учебное пособие
ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

2012

Бабаев М. А.

В настоящей книге излагаются основные математические и физические принципы приборостроения как одного из важнейших секторов экономики.

Будущему конструктору, инженеру, пользователю, сегодняшнему студенту предлагается ознакомиться с основами теории вероятности и их применением на практике.

Книга предназначена для студентов и преподавателей технических вузов.

Введение

Невозможно представить себе современную жизнь, идет ли речь о промышленности, других секторах экономики или просто о быте населения, без применения или использования технических приборов.

За каждым техническим изделием стоит кропотливый труд конструкторских коллективов, отдельных конструкторов.

Если говорить кратко, то **прибор** — это механико-техническое устройство для измерения неизвестной величины. Ее нужно сравнивать с неким эталоном. Результаты сравнения и есть измерение неизвестной величины.

Приборы — это не только технические предметы повседневности, но также и станки с ЧПУ.

В качестве эталонов имеются в виду измерительные приборы: от гирь, весов, линеек до измерительных приборов с использованием радиоэлектронных компонентов.

Самыми первыми приборами в истории человечества принято считать гири и часы. Именно им стало возможно дальнейшее совершенствование приборостроения.

В настоящей книге вниманию читателя предлагаются основы теории вероятности и их прикладное применение в приборостроении, рассматриваются вопросы взаимозаменяемости деталей приборов, их конструкции и расчеты, кратко излагаются вопросы технологии в приборостроении, рассказывается о средствах автоматики.

ЛЕКЦИЯ № 1. Элементы теории вероятности. Математическая статистика

1. Основные понятия и определения

Специфика технологии в приборостроении такова, что одни и те же механические, радиоэлектронные части могут применяться в производстве изделий не только одной, но и других серий. Поэтому эти части разрабатываются и выпускаются унифицированно, то есть не в расчете на какое-нибудь конкретное изделие; остальное зависит уже от конструктора, конструкторского коллектива, от каждого специалиста, принимавшего участие в проектировании создаваемых на основе этих частей изделий. Какой узел (серийный) и в каких целях использовать — этот вопрос решается еще в процессе проектирования изделий. Потому фактор взаимозаменяемости имеет чрезвычайно важное значение. Но взаимозаменяемость предполагает наличие определенных границ допуска параметров в изготовлении прибора: длина, высота, радиус, угол и т. п. Для наиболее точной реализации этих требований — взаимозаменяемость и допуск — без прикладного применения теории вероятности не обойтись. С ознакомления с этой дисциплиной и начинается данная книга. Роль теории вероятности в истории, науке и производстве велика. Наиболее важные закономерности в тех или других прерывных и непрерывных процессах удается выделить благодаря этой теории. **Теория вероятности** — наука, которая, изучая массовые случайные события (явления), описывает их, выявляя закономерности в этих процессах.

Что есть событие?

Восход или заход солнца нельзя считать случайным событием. А вот дождь или ветер можно считать событием случайным. Следовательно, случайное событие может произойти при наличии определенных условий, но может не произойти, если даже эти условия налицо. В приборостроении, например, если при изготовлении одних и тех же деталей в пределах допустимых параметров все же происходит появление в одной из деталей серии других параметров, которые не входят в предельно допустимые границы (ПДГ), то это случайное событие: такое случайное событие в производстве разрешается.

Наука, которая, изучая и описывая совокупность явлений, составляющих одно целое, но по одному (или нескольким) видам признаков (или свойств) разбивающая эти явления на группы, подгруппы, даже на единицы, называется **математической статистикой**. Математическая статистика является важнейшим инструментом в теории вероятности. Пример: изделия, составляющие одно целое по длине, весу, плотности, могут быть разбиты на подгруппы, например, по радиусу.

Количественная оценка колебания признака в совокупности называется **случайной величиной**.

Обнаруженное значение случайной величины называют статистической переменной (или вариантой). Наблюдаемые явления выделяют в разные разряды или классы, то есть группы. Количество таких групп называется частотой. Частоту выражают, как правило, в процентах от общего числа явлений. Частота в таком конкретизированном виде называется **частостью**.

Принято говорить о частоте и частости типичного представителя разряда (класса группы) x, параметры которого находятся на границах $[x'_i,\ x''_i]$, то есть

$$x'_i \le x \le x''_i. \tag{1}$$

Обычно говорят о срединном значении переменной x, которое определяется формулой:

$$x_i = \frac{x'_i + x''_i}{2}. \tag{2}$$

Параметр x_i определяется, как и частота, и частость, эмпирически либо опытным путем. Для того, чтобы получить сведения о всей массе или партии изделий, требуется отобрать их часть; эту отображенную часть называют **выборкой**.

Объемом выборки называют количество изделий в выборке (или число испытаний). Выборку деталей осуществляют в разных целях, чтобы определить соответствие требованиям взаимозаменяемости, оценить точность изготовления и т. д.

Пусть имеем случайные события в количестве N, которые по определенному признаку формируют определенный класс. И пусть эти события отвечают следующим требованиям:

1) все они равновероятны;

2) несовместимы, то есть если произошло одно событие, то исключено появление любого другого;

3) единственно возможны, то есть могут произойти события только из числа N событий, никакое другое произойти не может.

Вероятностью Р события A при этих условиях будем считать отношение числа случаев m, в пределах которого происходит событие A, к числу N равновозможных событий.

$$P(A)=\frac{m}{N}. \tag{3}$$

Рассмотрим следующие случаи.

1. $m = N$, тогда $P(A) = 1$. В таком случае событие считают достоверным.

2. $m = 0$, то есть $P(A) = 0$. Не произошло ни одного события, оно является невозможным.

Очевидно, что

$$0 \leq P(A) \leq 1, \tag{4}$$

где $P(A)$ — вероятность появления события A. По мере увеличения количества испытаний (или количества событий)

$$P(A) \to 1, \tag{5}$$

то есть вероятность появления событий А возрастает и наоборот.

Над вероятностью можно производить сложение и умножение, как и над числами. Например, для того, чтобы определить вероятность появления одного из трех событий, слагают вероятность каждого из них. Пусть этими событиями будут события *А*, *В* и *С*. Тогда вероятность того, что произойдет событие *А* или *В*, или *С*, определяется следующей формулой:

$$P(A \vee B \vee C) = P(A) + P(B) + P(C), \tag{6}$$

где $\vee$ — логический знак «или», $P(A), P(B), P(C)$ — вероятность каждого из событий *А*, *В* или *С*.

Различают события противоположные: если некоторое событие *Д* может произойти при непоявлении события *А*, то события *А* и *Д* являются противоположными. Если сложить их вероятности P_A и $P_Д$, то

$$P_A + P_Д = 1, \tag{7}$$

то есть в любом случае произойдет событие *А* или событие *Д*.

Событие называется независимым, если его появление не зависит от появления любого другого события. Иначе событие называется зависимым.

Условная вероятность — такая вероятность события *А*, которая вычислена при предположении, что событие *Д* произошло: при этом события *А* и *В* являются зависимыми, они обозначаются как $P(A/B)$ или $P(A)_B$.

Совместное (одновременное или последовательное) появление нескольких независимых событий *А*, *В*, *С*, ..., *F* называется **сложным событием**. Вероятность сложного события определяется путем умножения вероятностей составляющих его событий.

$$P(AuBuCu...uF) = P(A) \times P(B)_A \times P(C)_{AB} \times ... \times P(F)_{ABC}. \tag{8}$$

В случае независимости событий (8) выглядит следующим образом.

$$P(AuBuCu...uF) = P(A) \times P(B) \times P(C) \times ... \times P(F). \qquad (9)$$

Формула (6), которую привели выше, справедлива, если события *A* или *B* или *C* несовместимы. В случае их совместимости формула (6) выглядит следующим образом:

$$P(A \vee B \vee C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(AuBuC). \qquad (10)$$

Согласно (9),

$$P(AuBuC) = P(A) \times P(B) \times P(C).$$

С учетом этого из (10) получим

$$P(A \vee B \vee C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A) \times P(B) \times P(C). \qquad (11)$$

Теперь, после некоторого ознакомления с арифметическими операциями над вероятностями, можно привести формулу полной вероятности

$$P(A)_{Bn} = \sum_{i=1}^{i=n} P(Bi)P(A)Bi. \qquad (12)$$

В формуле (12) предполагается, что событие *A* может произойти только с одним из *n* несовместимых событий $B_1, ..., B_n$, то есть группа событий *A* и B_1, или *A* и B_2 и т. д. Любая группа из этого ряда равносильна появлению события *A*.

2. Распределение случайных величин. Теоремы о средних значениях и дисперсиях

Затрагивая вопрос о вероятности некоторого события, нельзя не говорить о закономерностях появления случайных величин.

Чтобы упростить ситуацию, эти величины делят на:

1) прерывные (дискретные) — например, количество некоторой продукции, не отвечающее установленным стандартам;

2) непрерывные — например, единицы той же продукции, которые имеют неодинаковые параметры, но эти параметры находятся в пределах границ предельно допустимого.

Если в первом случае случайная величина может принимать любые целые значения, то во втором случае некоторый параметр детали может принимать также любое значение, но только в заданных границах.

Зависимость между возможными значениями случайных величин и их вероятностями, выраженными конкретным способом, называется законом распределения случайных величин.

Для того, чтобы установить математическую форму этого закона, предположим, что дискретная случайная величина x может принимать значения $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_i, \ldots, x_k$, и пусть каждому из этих значений соответствует вероятность P_x. Тогда ряд вероятностей, соответствующих значениям случайной величины x, будет иметь следующий вид

$$P_x, P_{x_1}, P_{x_2}, \ldots, P_{x_i}, \ldots, P_{x_k}.$$

Очевидно, что вероятность P_x является некоторой функцией от переменной x и имеет вид:

$$P_x = f(x), \tag{13}$$

где $x = x_i$, $i = 1, 2, \ldots, k$.

Рассмотрим поведение этой функции для вышеприведенных двух видов случайных величин.

1. Случайная величина — дискретная (прерывная).

Это значит, что задано некоторое значение (некоторого параметра) x' и дискретная случайная величина $x < x'$. Тогда, по теореме сложения вероятностей (формула (11)), вероятность того, что случайная величина $x < x'$, где x' задано, может выражаться следующим образом:

$$F(x') = P(x < x') = \sum_{x<x'} f(x). \tag{14}$$

В формуле (14) сумма в правой части охватывает все значения дискретной случайной величины x, удовлетворяющей условию $x < x'$. Функция $F(x) = F(x')$ называется функцией распределения случайной прерывной величины x.

2. Случайная величина — непрерывна. Это значит

$$x < X < x + dx, \tag{15}$$

где $(x; x + dx)$ — бесконечно малый промежуток, в пределах которого x может принимать любое значение. В этом случае говорят о плотности вероятности и о вероятностном элементе $P(x; x + dx)$.

Плотностью вероятности P_x в точке $X = x$ называется предел вида

$$\frac{P(x < X < x + dx)}{dx}. \tag{16}$$

Поскольку в (16) функция P_x является непрерывной, то легко перейти к интегрированию формулы (16):

$$F(x') = P(x < x') = \int_{-\infty}^{x'} f(x) dx. \tag{17}$$

Выражение вида (17) является функцией распределения для непрерывной случайной величины x; в (17) $f(x)$ — плотность вероятности.

Следовательно, функцию $F(x')$ можно дифференцировать, тогда

$$F'(x) = f(x). \tag{18}$$

$F(x')$ можно рассматривать как то же, что и $F(x)$.

Основные свойства функции распределения следуют из анализа (18):

1) $x = \infty;\ F(\infty) = 1;$

2) $x = -\infty;\ F(-\infty) = 0;$

3) если аргумент x возрастает, т. е. если рассмотреть случай $x_2 > x_1$, то

$$F(x_2) \geq F(x_1). \ (19)$$

Если рассмотреть $\Delta F(x) = F(x_2) - F(x_1)$, то

$$P(x_1 < x < x_2) = F(x_2) - F(x_1) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx. \tag{20}$$

Как частный случай, можно расширить границы рассматриваемого промежутка до бесконечности. Тогда из основных свойств функции распределения, с учетом (20), следует:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = P(-\infty < x < +\infty) = 1. \tag{21}$$

Основные статистические характеристики и параметры распределения. Теоремы о средних значениях и дисперсиях

Значения случайной величины (числовые) x_i, которые определяются эмпирически, называют **статистическими характеристиками**.

Если те же числовые характеристики определены теоретически, исходя из закона распределения случайной величины x, то они называются параметрами распределения. И параметры, и статистические характеристики формируются похожими способами.

Основные характеристики.

1. **Меры положения.**

Таковыми называют (считают) точки, вокруг которых происходит колебание характеристики величин. Этими величинами являются:

1) среднее значение;
2) медиана;
3) мода.

Как статистические характеристики:

1) выборочное среднее значение;
2) выборочная медиана;
3) выборочная мода.

Сумма произведений эмпирических значений случайной величины x_i на соответствующие частости $I = n_i / N$, называется выборочным средним (или средневзвешенным) значением $\bar{x}$, которое описывается формулой:

$$\bar{x} = \sum_i \frac{n_i}{N} x_i. \qquad (22)$$

где n_i — частота появления случайной величины,

$N = \sum_i n_i$ — количество наблюдаемых значений x_i.

Формулу (22) можно представить в виде:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i n_i x_i. \qquad (23)$$

При $n_1 = n_2 = ... = n_k = 1$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i = \frac{x_1 + x_2 + ... + x_N}{N}. \qquad (24)$$

$\bar{x}$ — это статистическая характеристика, соответствующая параметрам, т. е. теоретическому анализу, называемая средним значением случайной величины или математическим ожиданием случайной величины.

Математическое ожидание обозначается как $\bar{x}_0$, $F(x)$ или *м. о.*(x), и определяется по уже известному теоретическому распределению.

При прерывности случайной величины

$$\bar{x}_0 = \sum x \times p(x), \tag{25}$$

где $p(x)$ — функция, которая определяет вероятности $p(x_i)$ для всех x_i случайной величины.

При непрерывности случайной величины

$$\bar{x}_0 = \int_{-\infty}^{\infty} x dF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx. \tag{26}$$

где $f(x)$ — плотность вероятности,

$F(x)$ — функция распределения случайной величины.

Определим формулы для выбора медианы *Me* из ряда упорядоченных (пл возрастанию или убыванию) значений.

Для этого расположим наблюдаемые значения в порядке возрастания

$$x_1 \le x_2 < \ldots < x_k < x_{k+1} < \ldots < x_{2R+1}.$$

В этом ряду каждое наблюдение имеет место как и его частота. Если рассмотреть случай выборки для четных чисел в индексе x, т. е. для членов ряда $cn = 2R + 1$, то

$$Me = x_{k+1}. \tag{27}$$

При четном числе выборки, когда $n = 2k$,

$$Me = \frac{1}{2}(x_\kappa + x_{\kappa+1}), \tag{28}$$

т. е. выборочная медиана при четном числе членов выборки является средним арифметическим между соседними значениями x_k и x_{k+1}.

