

ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ADXL105

Рассмотрены методы уменьшения влияния температуры окружающей среды на точностные характеристики акселерометра ADXL105 фирмы Analog Devices. Показана эффективность применения метода термостатирования. Рассмотрена система термостатирования с резистивным нагревателем фирмы Analog Devices. Предложена новая система термостатирования с транзисторным нагревателем. Проведен сравнительный анализ двух систем термостатирования.

Одной из основных проблем создания и эксплуатации микромеханических акселерометров, является высокая чувствительность акселерометров к изменениям температуры окружающей среды. Акселерометры ADXL105 имеют дрейф нуля в диапазоне температур от 0 до 70°C на уровне 60 мВ, что при крутизне датчика 250мВ/г составляет 0.25g. Температурное влияние проявляется и в изменении крутизны датчика. Величина изменения крутизны датчика доходит до 2% [1].

Для уменьшения температурной погрешности акселерометров применяют методы *термокомпенсации* или *термостатирования*. Метод термокомпенсации заключается в том, что сигнал акселерометра корректируется сигналом от датчика температуры по какому-либо закону. Термокомпенсация может быть программной или аппаратной. При использовании метода термостатирования акселерометр нагревается до заданной температуры статирования, которая в течение работы поддерживается постоянной. Эти методы уменьшения температурной погрешности имеют свои достоинства и недостатки. Нелинейная зависимость от температуры выходного напряжения U_a акселерометра ADXL105 и гистерезис (рис.1) существенно усложняют использование аппаратной термокомпенсации. Наличие гистерезиса равно 5мВ не позволяет повысить точность акселерометра лучше, чем 20mg [5].

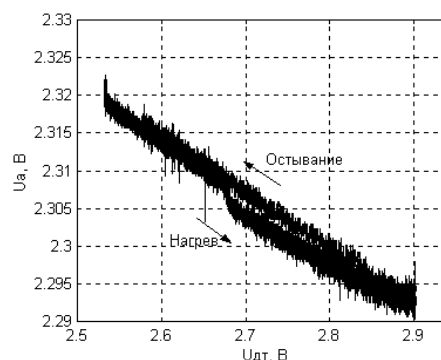


Рис.1 Зависимость выходного напряжения акселерометра U_a от напряжения с датчика температуры $U_{дт}$ (крутизна датчика температуры – 8mV/°C, $U_{дт}=2.5В$ при 25°C)

Использование программной термокомпенсации может повысить точность акселерометра за счет использования температурной характеристики самого акселерометра. Однако использование метода программной термокомпенсации существенно усложняет систему, увеличивает ее стоимость и габариты. К достоинствам термокомпенсации можно отнести:

- ◆ Готовность датчика к работе сразу после включения.
- ◆ Низкое потребление тока.

Использование метода термостатирования позволяет исключить гистерезис и нелинейность датчика. Отпадает необходимость измерения температурных характеристик каждого датчика. Поэтому представляется, что лучшим способом уменьшения температурной погрешности является термостатирование. Недостатки, присущие этому способу, заключаются в увеличении потребляемой мощности и времени готовности акселерометра.

Схема системы стабилизации температуры (ССТ) фирмы Analog Devices представлена на рисунке 2 [2]. На рисунке 3 представлена временная зависимость мощности выделяемой на нагревательном резисторе после включения ССТ. Поддержание заданной температуры возможно только в режиме широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Полученные результаты были подтверждены фирмой Analog Devices [5].

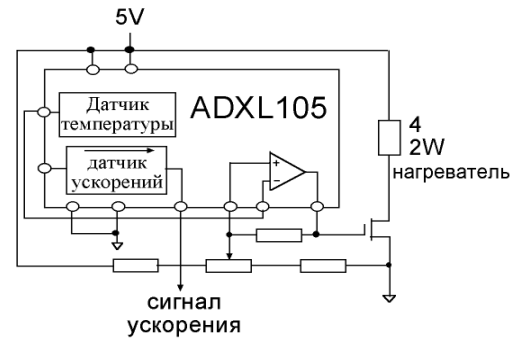


Рис.2 ССТ фирмы Analog Devices

Недостатками схемы предложенной фирмой Analog Devices являются:

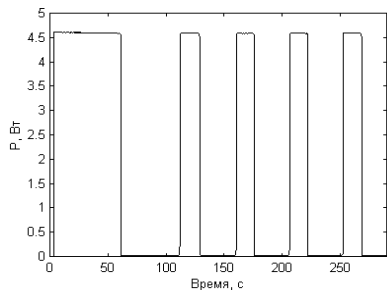


Рис.3 Мощность выделяемая нагревателем

Коммутация больших токов (до 1А), что неблагоприятно сказывается как на источнике питания, так и на нагревательном элементе ШИМ является источником импульсных помех.

При использовании ШИМ температура объекта термостатирования пульсирует с частотой, равной частоте автоколебаний системы.

