

**ФГБОУ ВО СТАВРОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

***Кафедра «Машины и технологии АПК»***

В.И. Марченко, Д.А. Сидельников, В.И. Кузьминов

**ОДНОФАКТОРНЫЙ ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ.  
ТАРИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ЗВЕНА С ПОМОЩЬЮ  
АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Методические указания по выполнению практико-ориентированной работы для бакалавров вузов, обучающихся по направлению: 23.04.03 - Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 35.04.06 – Агроинженерия

Ставрополь  
2019

**УДК 637.1.022(076)**  
**ББК 36.95я7**  
**М30**

**Рецензент**  
**доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО ДГАУ**  
**Азово-Черноморский государственный инженерный институт,**  
**г. Зерноград**  
**И.Н. Краснов**

**Марченко В.И., Сидельников Д.А., Кузьминов В.И.**

Однофакторный дисперсионный анализ. Тарировка тензометрического звена с помощью аналого-цифрового преобразователя / В.И. Марченко, Д.А. Сидельников, В.И. Кузьминов; Ставропольский государственный аграрный университет. – Ставрополь: АГРУС. 2019. – 14 с.

Рассмотрены вопросы выполнения практико-ориентированной работы: тарировки тензометрического звена с помощью аналого-цифрового преобразователя, описана методика проведения однофакторного эксперимента.

Предназначена для бакалавров вузов, обучающихся по направлению: 23.04.03 - Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 35.04.06 – Агроинженерия.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

## Тема: Тарировка тензометрического звена с помощью аналого-цифрового преобразователя. Однофакторный эксперимент

1. Цель работы:

1.1. Ознакомится с проведением тарировки тензометрического звена.

1.2. Изучить лабораторную установку и подготовить ее к проведению эксперимента.

1.3. Выполнить тарировку тензометрического звена (провести эксперимент).

1.4. Заполнить журнал наблюдений, обработать экспериментальные данные.

2. Оборудование рабочего места.

2.1. Лабораторная установка: компьютер Pentium (R) CPU 3.00 GHz 2.99ГГц; аналого-цифровой преобразователь **Zet-210 «Sigma USB»**, кабель HighSpeed USB2.0; разъем **DB-25**; клеммная колодка; усилитель **TDA**.

2.2. Разновесы (гири) 5шт. по 10кг.

2.3. Микрокалькулятор.

### I. Характеристика рабочего оборудования

*1. Аналого-цифровой преобразователь Zet-210 Sigma USB.* предназначен для измерения параметров сигналов в широком частотном диапазоне (с частотой дискретизации до 500 кГц), поступающих с различных первичных преобразований. Модуль функционирует в режиме непрерывного **ввода/вывода** аналоговых и цифровых сигналов в память персонального компьютера с возможностью цифровой обработки сигналов. Оцифровывание выбранных каналов происходит последовательной коммутацией ключей с использованием одного аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Аналого-цифровой преобразователь **Zet-210 «Sigma USB»**, позволяет подключать и обрабатывать разнородные источники сигналов с различными частотными диапазонами и проводить сравнительный анализ.

Цифровой **ввод/выход** используется для контроля и управления дискретными элементами: реле переключатели, концевые датчики. Модуль может быть использован автономно в качестве контроллера для систем сбора и обработки сигналов, управления различными устройствами и исполнительными механизмами.

### *Технические характеристики АЦП*

Параметр	Значение параметра
<b>Аналоговый вход</b>	
Количество входных каналов	8 дифференцированных
Частота преобразований	до 500 кГц
Количество разрядов АЦП	16
Максимальное входное напряжение	$\pm 7$ В
Динамический диапазон	84 дБ
Входное сопротивление	2 кОм
<b>Аналоговый выход</b>	
Количество выходных каналов	2
Частота преобразования вход	до 500 кГц
Максимальное выходное напряжение	$\pm 2,5$ В
Максимальный выходной ток	10 мА
Количество разрядов АЦП	16

### *Устройство прибора*

Аналого-цифровой преобразователь **Zet-210 «Sigma USB»**, является переносным прибором, который подключается к ПЭВМ кабелем HighSpeed USB2.0. Интерфейс HighSpeed USB2.0 служит для быстрой передачи данных между прибором и компьютером, а также для питания прибора.