Теоретический аналог *Me* для теоретического распределения прерывной случайной величины обозначают Me_0 и определяют похожим способом.

Обычно предпочитают нечетное число выборок. Но если случайная величина x непрерывна, то должно выполняться следующее условие:

$$p(x < Me_0) = p(x > Me_0), \tag{29}$$

т. е. вероятность любых событий из окрестности Me_0 одна и та же.

Наблюдаемое значение x_i, которое соответствует наибольшей ординате полигона распределения, называется **выборочной модой** ***Mo***.

Если случайная величина прерывна, то в случае теоретического распределения в качестве моды *Mo* выбирают наибольшую вероятность.

В случае непрерывной случайной величины в качестве вероятности $f(x)$ максимален. Если у кривой $f(x)$ (случайная величина непрерывна) имеется одна или несколько разных вершин, то кривую называют **одномодальной** или **одномодальной многовершинной** соответственно.

Кривая называется двух- или многомодальной, если у нее две или несколько вершин, одинаковых по ординате.

В случае симметричности относительно среднего значения $\bar{x}_0$ и одного максимума, плотность вероятности $f(x)$ оказывается равным медиане и моде.

Кроме всего этого, пользуются выборочным среднегеометрическим $x_{с.г.}$ положительных наблюденных значений x_n, где $m = 1, 2, ..., i$. Для этой величины формула имеет следующий вид:

$$x_{с.г.} = \sqrt[n]{x_1 \times x_2 \ldots x_n}\,. \tag{30}$$

В случае непрерывности случайной величины $x_{с.г.}$ определяется точно так же. Величиной $x_{с.г.}$ пользуются в случае, если требуется особая надежность всего прибора или его части.

Кроме вышеприведенных мер положения, оперируют еще следующими мерами положения:

1) среднее гармоническое;
2) среднее логарифмическое;
3) скользящее среднее;
4) накопленное среднее.

Но эти меры используются не очень часто.

2. **Меры рассеяния.**

Если меры положения характеризовали точки, вокруг которых происходило колебание значений случайных величин, то меры рассеяния характеризуют группировку самих значений колеблющейся величины x или x_i. Очевидно, что речь идет о разбросе значений случайной величины относительно меры положения: $\bar{x}$, *Me* или *Mo*.

Как и предыдущая характеристика, меры рассеяния также разделяются на несколько подхарактеристик.

1. Наиболее простой числовой характеристикой для оценки наблюдения данных, является выборочное среднее абсолютное отклонение Θ

$$\Theta = \sum_i \frac{n_i}{N}\left|x_i - \bar{x}\right| = \frac{1}{N}\sum_i n_i\left|x_i - \bar{x}\right|, \qquad (31)$$

где выражение $\left|x_i - \bar{x}\right|$ (читается: модуль разности x_i и $\bar{x}$) — абсолютное отклонение наблюденного значения x_i случайной величины от выборочного среднего.

2. Следующей подхарактеристикой наблюденных значений случайной величины x_i является выборочная дисперсия S^2; она характеризует рассеяние или однородность случайной величины x_i

$$S^2 = \frac{1}{N-1}\sum n_i\left(x_i - \bar{x}\right)^2. \qquad (32)$$

Наибольшей популярностью пользуется выборочное среднеквадратичное отклонение

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum n_i \left(x_i - \bar{x}\right)^2}. \qquad (33)$$

При $n_1 = n_2 = ... = n_k = 1$, т. е. в случае несведения в разряды наблюденных значений x_i,

$$S = \sqrt{\frac{\sum \left(x_i - \bar{x}\right)^2}{N-1}}. \qquad (34)$$

Если количество наблюденных значений случайной величины x_i, $N \geq 25$, то в формулах (33), (34), вместо $(N-1)$ остается только N, и расчет упрощается.

Читателю предлагается самостоятельно привести формулы (33), (34) в упрощенный вид при $N-1 \approx N$, в случае $N \geq 25$. Но если $N > 25$ и наблюденные значения сгруппированы по разрядам, то

$$S = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_i n_i \left(x_i - a\right)^2 - \left(\bar{x} - a\right)^2}, \qquad (35)$$

где a — «условный нуль».

Как у всех предыдущих подхарактеристик, так и у дисперсий S, есть теоретический аналог.

Дисперсией δ^2 теоретического распределения прерывной случайной переменной является математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины x от ее определенного значения x_0, т. е. $\left(x_R - \bar{x}_0\right)^2$.

Это математическое ожидание представляет собой:

если случайная величина прерывная, то

$$\delta^2 = \sum_k p\left(x_k\right)\left(x_R - \bar{x}_0\right)^2, \qquad (36)$$

где $p(x_k)$ — вероятность случайной величины x_k;

если случайная величина непрерывная, то

$$\delta^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x}_0)^2 \, dF(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x}_0)^2 f(x) dx, \qquad (37)$$

где $dF(x) = f(x)d$ — дифференциал от распределения случайной непрерывной величины x;

$f(x)$ — плотность распределения той же величины.

Если перейти к теоретическому аналогу среднего квадратичного отклонения выборочной дисперсии S, то:

1) для прерывной случайной величины (переменной)

$$\delta = \sqrt{\sum_k p(x_k)(x_R - \bar{x}_0)^2}; \qquad (38)$$

2) для непрерывной случайной величины (переменной)

$$\delta = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (x - x_0)^2 f(x) dx}. \qquad (39)$$

Роль в теории вероятности среднего квадратичного отклонения наглядно показывает неравенство Чебышева, которое имеет вид:

$$p\left(\left|x - \bar{x}_0\right| \le t\bar{\delta}\right) \ge 1 - \frac{1}{t^2}, \qquad (40)$$

где x — случайная величина;

$\bar{x}_0$ — ее математическое ожидание;

$t > 0$ — некоторый численный коэффициент.

Если взять $t = 3$, то из (40) следует:

$$p\left(\left|x - \bar{x}_0\right| \le 3\delta\right) > 1 - \frac{1}{9} > 0{,}88, \qquad (41)$$

что означает вероятность отклонения случайной величины x от своего среднего значения x_0, на величину большую, чем 3δ . Причем полученный результат справедлив при любом теоретическом распределении.

Как разновидностью меры рассеяния в приборостроении, пользуются коэффициентом изменчивости — вариации.

$$V_0 = 100\frac{\delta}{\bar{x}_n}, \tag{42}$$

а также выборки

$$V = 100\frac{S}{x}. \tag{43}$$

Эти формулы универсальны и не зависят от единиц измерения входящих в них параметров; они применяются, например, для характеристики размеров и веса разнородных деталей.

3. Еще одной важной разновидностью меры рассеяния в приборостроении для статистического анализа и контроля является размах выборки W, его также называют широтой эмпирического распределения.

$$W = x_{i\,\max} = x_{i\,\min}\,. \tag{44}$$

Как видно из (44), размах выборки характеризует однородность наблюденных значений случайной величины x_i. В зависимости от знака W, можно заключить об отношении случайной величины к мере положения (конкретно, выборочной медиане), что и видно из следующей системы:

$$\begin{pmatrix} W^{+} = x_{i\,\max} - Me \\ W^{-} = Me - x_{i\,\min} \end{pmatrix}. \tag{45}$$

Последним пунктом в этом вопросе являются теоремы о средних значениях и дисперсиях. Эти теоремы дают представление о том, как себя поведут средние значения и дисперсии при объединении нескольких выборок, у каждой из которых есть свое средневзвешенное значение случайной величины.

Пусть объемы N_1, N_2, ..., N_k, которые имеют соответствующие средневзвешенные x_1, x_2, ..., x_k, объединены в одно.

Теорема 1. Математическое ожидание (среднее значение) суммы случайных величин равно сумме их математических ожиданий (средних значений).

То есть математическое ожидание суммы

$$\bar{x} = \frac{N_1 x_1 + N_2 x_2 + ... + N_R x_k}{N_1 + N_2 + ... + N_R}, \tag{46}$$

точно так же себя ведет дисперсия.

Теорема 2. Дисперсия объединенной выборки S^2 равна средневзвешенной из дисперсий отдельной выборки, сложенной с дисперсией средних x_i частных выборок, т. е. если дисперсии $S_1^2, S_2^2, ..., S_k^2$ принадлежат выборкам N_1, N_2, ..., N_k, то в случае объединения этих выборок общая дисперсия

$$S^2 = \frac{N_1 S_1^2 + N_2 S_2^2 + ... + N_R S_k^2}{N} +$$

$$+ \frac{N_1(\bar{x}_1 - x)^2 + N_2(\bar{x}_2 - x)^2 + ... + N_k(\bar{x}_k - x)^2}{N}. \tag{47}$$

Очевидно, что объемы N_1, N_2, ..., N_k объединены в одну выборку с соответствующими дисперсиями $S_1^2, S_2^2, ..., S_k^2$.

Вторым слагаемым в (47) является дисперсия средних $\bar{x}_i$ частных выборок около среднего объединенной выборки x. Поэтому очевидно, что

$S^2 > \bar{S}^2$. (48)

Если бы $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = ... = \bar{x}_k = x$, то второе слагаемое в (47) тоже равнялось бы нулю.

В таком случае

$$S^2 = \overline{S}^2 = \frac{N_1 S_1^2 + N_2 S_2^2 + ... + N_k S_k^2}{N} + 0, \qquad (49)$$

где S^2 — средневзвешенная из дисперсий исходных выборок.

Таким образом, дисперсия суммы (или разности) независимых случайных величин равна сумме дисперсий этих величин.

В общем случае,

$$\sum_i \delta^2 = \sum_i \delta_i^2. \qquad (50)$$

3. Законы распределения. Законы Пуассона и Гаусса

В теории вероятности законов распределения много. Здесь мы будем рассматривать законы наиболее часто применяемые, в том числе и в приборостроении.

1. **Биноминальный закон распределения (Б/З/Р).** Пусть случайное событие *A* появляется *m* раз при количестве *n* независимых испытаний. Очевидно, что каждому появлению события *A* соответствует одна и та же вероятность *p*. Поскольку вся вероятность происходит на отрезке [0; 1], то разница (1 — *p*) есть показатель ненаступления случайных событий *A*. Обозначим эту величину как

$$q = 1 - p. \ (51)$$

Закон распределения, описывающий наступление прерывной случайной величины *m*, называется биноминальным законом распределения и обозначается как $p_{m,\,n}$.

Этот закон математически выражается формулой разложения бинома $(q + p)^2$ в следующем виде

$$\left(\begin{array}{l} P_{m,n} = \dfrac{n!}{m!(n-m)!} p^m q^{n-m} \\ \\ p_{m,n} = C_n^m p^m q^{n-m} \end{array} \right). \tag{52}$$

где $n!$ — читается как n-факториал,

C_n^m — биномиальный коэффициент, выражающий количество сочетаний из n элементов по m, причем, n — положительное целое число.

Как любая другая функция, которая описывает распределение случайной величины, рассматриваемый биномиальный закон распределения также имеет свои параметры распределения. Их два:

1) среднее значение функции биномиального закона распределения случайной величины определяется по формуле:

$$\bar{x}_0 = \sum_{m=0}^{n} m C_n^m p^m q^{n-m} = np, \tag{53}$$

2) дисперсия функции биномиального закона распределения случайной величины определяется по формуле:

$$\delta^2 = \sum_{m=0}^{n} (m - np)^2 = C_n^m p^m q^{n-m} = npq. \tag{54}$$

Напомним, что **дисперсия** — это математическое ожидание квадрата отклонения случайной величины x от его среднего значения x_0. Следовательно, как следует из (54),

$$\delta = \sqrt{npq}. \tag{55}$$

Основным свойством рассматриваемого закона является то, что по мере роста числа испытаний n, кривая функции (т. е. полигон) становится все более плавной, стремясь к графику непрерывной функции. Применительно к вопросам приборостроения, о биноминальном законе распределения можно сказать следующее: при одноразовой (бесповторной) выборке из общего количества деталей закономерности биноминального закона распределения могут и не проявиться. Они проявятся только при повторной выборке, поскольку при повторной выборке вероятность наступления искомого признака предрешена предыдущей выборкой (или предыдущими выборками). Поэтому условия, приводящие к необходимости прикладного применения рассматриваемого распределения, могут быть и не обнаружены.

Однако если взять очень большой объем выборок (теоретически бесконечный), то результаты повторной и бесповторной выборок почти совпадают.

Следовательно, последнее высказывание указывает направление применения настоящего закона распределения. Практический смысл вышесказанного заключается в том, что при разовой (бесповторной) выборке обнаруженный параметр деталей (например, количество брака) соотнесен со всей партией деталей: если в процентном отношении в выборке n количество брака было 20%, то во всех остальных выборках брака может вообще не оказаться.

Если вся партия состоит из нескольких таких выборок n, то 20% для n-го количества деталей и для всей партии деталей — не одно и то же.

При условии, что вся партия состоит из $10n$ деталей и там больше нет брака, доля брака для всей партии окажется всего 2%.

2. **Полиномиальный закон распределения (П/З/Р).** В предыдущем случае рассмотрено два исхода появления случайного события A: или оно появится с вероятностью p, или не появится с вероятностью $q = 1 - p$.

При П/З/Р исходов может быть не только два, но и различных попарных совместимых в количестве R, а также единственно возможных исходов V_1, V_2, ...,V_k.

Если обозначить вероятность исхода V_i через p_i , где $i = 1, 2, ..., k$ и $p_i = p(V_i)$, то в силу достоверности событий V_i

$$\sum_{i=1}^{i=k} p_i = 1. \quad (56)$$

Если предположить, что вероятность появления случайного события A имеет три исхода, что значит $k = 3$, то получим формулу, которая называется законом триномиального распределения. Эта формула широко используется в теории надежности и имеет следующий вид:

$$p(n_1, n_2, n_3) - \frac{n!}{n_1! n_2! n_3!} \times p_1^{n1} p_2^{n2} p_3^{n3}, \quad (57)$$

где $n_3 = n - n_1 - n_2; p_3 = 1 - p_1 - p_2$.

При прикладном применении формулы (57) величину p_i можно наделить вероятностью других событий, в качестве n_i в таком случае нужно брать количество таких отказов.

Например, в приборостроении формулу (57) применяют в службе контроля при приеме изделий, разделяя их на категории: надежные, сомнительные, ненадежные изделия (исходя из их качества).

