, в основном, распределились следующим образом.

В конце апреля с.г. был проведён цикл магнитных измерений с целью получения данных о зависимости показателя n в момент инжекции ($B_0 = 160$ Гс.) от скорости нарастания магнитного поля в зазоре электромагнита синхрофазотрона.

Произведена "стыковка" нового инжектора ЛУ-20 с кольцом синхрофазотрона и включение его в рабочий режим работы.

Получены положительные данные при исследовании работы новой системы коррекции n (РЗМИ-2) для повышения интенсивности ускоренного пучка.

В секторе электроники РТО осуществлена разработка узлов, непосредственно связанных с модернизацией системы связи частоты ускоряющего напряжения с магнитным полем, контрольной и управляющей аппаратуры.

Продолжались геодезические измерения - высокоточное нивелирование по реперам на стойках магнита ускорителя. Проведена подробная исполнительная съёмка нижнего полюса с применением нового прибора - микронивелира.

Велись работы по использованию нового источника многозарядных ионов совместно с инжектором ЛУ-9М.

Проводились дальнейшие расчёты динамики протонов в условиях устойчивого движения, которое обеспечивалось введением дополнительной горизонтальной составляющей поля - $B_{\text{гп}}$.

2. Магнитные измерения.

В конце апреля было проведено исследование зависимости формы показателя n в рабочей области камеры ускорителя от скорости изменения магнитного поля. Эти исследования преследовали своей целью выяснить величину изменения в распределении n по радиусу при четырёхкратной скорости изменения магнитного поля в зазоре и возможности компенсации этого искажения для уменьшения потерь ускоряемых ядер на остаточном газе.

Измерение n проводилось специальными катушками, длина которых была равна ширине полюсного башмака, и баллистическим гальванометром. В рабочей области камеры катушки перемещались в геометрической плоскости ($z = z_0$) с шагом 10 см. Каждый цикл включал в себя измерения на индукциях 160 Гс, 240 Гс, 320 Гс и 480 Гс при скорости изменения магнитного поля, равной \dot{B} , $2\dot{B}$, $3\dot{B}$, $4\dot{B}$ и $1/2\dot{B}$.

Здесь $\dot{B} = 4 \times 10^3$ Гс/сек. - рабочая скорость изменения поля,
 $B_0 = 160$ Гс - поле инжекции

В интервале $n = 0,5 \div 0,8$ точность измерения была не хуже $\pm 0,01$. Измерения проведены на двух полюсных башмаках квадранта \mathcal{H} , на которых отсутствуют контура токов. В результате оказалось, что увеличение скорости изменения поля приводит в области радиусов от $R_0 + 20$ см до $R_0 + 65$ см к уменьшению n на $-0,025$ при $\dot{B} \times 4$ и $B_0 = 160$ Гс. и возрастанию n на $+0,085$ в области $R_0 \pm 20$ см с максимумом на R_0 . На внутреннем радиусе, в области от $R_0 - 20$ см до $R_0 - 65$ см распределение n остаётся неизменным (до точности измерений).

Далее, с увеличением индукции от 160 Гс до 480 Гс искажение в распределении n , вызванное увеличением скорости магнитного поля в области $R_0 \pm 20$ см затухает (n за 20 мсек изменяется от 0,085 до 0,02), а в области радиусов от $R_0 + 20$ см до $R_0 + 65$ см остаётся практически неизменным.

Причины такого поведения показателя n пока остаются до конца не выясненными, однако существует целый ряд предположений.

Из вышесказанного следует, что при имеющейся системе коррекций - РЗМИ вполне возможна компенсация искажения показателя n при $4x\dot{B}$ с помощью перераспределения токов в ряде корректирующих проводников и формирования их линейного роста в области форсировки \dot{B} .

3. Согласование ЛУ-20 с кольцом синхрофазотрона.

В конце мая начались работы по согласованию ЛУ-20, нового инжектора протонов, с кольцом синхрофазотрона. Закончились они 14 июня. С этого времени ЛУ-20 вошёл в число действующих установок, как инжектор синхрофазотрона с энергией 20Мев и током 20ма.

