

9-98-1

На правах рукописи
УДК 621.384.6.01

М-482

МЕЛЬНИКОВ
Владимир Алексеевич

**СИСТЕМЫ ПОДАВЛЕНИЯ
ПОПЕРЕЧНЫХ КОГЕРЕНТНЫХ КОЛЕБАНИЙ
ПУЧКОВ ЦИКЛИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ**

Специальность: 01.04.20 — физика пучков заряженных
частиц и ускорительная техника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена в Лаборатории сверхвысоких энергий
Объединенного института ядерных исследований

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

И.Н.Иванов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
чл.-корр. РАН

И.Н.Мешков

кандидат технических наук

Т.А.Латыпов

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Институт физики высоких энергий РАН, г.Протвино

Защита диссертации состоится "___" _____ 1998 г.

в _____ часов на заседании диссертационного совета Д-047.01.06

при Лаборатории сверхвысоких энергий

Объединенного института ядерных исследований,

г.Дубна Московской области

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ

Автореферат разослан "___" _____ 1998 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

В.Г.Кривохижин

Общая характеристика работы

Актуальность

Разработка систем подавления поперечных колебаний (СППК) пучков является актуальной задачей в области ускорительной техники. Это обусловлено требованием высокой светимости пучка, необходимой для современных экспериментов физики элементарных частиц. Светимость определяется потоком частиц, и для ее повышения одинаково важно как увеличение полного тока, так и предотвращение роста поперечного сечения пучка. Для выполнения этих задач в состав циклических ускорителей вводятся СППК.

Системы поперечной обратной связи обеспечивают коррекцию ошибок инжекции и компенсируют развитие когерентных поперечных неустойчивостей. Тем самым они позволяют накапливать пучки высокой интенсивности, препятствуя быстрому росту эмиттанса и снижению светимости пучка. СППК состоят из датчика положения, электронных устройств обработки сигнала, усилителя мощности и исполнительного устройства – кикера. Датчик положения регистрирует отклонение центра тяжести пучка от равновесной орбиты в месте его расположения. Сигнал с датчика преобразуется в соответствии с детерминированной динамикой пучка, усиливается до заданного уровня и с необходимой задержкой подается на кикер, где происходит изменение угла наклона траектории пучка на величину, пропорциональную измеренному отклонению. Величина задержки подбирается таким образом, чтобы воздействие в кикере было синхронизовано с показаниями датчика положения для одних и тех же частиц.

В современных проектах ускорителей и коллайдеров на сверхвысокие энергии подобным системам уделяется особое внимание. Вместе с тем именно для таких установок реализация СППК традиционными способами становится затруднительной из-за одновременного роста требований на мощность и широкополосность систем. В связи с этим возникает потребность в поиске способов повышения эффективности работы как систем в целом, так и отдельных устройств, в первую очередь – устройств усиления мощности.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния режимов работы СППК на темп подавления колебаний, разработке и созданию устройств для их осуществления.

Результаты исследований и разработок применены для создания комплекса генераторов мощных импульсов СППК I ступени УНК (Ускорительно-Накопительный Комплекс, Протвино), для моделирования усилителей-формирователей СППК ЛНС (Большой Адронный Коллайдер, ЦЕРН), для оптимизации режима работы СППК SPS (Супер Протонный Синхротрон, ЦЕРН).

Цель работы

- разработка и создание мощных прецизионных импульсных генераторов для системы подавления начальных колебаний пучка 1 ступени УНК;
- исследование влияния режимов работы систем подавления на динамику пучка в циклических ускорителях;
- разработка модели мощного усилителя-формирователя для системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка ЛНС;
- повышение эффективности работы систем подавления поперечных когерентных колебаний пучка за счет оптимизации режима.

Научная новизна

- впервые обоснован и осуществлен метод цифрового моделирования обратной связи мощных радиофизических и импульсных устройств;
- впервые разработана и осуществлена методика оперативного измерения времени подавления поперечных колебаний;
- впервые обоснован и экспериментально подтвержден “логический” режим подавления поперечных когерентных колебаний пучков на основе систем со ступенчатой передаточной функцией;
- впервые создана система коррекции ошибок инжекции с использованием импульсного генератора вместо усилителя мощности.

Практическая ценность

- создан комплекс мощных прецизионных импульсных генераторов для системы подавления начальных колебаний пучка 1 ступени УНК;

- разработана модель мощного усилителя-формирователя для системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка ЛНС;
- использование методики оперативного измерения времени подавления поперечных колебаний позволило выработать рекомендации по оптимизации режима работы СППК SPS.

Автор защищает

- схмотехническое решение, принцип действия и техническую реализацию мощных прецизионных импульсных генераторов для системы подавления начальных колебаний пучка 1 ступени УНК с быстрой зарядкой формирующей линии;
- схмотехническое решение и принцип действия мощного усилителя-формирователя с изменяемой характеристикой для системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка ЛНС;
- метод моделирования параметров выходного сигнала для повышения эффективности мощных радиофизических и импульсных устройств;
- методику оперативного измерения времени подавления поперечных колебаний, принцип действия и схмотехническое решение аппаратуры для ее осуществления;
- теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение режима подавления поперечных когерентных колебаний пучков на основе систем со ступенчатой передаточной функцией (“логический” режим).

