

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

О.В. Беликов, Д.Е. Беркаев,
В.Р. Козак, А.С. Медведко

УСИЛИТЕЛИ МОЩНОСТИ УМ-6 И УМ-20
ДЛЯ ПИТАНИЯ КОРРЕКТОРОВ
КОМПЛЕКСА ВЭПП-2000

ИЯФ 2007-14

Новосибирск
2007

**Усилители мощности УМ-6 и УМ-20
для питания корректоров комплекса ВЭПП-2000**

О.В. Беликов, Д.Е. Беркаев, В.Р. Козак, А.С. Медведко

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера
630090, Новосибирск, Россия

Аннотация

Для питания системы слаботочных коррекций магнитных элементов комплекса ВЭПП-2000 были разработаны специализированные управляемые четырёх-квadrантные источники тока (усилители мощности) типа УМ-6 и УМ-20. Источники выполнены с использованием современных MOSFET транзисторов в качестве основных силовых элементов. Выходной ток каждого канала регулируется в диапазоне до 6 А для УМ-6, и до 20 А для УМ-20. Погрешность регулирования не превышает 0.1%. Источники питания управляются и контролируются с помощью специализированных блоков ЦАП-АЦП.

© *Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

1. Введение

В 2000-м году в Институте ядерной физики СО РАН начата модернизация коллайдера ВЭПП-2М для повышения светимости и увеличения максимальной достижимой энергии до 2×1 ГэВ. При этом принципиально изменилась магнитная система нового коллайдера (за основу взята концепция круглых встречных пучков [1]). Новый проект получил название ВЭПП-2000. При реконструкции было также решено разрабатывать заново всю систему питания элементов коллайдера ВЭПП-2000. Как следствие, для унификации было принято решение заменить систему питания корректирующих магнитов на всём комплексе.

Магнитная система комплекса ВЭПП-2000 содержит около 180 слаботочных элементов:

I. Инжекционный комплекс, включающий каналы транспортировки и бустерный накопитель БЭП

- Дипольные коррекции 47 каналов.
- Квадрупольные коррекции 26 каналов.
- Skew-квадрупольные коррекции 12 каналов.
- Секступольные коррекции 24 канала.

II. Коллайдер ВЭПП-2000

- Дипольные коррекции 36 каналов.
- Слаботочные квадрупольные линзы 4 канала.
- Skew-квадрупольные коррекции 12 каналов.
- Секступольные коррекции 24 канала.

Основная часть этих элементов управляется током, максимальное значение которого не превышает от 2 А до 5 А. Их питание осуществляется от четырёх-квadrантного усилителя мощности УМ-6. Для удобства работы комплекса питание этих элементов было разделено на три группы: питание канала инжекционного комплекса ИЛУ – Б-3М, питание бустерного накопителя БЭП, питание коллайдера ВЭПП-2000. Усилители мощности разных групп располагаются в отдельных шкафах. Поскольку элементы коррекций каждой группы имеют различное активное сопротивление их сгруппировали по падению напряжения. Получилось пять подгрупп элементов, с выходным напряжением: до 32, 40, 48, 64 и до 80 В. Для питания каждой подгруппы усилителей мощности используется отдельный источник буферного питания. Такая компоновка позволяет не различать УМ-6 по выходному напряжению,

а изготавливать единообразно с максимальным напряжением на выходе ± 120 В.

Кроме перечисленных коррекций, в канале транспортировки БЭП – ВЭПП-2000 имеется восемь дипольных коррекций, управляемых током до ± 20 А. Максимальное падение напряжения на обмотке коррекции составляет ± 40 В. Эти коррекции питаются от четырёх-квadrантных усилителей мощности УМ-20.

Параметры УМ-6 и УМ-20 приведены в Таблице 1, их размещение на комплексе приведены в Приложениях 1,2,3.

