

## ПРЕЦИЗИОННЫЙ МОДУЛЬНЫЙ СИЛЬНОТОЧНЫЙ ИСТОЧНИК ТОКА ДЛЯ СТЕНДА МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИЯФ<sup>1</sup>

© 2025 г. Д. В. Сеньков<sup>a, b, c, \*</sup>, Д. Н. Пурескин<sup>a</sup>, А. А. Старостенко<sup>a, b</sup>,  
В. А. Докутович<sup>a</sup>, К. В. Жиляев<sup>a</sup>, А. Ю. Пахомов<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук  
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11*

<sup>b</sup> *Новосибирский государственный университет  
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2*

<sup>c</sup> *Новосибирский государственный технический университет  
Россия, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20*

\* *e-mail: D.V.Senkov@inp.nsk.su*

Поступила в редакцию 26.11.2023 г.

После доработки 07.03.2024 г.

Принята к публикации 26.04.2024 г.

Представлены структура и алгоритмы управления модульного сильноточного источника тока, разработанного для работ по прецизионному измерению качества магнитного поля в создаваемых в ИЯФ магнитных элементах для современной ускорительной техники. Развитие ускорительных технологий постоянно повышает требования к качеству поля магнитных линз и поворотных магнитов циклических ускорителей. Появляются новые интегральные линзы со сложными законами изменения поля. Для настройки и контроля качества поля разрабатываемых в ИЯФ СО РАН магнитных элементов используются несколько стендов магнитных измерений. Одним из основных элементов стенда является прецизионный источник тока, позволяющий получить в испытуемом магнитном элементе карту поля на разных уровнях тока с погрешностями порядка 0.002%. Этот источник должен работать, сохраняя качество тока, с выходными токами от нескольких ампер до 1500 А и выходными напряжениями до 100 В при разных индуктивных нагрузках.

DOI: 10.7868/S3034564225070143

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Развитие ускорительных технологий постоянно повышает требования к качеству поля магнитных линз и поворотных магнитов, используемых для циклических ускорителей. Появляются новые интегральные линзы со сложными законами изменения поля. Для настройки и контроля качества поля разрабатываемых в ИЯФ СО РАН магнитных элементов используются несколько стендов магнитных измерений. Представленный источник разработан в рамках работ по модернизации стенда магнитных измерений и предназначен для организации прецизионных

измерений качества магнитного поля разрабатываемых и производящихся в ИЯФ магнитных элементов ускорителей и накопителей электронных и ионных пучков. Область применения накладывает на источник довольно серьезные требования к качеству выходного тока, так как измерения полей магнитов проводится во всем диапазоне допустимых для элемента токов, при положительном и отрицательном направлениях протекания тока. Соответственно, для этих целей требуется дипольный источник тока с высокой (лучше, чем  $10^{-5}$ ) долговременной и кратковременной стабильностью выходных параметров с программируемым значением

<sup>1</sup> Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, г. Новосибирск.

выходного тока и диапазоном выходного тока и напряжения, покрывающим разрабатываемые в ИЯФ магнитные элементы [1].

## 2. МОДУЛЬНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

При проектировании источника был выбран модульный принцип построения силовой части с параллельной коммутацией силовых преобразователей. Такой подход позволяет использовать более доступные и, на самом деле, лучшие по характеристикам силовые компоненты. Так, при выбранной величине тока одного канала 250А количество доступных для использования полупроводниковых ключей с 50–100-процентным запасом по току (максимальный рабочий ток 400–500А) от разных производителей, включая российских и китайских, существенно больше двадцати. Если же рассматривать вариант преобразователя с одним выходным каналом, то требуются уже модули с током не менее 2 кА, и выбор сильно сужается. К тому же, и это тоже крайне немаловажный аспект при планировании срока эксплуатации источника (более 10 лет), отсутствие уникальных компонентов существенно уменьшает риск того, что производитель снимет с производства модель, заменив другой, в другом корпусе, который будет невозможно использовать в уже разработанной конструкции. Есть еще один существенный плюс модульного подхода – используя отработанную конструкцию силовой секции, можно наращивать выходной ток и мощность источника, добавляя секции. При этом, безусловно, есть и отрицательные стороны. Главная из них – увеличение сложности схемы и количества компонентов статистически ведет к увеличению вероятности отказа оборудования, и тогда придется принимать специальные меры, чтобы единичные отказы не приводили к выводу источника

из строя и могли бы быть устранены во время обычного обслуживания, не требуя длительного ремонта.

