

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Факультет технической кибернетики
Кафедра информационных измерительных технологий**

Методические указания к лабораторной работе
«Градуировка датчиков силы»

Автор: Кудряшов Э.А.

Санкт-Петербург
2005

Программа работы «Градуировка датчиков силы методом прямого нагружения»

1. Изучение оборудования стенда и подготовка его к работе:

- 1.1. Емкостных датчиков силы ЕДС-300; ЕДС-6 и виброчастотного датчика ВЧ;
- 1.2. Конструкций нагрузочных устройств;
- 1.3. Электронносчетных частотомеров ЧЗ-32 и ЧЗ-34А;
- 1.4. Блоков питания Б5-49;
- 1.5. Проверка соединений цепей питания и выходов датчиков с блоками питания и электронносчетными частотомерами;
- 1.6. Включение питания стенда и измерительной аппаратуры (только с разрешения преподавателя!).

2. Градуировка емкостного датчика силы ЕДС-300

2.1. Тренировка испытуемого датчика силы и проверка работоспособности измерительного канала.

Примечание: Тренировка производится путем нескольких циклов нагрузки-разгрузки датчика массой гирь на 10-20% превышающей номинальное значение верхней границы рабочего диапазона, равное для ЕДС-300 100 кг. Для этого на арретированную грузоприемную платформу накладываются гири, масса которых составляет 110-120 кг. С помощью нагрузочного винта следует плавно опустить верхнюю планку нагрузочного устройства на датчик и проследить, чтобы узел арретира вышел из сцепления с нагрузочной планкой. Через 10-20с, вращая нагрузочный винт в противоположную сторону, ввести узел арретира в соприкосновение, а затем и приподнять им нагрузочную планку на 1-2 мм (так, чтобы между нагрузочной планкой и шариковой опорой датчика образовался просвет), и следовательно, полностью разгрузить датчик. Процедуру нагрузки-разгрузки повторить не менее 3 раз. В процессе тренировки рекомендуется записывать показания частотомера ЧЗ-34А и предъявить их преподавателю, так как характер изменения показаний при циклическом процессе нагрузки-разгрузки несет важную информацию о состоянии датчика и работоспособности измерительного канала в целом.

2.2. Экспериментальное исследование зависимости выходной частоты f_1 датчика ЕДС-300 от массы m_1 гирь, последовательно накладываемых на грузоприемную платформу (прямой ход) в диапазоне от 0 до 100 кг ступенями по 10 кг и затем последовательно снимаемых с грузоприемной платформы (обратный ход) до полной разгрузки ступенями по 10 кг.

Примечание: При выполнении п.2.2 выходную частоту датчика ЕДС-300 следует записывать с точностью 0.1 Гц. Для этого время счета частотомера ЧЗ-34А должно быть установлено равным 10с.

2.3. Математическая обработка результатов градуировки. Она проводится с целью определения номинального уравнения преобразования $f_1(m) = a_1 - b_1 \cdot m_1$ датчика ЕДС-300, где m_1 -масса гирь, а a_1 и b_1 - коэффициенты, определяемые с помощью метода наименьших квадратов. Кроме того необходимо оценить погрешности полученных численных значений коэффициентов (начального значения частоты a_1 и чувствительности b_1), а также разделить полосу неопределенности на случайную составляющую (порожденную погрешностями гирь, частотомера и несовершенством градуировочной установки) и систематическую составляющую (порожденную нелинейностью и гистерезисом датчика)

3. Градуировка емкостного датчика ЕДС-6

3.1 Тренировка датчика силы ЕДС-6 и проверка работоспособности измерительного канала.

3.2. Экспериментальное исследование зависимости выходной частоты датчика ЕДС-6 от массы гирь, последовательно накладываемых на грузоприемную чашку (прямой ход) в диапазоне от 0 до 5 кг ступенями по 1 кг и затем последовательно снимаемых с грузоприемной чашки (обратный ход) до полной разгрузки ступенями по 1 кг.

