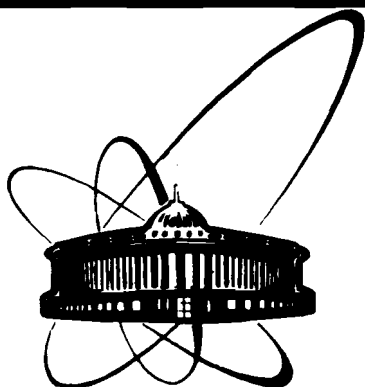


89-831



СООБЩЕНИЯ  
ОБЪЕДИНЕННОГО  
ИНСТИТУТА  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

Ж 122

9-89-831

В.М.Жабицкий, Л.Г.Игнатова, И.Н.Иванов,  
Н.А.Малахов, В.Н.Мамонов, В.А.Мельников,  
Н.И.Пиляр, А.С.Щеулин

ИМПУЛЬСНЫЙ ГЕНЕРАТОР  
УДАРНОГО МАГНИТА  
ДЛЯ ОДНОБОРОТНОЙ СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ  
НАЧАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ  
ПУЧКА I СТУПЕНИ У Н К

1989

В первую ступень УНК<sup>1/1</sup> инжектируется от одного до двенадцати сгустков, промодулированных частотой 200 МГц. Период обращения в УНК составляет  $T_0 = 70$  мкс. Максимальная длительность отдельного сгустка составляет  $T_1 = 4,85$  мкс, а минимальный интервал между сгустками  $T_2 = 0,6$  мкс. Проектом предусмотрено наличие интервала между первым и последним сгустком на орбите не менее  $T_3 = 5,2$  мкс. Инжекция из У-70 осуществляется по одному сгустку каждые 6,5 секунды.

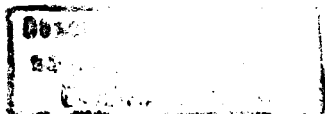
При инжекции очередной порции протонов возможно возникновение когерентных колебаний со случайными амплитудой и фазой, приводящие к максимальным отклонениям от стационарной орбиты до  $A_{\text{макс}} = 3,3$  мм. Допустимые отклонения не должны превышать  $A_{\text{доп}} = 0,15$  мм, что в основном обусловлено параметрами системы подавления когерентной поперечной неустойчивости<sup>12/</sup>. В литературе описана<sup>13/</sup> система подавления остаточных колебаний за несколько оборотов, но быстрее, чем за время перехода когерентных бетатронных колебаний в некогерентные. Для УНК это время составляет  $\sim 10 T_0$ , однако развитие поперечной резистивной неустойчивости происходит за 1,5–2  $T_0$ . Таким образом, необходимо стремиться к подавлению начальных колебаний за максимально короткое время, по крайней мере сравнимое с  $T_0$ .

В настоящей работе предлагается схема питания ударного магнита системы подавления начальных колебаний, обеспечивающая однооборотный режим работы.

## 1. ТРЕБОВАНИЯ К ПАРАМЕТРАМ ИМПУЛЬСА ТОКА В УДАРНОМ МАГНИТЕ

Для подавления колебаний с амплитудой 3,3 мм при энергии инжекции 70 ГэВ и стандартном условии пересечения пучком стационарной орбиты в центре ударного магнита необходимо в последнем обеспечить эффективное магнитное поле  $B \cdot l = 0,01$  Тл·м. При применении разработанных в ИФВЭ ударных магнитов<sup>14/</sup> (длина 3 м, ферритовое ярмо, индуктивность 4–6 мкГн) такому полю соответствует максимальная амплитуда импульса тока  $I_0 = 200$  А.

Исходя из временной структуры пучка и соотношения между максимальной ошибкой инжекции и максимально допустимым отклонением