Аналоговый **вход/выход** (разъем **DB-25**) является входами аналого-цифрового и выходами цифро-аналогового преобразователей.

### *Программное обеспечение*

Базовое обеспечение **ZetLab**:

- вольтметры переменного и постоянного тока;
- амперметры постоянного и переменного тока;
- многоканальный осциллограф;
- частотомер, фазометр, тахометр, омметр;
- программы тензометрических и термометрических измерений;
- программа просмотра результатов измерений;
- программа генерации сигналов различной формы.

### *Системные требования*

1. Процессор Intel®, Pentium® или совместимый с ними, с тактовой частотой 1,7 ГГц;
2. Операционная система Microsoft® Windows® XP с пакетом обновлений SP1 или SP2;
3. Наличие интерфейса HighSpeed USB2.0.
4. Оперативная память – не менее 512 Мб.

5. Свободное место на диске – не менее 200 Мб.
6. Видеокарта с 3D- графическим ускорителем, не менее 32 Мб памяти.
7. Привод CD-ROM для установки программ.

**2. Усилитель DTA** используется в качестве усилителя сигналов в системах измерения, обработки и управления различными устройствами и исполнительными механизмами.

#### *Технические характеристики усилителя DTA*

Параметр	Значение параметра
<b>Вход</b>	
Количество каналов	2 дифференциальных
Частота входного сигнала	до 100 кГц
Максимальное входное напряжение	±5 В
Ток питания пассивных датчиков	4 мА (12 В)
Напряжение питания активных датчиков	5 В
<b>Выход на АЦП</b>	
Количество каналов	2
Выходное напряжение	±5 В
Выходной ток	до 15 мА
<b>Общие характеристики</b>	
Подключаемые датчики	мостовые, полумостовые, четверть мостовые тензодатчики, термосопротивления, термопары, пьезорезисторные датчики
Коэффициент усиления	1, 10, 100, 1000

#### *Устройство прибора*

Предварительный усилитель **DTA** является переносным прибором, который подключается к входным каналам **АЦП** и выходным каналам генератора (например, к модулю «**Sigma USB**»). Питание прибора может осуществляться от интерфейса **USB** ПЭВМ или от внешнего источника питания +5В.

Разъем **DB-15 (ВХОД1/ВХОД2)** предназначен для ввода аналоговых сигналов с подключаемых измерительных схем, а также для питания этих схем.

#### *Подготовка прибора к работе*

Перед началом работы необходимо подключить предварительный усилитель **DTA** кабелем **USB**, входящим в комплект поставки к ПЭВМ, скоммутировать выход предварительного усилителя с входами **АЦП**, подключить к входам прибора используемые датчики, установить необходимый коэффициент пере-

дачи тракта. Коэффициент передачи на каждом из входных каналов устанавливается микропереключателями, расположенными рядом с входным разъемом **DB-15** на передней панели усилителя. Микропереключатель для первого входного канала (**КУ1**) находится слева от разъема **DB-15 (ВХОД1/ВХОД2)**, для второго справа.

## II. Методика проведения эксперимента

### 1. Назначение программы Тензодатчик

Программа Тензодатчик предназначена для измерения усилия с помощью тензорезисторов. Программа работает как в реальном времени, так и по записям оцифрованных сигналов.

**Тензометрия** (от лат. *tensus* - напряжённый, натянутый и греч. *metreo* - измеряю) - экспериментальное определение напряжённого состояния конструкций, основанное на измерении местных деформаций. При механической деформации материала его электрическое сопротивление изменяется. Этот эффект называется тензорезистивным эффектом. На основе этого эффекта реализованы тензодатчики, реагирующие на механическое напряжение  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{F}{\alpha} = E \frac{dl}{l}, \quad (1)$$

где  $E$  - модуль Юнга материала;  $F$  - приложенная сила, Н;  $dl/l = e$  - относительная деформация материала.

Рассмотрим цилиндрический проводник (провод), который растягивается с силой  $F$ . Объем провода  $\nu$  остается постоянным, при этом сечение уменьшается и длина увеличивается. Сопротивление проводника можно записать в виде:

$$R = \rho \cdot \frac{l^2}{\nu}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - удельное сопротивление материала, Ом/м;

$\nu$  - объем провода, м<sup>3</sup>.