## 3. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Как уже было указано выше, используется модульная конструкция на основе силовой преобразовательной секции с максимальным выходным током 500 А и диапазоном допустимых рабочих напряжений до 250 В. В данном источнике максимальное выходное напряжение составляет 100 В и ограничено входным трехфазным выпрямителем. В случае, если требуются напряжения выше, конфигурация обмоток трехфазного трансформатора выпрямителя может быть изменена (входные обмотки перекоммутированы со схемы звезда в схему треугольник) и максимальное выходное напряжение источника может быть увеличено до 150 В ценой увеличения потерь в силовом трансформаторе. На практике эта возможность используется исключительно редко.

Силовая секция представляет собой два независимых прямоходовых мостовых преобразователя с рабочим током 250 А каждый, входы которых подключены к одной батарее емкостей. Выбор полярности выходного напряжения определяется тем, какая из диагоналей транзисторного моста активна (рис. 1).

Сигнал широтно-импульсной модуляции (ШИМ) управления для силовых транзисторов формируется в цифровом блоке управления секцией. Частота ШИМ-сигнала составляет 20 кГц, при этом фаза сигналов управления для второго преобразователя сдвинута на 180°. Это позволяет получить эффективную частоту секции в 40 кГц, облегчая фильтрацию пульсаций выходного напряжения на нагрузке (рис. 2).

В модуле управления секцией используется микроконтроллер с модулем ШИМ генера-

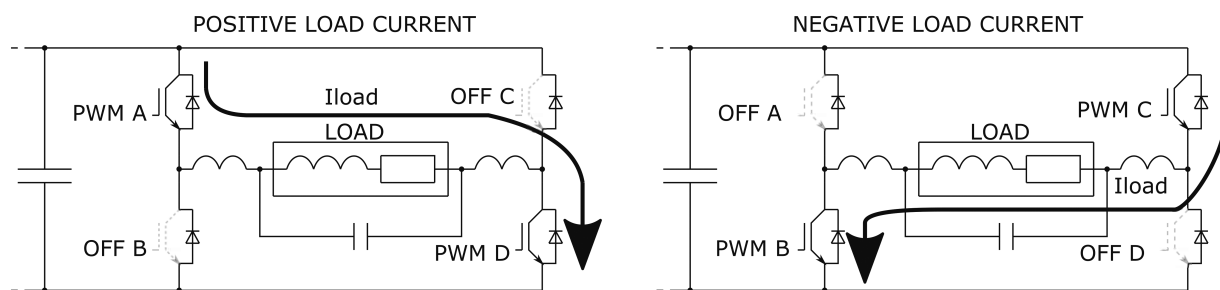


Рис. 1. Выбор полярности выходного напряжения мостового преобразователя.

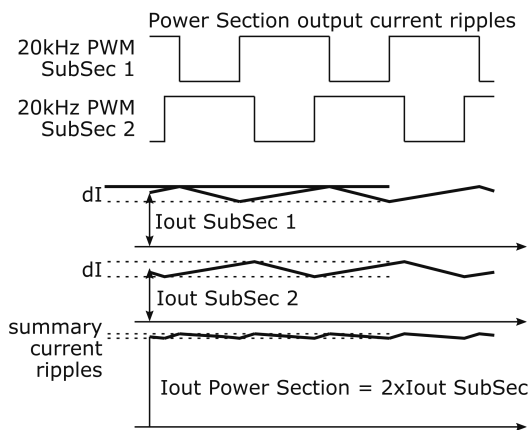


Рис. 2. Уменьшение пульсаций напряжения на нагрузке за счет увеличения эффективной частоты при сдвиге фазы управления преобразователями.

тора с увеличенной точностью (HRPWM) типа Delfino от TI. Объяснение технологии повышения точности ШИМ можно найти в [3], получающаяся временная дискретность ШИМ сигнала составляет примерно 120 пс, что дает эффективную разрядность ШИМ на частоте 20 кГц порядка 18.8 бит, обеспечивая достаточный запас по глубине регулирования на всех возможных режимах работы. На рис. 3 приведена общая блок-схема источника тока.