Апробация и публикации

Диссертация написана на основе научных работ, выполненных автором или с участием автора в Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ в период с 1990 по 1997 год. Изложенные в ней материалы

- докладывались на совещаниях, проходивших в ОИЯИ, ИФВЭ и МРТИ в рамках работ по созданию системы подавления для 1 ступени УНК;
- обсуждались в ускорительном подразделении ЦЕРН в связи с работами по созданию системы подавления для ЛНС;

- докладывались на научных семинарах Лаборатории сверхвысоких энергий ОИЯИ;
- обсуждались на рабочем совещании ICFA, Эричи, Италия, 1994.
- обсуждались на рабочем совещании ICFA, Монтре, Швейцария, 1996.
- докладывались на
 - XII Всесоюзном Совещании по ускорителям заряженных частиц (Москва, СССР, 1990 г.);
 - XIII Совещании по ускорителям заряженных частиц (Дубна, Россия, 1992 г.);
 - XIV Совещании по ускорителям заряженных частиц (Протвино, Россия, 1994 г.);
 - Международной конференции по ускорителям (Гамбург, ФРГ, 1992 г.);
 - Национальной конференции по ускорителям PAC93 (Вашингтон, США, 1993 г.);
 - Европейской конференции по ускорителям EPAC95 (Лондон, Великобритания, 1995 г.);
 - Рабочем совещании ICFA "Cooling&Damping-96".
 - Национальной конференции по ускорителям PAC97 (Ванкувер, Канада, 1997).

По результатам диссертации опубликовано 9 работ.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Работа изложена на 73 страницах, включая 41 рисунок.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность проблемы, кратко охарактеризованы современное состояние и тенденции развития систем подавления колебаний пучков. Показано, что решение задачи о повышении эффективности работы СППК может быть связано прежде всего с исследованиями нетрадиционных способов подавления и разработкой соответствующих устройств. Речь идет о режимах, при которых сигнал, поступающий на исполнительное устройство не пропорционален измеренному отклонению пучка. При этом передаточная функция системы становится нелинейной.

Такие режимы позволяют использовать в качестве устройств усиления мощности импульсные генераторы вместо широкополосных усилителей или специальные усилители-формирователи с изменяемой характеристикой. Показано, что сочетание оптимизированных режимов и новых схмотехнических решений является перспективным и позволяет повысить эффективность СППК.

В первой главе представлены результаты разработки и создания мощных прецизионных импульсных генераторов для системы подавления начальных колебаний пучка 1 ступени УНК.

Анализ проектных параметров первой ступени УНК (инжекционная жесткость пучка, величина ожидаемых ошибок инжекции, время развития когерентных неустойчивостей и т.д.) дает оценку необходимой средней мощности классической СППК в 5 МВт. При этом очевидно, что подобного уровня мощности требует лишь коррекция ошибок инжекции, тогда как для компенсации резистивной неустойчивости достаточно устройства мощностью около 40 кВт. В этой ситуации было принято решение о создании отдельной системы для компенсации начальных ошибок на основе импульсного генератора. Требуемая форма импульсов тока в ударном магните представлена на Рис. 1; амплитуда должна достигать 500 А; точность установки амплитуды $\pm 3\%$; генератор должен формировать серии до десяти импульсов. Время формирования импульса не должно превышать 50 мкс.

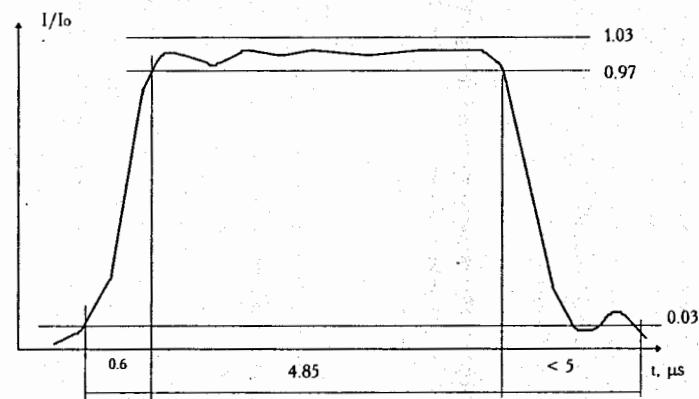


Рис. 1 Требования на форму импульса тока в кикерах системы коррекции ошибок инжекции.

Импульс тока требуемой амплитуды и длительности удобнее всего формировать с помощью искусственной длинной линии. Суммарная емкость линии составляет $100+300$ нФ. Зарядка такой емкости в течение 50 мкс до заданного значения с точностью 3% представляет собой сложную техническую задачу. Поэтому было предложено предварительно заряженную до максимального напряжения линию разряжать до необходимого уровня за время, не превышающее 50 мкс. Общая принципиальная схема генератора представлена на Рис. 2.

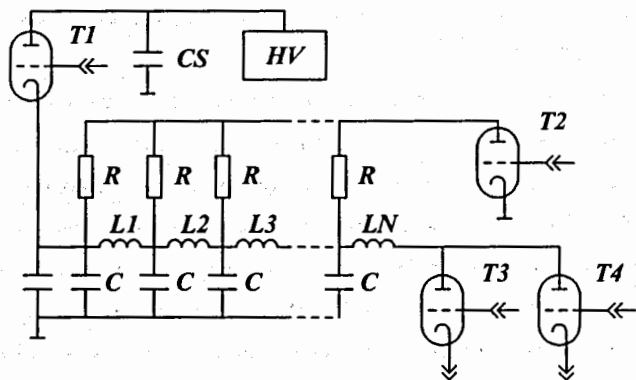


Рис. 2 Общая схема генератора.

В начальном состоянии емкость линии заряжена до напряжения U_0 , соответствующего максимальному требуемому току в нагрузке. При срабатывании коммутатора $T2$ вся формирующая линия разряжается по экспоненциальному закону, как сосредоточенная емкость. Эффективное значение разрядных сопротивлений R подобрано так, что время разрядки до уровня напряжения $0.03 U_0$ не превышает 40 мкс.