С целью использования метода термостатирования предлагается схема ССТ, представленная на рисунке 4.

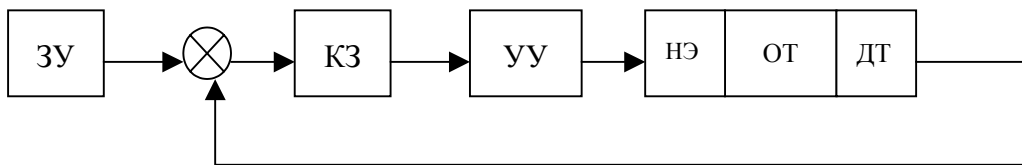


Рис.4 Функциональная схема ССТ

Система стабилизации температуры включает в себя датчик температуры (ДТ), задающее устройство (ЗУ), корректирующее звено (КЗ), нагревательный элемент (НЭ), усилительное устройство (УУ) и объект термостатирования (ОТ). При создании ССТ выбор типа и места установки ДТ и НЭ является, как правило, самой сложной задачей. Датчик температуры в акселерометре ADXL105 встроен, а для НЭ имеется только одна верхняя поверхность. Поэтому расположение этих элементов ССТ было выбрано таким же, как и в ССТ фирмы Analog Devices. Резистивный элемент был заменен на транзистор, поскольку резистивный НЭ является нелинейным элементом. При линейном изменении тока через резистивный НЭ рассеиваемая на нем мощность изменяется по квадратичному закону. Наличие в замкнутом контуре системы регулирования такого нелинейного элемента существенно снижает как статические, так и динамические характеристики системы. Мощность, рассеиваемая полевым или биполярным транзистором пропорциональна входному сигналу соответственно напряжению на затворе или току базы.

Для уменьшения потребляемой ССТ мощности акселерометр был установлен в кожух из пенопласта 80x80x50мм с тепловым сопротивлением 100°С/Вт.

Передаточная функция $W_o(s)$ была определена на основе анализа выходного напряжения ДТ $U_{дт}$ при ступенчатом изменении мощности НЭ на 1Вт [3](рис.5).

Полученные экспериментальные данные были аппроксимированы следующим выражением:

$$x(t)=K \cdot (1-e^{-t/T}) \cdot 1(t)$$

где

$1(t)$ - ступенчатая функция,
 T - постоянная времени,
 K – коэффициент передачи.

При $K=0.334$, $\tau=2.5$ с и $T=72.5$ с передаточная функция в форме Лапласа принимает вид:

$$W_o(s)=e^{-2.5 \cdot s} \cdot 0.334 / (72.5 \cdot s + 1)$$

Наличие звена чистого запаздывания практически ограничивает частоту среза системы регулирования, так как при большом коэффициенте усиления замкнутая система оказывается неустойчивой (данная система становится неустойчивой уже при $K=170$) из-за отсутствия запаса по фазе. Для повышения устойчивости системы и увеличения запаса по фазе был введен пропорционально-интегральный регулятор (ПИ-регулятор). Передаточная функция $W_{кз}(s)$ ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_{кз}(s)=K_{кз} (T_{кз} \cdot s + 1) / s$$

Постоянная времени $T_{кз}=156$ с и коэффициент усиления $K=0.0286$ определяют динамические свойства ССТ.

Анализ ССТ был проведен при помощи пакета Matlab в системе Simulink3.0.

При испытаниях ССТ измерялись выходное напряжение акселерометра U_a , сигнал управления нагревателем U_y и напряжение на выходе ДТ $U_{дт}$. На рисунках 6.1 и 6.2 приведены осциллограммы напряжений снятые при включении питания при температуре окружающей среды 30°С и температуре статирования 65°С, полученные экспериментально (непрерывная линия) и в результате моделирования в Simulink3.0 (штриховая линия). Выход на температуру статирования, как видно из рисунка 8.1, происходит примерно через 2 минуты с перегревом 5°С и заканчивается через 8-9мин. Необходимо отметить, что более 2минут (рис.8.2) ССТ находится в режиме насыщения из-за введенного ограничения по максимальной величине потребляемой мощности на уровне 1.3Вт.

