

РЕГУЛИРУЕМЫЙ ИСТОЧНИК ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ КОМПЬЮТЕРНОГО БЛОКА ПИТАНИЯ

© 2022 г. Р. А. Санжаров^а *, А. В. Козлов^а, П. А. Федин^а, А. В. Зиятдинова^а, Т. В. Кулевой^а

^аНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123182 Россия

*E-mail: roman.sanzharow@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 11.01.2022 г.

Принята к публикации 28.07.2022 г.

В современных реакторных установках существует проблема износа конструкционного материала под воздействием нейтронного потока. В НИЦ “Курчатовский институт” на базе ускорителя ТИПр (тяжело-ионный прототип) ведутся работы по изучению радиационной стойкости новых материалов с помощью ускоренных пучков ионов, имитирующих нейтронное воздействие. В рамках совершенствования экспериментов на ускорителе планируется создание второго канала для одновременного облучения образца как тяжелыми ионами, так и ионами водорода и гелия, что позволит моделировать эффекты трансмутации образца в зоне повреждения тяжелыми ионами. Для фокусировки пучка ионов водорода и гелия планируется использовать систему квадрупольных магнитных линз, питающихся от регулируемых источников постоянного тока.

Ключевые слова: источник постоянного тока, компьютерный блок питания, tl494, стабилизация тока, квадрупольная линза

DOI: 10.56304/S2079562922030435

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках совершенствования экспериментов на ускорителе ТИПр планируется создание второго канала облучения образца ионами водорода и гелия. Для фокусировки пучка ионов будет использоваться система квадрупольных магнитных линз (далее—магнитная линза).

Структура магнитной линзы показана на рис. 1. Линза состоит из магнитопроводного сердечника

с четырьмя полюсами и четырех обмоток—по одной на каждый полюс.

Постоянное магнитное поле внутри линзы создается протекающим через ее обмотки постоянным током, необходимая величина которого зависит от массы и скорости ионов в фокусируемом пучке. Для функционирования магнитной линзы необходимо создать регулируемый источник постоянного тока (далее—источник тока).

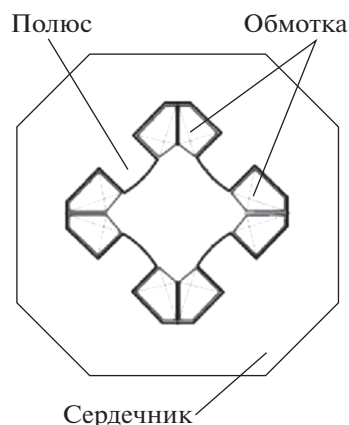
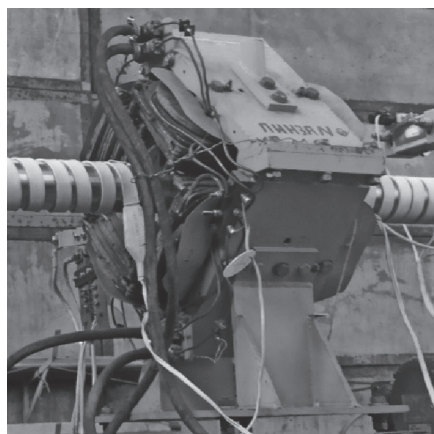


Рис. 1. Структура квадрупольной магнитной линзы.

Таблица 1. Технические характеристики источника тока

Характеристика	Величина
Входное напряжение (переменное), В	200–240
Регулируемый выходной ток (постоянный), А	1.0–5.0
Сопrotивление нагрузки (сопротивление обмоток магнитной линзы), Ом	0.5
Индуктивность нагрузки (индуктивность обмоток магнитной линзы), мГн	4–5
Пульсации выходного тока (не более)*, %	2
Отклонение величины выходного тока от заданной (не более)*, %	2

* Требования предъявляются к указанному диапазону выходного тока.

Требования, предъявляемые к источнику тока отображены в табл. 1.

2. РЕШЕНИЕ

Для выполнения поставленной задачи источник тока предлагается построить на базе компьютерного блока питания, упрощенная структура которого показана на рис. 2.

Есть несколько преимуществ, из-за которых компьютерный блок питания хорошо подходит для построения источника тока на его базе:

1. Рабочее входное напряжение компьютерного блока питания может варьироваться от 200 до 240 В переменного напряжения, что соответствует требованиям из табл. 1.

2. Одна из выходных линий компьютерного блока питания (линия +5 В) подходит для генерации постоянного тока через обмотки магнитной линзы в диапазоне, указанном в табл. 1.