Программа согласования предусматривала последовательно пройти этап получения циркуляции пучка в квазибетатронном режиме и осуществить захват в синхротронный, наладить аппаратуру для измерения основных параметров инжектора (эмитанса и энергетического спектра), наладить дебанчер и выявить дефекты в системе инжекции при работе на кольцо ускорителя.

В квазибетатронном режиме был получен циркулирующий пучок при оптимальной настройке:

$$N_{\beta} = 1,4 \times 10^{13} \text{ прот/цикл.}$$

При этом в камеру ускорителя инжектировалось:

$$N_{\text{ин}} = 1,9 \times 10^{13} \text{ прот/цикл.}$$

Ускоряющая станция работала 100 мсек, была получена интенсивность:

$$J_{100} = 2,0 \times 10^{11} \text{ прот/цикл.}$$

Система изоляторов ионной оптики источника была переделана с целью экранирования изоляторов от действия пучка. Это привело к стабильной работе форинжектора и позволило получить ток после ЛУ до 20 ма.

Налажена работа системы короткой инжекции. Она позволила получить данные о спектре инжектируемого пучка. Спектр определялся по времени взаимодействия короткого инжектируемого пучка с бетатронной мишенью. В одном из режимов ЛУ-20 без дебанчера полный энергетический спектр был измерен:

$$\frac{\Delta W}{W_s} = 1,3\%$$

Налаживаемый дебанчер эффективно влиял на сдвиг частиц в сторону малых колебаний, но при этом роста ускоренного пучка пока получено не было.

Измерения эмитанса не проведены из-за недостатка времени.

Выявлен ряд дефектов аппаратуры ЛУ-20, которые будут мешать нормальной эксплуатации инжектора. Наибольшего внимания заслуживает существующая система стабилизации тока поворотных магнитов ПМ - 1 и ПМ - 2, сейчас она не удовлетворяет необходимым требованиям.

Исходя из анализа параметров инжектора ЛУ-20 можно сделать вывод, что в данное время при нормальных потерях в кольце синхрофазотрона возможно получение интенсивности порядка 10^{12} п/цикл.

4. Включение новой системы расширения зоны на малых индукциях (РЗМИ - 2).

Показатель поля n является величиной, которая характеризует магнитную систему синхрофазотрона, определяет ряд параметров ускорителя.

Проведённые исследования распределения поля по радиусу показали, что при слабых магнитных полях (до 1500гс) динамические характеристики значительно отличаются от статических./1/. Для компенсации динамических искажений n и для регулировки n по всей ширине камеры в пределах $\pm 0,15$ используются специальные проводники. Рис.1. Они уложены по всей длине камеры, на верхних и нижних полюсах симметрично относительно среднего радиуса магнита R_0 .

Система коррекции n получила название РЗМИ-1 (расширение зоны на малых индукциях). Питание обмоток, собранных из отдельных проводников, производится за счёт ЭДС индукции магнита ускорителя. Пассивные элементы в виде дросселя и резистора формируют экспоненциальный закон нарастания тока в цикле. Однако в связи с влиянием поля остаточного намагничивания, появлением локальных контуров в рабочей области камеры и необходимостью регулирования n по азимуту оказалось, что существующая коррекция не обладает достаточной гибкостью. Поэтому была разработана новая система РЗМИ-2 с программным управлением роста тока коррекций. Система включает в себя 13 импульсных источников питания и программирования роста тока для автономного питания 13 обмоток коррекций. Рис.2.

Проделанная работа по исследованию влияния на интенсивность различных комбинаций проводников в различных радиальных областях камеры даёт возможность сделать целый ряд выводов.

1). При включении обмоток коррекции n последовательно по четырём квадрантам (такова схема включения РЗМИ-1) оказывается, что существующие величины и направления токов в них не являются единственными для получения оптимальной интенсивности при всех прочих равных условиях. Рис.3.

2). Корректирование n системой РЗМИ-1 в первые 20 мсек ускорения недостаточно эффективно, т.к. при отключении её темп потерь пучка на этом отрезке времени практически не меняется. Рис.4.

3). При включении РЗМИ-2 экспериментальным путём были найдены токи в проводниках, включённых последовательно в каждом квадранте, при которых темп потерь на 20 мсек был значительно уменьшен. Эти токи существенно отличаются от токов системы РЗМИ-1. Рис.4 и 5.

