

В.И. Иордан, Д.И. Кобелев

Алтайский государственный университет, г. Барнаул,

e-mail: Jordan@phys.asu.ru

**ПРЕЦИЗИОННЫЙ ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫЙ
ИМПУЛЬСНЫЙ СТАБИЛИЗАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА**

V.I. Jordan, D.I. Kobelev

Altai State University, Barnaul

**HIGH-PRECISION SOFTWARE PROGRAMMABLE PULSED
STABILIZATOR OF DIRECT CURRENT**

In article the design and creation of the software programmable stabilizer with a high-precision installation of value of an output direct current is considered. The method of control of the stabilizer current, protected by the patent Russian Federation, is realized by algorithm of adaptation of on-off time ratio of the pulse-width modulation (PWM) of a control signal of the inverter to dynamics of change of load mode at the expense of a digital prediction by means of the microcontroller program of value of output current of the stabilizer on its measured values.

В области создания прецизионной информационно-измерительной аппаратуры, применяемой не только в научных исследованиях, но и в производстве высокотехнологичной электронной техники, разработка и совершенствование уже зарекомендовавших себя стабилизированных источников питания и в настоящее время является актуальной задачей. Например, различные температурные эталоны (модели абсолютно черного тела) используются для калибровки и поверки пирометров, измеряющих температуру нагретых тел [1]. Для питания эталонного источника теплового излучения (например, для эталонной температурной лампы с вольфрамовой лентой - модель ТРУ 1100-2350) необходимо использовать регулируемый стабилизированный источник постоянного тока, который мог бы обеспечить достаточно высокое разрешение и высокую точность установки постоянного тока в цепи нагрузки. Низкий уровень остаточных пульсаций в сумме с шумами, высокое разрешение и высокая точность установки постоянного тока для эталонной температурной лампы в соответствии с ее температурной градуировкой гарантируют высокую точность значения температуры, однородно распределенной по вольфрамовой ленте лампы. Достижение высокого уровня прецизионной точности установки значения постоянного тока с очень малой нестабильностью в цепи нагрузки до сих пор остается традиционно сложной для технического решения задачей.

Для решения указанной задачи авторами используется высокоточный метод (способ) управления импульсным стабилизатором тока [2,3], основанный на адаптации параметра скважности широтно-импульсной

модуляции (ШИМ) сигнала управления инвертором к динамике изменения режима нагрузки. Способ заключается в том, что непосредственно в цепи нагрузки импульсного стабилизатора измеряется текущее значение тока, затем оно оцифровывается и сохраняется в памяти микроконтроллера с последующим вычислением программным способом параметра скажности ШИМ-сигнала по заданному (устанавливаемому) значению и последовательности сохраненных в памяти значений тока. Только после этого формируется ШИМ-сигнал управления инвертором, а затем выпрямляется и сглаживается выходной ток инвертора.

Краткое описание способа управления стабилизатором тока

В определенные тактовые моменты времени измеряется ток, протекающий через нагрузку, затем после его оцифровывания с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) сохраняется в памяти микроконтроллера (МК). В памяти МК всегда хранятся m соответствующих предыдущим тактовым моментам времени значений тока, из которых первое значение, предшествующее остальным значениям, удаляется со сдвигом всей последовательности на одну позицию, а текущее значение тока сохраняется в конце последовательности. Параметр m определяется в соответствии с требуемым качеством стабилизации выходного тока.

Устанавливаемое пользователем прибора значение тока, а также последовательность из m значений тока стабилизатора, хранимых в оперативной памяти МК и включающих в себя текущее измеренное значение, используются для вычисления «прогнозного» значения параметра скажности ШИМ-сигнала управления инвертором с помощью соответствующей программы МК. Прогнозное значение скажности ШИМ-сигнала позволяет с достаточно высокой вероятностью прогнозировать дальнейшее изменение величины выходного тока и тем самым компенсировать это изменение соответствующим изменением скажности ШИМ-сигнала управления инвертором.

Точность стабилизации напрямую зависит от разрядности АЦП, и она оценивается известным выражением $q=1-\varepsilon$, где q – оцениваемая точность стабилизации, $\varepsilon=1/2^n$ – погрешность стабилизации, n – разрядность аналого-цифрового преобразования.

