

ИСТОЧНИКИ ПОДШУНТИРОВАНИЯ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ С РЕКУПЕРАЦИЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕТЬ

О. В. Беликов¹, В. Р. Козак

Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН, Новосибирск, Россия

При создании компактных ускорительных и накопительных установок из-за ограниченного пространства не всегда удается разместить необходимые элементы магнитной структуры. Поэтому на таких установках частично отказываются от использования отдельно расположенных корректоров, а коррекцию поля в зазорах электромагнитов осуществляют подшунтированием обмоток электромагнитов специальными источниками, способными отбирать часть тока [1]. Описываются источники подшунтирования, способные рекуперировать отобранную от обмоток электромагнитов энергию в однофазную электрическую сеть.

During creating accelerators and storage rings installation on the compact space, we need magnet elements more than this space allows it. In this case, we can reduce the number of correctors if we shunt magnets coil by special bypass module, which is able to take some current away [1]. The paper describes this type of bypass modules, which are able to recuperate taken energy to electrical mains.

PACS: 29.20.Ej

ВВЕДЕНИЕ

На синхротроне COSY (Юлих, Германия) для подавления влияния рассеивания протонного пучка на внутренней мишени Институтом ядерной физики (ИЯФ СО РАН) была построена установка электронного охлаждения с диапазоном перестройки энергии электронного пучка от 0,025 до 2 МэВ [2]. Для коррекции искажений электронного пучка в системе электронного охлаждения использовались 57 отдельно стоящих корректирующих электромагнитов. Для дополнительных 8 коррекций корректирующие магниты не предусматривались, а использовались 4 двухканальных регулируемых источника подшунтирования двух различных типов: SR-20-15 и SR-20-30. В таблице приведены основные параметры источников подшунтирования.

1. СТРУКТУРА ИСТОЧНИКОВ ПОДШУНТИРОВАНИЯ

На рис. 1 изображена структурная схема двухканального модуля подшунтирования, состоящего из двух преобразователей постоянного тока в постоянное напряжение (DC/DC1 и DC/DC2) и одного синхронного выпрямителя (SR). Ко входу каждого

¹E-mail: O.V.Belikov@inp.nsk.su

Основные параметры источников подшунтирования SR-20-15 и SR-20-30

| Параметр | Значение | |
|---|--------------------------|----------|
| | SR-20-15 | SR-20-30 |
| Максимальный входной ток, А | 20 | |
| Максимальное входное напряжение, В | 15 | 30 |
| Действующее значение выходного напряжения, В | 100–250 | |
| Частота выходного напряжения, Гц | 50/60 | |
| Частота преобразования, кГц | 100 | |
| Относительная погрешность регулирования входного тока (от максимального значения) | $\leq 10^{-3}$ | |
| Долговременная стабильность входного тока (за 24 ч) | 10^{-4} | |
| Температурный коэффициент дрейфа входного тока, $1/^\circ\text{C}$ | $4 \cdot 10^{-5}$ | |
| Охлаждение | Воздушное принудительное | |

