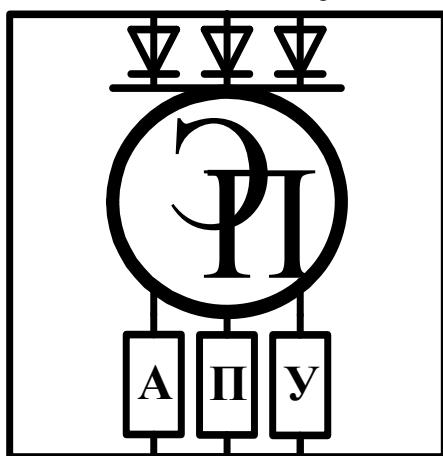


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА В МЕХАТРОНИКЕ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
дневной формы обучения*



Могилев 2025

УДК 629.113:004.65

ББК 39.33:32.973

И74

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «29» августа 2025 г.,
протокол № 1

Составитель канд. техн. наук, доц. Л. Г. Черная

Рецензент Е. В. Ильюшина

Методические рекомендации к практическим занятиям предназначены для студентов направления подготовки 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» дневной обучения формы. Изложена методика расчета и определения основных характеристик информационных устройств, применяемых в мехатронике робототехнических систем.

Учебное издание

ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА В МЕХАТРОНИКЕ

Ответственный за выпуск

А. С. Коваль

Корректор

А. А. Подошевко

Компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

Подписано в печать

. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.

Печать трафаретная. Усл. печ. л.

. Уч.-изд. л.

. Тираж 26 экз. Заказ №

Издатель и полиграфическое исполнение:

Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.

Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

Содержание

Введение.....	4
1 Практическое занятие № 1. Определение доверительного интервала и доверительной вероятности измерений	5
2 Практическое занятие № 2. Определение необходимого числа измерений для получения требуемой точности.....	8
3 Практическое занятие № 3. Определение частоты опроса датчиков.....	10
4 Практическое занятие № 4. Расчет вероятности безотказной работы приборов и датчиков.....	12
5 Практическое занятие № 5. Расчет действительных значений измеряемых величин в физических единицах измерения по кодам АЦП.....	16
6 Практическое занятие № 6. Экспериментальное определение значений функции преобразования измерительного канала информационно-измерительной системы.....	21
7 Практическое занятие № 7. Преобразование экспериментальных данных в аналитическую функцию.....	24
8 Практическое занятие № 8. Определение информационной пропускной способности канала измерения.....	26
Список литературы.....	29

Введение

Практические занятия по дисциплине «Информационные устройства в мехатронике» облегчают восприятие и понимание основных теоретических положений, способствуя их более глубокому усвоению.

Методические рекомендации соответствуют программе курса «Информационные устройства в мехатронике». Они служат основой для самостоятельной подготовки и проведения аудиторных, практических занятий и предназначены для получения навыков определения: доверительного интервала и доверительной вероятности измерений, необходимого числа опросов датчиков, функции преобразования измерительного канала, основных характеристик информационных устройств, применяемых в мехатронике робототехнических систем с последующим оформлением и анализом результатов, а также предусматривают изучение теоретического материала по учебной и справочной литературе, веб-страниц сайтов сети Интернет.

1 Практическое занятие № 1. Определение доверительного интервала и доверительной вероятности измерений

Цель занятия: получение навыков расчета доверительного интервала и доверительной вероятности.

Задание

1 Определить доверительную вероятность

$$P(-\Delta x < x_i - \bar{x} < \Delta x) = \alpha,$$

если для истинного значения измеряемой величины x_i погрешность измерения этой величины $\Delta x = \pm 0,1$; среднее арифметическое значение, полученное в результате измерений, $\bar{x} = 1,27$; средняя квадратичная погрешность единичного измерений $\sigma = S_n = 0,032$.

$$S_n^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}; \quad S_n = \sqrt{S_n^2},$$

где n – число измерений.

Какова вероятность того, что результат отдельного измерения не выйдет за пределы, определяемые неравенством $1,26 < x_i < 1,28$?

2 Определить доверительный интервал Δx , чтобы примерно 98 % результатов измерений попадали в него, т. е доверительная вероятность

$$P(\bar{x} - \Delta x < x_i < \bar{x} + \Delta x) = 0,98,$$

если для истинного значения измеряемой величины x_i среднее арифметическое значение, полученное в результате измерений, $\bar{x} = 1,27$; средняя квадратичная погрешность измерений $\sigma = 0,032$.

Методические указания по выполнению задания

1 Обозначим истинное значение измеряемой величины через x_i , погрешность измерения этой величины Δx , среднее арифметическое значение, полученное в результате измерений, будет \bar{x} . Пусть α означает вероятность того, что результат измерений отличается от истинного значения на величину не большую, чем Δx .

Это принято записывать в виде

$$P(-\Delta x < x_i - \bar{x} < \Delta x) = \alpha \tag{1.1}$$

или

$$P(\bar{x} - \Delta x < x_i < \bar{x} + \Delta x) = \alpha. \quad (1.2)$$

Вероятность α называется *доверительной вероятностью*, или коэффициентом надежности. Интервал значений от $\bar{x} - \Delta x$ до $\bar{x} + \Delta x$ называется *доверительным интервалом*.

Выражение (1.1) означает, что с вероятностью, равной α , истинное значение измеряемой величины не выходит за пределы доверительного интервала от $\bar{x} - \Delta x$ до $\bar{x} + \Delta x$. Разумеется, чем большей надежности мы требуем, тем большим получается соответствующий доверительный интервал, и, наоборот, чем больший доверительный интервал задаем, тем вероятнее, что результаты измерений не выйдут за его пределы.

Итак, для характеристики величины случайной ошибки необходимо задать два числа, а именно: величину самой ошибки (или доверительного интервала) и величину доверительной вероятности. Указание одной только величины ошибки без указания соответствующей ей доверительной вероятности в значительной мере лишено смысла, т. к. при этом не знаем, сколь надежны наши данные. Знание доверительной вероятности позволяет оценить степень надежности полученного результата. Необходимая степень его надежности опять-таки задается характером производимых измерений. Более высокая степень надежности, требуемая при ответственных измерениях, означает, что при их производстве нужно выбирать большой (волях σ) доверительный интервал. Иначе говоря, для получения той же величины ошибки Δx следует производить измерения с большей точностью, т. е. нужно тем или иным способом уменьшить в соответствующее число раз величину σ . Одна из возможностей такого увеличения состоит в многократном повторении измерений.

При обычных измерениях можно ограничиться доверительной вероятностью 0,9 или 0,95.

Для измерений, по условиям которых требуется чрезвычайно высокая степень надежности, иногда задают доверительную вероятность 0,997. Большая величина доверительной вероятности в подавляющем большинстве измерительных задач не требуется.

