электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

УДК 681.2

Проектирование измерительного модуля емкостного датчика на основе четырехлопастной пружины

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

Научный руководитель: Павлов Ю.Н., док д.т.н, профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»
pavlov@bmstu.ru

С ростом необходимости применения систем автоматизированного управления техника конструирования датчиков перешла из разряда вспомогательных средств в самостоятельную ветвь измерительной техники.

В наши дни существует колоссальное количество всевозможных типов датчиков, в числе которых и емкостные. Преимущества емкостных датчиков невозможно не оценить: это простота и низкая стоимость изготовления, высокая чувствительность при сравнительно небольшом потреблении электроэнергии и многое другое. Эти датчики сочетают в себе превосходные эксплуатационные качества и гибкость применения, а также гарантируют точность и стабильность в широком диапазоне условий. Преобразователем деформации в электрический сигнал в данном датчике является дифференциальный емкостной датчик. Преобразователем усилия – упругий элемент. В массовом производстве в качестве упругого элемента чаще всего используются обычные пружины. Это чревато возможными искажениями при измерении, что обусловлено сравнительно высоким значением числа степеней свободы. Для более жесткой фиксации предлагается использовать четырехлопастную пружину, что защитит систему от ряда помех, таких как непредусмотренные толчки или удары.

Таким образом, в состав измерительного модуля проектируемого емкостного датчика войдёт преобразователь деформации в электрический сигнал и преобразователь силы 100 кН с использованием четырехлопастной пружины. Диапазон рабочих температур: -30 – +50 °С. Точность измерения: 0,5%.

В простейшем случае дифференциальный емкостный датчик представляет собой две последовательно включенные емкости, построенные конструктивно таким образом, что при увеличении одной из них другая уменьшается.

Емкостные дифференциальные датчики с переменным расстоянием между обкладками устроены в основном одинаково: между двумя параллельными пластинами, расположенными одна против другой, на которые подается ЭДС, помещается третья подвижная пластина – ротор, перемещающаяся поступательно.

Обозначим расстояние между двумя неподвижными обкладками d, между верхней неподвижной пластиной и ротором – d_1, между ротором и нижней неподвижной пластиной – d_2. Значение d постоянно, соответственно, значения d_1 и d_2 переменные. Справедливо следующее равенство:

$d = d_1 + d_2 = const.$

Площади неподвижных обкладок равны:

$S_1 = S_2 = S.$

Также:

$e_1 + e_2 = e.$

Расчет дифференциальной конструкции

Структурная схема конструкции, используемой в данном датчике, изображена на рис. 1 и представляет собой конденсатор, состоящий из трёх пластин.

В состав установки входят: четырёхлопастная пружина, три пластины конденсатора, объединённых в дифференциальный емкостной элемент, электронная плата ГОСТ 10317-79, блок питания.

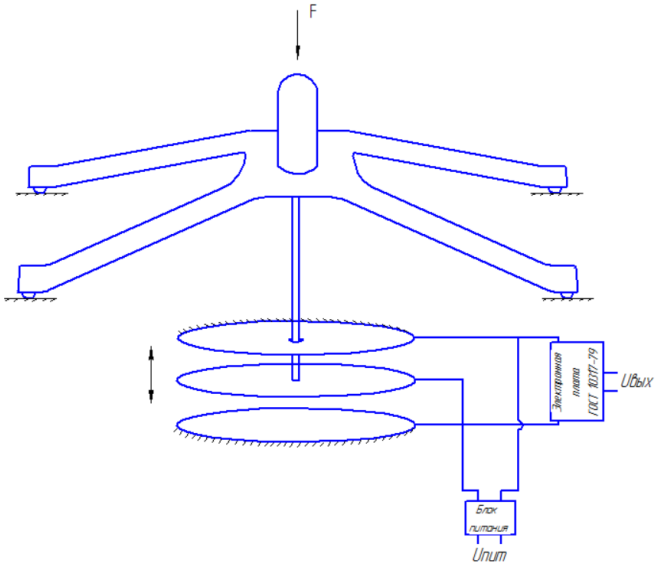


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции, используемой в датчике

Средняя пластина конденсатора называется ротором и может перемещаться в результате действия усилия F. Две другие пластины надежно закреплены, неподвижны и изолированы от корпуса специальными диэлектрическими обкладками. При отсутствии механического воздействия усилия F средняя пластина неподвижна и расположена строго посередине между двумя остальными пластинами, таким образом, емкости двух половин конденсатора $C_{1\text{-}2}$ и $C_{1\text{-}3}$ одинаковы и равны C. Уменьшение или увеличение зазора под действием некоторого усилия вызывает пропорциональное уменьшение или увеличение напряжения между обкладками, а сила, действующая между ними, остается неизменной, т. е. независимо от перемещения разность сил разна нулю.