После дифференцирования получим выражение для определения чувствительности сопротивления к удлинению провода:

$$\frac{dR}{dl} = 2 \cdot \frac{\rho}{\nu} \cdot l. \quad (3)$$

Чувствительность повышается при увеличении длины провода и его удельного сопротивления и уменьшается при увеличении сечения провода. Относительное изменение сопротивления провода в зависимости от относительной деформации  $e$  можно записать в виде:

$$\frac{dR}{R} = S_k \cdot e, \quad (4)$$

где  $S_k$  - коэффициент тензочувствительности. Для металлических проводов он лежит в пределах 2...6, а для полупроводников – 20...200.

Например, рассмотрим тензосопротивление со следующими характеристиками представленными в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики тензосопротивления материалов

Чувствительность ( $S_k$ ):	2,0
Материал подложки	полиамид
Измерительная решетка	константовая фольга
База (длина измерительной решетки), мм	20; 50; 100; 150
Температурный коэффициент чувствительности 1/К	$115 \cdot 10^{-6}$
Температурный диапазон эксплуатации, °С	-70...+200 статические измерения -200...+200 динамические измерения
Номинальное сопротивление, Ом	120; 350; 700; 1000

На рисунке 1 представлены некоторые формы измерительных решеток тензорезисторов

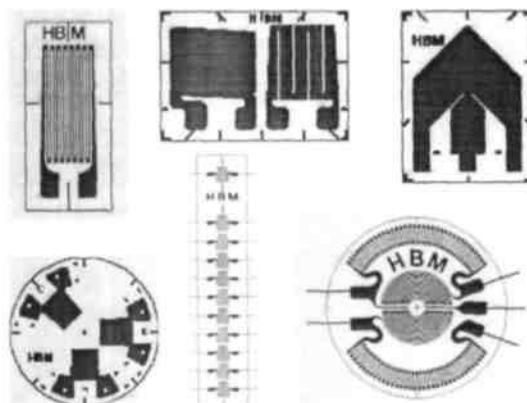


Рисунок 1 – Формы измерительных решеток тензорезисторов

Рассмотрим тензометрическую пластину для измерения усилия резания, основанную на измерении прогиба конца балки, закрепленной с одной стороны на одной опоре (рис.2).

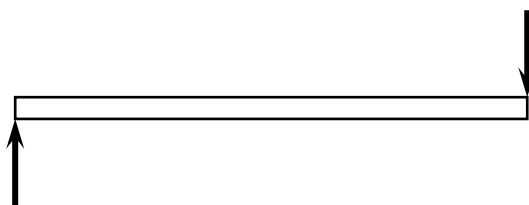


Рисунок 2 – Схема действия силы на тензометрическую балку

Прогиб балки  $\lambda$  равен:

$$\lambda = \frac{Fl^3}{(48 \cdot EI)}, \quad (6)$$

где  $F$  - приложенная сила в середине балки, Н;

$l$  - длина балки, м;

$I$  - момент инерции поперечного сечения балки.

Если поперечное сечение балки имеет форму прямоугольника с шириной  $a$  и высотой  $b$ , то

$$I = 1/12 \cdot ab^3. \quad ()$$

Для кругового поперечного сечения радиуса  $r$ :

$$I = 1/4 \cdot \pi \cdot r^4. \quad ()$$

Радиус изгиба балки ( $R$ ) составит:

$$R = \frac{4Fl}{Fl}. \quad ()$$

Если на нижнюю сторону балки прямоугольного сечения наклеить тензорезистор, то относительная деформация  $e$  резистора будет равна:

$$e = \frac{3Fl}{2Fab^2}. \quad ()$$

Пусть стальная балка имеет сечение  $a = b = 1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$  и длину  $l = 10 \text{ см} = 10^{-1} \text{ м}$ , тогда стрела прогиба  $\lambda = 1 \text{ мм}$  будет соответствовать усилию  $F = 8000 \text{ Н}$ , что соответствует весу массы 800 кг. Относительная деформация тензорезистора наклеенного на нижнюю сторону балки будет составлять 0,006 и относительное изменение сопротивления 0,012. Для создания тензозвена имеющего разрешающую способность 1 кг, необходимо регистрировать относительное изменение сопротивления до  $10^{-5}$ .