Если рассмотреть общий случай, когда количество независимых испытаний равно n, то велика вероятность того, что каждое событие V_i произойдет n раз, где $i = 1, 2, ..., k$. Причем $\sum_{i}^{k} n_i = n$ определяется формулой

$$p(n_i) = \frac{n!}{n_1! n_2! ... n_k!} p_i^i. \quad (58)$$

В виде формулы (58) получен искомый **полиномиальный полиноминальный закон распределения**.

3. **Закон Пуассона.** Другое название его — закон распределения редких событий. Закон Пуассона (З. П.) применяется в тех случаях, когда маловероятно, и поэтому применение Б/З/Р нецелесообразно.

Достоинствами закона являются: удобство при вычислении, возможность вычислить вероятность в заданном промежутке времени, возможность замены времени другой непрерывной величиной, например, линейными размерами.

Закон Пуассона имеет следующий вид:

$$p_{m,n} = \frac{a^m e^{-a}}{m!}, \qquad (59)$$

и читается следующим образом: вероятность появления события А в m раз при n независимых испытаниях выражается формулой вида (59), где $a = np$ — среднее значение $p(A)$, причем а является единственным параметром в законе Пуассона.

Если начертить график распределения по закону Пуассона, то сразу видна его несимметричность. По мере увеличения a несимметричность уменьшается, e — известное число в функции $f(x) = e^x$ и в основании натурального логарифма $\ln e = 2{,}17...$

Вероятности, вычисленные по Б/З/Р и закону Пуассона, считаются удовлетворенными, если $np = a < 10$. Закон Пуассона, так же, как и П/З/Р, используются при решении аналитических задач надежности приборостроения.

Пример. Предположим, требуется установить вероятность $p_k(t)$, где k — отказ в системе за время t, при неизвестных других условиях, то есть k — это событие в виде отказа. В таком случае, обозначив количество событий k как λ за время t и заменив в (59) a на $\lambda\, t$ и m на k, получим:

$$p_k(t) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}. \qquad (60)$$

Подставив численные значения k, λ , t , легко вычислить $p_k(t)$.

4. **Равновероятное распределение.** Рассматривая вышеприведенные законы распределения случайной величины, пришлось подчеркнуть различия в их проявлении при условиях: прерывно ли распределение случайных величин или непрерывно?

Достоинством рассматриваемого закона равновероятного распределения (в дальнейшем З Р/Р) является то, что он отражает самое простое распределение для непрерывных случайных величин *x*.

Другое название этого закона — равномерное, или прямоугольное распределение, несет в себе больше информации о кривой этого закона. Вероятность наступления случайного события А на рассматриваемом промежутке одинакова в любой точке из промежутка [*в; с*]. Для Р/Р плотность

$$f(x)=\left\{\begin{matrix} 0, при - x < в \\ \dfrac{1}{c-в}; при - в < x < c \\ 0, при - x > c \end{matrix}\right\}, \tag{61}$$

где *в, с* — параметры З/Р/Р.

Функция распределения для З/Р/Р имеет вид, при условии:

$$F(x)=\int\limits_{-\infty}^{x} f(x)dx = (при(61))\frac{1}{c-в}\int\limits_{в}^{x} dx = \frac{x-в}{c-в}. \tag{62}$$

При $x < b$, $F(x) = 0$, при $x > c$, $F(x) = 1$. Поэтому формулу (62) также можно представить в виде таблицы, как и (61).

$$F(x)=\left\{\begin{matrix} 0, при - x < в \\ \dfrac{x-в}{c-в}, при - в < x < c \\ 1, при - x > c \end{matrix}\right\}. \tag{63}$$

Применяя теорему Пифагора к соответствующему рисунку, легко заключить, что среднее квадратическое отклонение Р/Р есть

$$\delta = \frac{c-в}{2\sqrt{3}}. \tag{64}$$

5. **Закон нормального распределения (закон Гаусса).** Практика неуклонно подтверждает, что закону Гаусса с достаточным приближением подчиняются законы распределения ошибок при измерениях самых различных параметров: от линейных и угловых размеров до характеристик основных механических свойств стали.

Плотность вероятности закона нормального распределения (в дальнейшем Н. Р.) имеет вид

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}}e^{-\frac{(x-\bar{x}_0)^2}{2\sigma^2}}, \tag{65}$$

где $\bar{x}_0$ — среднее значение случайной величины;

τ — среднее квадратическое отклонение той же случайной величины;

$e = 2{,}1783...$ — основание натурального логарифма;

Ж — параметр, который удовлетворяет условию.

Причина широкого применения закона нормального распределения теоретически определяется теоремой Ляпунова, суть которой в следующем. По центральной теореме Ляпунова, случайная величина $Z = X + Y + ... + U$, причем $X, Y, ..., U$ — независимы, среди $X, Y, ..., U$ нет ни одной величины, которая была бы значительно больше, чем любая другая, сами $X, Y, ..., U$ — достаточно большие, случайная величина Z подчиняется З/Р/Р с любой заданной точностью $-\infty < x < \infty$.

При известных $\bar{x}_0$ и δ ординаты кривой функции $f(x)$ можно вычислить по формуле

$$(x)=\frac{1}{\sqrt{2\eth}}e^{-t^2/2}, \tag{66}$$

где t — нормированная переменная, $t = \frac{x - x_0}{\delta}$

(t) плотность вероятности z. Если подставить z в (66), и (t) в (65), то следует:

$$y = f(x)=\frac{(t)}{\delta}. \tag{67}$$

Кривую З.Н.Р. часто называют кривой Гаусса, этот закон описывает очень многие явления в природе. Она симметрична относительно своей максимальной ординаты. Сама форма кривой означает, что отклонения случайной величины x от x_0 в обе стороны от оси симметрии равновероятны, причем меньшие отклонения более вероятны, чем большие отклонения.

Задача отыскания y_{max} по (67) сводится к определению значения этой функции при нулевом значении нормированной переменной. Читателю предлагается определить значение (t) по (66) при $t = 0$, затем с учетом полученного результата определить вид (67). Для определения функции Н. Р. достаточно интегрировать формулу (65):

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(x)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{(x-\bar{x}_0)^2}{2\tau^2}dx}. \tag{68}$$

6. Рассмотрим законы распределения случайных величин, которые принимают только положительные значения — **закон распределения эксцентриситета (в дальнейшем з. р. э.)**.

Если случайная величина R непрерывна, то ее двухмерное рассеяние выражается формулой

$$R = \sqrt{x^2 + y^2}. \tag{69}$$

При этом саму случайную величину R, называют эксцентриситетом.

В формуле (69) x и y — координаты конца радиус-вектора в системе координат OXY.

При трехмерном распределении

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, \tag{70}$$

где x, y, z — координаты конца радиус-вектора в системе координат OXYZ.

З. р. э. описывает распределение величины при самых разнообразных процессах: от биения (направление не задано), не параллельности или перпендикулярности двух плоскостей, конусности процессов (причем плоскость не фиксирована) до магнитной проницаемости при настройке контуров частот радиоэлектронной аппаратуры.

Если говорить о плотности вероятности в з. р. э., то ее можно выразить двояким способом:

1) через среднее значение $\bar{x}_0$

$$f(R) = \frac{\pi}{2\bar{x}_0^2} R \times e^{-\frac{\pi R^2}{4\bar{x}_0^2}}, \qquad (71)$$

2) через дисперсию δ^2 координат X и $У$

$$f(R) = \frac{1}{\delta^2} R \times e^{-\frac{R^2}{2\delta^2}}; \ (0 < R < \infty) \qquad (72)$$

Как видно из (71) и (72), з. р. э. однопараметорный, параметром является эксцентриситет R, у которого среднее квадратическое отклонение τ_R связано с $\bar{x}_0$, причем это соотношение постоянно. Если требуется определить $\bar{x}_0$ для непрерывных величин, то согласно формуле (26),

$$\bar{x}_0 = \int_{-\infty}^{\infty} x dF(x) = \int_{0}^{\infty} Rf(R) dR; \qquad (73)$$

после взятия интеграла и подставки численных значений

$$\bar{x}_0 = \delta \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1{,}253\tau$$

Выражение для функции распределения эксцентриситета R имеет следующий вид.

$$F(R)=\frac{1}{\delta^2}\int_0^u \mathrm{Re}^{-\frac{R^2}{2\delta^2}}dR, \qquad (74)$$

где u — любое значение случайной переменной R, причем $0 < R < u$.

На практике нередко пользуются упрощенной формой формулы (74), где введены новые величины $T = R / \delta$ и $t = u / \delta$ (при $R = u$).

Из условия $R < u$ автоматически следует, что $T < t$. При таких нововведениях из (74) получим

$$F(t)=\int_0^t Te^{-\frac{T^2}{2}}dT=1-e^{-t^2 2}, \qquad (75)$$

закон распределения модуля разности (З.Р.М.Р).

Между этим и предыдущим законом много общего: законы применяются для распределений непрерывных, но только неотрицательных случайных величин; формы записи формул, выражающих эти законы во многом совпадают.

Разница в формах записи этих формул только в том, что эксцентриситета R, как случайная переменная, заменена на модуль разности

$$r=\left|x_1-x_2\right|,$$

где x_1, x_2 — случайные величины, они распределены по нормаль ному закону, имеют свои средние значения $\bar{x}_{01}, \bar{x}_{02}$, а также свои дисперсии $\delta_{0_1^2}, \delta_{0_2^2}$. Отсюда же следует второе отличие от закона Максвелла: рассматриваемый здесь закон распределения, в отличие от закона Максвелла, двухпараметричен: этими параметрами являются $\bar{x}_0^2$ и $\bar{\delta}_0^2$.

Практическая ценность этого закона высока: ему следуют отклонения в шагах резьбы, конусности, в межосевых расстояниях и прочее.

У разности R = $x_1 - x_2$, модуль которой и есть случайная величина r, имеется свое среднее $\bar{x}_0 = \bar{x}_{01} - \bar{x}_{02}$ и свои дисперсии $\delta_0^2 = \delta_{0_1^2} - \delta_{0_2^2}$.

Для случайной величины $r = (x_1 - x_2)$ плотность вероятности выражается формулой

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\delta_0} e^{-\frac{(r-\bar{x}_0)^2}{2\delta_0}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\delta_0} e^{-\frac{(r+\bar{x}_0)^2}{2\delta_0}}. \tag{76}$$

Для практического применения пользуются упрощенной формой формулы (76) в следующем виде.

$$f(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q-Q_0)^2}{2}} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(Q+Q_0)^2}{2}}, \tag{77}$$

где Q — нормированный модуль разности:

$$Q = \frac{r}{\tau_0} = \frac{(x_1 - x_2)}{\tau} \text{ и } 0 < Q < \infty \text{, поэтому } dQ = \frac{1}{\tau_0} dr.$$

Если более конкретно, то $Q_0 = \dfrac{\bar{x}_0}{\tau_0}$ и закон распределения имеет уже один параметр в виде $\bar{x}_0 = \tau_0 Q_0$. С учетом нововведения $Q = \dfrac{r}{\tau_0}$ можно привести формулы для:

1) среднего значения случайной величины

$$\bar{x}_0(Q) = \frac{1}{\tau_0} \bar{x}_0(r), \tag{78}$$

2) среднего квадратичного отклонения нормированного модуля разности:

$$\tau(Q) = \frac{1}{\tau_0}\tau(r), \tag{78}$$

3) дисперсии

$$\tau^2(Q) = \frac{1}{\tau_0}\tau(r). \tag{78}$$

В системе уравнений (78) ненормированный модуль разности r и нормированный модуль разности Q связаны одними и теми же характеристиками.

Для нормированного модуля разности функция распределения

$$F(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\left[\int_0^Q e^{-\frac{(Q-Q_0)^2}{2}}dQ + \int_0^Q e^{-\frac{(Q+Q_0)^2}{2}}dQ\right]. \tag{79}$$

Для облегчения практического использования $F(x)$ слагаемые правой части (79) выражают через интеграл вероятности Лапласа $\Phi(t)$, и формула (79) существенно упрощается:

$$F(Q) = \Phi(Q - Q_0) + \Phi(Q + Q_0). \tag{80}$$

Нормированная функция Лапласа, называемая также **интегралом вероятностей**, используется для упрощения сложных формул

$$\Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\delta}}\int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}}dt = \int \varphi(t)dt,$$

где $t = \dfrac{x - \bar{x}_0}{\delta}$ — нормированная переменная, функцию (t) называют **плотностью вероятности** нормированной переменной t

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}}.$$

Для слагаемых в формуле (80) составлены таблицы, поэтому применение закона распределения нормированного модуля разности значительно облегчается

Закон распределения некруглости (З.Р.НЕКР.). При изготовлении изделий для применения в приборостроении и в других отраслях экономики, при определенных условиях специально проектируются некруглые детали, но может случиться так, что такие изделия не предусмотрены и они появляются как ошибки некоторых издержек в производстве.

И в том, и в другом случаях, если некруглость является результатом максимального и минимального диаметров, то З.Р.НЕКР., как правило, следует закону модуля разности, который только что рассмотрели.

Но если же некруглость регистрируется при перпендикулярности этих диаметров x_1, x_2, причем один из них выбран произвольно, то предпочитают применять З.Р.НЕКР.

Если случайные переменные x_1, x_2 при следовании нормальному закону распределения имеют одинаковое среднеквадратическое отклонение δ с дополнительным (одновременным) выполнением условия $\bar{x}_0(x_2 - x_1)$, то некруглость

$$0 = | x_1 - x_2 | \tag{81}$$

является случайной неотрицательной величиной между x_1, x_2 корреляционной зависимости (плотностью вероятности для З.Р.НЕКР.)

$$f(w) = \frac{1}{\sqrt{\pi\delta}\sqrt{1 - rk}} \times e^{-\frac{w^2}{4\delta^2(1-rk)}}, \tag{82}$$

где rk — коэффициент корреляции.

При независимых x_1, x_2, $rk = 0$. Следовательно,

$$F(w) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (83)$$

где переменная $t = \frac{wdn}{\sqrt{2\pi}\,\overline{w}}$, причем $dn = 1{,}1284$, w — выбранное среднее из ряда регистрированных значений w_i.

Так как при $F(t) = \Phi_1(t) = 2\Phi(t)$, где $\Phi(t)$ — интеграл вероятности, применение (84) упрощается.

7. **Другие законы распределения.** В технической промышленности, в том числе приборостроении, применяются некоторые другие виды законов распределения, кроме вышерассмотренных.

При этом распределение случайных величин идет уже по самым разнообразным их параметрам. Приведем краткое изложение еще трех законов распределения случайной величины.

1. Композиция законов распределения, так называют закон распределения суммы случайных величин, причем слагаемые суммы заданы предварительно.

