

## МИКРОПРОЦЕССОРНАЯ СИСТЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ ВЫХОДНОГО ПОСТОЯННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО ПРОГРАММИРУЕМОГО ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

*Иордан Владимир Иванович, к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры «вычислительной техники и электроники» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Россия, 656049, Барнаул, пр-т Ленина, 61, e-mail: [jordan@phys.asu.ru](mailto:jordan@phys.asu.ru)*

*Кобелев Денис Игоревич, аспирант кафедры «вычислительной техники и электроники» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет», Россия, 656049, Барнаул, пр-т Ленина, 61, e-mail: [armored@inbox.ru](mailto:armored@inbox.ru)*

Цель статьи – разработка алгоритма ПИД-регулирования, программно реализованного в микроконтроллере прецизионного программируемого источника питания и используемого для стабилизации его выходного постоянного тока и напряжения. Рассмотрена структурная схема источника питания на уровне функциональных блоков, включая устройство управления, в состав которого входят микроконтроллер и ШИМ-контроллер. Изложен высокоточный способ управления выходным постоянным током в цепи нагрузки источника питания и принцип работы всего прибора. Для обеспечения устойчивости режима стабилизации выходных параметров источника питания за счет плавного выведения параметров на стабилизированный уровень в программе микроконтроллера реализован алгоритм ПИД-регулирования, для которого на этапе моделирования и экспериментов были получены приемлемые значения его «определяющих» коэффициентов.

**Ключевые слова:** источник питания, постоянный ток и напряжение, цепь нагрузки, микроконтроллер, ШИМ-контроллер, прецизионная точность, алгоритм ПИД-регулирования, фильтр, инвертор, АЦП.

## MICROPROCESSOR SYSTEM USING THE PID CONTROL ALGORITHM OF OUTPUT DC CURRENT AND VOLTAGE OF A PRECISION PROGRAMMABLE POWER SUPPLY

*Jordan Vladimir Iv., PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Altai State University, Russia, 656049, Barnaul, Lenin avenu, 61, e-mail: [Jordan@phys.asu.ru](mailto:Jordan@phys.asu.ru)*

*Kobelev Denis Ig., postgraduate student, Altai State University, Russia, 656049, Barnaul, Lenin avenu, 61, e-mail: [armored@inbox.ru](mailto:armored@inbox.ru)*

The purpose of the article is the development of an algorithm for PID control programmed in a microcontroller of a precision programmable power supply and used to stabilize its output DC current and voltage. The block diagram of the power supply at the level of functional blocks is considered, including a control device, which includes a microcontroller and a PWM controller. A high-precision method for controlling the output DC current in the load circuit of the power supply and the principle of operation of the entire device are set forth. To ensure the stability of the stabilization mode of the output parameters of the power supply at the expense of the smooth derivation of the parameters to the stabilized level, the PID control algorithm is realized in the

program of the microcontroller, for which the acceptable values of its "influential" coefficients were obtained at the stage of modeling and experiments.

**Keywords:** power supply, DC current and voltage, load circuit, microcontroller, PWM controller, precision accuracy, PID control algorithm, filter, inverter, ADC.

Разработка и совершенствование уже зарекомендовавших себя стабилизированных источников питания в области создания прецизионной информационно-измерительной аппаратуры, применяемой не только в научных исследованиях, но и в производстве высокотехнологичной электронной техники, и в настоящее время является актуальной и традиционно сложной для технического решения задач.

Для решения указанной задачи используется высокоточный метод (способ) управления импульсным стабилизатором тока [1,2], основанный на адаптации параметра скважности широтно-импульсной модуляции (ШИМ) сигнала управления инвертором к динамике изменения режима нагрузки. На основе высокоточного метода (способа) управления импульсным стабилизатором тока [1,2] был разработан и прошел испытания прецизионный программируемый источник питания постоянного тока, работающий в режимах стабилизации выходного постоянного тока и напряжения [2]. Была осуществлена модернизация прибора [3,4] с целью улучшения его технических характеристик.