3.3 Математическая обработка результатов градуировки. Она проводится с целью определения коэффициентов уравнения преобразования $f_2(m) = a_2 - b_2 \cdot m_2$ датчика ЕДС-6, где m_2 -масса гирь, a_2 -частота при $m=0$, b_2 -чувствительность. Кроме того необходимо оценить погрешности полученных численных значений коэффициентов a_2 и b_2 , а также разделить полосу неопределенности на случайную составляющую (порожденную погрешностями гирь, частотомера и несовершенством градуировочной установки) и систематическую составляющую (порожденную нелинейностью и гистерезисом датчика)

4. Градуировка вибросчетного датчика ВЧ

4.1 Тренировка испытуемого датчика силы и проверка работоспособности соответствующего измерительного канала.

4.2. Экспериментальное исследование зависимости выходной частоты вибросчетного датчика от массы гирь, последовательно накладываемых на подвес датчика (прямой ход) в диапазоне от 0 до 6 кг ступенями по 1 кг и затем последовательно снимаемых с подвеса (обратный ход) до полной разгрузки ступенями по 1 кг

4.3 Математическая обработка результатов градуировки. Она проводится с целью определения коэффициентов уравнения преобразования $f_3(m) = a_3 - b_3 \cdot m_3$ вибросчетного датчика, где m_3 -масса гирь, a_3 -частота при $m=0$, b_3 -чувствительность. Кроме того необходимо оценить погрешности полученных численных значений коэффициентов a_3 и b_3 , а также разделить полосу неопределенности на случайную составляющую (порожденную погрешностями гирь, частотомера и несовершенством градуировочной установки) и систематическую составляющую (порожденную нелинейностью и гистерезисом датчика)

5. Составление отчета и его защита

Методические указания к НИР «Градуировка датчиков силы методом прямого нагружения»

1. Стенд для проведения экспериментальных исследований.

Стенд представляет металлическую стойку с тремя полками (рис.1). На верхней полке размещены 2 блока питания типа БП-5, а также электронносчетные частотомеры типа ЧЗ-32 (слева) и ЧЗ-34А (справа). На второй усиленной полке смонтировано устройство нагружения емкостного датчика силы ЕДС-300. Устройство нагружения содержит жесткую балку 1 и грузоприемную платформу 2, соединенные штангами 3. Устройство нагружения может находиться в двух положениях. В положении, указанном на рисунке, балка 1 опирается на центрирующий шарик испытуемого датчика. Точка опоры соответствует центру масс устройства нагружения. В этом положении на датчик действует сила тяжести суммарной массы устройства нагружения и гирь, наложенных на платформу. Во втором положении балка 1 устройства нагружения