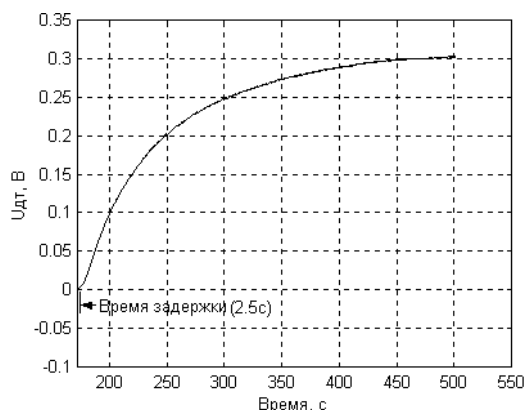


Рис.5 Реакция датчика температуры на скачок мощности $P=1.3$ Вт



Рис. 6.1 Напряжение датчика температуры U_{dt}

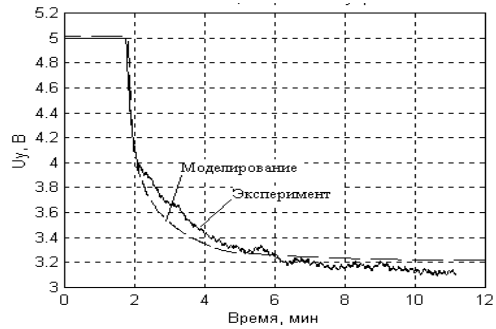


Рис. 6.2 Сигнал управления НЭ U_y

На рисунке 7 приведены осциллограммы напряжений, снятые при изменении температуры окружающей среды на 35°C (на участке 0-25 минут -нагрев, 25-60минут - остывание).

Напряжение на выходе ДТ (рис.7,в) не меняется. Это обусловлено тем, что в контур ССТ введен интегральный закон регулирования. Использование термостатирования позволило уменьшить дрейф нуля акселерометра (рис.7,а) до 1.5mV ($0.3\text{mg}/^{\circ}\text{C}$) при коэффициенте усиления сигнала акселерометра $K=2$. Зависимость выходного сигнала акселерометра U_a от сигнала управления НЭ U_y при нагреве и остывании близки к линейным и практически совпадают между собой (рис.7,г).

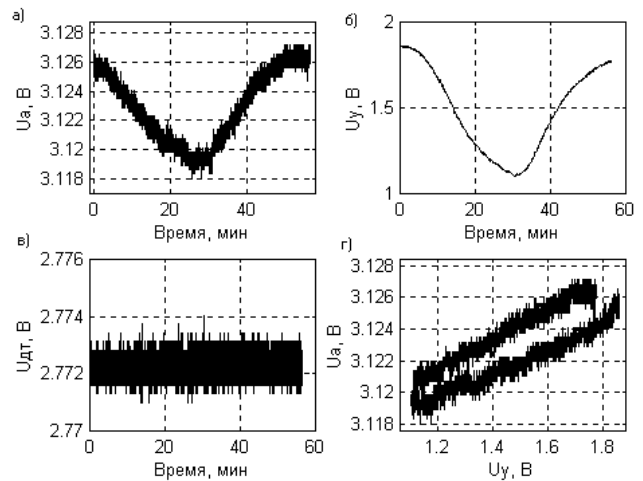


Рис.7 Осциллограммы сигналов ССТ при изменении температуры окружающей среды.

На основании этой зависимости была введена аддитивная поправка сигнала акселерометра U_a сигналом U_y с входа НЭ, который пропорционален мощности выделяемой на НЭ.

Корректировка сигнала акселерометра при изменении температуры на 35°C позволила уменьшить температурный дрейф термостабилизированного акселерометра в 2 раза (рис.8).

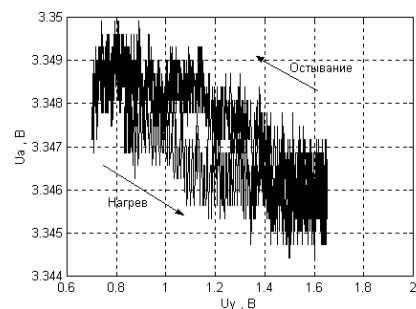


Рис.8 Скорректированный сигнал акселерометра

Заключение

Проведенные исследования показали возможность улучшения точностных характеристик акселерометров до единиц mg во всем рабочем диапазоне температур (30-65) $^{\circ}C$. Предложенная система термостатирования позволила обеспечить уменьшение влияния температуры на дрейф нуля в 20 раз до величины $0.3mg/^{\circ}C$, что в 1.5 раза лучше, чем в схеме с резистивным элементом. Коррекция выходного сигнала акселерометра сигналом управления системы термостатирования позволила в 1.5-2 раза снизить температурный дрейф нуля акселерометра и довести его до величины $0.12 mg/^{\circ}C$.

Литература

1. *High Accuracy 61g to 65g Single Axis Accelerometer with Analog Input. ADXL105_0.pdf.* –World Wide Web Site: <<http://www.analog.com>>.
2. **Harvey Weinberg** *Temperature Compensation Techniques for Low g Accelerometer.* World Wide Web Site: <http://www.analog.com/enewsletter/imems/temp_comp.html>
3. **П.Гроп** *Методы идентификации систем.* – М.: МИР 1979, 302стр.
4. **Е.П.Попов** *Теория линейных систем автоматического регулирования и управления.* – М.:Наука 1978, 256стр.
5. **Harvey Weinberg** *частное сообщение (19.03.2000).* – E-mail: MDP.feedback@analog.com