Напряжение питания для силовых секций формируется диодным выпрямителем, запитанным от понижающего трехфазного трансформатора мощностью 150 кВт. Выбранная конструкция обеспечивает высокий коэффициент мощности (лучше 0.95) на всех режимах работы и довольно компактна. Кроме того, при таком выпрямлении происходит мягкая коммутация тока в обмотках, что существенно снижает шум от трансформатора: при работе он ниже уровня 45 дБ. Выпрямленное постоянное напряжение поступает на три силовые секции, там оно модулируется ШИМ-сигналами управ-

ления для получения нужного уровня выходного напряжения и после сглаживается выходными LC-фильтрами. Все выходы секций подключены к общим выходным шинам, на которых расположены: прецизионный бесконтактный датчик выходного тока, гальванически отвязанный прецизионный датчик выходного напряжения и защитный коротитель, обеспечивающий защиту источника от запасенной в индуктивной нагрузке энергии. Коротитель основан на включенных встречно тиристорах и срабатывает автоматически, замыкая выход источника при превышении выходным напряжением уровня 250 В. При этом ток, протекающий в активно-индуктивной нагрузке будет циркулировать, не возвращаясь в источник, пока вся энергия не рассеется на сопротивлении нагрузки. Выходной ток каждого преобразователя измеряется отдельно для контроля работы и организации локального (на уровне управления секцией) ограничения тока.

Сигналы выходного тока и напряжения поступают в блок управления, выполненный в виде отдельного экранированного модуля. Там они оцифровываются и используются для вычисления с помощью пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора сигнала управления, который передается по цифровому интерфейсу в локальные контроллеры секций.

Весь источник выполнен в виде пыле-влагозащищенного шкафа шириной 1.8 м, глубиной 0.8 м и высотой 2.1 м (рис. 4). Для охлаждения силовых компонентов и обмоток трансформатора используется водяное охлаждение.

#### 4. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ

Как уже было сказано, в источнике используется полностью цифровое управление. Аналоговые сигналы выходного тока и напряжения

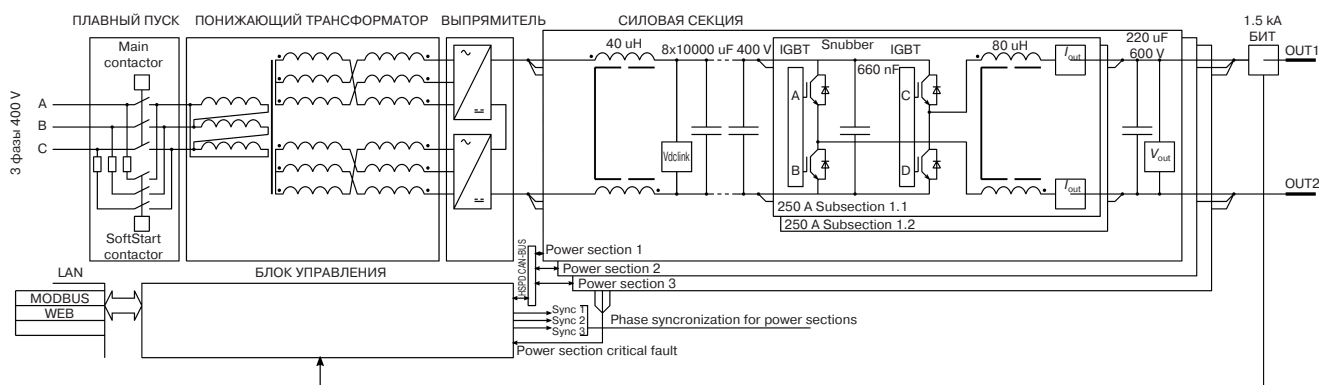


Рис. 3. Блок-схема прецизионного источника тока.



Рис. 4. Внешний вид шкафа источника тока. Показано место под четвертую секцию.

оцифровываются с частотой 20 кГц, при этом частота оцифровки синхронизирована с частотой ШИМ-сигнала, чтобы исключить интерференционные наводки от коммутации силовых ключей. Оцифрованные сигналы поступают в ПИД-регулятор, в котором реализована двухконтурная обратная связь, с основным контуром регулирования по току и дополнительным по выходному напряжению. Полученный сигнал затем передается по цифровому интерфейсу синхронно во все контроллеры секций с частотой 10 кГц. В штатной ситуации полученные данные контроллер секции прямо использует для формирования ШИМ-сигнала на силовые ключи. В случае, если ток в каком-либо преобразователе секции превышает заданный предел, обратная связь для данного преобразователя переключается на локальный уровень и осуществляется попытка стабилизации тока на уровне лимита. Если попытка оказывается неудачной, преобразователь отключается, при этом остальные продолжают работать в общей петле обратной связи.