Если рассмотреть случайную переменную $Z = X + Y$, где X и Y имеют соответствующие плотности вероятности и независимы, то плотность вероятности Z

$$\varphi(Z) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_1(t)\varphi_2(t) - (t)dt, \quad (86)$$

где t выступает как переменная интеграции. Замечено: какому закону распределения следуют X и Y, тому же следует Z.

Примечание этого закона можно встретить в вопросах анализа износа, отклонения различных геометрических параметров изделий.

2. Экспоненциальный закон распределения. Этому закону распределения следуют случайные величины, удовлетворяющие условию. Его плотность вероятности

$$f(x)=\frac{1}{\bar{x}_0}e^{-\frac{x}{\bar{x}_0}}. \tag{87}$$

Функция распределения

$$\Psi(x)=\frac{1}{\bar{x}_0}\int_0^x e^{-\frac{x}{\bar{x}_0}}dx=1-e^{-\frac{x}{\bar{x}_0}}. \tag{88}$$

В формулах (87) и (88) $\bar{x}_0$ — среднее значение случайной величины.

Этот закон находит применение при исследовании самых разнообразных вопросов в средствах автоматики, в производстве радиоэлектронной аппаратуры. Например, для определения вероятности безотказной работы в течение времени $X \geq x$.

3. Закон распределения Стьюдента. Этот закон представляет интерес, если число выборок $n < 30$, при $n > 30$ он переходит в нормальный закон распределения. Закон имеет следующий вид:

$$t = \frac{\sqrt{n}\left(\bar{x} - \bar{x}_0\right)}{S},$$

где n — объем выборки, t — случайная переменная.

Из-за ее сложного вида не приводим формулу для плотности вероятности (t), отметим только, что функция (t) является четной и ее кривая симметрична относительно оси ординат. Функция распределения этого закона имеет следующий вид:

$$F(t_0)=\int_{-\infty}^{t_0}\varphi(t)dt. \tag{89}$$

Формула (89) читается так: вероятность того, что случайная переменная t примет значение меньше заданного t_0, есть интеграл от плотности этой вероятности (t), который вычисляется по формуле (89).

На этом изложение законов распределения случайных величин мы завершаем. Существуют и другие законы распределения, с которыми в случае необходимости читатель может ознакомиться в специальной литературе. Например, с законом логарифмически-нормального распределения, где случайная величина имеет вид $\lg x_i$ или $\chi 2$-распределение (читается «хи-распределение»), которое применяется для приведения к общему знаменателю теории практики.

Логарифмически нормальное распределение находит применение в радиотехнике, в металлургии и в других секторах машино-, станко- и приборостроения.

ЛЕКЦИЯ № 2. Допуски и посадки

1. Взаимозаменяемость как важнейший конструкторский принцип в приборостроении

Современное приборостроение развивается в направлении все большего вторжения радиоэлектронной аппаратуры в машиностроение.

По этой причине удобно объяснить роль взаимозаменяемости на примере электронного приборостроения. Ясно, что совокупно различные радиоэлектронные аппараты состоят практически из одних и тех же радиоэлектронных деталей, как и различные слова, предложения, текст самой этой книги состоят из одних и тех же букв. Все зависит от поставленной задачи и замысла конструктора.

В радиоэлектронике радиодетали характеризуются максимальным и минимальным напряжениями, токами, мощностью, входными и выходными параметрами и, разумеется, геометрическими размерами радиодеталей.

Радиоэлектронное приборостроение является частным случаем приборостроения. Поэтому правила изготовления радиодеталей могут являться общими для всего приборостроения.

Так оно и есть: в радиоэлектронике производство самих радиодеталей и радиоэлектронные аппараты носят унифицированный характер.

В других секторах приборостроения эта унификация достигается с соблюдением определенной погрешности (допуска) других параметров: гидравлических, оптических, механических и т. д.

В итоге одни и те же, например, подшипники находят применение в производстве, казалось бы, совсем отдаленных друг от друга изделий. К примеру, что общего между персональным компьютером и гигантским экскаватором? Тем не менее, в них можно обнаружить одни и те же узлы тех же подшипников.

Таких взаимозаменяемых узлов и деталей, которые позволяют сборку самых разнообразных приборов, механизмов без предварительной обработки этих узлов, в машиностроении очень много: такое свойство узлов (деталей) называют взаимозаменяемостью.

Взаимозаменяемость — это важнейший принцип проектирования, производства и эксплуатации, который обеспечивает сборку (ремонт) независимо изготовленных деталей в узел (узлы) механизмов (приборов). Взаимозаменяемость как принцип предъявляет к узлам (деталям) следующие требования к точности их параметров: геометрическая, механическая, электрическая, и т. п.

При соблюдении точности по вышеуказанным параметрам, технические характеристики узлов (изделий) окажутся в заданных (допустимых) пределах, а их производство — рентабельным.

Достижение вышеуказанных требований в немалой степени зависит от качества материала, из которого изготавливаются узлы изделий. Качеством материала (а это его химические и физические свойства) задается долговечность узлов изделий в приборостроении.

В современном машиностроении целые заводы, полностью работающие в автоматизированном режиме, — привычное явление. Такая степень автоматизации, кооперации, специализации современного производства невозможна без взаимозаменяемости.

Взаимозаменяемость узлов и деталей следует из требований к их точности, а также из необходимости унификации, нормализации, стандартизации.

Требование к точности унифицированных узлов предполагает наличие определенного стандарта для каждого вида изделий, выражается в нормализации допуска к этой самой точности.

Требование к точности предполагает: соблюдение специфической технологии для каждого вида серийно выпускаемого изделий; соблюдение единства мер (последнее обеспечивает непрерывная поверка измерительных средств).

2. Классификация взаимозаменяемости

Различают взаимозаменяемость по очень многим критериям. Если исходить из степени сопряжения, то выделяют взаимозаменяемости:

1. **Полная взаимозаменяемость** (когда степень сопрягаемости очень высокая) — прочие физические параметры узлов точно соответствуют заданному, а это диктует их соответствие определенной заданности, которая ограничена минимальными и максимальными значениями, а последние следуют из эксплуатационных требований, сама граница допуска рассчитывается по теоретико-вероятностному методу, который изложен в предыдущей главе.

Когда взаимозаменяемость полная, то упрощается сборка, растет масштабность кооперации, повышается степень специализации и обеспечения запчастями, а также эффективность производства, в силу более рационального расхода времени, высокого темпа работы.

В итоге становятся возможными конвейерное производство, организация цехов автоматизированных заводов. Все вышеуказанные достоинства этого вида взаимозаменяемости были бы невозможны без соблюдения довольно жестких требований к точности параметров.

Но как быть, если эту точность не всегда возможно соблюдать по причинам, не зависящим от возможности производственных мощностей? В таких случаях производство узлов и деталей в вышеуказанных целях становится нецелесообразным.

В таких случаях приходит на помощь применение неполной взаимозаменяемости: расширяя границы допуска, затем применяя, когда требуется, селекцию, (регулировку, пригонку), добиваются поставленной задачи, обеспечив партию узлов в границах узкого допуска.

Как видно, без мер селекции здесь не обойтись. Однако такое производство узлов (деталей) приводит к росту незавершенного производства, сводит на нет другие преимущества принципа взаимозаменяемости.

2. Исходя из геометрических параметров и учитывая, насколько присоединяемы узлы различают **внешнюю взаимозаменяемость**, когда речь идет о сравнении наружных и внутренних размеров, и **внутреннюю взаимозаменяемость**, когда речь идет о том же самом, однако рассматриваются внутренние части узлов и деталей.

3. **Функциональная взаимозаменяемость.** Имеется в виду взаимозаменяемость узлов, когда, несмотря на различие между ними по некоторым параметрам, это различие не сказывается на выполнении функций, для которых они предназначены.

Нетрудно догадаться, что такая взаимозаменяемость узлов представляет собой перспективное направление в их производстве. Само собой разумеется, что задать теоретически границы допуска при функциональной взаимозаменяемости невозможно, это делается эмпирически.

После анализа полученных результатов (степени их влияния на работу установок и механизмов, на эксплутационные методы) устанавливают оптимальные допуски на исследуемые параметры. Сами параметры называют функциональными параметрами. Насколько высока роль принципа взаимозаменяемости в производстве изделий машиностроения (приборостроения), говорит срок их службы, т. е. повышая степень взаимозаменяемости, можно увеличить срок службы механизмов и приборов.

Однако проблемы максимального достижения расчетных величин заключаются в производстве узлов (деталей), в ограничении технологических возможностей технических измерений: для достижения более высокой точности требуется более трудоемкое производство. А это — высокая стоимость узлов и деталей.

Поэтому конструктивные требования больше опираются на функциональные параметры, поскольку при этом расходы, а следовательно, и стоимость изделий наименьшие.

Уровень взаимозаменяемости в производстве тех или других узлов зависит от того, насколько трудоемки:

1) изготовление узлов и деталей;
2) изготовление механизмов из этих узлов.

Если взять отношение характеристик трудоемкости и ввести коэффициент взаимозаменяемости K_B, равный этому отношению, $K_B < 1$, поскольку производство узлов и деталей менее трудоемки, чем сборка из них механизмов.

$K_B \rightarrow 1$ говорит о высокой рентабельности и эффективности производства, о наименьших потерях в производстве узлов и деталей, а значит, и самих приборов.

4. Различие взаимозаменяемости по **геометрическим параметрам**. Та методология, т. е. теоретико-вероятностная методология, которая была изложена в главе 1, устанавливает нормированную (заданную) точность (границы допуска) в производстве узлов.

Применительно к практике эти параметры называют номинальными. Действительные результаты отличаются от номинальных. Например, в достижении заданной шероховатости поверхности или длины, ширины, высоты, радиуса, может получиться деталь формы совсем другого геометрического тела: отклонения в последнем случае называют **макроотклонениями поверхности**. Эти отклонения характеризуются волнистостью, при этом расстояния между соседними возвышениями, впадинами оказываются больше, чем высота или глубина.

Если эти расстояния меньше, чем высота или глубина, то дефект называют **микроотклонениями**.

Мы говорили об отклонениях I порядка, но существуют и другие порядки отклонений.

Поэтому необходимость повышения качества в производстве предполагает уменьшение отклонения всех порядков. Исходя из этого, требования к обеспечению взаимозаменяемости устанавливают обязательность соблюдения точности по линейным и угловым размерам, геометрической форме поверхности, взаимному расположению поверхностей друг к другу или к осям, волнистости и шероховатости поверхности.

Директивными документами для достижения этих целей служат рабочие чертежи, ГОСТы, рекомендации ПСО (международная организация по стандартизации).

Взаимозаменяемость характеризуется и по многим другим параметрам, кроме геометрических, например, по механическим, физическим, пневматическим, гидравлическим, электрическим и другим.

Эти виды взаимозаменяемости объединяет то, что они функциональны. Следовательно, требуется однородность изделий, которая предполагает однородность самих исходных материалов и полуфабрикатов.

Если взять, например, электрические параметры, то неоднородность в исходном материале вызывает отклонения в токе, которые вызовут за собой ряд других отклонений, причем по нарастающей: в катушках, генераторах, локаторах. Далее, эти погрешности перейдут в другие системы, которые могут привести к катастрофам в ВМФ или авиации, к авариям на крупных промышленных предприятиях.

Механические параметры взаимозаменяемости — это характеристики упругости элементов, которые, в свою очередь, зависят от физико-механических свойств исходного материала, а также от технологии производства этих элементов.

В качестве упругих свойств элементов рассматривается реакция этих элементов на прогиб и раскрутку, последние, как известно из теоретической механики, характеризуются модулем упругости E и коэффициентом Пуассона M. Допуск на них определяется количеством уравнений, характеризующих систему.

В общем же случае для достижения полной взаимозаменяемости требуется обеспечение наименьшего разброса: любой плавности прогиба или раскрутки упругого элемента к приложенным усилиям; любых приемлемых значений этой плавности; любой остаточной деформации после снятия усилий; гистерезиса: любое несовпадение характеристик при погружении и разгружении упругого элемента и др.

При рассмотрении взаимозаменяемости по другим параметрам, требования примерно такие же.

Небольшим характерным отличием обладает взаимозаменяемость по магнитно-электрическим параметрам. Специфика этих элементов такова, что требуемой величины можно достичь путем различного сочетания тех же магнитно-электрических элементов.

Поэтому здесь решение проблемы взаимозаменяемости деталей (или узлов) облегчается. Тем не менее, требования к качеству исходных материалов остаются теми же, что и для взаимозаменяемости по другим параметрам.

Например, применение стандартных шкал в магнитно-электрических измерительных приборах. Стандартность шкал уменьшает расходы, но как обеспечить такую же стандартность показаний, если внутренние узлы, реагирующие на магнитную индукцию, изготовлены из неоднородных материалов?

Поэтому допуск погрешностей на диаметры проводов катушек, диаметры магнитных сердечников, на параметры полюсных наконечников и другое, (а эти погрешности сказываются на точности измерительных приборов) требует высоко профессионального подхода.

Чем сложнее прибор (например, магнетроны, ЛОВ, ЛБВ и другие электровакуумные резонаторы и генераторы), тем больше требуется ответственности и профессионализма.

3. Допуски и посадки: их классификация. Допуски и посадки типовых узлов и деталей в приборостроении

В предыдущем вопросе несколько раз использовалось понятие «допуск». Объясним, что же это такое.

Характеристики допуска и посадки — понятия, характеризующие процесс соединения узлов (деталей), т. е. степень приемлемости рассматриваемых узлов для сборки определенного механизма (прибора).

Например, при сборке часов приходится добиваться согласованного хождения множества узлов. Для этого приходится узел одной цилиндрической формы вставить или «одеть» в другой такой же формы. Насколько свободно выполняется эта работа? Какова свобода перемещения узлов относительно друг друга? Все эти вопросы характеризует параметр «посадка»: это разность между линейными размерами отверстия и вала. Когда соединяют два узла цилиндрической формы, то внутренняя поверхность «одеваемого» цилиндра называют охватывающей поверхностью, соответственно, внешнюю поверхность другого называют охватываемой поверхностью. Такое может иметь место при соединении узлов любой формы. В нашем случае, если поверхность охватывающая, то ее называют отверстием, во втором случае — валом.

Если, например, диаметр отверстия больше, чем диаметр вала, то разность диаметров называют **зазором**. Если наоборот, то — **натягом**.

Насколько, в каких пределах возможен зазор и натяг — это определяет допуск, который и обеспечивает требуемую посадку. Совершенно очевидно, что допуск — это разность между отклонениями, как максимальными, так и минимальными, зазора или натяга.

Номинальное, то есть расчетное (или заданное) значение зазора находится между этими пограничными значениями. Разность между верхним пределом и номинальным значением называют **верхним предельным отклонением**, разность с нижним пределом — **нижним предельным отклонением**.