3. Из-за высокой частоты работы импульсного преобразователя (несколько десятков килогерц) современные компьютерные блоки питания обладают высоким КПД (от 70%) и небольшими массогабаритными показателями.

Для построения источника тока на базе компьютерного блока питания предлагается заменить схему стабилизации выходного напряжения на схему стабилизации выходного тока, добавить элементы управления выходным током, включить в выходную цепь цифровые измерители. Упрощенная структурная схема готового устройства изображена на рис. 3.

3. ПОСТРОЕНИЕ ИСТОЧНИКА ТОКА

Для построения источника тока на базе компьютерного блока питания необходимо произвести следующие действия: измерить номинальную частоту работы ШИМ-контроллера блока питания, демонтировать схему стабилизации выходного напряжения и некоторые элементы выходного фильтра, собрать схему стабилизации выходного тока и интегрировать ее в блок питания.

3.1. Определение номинальной частоты импульсного преобразователя

ШИМ-контроллер в компьютерном блоке питания—это микросхема, генерирующая ШИМ-сигнал, скважность которого зависит от выходного сигнала встроенного в микросхему усилителя ошибки. ШИМ-сигнал подается на силовые ключи, коммутирующие первичную обмотку импульсного трансформатора блока питания. Выходное напряжение блока питания зависит от скважности ШИМ-сигнала.

Измеренная частота работы ШИМ-контроллера блока питания составляет 103 кГц. ШИМ-контроллер схемы стабилизации выходного тока должен работать на частоте, близкой к этой величине, чтобы при номинальной нагрузке (см. табл. 1) сердечник силового трансформатора блока питания не входил в насыщение, и динамические потери в силовых ключах, коммутирующих первичную обмотку трансформатора, были минимальны.

Поскольку импульсные преобразователи современных компьютерных блоков питания построены по двухтактной топологии [1], частота их работы

**Рис. 2.** Упрощенная структура компьютерного блока питания.

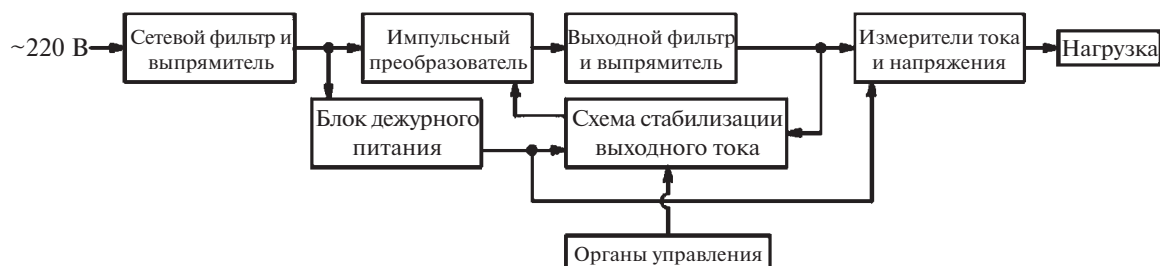


Рис. 3. Упрощенная структурная схема источника тока на базе компьютерного блока питания.

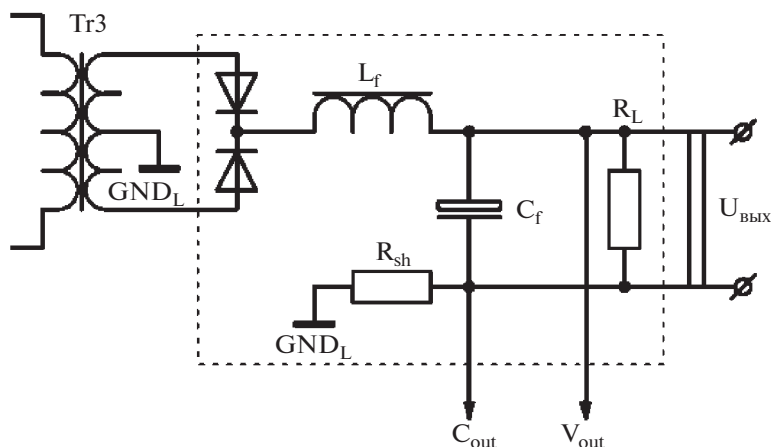


Рис. 4. Схема выходного фильтра и выпрямителя источника тока.

равна половине тактовой частоты ШИМ-контроллера. Этот факт объясняется тем, что в структуре всех двухтактных ШИМ-контроллеров (используемых в компьютерных блоках питания) в выходном каскаде используется D-триггер, делящий тактовую частоту пополам.

3.2. Демонтаж элементов с платы

После определения номинальной частоты работы импульсного преобразователя с платы была демонтирована схема стабилизации выходного напряжения, что освободило пространство для будущей схемы стабилизации выходного тока.