Удобство применения стандартной ошибки в качестве основного численного выражения погрешности наблюдений заключается в том, что этой величине соответствует вполне определенная доверительная вероятность, равная 0,68 (здесь и дальше полагаем, что ошибки распределены по нормальному закону). Для любой величины доверительного интервала по формуле Гаусса может быть рассчитана соответствующая доверительная вероятность. Эти вычисления были проделаны и их результаты сведены в таблицу 1.1.

Приведем примеры пользования таблицей 1.1 для определения доверительной вероятности α .

Пусть для некоторого ряда измерений получили $x = 1,27$, $\sigma = 0,032$. Какова вероятность того, что результат отдельного измерения не выйдет за пределы, определяемые неравенством $1,26 < x_i < 1,28$?

Таблица 1.1 – Доверительные вероятности α для доверительного интервала, выраженного в долях средней квадратичной ошибки $\varepsilon = \Delta x / \sigma$

ε	α	ε	α	ε	α
0,0	0,0	1,3	0,80	2,8	0,995
0,05	0,04	1,4	0,84	2,9	0,996
0,10	0,08	1,5	0,87	3,0	0,997
0,15	0,12	1,6	0,89	3,1	0,9981
0,20	0,16	1,7	0,91	3,2	0,9986
0,30	0,24	1,8	0,93	3,3	0,9990
0,40	0,31	1,9	0,94	3,4	0,9993
0,50	0,38	2,0	0,95	3,5	0,9995
0,60	0,45	2,1	0,964	3,6	0,9997
0,70	0,51	2,2	0,972	3,7	0,9998
0,80	0,57	2,3	0,978	3,8	0,99986
0,90	0,63	2,4	0,984	3,9	0,99990
1,00	0,68	2,5	0,988	4,0	0,99993
1,10	0,73	2,6	0,990		
1,2	0,77	2,7	0,993		

Доверительные границы Δx установлены в $\pm 0,01$, что составляет (в долях σ) $\varepsilon = \Delta x / \sigma = 0,01 : 0,032 = 0,31$.

Из таблицы 1.1 находим, что доверительная вероятность для $\varepsilon = 0,3$ равна 0,24.

Приблизительно 1/4 измерений уложится в интервал ошибок $\pm 0,01$.

Определим теперь, какова доверительная вероятность для границ $1,20 < x_i < 1,34$. Значение этого интервала, выраженное в долях σ , будет $\varepsilon = \Delta x / \sigma = 0,07 / 0,032 \approx 2,2$.

По таблице 1.1 находим значение α для $\varepsilon = 2,2$, оно равно 0,97. Результаты приблизительно 97 % всех измерений будут укладываться в этот интервал.

2 Какой доверительный интервал нужно выбрать для тех же измерений, чтобы примерно 98 % результатов попадали в него? Из таблицы 1.1 находим, что значению $\alpha = 0,98$ соответствует значение $\varepsilon = 2,4$. Следовательно, $\Delta x = \sigma \cdot \varepsilon = 0,032 \cdot 2,4 \approx 0,08$ и указанной доверительной вероятности соответствует интервал $1,27 - 0,08 < x_i < 1,27 + 0,08$, или $1,19 < x < 1,35$. Иногда этот результат записывают в виде $x_i = (1,27 \pm 0,08)$ с доверительной вероятностью 0,98.

Оформление результатов выполнения задания

- 1 Номер и тема практического занятия.
- 2 Цель занятия.
- 3 Задание.
- 4 Расчетные формулы с пояснениями.
- 5 Таблица 1.1.
- 6 Полученные значения доверительной вероятности и доверительного интервала.
- 7 Выводы.

2 Практическое занятие № 2. Определение необходимого числа измерений для получения требуемой точности

Цель занятия: приобретение навыков определения необходимого числа измерений для получения требуемой точности.

Задание

Диаметр шарика измеряется с помощью микрометра, имеющего погрешность $\delta = 1 \text{ мкм}$. Средняя квадратичная погрешность единичного измерения $S_n = 2,3 \text{ мкм}$. Сколько измерений нужно проделать, чтобы ошибка Δx не превышала $1,5 \text{ мкм}$ с надежностью $a = 0,95$?

Методические указания по выполнению задания

Погрешность измерения – это отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Под истинным значением измеряемой величины принято считать:

- среднюю арифметическую величину ряда измерений;
- известное эталонное значение;
- величину, полученную в результате более точных (не менее чем на порядок) измерений.

Погрешности бывают случайные и систематические.

Случайная погрешность – это погрешность, которая в отдельных измерениях может принимать случайные, заранее конкретно неизвестные значения. Случайные погрешности обязаны своим происхождением ряду как объективных, так и субъективных факторов, действие которых неодинаково в каждом опыте и не может быть учтено. Случайные погрешности различаются в отдельных измерениях, сделанных в одинаковых условиях одними и теми же измерительными приборами. Исключить случайные погрешности нельзя. Можно только оценить их значение.

Случайные погрешности определяются по законам теории ошибок, основанной на теории вероятностей.

Систематическая погрешность – это погрешность, вызванная факторами, действующими одинаковым образом при многократном повторении одних и тех же измерений с помощью одних и тех же измерительных приборов.

Для уменьшения случайной ошибки результата могут быть использованы два пути: улучшение точности измерений, т. е. уменьшение величины среднеквадратичного отклонения, и увеличение числа измерений, т. е. использование соотношения.

Пусть систематическая ошибка измерений, определяемая классом точности прибора или другими аналогичными обстоятельствами, будет δ .

Известно, что уменьшать случайную ошибку целесообразно только до тех пор, пока общая погрешность измерений не будет полностью определяться систематической ошибкой. Для этого необходимо, чтобы доверительный

интервал, определенный с выбранной степенью надежности, был бы существенно меньше величины систематической ошибки. Иначе говоря,

$$\Delta x \leq \delta. \quad (2.1)$$

Разумеется, нужно условиться, какой степени надежности α мы требуем и какую величину для случайной ошибки следует считать допустимой, т. е. какое соотношение величин Δx и δ можно считать удовлетворяющим условию (2.1).

Практически обычно можно удовлетвориться требованием $\Delta x \leq \delta/3$ или даже $\Delta x \leq \delta/2$.

Надежность α , с которой хотим установить доверительный интервал, в большинстве случаев не должна превышать 0,95, хотя иногда требуются и более высокие значения α . Для оценки необходимого числа измерений воспользуемся таблицей 2.1, в которой Δx дано в долях средней квадратичной ошибки.