4). Эксперимент показал, что необходимо вводить поквadrантную коррекцию n на ускорителе:

а. в средней области камеры $R_0 \pm 15$ см и в районе внутренних

радиусов $R_0 - 15\text{см} > R > R_0 - 25\text{см}$ необходимо вводить в показатель первую азимутальную гармонику;

б. в районе наружных радиусов $R_0 + 25\text{см} > R > R_0 + 15\text{см}$ необходимо ввести в показатель n вторую азимутальную гармонику.

5) При корректировании одновременно двумя системами РЗМИ-1 и РЗМИ-2 удаётся повысить интенсивность в 2 раза:

$$J_{3\text{мсек}} = (1,5 + 1,9) \times 10^{12} \text{ прот/цикл}$$

$$J_{20\text{мсек}} = (8,0 + 8,2) \times 10^{11} \text{ - " -}$$

$$J_{100\text{мсек}} = (4,6 + 5,1) \times 10^{11} \text{ - " -}$$

6). При улучшенных коррекциях n интенсивность стала зависеть от величины ускоряющего напряжения, оказалось, что начальная амплитуда его должна быть не $17 \div 18$ кВ, а $25 \div 28$ кВ, что согласуется с теоретическими обоснованиями синхрофазотрона:

$$E_{\text{уск}} = 17,5 \text{ кВ}$$

$$E_{\text{уск}} = 25 \text{ кВ}$$

$J_{3 \text{ мсек}}$	$1,0 \times 10^{12}$	$1,6 \times 10^{12}$ прот/цикл
$J_{20 \text{ мсек}}$	$4,1 \times 10^{11}$	$5,9 \times 10^{11}$ - " -
$J_{100 \text{ мсек}}$	$3,4 \times 10^{11}$	$4,2 \times 10^{11}$ - " -

5. Повышение надёжности систем управления задающей электроники.

Во втором квартале продолжалась разработка узлов схемы дискретного функционального преобразователя (ДФП), макетирование и отработка основных эксплуатационных параметров. ДФП представляет собой функциональную аналоговую машину, позволяющую осуществлять формирование закона связи частоты ускоряющего напряжения с магнитным полем и его независимую коррекцию в любой точке ускорительного цикла. Создание ДФП ставит своей целью в значительной степени упростить настройку режимов ускорения ядер и вывода их на

физический эксперимент. ДФП будет обладать высокими характеристиками по стабильности и надёжности работы управляющих систем в синхротронном режиме.

Для повышения надёжности и точности систем контроля в секторе электроники разработан блок измерения характеристик ускоряемого пучка, в частности, интенсивности, радиального положения центра заряда ускоряемого сгустка частиц, его азимутальной протяжённости. Одновременно блок выполняет функции датчиков информации об интенсивности пучка, используемой для работы функциональных узлов, управляющих дозировкой пучка в режиме физического эксперимента, и линеаризаторов растяжек пучка на внутренние мишени. Кроме того блок обеспечивает выдачу прецизионных данных для работы систем обратной связи по пучку ускоряемых частиц.

6. Геодезические измерения.

Во втором квартале с.г. было проведено два цикла геодезических измерений, которые включали в себя высокоточное нивелирование по реперам рабочей сети (52 репера) с привязкой реперов, закреплённых на стойках электромагнита синхрофазотрона (400 точек).

Кроме наблюдений за стабильностью электромагнита (ЭМ) был выполнен один цикл исполнительной съёмки по высоте нижних полюсов ЭМ. Измерения производились методом высокоточного геометрического нивелирования коротким визирным лучом с помощью нивелирной рейки и нивелира $Ni - 007$ в зоне оптической видимости вакуумной камеры (в районе окон вакуумной камеры). Вне зоны оптической видимости использовался микро nivelir с переменной базой. Микро nivelirные ходы прокладывались на радиусах $R_0 \pm 800$ мм. Начало и конец каждого хода располагался напротив окон вакуумной камеры. Положение начальной и конечной точек хода определялось методом геометрического нивелирования. Средняя квадратическая погрешность определения отметки характерной точки ЭМ при использовании ниве-

лирования и микронивелирования ориентировочно оказалась 0.200 мм. Данные измерений показали, что все квадранты ускорителя перекошены в радиальном направлении. Максимальный перекос достигает: в I и II квадрантах 1,6 , в III квадранте 1,5 и в I - 1,2 мм.

