

Разработка прецизионного источника питания электромагнитов с применением IGBT-модулей

В.В. Антонов, В.Ф. Веремеенко, Э.В. Ермолов, Ю.В. Заруднев, В.В. Колмогоров,
Д.А. Марков, А.С. Медведко, С.П. Петров
Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, Новосибирск, Россия

1. Актуальность разработки

В институте ядерной физики СО РАН накоплен многолетний опыт разработки и изготовления прецизионных источников питания электромагнитов ускорительно-накопительных комплексов. Для питания корректирующих элементов, линз и основных поворотных магнитов ускорителей требуются источники в широком диапазоне выходных мощностей – от нескольких ватт до нескольких мегаватт с выходным током от 1 до 10000 А. Требуемая точность поддержания уровня тока лежит в диапазоне от 1 до 0.001%. Появление новых силовых электронных элементов, таких как IGBT-транзисторов, полевых транзисторов, быстродействующих выпрямительных диодов, стимулировало разработку силовых источников нового поколения.

В частности, разработан специализированный источник электромагнитов ускорительно-накопительных комплексов с использованием IGBT-модулей в качестве основных силовых элементов. Источник ВЧ-300 выполнен по современной технологии высокочастотного преобразования мощности с применением широтно-импульсной модуляции сигнала (Switch Mode Technology with Pulse-Width Modulation).

2. Структурная схема

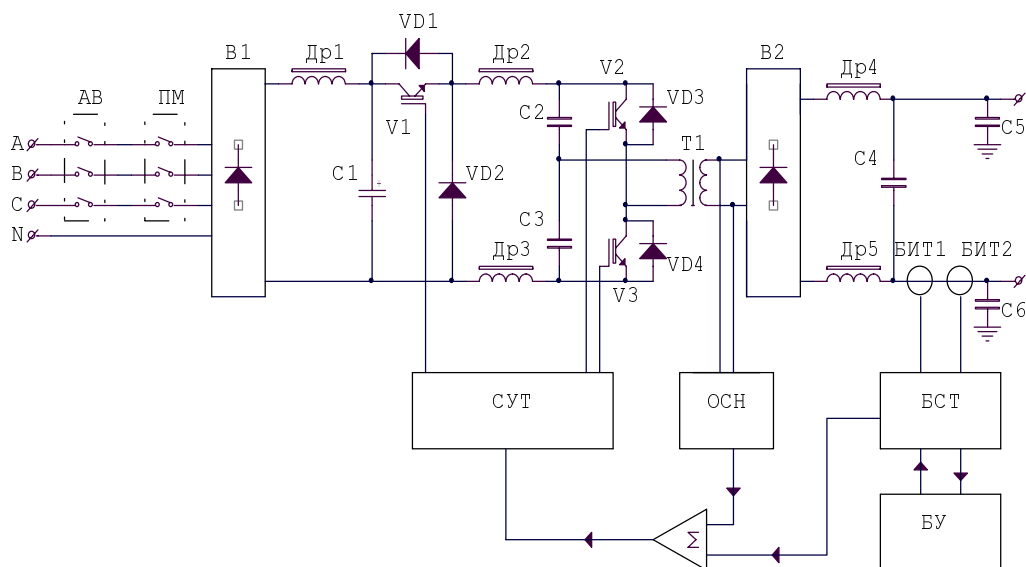


Рис. 1. Структурная схема источника ВЧ-300.

На рис. 1 показана структурная схема источника ВЧ-300. Источник питается от трехфазной сети 380/220 через встроенный автоматический выключатель и магнитный пускатель с набором необходимых защит и блокировок. Силовая часть источника включает: диодный выпрямитель В1, входной LC-фильтр, образованный Др1, С1, высокочастотный прерыватель (Chopper) V1 с частотой коммутации 40 кГц, сглаживающий фильтр Др2, Др3, С2, С4, полумостовой инвертор на IGBT-транзисторах V2, V3 с выходной частотой 20 кГц, согласующий трансформатор Т1, низковольтный выпрямитель В2, выходной фильтр Др4 Др5 С4 С5 С6.