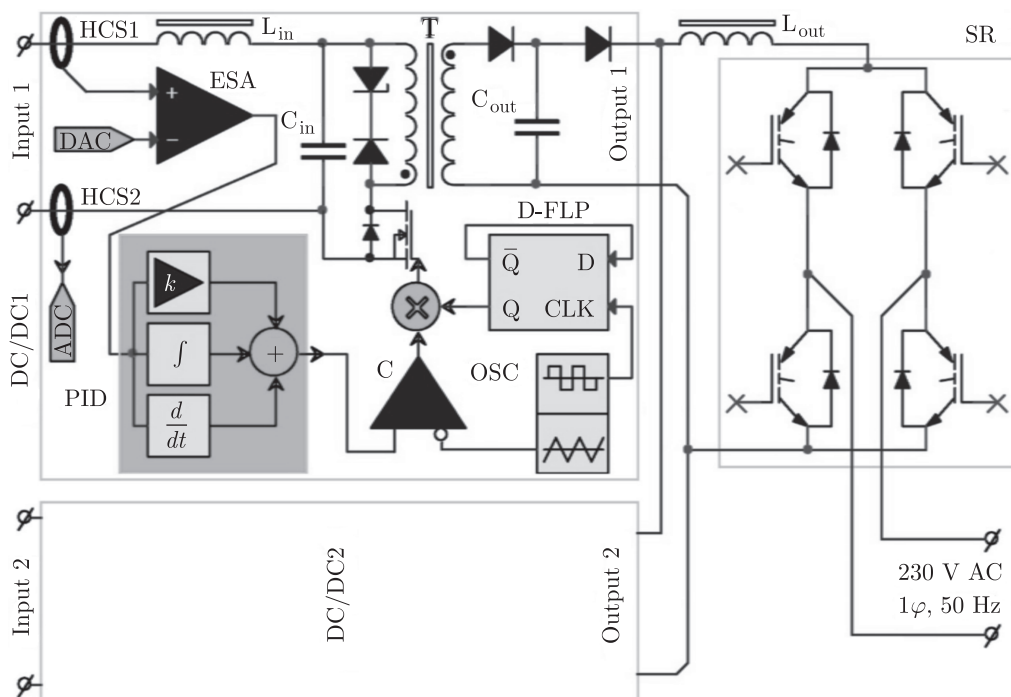


Рис. 1. Структурная схема двухканального модуля подшунтирования: HCS1, HCS2 – бесконтактные измерители тока; Т – трансформатор; SR – синхронный выпрямитель; ESA – усилитель сигнала ошибки; DAC – цифро-аналоговый преобразователь; D-FLP – D-триггер; DC/DC1, DC/DC2 – преобразователи постоянного тока в постоянное напряжение; ADC – аналого-цифровой преобразователь; С – компаратор; OSC – генератор

преобразователя DC/DC подключается обмотка подшунтируемого магнита. При этом входное напряжение преобразователя DC/DC может изменяться в широком диапазоне от минимального до максимального значения напряжения на магните. Выходное напряжение преобразователя DC/DC постоянно и равно действующему значению напряжения в сети. За основу схемного решения преобразователя DC/DC была выбрана схема однотактного обратного преобразователя. Фазы накопления и передачи энергии в нагрузку у таких преобразователей разнесены во времени, что позволяет работать в широком диапазоне значений входного напряжения. Регулирование входного тока производится широтно-импульсной модуляцией входного напряжения. Для подавления пульсаций входного тока на частоте преобразования и ее гармониках на входе преобразователя DC/DC имеется входной фильтр из элементов L_{in} и C_{in} , имеющий коэффициент подавления более 60 дБ. Для измерений входного тока используются два бесконтактных датчика тока HCS1 и HCS2, по одному датчику производится стабилизация тока, второй датчик используется в системе контроля. Петля обратной связи по току включает усилитель сигнала ошибки ESA, а также звенья с пропорциональной интегральной и дифференциальной характеристиками. Такая структура позволяет иметь высокий коэффициент усиления разомкнутой петли обратной связи по постоянному току (более 10^3), а также быстро реагировать на изменение входного напряжения.

Для преобразования постоянного выходного напряжения преобразователя DC/DC в переменное напряжение сети используется синхронный выпрямитель, выполненный на четырех ключах IGBT. При этом на входе синхронного выпрямителя будет выпрямленное сетевое напряжение с удвоенной частотой 100 Гц, что в 10^3 раз меньше частоты работы обратного преобразователя. Для согласования выходов обратных преобразователей со входом синхронного выпрямителя используется фильтр низких частот, состоящий из элементов L_{out} и $2C_{out}$. Относительную величину пульсаций выходного напряжения обратных преобразователей можно оценить по формуле

$$\delta U_{out} = \frac{\Delta U_{out}}{U_{AC}} \approx \frac{1}{8 \cdot \sqrt{2} \pi^2 f^2 L_{out} C_{out}},$$

где U_{AC} , f — действующее значение и удвоенная частота сетевого напряжения. В нашем случае $\delta U_{out} \approx 0,9\%$, поэтому, чтобы обеспечить требуемую стабильность тока подшунтирования, достаточно иметь коэффициент усиления разомкнутой петли обратной связи более 10 на частоте 100 Гц. Величину выходного тока обратных преобразователей можно оценить по формуле

$$I_{out}(t) = I_{DC} + I_{AC}(t) \approx \frac{\eta}{U_{AC}} (U_{in1} I_{in1} + U_{in2} I_{in2}) + \frac{U_{AC}}{8 \cdot \sqrt{2} \pi^2 f^2 L_{out} C_{out}} \sin \left(2\pi f t - \frac{\pi}{2} \right),$$

где I_{DC} и I_{AC} — постоянная и переменная составляющие тока; η — коэффициент полезного действия обратного преобразователя; U_{in1} и I_{in1} (U_{in2} и I_{in2}) — входные значения напряжения и тока для DC/DC1 (DC/DC2). В нашем случае максимальное значение постоянного тока $I_{DC_max} \approx 4,4$ А (для SR-20-30), действующее значение

переменного тока $I_{AC_rms} \approx 1,4$ А, величина фазового сдвига между выходным током и сетевым напряжением 12,5 мс.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИСПЫТАНИЯ

В рамках контрактной работы с COSY были изготовлены 4 двухканальных модуля подшунтирования SR-20-30 и один SR-20-15. Источники подшунтирования прошли успешные испытания в ИЯФ СО РАН на установке электронного охлаждения на 2 МэВ.

