

РАЗРАБОТКА СЕНСОРНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ДАТЧИКА ТОКА

Дотти П.¹, Поберезкин Н. И.²,

¹ ТПУ, ИШИТР, гр. 8Е11, e-mail: pablo1@tpu.ru

² ТПУ, ИШИТР, ассистент ОАР, e-mail: nip6@tpu.ru

Аннотация

Процесс разработки сенсорной системы на основе датчика тока по принципу шунтирования.

Ключевые слова: Датчик тока, шунт, операционный усилитель, микросхема.

Введение

Датчик тока – это устройство, которое измеряет величину электрического тока. Он используется в различных отраслях промышленности, включая электроэнергетику, машиностроение, производство и здравоохранение. Измерение величины тока является важным параметром при управлении, регулировании и диагностике различного рода электрических цепей, установок и производственных процессов. Датчики тока позволяют в реальном времени получать обратную связь о фактическом значении тока, текущем в цепи или системе. Это необходимо для контроля соответствия тока заданным параметрам, предотвращения перегрузок оборудования и срабатывания защитных механизмов при превышении допустимых пределов. Таким образом, датчики тока играют важную роль в обеспечении надёжной и безопасной работы технических устройств.

Исходя из этого, была поставлена задача разработать сенсорную систему для измерения тока электродвигателей постоянного тока. Система должна была обладать совокупностью характеристик, обеспечивающих низкую стоимость, воспроизводимость результатов, измерение тока в двух направлениях (от -3 до +3 А) без влияния на сигнал в цепи и формирование выходного напряжения в диапазоне от 0 до 3,3 В.

Описание работы

На сегодняшний момент существует много разных способов измерения тока: наиболее точным, является метод шунтирования, поскольку измеряемый ток напрямую протекает через часть измерительной системы – шунт. Шунт – это резистор с точно определённым, низким сопротивлением. Метод шунтирование заключается в измерении падения напряжения через шунт, чтобы по закону Ома можно было рассчитать протекающий ток через него. Шунт должен быть последовательно подключен с нагрузкой чтобы ток через них был равным. На первом этапе разработки датчика необходимо рассчитать основные параметры шунта – такие как мощность, сопротивление и падение напряжения на шунте. Для этого используется формулы приведены ниже:

$$P = R \cdot I^2 \rightarrow R = \frac{P}{I^2} = 0,11 \text{ Ом},$$

$$U = I \cdot R = 0,1 \text{ В},$$

где Р – выделяющаяся мощность, R – сопротивление шунта и I – максимальный ток системы.

Ввиду малого сопротивления шунта, данное падение будет незначительным, по сравнению с остальной нагрузкой системы, поэтому для измерения данного падения необходимо его усиливать. В основном для усиления сигнала падения напряжения используют операционные усилители.

Чтобы провести выбор операционного усилителя нужно иметь в виду что, при управлении направлением вращения вала ДПТ ток меняет свое направление. Поэтому датчик тока должен измерять ток в обоих направлениях. Для датчика изменение направление движения тока будет означать смену его знака. Поэтому усилитель в системе должен выполнять смещение значения на выходе датчика, то есть осуществлять симметричный диапазон измерения в положительном и отрицательном направлении. С этой целью был использован усилитель под названием «дифференциальный усилитель», схема которого показана на рисунке 1.

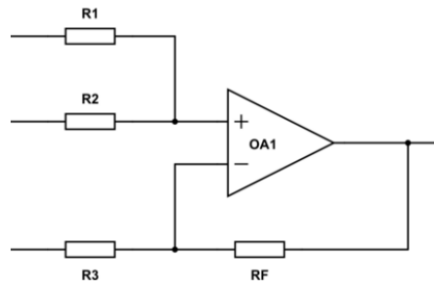


Рис. 1. Схема дифференциального усилителя [1, 4]

Коэффициент усиления на системе можно рассчитать по формуле (1):

$$U_{out} = \frac{1}{R_3} \left((R_3 + R_F) \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_1 + \frac{R_2}{R_2 + R_1} \cdot U_2 \right) - R_F \cdot U_3 \right) \quad (1)$$

где U_1 – это напряжение на входе через R_1 , U_2 – это напряжение на входе через R_2 , U_3 – это напряжение на входе через R_3 . При условии, что $R_1 = R_2$ и $R_F = R_1$ формулу (1) можно сократить и получается формула (2):

$$U_{out} = \left((U_3 - U_2) \frac{R_F}{R_3} \right) + U_1 \quad (2)$$

На формуле 2 можно заметить, что напряжение U_2 вычитается из напряжения U_3 . Именно эта характеристика нужна для измерения падения напряжения на шунте. Вход U_3 подключается к одному концу шунта, а вход U_2 – к другому. Исходя из формулы 2, необходимо рассчитать напряжение U_1 , которое отвечает за смещение и характеризуют нулевое значение тока:

$$U_1 = U_{ref} = \frac{U_{max_ADC}}{2} = 1,65 \text{ В.}$$

Для схемотехнической реализации данного напряжения, относительно исходного опорного напряжения питания в 5 вольт, использована схема делителя напряжения показана на рисунке 2, где $U_{выходное}$ равно 1.65 В и $U_{входное}$ равно 5 В.