Краткое описание способа и системы управления режимом стабилизации тока. Непосредственно в цепи нагрузки источника питания постоянного тока (рис. 1) измеряется текущее значение тока, затем оно оцифровывается и сохраняется в памяти устройства управления (УУ) с последующим вычислением программным способом в УУ параметра скважности ШИМ-сигнала по заданному (устанавливаемому) значению и последовательности сохраненных в памяти УУ значений тока. Только после этого формируется ШИМ-сигнал управления инвертором, а затем выпрямляется и сглаживается выходной ток инвертора (рис. 1).

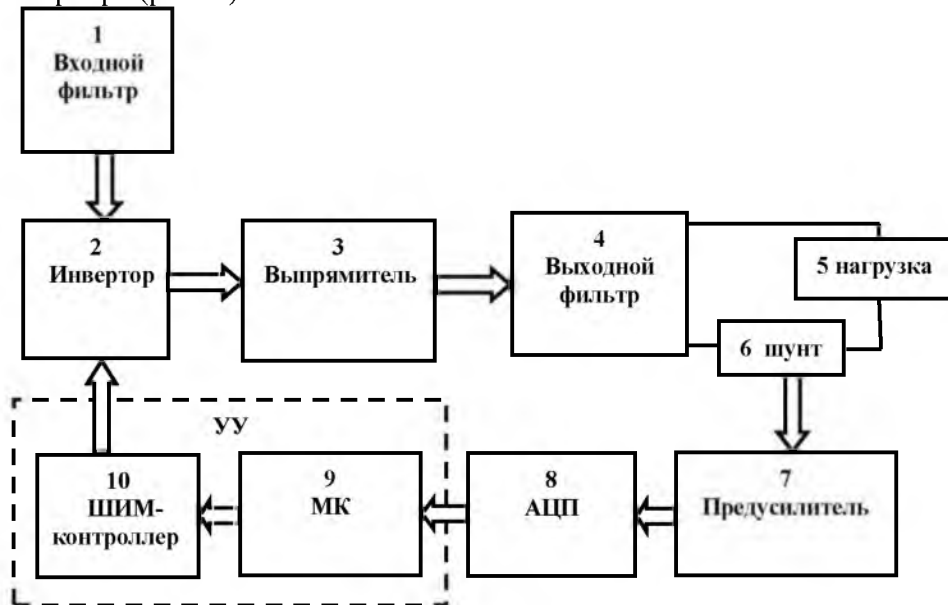


Рис. 1. Структурная схема импульсного стабилизатора постоянного тока с высокоточным способом управления током на основе предсказания скважности ШИМ-сигнала управления инвертором

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 микроконтроллер (МК) 9 устройства управления (УУ), где пересчитывается в цифровое значение тока. Кроме того, МК программным способом, использующим алгоритм «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.

Прогнозное значение скважности ШИМ-сигнала позволяет с высокой вероятностью прогнозировать изменение величины выходного тока и тем самым компенсировать это изменение соответствующим изменением скважности ШИМ-сигнала управления инвертором. Точность стабилизации  $q$  напрямую зависит от разрядности АЦП, и она оценивается известным выражением  $q=1-\varepsilon$ , где  $\varepsilon=1/2^n$  – погрешность стабилизации;  $n$  – разрядность аналого-цифрового преобразования. Для обеспечения устойчивой стабилизации и предотвращения «модуляции» выходного тока в цепи нагрузки, связанной с ошибками в квантовании скважности 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 микроконтроллера (МК). Поэтому 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.