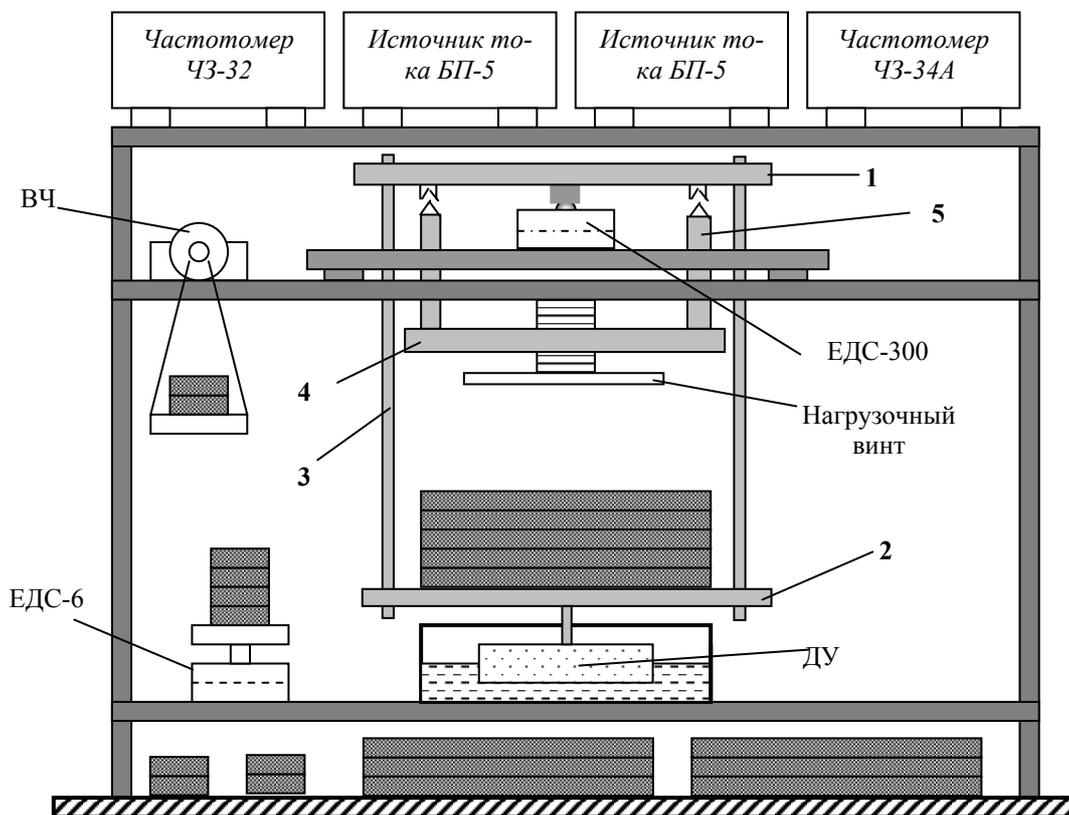


Рис.1 Стенд для проведения экспериментальных исследований

выводится из соприкосновения с датчиком путем ее подъема арретирующим устройством. Арретирующее устройство состоит из нижней балки 4 и упорных штанг 5. С помощью нагрузочного винта балка 4 может перемещаться вверх, приводя упорные штанги 5 вначале в соприкосновение с балкой 1 устройства нагружения, а затем приподнимая ее и все устройство нагружения настолько, чтобы полностью разгрузить датчик.

При съеме или наложении гирь возможны колебания грузоприемной платформы. Для успокоения (демпфирования колебаний) служит жидкостное демпфирующее устройство (ДУ), выполненное в виде тонкостенного цилиндра, боковые стенки которого с мелкими отверстиями погружены в трансформаторное масло, обладающее достаточной для гашения колебаний вязкостью. Тазик с трансформаторным маслом расположен на нижней полке.

Емкостной датчик ЕДС-6 отличается от датчика ЕДС-300 существенно меньшим пределом измерения (до 5-6 кг). Он снабжен грузоприемной платформой в форме чашки, расположенной сверху датчика. Поэтому нагружение такого датчика осуществляется прямым наложением или снятием гирь непосредственно с грузоприемной чашки.

Виброчастотный датчик ВЧ размещен на второй полке. Для его нагружения предусмотрен подвес, закрепленный с помощью серьги, висящей на призме упругого элемента датчика (см. рис.4).

2. Принцип работы и устройство датчиков силы ЕДС-300 и ЕДС-6

Устройство емкостных датчиков силы изображено на рисунке 2. Упругая система датчиков состоит из двух круглых мембран 1 с жесткими центром. Наружные кромки мембран жестко соединены между собой. Жесткий центр нижней мембраны служит для установки и закрепления датчика, а жесткий центр верхней мембраны