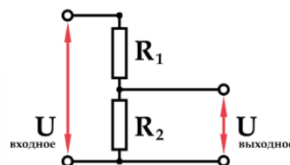


Рис. 2. Схема делителя напряжения

Значения сопротивления были рассчитаны по формуле:

$$U_{in} = U_{out} \left(\frac{R_2}{R_2 + R_1} \right).$$

В качестве результата расчета $R_1 = 20 \text{ кОм}$ и $R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Поскольку сигнал с делителя напряжения может быть нестабильным, произведена его стабилизация с применением схемы на базе операционного усилителя в режиме «повторитель напряжения». Повторитель напряжения — это специальный вариант неинвертирующего усилителя с коэффициентом усиления равным единице, схема которого показана на рисунке 3.

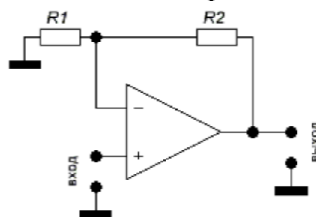


Рис. 3. Схема не-инвертирующего усилителя

Коэффициент усиления напряжение неинвертирующего усилителя рассчитывается по формуле:

$$k = 1 + \frac{R_2}{R_1},$$

где k – это коэффициент усиления. Так как нужен повторитель напряжения оба сопротивления должны быть равны нулю.

После вышеприведённых расчетов определяется коэффициент усиления для дифференциального усилителя по формуле, показанной ниже:

$$k = \frac{U_{out} - U_{ref}}{R_{shunt} \cdot I_{max}} = \frac{3,3 - 1,65}{0,1 \cdot 3} = 5,5 \quad (3)$$

где k – коэффициент усиления, U_{out} – максимальное допустимое напряжение на выходе датчика, R_{shunt} – сопротивление шунта и I_{max} – максимальный измеряемый ток. Этот коэффициент усиления равен отношению R_F к R_3 из (2). Для соблюдения этого отношения значения R_F и R_3 равны 7,25 кОм и 1,3 кОм, соответственно. Схема LM358P была использована в связи с тем, что она общедоступна, она дешевая и для датчика требуются два операционных усилителя.

Следующим этапом разработки стало моделирование рассчитанной схемы в среде Multisim 14. Этап моделирования необходим для проверки расчетов и демонстрации работы схемы. Результаты моделирования показали, что все расчеты были правильно проведены, и усилитель работает как рассчитано. В процессе моделирования было установлено появление высокочастотного шума, и для его компенсаций использован фильтр низких частот. В качестве фильтра был использован RC фильтр [2].

Так как датчик тока будет использоваться в многих системах были установлены конденсатор ёмкости 0,33 мкФ и потенциометр 1 кОм в качестве переменного сопротивления для того, чтобы можно было настраивать частоту среза фильтра под задачу.

Следующим этапом стала проверка работы и тестирование схемы на макете. Так как при тестировании датчик не достиг на выходе напряжения меньше 0,6 В была применена микросхема ICL7660 для питания усилителя с положительным и отрицательным напряжением. ICL7660 является преобразователем напряжения, способным преобразовать напряжение с $+U$ в $-U$. В связи с погрешностями компонентов было необходимо изменить значение сопротивления R_3 на 1,775 кОм с целью снижения коэффициента усиления. Конечная принципиальная схема датчика показана на рисунке 4 и список компонентов показан в таблице 1.

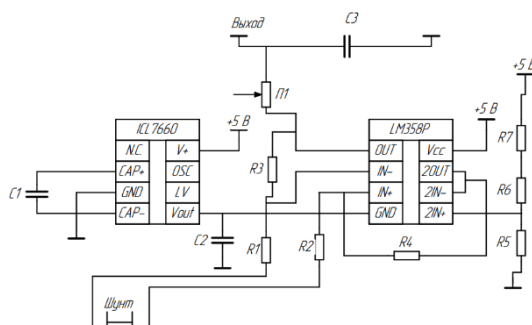


Рис. 4. Принципиальная схема датчика тока и таблица компонентов

Таблица 1

Список компонентов

Компоненты	Значения
R1, R2	1,3 кОм
R3, R4	7,5 кОм
R5, R6, R7	10 кОм
C1, C2	10 мкФ
C3	0,33 мкФ
П1	1 кОм

Следующим этапом стал процесс тестирования датчика. Результаты измерения допустимых пределов показаны в таблице 2.

Результаты измерения допустимых пределов тока

Проверка на	Ток, протекающий через датчик (А)	Напряжение на выходе датчика (В)
Нижний предел	-3,1	0,17
Нулевой ток	0	1,65
Верхний предел	3,1	3,04

Как можно заметить, был установлен небольшой запас с целью предотвращения возникновения отрицательного напряжения на выходе. С этими данными можно было рассчитать разрешение датчика по выражению:

$$\frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{3,04 - 0,17}{3,1 - (-3,1)} = 0,4629 \text{ В/А.}$$

Стоит отметить, что датчик действительно может пользоваться всем диапазоном АЦП микроконтроллера, однако для этого требуется большее потребление тока нагрузкой.