$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d-\delta}$, где:

δ – величина смещения, т. е. величина изменения зазора между пластинами, мм;

d – зазор между пластинами при δ=0, мм; S – площадь пластин, см^2;

ε_0 – относительная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками.

Управление датчиком производится с помощью электронной платы, которая принимает выходной сигнал и передаёт его на дальнейшую обработку.

Расчет чувствительности конденсатора

Определим чувствительность конденсатора.

$C = 0{,}89 \cdot 1 \cdot \frac{7854}{10} = 0{,}7$ пФ;

$S_\partial = \frac{dC}{d\delta} = 0{,}89\frac{S}{(d-\delta)^2}$; $S_\partial = \frac{dC}{d\delta} = 0{,}89\frac{7854}{(10-8)^2} = 17.5$ пФ/мм.

Расчет упругого элемента

Верхняя и нижние площадки плоской пружины имеют большую относительную толщину, поэтому не будут подвергаться деформациям. Так как лопасти действуют одинаково, можем рассматривать одну лопасть.

Чтобы не было статической неопределимости необходимо создать перемещение нижних площадок пружины, тогда работающие площадки можно будет представить в виде стержня на шарнирных опорах. Для этого используем металлические шарики, катающиеся в желобках, выточенных в основании и в лапках пружины. Параметры материала, используемого для четырехлопастной пружины указаны в таблице.

Максимальная нагрузка F, кН	Материал	Сортамент	$\sigma_{пред}$, МПа
100	Сталь 60С2ХФА	ГОСТ 2591-2006	1960

Здесь $\sigma_{пред}$ – предел кратковременной прочности.

В качестве материала для четырехлопастной пружины используем сталь марки 60С2ХФА (сталь конструкционная рессорно-пружинная, назначение: ответственные и высоко нагруженные пружины и рессоры, изготовляемые из круглой калиброванной стали), прошедшую дополнительную обработку: изотермическая закалка с выдержкой при 290 °С, 1 ч. Отпуск 325 °С.

Максимальная сила, действующая на пружину F = 100 кН, соответственно, на каждую лопасть пружины действует сила $F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F/4 = 25$ кН.

Возьмем следующие параметры лопасти: l – длина, h – высота, b – ширина. Коэффициент запаса прочности считаем равным $n_T = 1{,}5$.

$[\sigma] = \frac{\sigma_{пред}}{n_T} = \frac{1960}{1{,}5} = 1307$ МПа;

$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_X}$, где:

$M_{max} = \frac{F_{max} l}{4}$;

$W_X = \frac{bh^2}{6}$.

Пусть h = 7 мм, b = 20 мм.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{W_X} = \frac{6F_{max} l}{4bh^2} = \frac{6 * 25 * 10^3 * l * 10^{-3}}{4 * 20 * \ 10^{-3} * 49 * 10^{-6}} = 38{,}3l \text{ МПа.}$$

σ_{max} должно быть меньше или равно $[\sigma] = 1307$ МПа. Возьмем l = 30 мм.

$\sigma_{max} = 38{,}2l = (38{,}2 * 30)$ МПа $= 1147$ МПа ≤ 1307 МПа – верно.

Расчет оптимального диаметра шариков

$\sigma_H = z_E \left(\frac{w}{\rho_{пр}}\right) \leq [\sigma_H]$ – формула Герца для первоначального контакта, где:

w = F/l – удельная линейная нагрузка,

z_E – коэффициент влияния механических свойств деталей,

$\rho_{пр}$ – радиус кривизны.

По формуле Герца линии рассчитаем оптимальный диаметр подшипников. В качестве материала для их изготовления возьмем сталь ШХ15 – сталь конструкционная подшипниковая (назначение: шарики диаметром до 150 мм, ролики диаметром до 23 мм).

$\sigma_H = z_E \left(\frac{w}{\rho_{\text{пр}}}\right) \leq [\sigma_H]$.

$\frac{1}{\rho_{\text{пр}}} = \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2}$.

Пусть $\rho_1 = 4$ мм, $\rho_2 = 5$ мм.

$\frac{1}{\rho_{\text{пр}}} = \frac{1}{4} - \frac{1}{5} = \frac{1}{20}$ => $\rho_{\text{пр}} = 20$ мм.

$\sigma_{H\,max} = 4200$ МПа, $\sigma_{\text{Т}} = 1700$ МПа, $\sigma_{\text{В}} = 1900$ МПа.