Как было сказано в разделе 2, для создания постоянного тока через обмотки магнитной линзы подходит выходная линия блока питания +5 В. Поэтому необходимо демонтировать из выходного фильтра все элементы, не относящиеся к этой линии. На дросселе групповой стабилизации также необходимо оставить только одну обмотку, относящуюся к линии +5 В, для устранения возможных наводок из внешних источников электромагнитных помех. В общую шину выходного выпрямителя необходимо установить датчик тока—термостабильный токоизмерительный шунт (далее—шунт). Схема выходного выпрямителя и фильтра после переделки показана на рис. 4.

На схеме изображены Tr3—силовой импульсный трансформатор, L_f —фильтрующий дроссель, C_f —сглаживающие электролитические конденсаторы, R_{sh} —шунт сопротивлением 10 мОм, выполненный из манганиновой проволоки, R_L —малоомный резистор для разряда электролитических конденсаторов. Фотография печатной платы компьютерного блока питания после демонтажа схемы стабилизации выходного напряжения и переделки выходного фильтра представлена на рис. 5.

3.3. Схема стабилизации выходного тока

Для построения схемы стабилизации выходного тока выбран ШИМ-контроллер TL494 производства Texas Instruments. Такой выбор объясняется наличием в микросхеме двух усилителей ошибки и стабильного источника опорного напряжения +5 В (отклонение выходного напряжения до 0.2% от номинального при изменении температуры кристалла от 0°C до 70°C).

Микросхема имеет два усилителя ошибки, один из которых был использован для стабилизации выходного напряжения при работе источника тока в режиме холостого хода, другой—для стабилизации выходного тока при подключенных обмотках магнитной линзы.

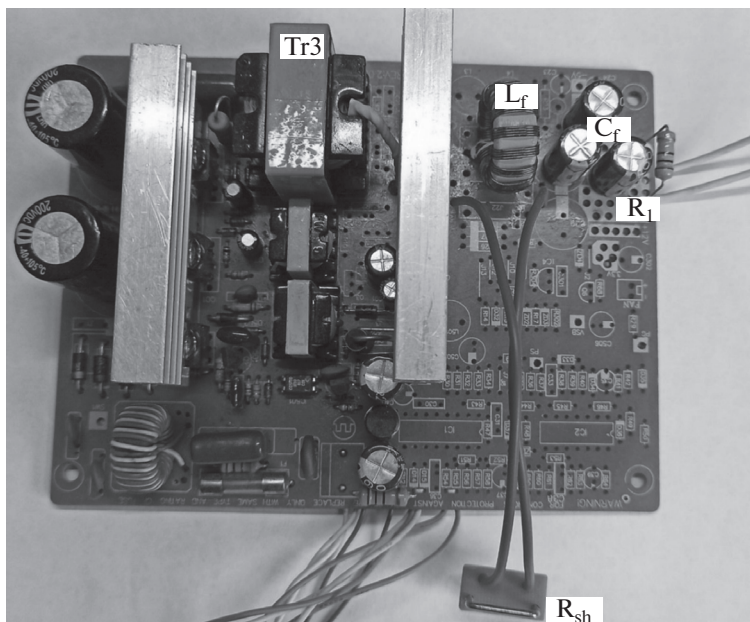


Рис. 5. Фотография платы компьютерного блока питания.

Для усиления падения напряжения на шунте R_{sh} (см. рис. 4) при протекании тока через нагрузку был использован операционный усилитель LM358 производства Texas Instruments, включенный по схеме неинвертирующего усилителя. Предлагаемая схема стабилизации выходного тока изображена на рис. 6.

Здесь конденсатор C2 и резистор R5 задают тактовую частоту ШИМ-контроллера DD1. Номиналы C2 и R5 рассчитываются по формуле 1 [2] так, чтобы тактовая частота работы микросхемы была близка к представленной в разделе 3.1.

$$f_{osc} = \frac{1}{RT \cdot CT}, \quad (1)$$

где f_{osc} — тактовая частота ШИМ-контроллера, Гц; RT — номинал резистора R5 в соответствии со схемой на рис. 6, Ом; CT — номинал конденсатора C2 в соответствии со схемой на рис. 6, Ф.

Конденсатор C3 и резисторы R2 и R3, номиналы которых рассчитываются по формуле (2) [2], обеспечивают плавный старт импульсного преобразователя.

$$C_s = \frac{N}{f_{osc} R_s}; \quad R_c \approx 10 R_s, \quad (2)$$

где C_s — номинал конденсатора C3 в соответствии с рис. 6, мкФ; N — количество тактов, участвующих в плавном старте (выбирается из диапазона 25–100); f_{osc} — тактовая частота ШИМ-контроллера, МГц; R_s — номинал резистора R3 в соответствии со схемой на рис. 6, Ом; R_c — номинал резистора R2 в соответствии со схемой на рис. 6, Ом.