Для решения предложенного задания положим $\Delta x = \delta/2 = 0,5$ мкм, для $S_n = 2,3$ мкм найдем ε :

$$\varepsilon = \Delta x / S_n = 0,5 / 2,3 = 0,22.$$

Таблица 2.1 – Необходимое число измерений для получения случайной ошибки ε с надежностью α

$\varepsilon = \Delta x / \sigma = \Delta x / S_n$	α					
	0,5	0,7	0,9	0,95	0,99	0,999
1,0	2	3	5	7	11	17
0,5	3	6	13	18	31	50
0,4	4	8	19	27	46	74
0,3	6	13	32	46	78	130
0,2	13	29	70	100	170	280
0,1	47	110	270	390	700	1100
0,05	180	430	1100	1500	2700	4300
0,01	4500	1100	27000	38000	66000	110000

Из таблицы 2.1 находим в колонке $\alpha = 0,95$ следующие значения: $n = 46$ для $\varepsilon = 0,3$ и $n = 100$ для $\varepsilon = 0,2$. Составив соответствующую пропорцию, легко рассчитать, что $n \approx 57$ для $\varepsilon = \Delta x / S_n = 0,22$.

Необходимо сделать около 60 измерений, чтобы случайная ошибка изменила общую погрешность результата измерений не более, чем в 1,5 раза.

Оформление результатов выполнения задания

- 1 Номер и тема практического занятия.
- 2 Цель занятия.
- 3 Задание.
- 4 Расчетные формулы с пояснениями.
- 5 Таблица 2.1.

6 Определение необходимого числа измерений.

7 Выводы.

3 Практическое занятие № 3. Определение частоты опроса датчиков

Цель занятия: освоить методику расчета частоты опроса технологических параметров.

Задание

Определить период опроса датчиков по экспериментальным данным.

На рисунке 3.1 представлена кривая реализации случайного процесса $X(t)$.

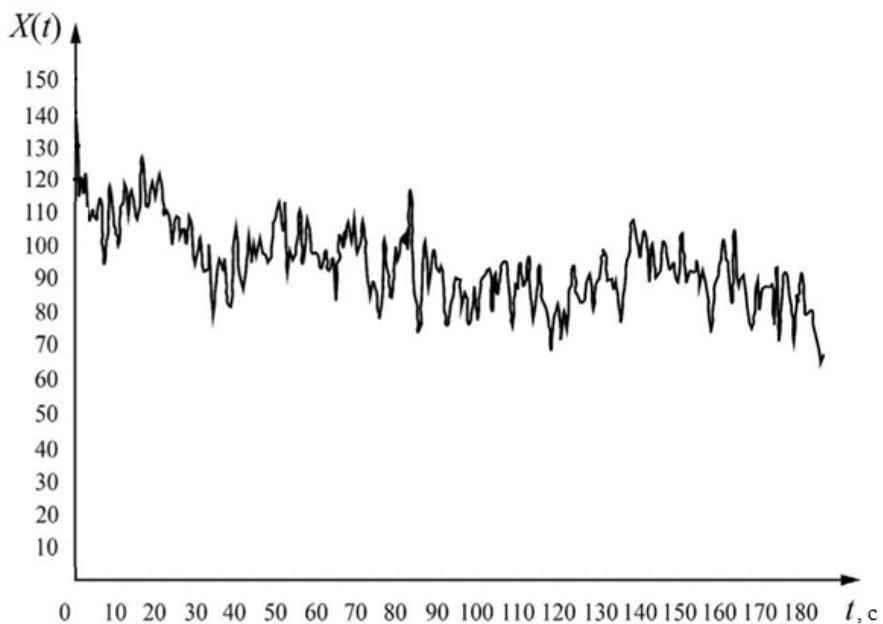


Рисунок 3.1 – Кривая реализации случайного процесса

Методические указания по выполнению задания

Вопрос выбора необходимой частоты опроса датчиков возникает при создании информационно-измерительных систем на стадии разработки.

Завышенная частота опроса ведет к усложнению системы дискретного контроля и повышению загрузки вычислительной части компьютера.

Заниженная частота опроса практически может свести к нулю результаты дискретного контроля, поскольку при этом невозможно проследить с необходимой точностью за изменением контролируемой величины.

Методика расчета частоты (периода) опроса датчиков заключается в следующем.

1 Определяем шаг дискретизации случайного процесса Δt , с.

На реализации случайного процесса $X(t)$ проводим линию математического ожидания $M_x = \text{const}$ (равно среднему арифметическому из ординат процесса) (рисунок 3.2).

$$M_x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X(t_i), \quad (3.1)$$

N – число дискретных значений ординат случайного процесса, по которому определяется оценка математического ожидания M_x .

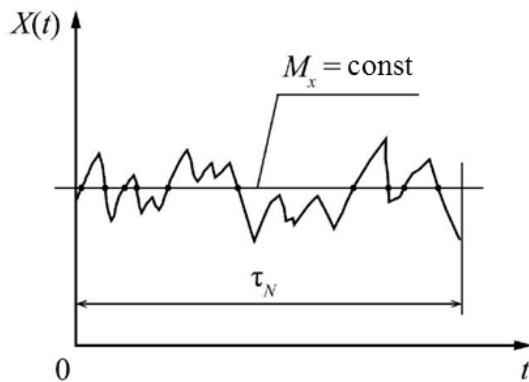


Рисунок 3.2 – График реализации случайного процесса $X(t)$

Подсчитываем число N пересечений процессом линии своего математического ожидания ($N \geq 100$). Принимаем $N = 100$ и определяем время τ_N , в течение которого произошло N пересечений.

Определяем среднее число нулей (пересечений случайным процессом линии своего математического ожидания) в единицу времени.

$$n_{CP} = \frac{N}{\tau_N}. \quad (3.2)$$

Определяем искомое значение шага дискретизации $\Delta\tau$. Для случайного процесса с монотонными спектральными характеристиками $\Delta\tau$ определяем по формуле

$$\Delta\tau = 0,15/n_{CP}. \quad (3.3)$$

Если время между двумя пересечениями случайным процессом линии математического ожидания условно назвать полупериодом, то данная формула рекомендует выбирать шаг так, чтобы в среднем на такой полупериод приходилось около семи ординат случайного процесса.

Оформление результатов выполнения задания

- 1 Номер и тема практического занятия.
- 2 Цель занятия.
- 3 Задание.
- 4 Кривая реализации случайного процесса.
- 5 Расчетные формулы с пояснениями.
- 6 Определение частоты (периода) опроса датчиков.
- 7 Выводы.

4 Практическое занятие № 4. Расчет вероятности безотказной работы приборов и датчиков

Цель занятия: получение навыков расчета вероятности безотказной работы приборов и датчиков.