Таблица 1. Параметры УМ-6 и УМ-20

| Параметры | Усилитель мощности УМ-6 | Усилитель мощности УМ-20 |
|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Выходной ток | ± 6 А | ± 20 А |
| Погрешность регулирования по току | менее 0.1% | менее 0.1% |
| Выходное напряжение (максимум) | ± 120 В | ± 80 В |
| Частота преобразования | 40 кГц | 40 кГц |
| Управление/контроль | ЦАП и АЦП | ЦАП и АЦП |
| Охлаждение в блоке | Естественное воздушное | Естественное воздушное |
| Охлаждение в стойке | Принудительное воздушное | Принудительное воздушное |
| Защита от токов перегрузки | Есть | Есть |
| Защита от перегрева | Нет | Есть |

2. Структурная схема

На рис. 1 показана структурная схема усилителей мощности УМ-6 и УМ-20. Регулирование выходного тока производится широтно-импульсной модуляцией выходного напряжения мостового инвертора с частотой преобразования 40 кГц. На выходе мостового инвертора имеется фильтр второго порядка, обеспечивающий подавление несущей частоты на 60 дБ. Необходимую точность преобразования обеспечивает петля обратной связи со

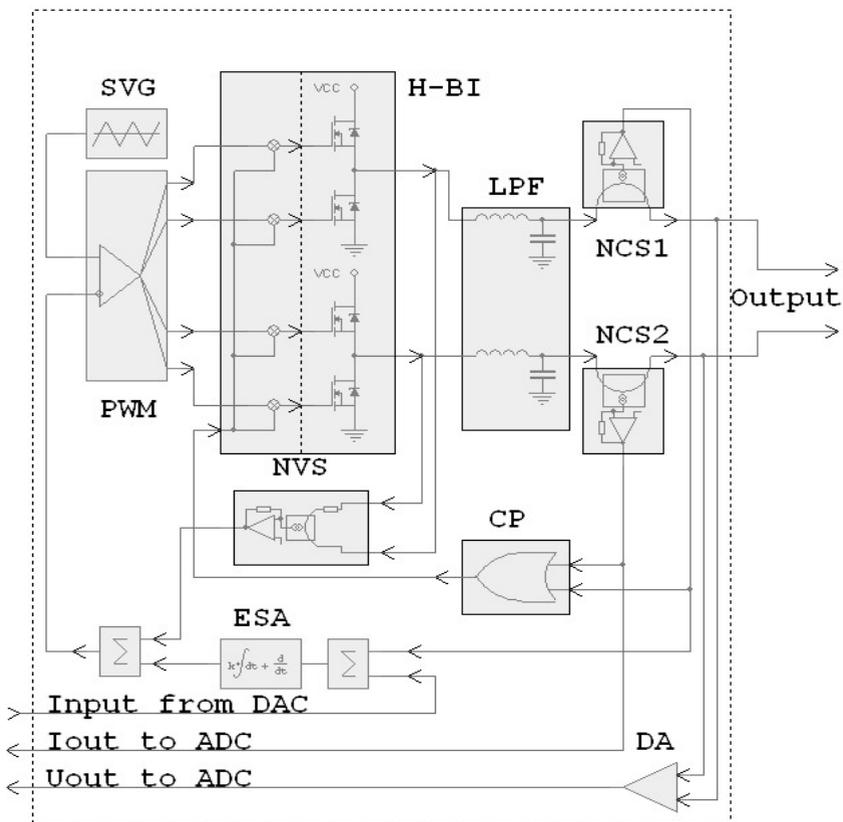


Рис. 1. Блок-схема усилителя мощности.

ESA (Error-signal amplifier) – усилитель сигнала ошибки; SVG (Sawtooth-voltage generator) – генератор пилообразного напряжения; PWM (Pulse width modulator) – формирователь широтно-импульсно модулированного сигнала. H-BI (H-Bridge inverter) – мостовой инвертор; LPF (Low-pass filter) – фильтр нижних частот; NCS (Noncontact current sensor) – бесконтактный датчик тока; NVS (Noncontact voltage sensor) – бесконтактный датчик напряжения; DA (Differential amplifier) – дифференциальный усилитель; CP (Current protection) – защита от превышения тока; DAC (Digital-to-analog converter) – ЦАП; ADC (Analog-to-digital converter) – АЦП.

статическим петлевым коэффициентом усиления порядка 1000. Устойчивость системы автоматического регулирования обеспечивается изодромным регулированием. В установившемся состоянии регулирование оказывается статическим относительно задающего воздействия, что позволяет реализовать высокую точность регулирования. После изменения задания система работа-

ет как пропорциональный регулятор, что позволяет избегать перерегулирования (рис. 2), вызванного замедлением интегрирующего звена (ESA), с постоянной времени интегрирования $\tau = 0.5$ сек.

