

02, февраль 2016

УДК 681.586

Цифровой датчик углового положения на основе датчика НМС1501 фирмы Honeywell

*Тишина Е.М., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

*Научный руководитель: Фёдоров С.В., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»
iu3@bmstu.ru*

Датчик углового положения или датчик угла поворота (ДУП) — устройство, предназначенное для преобразования угла поворота вращающегося объекта в электрические сигналы, позволяющие определить угол его поворота. По принципу действия ДУП подразделяются на оптические, резистивные, магнитные, индуктивные и механические.

Рассматриваемый датчик НМС1501 – магниторезистивный. В основе принципа его действия лежит анизотропный магниторезистивный эффект, который заключается в способности пермаллоевой пленки изменять свое сопротивление в зависимости от взаимной ориентации протекающего через нее тока и направления ее вектора намагниченности (рис. 1). Внешнее магнитное поле поворачивает вектор намагниченности пленки M на угол θ .



Рис. 1. Принцип действия магниторезистивного датчика

Основными элементами датчика являются четыре сопротивления, подключенные по схеме моста. На рис. 2 приведена схема датчика НМС1501.

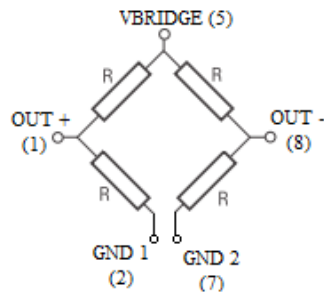


Рис. 2. Схема магниторезистивного датчика HMC1501

В таблице 1 приведена спецификация для рассматриваемого в статье датчика. Данные таблицы важны для последующего проектирования и расчетов схемы.

Дальнейшие расчеты и подбор элементной базы осуществлены в соответствии со следующими техническими требованиями: полоса пропускания – до 100 Гц, точность измерения угла – $0,1^\circ$, интерфейс передачи данных – I^2C , напряжение питания – 5 В и диапазон температур окружающей среды – 0°C до 85°C .

Таблица 1

Спецификация датчика HMC1501 фирмы Honeywell

Характеристика	Значения			Единицы измерения
	Минимальное	Типовое	Максимальное	
Питание моста	1	5	25	В
Сопротивление моста	4	5	6.5	кОм
Диапазон угла поворота	-45		+45	градус
Размах напряжения	100	120	140	мВ
Полоса пропускания	0		5	МГц
Температурный коэффициент чувствительности		-0.32		$\frac{\%}{^\circ\text{C}}$

Итак, разработку схемы следует начать со структурной схемы, далее в соответствии с ней разрабатывается функциональная и принципиально-электрическая схема. Среди всех этих схем структурная наименее детализирована, она отражает основные блоки устройства и главные связи между ними (рис. 3).

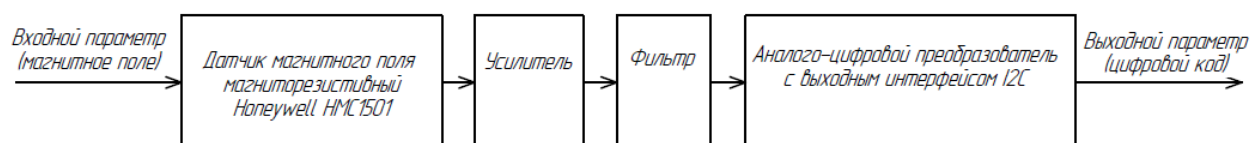


Рис. 3. Структурная схема датчика углового положения

Далее стоит пояснить структурную схему и плавно перейти от неё к функциональной.

Из таблицы 1 видно, что на выходе датчика напряжение имеет очень малую величину изменения – 120 мВ. Поэтому, для повышения точности разрабатываемого датчика, этот сигнал нужно усилить. Обычно для этого используют одну из схем включения операционного усилителя (ОУ). Дифференциальные усилители (рис. 4) используют для усиления разности двух входных сигналов. Так как с выхода датчика поступает именно разность напряжений (рис. 2) и именно её нужно усилить, то выбор схемы усиления был сделан в пользу схемы классического дифференциального усилителя (ДУ).