Задание

Определить изменение вероятности безотказной работы электронной схемы, работающей при нормальной температуре, в течение времени $t = 0 \dots 10000$ ч. Исходные данные к расчёту приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные

Номер группы	Наименование	Количество элементов в каждой группе m_j
1	Термисторы (термосопротивления)	3,0
2	Реле	16,5
3	Катушки индуктивности	1,0
4	Транзисторы	5
5	Микросхемы	1
6	Разъемы	40 контактов
7	Пайка	52

Методические указания по выполнению задания

Анализируя схему и конструкцию любого прибора, можно выделить n простейших элементов, внезапный отказ любого из которых приведёт к внезапному отказу прибора в целом. Тогда условием безотказной работы прибора будет отсутствие внезапных отказов у всех без исключения элементов.

Будем считать отсутствие внезапных отказов у элементов событиями независимыми. Тогда вероятность одновременного наступления этих событий, равная произведению их вероятностей, и будет вероятностью отсутствия внезапных отказов у прибора в целом:

$$P_e(t) = P_1(t)P_2(t)\dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (4.1)$$

где $P_i(t)$ – вероятность отсутствия внезапного отказа у i -го элемента.

Связь между вероятностями внезапных отказов прибора и его элементов получим, заменяя $P_e(t) = 1 - Q_e(t)$ и $P_i(t) = 1 - Q_i(t)$, откуда

$$Q_e(t) = 1 - \prod_{i=1}^n [1 - Q_i(t)].$$

Вероятность отсутствия внезапных отказов элементов можно представить в виде

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (4.2)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го элемента при реальной нагрузке и в реальных условиях эксплуатации.

Для типовых элементов (сопротивлений, конденсаторов, полупроводниковых элементов, реле, потенциометров, двигателей и т. п.) данные об интенсивности отказов (так называемые λ -характеристики) приводятся в специальных справочных таблицах или графиках, составленных на основании статистических испытаний больших партий элементов.

Поскольку практически невозможно все виды элементов испытывать при всевозможных комбинациях нагрузок и окружающих условий, то в справочных таблицах для каждого типа элемента даются значения λ_{i0} , установленные для случая номинальной нагрузки и некоторых нормальных условий эксплуатации (температура окружающей среды плюс 20 °C, нормальное давление, влажность 95 %...98 %).

В таблице 4.2 приведены значения λ_{i0} для элементов приборов и датчиков.

Для определения коэффициента λ_i , отвечающего действительным условиям эксплуатации, необходимо взятое из таблицы 4.2 значение λ_{i0} умножить на поправочный множитель a_i , называемый эксплуатационным коэффициентом и учитывающий влияние различных факторов (электрический режим работы элемента, температура окружающей среды, давление, влажность, вибрация, удары и т. п.):

$$\lambda_i = \lambda_{i0} a_i. \quad (4.3)$$

Вероятность отсутствия внезапного отказа у i -го элемента

$$P_i(t) = e^{-\lambda_{i0} a_i t}. \quad (4.4)$$

Таблица 4.2 – Интенсивность отказов элементов приборов и датчиков при нормальной температуре плюс 20 °С и номинальной нагрузке

Элемент	$\lambda_{i0}, 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Эксплуатационный коэффициент a_i
Конденсаторы	3,0	0,08
Переключатели	1,3	0,52
Резисторы	2,2	0,3
Диоды	5,0	0,3
Диодные сборки	5,2	0,35
Транзисторы	10,0	0,65
Микросхемы	10,2	0,55
Варистор	3,4	0,4
Катушки индуктивности	1,0	0,05
Разъемы	0,5 на один контакт	0,06
Дроссели и трансформаторы	0,9 на одну обмотку	0,2
Реле	16,5	0,35
Термисторы (термосопротивления)	3,0	0,08
Предохранители	0,6	0,2
Полупроводниковые сборки	8,4	0,35
Аккумуляторные батареи	6,0	0,4
Зуммер	2,0	0,15
Пайка	0,1	0,04

Общая вероятность отсутствия внезапных отказов

$$P_e(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_{i0} a_i t} = e^{-\Lambda t}, \quad (4.5)$$

где Λ (лямбда большая) – общий коэффициент интенсивности отказов прибора,

$$\Lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_{i0} a_i. \quad (4.6)$$

Если схема прибора содержит группы однотипных элементов, работающих в одинаковом режиме, то вычисление Λ можно вести по формуле

$$\Lambda = \sum_{j=1}^k m_j \lambda_{i0} a_j, \quad (4.7)$$

где k – число групп однотипных элементов;

m_j – число элементов в j -й группе.

Отметим, что общее число элементов в схеме $n = \sum_{j=1}^k m_j$.

Вероятность внезапных отказов прибора

$$Q_e(t) = 1 - P_e(t) = 1 - e^{-\Lambda t}. \quad (4.8)$$

Расчеты по изложенной методике ведутся обычно в следующем порядке.

Составляется перечень электрических элементов, входящих в схему, с указанием режимов их работы. При этом элементом схемы считается любая деталь, узел или соединение, внезапный отказ которого приведет к внезапному отказу прибора. Например, одним из таких элементов считают место припайки провода.

При составлении перечня элементы разбиваются на группы однотипных элементов, работающих в одинаковом режиме. За число паек принимаем число выводов того или иного элемента. Так, у резистора и конденсатора по два вывода, у микросхемы число паек соответствует числу выводов, показанных на принципиальной электрической схеме.

Составляется таблица, в которую заносятся группы элементов, количество элементов в каждой группе m_j , численные значения параметров λ_{i0} и a_j , определенные для каждой группы по справочным данным.

Расчетные данные представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчет коэффициента Λ

Номер группы	Наименование	m_j	λ_{i0}	a_j	$\lambda_{i0}a_jm_j$
1					
2					
...					
k					
$\Lambda = \sum_{j=1}^k \lambda_{j0}a_jm_j$					

Далее, для каждой строки определяют произведение $\lambda_{i0}a_jm_j$ и записывают его в последний столбец. После чего, суммируя все числа последнего столбца, определяют суммарную интенсивность внезапных отказов:

$$\Lambda = \sum_{j=1}^k \lambda_{j0}a_jm_j.$$

Затем окончательно определяют искомые вероятности по формулам для $t = 0 \dots 10000$ ч:

$$P_e = e^{-\Lambda t};$$

$$Q = 1 - e^{-\Lambda t}.$$

Строятся графики $P_B(t)$, $Q_B(t)$.

Пример расчета интенсивности отказов представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Расчет интенсивности отказов

Номер группы	Наименование	m_j	$\lambda_{i0}, 10^{-6}$	a_j	$\lambda_{i0}a_jm_j, 10^{-6}$
1	Резисторы	8	2,2	0,3	5,28
2	Конденсаторы	10	3,0	0,08	2,4
3	Диоды	4	5,0	0,3	6
4	Транзисторы	5	10	0,65	32,5
5	Микросхемы	1	10,2	0,55	5,61
6	Разъемы	20 контактов	0,5	0,06	0,6
7	Пайка	52	0,1	0,04	0,208

Суммируя числа в последнем столбце, имеем $\Lambda = 52,598 \cdot 10^{-6}$.
По формуле (4.5) находим вероятность безотказной работы

$$P_e(t = 10000) = e^{-\Lambda t}.$$

Оформление результатов выполнения задания

- 1 Номер и тема практического занятия.
- 2 Цель занятия.
- 3 Задание.
- 4 Расчетные формулы с пояснениями.
- 5 Таблица расчета коэффициента Λ .
- 6 Полученные значения и графики $P_B(t)$, $Q_B(t)$.
- 7 Выводы.