Коммутатор $T3$ ($T4$) срабатывает через оборот после момента измерения (то-есть в момент прохождения тока через магнит). Закон преобразования измеренного отклонения A во время Δt включения $T2$ выбирается таким образом, чтобы к моменту срабатывания $T3$ ($T4$) на линии было напряжение, соответствующее току, необходимому для демпфирования A . Эпюры, иллюстрирующие принцип работы схемы, показаны на Рис. 3.

Основная особенность принципиальной схемы формирующей линии определяется необходимостью ее частичного разряда как сосредоточенной емкости. Общая шунтировка звеньев линии разрядными резисторами (ТВО-20, 1 кОм) приводит к появлению наклона плато импульса, который выходит за допустимые пределы.

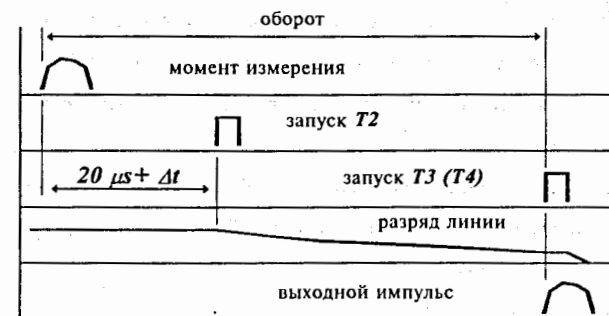


Рис. 3 Временная диаграмма работы системы.

Для компенсации этого эффекта в линию введена неоднородность за счет линейного изменения значений индуктивностей от звена к звену. Эти же индуктивности являлись основными элементами настройки линии при компенсации естественного разброса параметров емкостей (использовались конденсаторы К15-10 15 нФ). Введение коммутатора $T4$, включенного на магнит с обратным направлением тока, позволило получать разнополярные импульсы магнитного поля от генератора с однополярным зарядным напряжением.

Собранная линия имеет эффективное волновое сопротивление 17 Ом, что обеспечило ее согласование с фидером. В качестве коммутаторов были использованы тиратроны ТГИ1-1000/25. Динамический диапазон амплитуд токов на выходе генератора составляет $30 \div 1000$ А, что при заданной нагрузке соответствует напряжениям $0.51 \div 17$ кВ. Эти значения соответствуют паспортному режиму работы тиратронов.

Как отмечалось выше, система предусматривает возможность воздействия на пучок серий до 10 импульсов. Возможность формирования последующих импульсов в серии осуществляется схемой быстрой зарядки формирующей линии до некоторого максимального уровня. Далее процесс генерации импульса необходимой амплитуды и полярности полностью соответствует описанному выше.

Жесткие требования к точностным параметрам СПШК определяют необходимость создания специальной системы управления, которая должна анализировать не только внешние параметры (нормализованные показания датчиков положения пучка, синхронизация и т.п.), но и внутреннее состояние генератора. Кроме того, в автономном и стендовом режимах система управления должна обеспечивать возможность проведения исследований параметров генератора, его настройки и тестирования.

Разработанный генератор вместе с системой управления обладает одной принципиальной особенностью. Обычно для обеспечения требуемых значений стабильности и точности работы устройств в их состав вводится цепь обратной связи. На начальной стадии разработки данного генератора рассматривался именно такой вариант. Однако в процессе исследований выяснилось, что большая коммутируемая мощность приводит к нестабильности работы самой системы обратной связи. С другой стороны, сформулированные требования на генератор не могли быть обеспечены без соответствующей системы контроля.

Для решения этой проблемы была использована особая структура системы управления генератором. Принципиальной особенностью системы управления является наличие в ней интерполятора - двумерной электронной матрицы преобразования параметров входного сигнала в параметры выходного с учетом текущего состояния генератора в целом. Содержание матрицы формируется на основе тщательных измерений реальных характеристик каждого конкретного генератора во всех возможных комбинациях рабочих условий. Тем самым интерполятор является адекватной цифровой моделью реального генератора. Анализ показал принципиальную возможность применения такого способа управления в самых разнообразных мощных радиофизических устройствах, позволяющую говорить об обосновании и реализации цифрового моделирования обратной связи именно как общего метода.

Изготовленный генератор вместе с системой управления был налажен и испытан на специально оборудованном высоковольтном стенде. На Рис. 4 приведены типичные осциллограммы тока в магните при различных значениях задержки Δt .

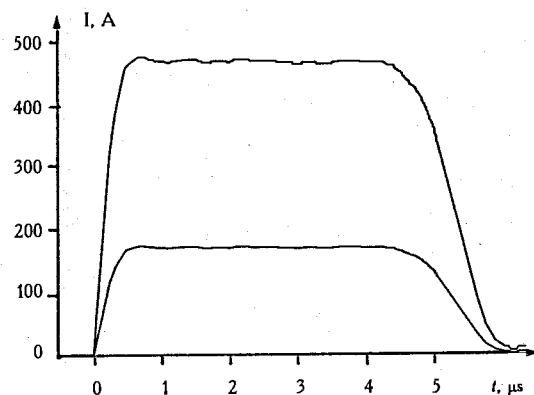


Рис. 4 Типичные импульсы тока в магните.

Осциллограммы получены путем оцифровки сигнала с тактовой частотой 10 МГц, что позволило провести тщательный анализ формы импульсов. Обработка показала, что отклонения от средней амплитуды на плато в заданном временном интервале не превышают $\pm 1.5\%$.