**Реализация алгоритма ПИД-регулирования.** Регулирование тока в цепи нагрузки должно выполняться плавно, так как при внезапно появившейся помехе большой амплитуды в цепи нагрузки пересчитанное по измеренному току значение скважности ШИМ-сигнала может оказаться некорректным, что приведет к нарушению устойчивости режима стабилизации выходного тока (элементы схемы управления током могут выйти из строя). Для корректного предсказания и плавного выведения на заданный уровень скважности ШИМ-сигнала управления в данной работе применяется алгоритм ПИД-регулирования (рис. 2), программно реализованный в микроконтроллере 9. На рисунке 2 представлена схема ПИД-регулятора, на котором:  $U_0$  – установочное значение (уставка) для выходного напряжения на шунте 6 (шунт показан на рис. 1);  $e(t)$  – рассогласование (разница между уставкой  $U_0$  и измеренным значением  $y(t)$  напряжения на шунте 6);  $u(t)$  – выходное напряжение ПИД-регулятора и  $u(t)=P+I+D$ , которое плавно приближается к заданному значению  $U_0$ ;  $K_p$  – коэффициент пропорциональной компоненты;  $K_i$  – коэффициент интегральной компоненты;  $K_d$  – коэффициент дифференциальной компоненты;  $K_s$  – коэффициент для вычисления скважности ШИМ-сигнала управления  $s(t) = K_s u(t)$ , которая с выхода МК поступает на вход ШИМ-контроллера. В состав блока G (рис. 2) входят следующие узлы: ШИМ-контроллер 10, инвертор 2, выпрямитель 3, выходной фильтр 4, нагрузка 5, шунт 6, предусилитель 7, АЦП 8.

За один период работы обработчика прерывания АЦП, соответствующего частоте порядка 800 Гц, микроконтроллер и ШИМ-контроллер успевают произвести перерасчет и установку нового корректирующего значения скважности ШИМ-сигнала.

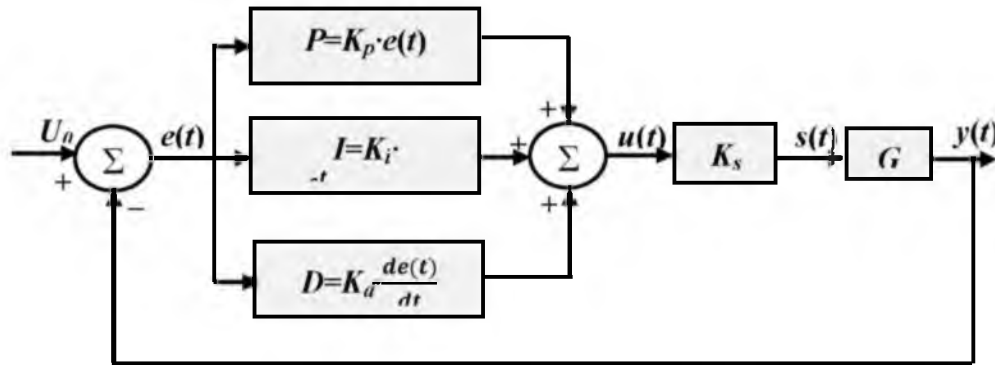


Рис. 2. Структурная схема алгоритма ПИД-регулирования

Ниже приведен алгоритм работы ПИД регулятора.

1.  $dt = ticks - m\_LastTime$  // Фиксируем величину времени, прошедшего с последней корректировки;
2.  $m\_LastTime = ticks$  // Запоминаем новое текущее время;
3.  $et = m\_RefValue - print\_val$  // Рассчитываем рассогласование  $e(t)$  между уставкой  $m\_RefValue = U_0$  и измеренным значением  $print\_val = y(t)$ ;
4.  $sum = m\_LastSumm + K_i * dt * et$  // накапливаем интегральную составляющую  $I$ ;
5.  $diff = K_d * (et - m\_LastEt) / dt$  // дифференциальная составляющая  $D$ ;
6.  $m\_Output = K_p * et + sum + diff$  // новое выходное значение  $u(t)$ ;
7.  $m\_LastOutput = m\_Output$  // Запоминаем выходное значение  $u(t)$ ;
8.  $m\_LastSumm = sum$ ; // Запоминаем интегральную составляющую  $I$ ;
9.  $m\_LastEt = et$ ; // запоминаем значение рассогласования  $e(t)$ ;
10.  $pwm = m\_Output * 8096$  // Пересчитываем новое значение скважности  $s(t) = K_s u(t)$ , где  $K_s = 8096$ ;
11.  $set\_duty(pwm)$ ; // устанавливаем скважность  $s(t)$  на входе инвертора;
12. Переход на п. 1, пока включена нагрузка (цикл продолжается до тех пор, пока идет режим «работы»).