Началась также работа по измерению зазоров между полюсными башмаками ЭМ с помощью специальной нивелирной рейки и нивелира Ni -007.

7. Ионный источник "Крион" на инжекторе ЛУ-9М.

Работа по теме: "Разработка и исследование по ускорению многозарядных ионов на синхрофазотроне" на данном этапе предусматривала монтаж и наладку готового ионного источника на инжекторе ЛУ-9М.

В помещении форинжектора были смонтированы магистрали обратного потока гелия. На изолированном основании у форинжектора смонтирован сам источник многозарядных ионов, проведено оптическое согласование его с форинжектором. На высоковольтной колонне смонтированы, опробованы и налажены блоки питания и управления Криона. Успешно прошли криогенно-вакуумные и криогенно-магнитные испытания, получен ионный ток на выходе форинжектора в режиме физического пуска.

8. Расчёты движения протонов с учётом деформаций магнита и дипольных коррекций вертикальных орбит.

Наличие деформаций магнита синхрофазотрона и зависимость показателя поля \mathcal{N} от радиуса вызывает увеличение вертикального размера пучка , превышающего апертуру камеры ускорителя /3/. В марте 1974 г. был выполнен расчёт движения частиц в условиях, описанных в работе /3/, но с учётом дипольных коррекций поля, вводимых в прямолинейных секциях. Первая гармоника перекоса квадрантов синхрофазотрона с амплитудой 0,4 мм/м вызывает искажение вертикальной орбиты с амплитудой $A = 6$ см. Аналогичное искажение орбиты вызывает первая гармоника параллельного смещения квадрантов на величину 15,2 мм. В обоих указанных случаях наблюдается рост вертикального размера пучка при $\bar{n} = 0,665$ (резонанс $3\bar{n}_x - \bar{n}_z = 1$).

Введение горизонтального корректирующего поля $V_{R\Pi}$ в прямолинейных секциях ускорителя уменьшает амплитуду искажения вертикальной орбиты и повышает устойчивость движения. При расчётах величина $V_{R\Pi}$ была выбрана постоянной во всём пространстве прямолинейной секции и независимой от времени. Амплитуда искажения орбиты уменьшалась до 1 см при введении $V_{R\Pi} = 0,25$ гс в I прямолинейной секции и $-0,25$ гс в III секции. Для указанного $V_{R\Pi}$ вертикальный размер пучка даже с большими начальными амплитудами радиальных и вертикальных бетатронных колебаний не изменялся за время более 1000 оборотов. Уменьшение $V_{R\Pi}$ до $\pm 0,17$ гс увеличивает амплитуду A до 2 см, при этом часть пучка теряется по вертикали. В данном случае время роста вертикального размера пучка увеличивается по сравнению со случаем отсутствия коррекций. Ниже приведена краткая таблица основных результатов расчёта с учётом дипольных коррекций. В последней графе таблицы приведён номер оборота, на котором частицы достигают горизонтальных стенок камеры (± 18 см). Рассмотрен только резонанс $3\nu_R - \nu_z = 1$, для которого требуется первая гармоника возмущения.

№ ПП	ρ_0 см	Z_0 см	перекос мм	прогиб мм	$V_{R\Pi}$ гс	номер оборота
1	54	0 + 9	$\pm 0,75$	0	0	2 + 50
2	54	0 + 9	0	$\pm 15,2$	0	0 + 80
3	54	4 + 9	$\pm 0,75$	0	$\pm 0,17$	32 + 400
4	54	9	$\pm 0,75$	0	$\pm 0,25$	устойчивость
5	54	9	0	$\pm 15,2$	$\pm 0,25$	устойчивость

Здесь ρ_0 и Z_0 — амплитуды радиальных и вертикальных бетатронных колебаний. При отсутствии коррекций (I и 2 случай) частицы с Z_0 от 0 до 9 см теряются по вертикали. При введении коррекций $V_{R\Pi} = \pm 0,17$ гс частицы с $Z_0 < 4$ см устойчивы, а с $Z_0 > 4$ см теряются по вертикали. При $V_{R\Pi} = \pm 0,25$ гс потерь пучка по вертикали не наблюдается даже для $Z_0 = 9$ см.