Например: $w = \frac{F}{l} = \frac{25000}{2} = 12{,}5 * 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}} = 125 * 10^3 \frac{\text{Н}}{\text{мм}}$.

$\sigma_H \leq 4200$ МПа.

Возьмем шарик диаметра 5 мм.

Зависимость ёмкости конденсатора от усилия

$\text{C} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d+\delta}$, где $\delta = \frac{Fl^3}{192Ebh^3}$ - величина смещения, т. е. величина изменения зазора между пластинами, мм; E – модуль Юнга, МПа.

Выполнив соответствующую подстановку получаем: $\text{C} = \frac{192\varepsilon\varepsilon_0 SEbh^3}{Fl^3+192dEbh^3}$.

Вычислим несколько ключевых значений.

1) При F = 0, C = 1668 пФ.
2) При F = 25кН, C = 139 пФ.
3) При F = 50кН, C = 72,6 пФ.
4) При F = 100кН, C = 37 пФ.

На рис. 2 представлен график зависимости ёмкости конденсатора от приложенного усилия.

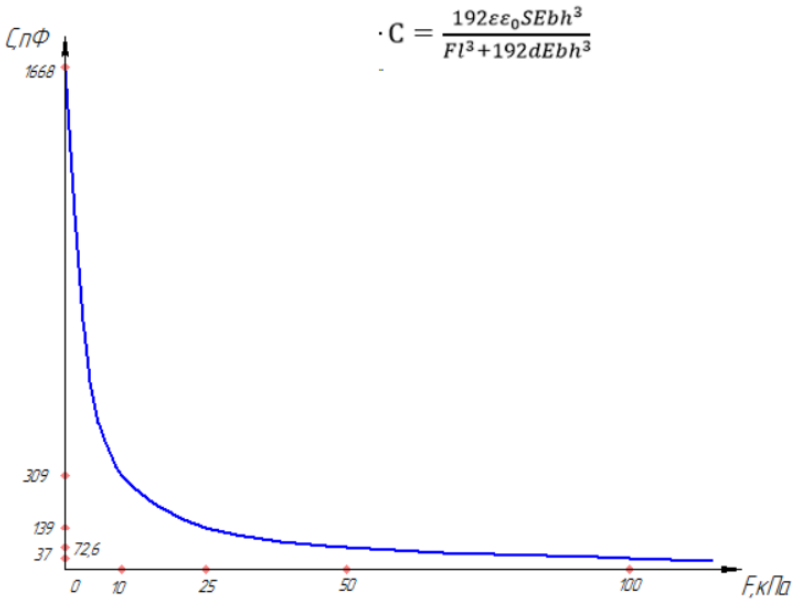


Рис. 2. Зависимость ёмкости конденсатора от усилия

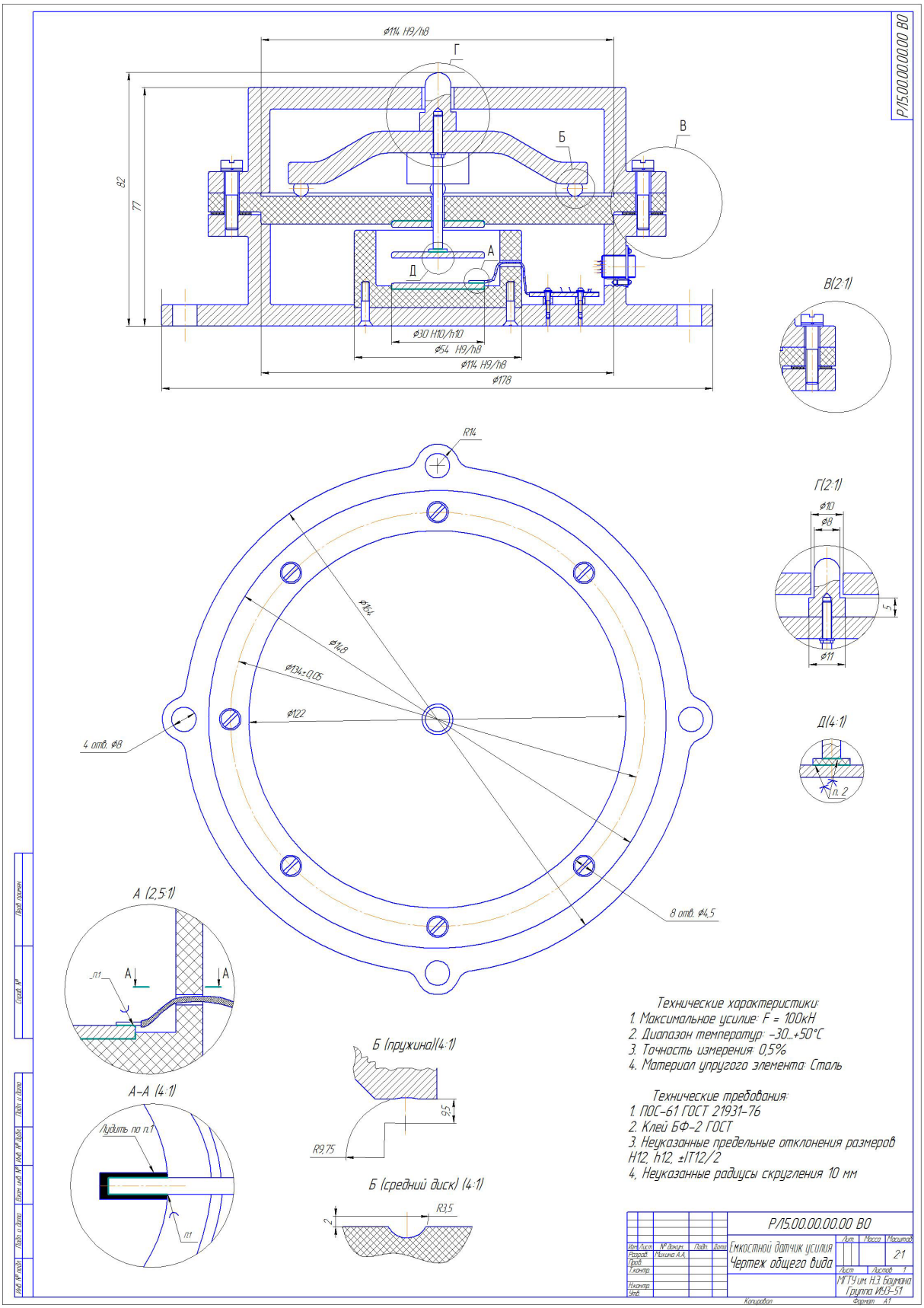
Выводы

По результатам расчетов был спроектирован емкостной датчик усилия. На чертежах представлен сам датчик, четырехлопастная пружина представляет собой систему из четырех равных балок. Усилие, будучи поданным на четырехлопастную пружину, влияет на смещение ротора – центральной пластины из трех составляющих дифференциальный конденсатор. Весь элемент помещен в корпус и накрывается крышкой, которая крепится к основанию винтами. Нагрузка передается пружине через скругленную кнопку, благодаря чему распределяется равномерно, что позволяет избежать перегрузки и поломки датчика. Основным преимуществом емкостного датчика с использованием четырехлопастной пружины в качестве упругого элемента является его устойчивость к внезапным помехам, таким как толчки, удары и прочее.

