

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРОТОННЫХ СИНХРОТРОНОВ И УСКОРИТЕЛЬНО-НАКОПИТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ

В.М.Кофман, А.В.Мизинцев, В.Н.Рожков, А.А.Смирнов, М.Г.Снедзе, А.А.Тункин

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры
им.Д.В.Ефремова, Ленинград

Общие характеристики и тенденции построения систем регулируемого питания кольцевых электромагнитов протонных синхротронов и ускорительно-накопительных комплексов (КЭМ ПС и УНК) рассмотрены на одном из предыдущих совещаний [1]. В связи с модернизацией автоматической системы регулирования магнитного поля (АСР-В) КЭМ ПС-ИФВЭ и работами по созданию системы регулируемого питания КЭМ УНК-ИФВЭ представляется своевременным рассмотреть некоторые особенности их построения.

Требования, предъявляемые к качеству регулирования магнитного поля КЭМ, наиболее полно, из отечественных уставок, реализованы на ПС-ИТЭФ [2]. Из таблицы, где приведены значения гармонических коэффициентов пульсации напряжения $Р_{ii}(i) = U_m(i)/U$, прикладываемого к обмоткам КЭМ на плоской вершине импульса магнитного поля, видно, что задачу сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения U_d до уровня, требуемого в режиме медленного вывода, можно считать принципиально решенной. На других участках импульса допуск на пульсации менее жесткий. Задачи обеспечения точности регулирования магнитного поля, в том числе при формировании нескольких плоских участков, и монотонного характера переходов решены за счет переключения структуры АСР и усовершенствования цифроаналогового программатора и аналогового индукционного датчика отклонения магнитного поля (ДОП) с управляемым "медленным" интегратором, а также проведенной ИТЭФ модернизации дискретного датчика магнитного поля, так называемого датчика В-импульсов.

Опыт пусконаладки и данные об эксплуатации системы в ИТЭФ, а также в ИФВЭ, где отличия, в основном, заключаются в структуре устройств сглаживания пульсаций напряжения U_d , позволяют обратить внимание на некоторые характерные особенности, которые необходимо учитывать при эксплуатации и при разработке аналогичных систем.

Корректирующие и основные обмотки блоков КЭМ имеют сильную индуктивную связь. Несмотря на меры по компенсации ЭДС, наводимой в кольце основных обмоток, в магнитное поле, измеряемое датчиком ДОП, проходят динамические возмущения. В результате за счет действия замкнутого контура АСР-В происходит искажение магнитного поля в кольце. Для их устранения на вход управляемого интегратора ДОП необходимо подать соответствующее компенсирующее напряжение, изменяемое одновременно с изменением программ работы корректирующих обмоток.

Наблюдаемое на гармониках, кратных трем, несоответствие гармонических коэффициентов $Р_{ii}(i)$ пульсаций напряжения на вводах последовательной цепи, образованной основными обмотками блоков КЭМ, и аналогичных коэффициентов

$Р_{ii}(i)$ пульсаций магнитного поля в блоках КЭМ вызвано наличием продольной составляющей пульсаций потенциала вводов относительно земли. Сглаживание первых трех из них до уровня поперечных составляющих может быть обеспечено активным заградительным фильтром с отрицательной обратной связью по продоль-

ной составляющей выходного напряжения источников питания. Для этого вместо одного усилителя низких частот с двумя потенциально разделенными выходами в каждый из выходов источника должен быть установлен отдельный усилитель. Суммарная мощность установленного оборудования усилителей при этом определяется суммой поперечных и продольных составляющих пульсаций напряжения U_c на выходе LC-фильтра пульсаций. Взаимное влияние контуров активного сглаживания поперечных и продольных составляющих устраняется взаимным подавлением составляющих в датчиках примерно в 300–500 раз.

Использование транзисторно-трансформаторных усилителей мощности низких частот в параллельном канале широкополосного контура активного сглаживания пульсаций весьма эффективно, но требует обеспечения надежной защиты транзисторов как в аварийных режимах системы питания, так и при некорректных действиях операторов.

В системе, сооружаемой на ПС-ИФВЭ, используются четыре, по числу вводов, усилителя, выполненных по схеме двухтактного дросельного каскада на основе промышленного реактора ФРОС-4000. Оборудование каждого из усилителей подано на потенциал 10 кВ. На входах установлены блоки разделения потенциалов, включающие модулятор с несущей частотой 1,5 МГц, разделительные трансформаторы с объемным витком и демодулятор. Меры по защите транзисторов аналогичны принятным во втором поколении источников серии ИСТ2 [3].