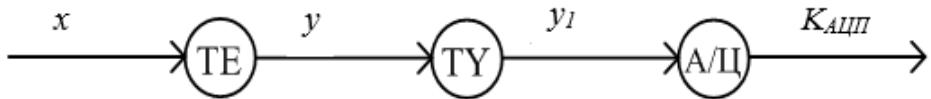
5 Практическое занятие № 5. Расчет действительных значений измеряемых величин в физических единицах измерения по кодам АЦП

Цель занятия: овладеть навыками расчета действительных значений измеряемых величин в физических единицах измерения по кодам АЦП.

Задание

Определить по коду АЦП $K_{\text{АЦП}}^{\theta}$ значение температуры в объекте в градусах Цельсия, измеряемое датчиком температуры (хромель-копелевая термопара).
На вход в ЭВМ по каналу измерения температуры на очередном такте опроса поступил сигнал (код АЦП), равный 768 ($K_{\text{АЦП}}^{\theta} = 768$). Измерительный

канал АСУ ТП для контроля температуры представлен на рисунке 5.1.



ТЕ – хромель-копелевая термопара; ТY – нормирующий термопреобразователь; градуировка ХК. Диапазон изменений температуры на входе 0 °C...100 °C. Выходной сигнал 0...10 В; А/Ц – 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь ($K_{AЦП}^{\max} = 1024$)

Рисунок 5.1 – Канал измерения температуры

Методические указания по выполнению задания

Сигнал измеряемой величины, поступающий от датчика в ЭВМ, преобразуется в аналого-цифровом преобразователе в двоичный код, который определяет не собственно измеряемую величину, а значение выходного сигнала датчика, функционально связанного с измеряемой величиной. Для решения задач контроля и управления необходимо иметь не выходной сигнал датчика, а саму измеряемую величину, выраженную в физических единицах измерения (градусах Цельсия, мегапаскалях, кубических метрах в час и др.).

Свойства конкретных датчиков и характер производимых в них преобразований определяют функциональную зависимость между измеряемой величиной x и выходным сигналом датчика y :

$$y = F(x), \quad (5.1)$$

где $F(x)$ – монотонная функция, называемая статической характеристикой датчика.

Задача заключается в определении измеряемой величины по выходному сигналу датчика y , т. е. в нахождении функции

$$x = F^{-1}(y) = f(y), \quad (5.2)$$

где $f(y)$ – функция, обратная статической характеристике датчика, называемая его градуировочной характеристикой.

На практике встречаются три основных варианта градуировочных характеристик.

1 Линейные, описываемые зависимостью

$$y = ax + b, \quad (5.3)$$

откуда

$$x = \frac{y - b}{a}, \quad (5.4)$$

где a и b – постоянные коэффициенты.

Такими характеристиками обладают, например, датчики давления, уровня, рН-метры, ротаметры, многие автоматические газоанализаторы, датчики химического состава и другие измерительные преобразователи.

2 Нелинейные, описываемые известной аналитической зависимостью. Типичным примером могут служить расходомеры переменного перепада давления с градуировочной характеристикой вида

$$x = a\sqrt{y}, \quad (5.5)$$

где a – постоянный коэффициент (если условия измерения соответствуют градуировочным).

3 Нелинейные, заданные градуировочной таблицей. К этой группе относятся, например, термопары и термометры сопротивления.

Градуировочные характеристики, заданные таблицей, чаще всего аппроксимируют аналитическим выражением, которое в дальнейшем и используется для расчета оценок измеряемой величины.

Аппроксимирующая функция обычно является многочленом степени n в виде

$$x = \sum_{K=0}^n a_K y^K, \quad (5.6)$$

где a_K – коэффициенты, определяемые, например, по методу наименьших квадратов, т. е. из условия

$$\sum_{i=1}^m \left(x_i - \sum_{K=0}^n a_K y_i^K \right) \rightarrow \min. \quad (5.7)$$

Для примера в таблице 5.1 приведены полиномы 2-й степени, аппроксимирующие градуировочные таблицы для термопар и термометров сопротивления нескольких градуировок.

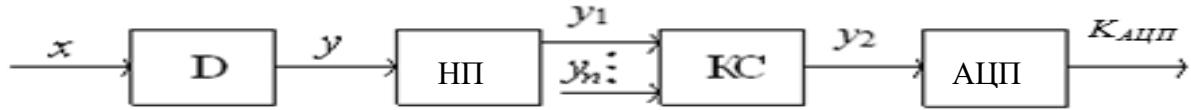
При расчете действительных значений измеряемых величин задача заключается в определении измеряемой величины x не по выходному сигналу у датчика, а по коду АЦП $K_{AЦП}$, связанному с y соотношением

$$K_{AЦП} = K_M \cdot y, \quad (5.8)$$

где K_M – масштабный коэффициент, численное значение которого определяется коэффициентом усиления нормирующего преобразователя НП и разрядностью АЦП (рисунок 5.2).

Таблица 5.1 – Полиномиальные зависимости $x(y)$ для термопар и термометров сопротивления

Датчик	Полином	Диапазон аппроксимации, °C	Максимальная абсолютная ошибка аппроксимации, °C	Относительная ошибка, %
Термопара платинородий-платиновая	$x(y) = -1,47y^2 + 118y + 17,7$	0...1600	17,69	0,1
Термопара хромель-копелевая	$x(y) = -0,03y^2 + 13,75y + 3,01$	0...600	3,0	0,5
Термопара хромель-алиумелевая	$x(y) = 0,011y^2 + 23,6y + 4,87$	0...800	4,87	0,4
Медный термометр сопротивления, гр. 50М	$x(y) = 0,0054y^2 + 4,994y - 262,5$	-120...150	0,319	0,06
Платиновый термометр сопротивления, гр. 50П	$x(y) = 0,011y^2 + 2,34y - 241,3$	-200...500	0,303	0,06



D – датчик; НП – нормирующий преобразователь; КС – коммутатор сигналов (мультиплексор); АЦП – аналого-цифровой преобразователь

Рисунок 5.2 – Типовой измерительный канал АСУ ТП

Величина K_M может быть легко определена по формуле

$$K_M = \frac{K_{\text{АЦП}}^{\max}}{y_{\max} - y_{\min}}, \quad (5.9)$$

где $K_{\text{АЦП}}^{\max}$ – максимальное значение кода АЦП, определяемое его разрядностью (таблица 5.2);

y_{\max} , y_{\min} – максимальное, минимальное значение выходного сигнала датчика соответственно.