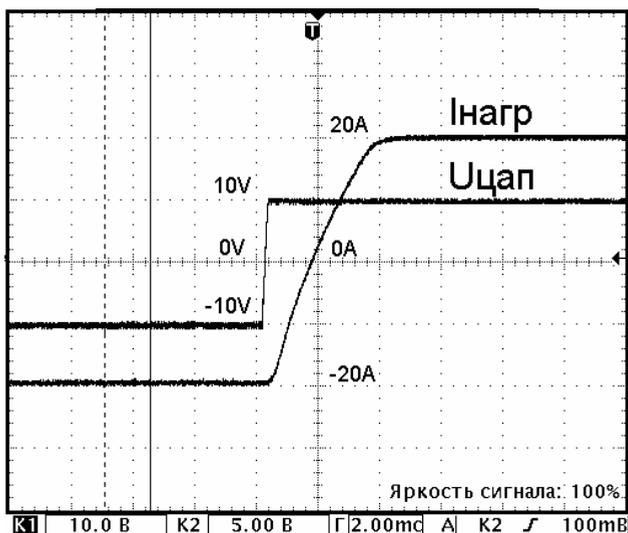


Рис. 2. Переходная характеристика УМ-20.

Петля обратной связи по току не способна подавлять пульсации питающей сети 220/380 В с частотами 50 Гц, 100 Гц и 300 Гц. Потому вводится, дополнительная более быстрая петля обратной связи по напряжению, с петлевым коэффициентом усиления порядка 10.

Усилители мощности снабжены двумя идентичными бесконтактными датчиками тока компенсационного типа, установленными в выходной цепи (после фильтра). Один из датчиков используется в цепи обратной связи, второй в качестве независимого измерителя для системы контроля.

Наиболее распространённой неисправностью корректирующих элементов на больших установках является замыкание обмотки на корпус. Для предотвращения неисправности источника питания в результате замыкания нагрузки, в УМ-6 и УМ-20 введена специальная защита, которая при превышении допустимого значения тока в полумосте инвертора блокирует работу усилителя мощности. Далее осуществляется автоматический перезапуск усилителя мощности с частотой около 1 Гц. При этом производится оповещение системы контроля комплекса ВЭПП-2000 о срабатывании защиты (на соответствующий бит входного регистра блока управления подаётся логическая единица).

В усилителе мощности УМ-20 кроме защиты по превышению тока имеется ещё температурная защита. При перегреве радиатора блокируется

работа источника. Далее, по мере охлаждения, производится автоматический запуск. Включение защиты происходит при температуре на радиаторе 70 °С, отключение при 60 °С. Такой температурный гистерезис позволяет избежать генерации схемы защиты. При включении температурной защиты также предусмотрено оповещение управляющей системы контроля.

Для многоканальной системы контроля и управления комплексом ВЭПП-2000 предусмотрено использование в каждом канале питания коррекции: одного ЦАП (для задания тока), двух АЦП (для измерения тока и напряжения), одного выхода регистра ввода/вывода (для аварийного обесточивания корректора) и одного входа регистра ввода/вывода (для оповещения системы контроля). Измерения тока и напряжения в каждом канале коррекции позволяют контролировать сопротивление нагрузки. Контроль сопротивления позволяет программным путём обнаружить неисправность обмотки элемента, а также контролировать его температуру.

Для удобства работы комплекса в усилителях мощности предусмотрен режим “горячей замены блока”. При этом допускается замена блоков в работающем модуле без отключения остальной аппаратуры шкафа.

3. Модуль питания и управления

Существует два варианта многоканальной системы питания слаботочных элементов. Первый вариант включает в себя до 8 усилителей мощности (рис. 3). Управление и контроль осуществляются через специальный блок САС208, который включает в себя 8-канальный 16-разрядный ЦАП, 20-канальный 24-разрядный АЦП, регистр ввода/вывода 8/8 внешних двоичных команд. Второй модульный вариант предполагает использование до 16 усилителей мощности. В качестве блоков компьютерного управления используются: 16-канальный 16-разрядный блок ЦАП (CANDAC16) и 40-канальный 24-разрядный блок АЦП (CANADC40) [2]. Наличие в блоках управления и контроля CANBUS интерфейса позволяет упростить связь модуля питания с компьютером системы управления комплекса, поскольку приём и передачу данных осуществляет специализированный блок, а не каждый усилитель мощности в отдельности.