Равновесная орбита пучка в настоящих расчётах задаётся на центральном радиусе ускорителя R_0 . Смещение центра пучка с R_0 потребует введения зависимости $V_{r\Pi}(R)$, что вызвано формой кривой $n(R)$, и применяется в синхрофазотроне на практике. Поскольку поле синхрофазотрона растёт во времени, коррекции в прямолинейных секциях должны также нарастать. Неполная компенсация искажений, вызванная относительным уменьшением $V_{r\Pi}$, может быть причиной длительных потерь пучка /4/.

Приведённые результаты расчётов показывают, что объяснение потерь частиц процессами резонансной раскачки бетатронных колебаний, которое было высказано и объяснено в работе /3/, является удовлетворительным. Имеющие место расхождения между расчётными и фактическими результатами вполне возможно объяснить тем обстоятельством, что в расчётах, ввиду отсутствия данных зависимости n от азимута, было использовано азимутально-однородное магнитное поле

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. А.А.Журавлёв, Е.Г.Комар, И.А.Мозолевский, Н.А.Моносзон, А.М.Столлов. Магнитные характеристики синхрофазотрона ОИЯИ. Сб. Ускорители элементарных частиц. Атомиздат, 1957 г.
2. Е.Д.Донец, А.И.Пикин. Сообщение ОИЯИ, Р7-7999, Дубна, 1974 г.
3. Б.В.Василишин и др. Депонированное сообщение ОИЯИ, Б1-9-8031, Дубна, 1974 г.
4. Безногих и др. Депонированное сообщение ОИЯИ, Б2-9-7208, Дубна, 1972 г.

