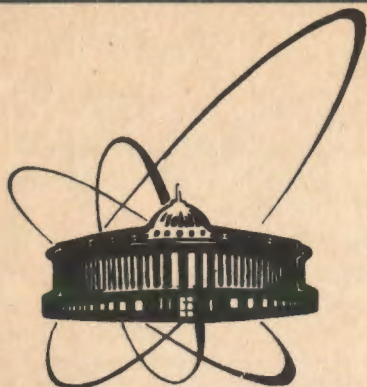


91-535



**сообщения
объединенного
института
ядерных
исследований
дубна**

9-91-535

И.Б.Иссинский, В.Ф.Сиколенко

**УЛУЧШЕНИЕ ВРЕМЕННОЙ ОДНОРОДНОСТИ
ПУЧКА МЕДЛЕННОГО ВЫВОДА
ИЗ СИНХРОФАЗОТРОНА**

1991

ПРОБЛЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ БЕССТРУКТУРНОГО ВЫВОДА ПУЧКА

Для большинства физических экспериментов в режиме медленного вывода требуется равномерный во времени пучок. В идеале его можно было бы представить как прямоугольный импульс, заполненный частицами таким образом, что отсутствует временная структура, т.е. с "гладким" распределением частиц во времени в пределах импульса вывода. Для устранения т.н. "микроструктуры" - модуляции тока обратной частотой - вывод осуществлялся без ускоряющего напряжения. Однако и в этом случае наблюдается глубокая модуляция тока пучка за счет неравномерного во времени изменения - показателя поля при выводе ^{6,9,10/}. Авторы приведенных публикаций объясняют это явление и формулируют требования к системам формирования магнитных полей, сводящим модуляцию тока пучка к минимуму (принятому уровню 20%). В соответствии с ^{6,9,10/} в процессе медленного вывода циркулирующие частицы выводятся из состояния устойчивых колебаний плавным подведением их бетатронной частоты колебаний к резонансному значению $Q_x = 2/3$. Мгновенная величина тока выведенного пучка определяется при заданной плотности распределения амплитуд скоростью изменения показателя поля (dn/dt) в области, в которой находится пучок. Неравномерность эффективного значения показателя поля (n) может объясняться появлением когерентных низкочастотных (25÷600 Гц) радиальных колебаний (дрожаний) пучка на столе главного поля, которые при наличии наклона n по радиусу (секступольной составляющей) приводят к дополнительным, синхронным с этими частотами, быстрым изменениям n . Появление таких когерентных колебаний может обуславливаться пульсациями главного поля ускорителя или в токах резонансных обмоток (РОМ-1, 2), если они превысят допустимый предел, который составляет (при 20% модуляции):

Для поля главного тока:

F, Гц	50	100	300	600
$\Delta B/B$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-7}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$9,5 \cdot 10^{-8}$
$\Delta B, Гс$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$

Для тока в резонансной обмотке РОМ-1:

F, Гц	50	100	300	600
$\Delta I_1/I_1$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$7,3 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$
$\Delta I_1, A$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$

Для тока в резонансной обмотке РОМ-2:

F, Гц	50	100	300	600
$\Delta I_2/I_2$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$
$\Delta I_2, A$	0,31	0,15	0,052	0,026

Аналогичное влияние могут оказывать помехи, наводимые на линии связей в аппаратуре управления медленным выводом.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКОВ МОДУЛЯЦИИ ТОКА ПУЧКА

1. Помехи на линиях связи определяются разнопотенциальными "землями" и обусловлены размещением силовой аппаратуры в различных частях ускорительного комплекса. Как показали измерения, разность потенциалов между "землями" первого и второго корпуса с частотой цикла и 50 Гц составляет $1,5 \pm 2$ В; на частотах 300 и 600 Гц около $0,2 \pm 0,3$ В. Помехи, возникающие от разнопотенциальных "земель" корпусов № 1А и № 2, больше в 3-4 раза, и спектр этих помех шире. Отмечается наличие электрических (емкостных) и магнитных источников помех, обусловленных прокладкой линий связей в полях силовых коммуникаций.

Весьма существенный вклад в модуляцию тока пучка вносят коммутационные импульсы длительностью $0,1 \pm 0,3$ мс, возникающие при переключении вентилей в многофазных выпрямителях.

На некоторых участках линий связей наблюдаются помехи от ускоряющих станций с амплитудой двойного размаха, достигающей $0,5 \pm 0,7$ В¹¹.