Резисторы R10 и R13 образуют делитель напряжения в цепи отрицательной обратной связи операционного усилителя DD2, включенного по схеме неинвертирующего усилителя (далее—усилитель), предназначенного для усиления падения напряжения на шунте R_{sh} (см. рис. 4). Резистор R10 выбран в исполнении многооборотного подстроечного резистора для возможности точной настройки коэффициента усиления усилителя. Резистор R12 применен для выравнивания входных токов дифференциального каскада в операционном усилителе DD2. Требуемый коэффициент усиления в предложенной на рис. 6 схеме определяется по формуле (3):

$$k \approx \frac{U_{out}}{RI_{max}}, \quad (3)$$

где k — коэффициент усиления; U_{out} — номинальное напряжение опорного источника ШИМ-контроллера, В; R — сопротивление шунта R_{sh} в соответствии с рис. 4, Ом; I_{max} — максимальный ток через нагрузку в соответствии с табл. 1, А.

Коэффициент усиления зависит от номиналов резисторов R10 и R13 и определяется соотношением [3]:

$$k = 1 + \frac{R_a}{R_b}, \quad (4)$$

где R_a — номинал резистора R10 в соответствии с рис. 6, Ом; R_b — номинал резистора R13 в соответствии с рис. 6, Ом.

Потенциометр R9 является элементом управления выходным током. Для увеличения точности и плавности настройки выходного тока по-