Управляющая программа реализована на языке Си в среде разработки Keil uVision. На этапе моделирования, используя специально разработанную программу на языке С# в среде разработки Visual Studio 2012, были получены значения коэффициентов ПИД-регулятора ( $K_p$ ,  $K_i$  и  $K_d$ ), а оптимальное значение коэффициента  $K_d$  оказалось равным 0.005.

При включении прибора в начальный промежуток времени происходят резкие колебания выходного напряжения. Поэтому в начальный промежуток времени для обеспечения плавности и уменьшения резких бросков выходного напряжения рекомендуется устанавливать следующие значения (рис. 3а,б):  $K_p = 0.03$ ,  $K_i = 0.0001$ . Затем после десятка (или двух десятков) циклов измерений для того, чтобы существенно ускорить выведение выходного напряжения на заданный уровень уставки  $U_0$ , коэффициент  $K_i$  можно увеличить, например, до 0.001 (рис. 3б).

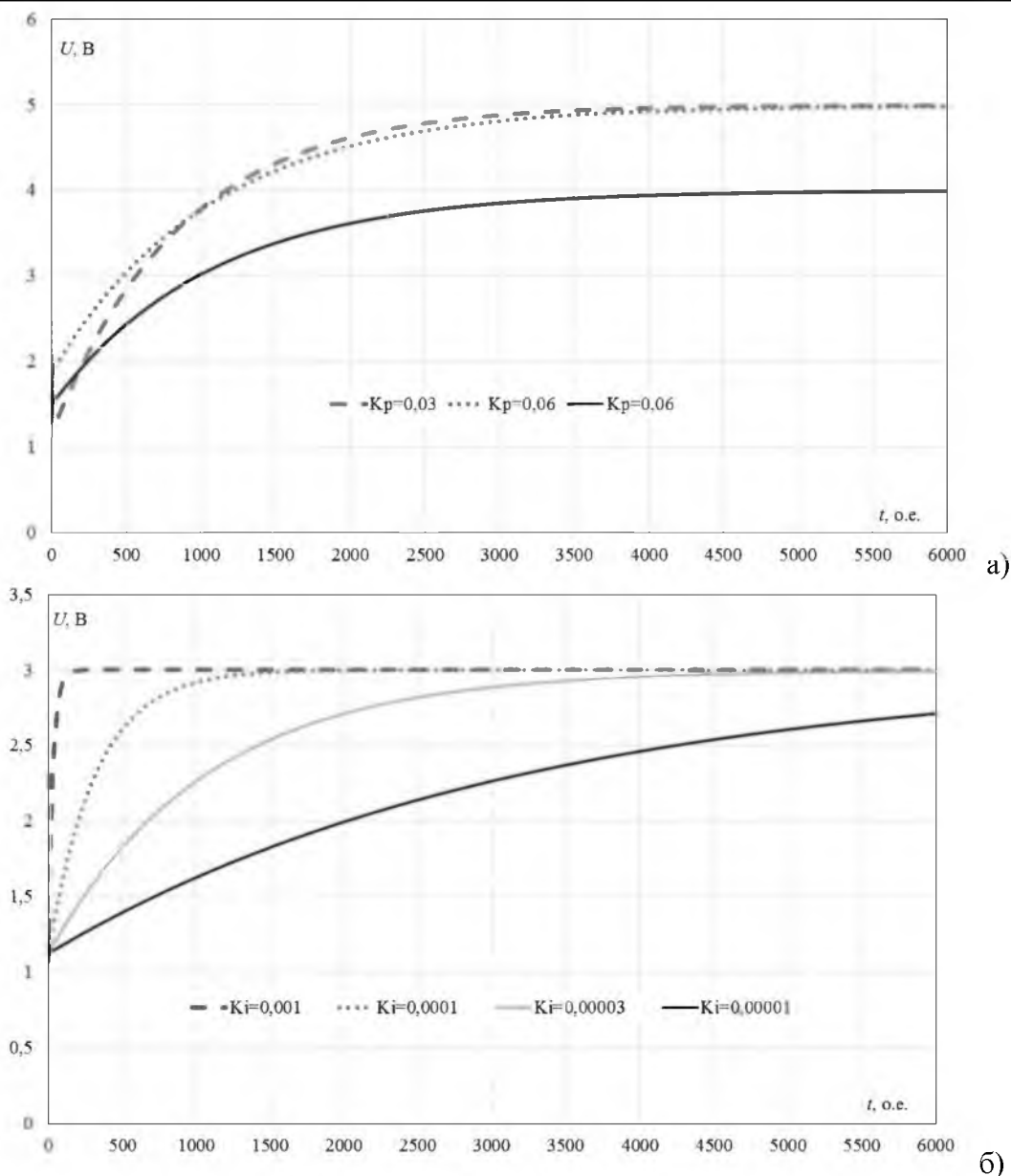


Рис. 3. Зависимости выходного напряжения от времени при различных значениях коэффициентов  $K_p$  и  $K_i$ : а –  $K_i = 0,00003$ ; б –  $K_p = 0,03$

В действующем варианте источника питания постоянного тока используется 32-разрядный микроконтроллер stm32f407 (максимальная частота 168 МГц, 1024 Кбайт Flash-памяти). Микроконтроллер сопрягается для обмена данными по интерфейсу SPI с АЦП AD73360 (разрядностью 16 бит с дифференциальными входами и со встроенным источником опорного напряжения). При этом АЦП передает данные в режиме master, а микроконтроллер в режиме slave. Кроме того, используется ПЛИС EPM240T100C5N, на которой реализован ШИМ-контроллер 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 0,001% и мощность 5 Вт.

**Модернизация источника питания постоянного тока.** Для достижения более высокого разрешения по переустановке значения тока, например в 0,001 А, необходимо поднять разрядность ШИМ-контроллера до 15 битов (максимальная возможность установки разрядности - 16 битов). В связи с тем, что большого количества логических ячеек ПЛИС не требуется, а требуется лишь быстродействие, была выбрана ПЛИС XC6SLX9-TQG144,