Использование в источнике двойного преобразования (последовательный прерыватель на V1 ($f = 40$ кГц) и полумостовой инвертор на V2, V3 и C2, C3) позволяет “разгрузить” сильноточный фильтр основной частоты преобразования 20 кГц разбиением его на две части, одна из которых расположена после прерывателя Т1.

Разработан также вариант силовой схемы источника без высокочастотного прерывателя (Chopper) и дросселей Др2, Др3. В этом случае регулировка выходного напряжения осуществляется путем широтно-импульсной модуляции полумостового инвертора. В этом варианте источник имеет повышенный уровень выходных пульсаций в частотном диапазоне гармоник частоты преобразования. Использование того или иного варианта обуславливается условиями эксплуатации источника.

Источник питания снабжен двумя идентичными бесконтактными датчиками тока (БИТ1, БИТ2), установленными в выходной цепи (после выходного фильтра). Один из датчиков используется в цепи обратной связи для стабилизации выходного тока; другой служит независимым измерителем тока и используется в системе контроля. Это позволяет с высокой степенью надежности обеспечивать (и контролировать) стабилизацию выходного тока с суммарной погрешностью, не превышающей 0,01%.

Электроника датчиков тока, а также усилитель обратной связи по выходному току источника расположены в блоке стабилизации тока (БСТ), откуда управляющий сигнал через сумматор поступает на схему управления транзисторами (СУТ). Введение обратной связи по напряжению (ОСН) позволяет в сочетании с входным фильтром (Др1 С1) эффективно подавлять пульсации выпрямленного напряжения сети.

Источник снабжен блоком компьютерного управления (БУ). Блок включает в себя 1-канальный 16-разрядный ЦАП, 8-канальный 24-разрядный АЦП, регистр ввода/вывода 8/8 внешних двоичных команд, последовательные интерфейсы CAN 2.0 и RS-485 для связи с ЭВМ, схему ЦП с ОЗУ 64К, последовательный интерфейс RS-232 для ручного управления. По последовательным интерфейсам также происходит загрузка программы работы блока в память (FLASH 128К) ЦП. Аналоговая часть подвешена относительно цифровой. АЦП имеет дифференциальный вход. Коммутатор двухпроводный с интегральными ключами на 8 каналов. Предусмотрено измерение нескольких аналоговых параметров источника (напряжений, температур) и сбор двоичной информации (контроль состояния блокировок, реле протока воды в нагрузке и т.д.). Блок позволяет производить дистанционное (компьютерное) включение/выключение силовой части источника.

3. Реализованные параметры

Источник имеет выходную мощность до 5кВт при КПД около 90%.

Различные модификации выходной части источника позволяют получить варианты с номинальными выходными токами 400; 200; 100; 50 при выходном напряжении от 12 до 100 вольт соответственно.

Суммарная погрешность стабилизации выходного тока не превышает 0.01%.

Источники допускают параллельное и последовательное соединения.

4. Конструкция источника

Источник занимает объем в один этаж конструктива “Вишня” (480x240x400 мм). В стойке «Евро-механика» Новосибирского производства может быть размещено до восьми источников ВЧ-300.

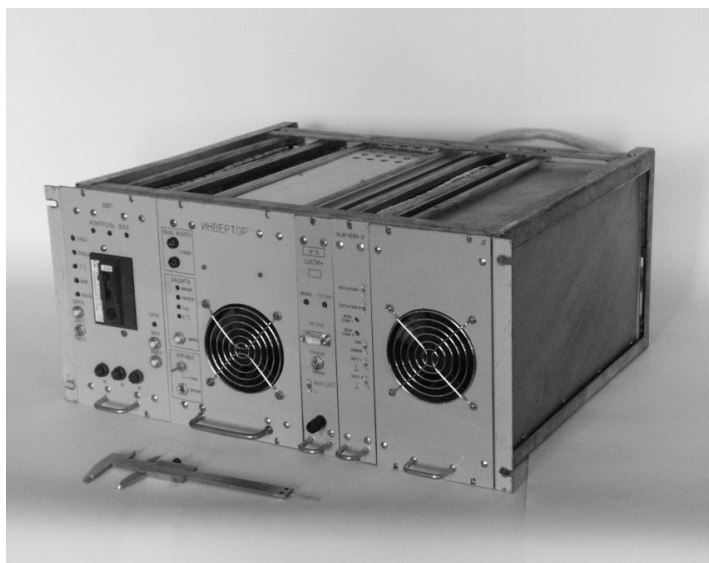


Рис. 2. Источник ВЧ-300.