Если взять разность между самими этими отклонениями, то получим допуск размера. Именно системой допуска и посадки определяется (устанавливается) класс точности узлов.

Если в расчетах или графически совместить соответствующие границы отверстия и вала, то между, например, верхним и нижним пределами обнаруживается зона, которую называют полем допуска.

Линия, соответствующая номинальному значению зазора, будет находиться в поле допуска, она называется нулевой линией.

Из-за взаимного расположения зазоров и натягов, допуски и посадки образуют целую систему. Однако все же в этой системе выделяются три основные группы.

1. Посадки с полем допуска отверстия находятся над полем допуска вала, может случиться, что нижняя граница поля допуска отверстия совмещается с верхней границей поля допуска вала (скользящие посадки). В этом случае говорят о посадках с зазором, причем зазор обеспечен в режиме соединения.

2. Случается так, что поле допуска вала находится над полем допуска отверстия. В таком случае говорят о посадке с натягом в соединении.

3. Наконец, встречаются случаи, когда поля допусков отверстия и вала чередуются, то есть имеют место ситуации (1) и (2). В этом смешанном случае говорят о переходных посадках.

Кроме вышеизложенного, допуски и посадки характеризуются **предельными зазорами (натягами)**, когда зазоры (или натяги) в соединяемых деталях не одинаковы, имеет место их разброс между предельными зазорами (натягами). Наибольший зазор (натяг) так и называется — **наибольший зазор (натяг)**. Соответственно, наименьший — **наименьший зазор (натяг)**.

Разница между предельными значениями зазоров (или натягов) называется **допуском посадки**.

Очевидно, что если посадки переходные, то допуск посадки состоит из суммы наибольших натяга и зазора.

Существуют ГОСТы, в которых имеются системы отверстия и вала. В каждой из систем есть множество классов точности посадки, которые составляются следующим образом: для системы отверстия вокруг одного номинального (теоретически расчетного) размера (параметра) сгруппируют предельные отклонения валов, при этом предельные значения отклонений отверстий неизменны.

Не входящие в рассматриваемую систему системы отверстий принимаются равными нулю. Эти нулевые отверстия называются основными отверстиями. Для валов класс точности посадки формируется аналогично, только здесь систему отверстий заменяет система валов, при этом неизменными остаются предельные отклонения вала. Совокупность изменений предельных отклонений при некотором номинальном значении размеров вала составляют содержание класса точности. Причем верхние отклонения валов нулевые, они называются **основными валами**.

Следует отметить, что все стандарты устанавливаются для эксплуатации КИП при комнатной температуре, то есть при 20 °С.

ЛЕКЦИЯ № 3. Точность приборов

1. Теория точности механизмов. Основные понятия. Причины ошибок

Если рассмотреть какой-либо движущийся узел некоторого механизма, то нетрудно заключить, что его приводит в движение какой-то другой узел, который называют **ведущим звеном**.

Тот узел, который ведущий узел приводит в движение, называют **ведомым звеном**.

Точность любого механизма определяется тем, насколько точно соответствуют параметры этих узлов заданным (или расчетным). Этими и другими вопросами, такими как выявление погрешностей звеньев, влияющих на точность механизмов в целом, занимается **теория точности механизмов**.

Современная теория точности механизмов состоит из теории механизмов и машин, технологии, метрологии, теории ошибок.

Здесь излагается теория ошибок, ее задачей является: определить пути повышения точности механизмов, суммируя частные погрешности (т. е. погрешности узлов). С этой целью теория точности механизмов занята решением двух задач:

1. **Прямая задача** — очень трудно решаемая задача. Ее суть состоит в определении соответствия параметров каждого узла техническим требованиям. Это работа очень трудоемкая, поскольку требуется согласование большого числа параметров.

Эта задача все же разрешается путем последовательных приближений. Само собой разумеется, что без применения программных средств с огромными вычислениями невозможно справиться.

2. **Обратная задача.** При решении этой задачи, хотя требования предыдущей задачи остаются в силе, все же главным является соответствие механизма заданному по конструкции, т. е. соответствие конечному результату.

Также проводится суммирование погрешностей отдельных составляющих механизма, но с целью определения общей неточности. Речь идет о точности механизма в целом, что позволяет несколько снизить жесткость требований к некоторым узлам. Результатом этого является наличие у этих узлов компенсаторов, которые позволяют при необходимости пригонять или регулировать требуемый параметр, тем самым удается достичь требуемых пределов чувствительности приборов.

Разберемся с характерными ошибками в приборостроении.

1) ошибка положения механизмов. Имеется в виду следующее: если взять два механизма, которые должны совершить некоторое согласованное действие, то несмотря на полное соответствие параметров ведущих звеньев, обнаруживается разница; эта разница и есть искомая ошибка. Эти механизмы можно себе представить как механизм действительный и его теоретический прототип, то есть под ошибкой имеется в виду несоответствие образца теоретическому прототипу;

2) ошибка перемещения механизмов: речь идет о несоответствии параметров ведомых узлов при тех же параметрах ведущих. Только теперь разница в перемещении, а не в положении ведомых узлов. Если ошибки типа (1) появляются при абсолютных методах измерения*, то ошибки типа (2) встречаются при относительных методах измерения;

3) ошибка положения ведомого звена — имеется в виду та же ошибка, что и в (1), только теперь ее причина в неточности ведущих звеньев, последние часто являются последствиями неправильных вводных данных;

4) ошибка перемещения ведомого звена: то же самое, что и ошибка (2), только теперь причина в ведущих звеньях, но по той же причине, что и в (3);

5) ошибка передаточного отношения (имеется в виду разность между действительным i_g (у образца) и теоретическим i_m передаточными отношениями):

$$\Delta i = i_g - i_m; \tag{1}$$

6) ошибка линейного передаточного отношения. Аналогично предыдущей ошибке, речь идет о разности между действительным i'_g и теоретическим i'_m линейными передаточными отношениями

$$\Delta i' = i'_g - i'_m. \qquad (2)$$

Факторы, порождающие рассмотренные выше и другие ошибки, очень многообразны. Тем не менее, они поддаются следующей классификации:

1) причины, связанные со схемой погрешностей, которые появляются при изготовлении механизмов (т. е. при применении схемы);

2) технологические причины, которые по линейным, т. е. геометрическим размерам разделяются на:

а) ошибки размера — отклонения размеров элементов у образца и теоретического прототипа от номинальной величины, а также ошибки между элементами, которые появляются при перемещении узлов, составляющих пару (кинематические пары);

б) ошибки формы у рабочих поверхностей тех же пар;

в) ошибки во взаимном расположении рабочих поверхностей узлов;

г) отклонения в шероховатости и волнистости от номинальных;

3) ошибки, вызванные силами в самом механизме (это силы деформации, трения, вибрации и прочие, а также воздействие динамических факторов (например, ударно-колебательное движение));

4) ошибки, связанные с нарушением температурного режима эксплуатации механизма, из-за изменения сопротивлений и линейных размеров в узлах;

5) ошибки, связанные с износом механизмов, в этом случае могут появиться любая из предыдущих ошибок или все вместе.

Передаточное отношение — это отношение мгновенных угловых скоростей, что одно и то же с мгновенными угловыми перемещениями звеньев ведомого и ведущего. Пусть угол поворота ведомого звена есть φ_1, причем φ_2 зависит от угла поворота ведущего звена φ_1. Тогда передаточное отношение:

$$i = \frac{w_2}{w_1} = \frac{d\varphi_2}{d\varphi_1}. \tag{3}$$

Линейное передаточное отношение: речь идет об отношении мгновенных линейных скоростей (что одно и то же с мгновенными линейными перемещениями) ведомого и ведущего звеньев в механизме. Если эти перемещения соответственно обозначить как v_2, v_1, то эти отношения:

$$i' = \frac{v_2}{v_1} = \frac{dS_2}{dS_1}. \tag{4}$$

Из школьного курса знаем, что если известны радиусы вращений соответствующих точек ведомого и ведущего звеньев, то (5) $v_2 = w_2 r_2,\ v_1 = w_1 r_1$. С учетом (5) из (3) следует:

$$i' = \frac{w_2 r_2}{w_1 r_1}, \tag{6}$$

поскольку $\frac{w_2}{w_1} = i$ (см. формулу (2)), то

$$i' = i = \frac{r_2}{r_1}. \tag{7}$$

Получили уравнение, связывающее угловое и линейное передаточные отношения.

2. Первичные ошибки и методы их определения

Рассмотрим ошибки схемы механизма.

После разработки конструкторских чертежей начинается реализация этих чертежей.

Производитель очень часто отклоняется от чертежа: для него становится важным получение функционального результата. Поэтому он идет по пути упрощения и изменения конструкторских разработок, достигнув все же требуемого результата, но только приблизительно, например, в передаче движения от одного звена к другому.

И сколько таких передач только в одном механизме? А передача электрических, пневматических, гидравлических данных? И куда деться от тех приближений, которые имели место при выборе исходного материала для производства самих узлов, а также от тех, при которых были изготовлены эти узлы?

Все эти приближения, в первое время обеспечив удовлетворительную работу, суммируясь, скоро дают о себе знать. На поверку «появляется» несоответствие механизма конструкторскому замыслу («теоретическая» ошибка при изготовлении механизма): вот это-то несоответствие («теоретическую» ошибку) и называют **ошибкой схемы**.

Но почему производитель прибегает к упрощенной схеме, приближенному результату?

По разным причинам: из-за упрощения технологий, «повышения» точности (это временно), наконец, из-за уменьшения трудоемкости, а следовательно, и себестоимости производства изделия.

Но такой выбор оправдан не всегда и часто носит в себе временный выигрыш. В конечном счете, потери оказываются больше, чем мнимый выигрыш.

С другими причинами типов ошибок картина примерно такая же, как и у ошибок схемы.

Методы обнаружения ошибок.

1. **Аналитический метод** — самый общий и распространенный метод обнаружения ошибок.

При этом сопоставляются уравнения движения уже имеющегося механизма и его теоретического прототипа. Цель: получить зависимость, которая выражала бы разность движений ведомых узлов в этих механизмах, в зависимости от движения ведущего звена уже произведенного механизма.

Полученная зависимость, являясь функцией от движения вышеупомянутого ведущего звена, как правило, соответствует искомой ошибке схемы ΔS_{cx}:

$$\Delta S_{cx} = S_{\partial} - S_{m},$$

где S_{∂} S_{m}— параметры движения ведомых узлов механизма (теоретического и действующего).

В итоге получается функция от ошибок схемы. Функция характеризует движение ведущего звена действующего механизма; ошибка схемы заключается в нарушении движения ведомого звена того же механизма, только это нарушение содержится в разности соответствующих параметров механизмов, действующего и теоретического прототипов.

Значение погрешности получают, разделив линейное перемещение нарушенного ΔS_{m} ведомого звена на чувствительность измерительного устройства R, и находят ошибку схемы, выраженную в

$$\Delta S_{m\,\text{изм}} = \frac{\Delta S_{m}}{R}. \qquad (8)$$

2. **Экспериментальный метод.** Этот метод применяют в том случае, когда применение предыдущего метода становится проблематичным из-за ряда причин, например, из-за плохого знания прибора, или же когда в приборах имеются упругие узлы, не позволяющие установить линейную зависимость между искомыми величинами.

Поэтому в случае обнаружения дефектов подвергают исследованию группы одинаковых приборов (механизмов).

После определения ряда одинаковых параметров, для которых характерны общие по роду отклонения, а для этого каждая единица прибора (механизма) исследуется многократно, в одних и тех же точках, где наблюдались отклонения, определяются средние значения этих параметров для каждой единицы, затем, исходя из этих средних, находят среднее значение для всей исследуемой партии.

После обработки полученных данных удается определить функцию от ошибки схемы прибора (механизма). Достоинством этого метода перед предыдущим является следующее: функцию от ошибок схемы находят, например, методом наименьших квадратов, что значит уменьшение влияния ошибок каждого механизма на общую ошибку для всей группы.

Если построить кривую для таких рядов найденных ошибок, то она будет отражать не только искомые ошибки схемы, но и другие систематические, которые были допущены при изготовлении или сборке приборов.

Способ нахождения первичных ошибок

Здесь речь пойдет о тех ошибках, которые характерны для технологии при изготовлении узлов или сборке механизмов: это в основном геометрические неточности узлов в форме, поверхности и т. п.

Первичной ошибкой является неточность геометрической формы рабочих поверхностей узлов (звеньев).

Этими ошибками могут считаться отклонения разного рода: геометрические параметры, связанные с формой и поверхностью узлов, а также с их взаимным расположением.

Когда говорим о кинематической паре или звене механизма, то имеем в виду два или более элементов механизма, например, ведущий и ведомый узлы. Для их согласованной работы выбираются конкретные параметры: сколько их, например, для поверхности кинематической пары. Их число, как правило, известно из чертежа. Совершенно ясно, что при изготовлении узла каждый из этих параметров может получиться несоответствующим данным чертежа. Поэтому число первичных ошибок целесообразно взять равным количеству этих параметров. Причем учитываются только рабочие, т. е. взаимодействующие поверхности узлов.

Короче говоря, число первичных ошибок определяется тем, каким количеством координат определяется рассматриваемая рабочая поверхность кинематической пары, — таким и должно быть число скалярных первичных ошибок.

Рассмотрим случаи.

1. Элемент кинематической пары, оформлен как точка. Например, этот элемент, как заточенный карандаш, заканчивается точкой. В системе координат *XYZ* положение этой точки характеризуется тремя координатами, по каждой из которых может быть допущено отклонение. Следовательно, число первичных ошибок также три, но уже в скалярной форме.

2. Элемент кинематической пары имеет форму линии, это значит, что число координат в системе *XYZ* уже четыре. Поэтому число первичных ошибок тоже четыре.

3. Элемент кинематической пары имеет форму плоскости: в этом случае число первичных ошибок не растет и снова равно трем.

В этом случае в числе параметров могут быть и направляющие углы, но общее число первичных ошибок остается тем же, равным трем.

Ясно, что если плоскостей несколько, то число первичных ошибок будет равно кратному трем, например, $3n$, где n — количество плоскостей.

4. В случае, когда элемент кинематической пары имеет форму сферы, отклонения могут иметь радиус сферы по трем координатам в декартовой (*XYZ*) системе координат и плюс радиус сферы по длине.

В итоге, число первичных ошибок равно четырем, т. е. равно количеству параметров с возможными отклонениями.

5. Рассуждая по вышеизложенной логике, нетрудно заключить, что число первичных ошибок может дойти до 11, например элемент кинематической пары, состоящий из цилиндра и двух

плоскостей. Поскольку для цилиндра (кругового) число первичных ошибок равно пяти.

6. Если цилиндр не круговой, то число первичных ошибок — шесть.