Для обеспечения устойчивой стабилизации и предотвращения «модуляции» выходного тока в цепи нагрузки, связанной с ошибками в квантовании скажности управляющего ШИМ-сигнала, разрядность ШИМ-контроллера выбирается исходя из условия превышения его разрядности над разрядностью АЦП, что не может быть обеспечено стандартными модулями ШИМ-контроллеров, входящих в состав МК. Поэтому в данном случае более эффективной реализацией цифрового

ШИМ-контроллера может быть применение программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). В программной конфигурации ПЛИС необходимы следующие функциональные блоки: счетчик импульсов, генератор прямоугольного напряжения и регистр скважности. Работа ШИМ-контроллера заключается в том, что счетчик считает импульсы от генератора прямоугольного напряжения. Схема формирования выходного сигнала формирует фронт управляющего сигнала при совпадении значения счетчика со значением в регистре скважности, а при переполнении счетчика происходит сброс и генерация спада управляющего сигнала.

Модернизация и принцип работы устройства

На рис. 1 представлена структурная схема устройства, реализующего высокоточный способ регулирования (управления) выходного тока стабилизатора [2].

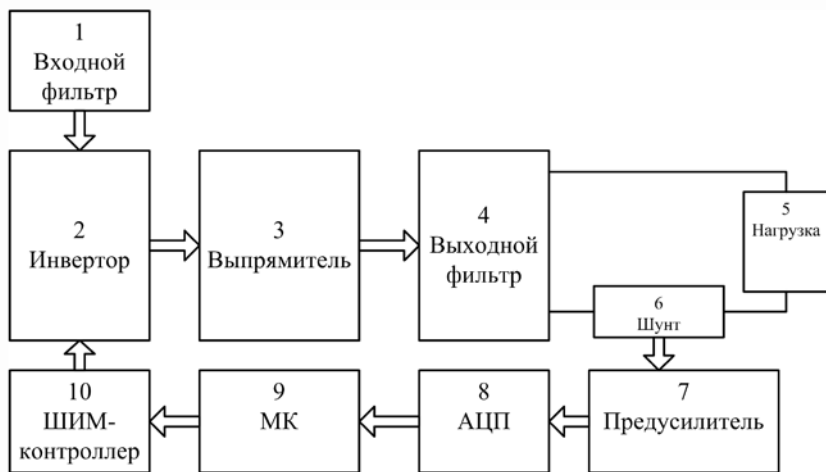


Рис. 1. Структурная схема импульсного стабилизатора постоянного тока с высокоточным способом управления током на основе предсказания скважности ШИМ-сигнала управления инвертором

Входной фильтр 1 сглаживает пульсации от нестабилизированного источника напряжения (например, от низкочастотного трансформатора с выпрямителем, подключенного к сети переменного тока напряжением 220 В частотой 50 Гц). Инвертор 2 пропорционально скважности управляющего сигнала формирует на выходе импульсный ток, который поступает непосредственно на выпрямитель 3. Выпрямитель 3 преобразует импульсный ток с выхода инвертора в постоянный, который затем сглаживается с помощью выходного фильтра 4 и подается в

нагрузку 5, в цепи которой последовательно включен прецизионный низкоомный шунт 6. Напряжение с шунта 6, пропорциональное току согласно закону Ома, поступает на АЦП 8 через предусилитель 7, который преобразует напряжение, снимаемое с шунта 6, до необходимого уровня в соответствии с динамическим диапазоном входного напряжения на АЦП 8. Дискретное значение выходного напряжения АЦП 8 передается в МК 9, где пересчитывается в цифровое значение тока. Кроме того, МК 9 программным способом, использующим алгоритмы «предсказания», определяет численную оценку значения скважности ШИМ-сигнала управления инвертором, передает ее в цифровой ШИМ-контроллер 10, который формирует сигнал прямоугольной формы для управления инвертором 1.

В стабилизаторе, ранее реализованном для подтверждения и апробации высокоточного способа управления током [2-4], были применены: микроконтроллер ATmega88-20AU (8 разрядов, ядро AVR, 20 МГц, объем ROM-памяти 8 кБайт, объем RAM-памяти 1 кБайт, внутренний АЦП, 23 канала), АЦП AD7899ARZ-3 с разрядностью 14 бит и ШИМ-контроллер на основе ПЛИС EPM3032AT44 с разрядностью 16 бит. Инвертор и выпрямитель были реализованы по стандартной понижающей схеме на основе двух полевых транзисторов, катушки индуктивности и конденсатора. Параметры шунта: сопротивление 0,001 Ом, относительная погрешность не более 0,01% и мощность 3 Вт.

