

# Усилитель мощности с контуром тока

July 2016

## 1 Постановка задачи

Есть двигатель постоянного тока. Задача - разработать, собрать и протестировать устройство, позволяющее реализовать контур тока применительно к этому двигателю. Желаемое время переходного процесса на застопоренном двигателе (без противо-ЭДС) – не более 10мс. Интерфес связи с внешним управляющим контроллером – SPI.

Параметры двигателя: максимальное напряжение  $U_{max}$  24В, рабочий ток до 5А.

## 2 Железо

### 2.1 Структура системы

В состав системы будут входить:

1. Силовая микросхема ключей, принимающая входной PWM сигнал и усиливающая его.
2. Датчик тока.
3. Управляющий микроконтроллер, реализующий обратную связь и закон управления.

В качестве силового драйвера выбрана широкодоступная плата (\$18) от Pololu на базе микросхемы Freescale MC33926, максимальная частота ШИМ 20кГц, 5А в пике, коммутируемое напряжение от 5 до 28 вольт.

Этот чип был взят за его возможность измерения абсолютной величины протекающего тока, которая в итоге не была использована. Таким образом, можно немного сэкономить, взяв более дешёвый драйвер со схожими характеристиками.

В качестве датчика тока выбран датчик Холла Allegro ACS714 (\$3), выдающий аналоговый сигнал с центром в 2.5В и 185мВ/А, типичная ошибка 1.5%. На датчик была добавлена RC-цепочка в качестве фильтра низких частот с частотой среза 16кГц.

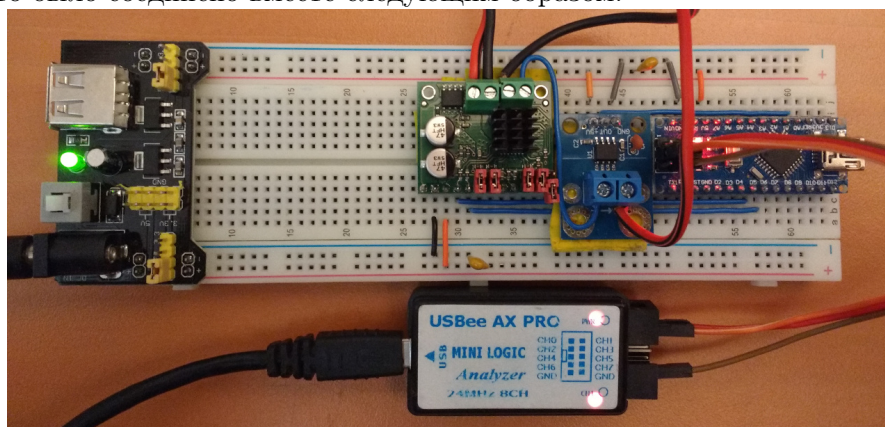
В качестве управляющего микроконтроллера выбран ATmega328p, работающий на частоте 16МГц. Обвязка микроконтроллера – китайский клон Arduino Nano v3 (\$1.5).

Микроконтроллер генерирует ШИМ сигнал через восьмибитный счётчик с делителем 8, таким образом, частота ШИМ сигнала  $16 \cdot 10^6 / 255 / 8 = 7.8 \text{ кГц}$ , что укладывается в максимально доступные для драйвера 20кГц.

Делитель АЦП микроконтроллера установлен на 128; поскольку каждое измерение требует примерно 13 тактов, максимальная частота измерений протекающего тока равна примерно  $16 \cdot 10^6 / 128 / 13 = 9.6 \text{ кГц}$ . Измерения производятся в фоновом режиме, извещая основную программу об окончании при помощи вызова соответствующего прерывания.