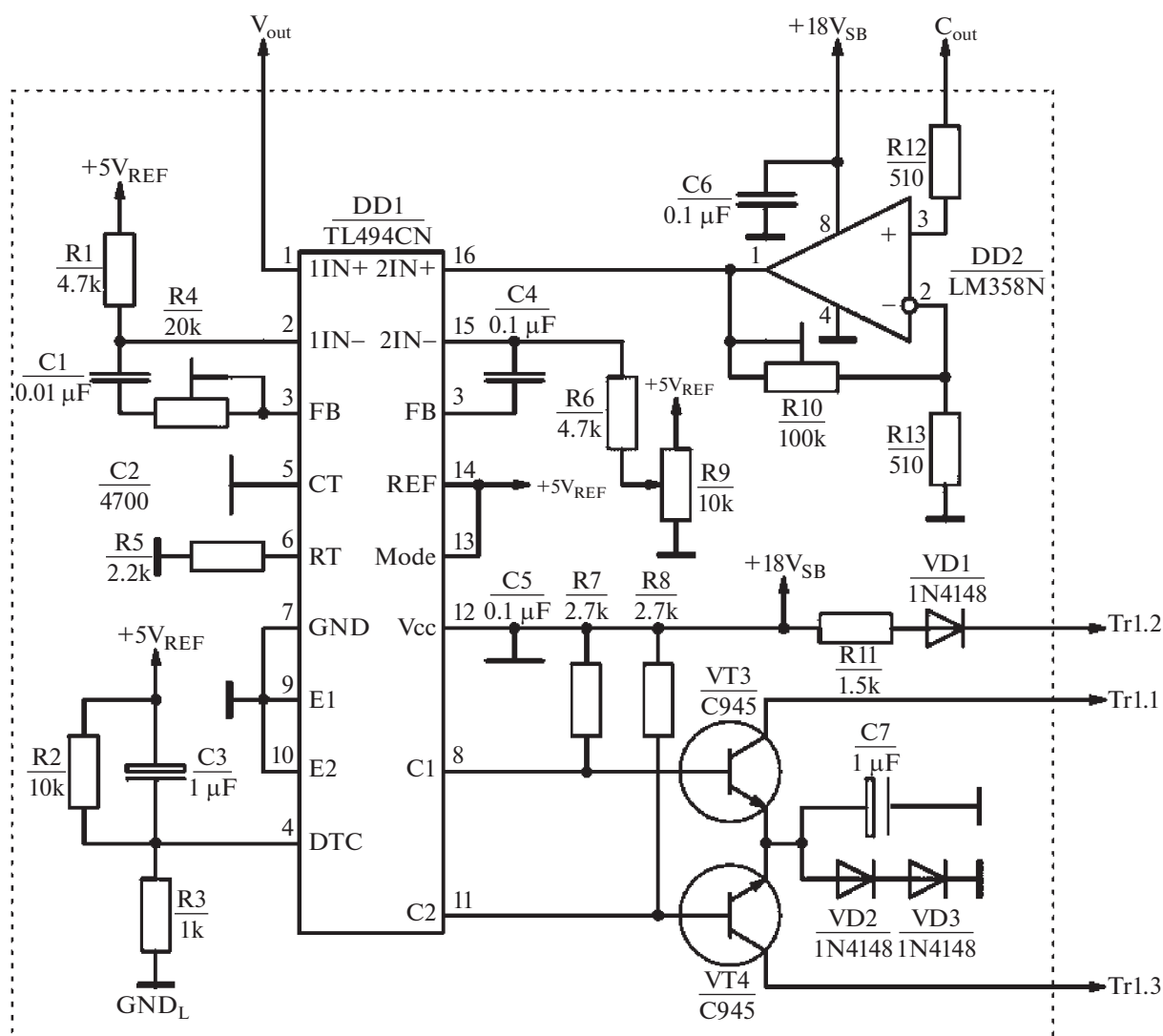


Рис. 6. Схема стабилизации выходного тока.

тенциометр R9 заменен на два потенциометра, соединенных по схеме, изображенной на рис. 7.

Верхний потенциометр отвечает за точную настройку выходного сигнала. Нижний потенциометр – за грубую настройку. Как правило, номинальное сопротивление нижнего потенциометра от 5 до 10 раз больше номинала верхнего потенциометра. Верхний потенциометр рекомендуется применять с номинальным сопротивлением от 500 Ом до 1 кОм.

Выходной каскад, построенный на элементах R7, R8, R11, VD1–VD3, VT3, VT4, C7 (см. рис. 6), отвечает за управление силовыми ключами VT1 и VT2, коммутирующими первичную обмотку силового трансформатора Tr3. Полная электрическая схема источника тока, построенного на базе компьютерного блока питания типа ATX, приведена на рис. 8.

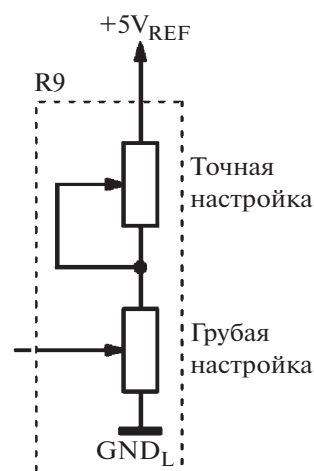


Рис. 7. Схема соединения потенциометров для точной настройки.