При $y_{\min} = 0$ формула (5.9) приобретает вид

$$K_M = \frac{K_{\text{АЦП}}^{\max}}{y_{\max}}. \quad (5.10)$$

Согласно таблице 5.1 градуировочная характеристика ХК термопары в диапазоне температур 0 °C...600 °C аппроксимируется полиномом 2-й степени

ни в виде

$$x = 3,01 + 13,75 y - 0,03 y^2, \quad (5.11)$$

где x – температура в объекте, $^{\circ}\text{C}$; $x = 0$;
 y – термоЭДС термопары.

Таблица 5.2 – Соответствие разрядности и кодов АЦП

Код АЦП	Разрядность АЦП			
	8	10	12	15
$K_{\text{АЦП}}^{\max} = 2^r - 1 \approx 2^r$	256	1024	4096	32788

Согласно (5.8) и (5.10) выходной сигнал датчика термопары выразится через код АЦП следующим образом:

$$y = \frac{K_{\text{АЦП}}^{\theta}}{K_M} = \frac{K_{\text{АЦП}}^{\theta}}{K_{\text{АЦП}}^{\max}} \cdot y_{\max}. \quad (5.12)$$

Подставляя (5.12) в (5.11), будем иметь

$$\theta = 3,01 + 13,75 \frac{K_{\text{АЦП}}}{K_{\text{АЦП}}^{\max}} \cdot y_{\max} - 0,03 \left(\frac{K_{\text{АЦП}}^{\theta}}{K_{\text{АЦП}}^{\max}} \right)^2. \quad (5.13)$$

Учитывая далее, что

$$y_{\max} = \frac{y_{1\max}}{K_{\text{НП}}}, \quad (5.14)$$

получим

$$\theta = 3,01 + 13,75 \frac{y_{1\max}}{K_{\text{АЦП}}^{\max} \cdot K_{\text{НП}}} \cdot K_{\text{АЦП}}^{\theta} - 0,03 \left(\frac{y_{1\max}}{K_{\text{АЦП}}^{\max} K_{\text{НП}}} \right)^2 \cdot (K_{\text{АЦП}}^{\theta})^2. \quad (5.15)$$

В выражениях (5.14) и (5.15) y_{\max} – максимальное значение выходного сигнала нормирующего преобразователя; $K_{\text{НП}}$ – коэффициент усиления нормирующего преобразователя.

Для заданных условий $K_{\text{АЦП}}^{\max}$, $K_{\text{НП}}$ и $y_{1\max}$ – постоянные величины. Следовательно, температура θ будет определяться только текущим кодом АЦП по температурному каналу – $K_{\text{АЦП}}^{\theta}$. На каждом такте опроса в ЭВМ будет поступать текущий код $K_{\text{АЦП}}^{\theta}$, по которому она, используя формулу (5.15), и определит текущее значение θ в градусах Цельсия.

Согласно заданию

$$K_{AЦП}^{\max} = 1024; \quad y_{1\max} = 10 \text{ В};$$

$$K_{H\Pi} = \frac{y_{1\max}}{y_{\max}},$$

где y_{\max} – максимальное значение выходного сигнала термопары при температуре 100 °C (значение температуры 100 °C тоже по заданию).

По градуировочной таблице (стандартной номинальной статической характеристики НСХ при температуре свободного конца 0 °C) для хромель-копелевой термопары при температуре рабочего конца 100 °C имеем термоЭДС $y_{\max} = 6,84 \text{ мВ}$.

Следовательно,

$$K_{H\Pi} = \frac{10}{6,84} = 1,46.$$

Подставляя значения $K_{AЦП}^{\max}$, $y_{1\max}$, $K_{H\Pi}$ и $K_{AЦП}^{\theta}$ в формулу (5.15), получим

$$\theta = 3,01 + 13,75 \frac{10}{1024 \cdot 1,46} \cdot 768 - 0,03 \left(\frac{10}{1024 \cdot 1,46} \cdot 768 \right)^2 = 72,8 \text{ °C}.$$

Оформление результатов выполнения задания

- 1 Номер и тема практического занятия.
- 2 Цель занятия.
- 3 Задание.
- 4 Расчетные формулы с пояснениями.
- 5 Таблицы 5.1 и 5.2.
- 6 Полученное значение температуры по коду АЦП.
- 7 Выводы.

6 Практическое занятие № 6. Экспериментальное определение значений функции преобразования измерительного канала информационно-измерительной системы

Цель занятия: получение навыков определения функции преобразования измерительного канала.

Задание

Определение значения функции преобразования измерительного канала (ИК) информационно-измерительной системы (ИИС) мехатроники на основании результатов эксперимента, представленных в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Протокол исследований метрологических характеристик измерительных каналов микропроцессорного контроллера

Данные в контрольных точках			Результаты измерений в контрольных точках y_{ij}					
j	x_j	Δ_{don}	1	2	3	4	5	6
1	0	0,01	0,00	0,03	0,02	0,02	0,00	0,01
2	20	0,01	20,00	19,97	19,96	19,98	20,00	19,99
3	40	0,02	39,99	39,96	39,97	40,00	40,02	39,99
4	60	0,02	60,02	60,05	60,01	60,00	60,01	60,00
5	80	0,03	80,00	79,99	79,98	79,97	79,98	79,96

Измерение метрологических характеристик (МХ) ИК ИИС состоит в проведении многократного измерения выходного сигнала в разных точках диапазона в условиях, максимально приближенных к реальным рабочим условиям эксплуатации ИИС.

На вход ИК подают последовательность значений сигнала в пяти контрольных точках шкалы x_j от минимального значения до максимального и регистрируют значения выходных сигналов.

В протоколах измерений приведены данные шести значений результатов многократного измерения y_{ij} и допустимое отклонение функции преобразования Δ_{don} ИК от номинального значения функции преобразования в каждой из точек.

Методические указания по выполнению задания

В каждой контрольной точке шкалы определяются средние арифметические значения результата измерений по формуле

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ji}}{n}, \quad (6.1)$$

где y_{ji} – результат измерения в j -й контрольной точке;

n – число отсчетов в j -й контрольной точке.

