

УДК 539.1.075 + 621.311.6

Ю. С. Актершев, С. С. Васичев, **В. Ф. Веремеенко**

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Акад. Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия*

*Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова 2, Новосибирск 630090, Россия*

Yu.S.Aktershev@inp.nsk.su, S.S.Vasichev@inp.nsk.su

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ЧЕТЫРЕХКВАДРАНТНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ВЧ-500-12P ДЛЯ ПИТАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ СОЛЕНОИДОВ

Рассматривается принцип действия разработанного прецизионного регулируемого источника постоянного тока 0–500 А, с возможностью рекуперации реактивной энергии индуктивной нагрузки в сеть. В источнике использован инверторный принцип преобразования постоянного напряжения в напряжение с частотой 20 кГц с последующим синхронным выпрямлением. Нестабильность выходного тока за 8 ч непрерывной работы составляет менее 0,01 % от номинального значения тока. Примененные схемотехнические решения позволяют уменьшить коммутационные потери в полупроводниковых силовых элементах и повысить КПД источника.

Ключевые слова: прецизионный источник тока, синхронный выпрямитель, стабильность тока, рекуперация энергии, двуполярный, четырехквadrантный.

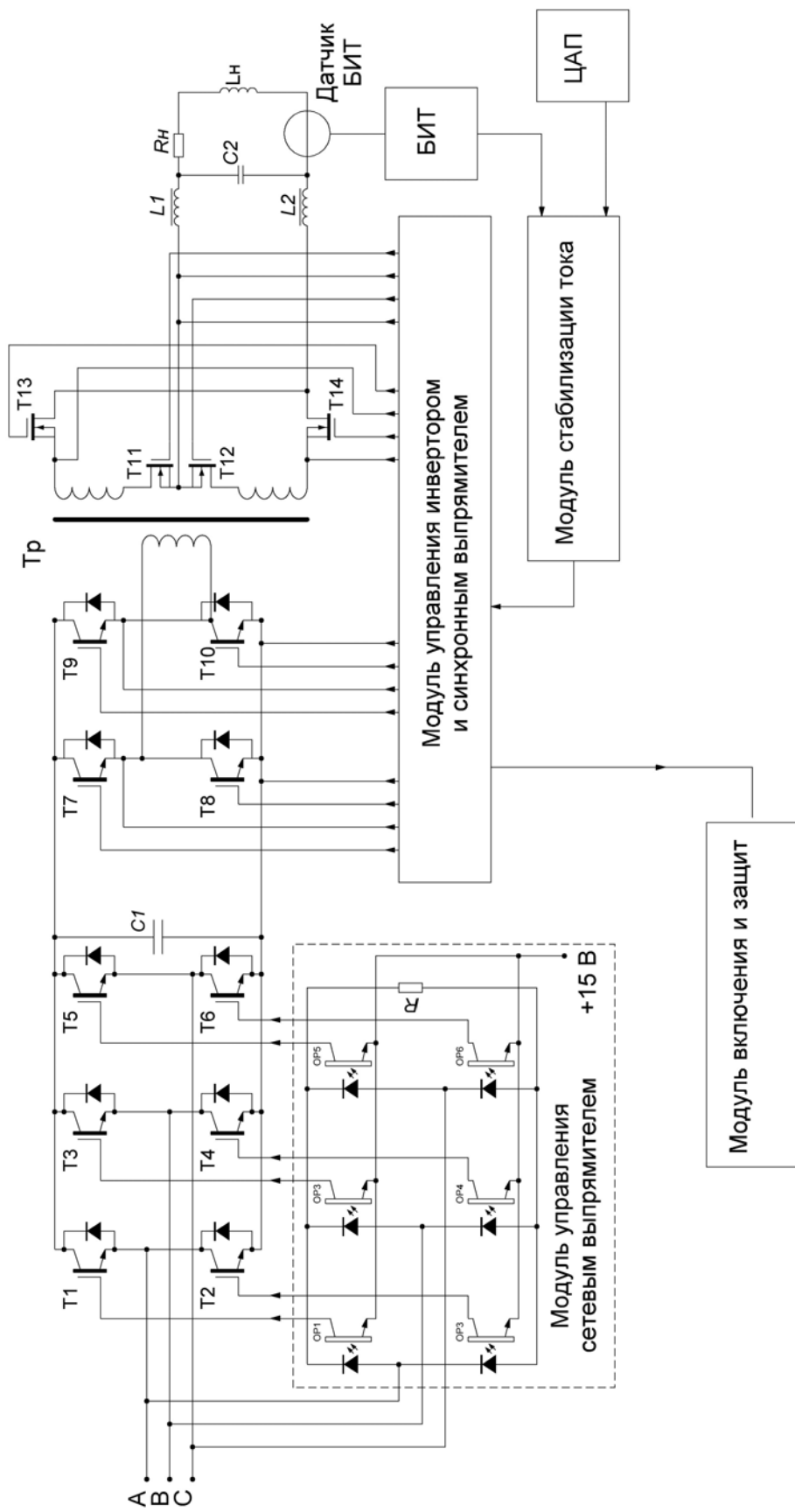
Введение

В научных электрофизических установках со сверхпроводящими соленоидами существует значительная проблема вывода накопленной в них реактивной энергии. Сверхпроводящие магнитные элементы, как правило, имеют высокую индуктивность при крайне низком омическом сопротивлении, определяемом питающими проводами и тоководами. В случае, когда требуется нестационарный режим работы, связанный с изменением величины или знака магнитного поля в сверхпроводящем соленоиде или магните, вывод энергии, запасенной в магнитном поле, становится существенной проблемой. Время релаксационного спада тока в сверхпроводящих элементах может измеряться часами, а иногда и днями. В качестве одного из вариантов решения данной проблемы используется включение последовательно со сверхпроводящим соленоидом резистивного элемента. Однако это

приводит к дополнительным значительным тепловым потерям и сводит к нулю достоинство сверхпроводящего соленоида – малое активное сопротивление [1; 2]. В качестве альтернативы возможно применение полностью обратимого источника тока, который может как передавать энергию питающей сети в магнитный элемент, так и осуществлять обратный процесс, отдавая энергию, запасенную в магнитном поле, обратно в питающую сеть. Такой подход актуален в каналах транспортировки, через которые осуществляется проводка частиц разной полярности, электронов и позитронов, например, и в ускорителях при циклическом ускорении заряженных частиц, когда режим работы установки выглядит следующим образом:

- прием заряженных частиц с низкой энергией;
- ускорение до высокой энергии;
- перепуск в накопительное кольцо или использование частиц в эксперименте;

Актершев Ю. С., Васичев С. С., Веремеенко В. Ф. Прецизионный четырехквadrантный источник тока ВЧ-500-12P для питания сверхпроводящих соленоидов // Сибирский физический журнал. 2017. Т. 12, № 2. С. 138–141.



Блок-схема источника

БИТ – бесконтактный измеритель тока, ЦАП – цифроаналоговый преобразователь

- снижение поля в магнитных элементах до уровня низкой энергии для приема новой партии частиц.

В рамках применения идеологии полностью реверсивного источника разработан четырехквadrантный прецизионный источник тока, способный иметь на выходе четыре комбинации знаков напряжения и тока; положительное напряжение и положительный ток, отрицательное напряжение и отрицательный ток, положительное напряжение и отрицательный ток, отрицательное напряжение и положительный ток. Последние две комбинации, когда выходная мощность имеет отрицательный знак, означают, что источник не отдает, а наоборот, принимает энергию от нагрузки и возвращает ее в питающую трехфазную сеть. Такой режим работы позволяет осуществить регулируемый спуск тока в сверхпроводящих соленоидах, имеющих большую энергоемкость.

Принцип действия источника

На рисунке приведена упрощенная блок-схема источника. Силовое питающее трехфазное напряжение выпрямляется трехфазным выпрямителем, транзисторы Т1–Т6 которого с помощью модуля управления сетевым выпрямителем открываются синхронно с напряжением питающей сети. Мостовой инвертор Т7–Т10 преобразует его в напряжение 550 В частотой 40 кГц. Трансформатор (Тр) осуществляет потенциальную развязку и понижает напряжение на выходе до 12 В. Напряжение с выхода трансформатора подается на синхронный выпрямитель. При положительном выходном напряжении попеременно открываются транзисторы Т11, Т12, транзисторы Т13, Т14 постоянно открыты. При отрицательном работают Т13, Т14, а Т11, Т12 постоянно открыты. После синхронного выпрямителя напряжение фильтруется дросселями L_1 , L_2 и конденсаторной батареей C_2 и подается в нагрузку R_n , L_n . Выходное напряжение источника и выходной сигнал прецизионного бесконтактного измерителя тока (БИТ) [3] подаются в модуль стабилизации тока, который с помощью модуля управления инверторов синхронным выпрямителем корректирует продолжительность открывания транзисторов Т7–Т10, а также управляет синхронным выпрямителем. Модуль стабилизации тока представляет собой аналого-