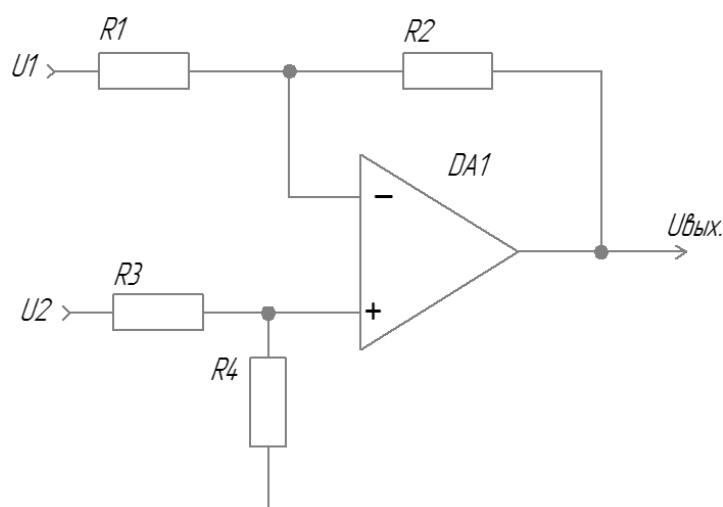


Рис. 4. Схема классического дифференциального усилителя

Уровень выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ ДУ определяется отношением резистивных элементов и разностью уровней входных сигналов. При выполнении условия $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$ напряжение на выходе ДУ пропорционально разности входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = (U_1 - U_2) \cdot \frac{R_2}{R_1} \text{ В.} \quad (1)$$

После того как сигнал усилен, его нужно пропустить через фильтр. Делается это для того, чтобы датчик соответствовал техническому требованию к полосе пропускания – до 100 Гц. Соответственно нужно подобрать подходящий фильтр нижних частот (ФНЧ).

Фильтр Саллена-Кея – один из типов активных электронных фильтров. Он реализуется в виде простой схемы с двумя резисторами, двумя конденсаторами и активным элементом. Задача расчёта номиналов элементов ФНЧ Саллена-Кея (рис. 5)

значительно упрощается, если принять, что $R_1 = R_2$ и $C_1 = 2 \cdot C_2$. Данный фильтр ослабляет сигнал в 0,86 раз, что нужно учесть при дальнейших расчётах.

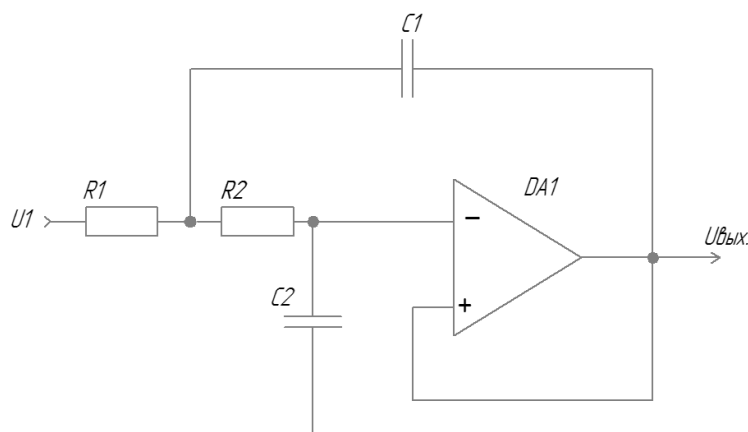


Рис. 5. Фильтр нижних частот Саллена-Кея

Рассчитать номиналы резисторов и конденсаторов можно по формуле (2):

$$f = \frac{\sqrt{2}}{4\pi RC_2}, \quad (2)$$

где f – граничная частота.

После того как сигнал усилен и отфильтрован, его нужно преобразовать из аналогового вида в цифровой. Для этого нужно подобрать соответствующий техническим требованиям аналогово-цифровой преобразователь (АЦП).

Итак, все блоки, изображённые на рис. 3 рассмотрены. Теперь можно составить функциональную схему, разрабатываемого цифрового датчика (рис. 6).