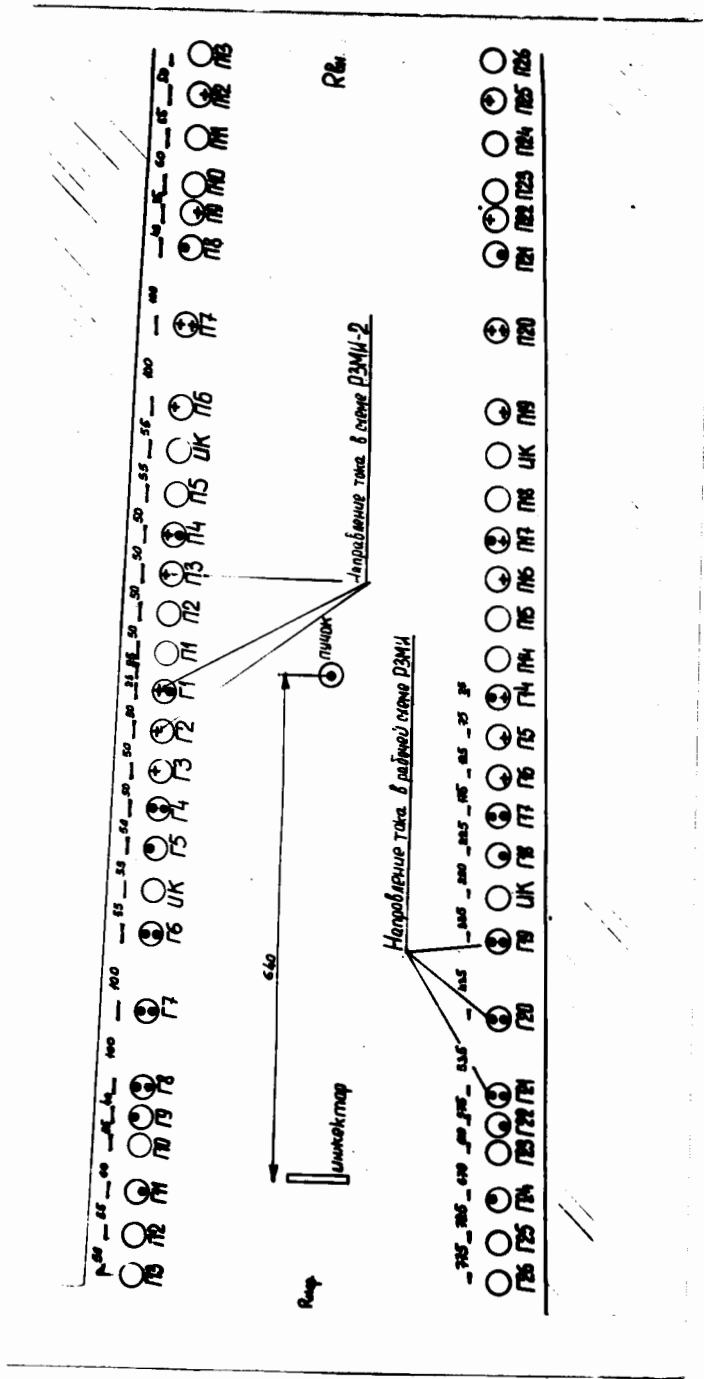


Рис. 1. Поперечное сечение камеры ускорителя и расположение проводников, включаемых в системы корректирования РЭВ-1.

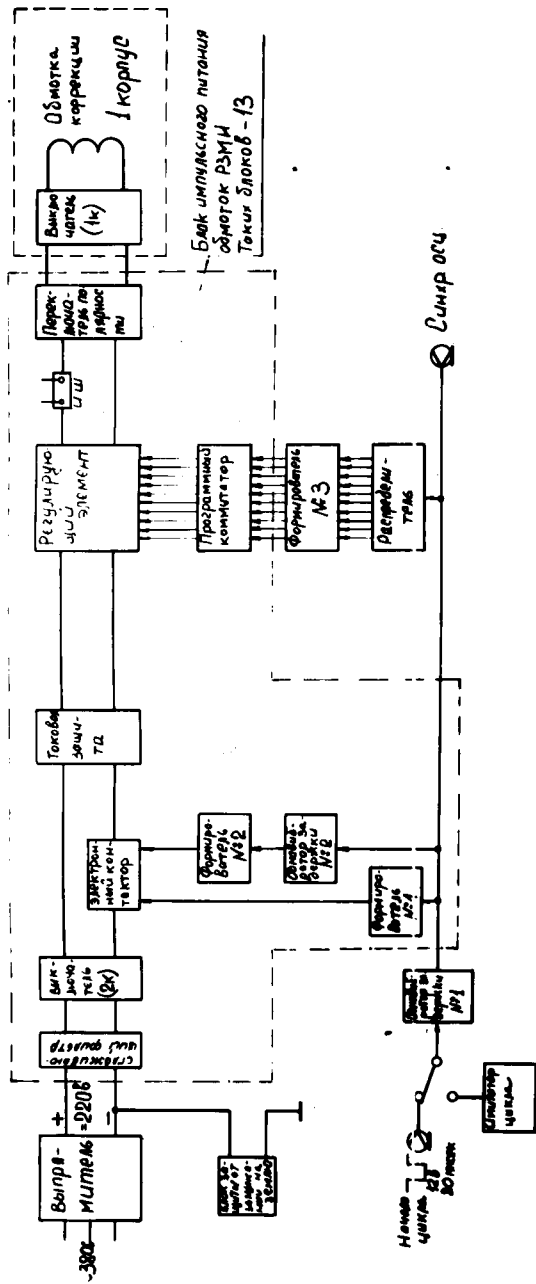


Рис. 2. Блок - схема системы РЭММ - 2.