Буферное питание на комплексе ВЭПП-2000 реализовано двумя способами: применены нестабилизированные сетевые трёхфазные понижающие выпрямители производства ИЯФ и промышленно выпускаемые AC/DC преобразователи фирмы Mean Well, с коррекцией коэффициента мощности. Осциллограмма пульсаций выходного тока усилителя мощности, работающего с буферным питанием от трёхфазного сетевого выпрямителя, приведена в Приложении 4 (основные пульсации на частоте 300 Гц). В тех местах, где применены AC/DC преобразователи, отсутствуют пульсации выходного тока на частоте 300 Гц (спектр пульсаций начинается с частоты преобразования 40 кГц).

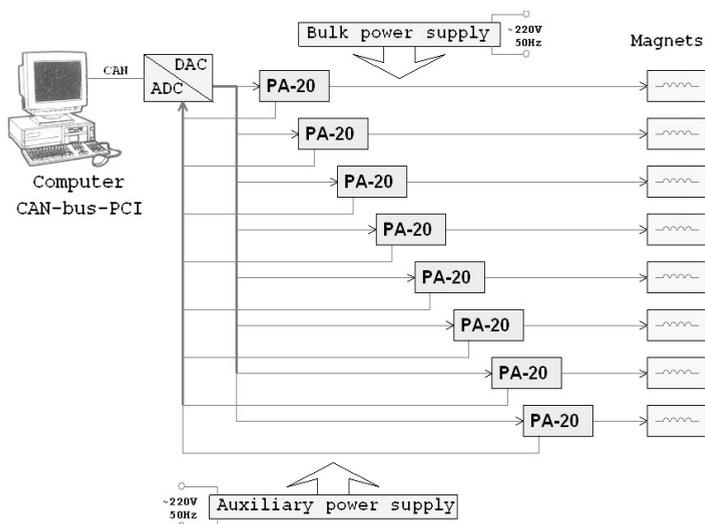


Рис 3. Многоканальная система из восьми усилителей мощности типа УМ-20.

Кроме буферного питания, каждый модуль оснащён вспомогательным источником для питания блоков ЦАП-АЦП и управляющей электроники усилителей мощности.

Применение модульности питания позволяет рациональнее использовать буферные источники, поскольку суммарная мощность потребления всегда меньше максимально возможной, так как все элементы коррекции не должны работать на максимальном токе.

4. Конструкция усилителей мощности

Усилители мощности выполнены в конструктиве ВИШНЯ (УМ-6 – ВИШНЯ-40, УМ-20 – ВИШНЯ-120). Многоканальный модуль питания занимает объём в два крейта (размеры крейта 480×240×400 мм). В стойке, содержащей восемь крейтов ВИШНЯ, может размещаться более 40 каналов УМ-6, или примерно 20 каналов УМ-20. При этом для охлаждения силовой электроники достаточно предусмотренных в стойке воздушных вентиляторов.

Поскольку частотный спектр современных MOSFET транзисторов простирается до десятков мегагерц, в ходе разработки большое внимание уделялось электромагнитной совместимости усилителей мощности. Так, в цепях питания применены фильтры, ориентированные на подавление пульсаций мегагерцового диапазона частот. Чтобы уменьшить электромагнитные поме-

хи, дроссели фильтров изготавливались преимущественно с замкнутым магнитопроводом из порошкового материала МРР.