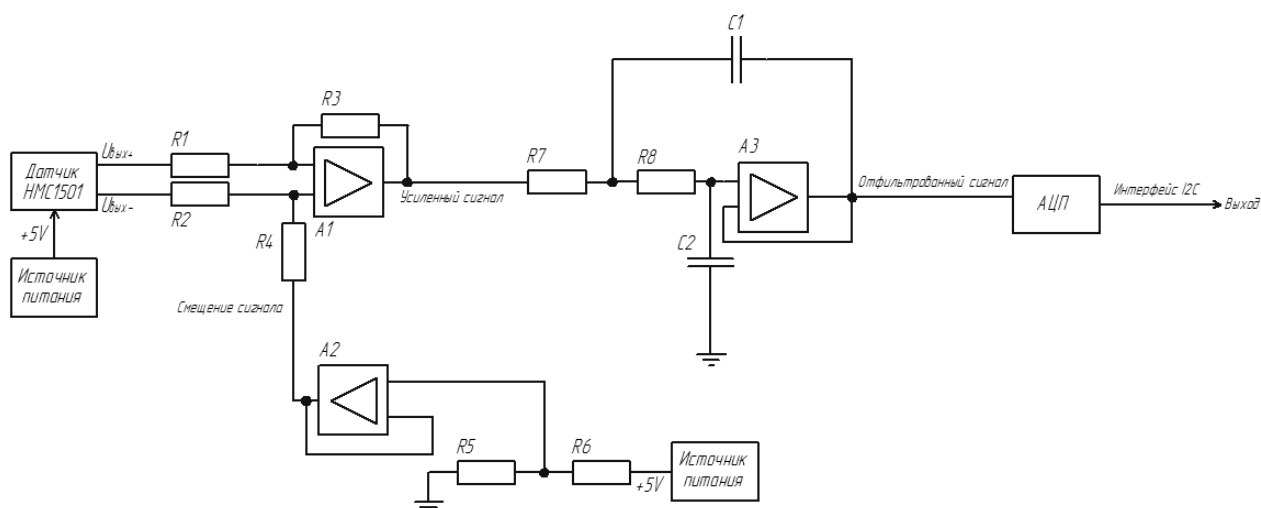


Рис. 6. Функциональная схема подключения цифрового датчика углового положения

Далее в статье рассматривается расчёт элементов и подбор элементной базы для дальнейшего составления принципиально-электрической схемы.

Большинство АЦП требует на вход напряжение, заключённое в диапазоне от 0 до

5 В. После датчика НМС1501, на входы дифференциального усилителя, согласно таблице 1 поступает сигнал: от -60 мВ до 60 мВ, то есть весь диапазон охватывает: 120 мВ = 0,12 В.

С учётом формулы (1) коэффициент усиления K_{yc} для ДУ составляет:

$$K_{yc} = \frac{R_3}{R_1} = \frac{5 \text{ В}}{0,12 \text{ В}} = 41,7. \quad (3)$$

Если коэффициент округлить в большую сторону, то часть сигнала в зоне от 0 В до 5 В, то есть на границах, будет “зарезаться”, поэтому округление было осуществлено в меньшую сторону. Из формулы (3) с учётом сказанного получается, что: $K_{yc} = 41$.

Из формулы (3) также находим сопротивление резисторов R_1 и R_3 . Пусть $R_1 = 2 \text{ кОм}$, тогда $R_3 = 82 \text{ кОм}$.

Усиленный сигнал будет иметь значения, расположенные в следующем диапазоне:

$$U_{\text{вых}} = -0,06 \text{ В} \cdot 41 \dots 0,06 \text{ В} \cdot 41 = -2,46 \text{ В} \dots 2,46 \text{ В}. \quad (4)$$

Номиналы резисторов $R_1 = 2 \text{ кОм}$ и $R_3 = 82 \text{ кОм}$ соответствуют значениям из ряда E24 номиналов радиодеталей. Металлоплёночные резисторы MF-25 (С2-23), имеющие номинальную мощность 0.25 Вт, сопротивления 2кОм и 82 кОм и с допуск в 1% удовлетворяют заданным техническим требованиям.

В формуле (4) были получены отрицательные значения напряжения. Ранее в статье уже было сказано, что АЦП требует, чтобы значение напряжения на входе было строго больше нуля. Поэтому нужно сдвинуть сигнал на +2,5 В.

Сдвиг выходного сигнала датчика на +2,5 В реализован с помощью буферного усилителя и резистивного делителя (рис. 6). Напряжение +5 В поступает от внешнего источника питания, затем оно с помощью двух резисторов R_5 и R_6 , которые имеют одинаковый номинал, делится пополам. Далее в схеме установлен буферный усилитель. Сделано это для того, чтобы сопротивление R_4 не влияло на сопротивления R_5 и R_6 , чтобы напряжение на неинвертирующем входе операционного усилителя А2 составляло ровно требуемые 2,5 В.

Номиналы резисторов R_5 и R_6 взяты из ряда E24 и равны 100 кОм. Металлоплёночные резисторы MF-25 (С2-23), имеющие номинальную мощность 0.25 Вт, с сопротивлением 100 кОм и с допуском в 1% удовлетворяют требованиям.

После сдвига на +2,5 В сигнал заключен в следующих пределах:

$$U_{\text{вых усил}} = -2,46 \text{ В} + 2,5 \text{ В} \dots 2,46 \text{ В} + 2,5 \text{ В} = 0,04 \text{ В} \dots 4,96 \text{ В}.$$

Ранее было сказано, что выбранный фильтр Саллена-Кея ослабляет выходной

сигнал в 0,86 раз. С учётом этого на вход АЦП будет подан следующий диапазон напряжений:

$$U_{\text{вых фильтр}} = 0,04 \text{ В} \cdot 0,86 \dots 4,96 \text{ В} \cdot 0,86 = 0,0344 \text{ В} \dots 4,2656 \text{ В}. \quad (5)$$

Техническими требованиями задана полоса пропускания датчика – до 100 Гц. Исходя из полосы пропускания нужно рассчитать номиналы R_7 , R_8 и C_1 , C_2 по формуле (2). Для упрощения вычислений принято, что $R_7 = R_8$; $C_1 = 2 \cdot C_2$. Получается два неизвестных в одной формуле, поэтому, пусть $C_1 = 5 \text{ нФ}$, тогда $C_2 = 2,5 \text{ нФ}$.