Список литературы

1. Тищенко О.Ф. Атлас конструкций ЭПУ. М.: Машиностроение. 1982. 117 с.
2. Андреева Л.Е. Упругие элементы приборов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1981. 392 с.
3. Пономарев С.Д. Расчет упругих элементов машин и приборов. М.: Машиностроение, 1980. 326 с.
4. Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещения, М.: Машиностроение, 1960. 107 с.

Приложение


Р/15.00.00.00.00 ВО
ø114 H9/h8
Г
В
Б
А
Д
82
77
ø30 H10/h10
ø54 H9/h8
ø114 H9/h8
ø178
В(2:1)
R14
Г(2:1)
ø10
ø8
5
ø11
ø164
ø148
ø134±0,05
ø122
4 отв. ø8
8 отв. ø4,5
Д(4:1)
п. 2
А (2,5:1)
п1
А
А
А–А (4:1)
Лудить по п.1
п1
Б (пружина)(4:1)
9,5
R9,75
Б (средний диск) (4:1)
R3,5
2
Технические характеристики:
1. Максимальное усилие: F = 100кН
2. Диапазон температур: −30..+50°С
3. Точность измерения: 0,5%
4. Материал упругого элемента: Сталь
Технические требования:
1. ПОС-61 ГОСТ 21931-76
2. Клей БФ-2 ГОСТ
3. Неуказанные предельные отклонения размеров H12, h12, ±IT12/2
4. Неуказанные радиусы скругления 10 мм
Р/15.00.00.00.00 ВО
Емкостной датчик усилия
Чертеж общего вида
Лит.
Масса
Масштаб
2:1
Лист
Листов 1
Изм. Лист
№ докум.
Подп.
Дата
Разраб.
Пров.
Т.контр.
Н.контр.
Утв.
Михина А.А.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Группа ИУ3-51
Копировал
Формат А1
Перв. примен.
Справ. №
Подп. и дата
Инв. № дубл.
Взам. инв. №
Подп. и дата
Инв. № подл.