Наиболее эффективным способом борьбы с указанными помехами при передаче аналоговых сигналов является использование линий связи, выполненных в виде экранированных скрученных пар¹² (например, кабель КММ-2х0,35) с последующим сложением сигналов

на дифференциальных ускорителях. Несколько менее эффективно использование двух коаксиальных кабелей, один из которых сигнальный, а второй включается как компенсационный.

Операция сложения осуществляется с помощью операционного усилителя в дифференциальном включении с довольно широким диапазоном подавляемых частот (от нуля до 4 МГц). Требования к широкополосности определяются необходимостью подавления коммуникационных и помех промышленной частоты повторения, которые существенно отличаются от синусоиды (для устранения таких помех необходимо подавление всех частот их спектра, т.е. в этом диапазоне частот входы дифференциального усилителя не должны вносить фазовых сдвигов)¹¹.

2. Пульсации в главном магнитном поле представляют собой импульсы несинусоидальной формы, содержащие спектр основной частоты питающих генераторов (44-50 Гц) и ее гармоники до 12 включительно. С помощью активного фильтра и асинхронной схемы управления вентилями^{11,12} пульсации поля низкочастотной части спектра подавлены до уровня $\Delta V/V = 10^{-6}$, а высокочастотной части - до 10^{-7} . Не менее успешно решена задача подавления пульсаций в токах резонансных обмоток: на частоте 300 Гц пульсации не превышают $(1 \pm 2) \cdot 10^{-6}$ как в РОМ-1, так и в РОМ-2. На частотах 50 и 100 Гц пульсации практически трудно измеримы; 600-герцевая пульсация отсутствует (обусловлено схемой выпрямителей).

Таким образом, в питающих системах выполнены все требования к величинам пульсаций, но, несмотря на это, наблюдается значительная модуляция тока пучка при медленном выводе (см. рис.4). Возможно, это связано с тем, что теоретически рассматривалась степень воздействия на модуляцию пучка пульсаций каждой системы в отдельности, а совместное влияние оказалось более значительным. Вторая версия объяснения этого явления состоит в том, что наличие обратной связи без демпфирования, вследствие недостаточной устойчивости системы автоматического регулирования, создает эффект увеличения глубины модуляции.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА СИСТЕМЫ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ ПО ТОКУ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА

Упрощенная функциональная схема приведена на рис.1. Датчиком тока выведенного пучка служит многопроволочная ионизационная камера в аналоговом режиме съема сигнала¹⁴. Заданный диапазон интенсивностей (от 10^6 до 10^{12} част./имп.) обеспечивается регулировкой коэффициента газового усиления. Датчики каналов