Для модульной конструкции, конечно, возможен и другой вариант стабилизации тока – когда ток стабилизируется в каждой секции и затем суммируется на выходе. При этом ток гарантировано делится по секциям равномерно, и, кроме того, секция является законченным устройством, которое может применяться как отдельный источник питания. Однако в таком случае требуется использование в каждом локальном контроллере прецизионного датчика тока и прецизионной электроники, что усложняет и удорожает контроллер, так что от такого подхода

при разработке было решено отказаться. Также можно было реализовать работающую постоянно, а не в режиме ограничения тока, обратную связь по току в секциях, но это усложняет алгоритмы управления и требует качественного разделения полос локальной и общей обратной связи. Поэтому ввиду того, что при выбранном подходе с единой петлей ОС неравенство токов в секциях не превышает 10%, было решено выбрать именно его.

## 5. КАЧЕСТВО СТАБИЛИЗАЦИИ ВЫХОДНОГО ТОКА

Источник тока был запущен в работу и используется для задания тока в испытываемых магнитных элементах (поворотных магнитах и линзах) [1, 2]. От источника требуется стабильная работа на широкий спектр индуктивных нагрузок (с постоянными времени от единиц секунд до единиц миллисекунд) во всем диапазоне выходных токов – от ампер до максимальных 1.5 кА. И источник с данной задачей успешно справляется. На рис. 5 показаны графики полученные при тестовых испытаниях источника, подключенного к калибровочному магниту [2]. Вверху значение измеренного

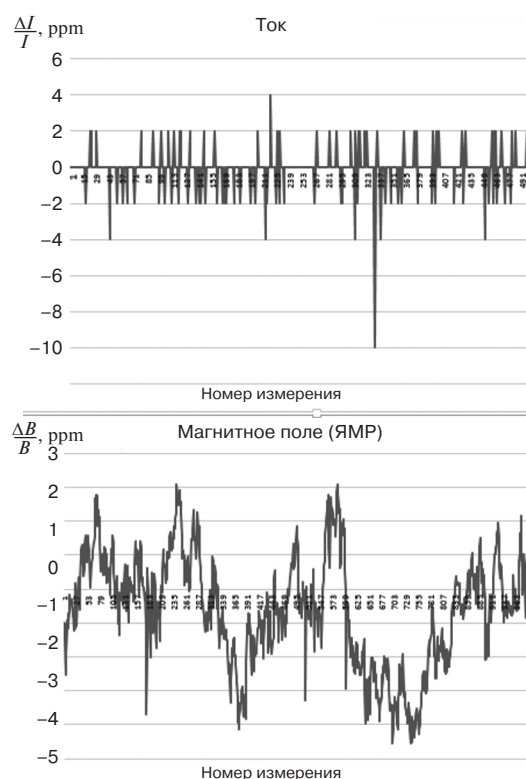


Рис. 5. Измерения качества стабилизации тока.

выходного тока, внизу измерения магнитного поля, получающегося при протекании этого тока в магните абсолютным датчиком магнитного поля (ЯМР-магнитометром).

Полученная относительная точность стабилизации тока – лучше  $\pm 5 \cdot 10^{-6}$  (размах от пика до пика).

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источник был испытан и введен в эксплуатацию в 2020 году и используется по настоящее время для магнитных измерений. Нестабильность тока (долговременная и пульсации) составляет менее 10 ppm на токах от 100 до 1500 А и до 0.01% от выходного тока на токах 1–100 А. Модульная конструкция и специальные алгоритмы контроллера позволяют эксплуатировать источник при отключении одной или двух сек-

ций, не останавливая измерения магнитов на время профилактики.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Riabchenko K.K., Pakhomov A. Yu., Rybitskaya T.V., Starostenko A.A., Tsyganov A.S., Zhiliaev K.V.* // Proc. IPAC'21. 2021. Campinas, SP, Brazil. P. 2367. <https://doi.org/10.18429/JACoW-IPAC2021-TUPAB364>
2. *Рябченко К.К., Пахомов А.Ю., Рыбичкая Т.В., Старостенко А.А.* // ПТЭ. 2019. № 6. С. 117. <https://doi.org/10.1134/S0032816219060132>
3. *Самоделов А., Игнатов С.* // Силовая электроника. 2012. № 2. С. 54.