В каждой контрольной точке вычисляется стандартное отклонение (мера неопределенности, оцениваемая по типу А):

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{ji} - \bar{y}_j)^2}{n(n-1)}}. \quad (6.2)$$

В каждой контрольной точке вычисляется мера неопределенности поправки к показаниям ИК, вычисляемая по типу В. При этом в качестве математической

модели неопределенной ситуации принимается равномерный закон распределения вероятности:

$$u_{\Theta_j} = \frac{\Delta_{don}}{\sqrt{3}}. \quad (6.3)$$

В каждой контрольной точке вычисляется мера неопределенности измеряемой величины:

$$u_j = k \sqrt{S_j^2 + u_{\Theta_j}^2}. \quad (6.4)$$

Принимаем коэффициент охвата $k = 2$.

По результатам расчетов строятся дискретные значения функции преобразования с учетом полученных значений $y_j = f(x_j)$. Мера неопределенности входного параметра считается пренебрежимо малой.

$$y_j = x_j \pm u_j. \quad (6.5)$$

Результаты измерений и расчетов следует занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Сводная таблица результатов измерений и расчетов

Данные в контрольных точках			Результаты измерений в контрольных точках y_{ij}						Результаты расчетов		
j	x_j	Δ_{don}	1	2	3	4	5	6	S_j	u_{Θ_j}	u_j
1											
2											
3											
4											
5											

Оформление результатов выполнения задания

- 1 Номер и тема практического занятия.
- 2 Цель занятия.
- 3 Задание.
- 4 Протокол исследований метрологических характеристик измерительных каналов микропроцессорного контроллера.
- 5 Расчетные формулы с пояснениями.
- 6 Сводная таблица результатов измерений и расчетов.
- 7 График дискретных значений функции преобразования с учетом полученных значений $y_j = f(x_j)$.
- 8 Выводы.

7 Практическое занятие № 7. Преобразование экспериментальных данных в аналитическую функцию

Цель занятия: получение навыков преобразования экспериментальных данных в аналитическую функцию.

Задание

1 По полученным экспериментальным данным с датчика, отображающих зависимость выходного напряжения от перемещения рабочего органа роботоманипулятора, построить аналитическую функцию для дальнейшего расчёта микроконтроллером промежуточных значений.

2 Построить график относительной погрешности расхождения экспериментальных данных выходного напряжения от аналитических.

Исходные данные:

- экспериментальные данные выходного напряжения $U_{ucx} = 7,389; 3,320; 1,492; 0,670; 0,301; 0,135; 0,061$ мВ;
- экспериментальные данные расхода воздуха $M = 0; 1; 2; 3; 4; 5; 6$ мм.

Методические указания по выполнению задания

Аналитическая зависимость должна иметь вид

$$U_{\text{вых}} = \exp(a \cdot M \cdot b),$$

где a и b – коэффициенты.

Общая формула метода наименьших квадратов следующая:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i = a \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2 + b \cdot \sum_{i=1}^N x_i; \\ \sum_{i=1}^N y_i = a \cdot \sum_{i=1}^N x_i + b \cdot N. \end{cases} \quad (7.1)$$

Прологарифмируем экспериментальные значения выходного напряжения: возьмём натуральный логарифм от каждого значения из массива U_{ucx} .

Найдём коэффициенты a и b из системы уравнений (7.1). Здесь значения x_i соответственно равны данным из массива M ; значения y_i соответственно равны данным из прологарифмированного массива U_{ucx} .

В результате решения системы уравнений получаем значения искомых коэффициентов: $a = -0,788$ и $b = 1,946$.

Аналитическая зависимость $U_{\text{вых}} = \exp(a \cdot M \cdot b)$ при найденных значениях коэффициентов a и b представлена на рисунке 7.1.

Найдём расхождения экспериментальных данных выходного напряжения от аналитических с помощью среднеквадратичного отклонения. Отметим, что в качестве экспериментальных данных при расчете погрешностей используем исходный массив U_{ucx} . В качестве аналитических данных значения $U_{\text{вых}}$ полу-

чены по зависимости $U_{вых} = \exp(a \cdot M \cdot b)$.

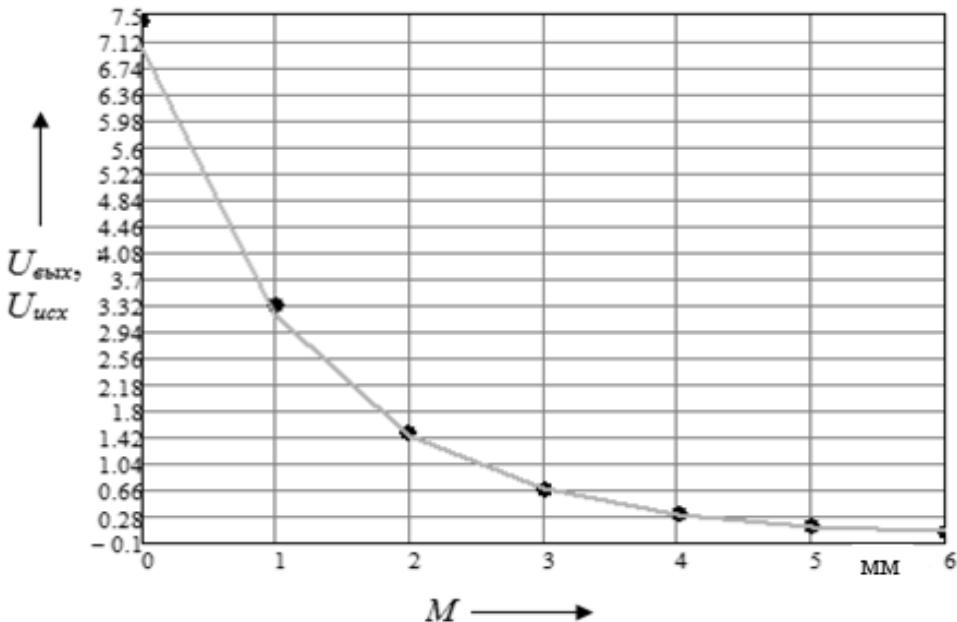


Рисунок 7.1 – График аналитической зависимости $U_{вых} = \exp(a \cdot M \cdot b)$ и экспериментальных данных $U_{вых}$

Итак, имеем $U_{вых} = 7,389; 3,320; 1,492; 0,670; 0,301; 0,135; 0,061$ мВ и $U_{вых} = 7,000; 3,184; 1,448; 0,658; 0,299; 0,136; 0,061$ мВ.

Определить адекватность полученной зависимости датчика можно по среднеквадратичному отклонению, которое не должно превышать 10 %:

$$\sigma \% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (U_{выхi} - \bar{U}_{вых})^2}{N-1}} \cdot \frac{100}{\bar{U}_{вых}}, \quad (7.6)$$

где $\bar{U}_{вых}$ – среднее значение.

Если среднеквадратичное отклонение σ превышает 10 %, то полученная аналитическая зависимость датчика, отображающая зависимость выходного напряжения от перемещения рабочего органа робота-манипулятора адекватна реальному объекту с точностью меньше 90 %.