7. Если взять круговой конус, то число первичных ошибок — семь, для некругового — восемь. В случае усеченного кругового конуса также восемь.

Как мы видим, числа первичных ошибок элемента кинематической пары, суммируясь для каждого звена, в итоге составляют суммарное число первичных ошибок для всего механизма.

Правда, в некоторых нестандартных случаях приходится учитывать другие особенности, например, специфику сборки нестандартного оборудования. Но тенденция к минимизации количества первичных ошибок та же: это удается, если первичные ошибки определяют исходя из координатных осей, связав с ними кинематические пары.

Именно такого подхода и ждут технологические, метрологические и эксплуатационные требования к изготовлению качественного изделия. При подсчете числа первичных ошибок по произвольно выбранным осям (число первичных ошибок можно определить и так) количество параметров растет, а это приводит к ухудшению качества из-за сложности согласования количества параметров друг с другом.

3. Исследование точности механизмов

В процессе исследования механизмов анализируются: причины возникновения ошибок, предполагаемые (ожидаемые) величины этих ошибок, методы контроля ошибок и поверки приборов.

Как мы видим, все эти вопросы принадлежат метрологии, как неотъемлемой части производства и эксплуатации изделий в «Приборостроении». Напомним, что теория точности, которой посвящена текущая глава, состоит из теории ошибок, метрологии, технологии.

Поэтому прежде чем перейти непосредственно к изложению вопросов метрологии, требуется ознакомление с некоторыми понятиями, без которых изложение потеряет смысл. Речь идет о следующих понятиях.

1. **Действующая ошибка кинематической пары** — так называют результирующую ошибку в формах, размерах элемента кинематической пары, которая проявляется непосредственно в процессе работы.

Ее отличительной чертой является то, что ее невозможно фиксировать как постоянную величину, поскольку механизм работает непрерывно, следовательно, например, соприкасающиеся поверхности узлов заменяются другими, имеющими свои возможные отклонения от заданных. Другими словами, перемещение ведущего звена $f(\varphi)$ является аргументом для функций закона распределения этих ошибок.

$$\Delta F = f(\varphi). \tag{9}$$

2. **Линия действия** — так называют линию, которая является общей нормалью к соприкасающимся рабочим поверхностям, причем эта нормаль проходит через точку касания этих поверхностей. Если рассмотреть соответствующий рисунок, то увидим, что из-за отклонения параметров у элемента кинематической пары практическая линия действия отличается от теоретической (заданной), что является нередким явлением.

Казалось бы, действующая ошибка у элемента кинематической пары является простой суммой отдельных первичных ошибок, но это не так. Взаимодействуя друг с другом в процессе эксплуатации, отдельные ошибки порождают совсем другую, комплексную ошибку, которая не подчиняется закону простого суммирования.

Поэтому первичные ошибки рассматривают как частные случаи от комплексной: при анализе комплексной (функциональной) ошибки ее раскладывают в ряд, состоящий из первичных ошибок. Этот метод помогает увидеть ошибки, допущенные в самом технологическом процессе, в разных его стадиях.

Насколько важна роль функциональной ошибки в теории и практике приборостроения, говорит тот факт, что из-за их выявления требуется установить функциональную взаимосвязь отклонений в процессе изготовления (технологических погрешностей) с ошибками в готовых изделиях, а также исследовать динамическую работу заведомо неточного механизма.

Тем не менее, производимые расчеты исходят от функциональной (т. е. практически существующей) ошибки узлов. Какие методы используются в анализе ошибок?

Их много: все зависит от характера ошибок и замысла исследователя. Все же можно выделить следующие методы: дифференциальный метод; метод преобразованного механизма; геометрический метод; метод планов малых перемещений; метод относительных ошибок; метод плеча и линии действия.

Первые пять методов служат для анализа первичных ошибок.

Последний метод применяется для исследования функциональных действующих (т. е. комплексных) ошибок, причем является достаточно надежным.

Для перехода от комплексных ошибок к частным и наоборот существует специальная функция, которую называют **передаточным отношением ошибок** (ее нередко называют еще **коэффициентом влияния**).

Остановимся на методе плеч и линий действия, поскольку этот метод позволяет выявить все погрешности, приводящие к кинематической неточности прибора.

Погрешности делят на следующие группы:

1. ΔFr — так выделяют те избыточные приращения в общем плече, которые возникают из-за отклонений в подвижных звеньях механизма.

2. $\Delta F л.д.$ — так обозначают погрешности, которые возникают из-за ошибок на линии действий или на параллельных ей линиях.

3. $\Delta F н.э.$ — приращения (погрешности), являющиеся следствием ошибок у неподвижных звеньев механизма.

Общее приращение ΔF_{Σ}, как нетрудно себе представить, является суммой вышеперечисленных групп, то есть

$$_{\Delta}F_{\Sigma} = {}_{\Delta}F_{r} + {}_{\Delta}F_{л.д.} + {}_{\Delta}F_{н.э.} \qquad (10)$$

Поскольку рабочие поверхности непрерывно изменяются, то изменяются и погрешности, содержащиеся в них. Поэтому реальный процесс можно рассматривать, как плавное (т. е. непрерывное) изменение обобщенного плеча δr_0. Следовательно,

$$\Delta Fr = \int \delta r_0 \, d\varphi, \tag{11}$$

где φ — параметр (или его аналог), который исследуется, им может быть, например, угол поворота, δr_0 — ошибка в подвижном звене, ΔFr — суммарное приращение.

В свою очередь, приращение δr_0 можно представить как сумму всех ошибок по линиям действия (в рассматриваемом случае) на само общее плечо:

$$\delta r_0 = \sum \delta_i \cos\gamma_i, \tag{12}$$

где δ_i — ошибка в звене i, γ_i между направлением ошибки и общим плечом.

Формула для ошибок в неподвижных звеньях выглядит следующим образом:

$$\Delta F н.э. = \Delta н.э. \cos w, \tag{13}$$

где Ä*н.э.* — элементарная ошибка в неподвижном звене, w — угол между направлением ошибки Ä*н.э.* и линией действия.

С учетом последних формул:

$$\Delta F_\Sigma = \int \delta r_0 d \quad + \Delta F л.д. + \Delta н.э. \times cos w. \tag{14}$$

Остается вопрос о знаках слагаемых: знаки зависят от направления отсчета аргумента при исследовании. Когда речь идет о приращении плеча δr_0, то его знак «плюс», если при возрастании аргумента и координат положения ведомого звена растет в противном случае, знак у δr_0 — отрицательный.

Для следующих двух слагаемых почти то же самое: если положительная ошибка увеличивает координату ведомого звена, то знак положительный, и наоборот.

Если приходится исследовать ошибки более сложных механизмов (систем), то суммарное избыточное приращение разлагают по отдельным линиям действия, и после суммируют избыточное приращение: так и сказано выше — сперва суммарная ошибка должна быть разложена на частные, а не частные — суммированы.

Для переноса избыточного приращения с одной линии на другую, действие между этими линиями умножают на линейное передаточное приращение:

$$\Delta F_2 = \Delta F_1 i' p, \quad \text{где} \quad i' p = i\frac{r_2}{r_1},$$

поэтому

$$\Delta F_2 = \Delta F_1 i\frac{r_2}{r_1}. \tag{15}$$

где $\Delta F_2, \Delta F_1$ — действия соответственно ведомого и ведущего звеньев,

i — линейное передаточное отношение между узлами,

r_2, r_1 — соответственно, радиусы точек, находящихся на рассматриваемых узлах.

Для механизмов других типов и формула (15) будет выглядеть по-другому.

Не всегда совпадают линии движения ведомого звена и действия: они могут образовать некоторый угол $\emptyset$. В таком случае приращение на линии движения

$$\Delta S = \frac{\Delta F_\Sigma}{\cos\Psi}, \tag{16}$$

где ΔF_{Σ} — общее избыточное приращение по линии действия;

$\frac{\Delta F_{\Sigma}}{\cos\Psi}$ — антипроекция ΔF на линии действия.

Если исходить из ошибки положения механизма, то развернутая формула зависимости ошибки положения от различных технологических ошибок имеет вид:

$$\Delta S = \sum\left[\int \delta r_0 d \quad + \Delta F_{д.д.} + \Delta_{н.э.}\cos Q\right]\frac{i'_F}{\cos\Psi}. \qquad (17)$$

Ошибка для линейного углового положения ведомого звена по формуле:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{\Delta F_{\Sigma}}{r_{02}}, \qquad (18)$$

где ΔF_{Σ} — общее избыточное давление; $\Delta\varphi_2, r_{02}$ — изменениеугла между двумя положениями и радиус точки у ведомого звена.

Для углового перемещения ведомого звена ошибка:

$$\Delta\varphi_{2\text{пер}} = \left[\frac{\Delta F_{\Sigma}}{r_{02}}\right]_к - \left[\frac{\Delta F_{\Sigma}}{r_{02}}\right]_н, \qquad (19)$$

где индексы «к», «н» означают конечное начальное положение. Очевидно, что ошибка линейного перемещения

$$\Delta S_{пер} = \Delta S_k - \Delta S_н. \qquad (20)$$

Рассуждая дальше, можно определить ошибки других параметров ведомого звена. Для скорости:

$$\Delta v^2 = \frac{d(\Delta S_2)}{dt}, \quad (21)$$

где ΔS_2 можно вычислить по формуле (17). С учетом $w_1 = \frac{\Delta\varphi_1}{dt}$, из формулы (17) следует, что

$$\Delta v^2 = \frac{d(\Delta S_2)}{\Delta\varphi_1} w_1, \ (22)$$

где $w_1 = \frac{\Delta\varphi_1}{dt}$ — угловая скорость ведущего звена.

Для ускорения

$$\Delta\alpha = \frac{d\left(\Delta v^2\right)}{dt} = \frac{d^2(\Delta S_2)}{dt^2}. \qquad (23)$$

При расчетах по определению ошибки используют также коэффициент неравномерности хода:

$$\delta_w = \frac{w_{\max} - w_{\min}}{w_{\text{ср}}}, \qquad (24)$$

где смысл всех величин очевиден — $w_{\max}, w_{\min}, w_{\text{ср}}$ — значения (максимальное, минимальное и среднее) мгновенной угловой скорости w.

После некоторого преобразования

$$\delta_w = \frac{\Delta i_{\max} - \Delta i_{\min}}{i}, \qquad (25)$$

где i — передаточное отношение ошибок.

4. Расчет точности механизмов. Обеспечение заданной точности

Вкратце перечислим, что было рассмотрено в теории точности приборов.

1. Во-первых, мы убедились, что если ведется исследование прибора с его постоянными известными ошибками и известными их закономерностями распределения переменных ошибок, то удается найти функциональную зависимость поведения ведомого звена, стало быть, точности прибора от ошибок положения или перемещения механизма.

2. Во-вторых, мы убедились, что возможно определить влияние отдельных (в том числе первичных) или комплексных (суммарных) ошибок на общую ошибку механизма. И после этого, путем суммирования, удается найти искомую функцию ошибки положения механизма.

3. И наконец, убедились — после определения функции ошибок положения механизма с помощью уравнения кинематики неточного механизма возможно найти все остальные показатели в работе механизма, влияющие на неточность того же механизма.

Теперь вопрос в том, как разобраться с проблемой точности в партии из однородных механизмов?

Имеем только допуски и ничего больше: вот в пределах этих допусков и требуется обеспечить заданную точность.

В пределах допуска возможен разнообразный разброс самых различных типов ошибок. Сложность ситуации в том, что одни и те же ошибки могут влиять на точность механизма в конкретном случае, но те же ошибки в других случаях могут не сказаться на их точности. Все зависит от разного сочетания разных обстоятельств, которое носит случайный характер.

Именно по этой причине их называют случайными ошибками, а закон распределения этих ошибок — случайными функциями.

Поэтому при определении суммарной точности прибора складывают крайние данные в пределах допуска, причем суммированию подвергаются все ошибки, по правилам теории вероятности. Несмотря на большое множество случайных величин, среди них все же есть такие, которые остаются постоянными при разных положениях или перемещениях механизма.

Рассмотрением именно таких ошибок и будем заниматься; схоластические процессы придется оставить за бортом. Теперь задача представляется следующей: задан допуск для расчета точности партии однородных механизмов. Требуется найти характеристики случайных ошибок, которые находятся в пределах заданного допуска, и их связь с самим допуском.

Если предположить, что допуск имеет вид $[x_в; x_н]$, где $x_в$, $x_н$ — границы допуска, то закон распределения случайной величины $x \in [x_в; x_н]$ ($\in$ — знак принадлежности) имеет плотность вероятности $\varphi(x)$.

Причем, для любой случайной величины существует такое $\varphi(x)$, для которых задан допуск.

Поиск и определение характеристик случайной величины (или ошибок) подводится к нахождению следующих характеристик.

1. Находят координаты середины поля допуска Δ_0, где

$$\Delta_0 = \frac{x_в + x_н}{2}. \qquad (26)$$

2. Половины величины поля допуска

$$\delta = \frac{x_в - x_н}{2}.$$

3. Закон распределения отклонения внутри поля допуска имеет асимметрию (относительную), коэффициент которой

$$\alpha = \frac{\overline{x} - \Delta_0}{\delta}. \qquad (27)$$

4. Относительное среднее квадратическое отклонение

$$\lambda = \frac{\partial}{\delta}. \qquad (28)$$

Для определения значений (точнее, выбора) α и λ существует много методов, вплоть до табличных. Оказывается достаточным рассмотрение 4—8 законов распределения, то есть при выборе оказывается достаточным рассмотрение выбранных значений α и λ.

Следует иметь в виду, что на этом определение характеристик первичных ошибок не завершается. Множество других факторов, которые по разным причинам оставляют без внимания, могут оказать (и оказывают) существенное влияние на точность приборов (отклонения, связанные с геометрией, с изменением температуры, векторные и др.).

Все эти ошибки можно характеризовать или с помощью их модуля или направления. Среди них наибольшее влияние на передаточные отношения, следовательно, и на точность прибора, оказывают векторные ошибки: они вызваны случайным значением угла, который можно рассматривать, как угол между линией действия и направлением отсчета ошибки.

В вышеприведенных формулах этот угол уже встречался в виде $\sin\varphi, \cos\varphi$, причем $0 < \varphi < 360^{o}$.

На первый взгляд, раз этот угол может принимать любое значение в пределах (0, 360°), то он не должен оказать какое-либо влияние на точность прибора; на практике, поскольку этот угол связан с перемещением ведущего угла, его случайное значение может оказать значительное влияние на точность из-за его влияния на передаточные отношения.

Ранее было сказано, что нельзя суммарную ошибку механически формировать из арифметического сложения других (составных). Наоборот, суммарную ошибку разложить в ряд, проанализировть члены ряда, только после этого обобщать и формировать общую картину о происхождении ошибок.