Далее, после преобразования формулы (2), произведён поиск номинала сопротивления:

$$R = \frac{\sqrt{2}}{4\pi f C_2} = \frac{1,4142}{4 \cdot 3,1416 \cdot 100 \cdot 0,0000000025} = 450158 \text{ Ом} = 450 \text{ кОм}.$$

В соответствии с рядом E24 получаются следующие значения номиналов:

$$C_1 = 5,1 \text{ нФ}, C_2 = 2,4 \text{ нФ}, R_7 = R_8 = 470 \text{ кОм}.$$

Полученные значения подставляются в формулу (2) для проверки того, что номиналы, действительно, выбраны верно:

$$f = \frac{\sqrt{2}}{4\pi R C_2} = \frac{1,4142}{4 \cdot 3,1416 \cdot 0,0000000024 \cdot 470000} = 99,769 \text{ Гц} \approx 100 \text{ Гц}.$$

Резисторы можно взять те же – металлоплёночные MF-25 (C2-23), с номинальной мощностью 0.25 Вт, сопротивлением 470 кОм и с допуском в 1%.

Что касается выбора конденсаторов, то требованиям соответствуют следующие: конденсатор керамический выводной K10-17Б емкостью 2400 пФ и K10-17Б емкостью 5100 пФ.

Для разрабатываемого датчика выбран операционный усилитель OP295 производства фирмы Analog Devices. Данный элемент отвечает техническим требованиям и подходит как для реализации фильтра, так и для реализации усилительного каскада и буферного усилителя.

Все элементы подобраны, кроме АЦП. Существуют сотни различных АЦП, однако, задача состоит в том, чтобы подобрать такой, характеристики которого будут удовлетворять заданным требованиям.

Первое требование – интерфейс передачи данных по шине I²S. АЦП с таким

интерфейсом не так уж и много, поэтому диапазон поиска существенно сужается.

Второе требование – диапазон входного напряжения от 0 до 5 В. Под это требование подходит большинство элементов.

Третий важный параметр – частота дискретизации. Полоса пропускания датчика составляет 100 Гц, поэтому с помощью теоремы Котельникова определяется минимальная частота дискретизации.

Теорема формулируется следующим образом: если непрерывный сигнал имеет спектр, ограниченный частотой $F_{\text{макс}}$, то он может быть полностью и однозначно восстановлен по его дискретным отсчетам, взятым через следующие интервалы времени:

$$T = \frac{1}{2 \cdot F_{\text{макс}}},$$

то есть с частотой:

$$F_{\text{д}} \geq 2 \cdot F_{\text{макс}}, \quad (6)$$

где $F_{\text{д}}$ – частота дискретизации, $F_{\text{макс}}$ – максимальная частота спектра сигнала.

Из формулы (6) следует, что минимальная частота дискретизации $F_{\text{д}} = 200 \text{ Гц}$.

Для фильтра нужно привести расчёт ослабления на половине частоты дискретизации. Начиная с такого ослабления, гармоники выше $\frac{f}{2}$ будут отражаться в полосу от 0 до $\frac{f}{2}$. На рис. 7 приведён пример такого отзеркаливания, из рисунка видно, что отражённый сигнал мешает полезному.