Работа осуществлялась в следующем режиме: число импульсов в серии - 10; частота повторения импульсов в серии - 7 кГц; частота следования серий - 0.14 Гц. Таким образом, объем паработанной статистики составляет более 3000 серий импульсов. Это соответствует 250 рабочим циклам УНК (более трех месяцев работы). Разброс откликов системы не превысил $\pm 1.5\%$ по отношению к максимальной амплитуде. Функциональных изменений в работе мощного генератора и системы управления после проведения испытаний обнаружено не было.

Во второй главе проводится анализ нетрадиционных режимов работы СППК, при которых сигнал, поступающий на исполнительное устройство, не пропорционален измеренному отклонению пучка. При этом передаточная функция системы становится нелинейной. Приводятся результаты экспериментальной проверки нелинейных режимов подавления поперечных колебаний пучка SPS.

Первый эксперимент с нелинейной передаточной функцией был осуществлен в 1986 г. при исследованиях свойств СППК SPS. Было замечено, что насыщение усилителя мощности при больших амплитудах колебаний приводит к повышению темпа подавления. Насыщение усилителя приводит к изменению передаточной характеристики СППК от линейной к комбинированной, содержащей линейную часть для малых амплитуд колебаний и фиксированное воздействие для амплитуд, превышающих некоторое пороговое значение. Режим подавления с такой передаточной функцией получил название "Bang-Bang".

При детальном исследовании передаточной функции, использованной в экспериментах 1986 года, было обнаружено, что участок, ответственный за малые амплитуды колебаний, имеет квазилинейный ступенчатый характер, что объясняется наличием в цепи обработки сигнала цифровых элементов. При этом на "линейный" участок приходится всего 4-6 квантов АЦП. Это навело на мысль о возможности использования режима "bang-bang" для колебаний с малыми амплитудами. Полное необходимое число ступеней определяется соотношением максимальной начальной

амплитуды колебаний (ошибкой инжекции), разрядностью цифровой части системы и требуемым темпом подавления. Оценки показывают, что для большинства установок и проектов достаточно 2-3 ступеней. Режим с подобной передаточной функцией получил название "логического". Рис. 5 позволяет сравнить передаточные характеристики для различных режимов подавления.

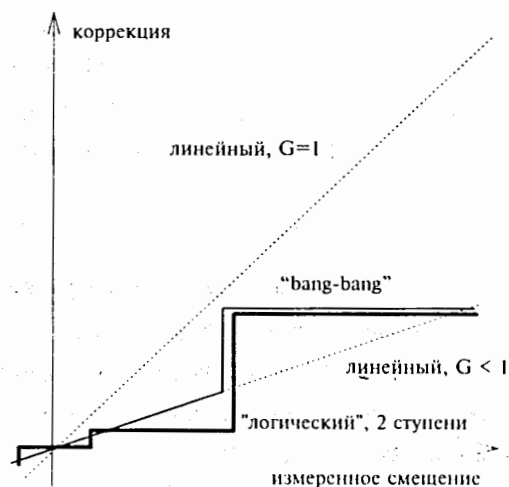


Рис. 5 Передаточные характеристики для различных режимов подавления.

Эффективность логического режима была подтверждена экспериментально на SPS в 1995 году. Основной целью эксперимента являлась оптимизация параметров передаточной характеристики цепи обратной связи за счет использования режимов "bang-bang" и "логического" для подавления поперечных колебаний.

Для проведения эксперимента в условиях SPS был разработан специальный функциональный блок, позволяющий плавно переходить от линейной передаточной функции к различным видам нелинейности, и устройство для измерения времени подавления. Функциональный блок выполнен на основе аналоговой техники в отличие от цифровых устройств, которые применялись для этой цели ранее. Это обеспечило возможность плавной настройки порогов реакции и амплитуд коррекции. Принцип действия устройства для оперативного измерения времени подавления состоит в комбинированной аналоговой и математической обработке сигнала датчика положения. При этом результатом измерения является оцифрованное значение времени, за которое

амплитуда колебаний уменьшается в e раз. Используемый метод обеспечивает более высокую точность по сравнению с осциллографическими и большую оперативность по сравнению со способами на основе измерения спектра колебаний.

В эксперименте использовался один из каналов горизонтального подавления. В СППК SPS используются два практически независимых идентичных канала для подавления колебаний по каждой координате. Существует возможность включать в действие каждый канал в строго определенные моменты времени в течение ускорительного цикла, а также изменять коэффициенты усиления каналов в линейном режиме. Использование одного из них в стандартном режиме, другого - в нелинейном позволило существенно повысить гибкость аппаратуры и увеличить число исследуемых вариантов режима работы.

В ходе эксперимента был реализован "логический" режим, передаточная характеристика которого приведена на Рис. 6.

С использованием выбранных значений параметров функционального блока был проведен сравнительный анализ режимов подавления по линейному и модифицированному каналам. Измерения показали, что при сходных условиях инжекции линейный канал обеспечивал подавление колебаний в e раз за 800 мкс, тогда как модифицированный канал обеспечивал характерное время подавления на уровне 250 мкс. Типичные осциллограммы приведены на Рис. 7, Рис. 8.