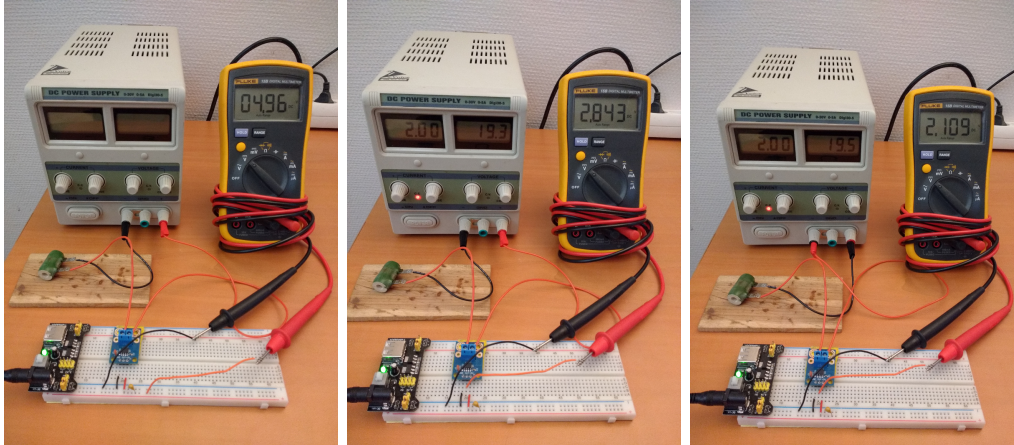
Отладочная информация передаётся микроконтроллером по интерфейсу SPI, для её записи был применён широкодоступный (\$10) китайский клон логического анализатора Saelae Pro 8 Logic.

Всё это было соединено вместе следующим образом:



## 2.2 Проверка датчика тока

Датчик тока был запитан от 4.96В источника, последовательно с датчиком был подключен резистор, через который было пропущено 2А. Теоретическое напряжение на выходном пине должно быть  $4.96 / 2 + (2 \cdot 0.185 \pm 1.5\%)$ , измерение показало 2.84 В, что укладывается в расчётные параметры. Затем было поменяно направление течения тока через резистор, при -2А измеренное напряжение на выходном пине датчика составило 2.11В, что опять укладывается в расчётные параметры.



### 3 Контур тока

#### 3.1 Идентификация параметров

Протекающие в двигателе процессы описываются дифференциальным уравнением

$$L \frac{dI}{dt}(t) = U(t) - RI(t) - C_\omega \omega(t),$$

где  $L$  – индуктивность,  $R$  – сопротивление,  $C_\omega$  – коэффициент противоЭДС,  $U(t)$  – приложенное напряжение,  $I(t)$  – протекающий ток,  $\omega(t)$  – скорость вращения ротора. Для настройки контура тока мы зафиксируем ротор двигателя, то есть  $\omega(t) \equiv 0$ .

На следующей фотографии виден двигатель с заблокированным ротором, источник напряжения 24В, макет усилителя и подключенный логический анализатор для записи внутренних состояний регулятора.



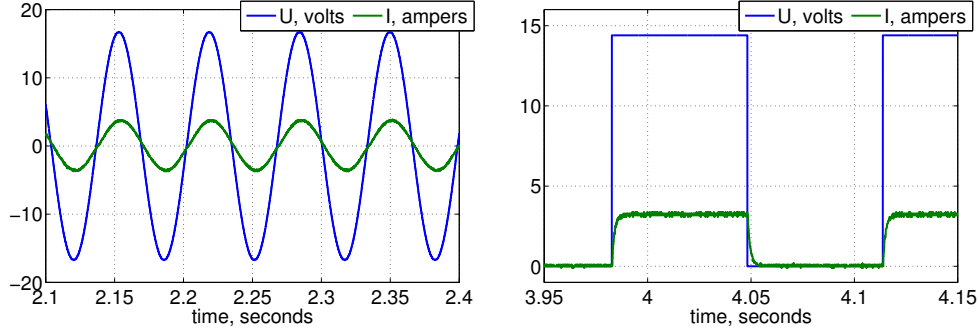


Рис. 1: Сигнал тока при подаче входного сигнала в форме синусоиды и менадра, разомкнутый контур.

Передаточная функция двигателя от напряжения к току имеет вид

$$W(s) = \frac{1}{Ls + R} = \frac{K}{\tau s + 1}. \quad (1)$$

Для построения системы управления током нас интересуют значения коэффициента передачи  $K$  и постоянной времени  $\tau$ .