5. Результаты испытания

Для проверки долговременной стабильности работы усилителей мощности проводились специальные испытания на стенде. Для набора статистики была разработана специальная программа, позволяющая проводить мониторинг. На рис. 4 изображена гистограмма выходного тока усилителя мощ-

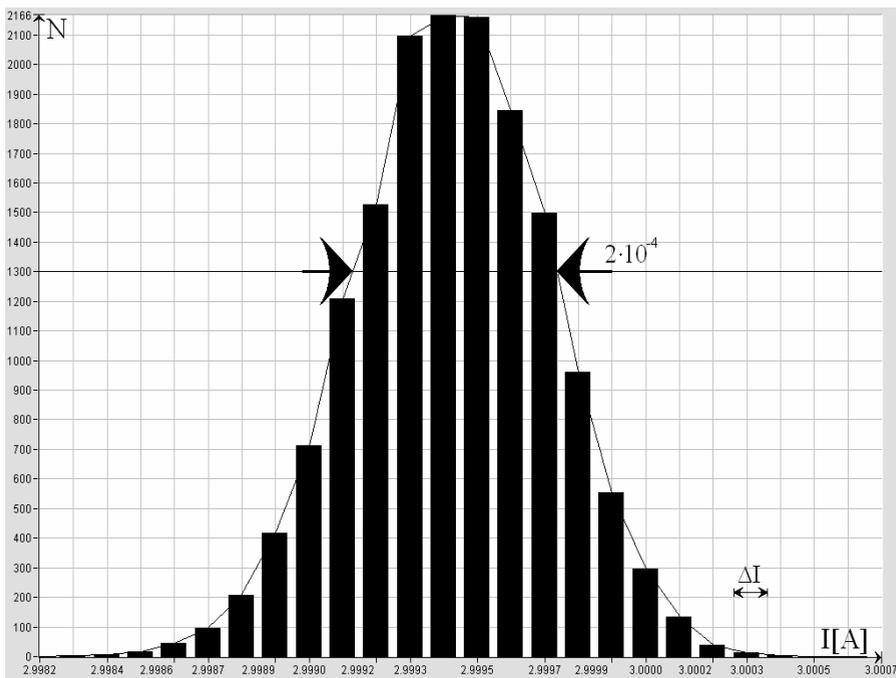


Рис. 4. Дисперсия тока.

I – измеренный выходной ток усилителя мощности; $N(I)$ – количество измерений со значениями тока в диапазоне $(I, I+\Delta I)$.

ности, построенная за 10 часов непрерывной работы при комнатной температуре. Для измерений температурного дрейфа проводились испытания в термокамере в диапазоне температур 10 ± 60 °С. Измеренные параметры приведены в Таблице 2. Во время испытания перегрев полупроводниковых компонентов усилителя мощности не превышал 20 °С (при отсутствии принудительного охлаждения).

Таблица 2. Измеренные параметры УМ-6 и УМ-20

| Параметры | | Значение | |
|-------------|---|-----------------|------------------|
| X_G | Абсолютная погрешность регулирования тока | <0.1 % | |
| σ | Дисперсия выходного тока | 100 ppm | |
| ξ | Пульсации выходного тока | 300 Гц | 40 кГц |
| | | 400 ppm | 200 ppm |
| TCl_{OUT} | Температурный дрейф выходного тока | 40 ppm/K | |
| I_{OM} | Гистерезис выходного тока | <i>для УМ-6</i> | <i>для УМ-20</i> |
| | | 5 мА | 20 мА |
| P_D | Тепловые потери в блоке | <i>для УМ-6</i> | <i>для УМ-20</i> |
| | | ≤ 15 Вт | ≤ 50 Вт |