На рис. 2 приведена осциллограмма сетевого напряжения и тока двухканального модуля подшунтирования SR-20-30 с одним каналом, работающим на максимальных

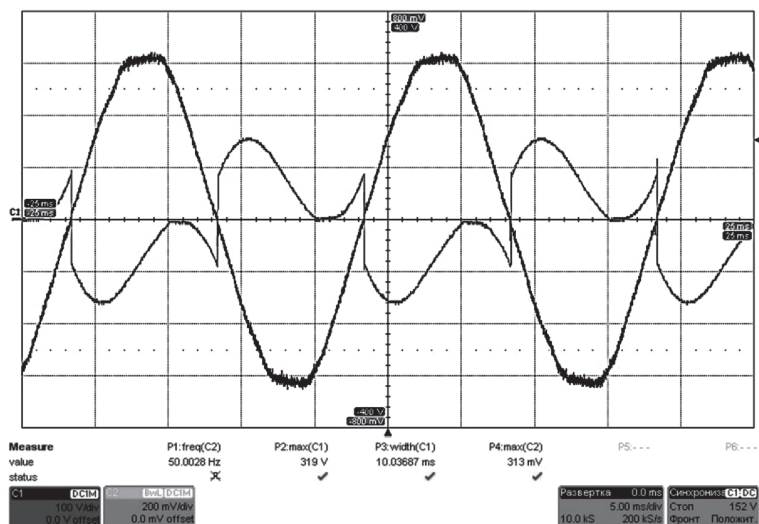


Рис. 2. Осциллограмма напряжения и тока. C1 — напряжение в сети; C2 — ток, потребляемый от сети (100 мВ соответствует 1 А)

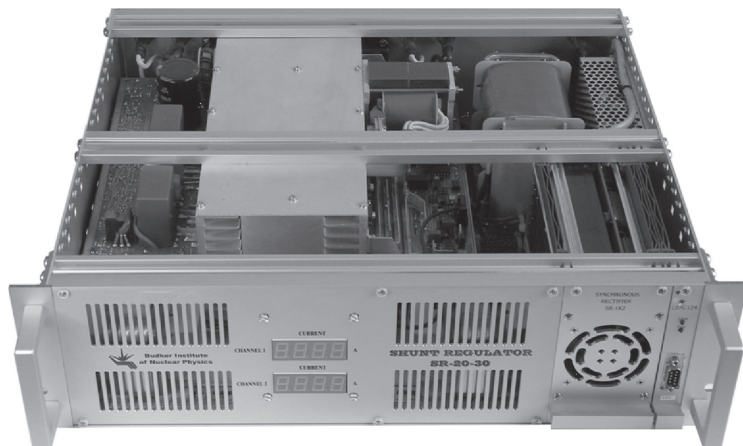


Рис. 3. Внешний вид SR-20-30

параметрах. Ток и напряжение находятся в противофазе, что соответствует отрицательному значению мощности, потребляемой из сети.

На рис. 3 показан двухканальный модуль SR-20-30. Модуль выполнен в конструктиве «Евромеханика» 3U-subunit ($432 \times 355 \times 133$ мм). Контроль и управление модулем осуществляется при помощи встроенного контроллера SEAC124 [3] разработки ИЯФ СО РАН. Контроллер содержит 4 канала 16-разрядных цифро-аналоговых преобразователей, 12 каналов 24-разрядных аналого-цифровых преобразователей, 4 входных и 4 выходных регистра. Связь с контроллером осуществляется по CANbus.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Беликов О. В., Медведко А. С., Козак В. Р.* Источник подшунтирования электромагнитов для коррекции параметров пучка в ускорителях и накопителях заряженных частиц // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. «Физика». 2009. Т. 4, № 3. С. 63–66.
2. *Reva V. B., Alinovskiy N. I., Bedareva T. V., Bekhtenev E. A., Belikov O. V., Bocharov V. N., Borodich V. V., Bryzgunov M. I., Bublely A. V., Chekavinskiy V., Cheskidov V., Dovzhenko B., Erokhin A., Fedotov M., Goncharov A. D., Gorchakov K., Gosteev V. K., Gusev I., Ivanov A., Karpov G., Koisin Yu., Kondaurov M., Kozak V., Lisitsyn A., Lopatkin I., Mamkin V., Medvedko A. S., Panasyuk V. M., Parkhomchuk V. V., Poletaev I., Polukhin V., Protopopov A., Pureskin D., Putmakov A., Selivanov P. A., Semenov E., Senkov D., Skorobogatov D. N., Zapiatkin N. P., Kamerdzhiev V., Mao Lijun, Dietrich J.* COSY 2 MeV Cooler: Design, Diagnostic and Commissioning // Proc. of the 5th Intern. Particle Accelerator Conf. "IPAC 2014", Dresden, Germany, June 15–20, 2014. Dresden, 2014. P. 777–779.
3. *Беликов О. В., Веремеенко В. Ф., Козак В. Р., Медведко А. С., Купер Э. А.* Семейство контроллеров SEAC для управления источниками питания ускорительно-накопительных комплексов // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Сер. «Физика». 2012. Т. 7, № 4. С. 43–48.