Другими словами, функциональная погрешность, которая есть результат сочетания множества других частных ошибок, не поддается формированию путем алгебраического сложения.

Как у любой функции, у ошибки есть свои, только ей присущие причины, так и у самих частных ошибок есть похожие причины: их называют **сочетанием неблагоприятных статистических данных**. По этой причине частные ошибки, приводящие к одинаковым функциональным, не обязательно одни и те же.

Пример: если число 7 обозначить как суммарную ошибку, а цифры, из сложения которых можно получить 7, как частные ошибки, то возможно несколько вариантов получения 7

$$1 + 6 = 7;$$
$$3 + 4 = 7;$$
$$5 + 2 = 7;$$
$$2 + 5 = 7;$$
$$4 + 3 = 7;$$
$$6 + 1 = 7.$$

Вариантов будет больше, если перейти к отрицательным числам.

Но ни одно выражение даже в приведенном примере не является повторением любого другого.

Поэтому, чтобы найти причину ошибки «7», ее сначала надо представить как ряд, проанализировать члены ряда —только после этого суммировать полученные результаты.

Здесь речь не идет о цифрах, говорим об ошибках, обозначенных цифрами.

Возвращаясь непосредственно к приборостроению, можно сказать, что одинаковые ошибки у механизмов из одной и той же партии могут иметь разные причины.

Все же удается выйти из этого положения: если регистрировать все ошибки положения ведущих звеньев у разных механизмов, то можно «видеть» их среднее значение (это и есть математическое ожидание).

Кроме средних ошибок, из полученного уже ряда средних ошибок (правильнее было бы говорить не о ряде, а о некоей функции) выделяют пограничные (предельные) значения ошибок.

Согласно нормальному закону распределения (возможно, и другим), в пределах пограничных значений ошибок положения механизма вероятность появления отдельных величин ошибки имеет некоторую плотность.

Чтобы получить полную картину возможных ошибок при расчете точности механизмов, требуется найти следующие статистические значения ошибки в положении механизма.

1. $\Delta\overline{S}_{\Sigma}$ — среднее значение ошибки положения механизма.

Для его определения составляют алгебраическую сумму значений случайных ошибок, предварительно помножив их на соответствующие передаточные отношения.

2. δS_{Σ} — действующая предельная случайная ошибка положения механизма.

3. ΔS_{Σ} — действующая предельная ошибка положения механизма.

Если теперь допустить, что:

1) учитываемые нами первичные ошибки не зависят друг от друга, следовательно, любая них может произойти независимо от любой другой;

2) учтенные нами ошибки и по количеству, и по распределению следуют нормальному закону распределения (закону Гаусса);

3) взаимосвязь между первичными ошибками, которые мы учитываем, и ошибками положения механизма линейна.

То можем определить полную (действующую) ошибку положения механизма:

$$\sum = \text{Ä}\overline{S}_{\Sigma} \pm \text{ä}S_{\Sigma} \qquad (29)$$

Что касается самой погрешности расчета точности, это зависит от зоны рассеивания случайной величины, если, конечно, она следует распределению Гаусса. Теоретически эту зону можно взять бесконечно большой, и вероятность ошибок здесь будет наименьшая, т. е. от масштаба зоны зависит значение вероятности случайной величины.

На практике достаточно ограничиться зоной, где можно пренебречь бесконечно малой вероятностью появления случайной ошибки.

Очевидно, что чем больше зона рассеивания, тем меньше вероятность появления ошибок, выходящих за границы этой зоны.

Следовательно, уменьшение величины (см. график) увеличивает вероятность ошибок. Расчет ошибок перемещения такой же, что и при расчете ошибок положения. Это требуется, если речь идет об относительных измерениях. Так же находят статистические характеристики ошибки, что следуют из ошибок положения механизма:

$\Delta\bar{S}\sum_{пер}$ ... — среднее значение ошибки перемещения механизма;

$\delta S\sum_{пер}$ — действующая предельная случайная ошибка перемещения механизма;

$\Delta S\sum_{пер}$ — действующая полная ошибка перемещения механизма.

Среднее значение ошибки перемещения механизма как разность средних значений ошибок при начальном $\Delta\bar{S}\sum_{H}$ и при конечном $\Delta\bar{S}\sum_{k}$ положениях механизма, то есть

$$\Delta\bar{S} = \sum_{пер} \Delta\bar{S}\sum_{k} - \Delta\bar{S}\sum_{n}. \qquad (30)$$

Теперь, когда мы знаем основы расчета точности приборов (механизмов), то можем составить краткий алгоритм этого расчета для партии однородных механизмов (приборов):

1) уточняем, каковы ошибки выбранной схемы механизма (прибора);

2) распределяем эти ошибки по составным частям устройства, определив их как частные ошибки; затем сортируем, отбросив незначительные;

3) для каждой частной (первичной) ошибки нужно определить границы допуска, для чего достаточно определить характеристики $Ä_0, \delta, \alpha, \lambda$;

4) находим передаточные числа для каждой частной (первичной) ошибки и, если они случайные, определяем статистические характеристики $\bar{i}'_S, \ddot{e}_{iS}, \ddot{a}_{iS}$, после чего составляем сводную таблицу: для любого положения оказывается достаточно трех-пяти значений i_n, где $n = 1, 2, ..., 5$;

5) определив по таблице статистических характеристик ошибки положения механизма для нескольких положений ведущего звена, строим график (если приборы предназначены для абсолютного измерения). Если требуется, можно провести повторный расчет при другом допуске.

Если приборы требуется использовать для относительного измерения, то поступаем так же: определив статистические характеристики для ошибки перемещения механизма, строим график значений средних и предельных ошибок перемещения механизма для нескольких положений механизма.

И в том, и в другом случаях по полученной кривой определяется точность механизмов. Теперь рассмотрим случай, когда точность задана и остается обеспечить эту точность, выбирая параметры механизмов; поскольку при этом требуется подгонять сами параметры под заданную точность, то речь идет о решении прямой задачи теории точности.

Приведем краткий алгоритм последовательности действий при решении этой задачи:

1) выбираем схему (принципиальную);

2) по схеме определяем номинальные величины, при которых заданная точность содержит погрешность схемы, т. е. погрешности не превышают заданную точность;

3) выясняем место ошибок звеньев у механизма, выбираем число компенсаторов (регуляторов) и их местоположение, устанавливаем системы регулирования при сборке;

4) устанавливаем допуски на размеры звеньев механизма;

5) рассчитываем суммарную ошибку.

Последний пункт является решением уже обратной задачи теории точности.

5. Расчет точности электрических цепей приборов. Методы расчета

В электрических цепях механизмов в основном используют следующие элементы: сопротивления R; емкости C; индуктивности L; взаимные индуктивности M.

Параметры этих элементов не обязательно зависят от токов, которые протекают через них. В таком случае эти элементы называют **линейными элементами**. **Ведущими** в этих цепях являются элементы, величина которых может быть регулирована, так как именно с их помощью можно регулировать выходное напряжение. Электрическая цепь идеальна, если выполняет функцию по чертежу абсолютно точно. Реальная электрическая цепь выполняет ту же функцию с погрешностью. Систематическая погрешность схемы называется **структурной ошибкой**, которая является аналогом ошибки схемы.

Разность между практическим и идеальным выходными напряжениями называют ошибкой цепи. Из-за ошибки цепи и выходных параметров возникает погрешность, которую называют ошибкой выходного напряжения.

Если при изменении выходных параметров на постоянную величину между U_R и U_T образуется разность, то ее называют ошибкой изменения цепи по напряжению (или по току), где U_R — выходное напряжение реальной цепи, U_T — выходное напряжение идеальной цепи.

Если же ($U_R - U_T$) возникает из-за ошибок цепи и входных параметров, то такую разность называют **ошибкой изменения выходного напряжения**.

У электрических цепей первичные ошибки (т. е. погрешности), как правило, возникают по следующим причинам:

1) из-за отклонений практических величин элементов от их идеальных значений;

2) не предусмотренные чертежом продуктивные и емкостные проводимости, возникающие из-за неудачного монтажа;

3) ошибки в электродвижущей силе (источнике питания).

Среди таких ошибок также различают ошибки систематические и случайные: к последним относят, кроме всех прочих, и флуктуации в цепи, которые возникают случайно из-за изменения температуры, внешних наводок.

Различают электрические цепи, работающие в установившемся режиме и в переходном режиме.

С таким же различием оценивают прочность цепей. Рассмотрим первый случай, когда режим работы электрической цепи является установившимся.

Если линейная электрическая цепь состоит из омических элементов и n источников питания E_n, где $n = 1, 2, ..., n$; то ошибка выходного напряжения цепи:

$$\Delta U = E\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial q_i}\right)_0 \Delta q_i + E\left(\varphi - \varphi_0\right)_0 + \Delta E_{\varphi 0}, \qquad (31)$$

где первое слагаемое — погрешность цепи из-за ошибок в пара

метрах электрической цепи, второе — структурная ошибка (аналог ошибки схемы), третье — погрешность источника питания$

φ функция передачи идеальной цепи — это отличие $U_{вых}$ от $U_{вход}$ (выходное и входное напряжение);

$\left(\frac{\partial\varphi}{\partial q_i}\right)_0 = T_i$ — коэффициенты влияния первичных ошибок на

ΔU (ошибка выходного напряжения).

В индексе у первого слагаемого содержится нуль, это указание на то, чтобы все Äq_i были равны нулю.

Зависимость в (31) линейно относительна к слагаемым (т. е. относительно первичных ошибок), что значит, что эти ошибки независимы и могут быть рассмотрены отдельно от любой другой, при этом все другие действия выполнены точно в соответствии с чертежами.

Теперь ошибку выходного напряжения, которая возникла из-за первичных ошибок, можно выразить через изменение параметра $\ddot{A}q_i$. Рассматривая эту ошибку отдельно от других, из (31) имеем:

$$\Delta U = E\sum_{i=1}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial q_i}\right)_0 \Delta q_i = E\times T_i\Delta q_i, \qquad (32)$$

после приравнивания к нулю всех ошибок в выражении $\sum_{i=1}\left(\frac{\partial\varphi}{\partial q_i}\right)_0$ остается один $\left(\frac{\partial\varphi}{\partial q_i}\right)_0 = T_i$.

В нашем случае погрешность $\ddot{A}q_i$ может возникать из-за первичных ошибок, перечисленных выше.

Для вычисления ΔU требуется знать коэффициент влияния $\frac{\partial\varphi}{\partial q_i}$, который выражает, в какой степени первичные ошибки передались на выход через параметр Δq_i и вызвали ошибку ΔU_i. Для этого пользуются методом преобразованных цепей (другие методы громоздки по вычислению): выделив изучаемую ошибку, на ее месте образуют новую пару полюсов (закорачивают источник питания).

Если при этом внутреннее сопротивление у источника питания не отсутствует, то есть не равно нулю, то вместо закорачивания полюсов у источника вводят в цепь сопротивление R_i, которое равно внутреннему сопротивлению источника питания, но в этом случае возникает коэффициент влияния по ошибке $\ddot{A}R_i$ из-за введения R_i.

Согласно терминологии, из формулы (31) этот коэффициент

$$T_{Ri} = \left(\frac{\partial\varphi_{ab,cd}}{\partial R_i}\right)_0 = \frac{1}{R_i}\varphi_{ab,ef}\times\varphi_{qf,cd}. \qquad (33)$$

Для получения формулы (33) мы преобразуем цепь и приведем в вид идеальной цепи, где нет погрешностей.

Из (33) видно: коэффициент влияния T_{Ri} состоит из произведения функции передачи изучаемой цепи $\varphi_{ab,ef}$ и функции передачи преобразований цепи $\varphi_{ef,cd}$, путем изменения входных параметров можно получить таблицу, отражающую это изменение на поведении коэффициента влияния: следующие действия (построение графика, оценка неточностей) описаны в предыдущих вопросах.

Только следует учесть, что ошибка ΔU может быть внесена в результате, например, ошибки в монтаже схемы в виде утечки тока ΔA_i. В этом случае определение коэффициента влияния T_i проводится также по формуле (33), путем простой замены R_i на A_i, где ΔA_i — омическая проводимость.

Рассмотрим теперь расчет коэффициента влияния работы электрической цепи в переходном режиме.

В отличие от предыдущего режима, здесь цепь содержит, кроме сопротивлений R, еще и реактивные элементы: емкость C, индуктивность L, взаимная индуктивность M.

В этом случае задача несколько усложняется, поскольку уравнения, описывающие процессы в цепи, становятся дифференциальными (в предыдущем случае они были конечными) из-за возникновения дополнительных паразитных параметров, из-за изменения формы входного сигнала.

Короче говоря, погрешности из статистических превращаются в динамические. Тем не менее, эти дифференциальные уравнения легко сводить к простым алгебраическим уравнениям: следовательно, для расчета коэффициента влияния в рассматриваемом режиме формулы (32) и (33) остаются в силе.

Реактивные параметры в цепи удается привести в упрощенную форму путем их представления в комплексной форме. В этой форме реактивные составляющие параметры выражают мнимыми числами.

К слову, отношение мнимой части реактивного параметра к действительной — это тангенс угла сдвига фазы тока и напряжения на одном и том же элементе электрической цепи.

С учетом выше изложенного, приведение дифференциальных уравнений к простым алгебраическим становится возможным из-за упрощения следующих параметров:

1) омическое сопротивление $Z_R = R$;

2) сопротивление емкости $Z_C = \frac{1}{jwc}$; (34)

3) сопротивление индуктивности $Z_L = jwL, \left(j = \sqrt{-1}\right)$.

Проводимости для этих параметров следующие:

$$Y_R = \frac{1}{R};\ Y_C = jwc;\ Y_L = \frac{1}{jwL}. \tag{35}$$

Теперь можно выразить соответствующие источники погрешностей.

Ошибки:

1) в омическом сопротивлении $\Delta q_i = \Delta R_i$;

2) в омической проводимости $\Delta q_i = \Delta A_i$;

3) в емкости $\Delta q_i = jw\Delta C_i$;

4) в дополнительной емкостной проводимости ΔY_{Ci};

5) в индуктивности $\Delta q_i = jw\Delta L_i$;

6) в индуктивной проводимости Y_{Li}.

В современном приборостроении радиоэлектронной аппаратуры узлы механизмов становятся все более совершенными, более миниатюрными. Поэтому их питание не всегда имеет синусоидальный источник, формы входного сигнала в источниках питания в основном импульсивные, но могут быть и другими.

Следовательно, они работают в переходном, т. е. в нестационарном режиме, что означает: ошибка в цепи уже не является статистической, она переменная и является функцией времени $\Delta U_{вых}(t)$.