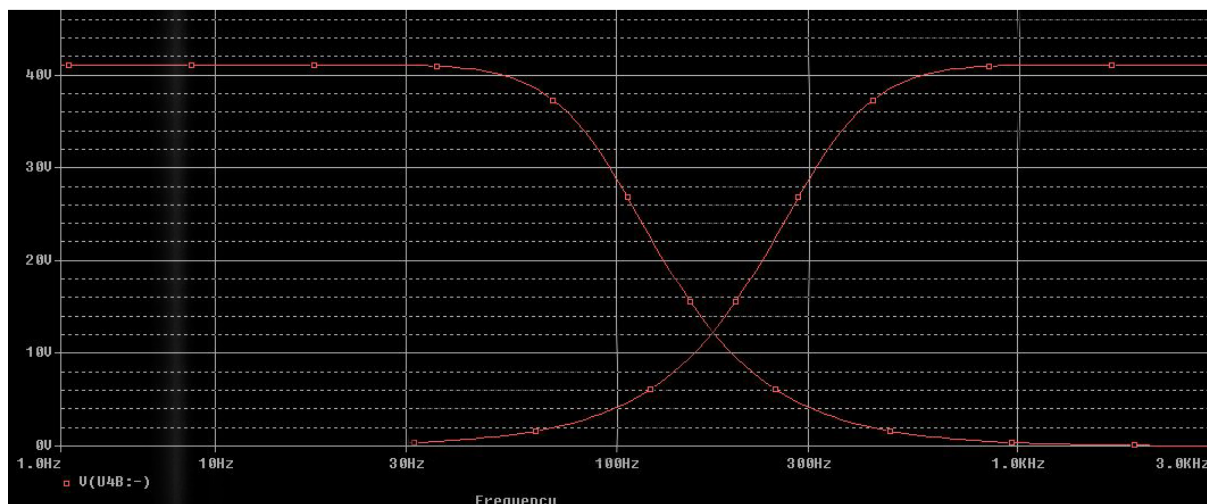


Рис. 7. Пример отражения гармоник в полосу пропускания

Пусть спад амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) после частоты среза фильтра равен $40 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}$, тогда при увеличении частоты в 10 раз, то есть на значении 1 кГц, будет ослабление по амплитуде в 100 раз. Спад, подсчитанный при дальнейшем моделировании схемы, составляет:

$$20 \cdot \lg\left(\frac{28,853}{0,346}\right) = 35,6 \frac{\text{дБ}}{\text{дек}}.$$

Допустим, частота дискретизации составляет 2 кГц. Тогда $\frac{f}{2} = 1 \text{ кГц}$. Получается, что частоты от 1900 Гц до 2000 Гц будут перенесены в полосу полезного сигнала, если не будут достаточно ослаблены. Возникает вопрос: сильно ли будет влиять отражение на полезный сигнал в данном случае? Значения напряжений для исследуемых частот следующие:

$$\begin{aligned} U_{1900} &= 0,078 \text{ В} & U_{100} &= 28,853 \text{ В} \\ U_{2000} &= 0,062 \text{ В} & U_0 &= 41 \text{ В} \end{aligned}$$

Таким образом, для 0 Гц погрешность:

$$\frac{0,062}{0,41} = 0,15 \%,$$

а для 100 Гц погрешность:

$$\frac{0,078}{0,289} = 0,27 \%.$$

Итак, в пользу частоты дискретизации выбор сделан – она должна быть не менее 2 кГц. Теперь нужно определиться с разрядностью АЦП и диапазоном измерения, так как они прямым образом влияют на результирующую погрешность преобразования.

Таблица 2

Зависимость разрядности АЦП, диапазона измерения и точности

Шаг	Диапазон	Точность	Шаг	Диапазон	Точность
1	$2^{-1} \cdot U = 2.5 \text{ В}$	50%	9	$2^{-9} \cdot U = 9.8 \text{ мВ}$	0.195%
2	$2^{-2} \cdot U = 1.3 \text{ В}$	25%	10	$2^{-10} \cdot U = 4.9 \text{ мВ}$	0.098%
3	$2^{-3} \cdot U = 625 \text{ мВ}$	13%	11	$2^{-11} \cdot U = 2.45 \text{ мВ}$	0.049%
4	$2^{-4} \cdot U = 312.5 \text{ мВ}$	6%	12	$2^{-12} \cdot U = 1.2 \text{ мВ}$	0.024%
5	$2^{-5} \cdot U = 156.3 \text{ мВ}$	3%	13	$2^{-13} \cdot U = 610.3 \text{ мкВ}$	0.012%
6	$2^{-6} \cdot U = 78.1 \text{ мВ}$	2%	14	$2^{-14} \cdot U = 305.2 \text{ мкВ}$	0.006%
7	$2^{-7} \cdot U = 39.5 \text{ мВ}$	0.781%	15	$2^{-15} \cdot U = 125.6 \text{ мкВ}$	0.003%

8	$2^{-8} \cdot U = 19.5 \text{ мВ}$	0.391%	16	$2^{-16} \cdot U = 76.3 \text{ мкВ}$	0.002%
---	------------------------------------	--------	----	--------------------------------------	--------

Согласно спецификации датчика (таблица 1), общий диапазон угла поворота составляет 90° . Чтобы обеспечить требуемую точность в $0,1^\circ$, нужно высчитать минимальное кол-во состояний на выходе АЦП:

$$\frac{90^\circ}{0,1^\circ} = 900 \text{ состояний.}$$

Поскольку $2^{10}=1024$, то минимальная разрядность АЦП составляет 10 бит. Но, нужно учесть, что на вход поступают только значения, вычисленные по формуле (5). Получается, что будет обрабатываться:

$$\frac{4,2656 \text{ В} - 0,0344 \text{ В}}{0,0049} = 866 \text{ состояний.}$$

Это значит, что АЦП с разрядностью 10 бит не подходит для использования в разрабатываемом устройстве. Можно применять АЦП разрядность которого 11 бит и более. Четвёртый параметр найден.