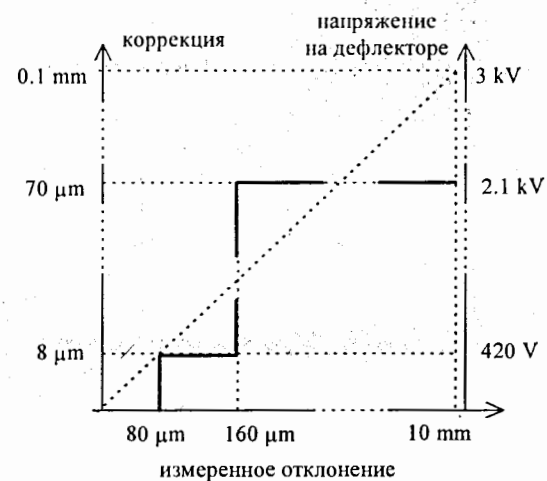


Рис. 6 Полная передаточная характеристика СППК, осуществленная в эксперименте.

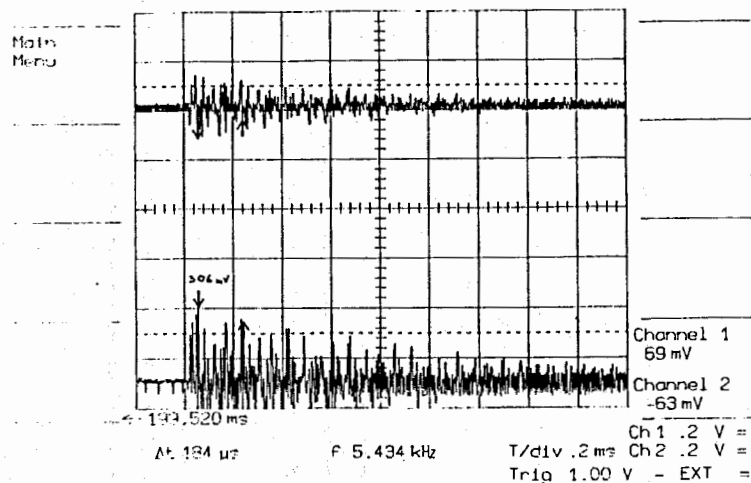


Рис. 7 Типичная осциллограмма подавления колебаний в линейном режиме (верхний луч - сигнал с пластин дефлектора; нижний луч - сигнал датчика положения пучка).

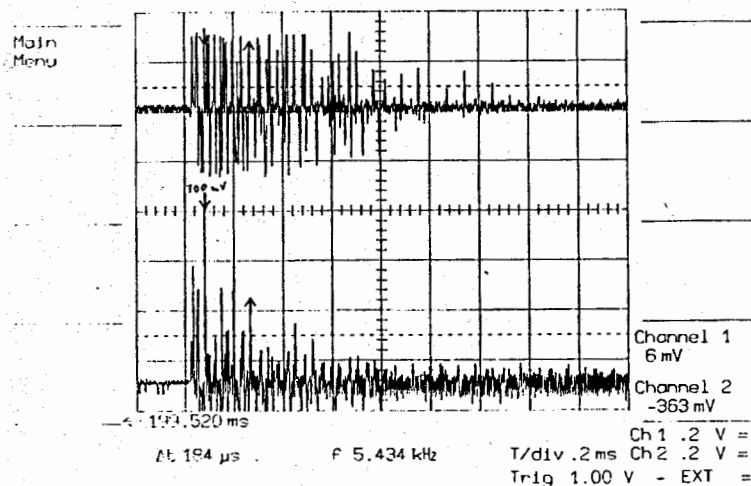


Рис. 8 Типичная осциллограмма подавления колебаний в нелинейном режиме (верхний луч - сигнал с пластин дефлектора; нижний луч - сигнал датчика положения пучка).

Анализ приведенной характеристики показывает, что в ходе эксперимента был реализован двухуровневый логический режим. При этом темп подавления колебаний был повышен при использовании меньшей амплитуды выходного сигнала. Так, максимальная амплитуда, при которой обеспечивалось время подавления начальных колебаний 250 мкс, составляла 2.1 кВ, по сравнению с 3 кВ амплитуды выходного сигнала в классическом режиме. Стабильность пучка в течение всего рабочего цикла ускорителя обеспечивалась сигналом с фиксированной амплитудой ± 420 В, что соответствует значению младшего значащего бита цифровой системы обработки сигнала. Это очередной раз подтверждает возможность снизить среднюю мощность СППК за счет использования нелинейных режимов подавления.

Третья глава посвящена разработке устройства усиления мощности для СППК ЛНС.

Параметры, которыми должна обладать данная система, полностью определяются проектными данными. Минимально необходимая амплитуда сигнала на пластинах кикера должна составлять ± 7.5 кВ в полосе полной передачи мощности. Амплитудно-частотная характеристика системы должна отвечать следующим требованиям: низкочастотный полос (3 дБ) находится в области $1 \div 3$ ГГц, полоса полной передачи мощности распространяется до 1 МГц, высокочастотный полос соответствует 3 МГц, далее следует равномерный спад характеристики с темпом 6 дБ/октава без паразитных резонансов в полосе до 20 МГц.

Анализ условий инжекции пучка в ЛНС показывает невозможность использования в рассматриваемом случае решения, аналогичного используемому в УНК, суть которого изложена в главе 1. Это обусловлено тем, что величина статической ошибки инжекции и погрешности, вносимой инжекционным кикером, имеют одинаковый порядок и равную вероятность возникновения. Таким образом, при разработке СППК в рассматриваемом случае необходимо опираться на классический вариант решения, основанный на использовании широкополосного усилителя. При этом все задачи, свойственные системам подавления, выполняются одним и тем же устройством.

Средняя мощность подобного усилителя должна составлять $15 \div 20$ кВт. Весьма сложной технической задачей является обеспечение требуемой широкополосности и линейности фазочастотной характеристики, даже при условии отсутствия паразитных

резонансов. Трудности достижения требуемых параметров обусловлены прежде всего тем, что в рассматриваемых устройствах не решена проблема организации радиофизической обратной связи.