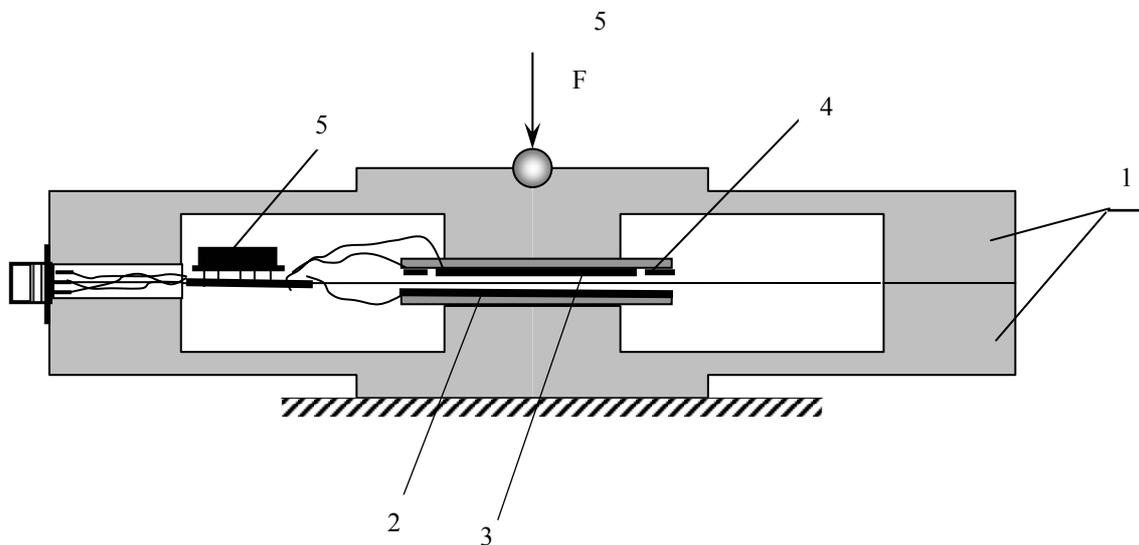


Рис.2 Устройство емкостных датчиков силы

воспринимает измеряемую нагрузку $F=mg$. Во внутренней полости мембран смонтированы электроды 2 и 3 емкостного преобразователя (ЕП). При воздействии нагрузки происходит симметричный прогиб мембран, вследствие чего изменяется величина воздушного зазора H между электродами ЕП:

$$H = H_0 - 2 \cdot \eta \cdot F$$

где H_0 – начальное значение зазора, η – податливость центра мембраны. Для уменьшения электростатического поля рассеяния и краевой емкости рабочих электродов используется вспомогательный охранный электрод 4, расположенный вокруг меньшего из рабочих электродов. Для преобразования емкости между рабочими электродами ЕП в выходную величину (частоту следования импульсов) используется измерительная цепь, выполненная в виде гибридно-пленочной интегральной микросхемы 5 и размещенная непосредственно в датчике. Принципиальная схема измерительной цепи изображена на рис.3. Рабочие электроды ЕП включены в цепь отрицательной обратной связи ОУ1. Большой из рабочих электродов является высокопотенциальным и соединен с выходом операционного усилителя, имеющего низкое выходное сопротивление. Меньший из рабочих электродов, подключенный к инвертирующему входу усилителя, имеет потенциал близкий к потенциалу земли. Охранный электрод соединен с корпусом датчика и землей измерительной цепи. Таким образом, паразитные емкости рабочих электродов ЕП относительно земли мало влияют на результат преобразования. Малый рабочий электрод и охранный электрод имеют близкие потенциалы, что обеспечивает равномерность электрического поля в воздушном зазоре между рабочими электродами, а следовательно достаточно точное соответствие емкости между ними формуле плоского конденсатора:

$$C = \varepsilon \frac{\pi \cdot r^2}{H}$$

где ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость воздуха, а r – радиус меньшего электрода. В измерительной цепи, изображенной на рис.3, осуществляется преобразование емкости C в частоту следования импульсов f в соответствии с формулой:

$$f = \frac{A}{C} = f_0 - S \cdot F$$

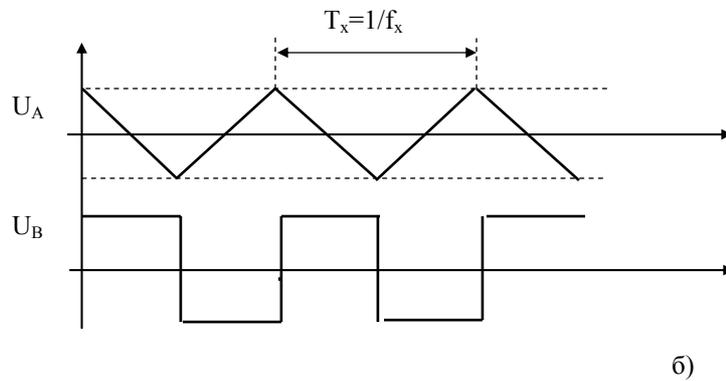
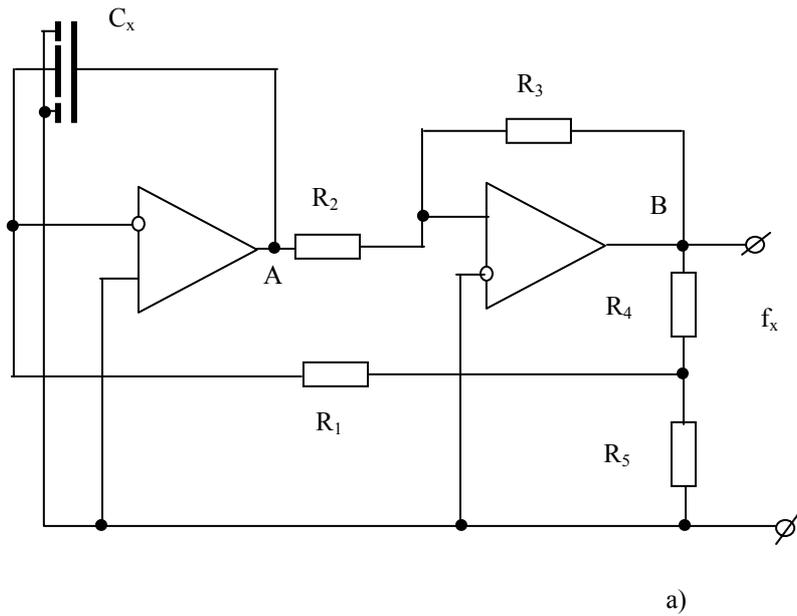


Рис.3 Преобразователь емкости C_x в частоту f_x :
а) схема б) эпюры напряжений в т. А и В

где: A - постоянный коэффициент, f_0 - частота следования импульсов на выходе при отсутствии нагрузки, S - чувствительность датчика.

Постоянная измерительной цепи A , как следует из рис.3, равна:

$$A = \frac{R_3 \cdot R_5}{2 \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot (R_4 + R_5)}$$

Для коэффициентов уравнения преобразования датчика f_0 и S нетрудно получить выражения:

$$\left. \begin{aligned} f_0 &= \frac{A \cdot H_0}{\varepsilon \cdot \pi \cdot r^2} \\ S &= \frac{A \cdot \eta}{\varepsilon \cdot \pi \cdot r^2} \end{aligned} \right\}$$

Выходной сигнал емкостных датчиков представляет периодическую последовательность импульсов положительной полярности типа меандр с амплитудой 5 В . Питание каждого из датчиков осуществляется от двух источников постоянного напряжения $\pm 12\text{ В}$ с общей точкой. Измерение частоты следования выходных импульсов и подача питания осуществляется с помощью малогабаритных разъемных соединений типа РМ-6 (для ЕДС-300) и РМ-4 (для ЕДС-6).

3. Принцип работы и устройство виброчастотного датчика

Виброчастотные датчики (ВЧ на рис.1) относятся к категории стабильных и точных датчиков силы, но обладают существенно большей нелинейностью уравнения преобразования по сравнению с другими типами датчиков силы. Устройство и принцип работы виброчастотного датчика показаны на рис.4. Упругий элемент датчика выполнен в виде двойной консольной балки 1, один конец которой жестко закреплен в корпусе, а на другой воздействует измеряемое усилие. Нижняя, более толстая и жесткая консольная балка воспринимает нагрузку, а вторая, тонкая и более гибкая 2, подвергается напряжениям растяжения, которые увеличивают ее жесткость и, следовательно, собственную частоту изгибных колебаний. Преобразование собственной частоты изгибных колебаний тонкой балки в частоту автоколебаний осуществляется с помощью двух обратимых электромагнитных преобразователей 3 и 4, включенных соответственно в цепи входа и выхода усилителя. Нагружение виброчастотного датчика осуществляется с помощью серьги 5, которая навешивается на свободный конец упругого элемента 1.