Пятый параметр это – температура, при которой АЦП может работать.

В соответствии с найденными параметрами выбран аналогово-цифровой преобразователь ADC121C021 фирмы Texas Instruments. Этот АЦП 12-битный и согласно спецификации имеет частоту дискретизации 188,9 кГц.

При разрядности 12 битв диапазон укладывается следующее кол-во состояний:

$$\frac{4,2656 \text{ В} - 0,0344 \text{ В}}{0,0012} = 3526 > 900.$$

Все элементы рассчитаны и подобраны, поэтому теперь можно составлять принципиально-электрическую схему (рис. 8):

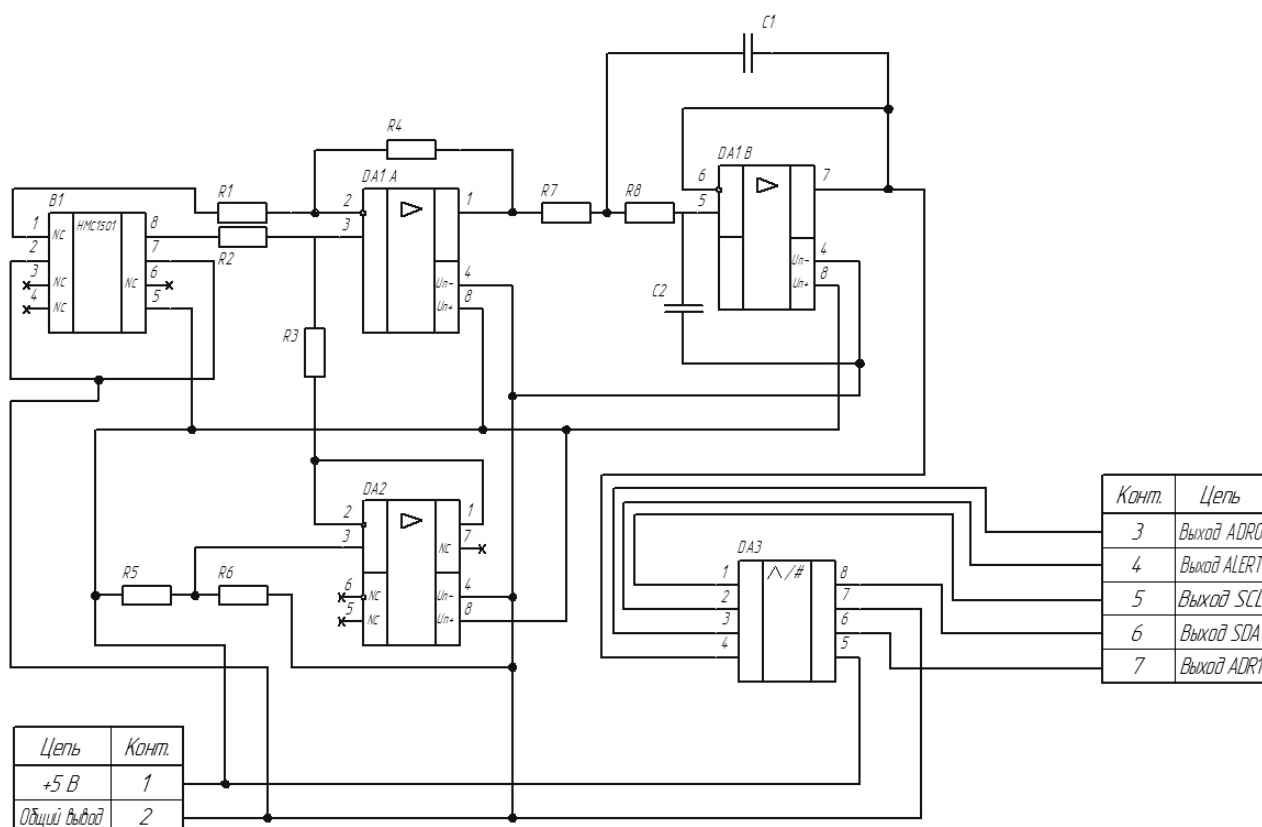


Рис. 8. Принципиально-электрическая схема цифрового датчика углового положения

В статье ранее не был ещё освещен один очень важный пункт – моделирование получившейся схемы. Перед тем как собирать схему на реальных элементах, нужно промоделировать её работу виртуально, чтобы проверить на соответствие заданным требованиям и устранить очевидные неточности.