В таблице 1.2 приведены модуль Юнга и пределы прочности для некоторых материалов.

Таблица 1.2 – Характеристика материалов

Материал	Модуль Юнга, $10^9 \text{Н/м}^2$	Предел прочности, $10^7 \text{Н/м}^2$
Сталь	196	127
Железо	186	33
Медь	120	24
Латунь	102	35
Алюминий	68	7,8
Свинец	1,7	1,5

При измерении сопротивления тензорезистора используют мостовую (рис.3) или полумостовую (делитель напряжения) схему подключения (рис.4, 5). В качестве сопротивлений  $R_1 - R_3$  обычно используется такие же тензорезисторы, как и измерительный, только наклеенные на балку в поперечном направлении, нечувствительном к деформации. Это связано в первую очередь с высоким температурным коэффициентом сопротивления тензорезистора. В данном примере при изменении температуры на  $1^\circ$  относительное сопротивление изменится на  $10^{-4}$ , что соответствует ошибке в измерении веса 10 кг. При использовании в качестве  $R_1 - R_3$  таких же тензорезисторов, находящихся в тех же условиях, что и измерительный тензорезистор, существенно упрощается термокомпенсация мостовой схемы. Для этого необходимо использовать 6-ти проводную схему измерения. Одна пара проводов служит для питания моста, другая пара проводов служит для измерения подаваемого напряжения, третья пара – для измерения разности потенциалов в мостовой схеме.