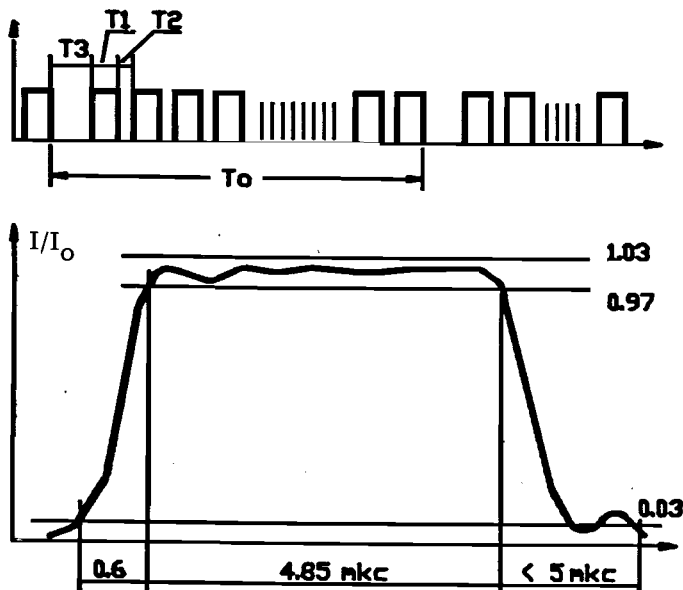


Рис. 1. Временная структура пучка 1 ступени УНК и требуемая форма импульса тока.

пучка после подавления ( $A_{\text{доп}} = 0,03 A_{\text{макс}}$ ), можно сформулировать требования к импульсу тока (в предположении равномерного распределения начального отклонения по длительности сгустка).

Длительность плато (рис. 1) по уровням  $0,97-1,03 I_0$  —  $4,85$  мкс (соответствует длительности одного инжектируемого сгустка); длительность фронта по уровням  $0,03-0,97 I_0 < 0,6$  мкс (не должна превышать интервала между двумя ближайшими сгустками на орбите); длительность спада от уровня  $0,97$  до  $0,03$  (включая послеимпульс) — не более  $5$  мкс (должно укладываться в промежуток между последним и первым сгустком на орбите); неравномерность плато в пределах  $\pm 3\% I_0$ ; точность и минимальный шаг установки амплитуды импульса —  $3\%$  от  $I_0$ .

Кроме того, помещение, где предполагается разместить генераторы, отстоит от магнитов на расстоянии порядка  $300$  метров, что подразумевает работу генератора на нагрузку, включающую кабельную линию с волновым сопротивлением  $17$  Ом и временем задержки  $1,5$  мкс.

Амплитуда и полярность импульса должны определяться показаниями двух датчиков положения, фиксирующих начальные отклонения и фазу колебаний пучка. Полная система подавления предусматривает  $4$  ударных магнита (и  $4$  униполярных генератора), обеспечивающих независимость темпа подавления от начальной фазы колебаний.

На обработку сигналов датчиков положения, выработку соответствующих сигналов управления необходимо около  $15$  мкс (включая время прохождения всех импульсов по линиям связи). Таким образом, для формирования импульса тока ударного магнита с амплитудой, линейно зависящего от уровня сигнала соответствующего датчика, остается не более  $55$  мкс с учетом длительности самого импульса.

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ И РАСЧЕТ СХЕМЫ ГЕНЕРАТОРА

Импульс тока требуемой амплитуды и длительности удобнее всего формировать с помощью искусственной длинной линии. Если ограничиться не слишком высоким напряжением (менее  $20$  кВ), то окажется, что суммарная емкость этой линии должна составлять  $100-300$  нФ. Зарядка такой емкости в течение  $50$  мкс с обеспечением пропорциональности напряжению амплитуде сигнала датчика положения пучка с отклонением от линейности не более  $3\%$  представляет собой сложную техническую задачу. Поэтому было предложено предварительно заряженную до постоянного напряжения  $U_0$  линию разряжать до необходимого уровня за время  $< 50$  мкс.

Упрощенная схема генератора представлена на рис. 2. В начальном состоянии емкость линии заряжена до напряжения  $U_0$ , соответствующего максимальному требуемому току в нагрузке. Разрядное сопротивление  $R$  выбрано таким, что при срабатывании коммутатора  $T1$  напряжение падает до уровня  $0,03 U_0$  за  $50$  мкс (линия разряжается как сосредоточенная емкость). Коммутатор  $T2$  срабатывает через время  $T_0$  после момента измерения. Закон преобразования  $A_{\text{изм}}$  во время включения  $T1$  выбирается таким образом, чтобы к моменту срабатывания  $T2$  на линии было напряжение, соответствующее току, необходимому для демпфирования  $A_{\text{изм}}$ . Чем больше  $A_{\text{изм}}$ , тем позже включается  $T1$ . Эпюры, иллюстрирующие принцип работы схемы, показаны на рис. 3.

Конкретная схема генератора, приведенная на рис. 4, рассчитывалась численными методами.