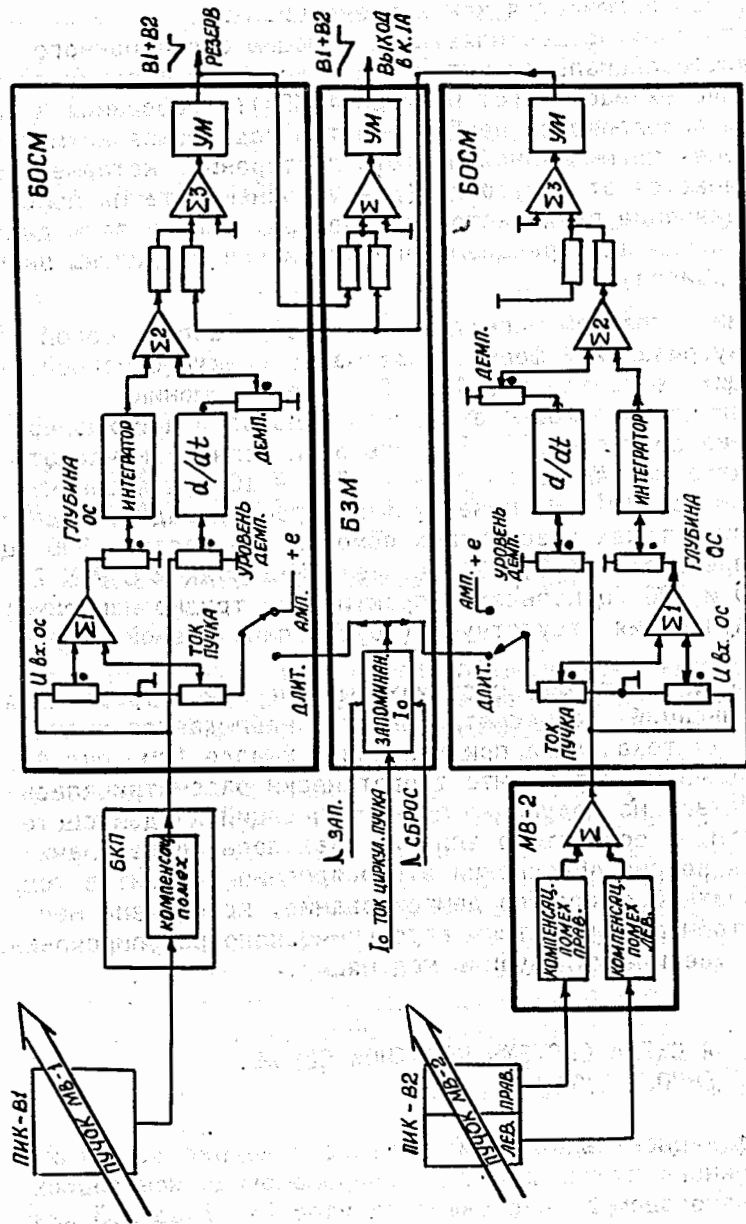


Рис. 1. Функциональная схема.

МВ-1 и МВ-2 конструктивно идентичны, отличаются лишь методом выработки результирующего сигнала, несущего информацию о токе пучка. В каналах связи датчиков с пультом управления, где расположена аппаратура обратной связи (корпус 2), использованы методы подавления помех с применением экранированных скрученных пар и дифференциальных усилителей. Аппаратура обратной связи в каналах МВ-1 и МВ-2 полностью идентична и взаимозаменяема.

Сигнал тока пучка, очищенный от помех, поступает на сумматор $\Sigma 1$, который вырабатывает сигнал ошибки, возникающий как разность между некоторым заданным оператором значением постоянного напряжения ("ток пучка") и истинным значением тока пучка. Полученная разность напряжений поступает на интегратор, формирующий сигнал управления током в резонансной обмотке РОМ-1 (физическое обоснование приведено в [5, 6]). Далее сигнал интегратора проходит через сумматоры $\Sigma 2$ и $\Sigma 3$ на усилитель мощности, выходное напряжение которого управляет значением производной в токе обмоток РОМ-1.

Для предотвращения колебаний, возникающих в системе обратной связи, вводится цепь демпфирования, содержащая устройство, выделяющее напряжение, пропорциональное отрицательной производной сигнала ошибки (т.е. производной, прекращающей вывод частиц из ускорителя). Демпфирующий сигнал вырабатывается при достижении сигналом ошибки некоторого уровня (подбирается экспериментально) и суммируется с выходным напряжением интегратора в каскаде $\Sigma 2$. Результирующее напряжение через каскад $\Sigma 3$ (резервный сумматор на случай отказа блока БЗМ) поступает на линейный усилитель мощности. Выходные сигналы каналов МВ-1 и МВ-2 поступают на суммирующий каскад блока БЗМ и через усилитель мощности поступают на линию связи, передающую сигналы управления на систему питания обмоток РОМ-1.

Блок БЗМ содержит аналоговую память, запоминающую напряжение, пропорциональное интенсивности циркулирующего пучка в момент времени, предшествующий началу вывода.

При использовании этого напряжения в качестве опорного в системе обратной связи ($\Sigma 1$, БОСМ) осуществляется стабилизация длительности вывода (при переменном значении тока пучка). Использование в качестве опорного напряжения постоянного напряжения "е" соответствует режиму стабилизации амплитуды тока выводимого пучка. Подробная функциональная схема с указанием прохождения сигналов через разъемы в части аппаратуры от ионизационной камеры до разъемов линии связи с аппаратурой управления питанием обмоток РОМ-1 приведена в технической документации на систему.