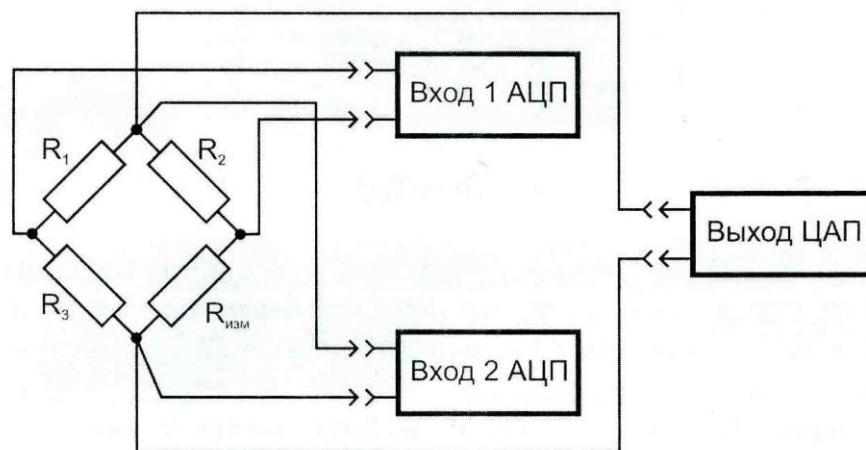


Рисунок 3 – Мостовая схема подключения тензорезистора к АЦП

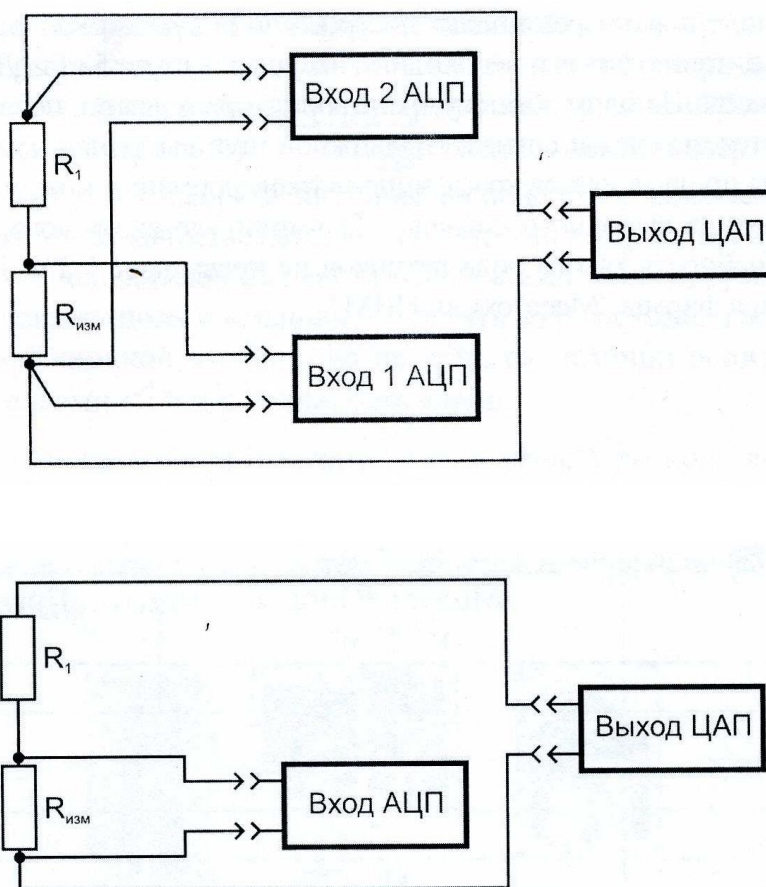


Рисунок 4 – Полумостовые схемы подключения тензорезистора к АЦП

Рассмотрим мостовую схему с датчиками 120 Ом. При питании схемы напряжением 1,2 В, ток проходящий по каждому резистору будет составлять 5 мА. При нулевой нагрузке разность потенциалов в мостовой схеме  $V_{\text{мм}}$  будет равна нулю, при максимальной нагрузке 800кг – 3 мВ. В полумостовой схеме измерения при нулевой нагрузке разность потенциалов будет равна 600 мВ, при максимальной нагрузке - 603 мВ. Изменению веса на 1кг соответствует изменение напряжения на 10 мкВ. При проведении измерений разности потенциалов с помощью АЦП в мостовой схеме необходимо использовать 14...16 разрядный АЦП. В полумостовой схеме – 18...20 разрядный АЦП.

#### Методика проведения эксперимента.

1. Включить лабораторную установку.
2. Нагрузить противорезиющую пластину усилием от 0 до 50кг, с шагом 10кг методом «нагрузки-разгрузки». Каждому значению приложенной нагрузки определить показания вольтметра на осциллографе.
3. Обработать полученные экспериментальные данные, используя метод корреляции и метод наименьших квадратов.
4. Определить коэффициент уравнения для тарировки тензометрического звена, нанести экспериментальные точки построить тарировочный график.

Для измерения деформации наиболее часто пользуются проволочными тензорезисторами на бумажной основе, которые применяются для измерения относительной деформации от 0,005 до 2%.

Устройство наиболее распространенного типа наклеиваемого проволочного тензорезистора изображено на рис.1. На полоску такой бумаги 1 наклеивается так называемая решетка из зигзагообразно уложенной тонкой проволоки 2 из нихрома диаметром 0,02... 0,05 мм. К концам проволоки присоединяется спайкой выводные проводники 3.

В основе работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, заключающегося в изменении активного сопротивления проводников при их механической деформации. Характеристикой тензоэффекта материала является коэффициент относительной тензочувствительности  $K$ , определяемый как отношение относительного изменения сопротивления к относительному изменению длины проводника (рис. 1б):

$$K = \frac{\varepsilon_R}{\varepsilon_l}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_R = \frac{\Delta R}{R}$  – относительное изменение сопротивления проводника;

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$$

– относительное изменение длины проводника.

Значение коэффициента тензочувствительности  $K$  для большинства металлов не выходит за пределы 1,48...1,8.

Такой преобразователь, будучи наклеен к испытываемой детали, воспринимает деформацию его поверхностного слоя. Таким образом, естественной входной величиной тензометрического преобразователя является деформация поверхностного слоя детали, на которую он наклеен, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорционально этой деформации. Измерительной базой преобразователя является длина детали, заклеенная проволокой. Наиболее часто используются тензометрические преобразователи с базой от 5 до 20мм, обладающие сопротивлением 50...200Ом.

Для измерения величины изменения сопротивления тензорезисторы обычно включаются в мостовую или полумостовую схемы.