Результаты исследований и разработок, изложенные в предыдущих главах, показывают возможность решить основные проблемы, связанные с созданием системы подавления для ЛНС. Эти возможности состоят в использовании нелинейных режимов подавления и способе замены радиофизической обратной связи моделированием параметров выходного сигнала на малом уровне мощности или на стадии цифровой обработки сигнала. Однако для такого крупномасштабного проекта, как ЛНС, недопустимо введение нетрадиционных решений (не прошедших длительного испытания на действующей установке) в качестве базового варианта построения системы. Одна из возможностей реализации нелинейных режимов представлена в Главе 2. Она состоит во введении в цепь обработки сигнала на малом уровне мощности специального блока, позволяющего плавно изменять передаточную функцию системы в целом от чисто линейного вида вплоть до «логического». Возможность оптимизации процесса подавления при этом доказана экспериментально. Однако необходимо отметить, что подобный способ удовлетворяет лишь исследовательские потребности при изучении динамики подавления, оставляя в стороне решение инженерных проблем, возникающих при разработке СППК. Без изменения схемотехнического решения выходного каскада усиления мощности использование преимуществ нетрадиционных режимов невозможно.

Принимая во внимание эти противоречивые условия (необходимость осуществления классического подавления как базового варианта и повышения эффективности системы в целом), можно сформулировать задачу о разработке мощного устройства с изменяемой характеристикой, которое позволяло бы оптимизировать режим непосредственно на стадии преобразования сигнала высокой мощности.

Наиболее эффективным известным устройством является каскадный усилитель с параллельным управлением (Рис. 9). Основным отличием усилителей с параллельным управлением от традиционных является то, что в них постоянное нагрузочное сопротивление заменено управляемой лампой, то есть переменным активным сопротивлением. На сетку этой управляемой лампы подается сигнал, противоположный по фазе входному. Этот сигнал формируется в самом усилителе при помощи

специальных сопротивлений связи (или специальных усилительных каскадов), включаемых в различных схемах по-разному.

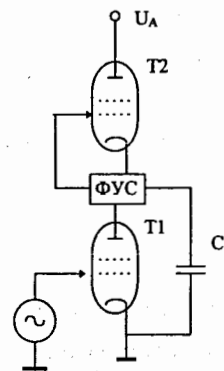


Рис. 9 Общая принципиальная схема усилителя с параллельным управлением. ФУС - формирователь управляющего сигнала.

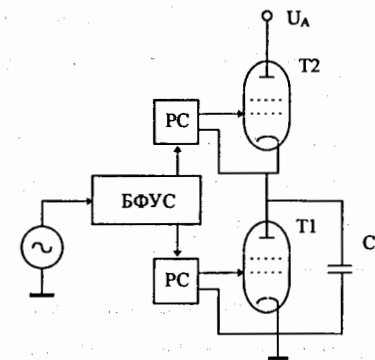


Рис. 10 Общая принципиальная схема усилителя с независимым управлением. БФУС - блок формирования управляющих сигналов; PC - устройство развязки и согласования.

Ограничения преимуществ схемы усилителя с параллельным управлением связаны в основном со способом формирования управляющего напряжения второй лампы. Это особенно ярко проявляется в ситуациях, когда нагрузка носит чисто емкостной характер. При этом на временные параметры выходного сигнала значительное влияние оказывают свойства именно нагрузки. Исследования показывают, что подобное ограничение может быть снято при переходе к использованию независимого управления лампами. Принципиальная схема такого устройства приведена на Рис. 10.

Действительно, при подробном рассмотрении работы схемы с параллельным управлением видно, что ее основные преимущества определяются активностью балластного элемента, роль которого выполняет вторая лампа. При этом изменение состояния последней определяется изменением тока через первую лампу и нагрузку. Параметры обратной связи ограничены в данном случае общим временем реакции системы на изменение входного сигнала. Очевидно, что снятие подобного ограничения может существенно повысить эффективность и качество разрабатываемых устройств. Этого можно добиться, если управляющий сигнал на вторую лампу формировать не внутри выходного каскада, а на стадии обработки общего входного сигнала. Именно такой способ назван схемой с независимым управлением.

Основное преимущество независимого управления состоит не только в расширении частотной характеристики устройства и повышении ее эффективности. Кроме этого, при рассматриваемом способе управления появляется возможность произвольно выбирать рабочую точку схемы в целом, изменяя тем или иным способом уровень постоянной составляющей управляющего сигнала.

Таким образом задача о разработке мощного устройства с изменяемой характеристикой, позволяющей оперативно выбирать режим работы системы подавления, может быть решена с помощью каскодных схем с независимым управлением.

Сравнительный анализ трех вариантов реализации устройства усиления мощности был проведен путем компьютерного моделирования с использованием программы MicroSim PSpice 7.1. При этом в рассматриваемых схемах применялись модели реальных компонентов. Модели вакуумных ламп создавались на основе паспортных данных и измеренных характеристик по рекомендациям и стандартам корпорации MicroSim.

В качестве эквивалентной нагрузки использовалась модель сосредоточенной емкости. Рабочий режим каждой из моделируемых схем выбирался таким образом, чтобы мощность, выделяемая на вакуумных лампах, была одинаковой во всех вариантах схем. При моделировании схемы с независимым управлением в качестве устройства развязки-согласования использовались оптоэлектронные элементы.