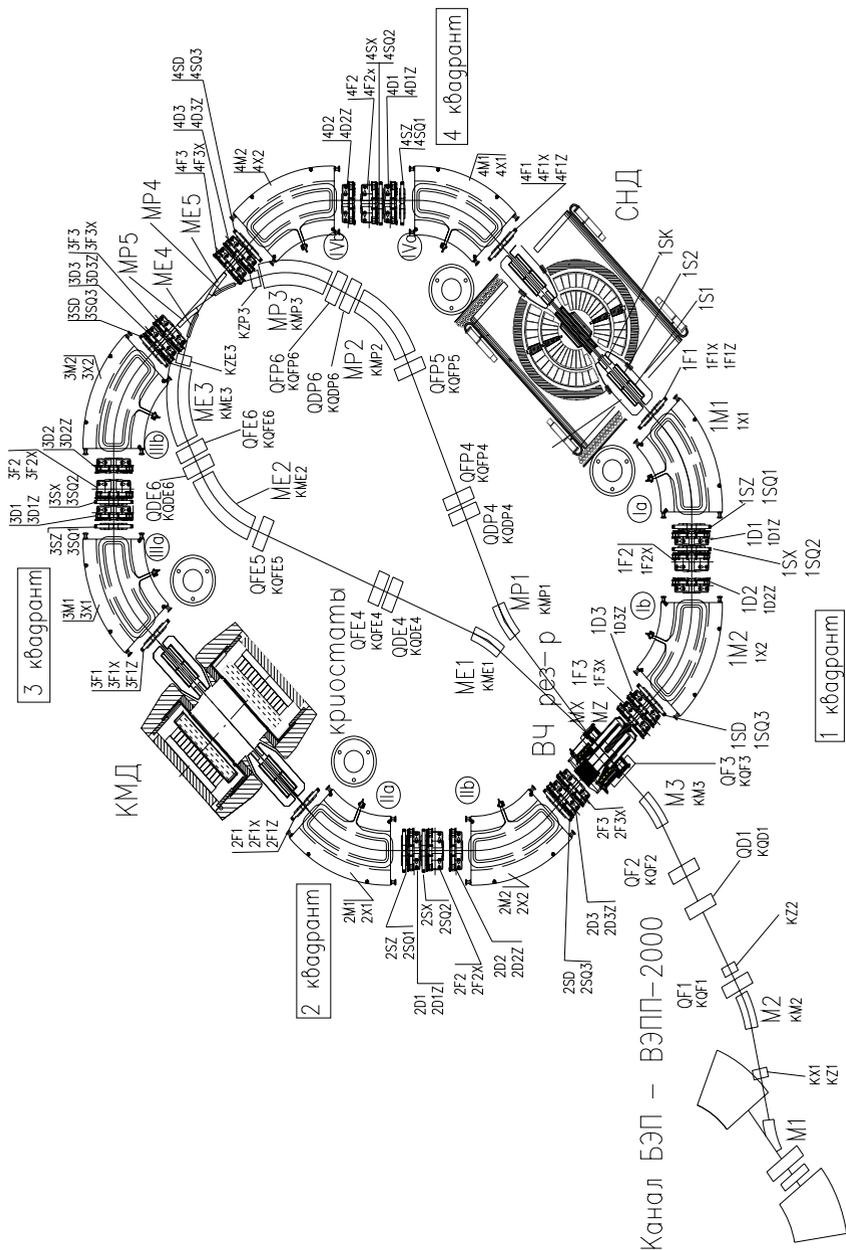
6. Заключение

Описанные в данной работе усилители мощности УМ-6 и УМ-20 прошли испытания на установке и в данный момент необходимое количество (около двухсот блоков) успешно работают на комплексе ВЭПП-2000.

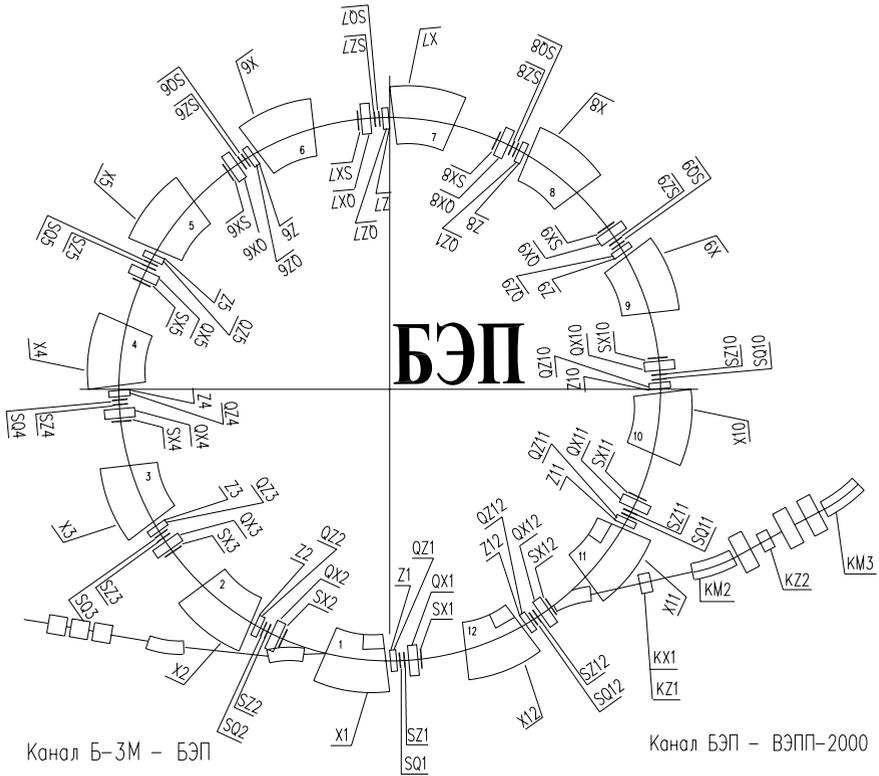
Унификация усилителей мощности по выходному напряжению позволила нам обеспечить полную взаимозаменяемость блоков одного типа. Наличие специальных защит позволило предотвратить возможные неисправности блоков в нестандартных ситуациях, возникающих в процессе эксплуатации.