Измерительные цепи тензорезисторов весьма разнообразны, но преимущественно распространения получили приборы с усилителями на несущей ча-

стоте типа 8.АНЧ-7, ИДЦ-1, ЦТМ-5, а в последнее время АЦП (аналогово-цифрового преобразователя).

На рис. 4 схематически изображен наиболее применяемый упругий преобразователь с входной величиной в виде сосредоточенной силы сопротивления резанию стеблей соломы и выходной – в виде линейного перемещения или деформации консольной балки.

В современной теории измерений понятию порога чувствительности придается количественный смысл: малейшее изменение показаний прибора, вызванные наименьшим значением измеряемой величины невозможно отличить от помех до тех пор, пока они не станут больше этих помех.

Корреляция – математический прием, позволяющий дать числовую оценку степени взаимной связи между явлениями. Оценивается коэффициент корреляции  $r_{xy} = 0...1$ .

Если  $r_{xy} \geq 0,5$  – явления взаимосвязаны.

Если  $r_{xy} < 0,5$  – явления не взаимосвязаны и дальнейшее проведение исследований не имеет смысла.

Определяется корреляция из выражения:

$$r_{xy} = \frac{\sum \Delta \bar{x} \cdot \Delta \bar{y}}{\sigma_{\Delta x} + \sigma_{\Delta y}}, \quad (2)$$

где  $\Delta x$  – текущие значения, отклонение среднего значения;

$$\Delta x = \bar{x}_i - \bar{x}; \quad \Delta y = \bar{y}_i - \bar{y}, \quad (3)$$

$\bar{x}$ ,  $\bar{y}$  – среднее значение отклонений;

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}, \quad (4)$$

$\sigma_{\Delta x}$ ,  $\sigma_{\Delta y}$  – среднеквадратичные отклонения;

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta x)^2}{n-1}}; \quad \sigma_{\Delta y} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta y)^2}{n-1}}, \quad (5)$$

где  $n$  – число опытов;

Для оценки надежности коэффициента корреляции вычисляют ошибку коэффициента корреляции:

$$m_r = \frac{1 - r_{xy}^2}{\sqrt{n}}. \quad (6)$$

Значение коэффициента корреляции считаются вполне надежными если выполняется неравенство:

$$r_{xy} \geq 3m_r. \quad (7)$$

Отклонение луча на осциллографе прямо пропорционально приложенной к противорежущей пластине нагрузке, что описывается уравнением прямой:

$$y = Ax + C; \quad L = AP + C$$

Для определения коэффициента уравнения  $A$  и  $C$  необходимо решить систему уравнений.

$$\begin{cases} A \cdot S_3 + C \cdot S_1 = S_4 \\ A \cdot S_1 + C \cdot n = S_2 \end{cases}$$

где  $S_1$  – сумма данных аргументов;

$S_2$  – сумма данных функции;

$S_3$  – сумма квадратов аргумента;

$S_4$  – сумма произведений аргумента и функции.

Показания заносим в таблицы 1 и 2.

Таблица 1.

$x$	$y$	$\Delta x$	$\Delta y$	$\Delta x \Delta y$	$(\Delta x)^2$	$(\Delta y)^2$
0						
10						
20						
30						
40						
50						
$\Sigma 150$		x	x			

Замечание: В нашем случае аргументу  $x$  соответствует приложенная к противорежущей пластине нагрузка  $P$  (кг), а функции  $y$  – отклонения луча на осциллографе  $L$  (мм).

Таблица 2.

№ опыта	Усилие $P$ , кг	Отклонение луча, мм			$P^2$	$L \cdot P$
		$L_1$	$L_2$	$L$		
1	0					
2	10					
3	20					
4	30					

5	40					
6	50					
$n=6$	$S_1=150$			$S_2=$	$S_3=$	$S_4=$

Затем строим тарифовочный график

В.И. Марченко, Д.А. Сидельников, В.И. Кузьминов

**ОДНОФАКТОРНЫЙ ДИСПЕРСИОННЫЙ АНАЛИЗ.  
ТАРИРОВКА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО ЗВЕНА  
С ПОМОЩЬЮ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Методические указания по выполнению лабораторной работы для студентов вузов, обучающихся по направлению: 23.04.03 - Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов; 35.04.06 – Агроинженерия