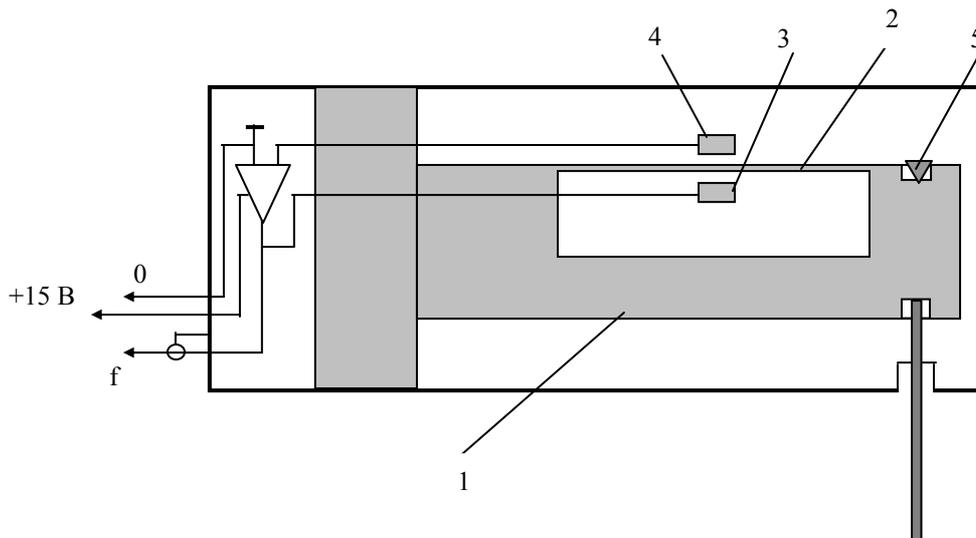


Рис.4 Устройство и принцип работы виброчастотного датчика

4. Обработка результатов градуировки

Обработка результатов градуировки датчиков ЕДС-300, ЕДС-6 и виброчастотного датчика ВЧ рекомендуется проводить в системе MathCAD. Методика обработки результатов градуировки в системе MathCAD приведена в приложении 1.

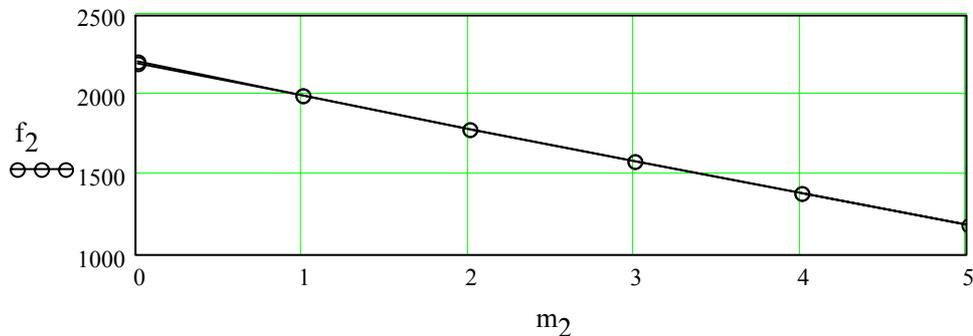
Приложение 1. Обработка результатов градуировки в системе MathCAD (на примере датчика ЕДС-6)

1. Аналитическое описание уравнения преобразования

Пусть в результате эксперимента, например, при градуировке датчика силы, получены векторы входной величины m_2 (массы накладываемых гирь, кг) и выходной величины f_2 (частоты следования импульсов на выходе датчика ЕДС-6, Гц). Пусть в эксперименте число ступеней нагружения равно $N := 11$. Обозначим номера ступеней: $i := 0, 1.. N - 1$. Предположим, что в результате эксперимента получены следующие вектора входной и выходной величин:

$m_{2_i} :=$	$f_{2_i} :=$
0	2201
1.00	1992
2.00	1783
3.00	1581
4.00	1377
5.00	1176
4.00	1376
3.00	1579
2.00	1784
1.00	1992
0	2200

Представим полученные данные в виде графика:



Экспериментальные точки (кружки) зрительно воспринимаются лежащими на прямой $f_{2i} = a_2 + b_2 m_{2i}$. Определим численные значения коэффициентов a_2 и b_2 этой прямой, а также погрешности, с которыми эти коэффициенты могут быть оценены из приведенных выше результатов эксперимента (векторов m_2 и f_2). Для этого используем метод наименьших квадратов. Процедура начинается с создания матрицы Z , имеющей размер $N \times (m+1)$, где m — порядок аппроксимирующего полинома. Для случая линейной аппроксимации $m = 1$. В этом случае Z состоит из двух столбцов. Первый столбец содержит единицы, второй — входной вектор m_2 .

$$Z_{i,0} := 1 \quad Z_{i,1} := m_{2_i} \quad Z^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 4 & 3 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Коэффициенты аппроксимирующей прямой находятся из матричного выражения:

$$A := (Z^T \cdot Z)^{-1} \cdot (Z^T \cdot f_2) \quad A^T = (2197.532 \quad -205.274)$$

Искомые коэффициенты суть элементы матрицы A :

$$a_2 = A_0 = 2197.532 \text{ Гц}; \quad b_2 = A_1 = -205.274 \text{ Гц/кг}$$

Искомая прямая может быть записана в матричном виде:

$$f_{a2} := Z \cdot A$$

Для наглядности выведем на экран вектора: f_2 (ординаты экспериментальных точек) и f_{a2} (ординаты точек аппроксимирующей прямой), а также вектор погрешности аппроксимации:

$$\Delta f_2 := f_2 - f_{a2}$$

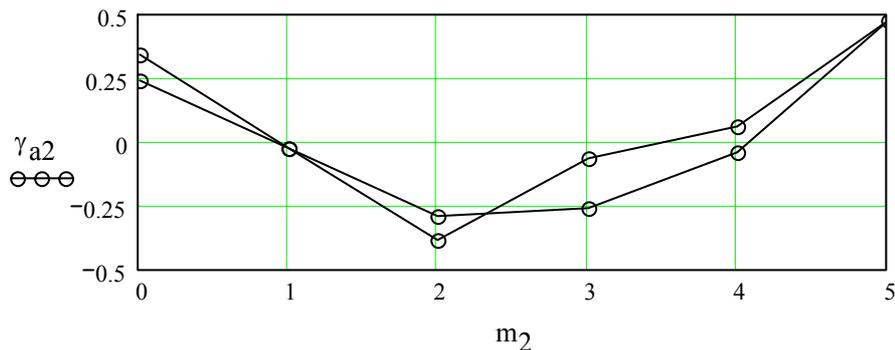
$$f_2^T = (2201.0 \quad 1992.0 \quad 1783.0 \quad 1581.0 \quad 1377.0 \quad 1176.0 \quad 1376.0 \quad 1579.0 \quad 1784.0 \quad 1992.0 \quad 2200.0)$$

$$f_{a2}^T = (2197.5 \quad 1992.3 \quad 1787.0 \quad 1581.7 \quad 1376.4 \quad 1171.2 \quad 1376.4 \quad 1581.7 \quad 1787.0 \quad 1992.3 \quad 2197.5)$$

$$\Delta f_2^T = (3.468 \quad -0.258 \quad -3.984 \quad -0.710 \quad 0.565 \quad 4.839 \quad -0.435 \quad -2.710 \quad -2.984 \quad -0.258 \quad 2.468)$$

Построим график относительной погрешности аппроксимации. В качестве нормирующего значения следует взять максимальное приращение частоты при нагружении датчика:

$$\gamma_{a2} := \frac{\Delta f_2}{\max(f_2) - \min(f_2)} \cdot 100$$



На графике видны две кривые, соответствующие нагружению датчика от 0 до 5 кг и разгрузке от 5 кг до 0. Как следует из графика, погрешность аппроксимации состоит из систематической составляющей (обе кривые напоминают параболы) и случайной составляющей (разброс относительно воображаемой параболы). Систематическая составляющая характеризует погрешность линейности уравнения преобразования испытуемого датчика. Из графика можно оценить погрешность линейности: она не превышает 0.5%. Случайная погрешность эксперимента не превышает 0.2%. Гистерезис датчика (разность между кривыми прямого и обратного нагружения) по видимому меньше 0.2%, ибо он замаскирован случайной компонентой погрешности.