В начальный момент времени на емкостях  $C1-CN$  задавалось одинаковое напряжение. Затем эти емкости

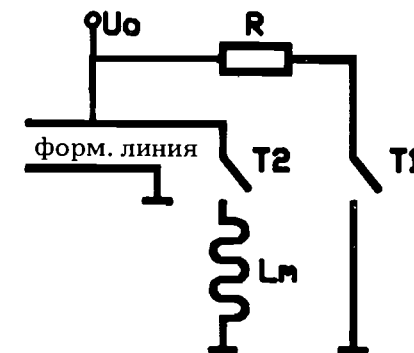


Рис. 2. Упрощенная схема генератора.

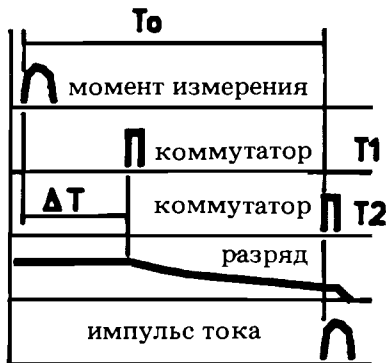


Рис. 3. Временные диаграммы работы генератора.

разряжались через резисторы  $R1-RN$  и нагрузку с помощью ключей  $T1-T2$ . Омическая нагрузка  $RS3$  равнялась волновому сопротивлению фидера. Для компенсации спада зарядного напряжения в течение длительности импульса, задаваемого сопротивлениями  $R1-RN$ , величины этих сопротивлений варьировались по длине линии по закону  $R1 = R1 - IdR$  ( $I$  — номер

ячейки). Варьировались также номиналы индуктивностей по закону  $LI = L1 + IdL$ . Величина индуктивности  $LN$  выбиралась равной  $2 \cdot LN - 1$ . Резисторы  $RS1$  и  $RS2$  необходимы для согласования выхода формирующей линии со входом кабеля. Число ячеек  $N$  и конкретные параметры определялись временными параметрами импульса тока в нагрузке и наличием соответствующей элементной базы. Они составляли:

$$C1 = C2 = \dots = C10 = 20 \text{ нФ},$$

$$L1 = 1,8 \text{ мкГн}, \quad dL = 0,45 \text{ мкГн},$$

$$R1 = 960 \text{ Ом}, \quad dR = 50 \text{ Ом}.$$

Линия, построенная по такой схеме, обладает эффективным волновым сопротивлением 11-12 Ом.

На рис. 5 представлены результаты расчетов. Видно, что можно получить уровень пульсаций на вершине не более 2%. Погрешность расчета была не выше 2%.

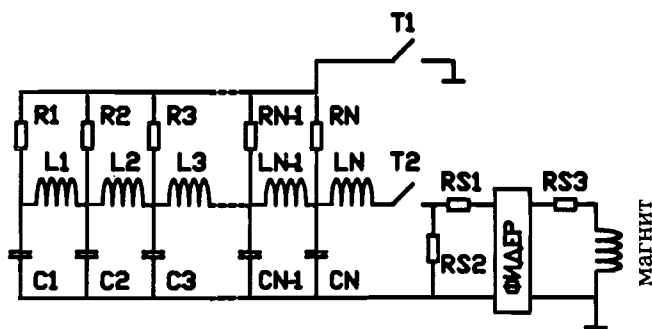
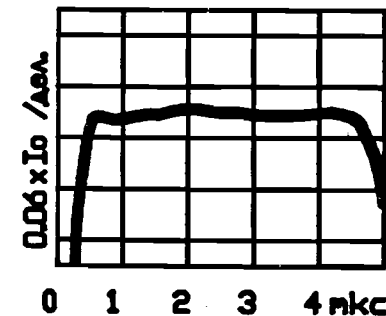


Рис. 4. Принципиальная схема генератора.

Рис. 5. Расчетная форма импульса тока.



Особо отметим, что требования к точности всех элементов схемы являются жесткими ( $\leq 0,5\%$ ), кроме резисторов  $R1-RN$ , которые нужно подбирать с точностью не хуже 2%.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для выполнения экспериментов был создан специальный стенд (рис. 6), включающий ПЭВМ "Правец-16". Электронные блоки выполнены в стандарте КАМАК. Связь с ПЭВМ осуществляется через контроллер КК-009<sup>15</sup>.