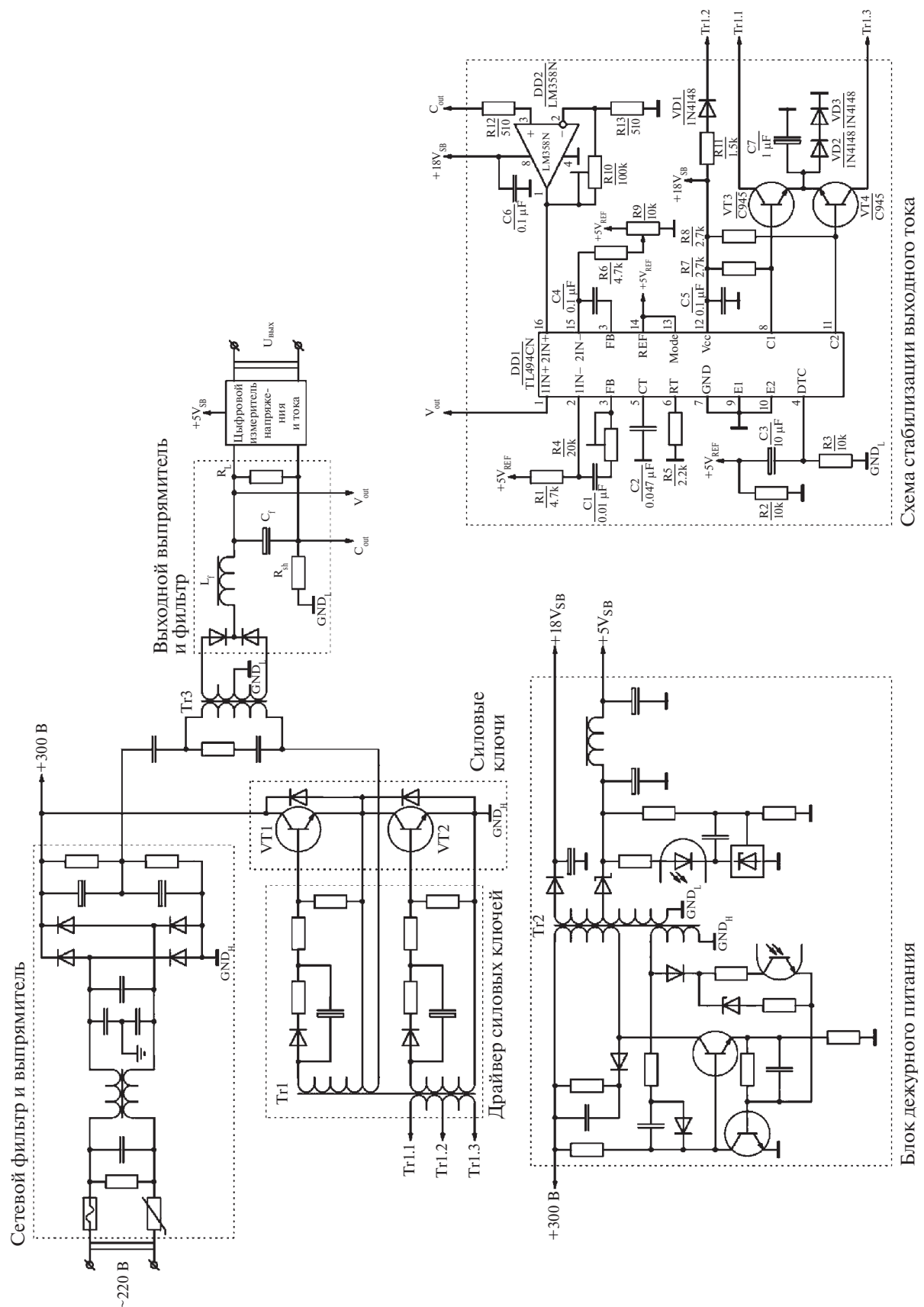


Рис. 8. Электрическая схема источника тока.

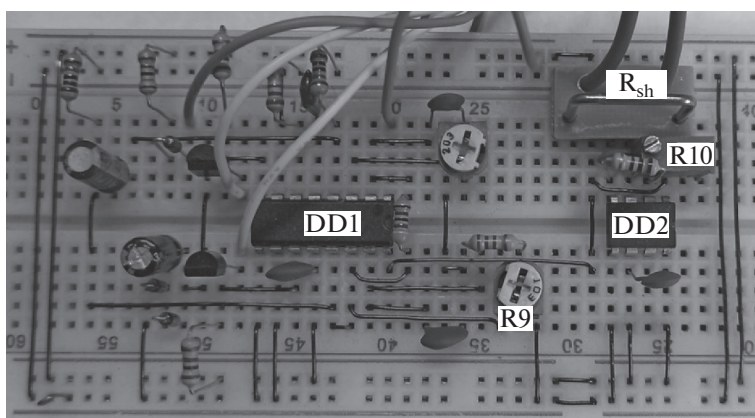


Рис. 9. Схема стабилизации тока, собранная на макетной плате.

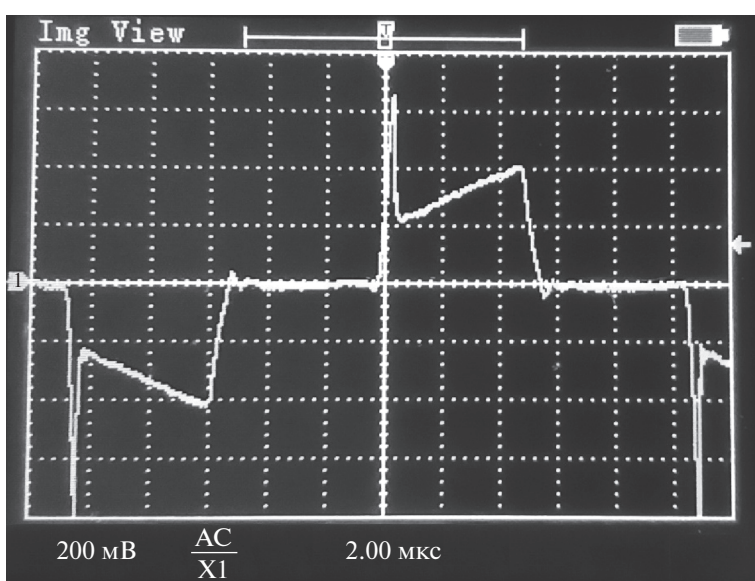


Рис. 10. Осциллограмма тока в первичной обмотке силового трансформатора.

Макет схемы стабилизации тока был собран на беспаячной макетной плате. Фотография макета изображена на рис. 9.