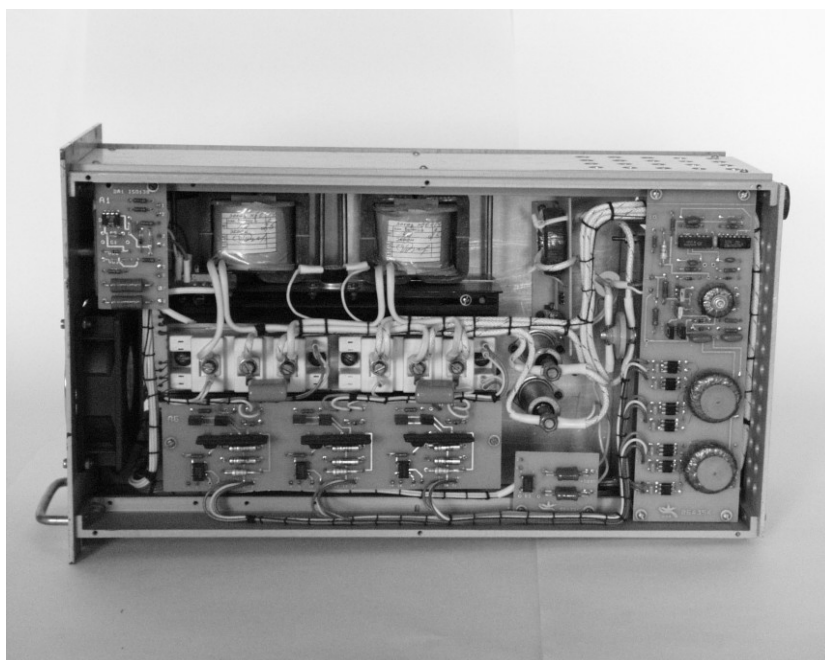


Рис. 3. Силовой блок инвертор.

Охлаждение источника автономное, воздушное. Конструктивно источник ВЧ-300 разбит на отдельные функционально законченные блоки, что облегчает обслуживание и ремонт, а также позволяет адаптировать источник к нестандартным вариантам его применения. Внешний вид ВЧ-300 и отдельно силового блока инвертора показан на фото (рис. 2, 3).

Использование полумостовой схемы инвертора (исключающей постоянную составляющую на выходе) при частоте преобразования 20 кГц позволяет выполнить ВЧ-силовой трансформатор из аморфного железа толщиной 20 мкм со значением максимальной индукции 0.4-0.5 Тл, что дает выигрыш по энергомасштабным характеристикам в 2-3 раза по отношению к использованию на этой частоте ферритовых сердечников.

В процессе разработки большое внимание уделялось электромагнитной совместимости источника, так как спектр частот коммутации преобразовательной части простирается до нескольких мегагерц. С этой целью выполнена экранировка инвертора и выходного блока ВЧ-трансформатора-выпрямителя, также оказалась полезной установка проходных и блокировочных конденсаторов по сети и по выходу. Оправдано применение в выходной части двухзвенного LC-фильтра. Второе звено ориентировано на подавление гармоник пульсаций выходного напряжения в мегагерцовом диапазоне.

5. Испытания и результаты

Анализ полученных результатов в ходе испытаний источника ВЧ-300 на долговременную стабильность, включающих изменение напряжения сети ($\pm 10\%$), сопротивления нагрузки ($\pm 25\%$), а также на работу при температуре окружающего воздуха в диапазоне 20-50 градусов показал, что нестабильность выходного тока лежит в пределах погрешности измерительной аппаратуры (на уровне 0.005%).