С целью улучшения технических характеристик стабилизатора авторами настоящей статьи было принято решение о модернизации устройства. В новом варианте устройства используется низкоомный шунт с улучшенными параметрами: сопротивление 0,001 Ом, относительная погрешность не более 0,001% и мощность 5 Вт. Т.е. при номинальном значении выходного постоянного тока в 25 А на шунте падает напряжение 0,025 В, которое должно соответствовать для АЦП его максимальному уровню 5 В. Следовательно, коэффициент усиления предусилителя 7, выполненного по схеме неинвертирующего усилителя на операционном усилителе, с необходимостью установлен равным 2000. Для подавления шумов перед подключением к АЦП подключена цепь RC-фильтра. Для увеличения разрешения и точности установки значений выходного постоянного тока в цепи нагрузки вместо АЦП AD7899ARZ-3 с разрядностью 14 бит было использовано АЦП AD73360 с разрядностью 16 бит с дифференциальными входами и со встроенным источником опорного напряжения (передача данных осуществляется по интерфейсу SPI). В качестве управляющего устройства используется 32-разрядный микроконтроллер stm32f103rbt6 (максимальная частота 72 МГц, 128 кБайт Flash-памяти). Микроконтроллер сопрягается с АЦП для обмена данными

по интерфейсу SPI (рис. 2). При этом АЦП передает данные в режиме master, а микроконтроллер в режиме slave.

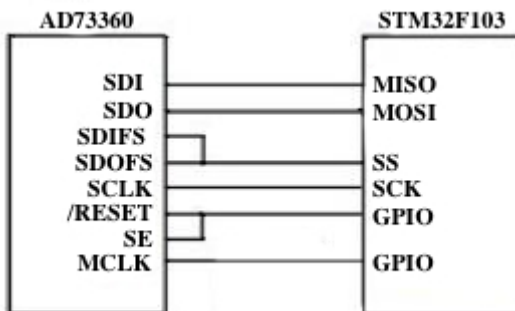


Рис. 2. Схема сопряжения АЦП AD73360 с микроконтроллером stm32f103rht6

Микроконтроллер выдает сигнал частотой 16 МГц для внешнего тактирования АЦП (вход MCLK), а АЦП возвращает сигнал тактирования для передачи данных микроконтроллеру (вход SCK). Передача управляющих команд от микроконтроллера в АЦП реализуется следующим образом: микроконтроллер устанавливает AD-RST и SE в уровень логической единицы, в ответ АЦП отправляет строб-импульс на выходе SDOFS (INT). Тогда в микроконтроллере срабатывает прерывание по заднему фронту строба и внутри обработчика прерывания происходит загрузка требуемых данных и команд в регистр SPI, после чего данные поступают в АЦП. Для обеспечения высокой стабильности и разрешающей способности установки значения тока используется современная быстродействующая ПЛИС EPM240T100C5N с внешним кварцевым резонатором 100 МГц, на которой реализован 16-разрядный ШИМ-контроллер.

Кроме того, достоинством микроконтроллера stm32f103rht6 является наличие у него большого количества выводов и встроенной периферии, что позволило подключить ЖК-дисплей для отображения информации и ряд элементов управления (кнопки для установки заданного значения тока, для включения/отключения питания и т.д.), а также имеется возможность обмена данными с персональным компьютером по USB.

Программа для микроконтроллера написана в среде Keil uVision 4, используемой при разработке программного обеспечения (ПО) для микроконтроллеров. Программу можно разделить на несколько функциональных узлов:

- инициализация периферии и состояний выводов микроконтроллера;
- обработчики событий для элементов управления;
- прием/передача данных с АЦП;

- передача данных на ПЛИС;
- прием/передача данных по USB;
- вывод данных на ЖК-дисплей.

Тестирование прецизионного стабилизатора тока

Изготовленный импульсный стабилизатор тока был применен для питания «температурной эталонной» лампы накаливания ТРУ 1100-2350 в качестве модели «абсолютно черного тела» и тем самым прошел тестирование в отношении заявленной в паспорте лампы точности стабилизации тока питания лампы (табл. 1).

Таблица 1
Изменение выходного тока импульсного стабилизатора

№	Ток, А	№	Ток, А
1	24,951	26	24,950
2	24,951	27	24,948
3	24,951	28	24,949
4	24,947	29	24,950
5	24,948	30	24,949
6	24,950	31	24,949
7	24,949	32	24,950
8	24,948	33	24,949
9	24,947	34	24,950
10	24,947	35	24,951
11	24,949	36	24,951
12	24,948	37	24,950
13	24,948	38	24,950
14	24,950	39	24,949
15	24,948	40	24,948
16	24,951	41	24,949
17	24,950	42	24,950
18	24,949	43	24,951
19	24,948	44	24,949
20	24,950	45	24,950
21	24,951	46	24,949
22	24,950	47	24,949
23	24,950	48	24,950
24	24,951	49	24,949
25	24,951	50	24,951

Верхний предел питания лампы накаливания, для которого гарантируется градуировка ее температурной характеристики, ограничивается током порядка 25 А.

Для гарантирования минимальной погрешности на температуру эталона, указанной в паспорте лампы, требуется точность стабилизации не менее 99,95% (нестабильность не более 0,05%).