Авторы выражают благодарность Леханову В.В., Лысенко А.П., Проскуриной О.А., Сингатулину Ш.Р., Третьякову А.К. за плодотворное участие в данной работе, а также Кондаурову М.Н. за разработку тестового программного обеспечения.

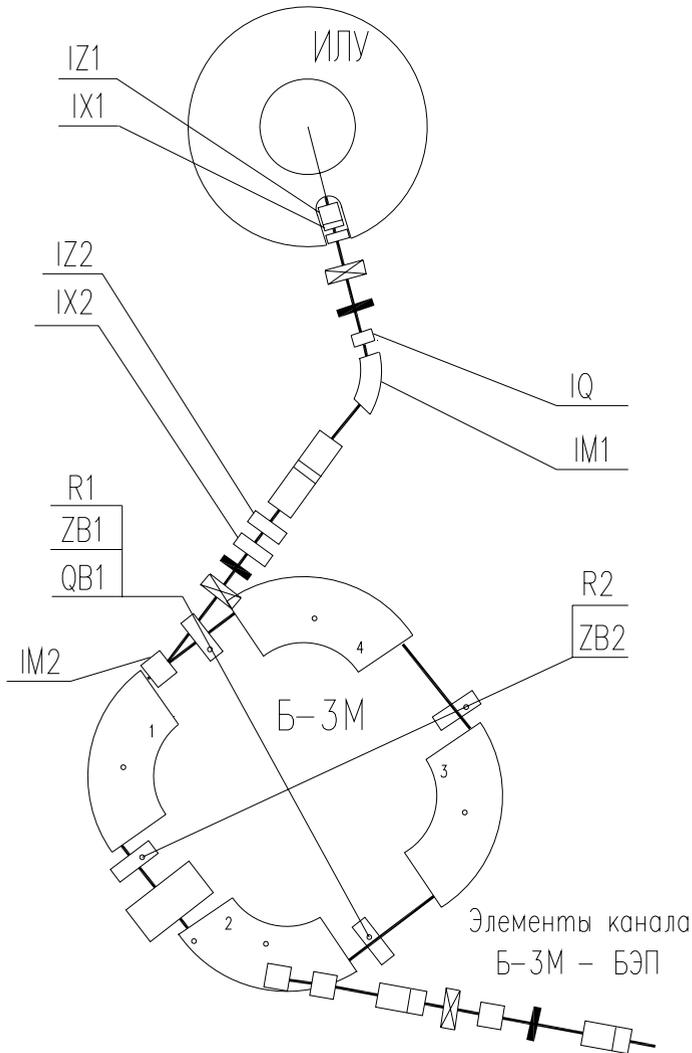
Размещение элементов в коллайдере ВЭПП-2000