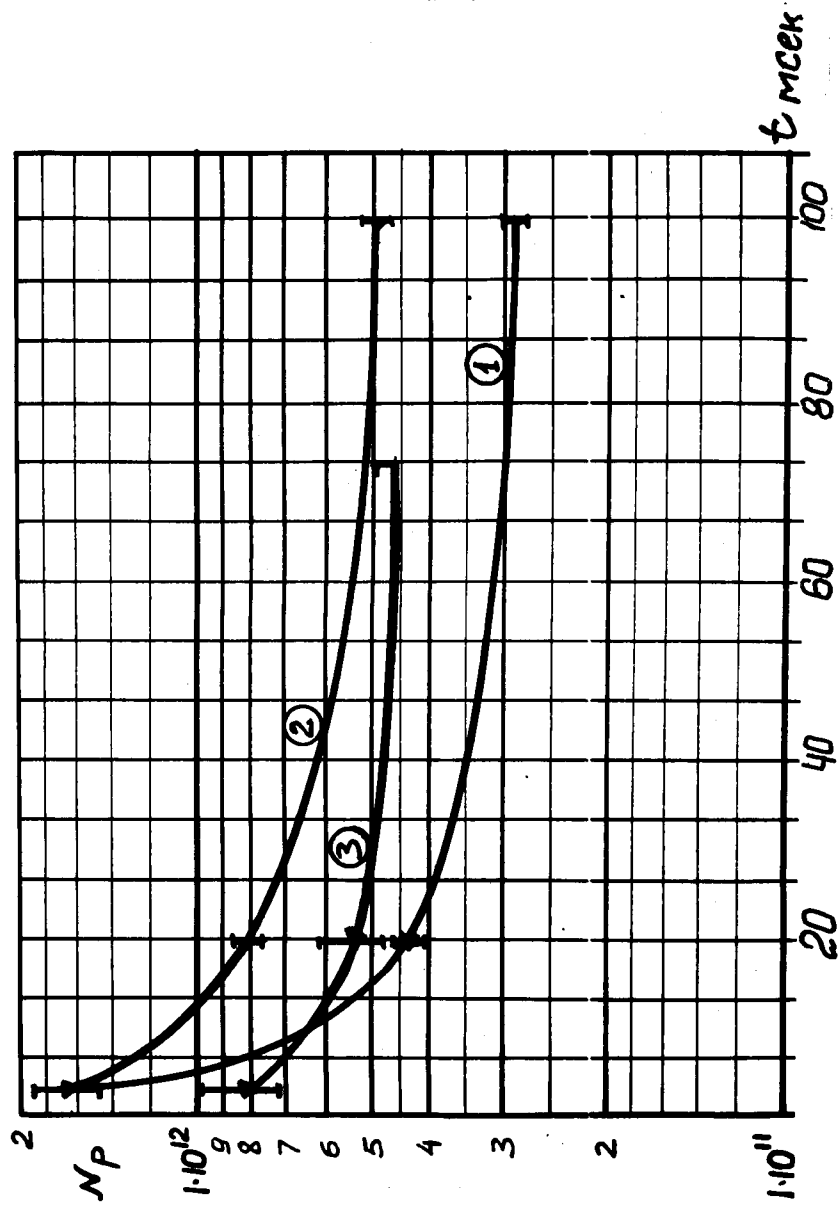


Рис. 3. Интенсивность на первых 100 мсек ускорения (инжектор ЛУ-20, протоны).

1 - оптимальный уровень интенсивности при работе системы РЗМИ - I.

2, 3 - то же, при работе системы РЗМИ - 2 с двумя комбинациями проводников, включённых поквадрантно.