Оформление результатов выполнения задания

1 Номер и тема практического занятия.

2 Цель занятия.

3 Задание.

4 Расчетные формулы с пояснениями.

5 График аналитической зависимости $U_{вых} = \exp(a \cdot M \cdot b)$ и экспери-

ментальных данных U_{ucx} .

6 Среднеквадратичные отклонения.

7 Выводы.

8 Практическое занятие № 8. Определение информационной пропускной способности канала измерения

Цель занятия: получение навыков определения информационных характеристик средств сбора и преобразования измерительной информации, структуры информационно-измерительной системы (ИИС).

Задание

Определить структуру ИИС и информационные характеристики средств сбора и преобразования измерительной информации: пропускную способность коммутатора ИИС C_k ; пропускную способность АЦП $C_{AЦП}$; частоту опроса измерительных каналов f_k ; производительность источника измерительной информации R_H .

Исходные данные (таблица 8.1): N_k – число каналов; δ – относительная неопределенность восстановления сигнала; $\delta_{AЦП}$ – относительная неопределенность преобразования АЦП; C_\varnothing – быстродействие элементной базы.

Таблица 8.1 – Исходные данные для определения информационных характеристик средств сбора и преобразования измерительной информации

Вариант	N_k	δ	$\delta_{AЦП}$	$C_\varnothing, 10^2$ операций/с
1	58	0,050	0,01	$6 \cdot 10^5$
2	72	0,040	0,05	$5 \cdot 10^5$
3	450	0,045	0,3	$4 \cdot 10^2$

Методические указания по выполнению задания

К информационным характеристикам средств сбора и преобразования измерительной информации относятся: пропускная способность коммутатора ИИС C_k ; пропускная способность АЦП $C_{AЦП}$; частота опроса измерительных каналов f_k .

Пропускная способность измерительного канала C_{HK} , бит/с, производится в предположении равенства относительной неопределенности восстановления и измерения сигнала (при равномерном законе распределения вероятности):

$$C_{HK} = f_C \log_2(1 + 1/\delta^2), \quad (8.1)$$

где f_C – верхняя граница частотного спектра передаваемого сигнала,

$$f_C = \frac{1}{2\pi\sqrt[3]{\delta^2}}, \quad (8.2)$$

Пропускная способность АЦП при обработке измерительной информации

$$C_{AЦП} = \frac{2f_C}{\delta_{AЦП}} \log_2 \left(1 + \frac{1}{\delta_{AЦП}^2} \right). \quad (8.3)$$

Пропускная способность АЦП при обработке информации многоканальной системы

$$C_{AЦПN} = C_{AЦП} \cdot N_k. \quad (8.4)$$

Частота опроса измерительных каналов коммутатора ИИС

$$f_k = 2 \cdot f_C \cdot N_k. \quad (8.5)$$

Пропускная способность коммутатора ИИС

$$C_K = N_k \cdot C_{ИК}. \quad (8.6)$$

При последовательном преобразовании сигналов

$$C_3 > C_{ИК}; C_K; C_{AЦПN}. \quad (8.7)$$

При параллельном преобразовании сигналов

$$n_{AЦП} > C_{AЦПN} / C_3. \quad (8.8)$$

Рассчитав по вышеприведенным формулам значение f_C , $C_{ИК}$, C_K , $C_{AЦП}$, проверить выполнение условия (8.7), что соответствует последовательному преобразованию сигналов.

В случае его невыполнения, определить количество АЦП по уравнению (8.8), что соответствует параллельному преобразованию сигналов.

Существует два подхода при обработке более чем одного аналогового сигнала: с использованием аналогового коммутатора всех входных сигналов с применением одного АЦП для выполнения преобразований; при параллельном способе сбора данных для каждого канала используется отдельный АЦП.

На рисунке 8.1 представлена структурная схема многоканальной ИИС при последовательном преобразовании сигналов.

На рисунке 8.2 представлена структурная схема многоканальной ИИС при параллельном преобразовании сигналов.

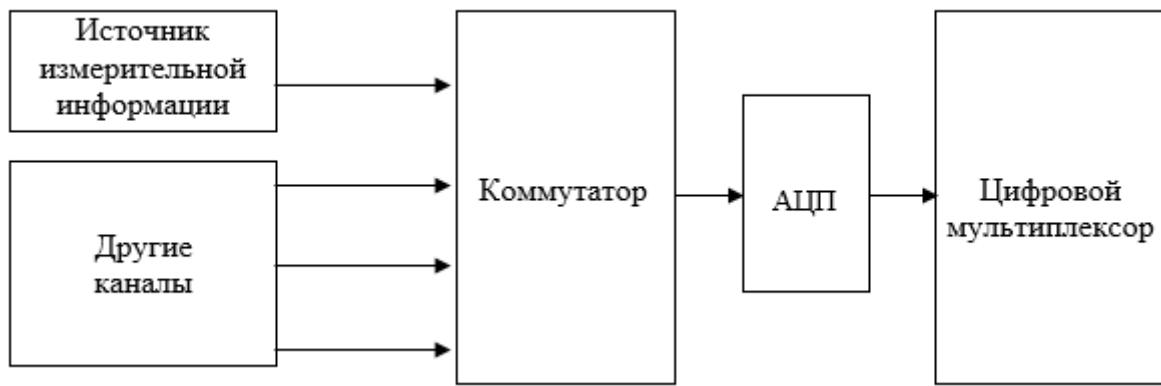


Рисунок 8.1 – Структурная схема многоканальной ИИС при последовательном преобразовании сигналов



Рисунок 8.2 – Структурная схема многоканальной ИИС при параллельном преобразовании сигналов

Оформление результатов выполнения задания

- 1 Номер и тема практического занятия.
- 2 Цель занятия.
- 3 Задание.
- 4 Расчетные формулы с пояснениями.

5 Полученные значения (пропускная способность коммутатора ИИС C_K ; пропускная способность АЦП $C_{АЦП}$; частота опроса измерительных каналов f_k).

6 Структурная схема полученной по результатам расчетов многоканальной ИИС.

7 Выводы.

Список литературы

1 **Иванов, А. А.** Основы робототехники : учеб. пособие / А. А. Иванов. – 2-е изд., испр. – М. : ИНФРА-М, 2021. – 223 с.

2 Информационные системы и цифровые технологии : учеб. пособие : в 2 ч. / В. В. Трофимов, М. И. Барабанова, В. И. Кияев, Е. В. Трофимова ; под общ. ред. В. В. Трофимова и В. И. Кияева. – М. : ИНФРА-М, 2021. – Ч. 1. – 253 с.

3 **Гвоздева, В. А.** Информатика, автоматизированные информационные технологии и системы : учебник / В. А. Гвоздева. – М. : ФОРУМ; ИНФРА-М, 2021. – 542 с.