вый пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор. Управление от компьютера осуществляется посредством ЦАП [3; 4].

Модуль включения и защиты обеспечивает включение источника – как местное, так и от компьютера, контроль защиты и выключение при аварийных ситуациях.

Вывод энергии из соленоида (рекуперация энергии) осуществляется следующим образом.

Выходное напряжение источника (напряжение на индуктивности L_n) меняет полярность, ток нагрузки при этом сохраняет свое направление за счет большой индуктивности L_n . Постоянное напряжение на нагрузке соответствующим выходным синхронным выпрямителем преобразуется в напряжение с частотой 20 кГц, трансформатором (Тр) повышается до уровня 550 В, выпрямляется инвертором в постоянное напряжение 550 В, накапливаемое на емкости C_1 , и, наконец, преобразуется в трехфазное переменное напряжение трехфазным синхронным выпрямителем Т1–Т6, создавая в сети ток обратного направления. В режиме рекуперации выходной выпрямитель, инвертор и сетевой трехфазный выпрямитель меняются ролями: выходной выпрямитель становится инвертором, инвертор – выпрямителем, сетевой выпрямитель – трехфазным инвертором. В этом режиме по-прежнему осуществляется регулирование тока нагрузки в соответствии с опорным напряжением ЦАП [4], а роль регулятора выполняют выходные синхронные выпрямители совместно с контуром регулирования.

Заключение

Описанный источник был разработан и испытан нагруженным на сверхпроводящий соленоид ускорителя ВЭПП-2000. Создана серия из 10 источников, которые используются в Институте ядерной физики СО РАН в составе ускорителя ВЭПП-2000.

Технические характеристики источника:

- номинальная выходная мощность 5 кВт;
- номинальный выходной ток 500 А;
- номинальное выходное напряжение 12 В;
- нестабильность тока за 8 часов непрерывной работы не более 0,01 % от номинального значения тока;
- КПД лучше 90 %.

Список литературы

1. Веремеенко В. Ф. Прецизионные элементы систем питания магнитных структур накопителей заряженных частиц: Дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск, 1989.

2. Мизинцев А. В. Прецизионные источники тока с высокими динамическими характеристиками для питания электромагнитов ускорителей заряженных частиц: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2002.

3. Veremeenko V. F. Digital to analog converter with magnetic comparator // Instruments and Experimental Techniques. 1990. Vol. 33, № 1. P. 103–108.

4. Козак В. Р., Кунер Э. А. и др. Семейство контроллеров СЕАС для управления источниками питания ускорительно-накопительных комплексов // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2012. Т. 7, № 4 С. 43–48.

Материал поступил в редколлегию 20.02.2017

Yu. S. Aktershev, S. S. Vasichev, V. F. Veremeenko

*Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS
11 Acad. Lavrentiev Ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

*Novosibirsk State University
2 Pirogov Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation*

Yu.S.Aktershev@inp.nsk.su, S.S.Vasichev@inp.nsk.su

PRECISION FOUR-QUADRANT CURRENT SOURCE VCH-500-12R FOR SUPERCONDUCTING SOLENOIDS

A precision controllable bidirectional current source 0-500A for superconducting solenoids used in particle physics experiments has been proposed. This article discusses the operation principle of the designed device including a 40-kHz voltage conversion with subsequent synchronous rectification and an approach to energy recuperation from large inductive loads. It also presents some circuit designs aimed at reducing switching losses and increasing the overall efficiency. Current instability for 8 hours of continuous operation is no more than 0.01 % of the normal current.

Keywords: precision current source, synchronous rectifier, current stability, energy recuperation, bidirectional, four-quadrant.