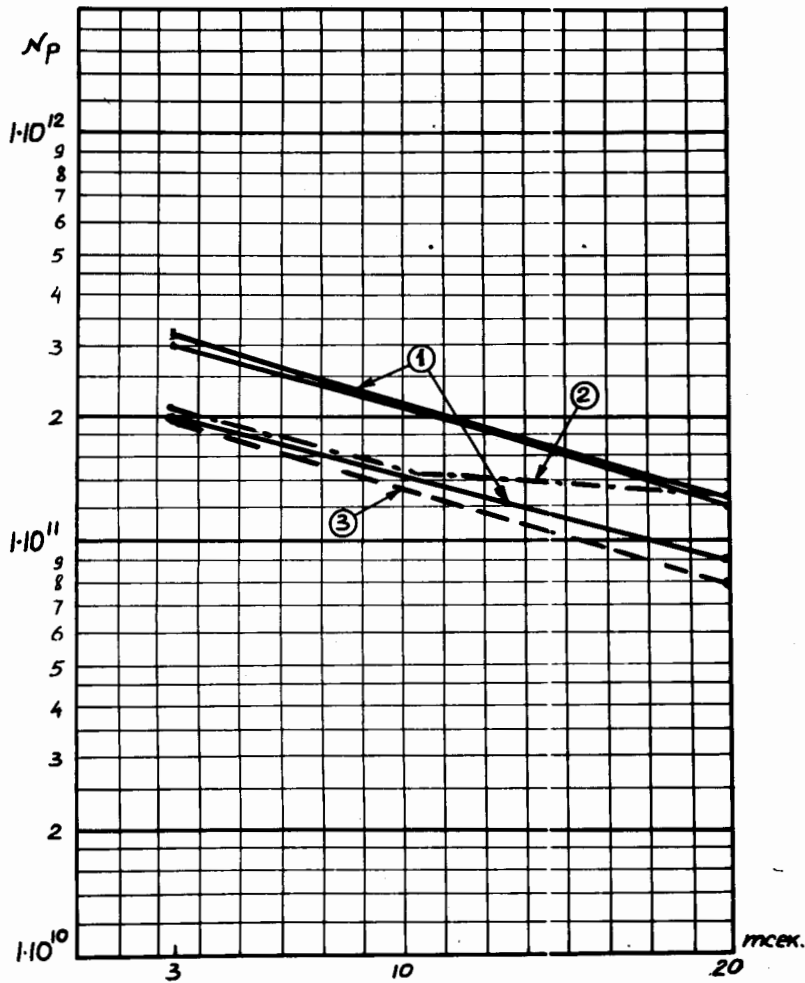


Рис.4. Интенсивность на первых 20 мсек ускорения.

(Инжектор ЛУ-9М, протоны).

1 - оптимальные уровни интенсивности, получаемые на 100 мсек ускорения при работе РЗМИ - 1.

2 - то же при работе РЗМИ - 2.

3 - системы коррекции отключены.

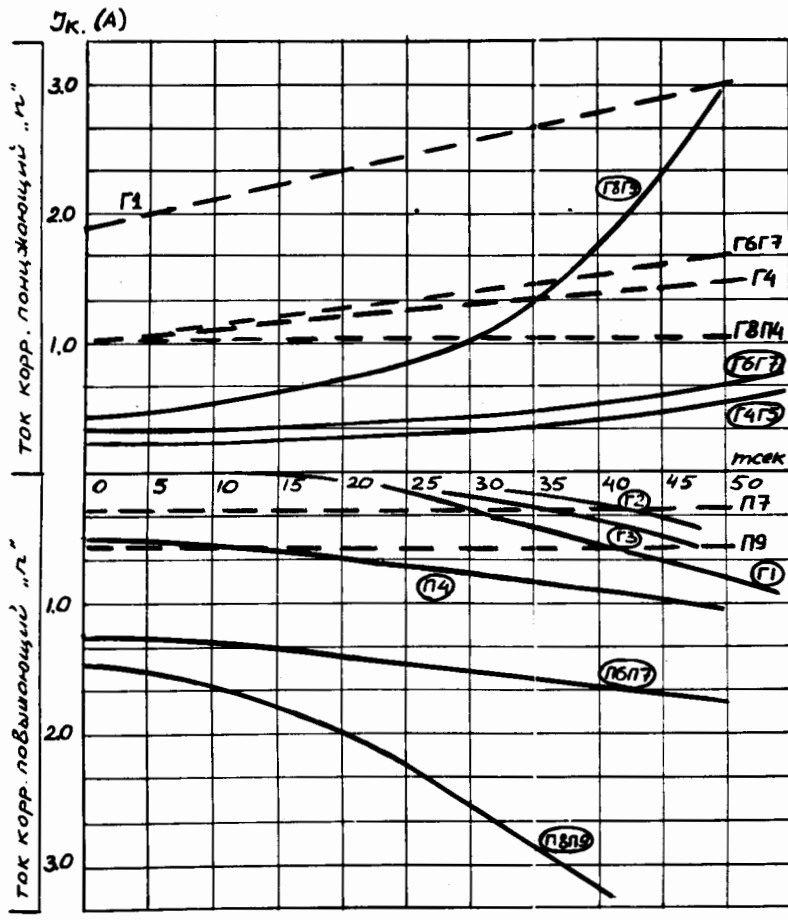


Рис. 5. Характер нарастания токов в проводниках коррекции РЗМИ.

- 1 - в системе РЗМИ - 1
- 2 - в системе РЗМИ - 2.