Настройка схемы стабилизации тока производится при включенном устройстве, работающем на исключительно резистивную нагрузку ввиду отсутствия подходящей катушки индуктивности для имитации индуктивности обмоток линзы. Настройка заключается в подборе коэффициента усиления падения напряжения на шунте R_{sh} (см. рис. 4) с помощью подстроечного резистора R10 (см. рис. 6) и в подборе постоянной времени демпфирующих цепей в отрицательной обратной связи усилителей ошибок ШИМ-контроллера DD1 (см. рис. 6).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

При указанных на рис. 6 номиналах C2 и R5 измеренная тактовая частота работы ШИМ-кон-

троллера составляет 97 кГц. Необходимо убедиться в том, что при данной частоте и номинальной нагрузке (см. табл. 1) сердечник силового трансформатора Tr3 (см. рис. 8) не входит в насыщение. Об этом можно судить по осциллограмме тока, протекающего через первичную обмотку трансформатора. Последовательно его первичной обмотке временно был добавлен резистор сопротивлением 1 Ом, с которого была снята осциллограмма, изображенная на рис. 10.

Анализ полученной осциллограммы показал, что при частоте тактового генератора ШИМ-контроллера величиной 97 кГц (вместо бывших 103 кГц (см. раздел 3.1)) сердечник силового импульсного трансформатора не входит в насыщение при номинальной нагрузке (см. табл. 1), о чем свидетельствует линейный рост тока в его первичной обмотке [4].

После настройки схемы стабилизации выходного тока были проведены замеры пульсаций

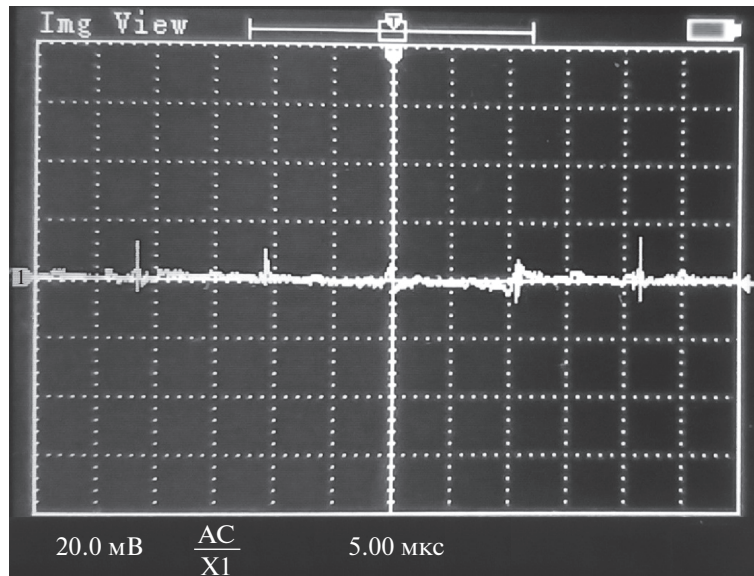


Рис. 11. Осциллограмма выходного напряжения источника тока при выходном токе 1 А.

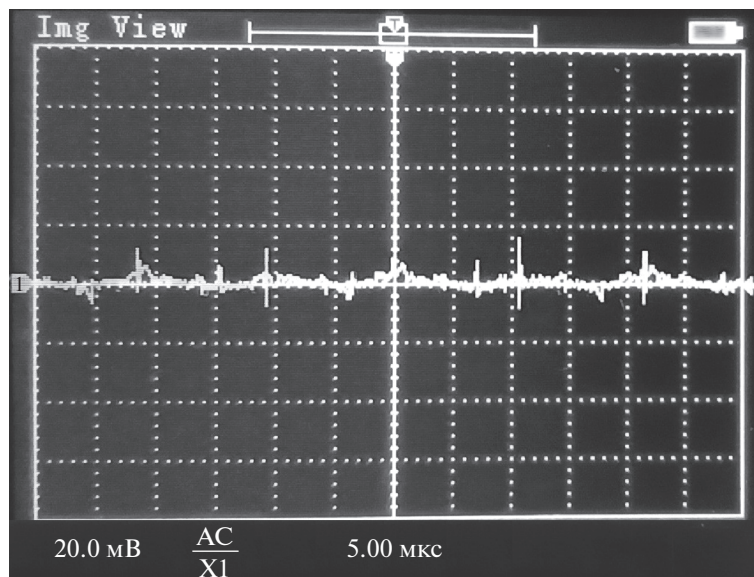


Рис. 12. Осциллограмма выходного напряжения источника тока при выходном токе 5 А.

напряжения и стабильности выходного тока. На рис. 11 и 12 изображены осциллограммы выходного напряжения источника тока при токах нагрузки 1 и 5 А соответственно.