Специально разработанный блок режимов (БР) осуществляет синхронизацию всего стенда, вырабатывая тактовые импульсы 20 МГц, 10 МГц, а также программируемые в диапазоне 0-100 мкс с шагом 20 нс запуски коммутаторов. 8-канальный блок задержек БЗН-8К<sup>16</sup> используется для запуска измерительных систем.

На основе блока АЦП-04 (разработка ЛВЭ, время преобразования 50 нс, 8 разрядов, 2К-буфер) программно реализован своего рода цифровой осциллограф с возможностью накопления и обработки информации. АЦП 12/16<sup>17</sup> применяется для измерения постоянных или медленно меняющихся параметров

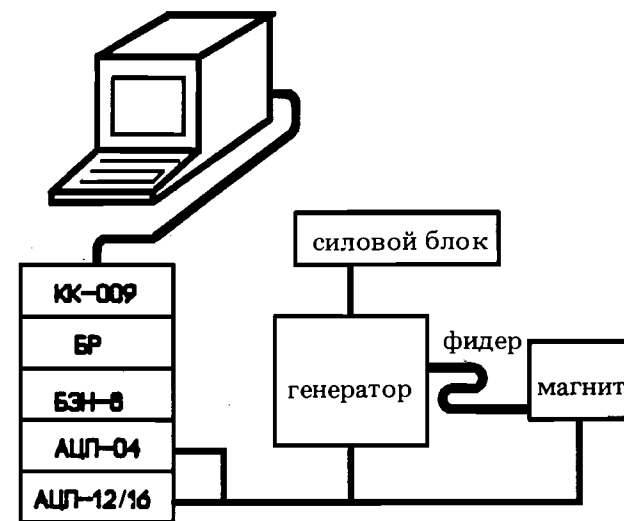


Рис. 6. Блок-схема экспериментального стенда.

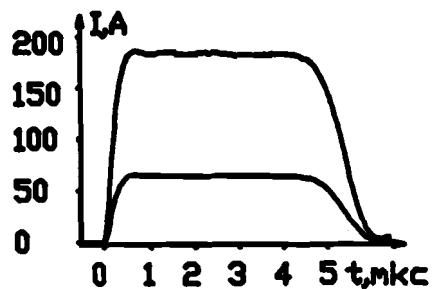


Рис. 7. Оциллограммы тока в нагрузке при различных временах включения коммутатора  $T_1$ .

(в том числе зарядного напряжения).

Система электроники в целом обеспечивала управление стендом, накопление, обработку и представление информации в графическом или цифровом виде. Собранный и налаженный генератор соответствовал расчетной схеме. Подбор элементной базы был проведен следующим образом.

Каждая емкость в линии образуется параллельным соединением 4 конденсаторов (имеющих разброс номиналов 10%), что позволило нам свести разброс суммарных емкостей ячеек линии к требуемым 0,5%, и при окончательном расчете рабочего варианта мы пользовались измеренными значениями емкостей. Соответствующий рост паразитных индуктивностей укладывался в допустимые пределы.

Точная установка индуктивностей обеспечивалась использованием катушек с медным сердечником. Точность 0,5% достигалась фиксацией положения сердечника с погрешностью 0,3 мм. В качестве коммутаторов предложено использовать тиратроны ТГИ1-1000/25, обеспечивающие надежную работу при токах до 1,5 кА с временным разбросом по запуску не более 100 нс. Следует отметить, что эти тиратроны стабильны при работе с напряжением на линии не ниже 140 В. Фидер с волновым сопротивлением 17 Ом был изготовлен путем параллельного соединения трех кабелей РК50-9/11 длиной 300 м. Кроме того, был изготовлен макет ударного магнита с индуктивностью, варьируемой в пределах 1-6 мкГн.

Эксперименты показали соответствие реальных параметров выходного импульса расчетным во всем динамическом диапазоне (изменение амплитуды импульса тока в нагрузке в 32 раза при изменении задержки срабатывания  $T_1$  на 50 мкс). Анализ реальной формы разрядной кривой позволил оценить минимальный необходимый дискрет задержки. На рис. 7 приведены типичные оциллограммы при различных задержках  $T_1$ . При зарядке линии до 6 кВ и максимальной задержке запуска тиратрона  $T_1$  ток в нагрузке составил 200 А. По заданным уровням: длительность фронта составила не более  $600 \pm 50$  нс; длительность плато —  $4,6 \pm 0,05$  мкс; время спада вместе с послеимпульсом — не более 4 мкс.