которая тактируется от внешнего генератора, а с помощью внутри встроенного генератора (PLL) можно произвести умножение частот до требуемых – около 1 ГГц [3,4]. Таким образом, на выбранной ПЛИС XC6SLX9-TQG144 реализуется 16-разрядный ШИМ-контроллер с частотой ШИМ-сигнала управления током порядка 17 кГц и в самой ПЛИС можно реализовать встроенное в нее программное обеспечение (ПО), аналогичное ПО микроконтроллера. Кроме того, в качестве АЦП можно использовать, например, микросхему AD7765, которая имеет 24 разряда, высокую скорость преобразования и дифференциальный вход, что очень важно для повышения точности измерения тока (напряжения) в цепи нагрузки [3,4].

### **Список литературы**

1. Соловьев А.А., Иордан В.И. Высокоточный способ управления импульсным стабилизатором тока // Патент РФ № 2420853 на изобретение по заявке № 2010119809. - опубл. 10.06.11 в Бюл.И. № 16. – 8 с.
2. Иордан В.И., Кобелев Д.И. Прецизионный программно-управляемый импульсный стабилизатор постоянного тока // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 11-ой Международной научно-технической конференции АПЭП-2014 (Саратов, 25-26 сентября 2014 г.): в 2 т. – Т.2. - Саратов: Буква, 2014. – 479 с. - С. 267-274.
3. Кобелев Д.И., Иордан В.И. Модернизация прецизионного программируемого источника питания постоянного тока на основе быстродействующей ПЛИС // Многоядерные процессоры, параллельное программирование, ПЛИС, системы обработки сигналов [Текст]: сборник научных статей VI Международной научно-практической конференции / отв. ред. В.И. Иордан (Барнаул, 11-12 марта 2016 г.). – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2016. – 300 с. - С. 27-31.
4. Иордан В.И., Кобелев Д.И., Матющенко Ю.Я. Высокоточный способ и система управления режимом стабилизации постоянного тока прецизионного программируемого источника питания // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2016: сборник научных статей Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов / отв. ред. В.И. Иордан (Севастополь, 19-21 мая 2016 г.). – Севастополь: Изд-во Алт. ун-та, 2016. – 300 с. - С. 27-31.