Допустимая амплитуда пульсаций выходного напряжения на нагрузке при токе I через нее определяется выражением:

$$\Delta V_{\max} = IR\sigma_{\max}, \quad (5)$$

где $\Delta V_{\max}$ — допустимая амплитуда пульсаций выходного напряжения, В; I — выходной ток, А; R —

сопротивление нагрузки, Ом; $\sigma_{\max}$ — допустимое отклонение (см. табл. 1).

Таким образом, величины допустимых амплитуд пульсаций выходного напряжения на нагрузке при токах 1 и 5 А через нее:

$$\begin{cases} \Delta V_{\max 1} = 1 \text{ А} \cdot 0.5 \text{ Ом} \cdot 0.02 = 0.01 \text{ В} = 10 \text{ мВ}, \\ \Delta V_{\max 5} = 5 \text{ А} \cdot 0.5 \text{ Ом} \cdot 0.02 = 0.05 \text{ В} = 50 \text{ мВ}, \end{cases} \quad (6)$$

где $\Delta V_{\max 1}$ — допустимая амплитуда пульсаций выходного напряжения при выходном токе 1 А, В;

$\Delta V_{\max 5}$ — допустимая амплитуда пульсаций выходного напряжения при выходном токе 5 А, В.

Согласно рис. 11 и 12, амплитуда пульсаций выходного напряжения на нагрузке при выходных токах 1 и 5 А через нее не превышает 10 мВ или 0.4%, что удовлетворяет выражению (6) и, следовательно, требованиям из табл. 1. Полученные характеристики пульсаций тока действительны для резистивной нагрузки. Обмотки магнитной линзы являются индуктивно-резистивной нагрузкой, вследствие чего пульсации тока в них будут еще меньше.

Отклонение величины выходного тока от заданной обусловлено температурным отклонением сопротивления шунта R_{sh} (см. рис. 4) и напряжения внутреннего источника опорного напряжения ШИМ-контроллера DD1 (см. рис. 6). Для измерения величины температурного отклонения выходного тока устройство было сначала охлаждено до температуры 4°C, после чего шунт и ШИМ-контроллер в процессе работы источника тока были нагреты до температуры 70°C (максимальная рабочая температура ШИМ-контроллера). Максимальное зафиксированное отклонение тока составило 1.5%, что удовлетворяет заданным условиям (см. табл. 1).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проделанной работы показывают, что компьютерный блок питания пригоден для создания на его основе стабильных регулируемых источников постоянного тока с заданными в табл. 1 параметрами. Создание одного из таких устройств было осуществлено путем замены встроенной схемы стабилизации выходного напряжения на схему стабилизации выходного тока с переделкой выходного фильтра и добавлением термостабильного токоизмерительного шунта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Шевчук В. // Современные блоки питания АТХ и их характеристики. https://ru.gecid.com/power/sovremennyye_bloki_pitaniya_atx_i_ih_harakteristiki/.
2. Texas Instruments. TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>.
3. Ремпен И.С., Егоров Е.Н., Савин А.Н., Пономаренко В.И. Операционные усилители. Часть 2. Учебно-методическое пособие. 2004. Саратов: Изд-во ГосУНЦ “Колледж”.
4. Рогачев А.И., Лещенко В.М., Загребенюк В.А. // Вестник нац. тех. унвер. ХПИ: сб. науч. тр. Темат. вып.: Автоматика и приборостроение. 2010. № 23. 92–97. <http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/21217>.

Adjustable Direct Current Supply Based on Computer Power Supply

R. A. Sanzharov^{1, *}, A. V. Kozlov¹, P. A. Fedin¹, A. V. Ziiatdinova¹, and T. V. Kulevoy¹

¹National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, 123182 Russia

*e-mail: roman.sanzharow@yandex.ru

Received December 27, 2021; revised January 11, 2022; accepted July 28, 2022

Abstract—In modern reactor installations, there is a problem of structural material wear under the influence of neutron flux. At the National Research Centre “Kurchatov Institute”, based on the TIPr accelerator (Heavy-Ion Prototype), work is underway to study the radiation resistance of new materials using accelerated ion beams simulating neutron flux. As part of the improvement of experiments at the accelerator, it is planned to create a second channel for simultaneous irradiation of the sample with both heavy ions and hydrogen and helium ions, which will allow modeling the effects of transmutation of the sample in the area of damage by heavy ions. To focus a beam of hydrogen and helium ions, it is planned to use a system of quadrupole magnetic lenses powered by adjustable direct current sources.

Keywords: direct current supply, computer power supply, tl494, current stabilization, quadrupole lens