

# Подавление пульсаций тока в системах коррекции магнитного поля и локального искажения орбиты для улучшения качества медленного вывода протонного пучка из ускорителя ИФВЭ

С.А. Белов, М.Н. Горохов, А.А. Кардаш, В.А. Медведев,  
В.К. Перебейнос, С.А. Ряжских, В.В. Сплюхин  
ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

## Введение

Многие эксперименты на ускорителе ИФВЭ проводятся с использованием медленного вывода протонов. Одним из условий эффективности таких экспериментов является возможность получения равномерного во времени пучка. Модуляция интенсивности выведенного протонного пучка определяется пульсациями магнитного поля ускорителя и элементов системы медленного вывода. В настоящем докладе представлены реализованные на ускорителе У-70 способы подавления пульсаций токов в системах коррекции магнитного поля и локального искажения орбиты пучка.

## 1. Система коррекции градиента магнитного поля

Коррекция градиента магнитного поля осуществляется двумя цепями коррекции, собранными соответственно из корректирующих обмоток 48 фокусирующих и 60 дефокусирующих блоков кольцевого электромагнита и возбуждаемыми от двух источников питания. Для ускорения пучка, его медленного наведения на внутренние мишени, а также быстрого вывода источники должны формировать токи от 0,5 до 100 А со скоростью изменения до 200 А/сек и повторяемостью (с учетом пульсаций)  $\pm 1\%$ . Нагрузка: активное сопротивление —  $R=8$  Ом; индуктивность на низких частотах —  $L=0.1$  Гн; наведенное напряжение —  $U_{навед.} = \pm 40$  В.

Проектная система, построенная по схеме Кернса [1], требуемых параметров не обеспечивала. Поэтому на основе имеющегося оборудования была предложена и реализована схема с двумя контурами авторегулирования — по току нагрузки и по напряжению на регулирующем элементе [2,3] (рис.1). Широкополосный транзисторный регулятор тока был выполнен на германиевых транзисторах с водяным охлаждением. В качестве регулятора напряжения работали электромашинные преобразователи. В результате удалось улучшить повторяемость тока до  $\pm 0,1\%$ , при этом амплитуда пульсаций была снижена до уровня 15-20 мА на удаленных от регулятора тока точках и до 5 мА непосредственно на регуляторе. Дело в том, что нагрузка — это цепь из последовательно включенных корректирующих обмоток блоков, установленных в кольцевом зале длиной 1500 м, представляющая собой длинную линию с распределенными параметрами, в которой кроме корректирующего тока протекают еще и паразитные токи от внешних источников, замыкающиеся через распределенную емкость цепи помимо датчика контура стабилизации тока.

Физическим обоснованием медленного вывода [4] были предъявлены новые, более жесткие, требования к пульсациям тока. Согласно этим требованиям амплитуда пульсаций тока во время вывода не должна превышать  $0,02/f\%$ . В [3] уточнено, что

реальная чувствительность величины модуляции выведенного пучка к пульсациям тока практически совпадает с расчетной до частот 300-400 Гц, а далее чувствительность снижается. Тем не менее для частот 300-400 Гц допуск на амплитуду пульсаций тока составляет 0,12-0,14 мА при постоянной составляющей 100 А.

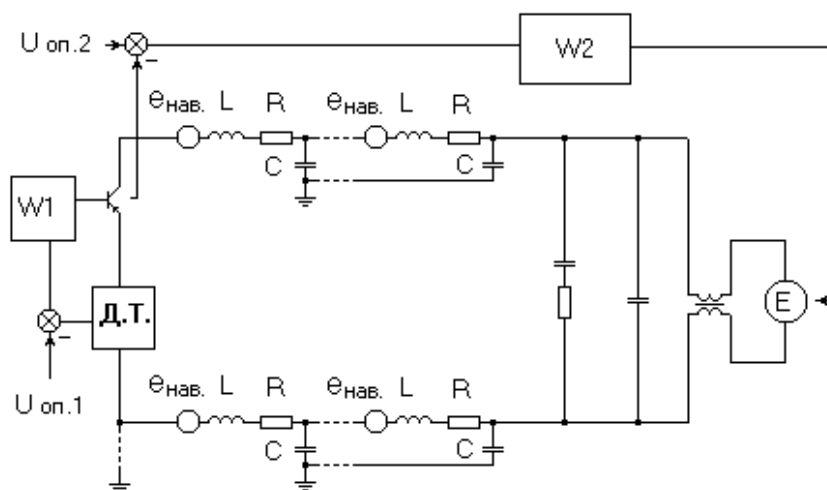


Рис. 1: Схема системы коррекции градиента магнитного поля.  $L_p$ ,  $R_p$ ,  $C_p$  — распределенные параметры нагрузки;  $e_{нав.}$  — наведенные ЭДС нагрузки;  $L_{\phi}$ ,  $C_{\phi}$  — элементы пассивного фильтра;  $C_d$ ,  $R_d$  — элементы цепи пассивного демпфирования.

Поэтому следующим шагом на пути подавления пульсаций тока было радикальное изменение системы: отказ от заземления схемы, замена германиевого транзисторного регулятора тока с водяным охлаждением на кремниевый с воздушным, замена электромашинных преобразователей на тиристорные двенадцатипульсные с асинхронным фазовым управлением. Первое дало снижение уровня пульсаций, наведенных внешними источниками, и улучшение частотных характеристик контура регулирования тока [3]; второе почти на порядок повысило динамическое сопротивление регулятора тока и увеличило сопротивление утечки на землю; третье позволило снизить величину пульсаций питающего напряжения.

Новый регулятор тока состоит из трех последовательно включенных четырехкаскадных составных транзисторов, каждый из которых содержит в выходном каскаде 250 транзисторов типа КТ808А. На регуляторе поддерживается напряжение 60 В во всем диапазоне рабочих токов.