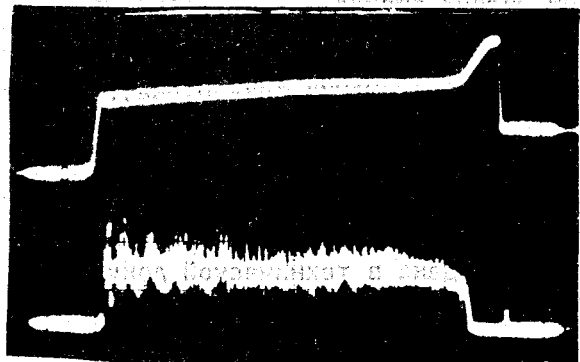
В^{7/} показано, что поддержание равномерного распределения частиц в процессе вывода возможно с помощью обратной связи, воздействующей на систему питания резонансных обмоток таким образом, что ток в них изменяется:

$$i_n(t) = I_{on} + v \int [U_c(t) - e_0] dt,$$

где I_{on} - некоторое начальное значение тока в резонансных обмотках ("пьедестал"); v - коэффициент пропорциональности; $U_c(t)$ - напряжение, пропорциональное току пучка; e_0 - опорное напряжение. Разность $[U_c(t) - e_0]$ представляет собой сигнал ошибки.

Степень воздействия сигнала ошибки на изменение тока РОМ-1 определяет глубину обратной связи и регулируется с помощью потенциометра, установленного на входе интегратора (см. функциональную схему). Осциллограмма на рис.2 иллюстрирует работу обратной связи, которая сфазирована таким образом, что уменьшение тока пучка вызывает увеличение скорости изменения тока РОМ-1 (положительная производная), что, в конечном счете, стабилизирует ток выводимого пучка до тех пор, пока не исчерпаны возможности системы (выведены все частицы). О запаса динамического диапазона системы регулирования свидетельствует резкое увеличение скорости роста тока РОМ-1 после завершения вывода частиц из ускорителя (см. верхний луч на осциллограмме рис.2).

В соответствии с^{7/} физический смысл имеет лишь положительная производная в токе РОМ-1, однако в реальных условиях воздействия пульсаций и помех возможны ситуации, когда для поддержания равномерного вывода в токе РОМ-1 могут быть моменты,



когда производная принимает отрицательные значения (при этом результирующая производная — помехи плюс тока РОМ-1 —

Рис.2. Осциллограмма токов выводимого пучка и питания обмотки РОМ-1: верхний луч — ток в РОМ-1, нижний луч — ток пучка.

остается положительной). Учитывая то обстоятельство, что система регулирования имеет конечное значение динамического диапазона, для осуществления пропорционального регулирования (предотвращения перехода системы в режим регулирования "да - нет") необходимо, чтобы возмущения, т.е. величина модулирующих ток пучка пульсаций, были меньше некоторого значения, определяемого характеристиками системы регулирования. Как показал опыт, достигнутые значения пульсаций в главном магнитном поле, в токах обмоток РОМ-1 и РОМ-2 (см. выше) вполне приемлемы для нормальной работы системы, однако следует иметь в виду, что отключение любой аппаратуры подавления пульсаций в главном поле или в токах РОМ переводит систему регулирования в колебательный режим, не управляемый схемой демпфирования. Однако даже при приемлемых значениях величины модулирующих пульсаций при быстрых возмущениях в токе пучка, в силу инерционности развития резонанса, возникают колебания в системе регулирования. Для их устранения введена система демпфирования, вырабатывающая опережающий сигнал^{8/}, возникающий в начале изменения величины тока пучка. Это достигается тем, что сигнал ошибки поступает на дифференциатор (уровень срабатывания которого подбирается экспериментально), вырабатывающий импульс постоянной амплитуды, некоторая часть которого суммируется с напряжением интегратора. Таким образом определяется тенденция наметившегося изменения тока пучка во времени и вносится опережающая коррекция в изменение поля градиентных обмоток, что стабилизирует скорость развития резонанса. Как показал опыт, для демпфирования системы регулирования достаточно вводить сигнал, возникающий при положительной производной в токе пучка (тенденция к увеличению тока пучка), но такой полярности, которая соответствует прекращению вывода, т.е. формирует в токе РОМ-1 участок с отрицательной производной. Длительность этого участка составляет $0,3 \pm 0,6$ мс, а величина отрицательной производной определяется амплитудой демпфирующего сигнала (потенциометр "демпфирование"). Прием демпфирования, с помощью создания разной постоянной интегрирования для положительных и отрицательных направлений изменения сигнала ошибки, описанный в^{8/}, в наших условиях оказался неэффективным.