Было проведено 11 экспериментов: три синусоидальных сигнала с частотами 61Hz,  $\frac{1}{2}61\text{Hz}$  и  $\frac{1}{4}61\text{Hz}$  и амплитудой 70% от 24В, и меандр с периодом 0.128 секунды, скважностью 50% и амплитудами 80%, 60%, 30% и 10% от 24В, в положительном и отрицательном направлениях. Пример реакции на синусоидальное напряжение и на меандр приведены на рисунке 1.

По полученным экспериментальным данным с использованием функции `tfest` Matlab была получена оценка параметров передаточной функции (1):  $\hat{\tau} = 0.0013$ ,  $\hat{K} = 0.22$ . Степень совпадения с экспериментальными данными более 95% для первых 7 экспериментов (амплитуда задания 60% от максимума и выше), 86% для экспериментов 8 и 9 (амплитуда задания 30% от максимума) и 65% для экспериментов 10 и 11. Предположительно, основной источник погрешности – сэмплирование тока и мертвая зона драйвера силовых ключей.

### 3.2 Расчёт регулятора

Так как мы хотим получить аperiодический характер переходных процессов в контуре тока, то желаемая передаточная функция замкнутого контура выбрана как

$$W_{cl}^*(s) = \frac{1}{T_i s + 1},$$

где  $T_i$  – желаемая постоянная времени, выбранная как 2мс, что даст время переходного процесса  $\approx 6\text{мс}$ . Соответствующая ей желаемая передаточная функция разомкнутого контура

$$W_{ol}^*(s) = \frac{1}{T_i s}.$$

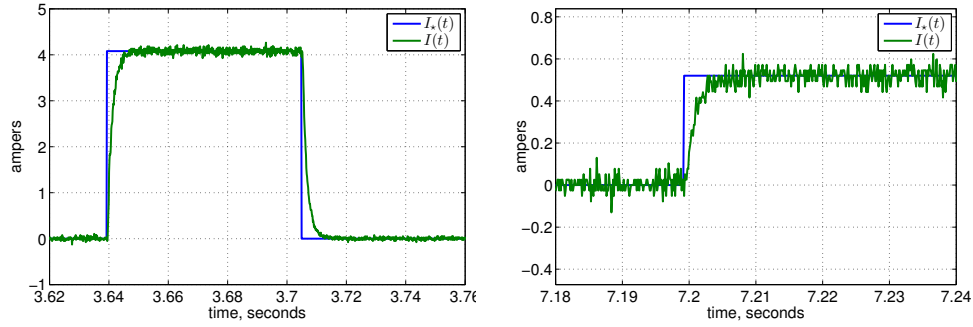


Рис. 2: Задание по току и ток в замкнутой системе.

Исходя из желаемого передаточной функции разомкнутого контура, выберем передаточную функцию ПИ регулятора как

$$W_{PI}(s) = \frac{\hat{\tau}s + 1}{\hat{K}T_s} = K_P + K_I \frac{1}{s},$$

где  $K_P = 3$  и  $K_I = 2268$ .

Обозначим желаемое значение тока в обмотках как  $I_*(t)$ . Тогда ошибка слежения по току  $e_I(t) := I_*(t) - I(t)$ , а закон управления примет вид

$$U(t) = K_P e_I(t) + K_I \int_0^t e_I(w) dw.$$

### 3.3 Реализация

регулятор тока был реализован в контроллере вот так.

## 4 Проверка

Проверка работы замкнутого контура была проведена для двух типов задания тока: синусоидального и меандра. На Рис. 2 приведены результаты работы регулятора для меандров большой амплитудой (4А) и малой (0.5А) амплитуды. Время переходного процесса составляет примерно 6мс.

Для дополнительной проверки по экспериментальным данным была определена передаточная функция, описывающая замкнутый контур. Результат идентификации с помощью `tfest`:

$$\hat{W}_{cl}(s) = \frac{1}{0.0019s + 1},$$

что практически совпадает с желаемой передаточной функцией замкнутой системы.

## 5 Выводы

Оставить это железо или менять.