Адекватность компьютерного моделирования была проверена при реализации двух из просчитанных схем (усилителя класса А и каскодного с параллельным управлением) на специально созданном радиофизическом стенде.

Разработанные и созданные устройства позволяют развивать мощность на анодах ламп выходного каскада до 2 кВт, то есть являются моделями возможных реальных усилителей в энергетическом масштабе 1:10. Для построения выходного каскада были выбраны лучевые тетроды ГУ-73 с воздушным охлаждением. Роль имитатора исполнительного устройства (электростатического кикера) выполнял отрезок 75-омного кабеля общей емкостью 130 пФ. Амплитудно-частотные характеристики построенных усилителей представлены на Рис. 11, Рис. 12.

Основным результатом проведенной стендовой проверки следует считать именно подтверждение того, что использованные программные средства позволяют адекватно воспроизводить свойства схем на основе мощных вакуумных ламп. Это позволило дать

обоснованные предложения по реализации выходного устройства на основе компьютерного моделирования.

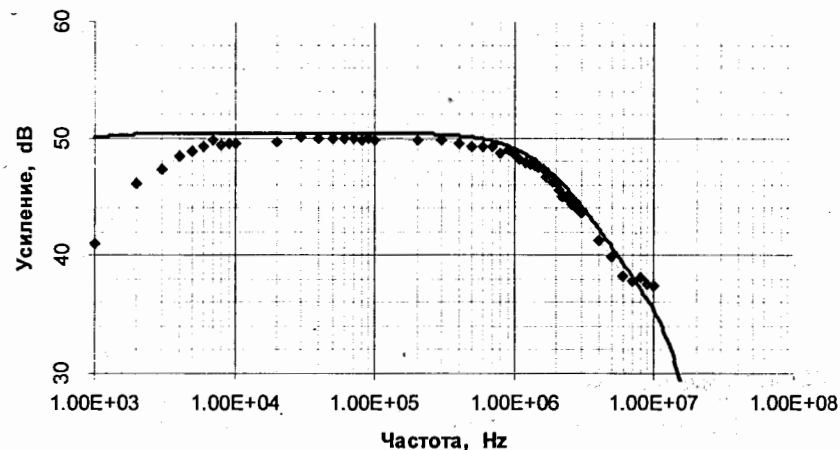


Рис. 11 Амплитудно-частотная характеристика классического усилителя. Сплошные линии – компьютерное моделирование; точки – стендовые результаты.

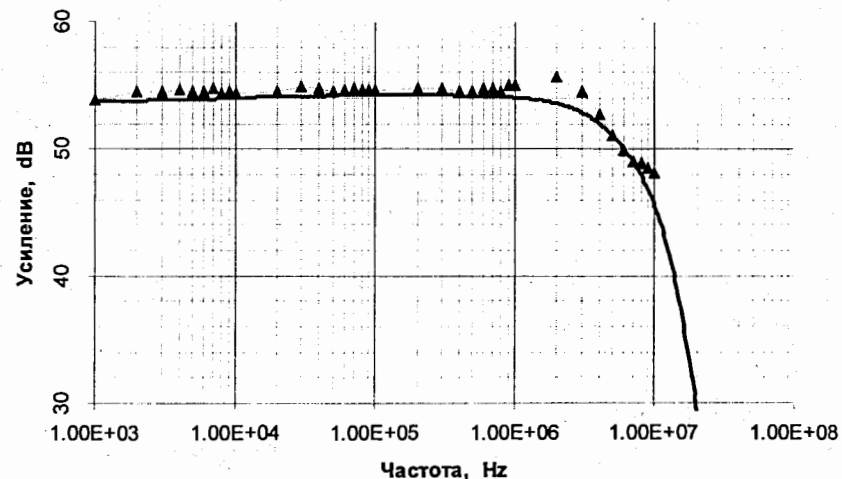


Рис. 12 Амплитудно-частотная характеристика каскодного усилителя с параллельным управлением. Сплошные линии – компьютерное моделирование; точки – стендовые результаты.

В качестве устройства усиления мощности для СППК LHC предложен усилитель-формирователь на основе каскодной схемы с независимым управлением. Основным базовым элементом должен являться лучевой тетрод RS2048 производства фирмы SIEMENS. Амплитудно-частотная характеристика компьютерной модели такого устройства приведена на Рис. 13.

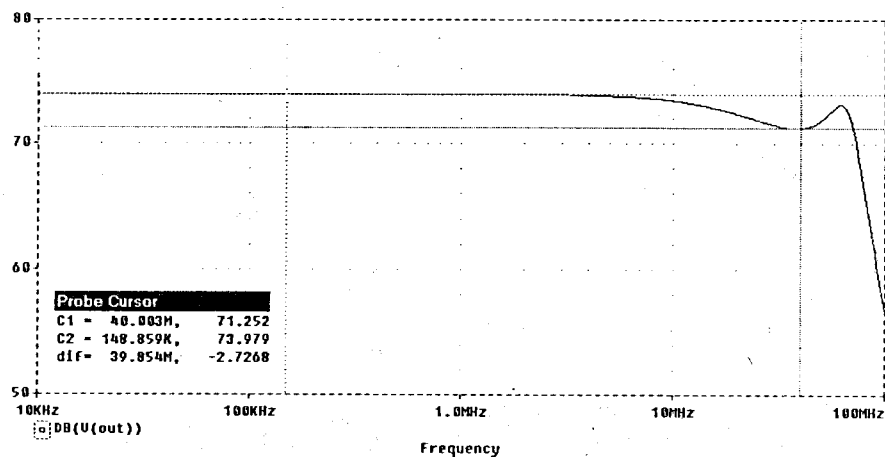


Рис. 13 Компьютерное моделирование амплитудно-частотной характеристики каскодного усилителя с независимым управлением на базе тетрода RS2048.