Для оценки системы подавления пульсаций в токе выведенного пучка разработана аппаратура оперативного вычисления коэффициента однородности (K_{oc}) во времени тока выведенного пучка $i(t)$ и эффективной длительности вывода ($T_{эф}$)^{13/}:

$$K_{oc} = \frac{1}{T} \frac{[\int_0^T i(t) dt]^2}{\int_0^T i^2(t) dt}, \quad \text{где } T - \text{длительность вывода.}$$

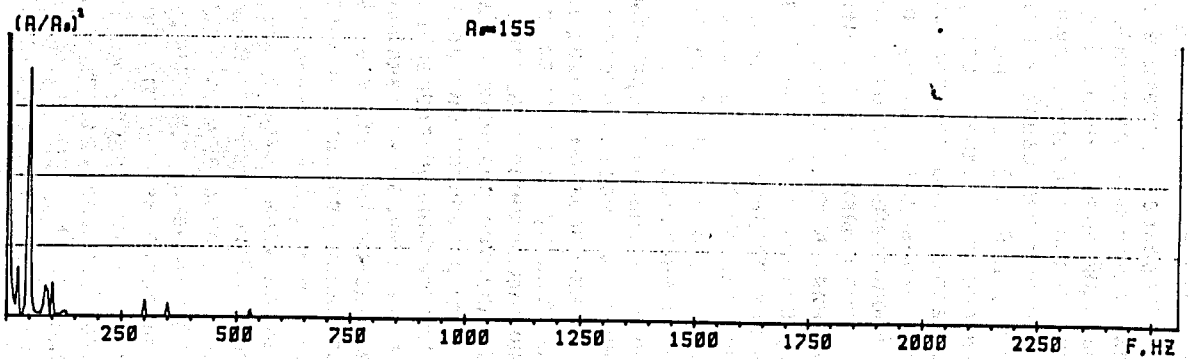
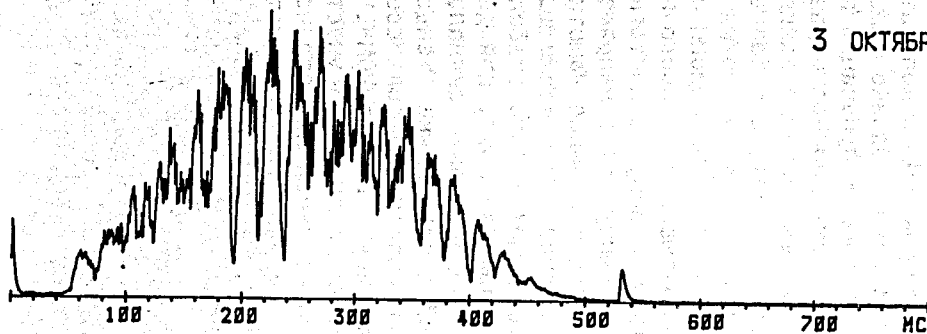
ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР РАСТЯЖКИ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА

3 ОКТЯБРЯ 1988 Г. 16⁴⁴

Техт: 537 МС

Тeff: 323 МС

Кос: 59 %



F, HZ	5	50	25	100	85	300	350	530
A/A ₀	0.284	0.267	0.118	0.097	0.092	0.069	0.061	0.048

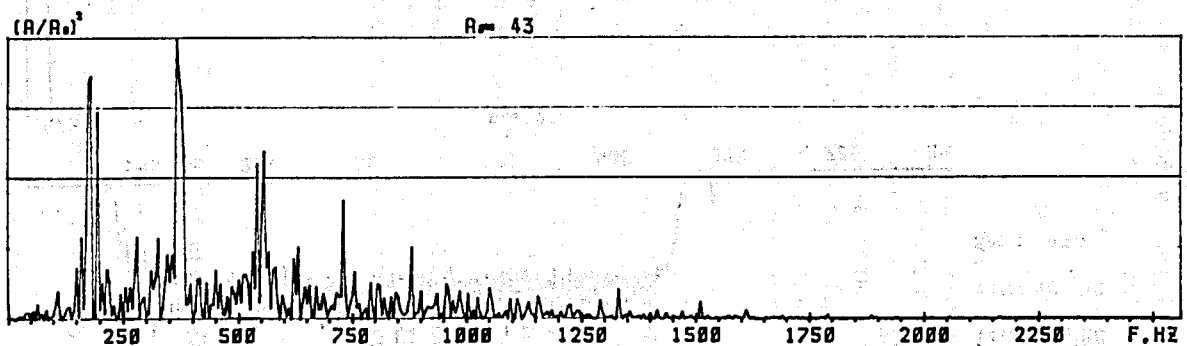
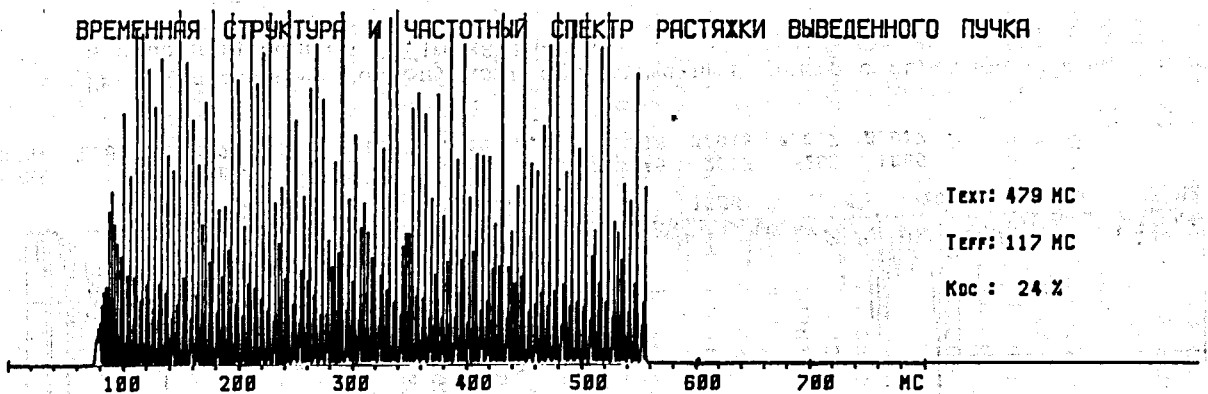
Рис. 3. Диаграмма тока и частотный спектр пучка при выводе без обратной связи с заданным фиксированным значением производной в токе РОМ-1 (3.10.88.16-44).

ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА И ЧАСТОТНЫЙ СПЕКТР РАСТЯЖКИ ВЫВЕДЕННОГО ПУЧКА

Техт: 479 МС

Тeff: 117 МС

Кос: 24 %



F, HZ	365	180	195	555	540	730	160	280	325	630
A/A ₀	0.523	0.488	0.449	0.403	0.369	0.340	0.282	0.282	0.280	0.264

Рис. 4. Диаграмма тока и частотный спектр пучка с обратной связью без демпфирования.