Снижение величины пульсаций питающего напряжения достигнуто за счет выбора двенадцатипульсного выпрямителя и пассивного Г-образного LC фильтра с сопряженной частотой около 20 Гц, а также за счет внутренней обратной связи, присущей асинхронной системе управления выпрямителем. Фильтр, фактически работающий на стабилизатор тока, имеет весьма малый относительный коэффициент затухания, и его демпфирование пассивным образом, при рабочем напряжении около 1000 В и волновом сопротивлении фильтра около 7 Ом затруднено. Решением этой задачи стало введение активного демпфирования, суть которого сводится к охвату фильтра и выпрямителя со схемой управления цепью отрицательной обратной связи, как это показано на рис.2. Тогда на частоте резонанса глубина отрицательной обратной связи

резко увеличивается, коэффициент затухания становится больше 0,5, за счет чего и достигается демпфирование.

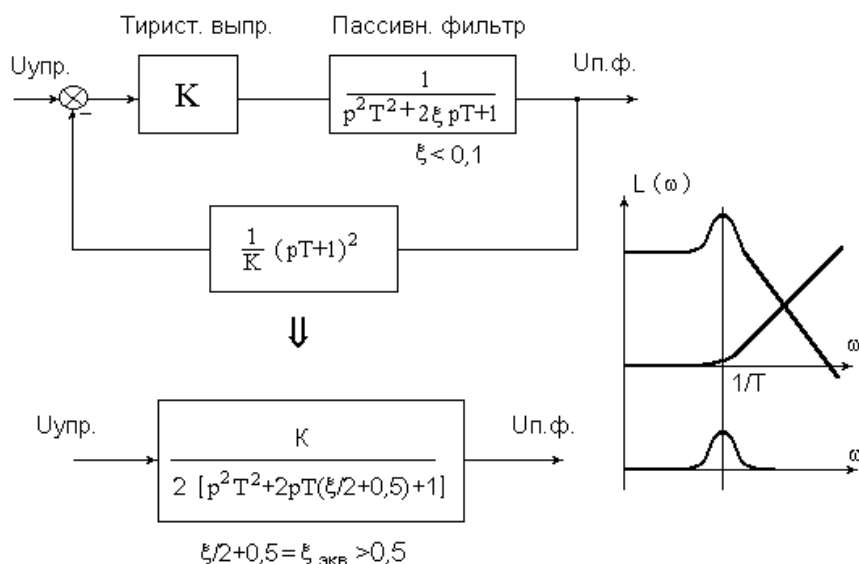


Рис. 2: Структурная схема и логарифмические частотные характеристики контура активного демпфирования. 1 — ЛАЧХ прямого тракта; 2 — ЛАЧХ цепи обратной связи; 3 — суммарная ЛАЧХ.

Дальнейшее снижение пульсаций тока достигнуто за счет включения в оба полюса выпрямителя фильтров-пробок, настроенных на частоту основной гармоники пульсаций напряжения, и тщательного выполнения контура регулирования тока (отстройка от синфазной помехи, наводок и т. д.).

В результате всех мер в системе коррекции градиента магнитного поля амплитуда пульсаций тока на выходе транзисторного регулятора не превышает 150-200 мкА для суммарного сигнала и 50-100 мкА по гармоникам.

## 2. Система коррекции квадратичной нелинейности магнитного поля

Система также состоит из отдельных цепей коррекции фокусирующих и дефокусирующих блоков. Величина токов коррекции достигает 150 А в цепях с  $R=14$  Ом,  $L=0,1$  Гн,  $U_{навед.} = \pm 30$  В. В связи с тем, что в системе развивается напряжение до 2,5 кВ, схема составлена из трех источников питания и трех частей нагрузки, включенных попеременно последовательно с тем, чтобы напряжение относительно земли в любой точке схемы не превышало допустимых для корректирующей обмотки 500 В. Невысокие первоначальные требования к стабильности и уровню пульсаций  $\pm 0,25\%$  [4] позволили сделать схему одноконтурной с регулированием тока непосредственно от шестипульсных выпрямителей, однако в дальнейшем, с ростом требований к пульсациям в системе был осуществлен переход к схеме, аналогичной схеме коррекции градиента магнитного поля, т.е. включение в середине одного из участков

нагрузки транзисторного регулятора тока, снижение сопряженной частоты пассивного фильтра, введение активного демпфирования и т.д. Кроме того, каждый из силовых источников снабжен последовательным транзисторным фильтром с трансформаторным включением в токовую цепь.

Все эти меры привели к снижению амплитуды пульсаций до 1 - 2 мА, что соответствует нынешним требованиям.

### **3. Системы локального искажения орбиты пучка**

В системах применены шестипульсные тиристорные источники питания с асинхронной системой фазового управления, активным демпфированием и транзисторным фильтром, аналогично установленным в предыдущей системе. В реальных режимах работы полученный уровень пульсаций токов (менее 30 мА) не дает заметного вклада в модуляцию интенсивности выведенного протонного пучка. В новых источниках питания с двенадцатипульсной схемой тиристорного выпрямителя и тщательной проработкой тракта съема и усиления сигнала обратной связи достигнут уровень пульсаций менее 3 мА.

#### **Список литературы**

- [1] Смит, Атвуд, Лайон. Приборы для научных исследований. 1964, т.3, стр.82.
- [2] Белов С.А. и др. Труды 7-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц (Дубна, 1980). Дубна, 1981, т.1, стр.364.
- [3] Кардаш А.А. Диссертация ИФВЭ, Серпухов, 1981.
- [4] Мызников К.П. и др. Препринт ИФВЭ 70-51, Серпухов, 1970.