Моделирование осуществлялось в программном пакете OrCAD. Для начала была составлена схема, где присутствуют все компоненты, рассчитанные и выбранные ранее, кроме АЦП (рис. 9). Для этого используется редактор Capture программного пакета OrCAD.

На рис. 9 к схеме подключено три вольтметра, которые снимают следующие значения напряжений:

- зелёный – разность напряжений на входе ДУ;
- синий – значение напряжения после усиления и сдвига;
- красный – значение напряжения после фильтра.

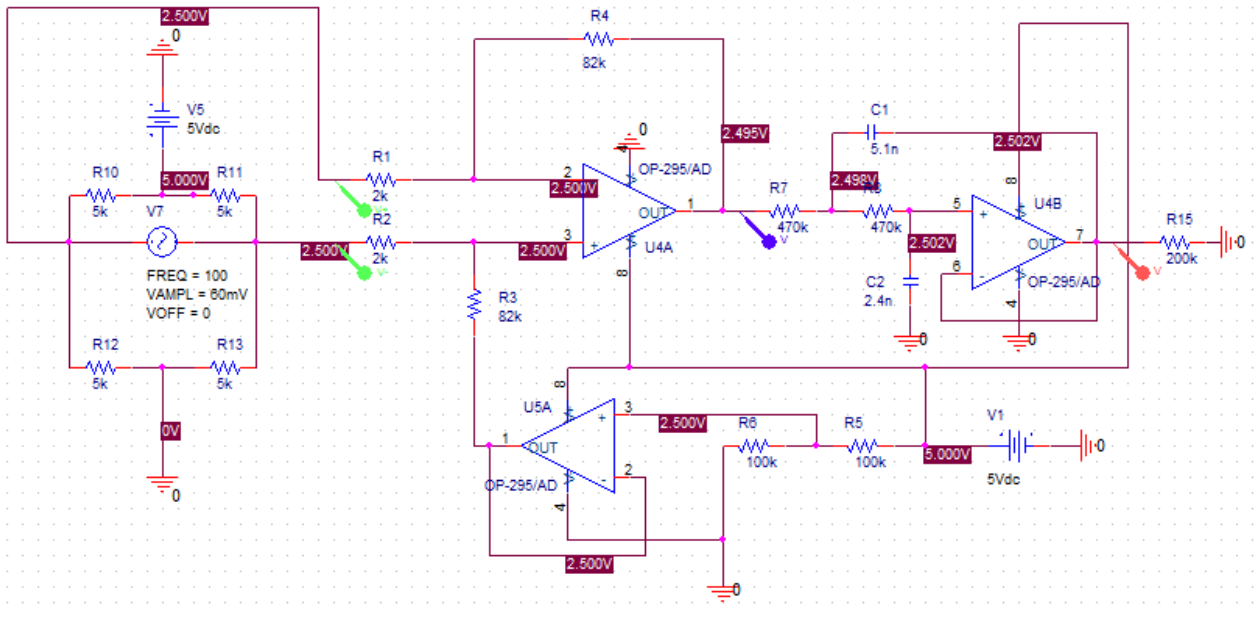


Рис. 9. Схема подключения датчика в редакторе Capture программного пакета OrCAD

С помощью редактора PSpice программного пакета OrCAD производится непосредственно моделирование схемы. Из рис. 10 видно, что расчетные значения диапазонов совпадают с теми, которые промоделированы.