Размещение элементов коррекции
в накопителе БЭП



Размещение элементов коррекции
на ИЛУ – Б-3М

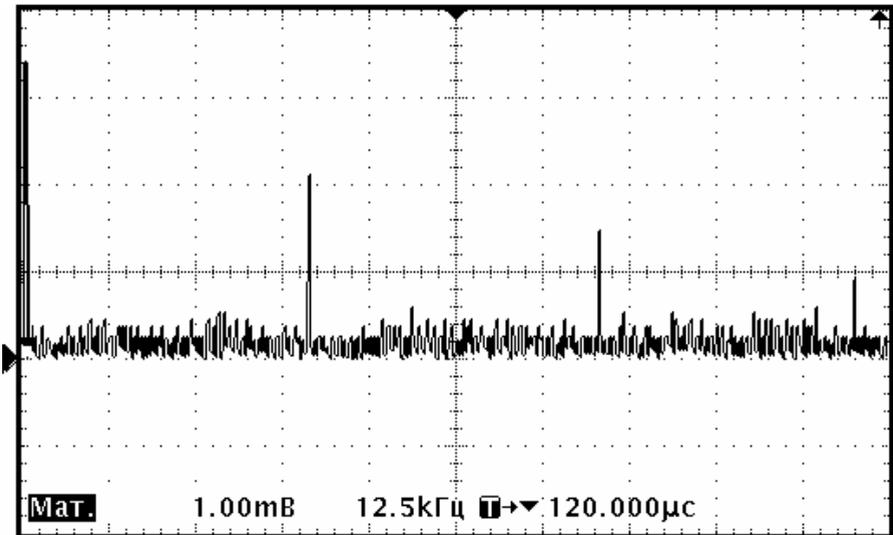
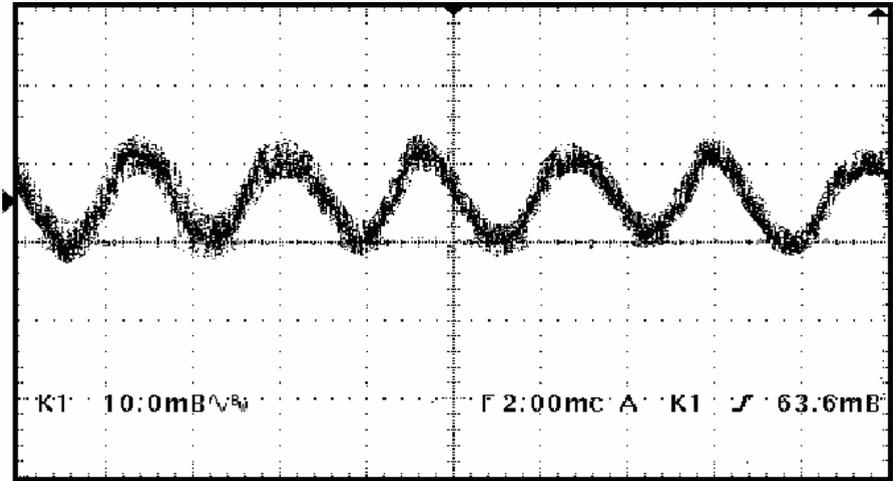


Приложение 4.

Осциллограммы выходного тока усилителя мощности УМ-20, работающего на активную нагрузку. Стабилизируемый ток усилителя мощности 20А. Буферное питание от трёхфазного нестабилизированного сетевого инвертора.

Сверху: Пульсации выходного тока (10 мА/дел.)

Снизу: Спектр пульсаций выходного тока (1 мА/дел.)



Литература

1. V. Danilov et al. Proc of the Asian Particle Accelerator Conference, Tsukuba (1998), p.257.
2. В.Р. Козак, Э.А. Купер “Микропроцессорные контроллеры для управления источниками питания”. Препринт 2001-70 ИЯФ, г. Новосибирск.

О.В. Беликов, Д.Е. Беркаев, В.Р. Козак, А.С. Медведко

**Усилители мощности УМ-6 и УМ-20
для питания корректоров комплекса ВЭПП-2000**

O.V. Belikov, D.E. Berkaev, V.R. Kozak, A.S. Medvedko

**Power amplifiers UM-6 and UM-20 to supply
of the corrector magnets of the VEPP-2000 storage ring**

ИЯФ 2007-14

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 6.04.2007 г.

Сдано в набор 6.04.2007 г.

Подписано в печать 9.04.2007

Формат 60x90 1/16 Объем 0.9 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 125 экз. Бесплатно. Заказ № 14

Обработано на IBM PC и отпечатано
на ротапинтере "ИЯФ им. Г.И. Будкера" СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11