Увеличение длительности плато возможно за счет увеличения числа ячеек, как это и предполагалось в расчетах. В остальном генератор удовлетворяет поставленным требованиям.

Увеличение длительности плато возможно за счет увеличения числа ячеек, как это и предполагалось в расчетах. В остальном генератор удовлетворяет поставленным требованиям.

Существенное внимание уделялось проблеме передачи импульса тока в нагрузку. С одной стороны фидер сопрягается с 12-омной формирующей линией, а с другой — нагружен на магнит, импеданс которого носит индуктивный характер. Нами выбран простой путь введения несимметричной резистивной цепи между формирующей линией и фидером (см. рис. 4). Это приводит к их взаимному согласованию с допустимой потерей мощности: отсутствует искажение импульса при входе в фидер и гасится отраженная от магнита волна, не давая (после двойного пробега) искажений импульса тока в нагрузке. Естественная неидеальность такой цепочки вынуждает вводить последовательно с магнитом сопротивление  $RS_3$ , уменьшающее коэффициент отражения и позволяющее свести суммарные искажения к минимуму.

Импульс тока в магните, удовлетворяющий начальным требованиям, получен при следующих значениях сопротивлений:

$$RS_1 = 34 \text{ Ом}, \quad RS_2 = 12 \text{ Ом}, \quad RS_3 = 17 \text{ Ом}.$$

При этом для сохранения амплитуды тока в магните пришлось вдвое увеличить зарядное напряжение.

Пути улучшения связи генератора с магнитом могут состоять как в оптимизации предложенной схемы, так и в применении иных схем согласования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная схема генератора позволяет формировать импульс тока в ударном магните, соответствующий задаче подавления начальных колебаний пучка I ступени УНК в однооборотном режиме с необходимой точностью.

Авторы выражают признательность Г.А.Иванову, Н.И.Лебедеву, А.А.Фатееву, С.А.Попову за плодотворные обсуждения, а также С.В.Швецову за большой объем монтажных работ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев А.И. и др. — В сб.: Труды X Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Д9-87-105, 1987, т.2, с.430.
2. Балбеков В.И. — В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т.2, с.360.

3. Brouzet E. et al. — In: NS-32, 1985, No.5, p.2135.
4. Андреев В.Н. и др. — В сб.: Труды IX Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Дубна, 1985, т.2, с.395.
5. Георгиев А., Чуринов И.Н. — Сообщение ОИЯИ P10-88-381, Дубна, 1988.
6. Глейбман Э.М., Пиляев Н.В. — Сообщение ОИЯИ 9-84-528, Дубна, 1984.
7. Попов С.А. — Сообщение ОИЯИ P10-86-398, Дубна, 1986.

Жабицкий В.М. и др. 9-89-831

Импульсный генератор ударного магнита для однооборотной системы подавления начальных колебаний пучка I степени УНК

Для системы подавления начальных бетатронных колебаний I степени УНК разработан и создан генератор, обеспечивающий однооборотный режим работы этой системы. Предварительно заряженная формирующая линия разряжается как сосредоточенная емкость до уровня, соответствующего показаниям датчиков положения, за время, не превышающее 50 мкс (время оборота пучка составляет около 70 мкс). Импульс тока передается в ударный магнит по длинному 17-омному фидеру. Стендовые эксперименты показали, что предложенная схема генератора позволяет формировать с необходимой точностью ( $\pm 3\%$ ) импульс тока, имеющий требуемые амплитудные и временные параметры.

Работа выполнена в Общественном научно-методическом отделении ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1989

Перевод авторов

Zhabitskij V.M. et al. 9-89-831

The Kicker-Magnet Pulse Generator for Initial Oscillations Dampfer System in One-Turn Regime for I Stage UNK

The generator for initial betatron oscillations dampfer system in one turn regime for I stage UNK is described. The forming line is preliminary charged, and discharged from the certainly level (defined by beam-location sensor) as the local capacitor. The discharge time must be less than 50  $\mu$ s (turns delay in UNK is about 70  $\mu$ s). The current pulse is transmitted to kicker by a long 17-ohms line. Accuracy ( $\pm 3\%$ ) is shown experimentally.

The investigation has been performed at the Scientific-Methodical Division, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1989

Рукопись поступила в издательский отдел  
18 декабря 1989 года.