Последним этапом разработки стало тестирование RC фильтр нижних частот. Для этого были использованы генератор сигналов, для создания зашумленного сигнала, и осциллограф. Генератор сигналов был подключен к концам U_3 и U_2 , а осциллограф к выходу и к входу фильтра. В качестве тестового сигнала был задан сигнал с частотой 10 кГц, так как при управлении электроприводами это самая распространенная частота ШИМ [3], и амплитудой 200 мВ. Результаты представлены на рисунках 5 и 6.

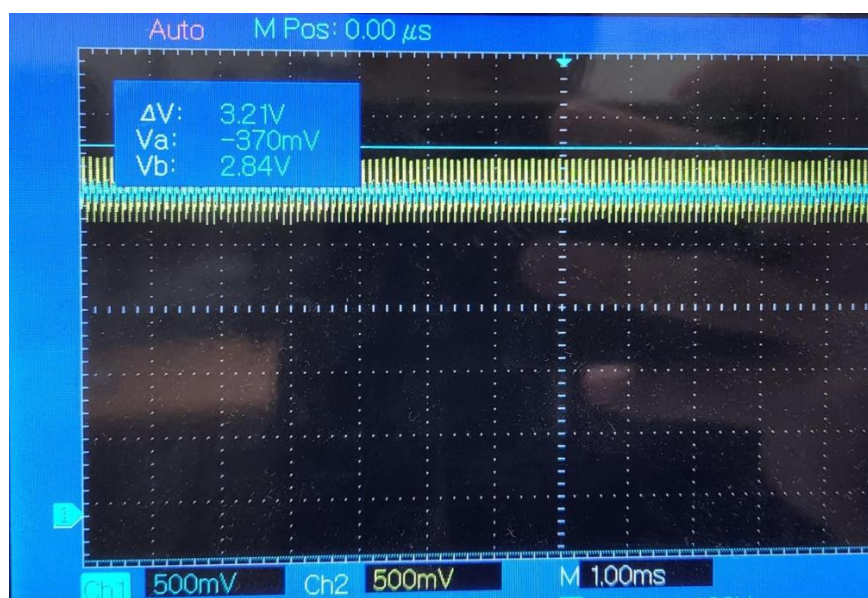


Рис. 5. Сигнал на осциллографе в диапазоне времени 100 мс

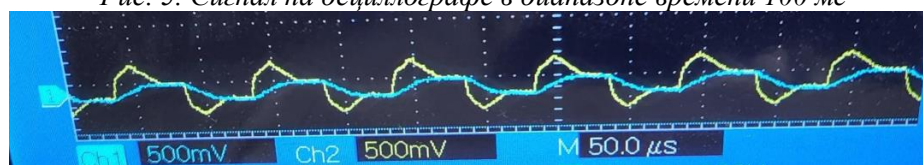


Рис. 6. Сигнал на осциллографе в диапазоне времени 50 мкс

На рисунках 5 и 6 сигнал желтого цвета представляет собой сигнал перед фильтрацией, а сигнал синего цвета – сигнал после фильтрации или на выходе датчика. Как можно заметить фильтр действительно работает и на выходе дает более плавный сигнал. Этот эффект можно усилить или уменьшить с помощью потенциометра на датчике. При этом, чем больше сопротивление (R) тем меньше полоса фильтрации, время переходного процесса возрастает, что показано в таблице 3.

Результаты измерения частоты чтения датчика при разных сопротивлениях

Сопротивление (Ом)	Время переходного процесса (мс)	Максимальная частота чтения датчика (Гц)
129	0,82	1280
341	0,912	1230
17,1	0,672	2100

Заключение

В рамках данной работы была спроектирована, разработана, собрана и протестирована сенсорная система на основе датчика тока по принципу шунтирования. Данный датчик будет в будущем применяться в мобильных робототехнических системах для измерения тока в системе управления ДПТ, где можно будет настроить частоту среза фильтра для каждой системы

Список использованных источников

1. Creating a Bidirectional Current-Sense Amplifier from Two Unidirectional Current-Sense Amplifiers. // Analog Devices. – URL: <https://www.analog.com/en/resources/technical-articles/creating-a-bidirectional-currentsense-amplifier-from-two-unidirectional-currentsense-amplifiers.html>
2. Low-Pass Filter a PWM Signal into an Analog Voltage. // All About Circuits. – URL: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/low-pass-filter-a-pwm-signal-into-an-analog-voltage/>
3. Patel and M. Ferdowsi, "Current Sensing for Automotive Electronics – A Survey," in IEEE Transactions on Vehicular Technology. – vol. 58. – no. 8. – pp. 4108-4119. – Oct. 2009. – doi: 10.1109/TVT.2009.2022081. // Научная статья. – URL: https://www.researchgate.net/publication/224439603_Current_Sensing_for_Automotive_Electronics-A_Survey
4. Current-sense amplifiers. // Texas Instruments. – URL: <https://www.ti.com/amplifier-circuit/current-sense/overview.html>