В полосе частот $0 \div 40$ МГц (верхняя граница соответствует частоте следования сгустков частиц) коэффициент усиления падает не более, чем на 3дБ. Небольшой резонансный пик (менее 2 дБ) на частоте 60 МГц соответствует тактовой частоте работы блока формирования управляющих сигналов.

Предложенное устройство удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к СППК LHC. Возможность оперативного изменения рабочей характеристики усилителя-формирователя позволяет при необходимости использовать наиболее эффективные режимы подавления колебаний пучка.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

1. Разработан и изготовлен комплекс генераторов мощных (до 5 МВт) импульсов для системы подавления начальных колебаний (СППК) пучка I ступени УНК. Выбранное схемотехническое решение обеспечивает быстрдействие и точность работы генераторов, необходимые для коррекции ошибок инжекции в течение нескольких оборотов.

2. Предложен и осуществлен метод цифрового моделирования обратной связи мощных радиофизических и импульсных устройств. Использование такого способа управления устройствами позволяет обеспечивать высокую стабильность и точность работы в ситуациях, когда реализация традиционной внутренней обратной связи невозможна.
3. Разработано и изготовлено аналоговое устройство оперативной модификации передаточной функции СППК пучка SPS. В отличие от цифровых приборов, использовавшихся для этой цели ранее, созданное устройство обеспечивает плавный переход от пропорционального режима подавления к режимам с различной степенью нелинейности. Это позволяет проводить подробные исследования режимов подавления и осуществлять оптимизацию работы устройств усиления мощности.
4. Предложена методика оперативного измерения времени подавления поперечных колебаний, разработан принцип действия и схемотехническое решение аппаратуры для ее осуществления. Этот способ отличается более высокой точностью ($\pm 2.5\%$) по сравнению с осциллографическими измерениями ($\pm 10\%$) и большей скоростью получения информации (в режиме on-line) по сравнению с методиками на основе анализа спектра колебаний (время, необходимое для обработки сигнала).
5. Предложенный и обоснованный “логический” режим подавления поперечных когерентных колебаний пучков на основе систем со ступенчатой передаточной функцией обеспечивает более быструю (в 2-3 раза) коррекцию начальных колебаний по сравнению с традиционными пропорциональными режимами. “Логический” режим впервые осуществлен экспериментально на пучке SPS.
6. Усилители-формирователи на основе каскодной схемы с независимым управлением обладают большей широкополосностью по сравнению с каскодной схемой с параллельным управлением. Их особенность состоит в возможности оперативного изменения рабочей характеристики. Разработанные устройства этого типа предложены для использования в составе системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка LHC.

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. В.М.Жабицкий, Л.Г.Игнатова, И.Н.Иванов, Н.А.Малахов, В.Н.Мамонов, В.А.Мельников, Н.И.Пилляр, А.С.Щеулин. Импульсный генератор ударного магнита для однооборотной системы подавления начальных колебаний пучка I степени УНК. Сообщение ОИЯИ Р9-89-831 Дубна, 1989.
2. В.М.Жабицкий, Л.Г.Игнатова, И.Н.Иванов, Н.А.Малахов, В.Н.Мамонов, В.А.Мельников, Н.И.Пилляр, А.С.Щеулин. Моделирование системы однооборотного подавления начальных колебаний пучка I степени УНК. Труды двенадцатого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т.3, с.197, Москва 1990.
3. V.M.Zhabitsky, I.N.Ivanov, N.A.Malakhov, V.A.Melnikov, A.S.Scheulin. The feedback system for UNK initial oscillations. IEEE Particle Accelerator Conference, v.2, p.394, Washington 1991.
4. I.N.Ivanov, V.A.Melnikov. Suggestions for new transverse oscillations damping systems in large synchrotrons and colliders. Труды четырнадцатого всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. т.3, с.280, Протвино 1994.
5. W.Hofle, I.N.Ivanov, R.Louwerse, V.A.Melnikov. Suggestions to increase the transverse damper efficiency. Particle Accelerators, No53, p.78. Geneve, March 1997.
6. V.A.Melnikov. Possibilities of technical implementation of nonlinear damping of transversal coherent oscillations of a beam. NIM A 391 (1997), 93-95 Elsevier Science, Amsterdam, 1997.
7. I.N.Ivanov, V.A.Melnikov. Nonlinear damping of coherent transverse oscillations of a beam in hadron cyclic accelerators and colliders. NIM A 391 (1997), 52-55 Elsevier Science, Amsterdam, 1997.
8. E.M.Gleibman, V.M.Zhabitsky, I.N.Ivanov, G.I.Kononov, N.I.Lebedev, A.G.Likha-chev, V.A.Melnikov, N.A.Malakhov, N.V.Pilyar, T.B.Rukojatkina, A.S.Scheulin, S.E.Merker, M.S.Mikheev. System for initial betatron oscillations damping for UNK I stage. NIM A 391 (1997), 100-102, Elsevier Science, Amsterdam, 1997.
9. В.И.Аверьянов, Е.В.Горбачев, И.Н.Иванов, Н.И.Лебедев, В.А.Мельников, К.П.Сычев, С.В.Рабцун, А.А.Фатеев. Разработка системы подавления поперечных когерентных колебаний пучка LHC. Труды II мемориального семинара памяти В.П.Саранцева. Будет опубликовано в 1998 г.

Рукопись поступила в издательский отдел
15 января 1998 года.