Для тестирования устройства были выбраны значения в начале, в середине и в конце диапазона выходного тока: 1,0199 А, 15,889 А, 24,949 А. В табл. 1 приведены результаты тестовых испытаний, в которых контролировалось заданное значение постоянного тока в нагрузке стабилизатора, соответствующее 24,949 А.

Изменения выходного тока стабилизатора в установившихся режимах для указанных значений тока оказались, соответственно, равны $1,0199 \pm 0,0001$ А; $15,889 \pm 0,001$ А и $24,949 \pm 0,002$ А. Промежуток времени между соседними отсчетами измеренного выходного тока был равен 0,1 с (табл. 1). Время выхода на номинальный режим работы занимает 0,7 с.

Изготовленный импульсный стабилизатор тока, подтвердивший в испытаниях предъявляемые к нему требования по точности стабилизации выходного тока, совместно с «температурной эталонной» лампой накаливания ТРУ 1100-2350 в качестве модели «абсолютно черного тела», были использованы авторами для калибровки чувствительности ячеек ПЗС-фотоприемника, используемого в автоматизированном комплексе по спектрофотометрии [1]. Откалиброванный ПЗС-фотоприемник, в свою очередь, применялся для регистрации интегрального теплового спектра частиц металлического порошка, используемого в плазменной технологии напыления упрочняющих покрытий на изделия [1]. Метод «обращения» интегрального теплового спектра частиц [1], который позволяет определять распределение частиц по температурам в различных поперечных сечениях технологической струи, в том числе в непосредственной близости от напыляемой поверхности, можно использовать для контроля и управления режимными параметрами процесса напыления покрытий.

Таким образом, прецизионный программно-управляемый стабилизатор постоянного тока, способ стабилизации которого основан на адаптации параметра скважности ШИМ-сигнала управления инвертором к динамике изменения режимов нагрузки за счет цифрового предсказания значения выходного тока стабилизатора по его измеренным значениям, позволяет обеспечить высокую точность установки и стабилизации выходного тока стабилизатора не менее 99,99% в широком диапазоне значений от 1 до 25 А, другими словами, нестабильность выходного постоянного тока в цепи нагрузки оказывается не более 0,01%.

Патент РФ № 2420853 на изобретение «Высокоточный способ управления импульсным стабилизатором тока» на 41-й Международной выставке изобретений «INVENTIONS GENEVA» (10 - 14 апреля 2013 г., г. Женева, Швейцария) отмечен Дипломом за 1-е место и золотой медалью, а на 11-й Международной выставке изобретений и инноваций «ARCA 2013» (5 октября 2013 г., г. Загреб, Хорватия) отмечен Дипломом за 2-е место и серебряной медалью.

Библиографический список

1. Иордан В.И. Редукция температурного распределения частиц гетерогенных потоков методом «обращения» их интегрального теплового спектра / В.И. Иордан, А.А. Соловьев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2010. № 2(98). С. 85-95.

2. Патент РФ № 2420853 на изобретение по заявке № 2010119809. Высокоточный способ управления импульсным стабилизатором тока / А.А. Соловьев, В.И. Иордан. Приоритет от 17.05.2010, опубл. 10.06.2011. Б.И. № 16.

3. Соловьев А.А. Высокоточный метод ШИМ-регулирования выходного тока импульсного стабилизатора посредством цифрового предсказателя с обеспечением адаптации к динамике изменения нагрузки / А.А. Соловьев, В.И. Иордан, А.И. Постоев // Ползуновский вестник. 2011. № 3/1. С. 55-58.

4. Иордан В.И. Изобретение «Высокоточный способ управления импульсным стабилизатором тока» / В.И. Иордан, А.А. Соловьев // Восьмой Саратовский салон изобретений, инноваций и инвестиций. Саратов: Буква, 2013. С. 177-179.

УДК 621.318.2

А.А. Захаров, И.Н. Афонин, А.Ю. Кивокорцев, Р.В. Спиридонов

Саратовский государственный технический университет

имени Гагарина Ю. А., e-mail: b1984h@yandex.ru

О РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ КРИВЫХ РАЗМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТОТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ МЕТАЛЛАМИ

A.A. Zaharov, I. N. Afonin, A.Yu. Kivorurzev, R.V. Spiridonov

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

TO WORKING RANGES OF DEMAGNETISING CURVES FOR RARE-EARTH MAGNETS

Possibilities to expand of working ranges for demagnetizing curves of rare-earth magnets are described. To use of permanent magnets for magnetic focusing systems are available. Methods of calculation of such systems are available.

978-1-4799-3438-6/14/\$31.00 ©2014 IEEE 274