3 ОКТЯБРЯ 1988 Г. 1631

Текст: 533 НС
 Тера: 486 НС
 Кос: 90 %

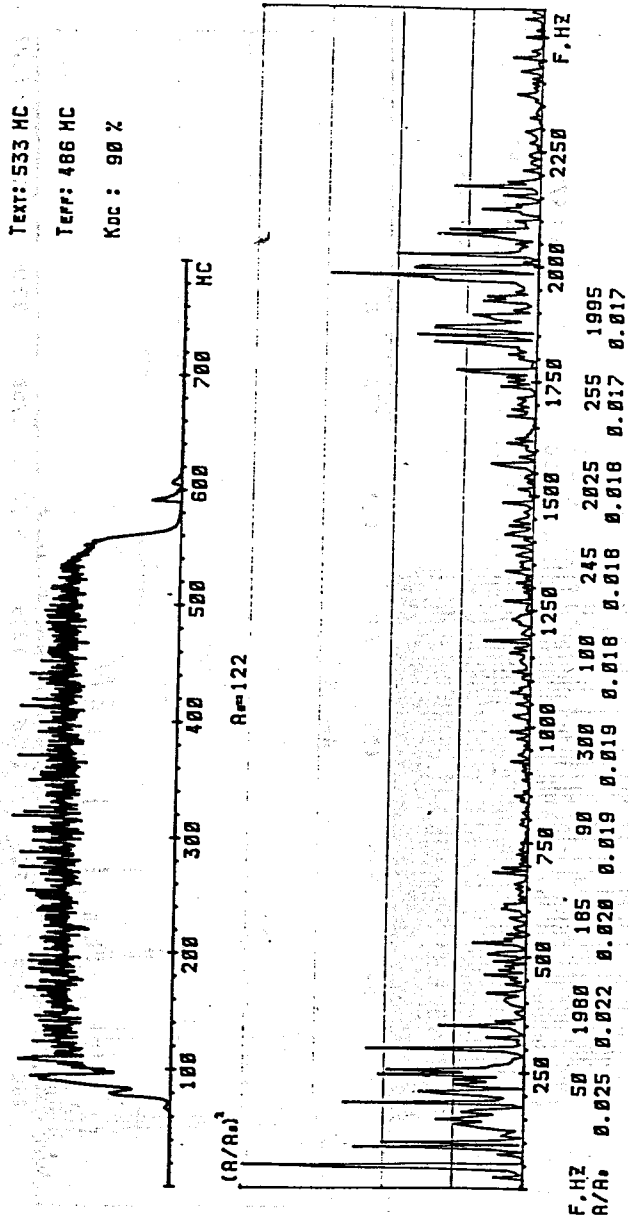


Рис.5. Диаграмма тока пучка и его частотный спектр с обратной связью и с демпфированием (3.10.88 16-31).

Работа системы подавления пульсаций в токе пучка при выводе из ускорителя без высокой частоты иллюстрируется диаграммами рис.3, 4, 5.

На диаграмме рис.3 показан ток пучка, полученный при выводе с фиксированным значением производной в токе РОМ-1 (без обратной связи). Длительность вывода 537 мс, эффективная длительность 323 мс, коэффициент однородности 59%. Ток пучка имеет неприемлемую колоколообразную форму и содержит пульсации 5, 25, 50 Гц и т.д. до 12 гармоники частоты синхронных генераторов, питающих магнит главного поля.

На рис.4 представлена диаграмма тока пучка и частотный спектр его модуляции при работе обратной связью без демпфирования. Форма тока пучка прямоугольная, подавлены низкие частоты (5, 25, 50, 100 Гц), но подчеркнуты частоты модуляции более 150 Гц. Появились ранее отсутствующие частоты модуляции, превышающие частоту 12 гармоники питающей сети (до 1500 Гц). Наличие этих частот в спектре тока пучка можно объяснить работой системы регулирования. Коэффициент однородности низок: 24%.

На рис.5 представлены диаграмма тока пучка и его частотный спектр при работе обратной связью и системы демпфирования. Форма тока - прямоугольная, коэффициент однородности $\kappa_{ос} = 90\%$ достаточно высок. Подавлены все низкочастотные пульсации (наличие в спектре частоты 50 и 90 Гц определяется начальным участком импульса, где имели место дефекты в работе системы подавления пульсаций этих частот в главном поле). Пульсации с частотами более 600 Гц определяются работой системы регулирования (низкочастотные пульсации "дрожатся" и уменьшаются по амплитуде).

Как следует из приведенных диаграмм, работа обратной связью по току пучка с демпфированием достаточно эффективна и выполняет поставленную задачу формирования бесструктурного тока пучка медленного вывода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиколенко В.Ф., Тищенко В.Л. - Сообщение ОИЯИ, 9-81-299, Дубна, 1981.
2. Отт Г. - Методы подавления шумов и помех в электронных системах. М.: Мир, 1979.
3. Дорошенко А.З., Смирнов А.А. - А.с. № 756596 (СССР). Опубликовано в ОИ, 1980, № 30, с.326.
4. Волков В.И. и др. - ПТЭ, 1978, № 1, с.16.
5. Issinsky I.B. et al. - Particle Accelerators, 1973, vol.5, p.215.

6. Васишлин Б.В., Иссинский И.Б., Кулакова Е.М. - Препринт ОИЯИ, Р9-6972, Дубна, 1973.
7. Васишлин Б.В., и др. - Препринт ОИЯИ, Р9-6973, Дубна, 1973.
8. Mirer W. et al. - IEEE Transaction on Nuclear Science, 1985, vol.NS-32, No.5, p.2177.
9. Васишлин Б.В. и др. - ОИЯИ, Б1-9-6536, Дубна, 1972.
10. Васишлин Б.В., Иссинский И.Б., Михайлов В.А. - ОИЯИ, 9-7498, Дубна, 1973.
11. Глущенко В.Г. и др. - Сообщение ОИЯИ, 9-86-473, Дубна, 1986.
12. Глущенко В.Г. и др. - В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, Дубна, 1987, т. I, с.304.
13. Баландиков А.Н. и др. - В сб.: Труды XI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-89-52, Дубна, 1989, т. II, с.348.
14. Cassel K. - IEEE, Trans. Nucl. Sci., June, 1967, p.500.
15. Proudlock P. - CERN, 90-07, 1990, p.55.

Рукопись поступила в издательский отдел
4 декабря 1991 года.