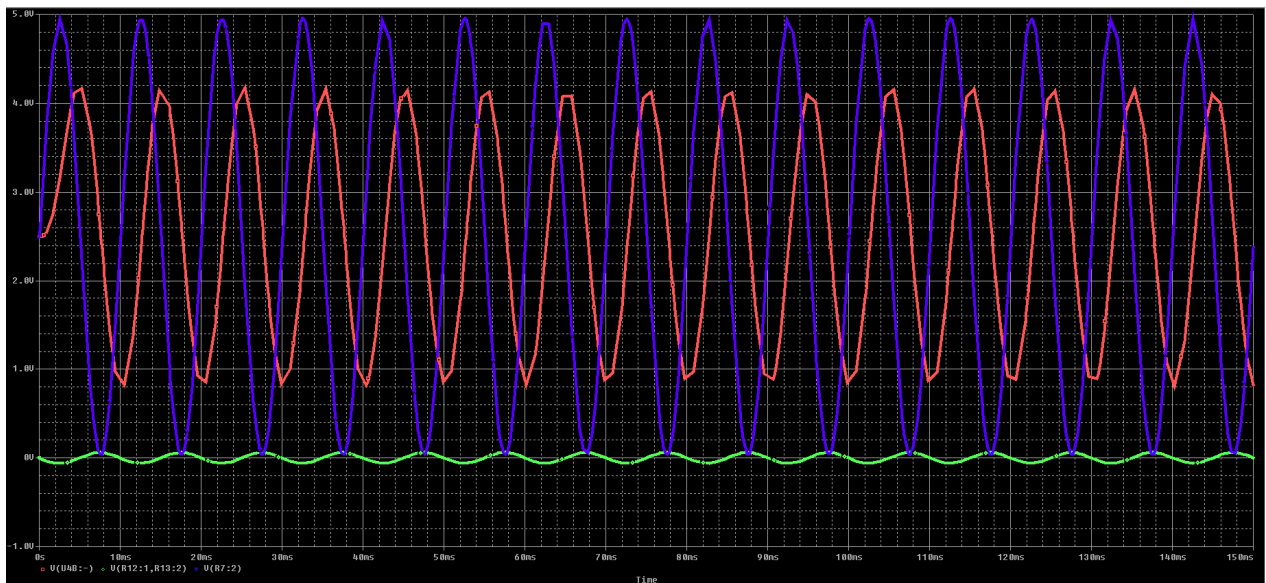


Рис. 10. Результаты моделирования схемы в пакете PSpice программного пакета OrCAD

Теперь осталось произвести проверку того, что выбранный фильтр обрабатывает корректно. Амплитудно-частотная характеристика фильтра представлена на рис.11:

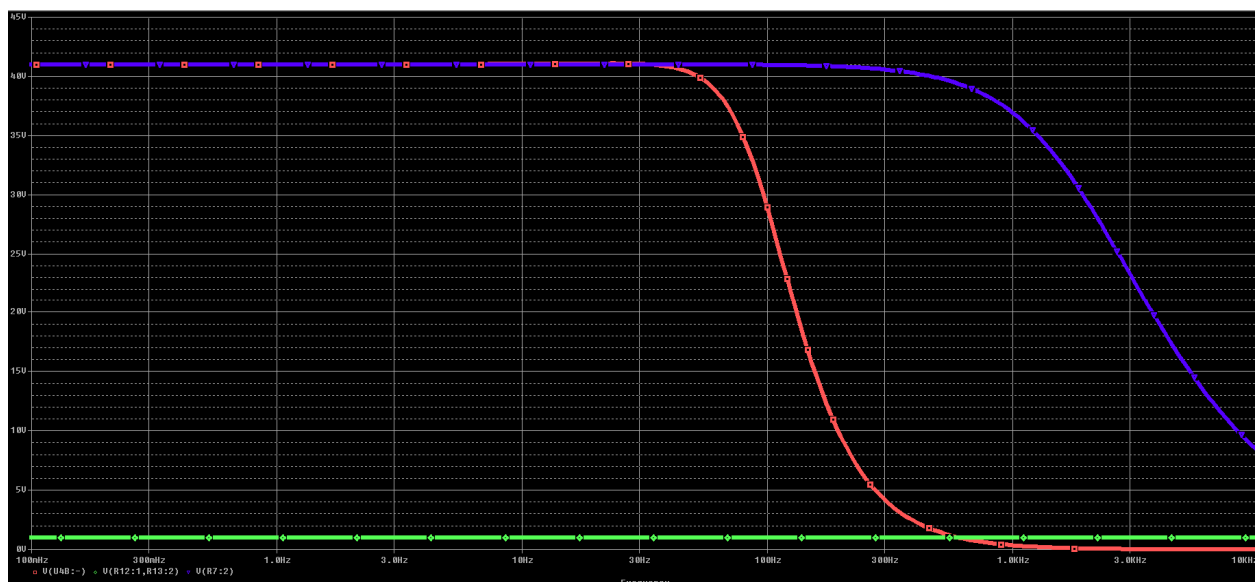


Рис. 11. АЧХ фильтра

Заключение

В настоящее время цифровые датчики используются повсеместно. Поэтому нужно признать, что разработка цифрового датчика угловых перемещений актуальна и востребована. Данная статья может послужить как теоретической, так и практической основой для более сложных проектов.

Разработанный датчик соответствует техническим требованиям, что было проверено расчётами и моделированием схемы в программном пакете OrCAD.

Список литературы

- [1]. Маргелов А.А. Компонентные магниторезистивные датчики и компасы компании Honeywell. Часть 1. // Новости электроники. 2006. № 10. С. 10-14.
- [2]. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника / под ред. Г.И. Изъюрова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1991. 622 с.
- [3]. Иванов А.А. Теория автоматического управления. М.: Национальный горный университет, 2003. 250 с.
- [4]. Продукция компании Maxim для промышленной электроники. Обзор датчиков. Режим доступа: http://www.compel.ru/wordpress/wp-content/uploads/2011/03/Sensors_ru.pdf (дата обращения 04.05.2012).