Так как КЭМ возбуждается от двух тиристорных выпрямителей с индивидуальными LC-фильтрами и общей системой фазового управления, то для обратных связей по напряжениям формируются среднеарифметические значения поперечных составляющих и индивидуальное значение продольных составляющих напряжений источников.

С ростом максимальной энергии ускоренных частиц количество источников питания, включенных последовательно и распределенных по кольцу, возрастает до нескольких десятков. В частности, питание КЭМ УНК-ИФВЭ проектируется осуществлять от 24 тиристорных 12-пульсных выпрямителей с выходными параметрами 4,0 кА; 1,86 кВ. Выпрямители подключены к сети напряжением 10 кВ через преобразовательные трансформаторы и оснащены устройствами сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, АСР выходного напряжения. Подобное построение системы питания, предоставляя дополнительные возможности организации АСР-В, одновременно ставит перед разработчиком дополнительные задачи помимо увеличения надежности.

Как видно из рис. I, источник, разработанный для УНК ИФВЭ, по структуре аналогичен источникам серии ИСТ2 и отличается полной симметрией силовой схемы, введением шунтирующего ключа VT и контура обратной связи $KOC-Цd$ и исключением контура $KOC-Цm$. Сравнительно низкое значение емкостной проводимости вторичных обмоток преобразовательных трансформаторов на землю позволяет уменьшить продольные составляющие пульсаций напряжения до допустимого значения заземлением средней точки части конденсаторов LC-фильтра пульсаций. Регуляторы напряжения $Р-Цd$, $-Цc$, $-Цm$ по структуре унифицированы и отличаются видом передаточной функции $W(s)$ звена с ограничением зоны линейности. В регуляторе $Р-Цm$ организован дополнительный симметричный выход для подключения усилителя мощности УМ низких частот. Прием сигналов обратных связей с симметричных делителей напряжения производится масштабируемыми дифференциальными усилителями на уровне 50–100 В.

Макет АСР-У испытан в НИИЭФА на модели источника с выходными параметрами 5 А; 1,86 кВ в режиме отработки импульса напряжения, соответствующем

Таблица. Пульсации напряжения на вершине импульса магнитного поля

Частота	Коэффициент пульсаций			
$\frac{f}{f_0}$	$P_B \cdot 10^{-7}$	$P_B \cdot 10^{-5}$		
I	0,2	0,8		I
2	2,0	10		1,5
3	2,0	15		0,5
6	5,0	50		0,8
I2	10	100		75
Установка	УНК	ПС-ИФВЭ	ПС-ИТЭ	

* - суммарное значение

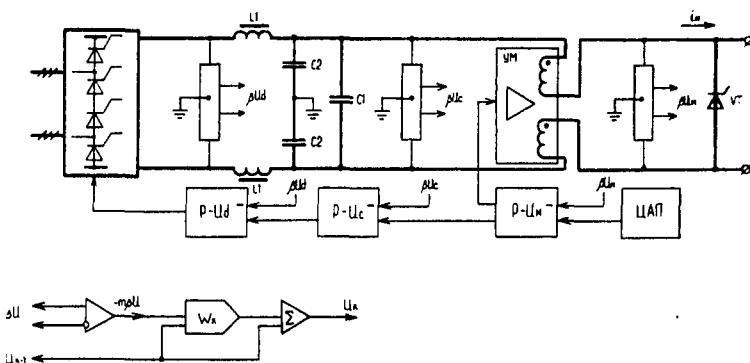


Рис.1. Источник питания КЭМ УНК: а - общая схема, б - структура К-го регулятора.

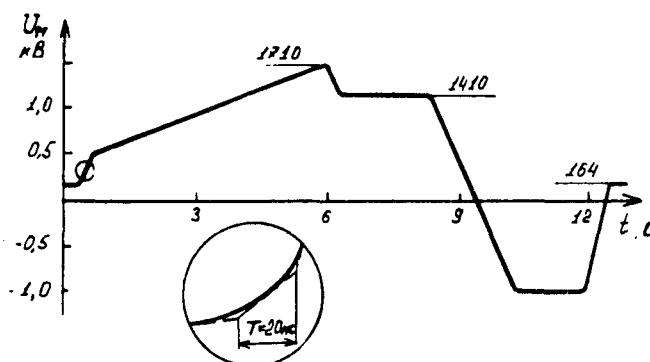


Рис.2. Импульс выходного напряжения источника с номинальными параметрами.