2. Оценка случайной погрешности испытуемого датчика

Если градуировку датчика повторять несколько раз, то каждый раз будут получаться результаты несколько отличающиеся от приведенных выше таблиц и графиков. Это объясняется случайными погрешностями градуировочного эксперимента. В частности, коэффициенты аппроксимирующих прямых a_2 и b_2 также каждый раз будут немного отличаться от предыдущих значений. Случайные разбросы значений a_2 и b_2 обычно оценивают указанием их дисперсий или среднеквадратических значений (с.к.о.).

Они могут быть получены разными способами. Самый надежный состоит в проведении многократной градуировки (например, 3-5 раз) и оценке дисперсии или с.к.о. путем статистической обработки массивов значений упомянутых коэффициентов. Однако этот способ требует больших затрат средств и времени на проведение эксперимента.

Поэтому ниже приводятся формулы, позволяющие получить оценки дисперсии и с.к.о. коэффициентов a_2 и b_2 линейной регрессии по результатам однократной градуировки. В частности, оценки дисперсии S_a и с.к.о. s_a флуктуаций коэффициента a_2 вычисляются по формулам:

$$S_{a2} := \frac{\sum_{i=0}^{N-1} (\Delta f_{2_i})^2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (m_{2_i})^2}{N \cdot (N-2) \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (m_{2_i} - \text{mean}(m_2))^2} \quad s_{a2} := \sqrt{S_{a2}} \quad s_{a2} = 1.509 \quad \Gamma\text{ц}$$

Оценки дисперсии S_{b2} и с.к.о. s_{b2} флуктуаций коэффициента b_2 имеют вид:

$$S_{b2} := \frac{\left[\sum_{i=0}^{N-1} (\Delta f_{2_i})^2 \right]}{(N-2) \cdot \sum_{i=0}^{N-1} (m_{2_i} - \text{mean}(m_2))^2} \quad s_{b2} := \sqrt{S_{b2}} \quad s_{b2} = 0.543 \quad \Gamma\text{ц/кг}$$

Найдем квантиль t_{pd} распределения Стьюдента для доверительной вероятности p и числа степеней свободы d :

$$p := 0.95 \quad d := N - 2$$

Используя встроенную функцию MathCAD для квантилей распределения Стьюдента, получим:

$$t_{pd} := \text{qt}(p, d) \quad t_{pd} = 1.833$$

Тогда полоса неопределенности коэффициента a_2 (дрейфа нуля) датчика ЕДС-6 может быть оценена из выражения:

$$\Delta a_2 := t_{pd} \cdot s_{a2} \quad \Delta a_2 = 2.767 \quad \Gamma\text{ц}$$

Приведенная погрешность нуля (в %) датчика силы ЕДС-6 составит:

$$\gamma_{02} := \frac{\Delta a_2}{\max(f_2) - \min(f_2)} \cdot 100 \quad \gamma_{02} = 0.27 \quad \%$$

Неопределенность коэффициента b_2 (чувствительности) датчика ЕДС-6 может быть оценена из выражения:

$$\Delta b_2 := t_{pd} \cdot s_{b2} \quad \Delta b_2 = 0.995 \quad \Gamma\text{ц/кг}$$

Относительная погрешность чувствительности датчика ЕДС-6 составит (%):

$$b_2 := A_1 \quad \gamma_{s2} := \frac{\Delta b_2}{|b_2|} \cdot 100 \quad \gamma_{s2} = 0.485 \quad \%$$

Выводы:

Номинальное уравнение преобразования емкостного датчика силы ЕДС-6 имеет вид:

$$f_2 := 2197.532 - 205.274m_2$$

Погрешность линейности датчика не превышает 0.5 %. Гистерезис существенно ниже уровня случайных погрешностей нуля и чувствительности (на фоне случайных погрешностей он не проявляется).

Приведенная погрешность нуля (при доверительной вероятности $p=0.95$) составляет:

$$\gamma_{02} = 0.27 \quad \%$$

Погрешность чувствительности (при доверительной вероятности $p=0.95$) составляет:

$$\gamma_{s2} = 0.485 \quad \%$$