регулированию всех 24 источников при формировании импульса магнитного поля по одной программе. Исследования показали, что линеаризация динамического коэффициента передачи тиристорного выпрямителя, обеспечиваемая системой фазового управления с арккосинусной регулировочной характеристикой, принципиальная. В отношении четных субгармоник пульсаций напряжения U_d , вызванных несимметрией напряжения, подводимого к выпрямителю, указанная схема при малых углах регулирования α незначительно лучше равноинтервальной, представляющей возможность уменьшения субгармоник введением прямой компенсирующей связи со стороны питающего напряжения [4]. Последнее существенно, так как мощность оборудования усилителя УМ определяется, в основном, спектром субгармоник пульсаций напряжения U_c . Окончательно этот вопрос будет решен на основании результатов испытания разрабатываемого макета безынерционного одноканального синхронного равноинтервального устройства фазового управления с компенсирующей связью и линеаризующей регулировочной характеристикой. При положительных результатах испытаний для уменьшения реактивной мощности, потребляемой выпрямителем, целесообразно дополнить схему выпрямления коммутирующими тиристорами или использовать "двойное" включение тиристоров по управлению.

Так как индуктивность вторичных обмоток выходных трансформаторов УМ много меньше индуктивности КЭМ, то режим работы транзисторов на фронте и спаде импульса напряжения отличается от статического режима незначительно. Из аварийных режимов для УМ наиболее тяжелым является режим пробоя ключа VT , при котором конденсаторы LC -фильтра разряжаются через выходы УМ. Для уменьшения мощности защитного оборудования, подобного устанавливаемому на УМ ПС-ИФВЭ, необходимо установить токоограничивающие предохранители в цепи конденсаторов и выполнить вторичные обмотки трансформаторов с изоляцией между концами на напряжение, равное U_c макс. При этом тиристорные разрядники, шунтирующие УМ, могут быть перенесены на первичную сторону трансформаторов и соответственно уменьшена их мощность.

Стабилизация магнитного поля на плоских участках и переходах импульса поля может быть обеспечена замыканием контура КОС-В с выхода дополнительно-го датчика В-импульсов, предложенного ИФВЭ, через цифровой регулятор и цифроаналоговый преобразователь на вход замкнутых контуров КОС-ЦМ двух источников. Нестабильность датчика $\pm 3 \cdot 10^{-6}$ Тл, дискретность 10^{-5} Тл и динамический диапазон в области плоских участков цикла $\pm 2 \cdot 10^{-3}$ Тл.

Отличительной особенностью системы питания КЭМ УНК-ИФВЭ является применение силового преобразовательного оборудования в основном общепромышленного исполнения и обеспечение требуемого качества регулирования магнитного поля при питании от промышленной сети энергоснабжения без дополнительной стабилизации и симметрирования переменного напряжения.

Представленная АСР позволяет также формировать импульсы магнитного поля с неодинаковыми программами регулирования напряжения групп источников. Цифроаналоговые программаторы-задатчики напряжения синхронизируются автономными сериями Т-импульсов, задатчик магнитного поля – сериями В-импульсов. Предусматривается автокоррекция программ для последующего импульса поля по результатам цифрового сравнения временных интервалов между соответствующими В-импульсами с эталонными, определяемыми опорной серией T_0 -импульсов, и допусковой информацией о потенциалах на выводах источников в диапазоне регулирования выходного напряжения двух из них, входящих в контур КОС-В. В аварийных режимах обеспечивается программное регулирование выходного на-

пражения исправных источников с помощью простейшего аналогового программа-
тора при отключенных регуляторах. Рассматривается также целесообразность
введения простейших "грубых" устройств фазового управления, работающих
в дежурном режиме.

Л и т е р а т у р а

1. Васильев С.Н., Гусев О.А., Федоров В.Д. Тенденции развития систем лите-
ния ускорителей заряженных частиц. В кн. Труды VII Всесоюзного сове-
щания по ускорителям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1981, т. I с. 315-322.
2. Гусев Г.И., Гусев О.А., Кофман В.М., Рожков В.Н. Результаты модернизации
системы регулирования и сглаживания пульсаций магнитного поля протонно-
го синхротрона ИТЭФ. В кн. Труды VII Всесоюзного совещания по ускори-
телям заряженных частиц. Дубна, ОИЯИ, 1981, т. I с. 334-337.
3. Алексеев Б.А., Засенко В.А., Ивкин В.Г. и др. Серия регулируемых источни-
ков стабилизированного тока типа ИСТ второго поколения для ускоритель-
ных комплексов высоких энергий. Наст. сб., с. 309.
4. Исхаков С.М., Кофман В.М., Рябенский В.М., Тистол Н.К. Разработка и иссле-
дование эффективных алгоритмов управления преобразователем с компенсацией
неканонических гармоник. В кн.: III Всесоюзная конференция по проблемам
преобразовательной техники. Киев, Институт электродинамики АН УССР, 1983,
т. 7 с. 149-152.