В случае необходимости определения погрешностей можно воспользоваться вышеописанным упрощением методики расчета точности цепей. Однако существуют и другие методы расчета точности цепей.

1. **Аналитический метод.** Как известно, в цепях, где есть реактивные элементы, рассматриваются реальные (не идеальные) цепи.

Разница между ними — наличие погрешностей в реальных и отсутствие их в идеальных — приводит к осложнению уравнений для описаний реальных цепей.

Например, для погрешности в расчете выходного напряжения. Если для идеальной цепи выходное напряжение $U_{0\,вых}(t)$, а для реальной — $U_{вых}(t)$, то их разница есть ошибка выходного напряжения для реальной системы.

$$\Delta U_{вых}(t) = U_{вых}(t) - U_{0вых}(t) \qquad (37)$$

где $U_{вых}(t)$ — интеграл реальной системы,

$U_{0\,вых}(t)$ — интеграл идеальной системы.

Как известно из курса математического анализа, малые величины типа погрешности Δq_i, разлагая, например, в ряд Тейлора и оставляя только первые два члена, можно представить в виде линейной функции первичных ошибок.

Например, после соответствующих преобразований формула (37) могла бы иметь вид:

$$\Delta U(t) = \left[U(t) + U_0(t)\right]_0 + \sum_{i=1}^{n_0}\left[\frac{\partial U(t)}{\partial q_i}\right]\Delta q_i. \qquad (38)$$

Сходство формул (31) и (37) говорит о том, что и в этом случае речь идет о вычислении коэффициентов влияний, только теперь они являются функциями от времени, т. е. не статистическими. Речь идет о вычислении частных производных $\partial U / \partial q_i$.

Есть и другой, более рациональный метод для вычисления коэффициентов влияния — метод Лапласа.

По этому методу используется преобразованная цепь, и все параметры, входящие в формулу, которая приводится, подвергаются так называемому S-преобразованию. Для параметра q_i, коэффициент влияния для погрешности:

$$T(S) = \Delta U_{вх}(S)\frac{1}{q_i(S)}\varphi_{ab,ef}(S) \times \varphi_{gf,cd}(S). \qquad (39)$$

В формуле (39) $\varphi_{ab,ef}(S)$, ${}_{gf,cd}(S)\varphi$ — функции передачи первичных ошибок в $U_{вых}$ в расчетной и преобразованной цепях, соответственно.

$\Delta U_{вх}(S)$ — входное напряжение, $q_i(S)$ — сопротивление элемента q_i.

Наличие в формуле буквы S означает, что все параметры элементов q_i расчетной цепи преобразованы в соответствующие для $q_i(S)$ элементы. Например, преобразованы реактивные сопротивления:

$$L \to SL,$$

$$C \to \frac{1}{SC}.$$

Поскольку все сводится к преобразованию в линейный вид, то омическое сопротивление не преобразуется.

После всего S-преобразования находят по формуле (39) коэффициент влияния в виде S-преобразования $T(s)$. Затем, согласно существующим таблицам, проводят обратные преобразования и получают коэффициент влияния как функцию от времени — $T(t)$.

2. **Экспериментальный метод.** В этом случае после цепей расчетной и преобразованной, соединенных последовательно, следует еще одна, так называемая операторная цепь. Операторная цепь не всегда требуется. Изменяя входное напряжение и наблюдая за входными и выходными параметрами, составляют таблицу, строят график и оценивают точность в расчетной цепи. При необходимости вносят коррективы.

3. **Вероятностный метод.** Два метода, рассмотренные выше, позволяют вычислить $\Delta U_{вых}$, если первичные ошибки известны и корректны, в том числе и как функция от времени.

Однако когда параметры выбранных цепей случайно могут измениться, то есть когда они случайны (например, из-за случайных изменений температуры в полях), тем более если исследуется механизм, состоящий уже не из одного, а группы других механизмов, даже с заданными точностями, то эти методы не срабатывают. Поэтому применяется вероятностный метод. Как случайные величины, первичные ошибки состоят из случайных параметров и случайных функций.

Случайные параметры, такие, как первичные ошибки, во времени не изменяются. В противном случае, эти параметры называют **случайными функциями**. Их разница в том, что в отдельно взятом механизме, случайный параметр изменяется только при переходе от одного к другому образцу.

Случайная функция изменяется и для отдельно взятого механизма: по времени. Ясно, что основными характеристиками первичных ошибок как случайных величин служит математическое ожидание.

$$a_i = \frac{1}{2}(\partial_i + m_i) + x_i \delta_i a, \tag{40}$$

также их дисперсия

$$D_i = \lambda_i^2 \delta_i^2. \tag{41}$$

В формулах (40) и (41) ∂_i, m_i — границы (алгебраические) допуска, δ — половина поля допуска, λ_i, x_i — конкретные характеристики конкретных законов распределения первичных ошибок, которые проявляются еще в процессе изготовления элементов.

Если теперь применять к уравнениям (40) и (41) формулу (38), то

$$a_{\Delta U_{noct}}(t) = [U(t) - U_0(t)]_0 + \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\partial U}{\partial q_i}(t) \right]_0 a_i, \tag{42}$$

$$D_{\Delta U_{noct}}(t) = \sum_{i=1}^{n} \left[\frac{\partial U}{\partial q_i}(t) \right]_0 D_i. \tag{43}$$

Полученные формулы позволяют определить пограничные ошибки в цепи. В случае, если первичные ошибки являются функциями от времени, для вычисления первичной ошибки применяют следующую формулу:

$$\delta^2_{\Delta U_J} = \int_0^{\infty} [T_i(2\eth jf)]^2 G\Delta q_i(f) df. \tag{44}$$

Здесь $G(f)$ — спектральная плотность, характеризующая спектральный состав случайного сигнала. Нередко вместо $G(f)$ используют корреляционную функцию $R(t)$, которая является мерой корреляционной связи случайных сигналов для различных моментов времени.

$G(f)$, $R(t)$ связаны между собой преобразованием Фурье.

$\delta^2_{\Delta U_1}$ — среднеквадратичное значение ошибки $U_{вых}$.

Формула (44) справедлива, если среднее значение первичной ошибки как стационарной случайной величины равно нулю. В противном случае, для определения $\Delta U_{вых}$ применяется формула (42).

С помощью (42)–(44) удается определить вероятностные характеристики ошибок для выходного напряжения ΔU_i. Для рассматриваемых случайных функций аналогичные формулы (42) и (43) будут иметь следующий вид:

$$a_{\Delta U_i}(t) = a_{\Delta U_i}(t)_{пар} + a_{\Delta U_i}(t)_{сл.ф}, \tag{45}$$

$$D_{\Delta U_i}(t) = D_{\Delta U_i}(t)_{пар} + D_{\Delta U_i}(t)_{сл.ф}. \tag{46}$$

Несмотря на то, что ошибки ΔU_i вызываются большим количеством первичных ошибок, результат один и тот же: ΔU_i, — следовательно, ошибка должна следовать распределению Гаусса. В таком случае, вероятность распределения ΔU_i

$$P(\Delta U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{\Delta U}}} e.^{-\frac{(\Delta U - a_{\Delta U})^2}{2D_{\Delta U}}} \tag{47}$$

В (47) математическое ожидание $a_{\Delta U}$, дисперсия $D_{\Delta U}$ определяются по формулам (45) и (46). Изучая кривую, удобно ввести новые параметры: предельное отклонение $\xi(t)$ для ошибки $\Delta U(t)$ от ее среднего значения $a_{\Delta U}(t)$:

$$\xi = 3\sqrt{D_{\Delta U}}. \tag{48}$$

Это нижняя граница.

Если оценить вероятность

$$\left|U - a_{\Delta U}\right| > \xi, \text{ то } \xi = 0{,}27.$$

Максимум возможной ошибки для $\Delta U(t)$

$$\xi_{np}(t) = \left|a_{\Delta U}(t)\right| + \xi(t). \qquad (49)$$

6. Расчет точности пневматических КИП

Особенностями в расчетах точности пневматических приборов являются, кроме всего прочего, источники ошибок при измерениях. Эти ошибки имеют следующие происхождения:

1) погрешности установочных калибров, температурные погрешности и другие, которые характерны для всех КИП;
2) нелинейность физических зависимостей в пневматических КИП (основной источник);
3) отсутствие жесткой фиксации положения в процессе измерения самого изделия, которое подвергается измерению;
4) особенности динамики измерения.

Различают пневматические КИП двух основных типов: **датчики давления и датчики расхода воздуха**.

Номинальное передаточное (т. е. чувствительность прибора)

$$J_0 \sim \frac{a}{c}, \qquad (50)$$

где a — интервал шкалы измерений;

c — цена деления шкалы.

Если определить чувствительность прибора для текущего момента (измерений), то

$$J = \frac{dL}{dS}. \qquad (51)$$

При линейности $L(S)$, текущее передаточное отношение

$$J = J_0. \tag{52}$$

Если теперь величина зазора S_1 по каким-то причинам изменилась на δS, то перемещение стрелки уже должно быть другое, как следует из формулы (51).

$$L_э = J_0 \delta S. \tag{53}$$

В действительности перемещение стрелки прибора

$$L = \int_{S_1}^{S_1+\delta S} J dS. \tag{54}$$

Вот и получили искомую величину. Ошибку перемещения стрелки

$$\Delta L = L_э - L \tag{55}$$

называют систематической ошибкой показаний Δ, где

$$\Delta = \frac{J_{0\delta S} - \int_{S_1}^{S_1+\delta S} J dS}{J_0} = \delta S - \frac{\int_{S_1}^{S_1+\delta S} J dS}{\frac{1}{S_2 - S_1} \int_{S_1}^{S_2} J dS}. \tag{56}$$

В формуле (56), S_1, S_2 — значения зазоров, которые находят перед любым измерением при определении цены деления шкалы, т. е. при любой настройке прибора.

Из (56) однозначно следует, что ошибка в показаниях Δ рассматриваемого КИП зависит от других параметров того же прибора, например, от таких, по которым определяют его чувствительность J; от способа установки нуля.

Этот нуль достижим только в том случае, если $S_2 = S_1 + \delta S$ или $S_2 = S_1$.

Последние условия соблюдаем только в случае, если измеряемые величины совпадают размерами или положением калибровок: насколько точно установлена калибровка, настолько точны и показания прибора.

Но на практике это редко удается, если вообще удается из-за плавающего контакта датчика со стрелкой, поэтому остается выбирать КИП и пользоваться им более точно.

Из-за вышеуказанной причины наибольшее значение придается вопросам способа наладки прибора, которые состоят в выборе размеров установочных калибров, а эти калибры определяют величины зазоров S_1, S_2. Как только что было доказано в формуле (56), именно эти последние и определяют ошибку Δ.

Если зазоров несколько, то говорят о среднем значении

$$S = \frac{S_1 + S_2 + ... + S_n}{n}, \; n = 1, 2, ..., N. \tag{57}$$

Из формулы (56) также следует, что нелинейность прибора и нежесткая фиксация при измерении контролируемых изделий не влияют на ошибку Δ при правильной наладке.

Но нелинейность превращается в причину ошибки, если пренебречь погрешностями непневматических узлов, следовательно, при постоянном передаточном отношении этих узлов, если рассмотреть эту линейность как функцию, то она зависит, например, от диаметров сопел и от входного давления.

Как показано выше, номинальная чувствительность пневматических КИП J_0 зависит от отношения a / c (50). Следовательно, сам линейный закон построения прибора определяется величиной J_0.

При определенных предположениях, номинальная «пневматическая» чувствительность

$$i_{S0} = \frac{1}{S_2 - S_1}\int_{S_1}^{S_2} i_S dS = \frac{h_2 - h_1}{S_2 - S_1}. \tag{58}$$

В формуле (58), h_1, h_2 — величины давлений, соответствующие наладочным значениям зазоров S_1, S_2. Следует отметить, что если не учитывать другие передаточные отношения, то i_{S0} превращается в единственную характеристику, которая характеризует чувствительность системы.

Как и из формулы (56), из (58) также следует решающая роль наладки пневматических КИП в установлении точности их размеров.

Например, если «заморозить» все другие параметры, то линейная зависимость изменения давления (56), точнее, i_{0S}, определяется только способом наладки.

i_{0S} имеет координаты S и h , где, в свою очередь, сама функция $h(S)$ характеризует действительный закон изменения давления: поскольку $h(S)$, как функция зависит от диаметров сопел и от входного давления H.

А последнее определяется величиной зазоров S_1, S_2.

Рассмотрим три варианта (способа) наладки пневматических КИП, причем каждый следующий способ приводит к большей точности измерений.

1. Теоретический способ наладки пневматических КИП: кроме всего прочего, этот способ очень удобен для анализа количественных и качественных показателей.

По **первому способу**, налаживание прибора сводится к точной установке калибровки, которая зависит от значения величин зазоров S_1, S_2; эти величины, как правило, близки к некоторому значению S. S — точка, которая находится в примерной середине линии $h(S)$, в точке перегиба этой прямой. При этом i_{S0} считают такой же, что и максимальное значение

$$i_S = \left(\frac{dh}{dS}\right)S = S,$$

а после этого, чтобы не путать, пишут ее так: i_S : i_S является тангенсом угла a между прямой, проходящей через точку перегиба линии $h(S)$, то есть через точку $h(S)$ и абсциссу.

Прямая, проходящая через точку, отражает линейную (причем теоретическую) зависимость $h(S)$; кривая — действительную.

Если теперь взять прямоугольник Ak, катетами которого будут ордината и абсцисса, величины Δh на самом деле являются разностью ординат действительной и теоретической зависимости $h(S)$, то по известным tgx и Δh определяются ΔS, где по определению

$$\Delta S = \frac{\Delta h}{i_S}. \qquad (60)$$

Имеется в виду, что Δh — разность ординат отрезка прямой, концы которой равноудалены от точки $h(S)$ при $h(S)$, что одно и то же. Чтобы исключить путаницу, величины, находящиеся по разные стороны от точки $h(S)$, обозначают по-разному, например, с разными индексами.

Если взять две части одной и той же величины, например, $\delta(S)$, и представить ее как $(\delta S_1 + \delta S_2)$, причем $\delta S_1 = \delta S_2$, то при условии S > S, ошибки не будут равны: $\Delta S_1 > \Delta S_2$. Причина — большая крутизна кривой $h(S)$.

Второй способ наладки пневматических КИП дает возможность уменьшить ошибки ΔS около 4-х раз; на этот раз проводится двойная калибровка.

При этом i_{S0} — то же, что и средняя текущая чувствительность.

Третий способ: проводится 4-кратная калибровка, приводящая к уменьшению ошибок примерно в 6 раз. При этом $i_{Scp} < i_{SO} < i_S$. Чтобы не запутать чувствительности прибора, вместо i_{SO} в равенстве пишут v_{CH}. Причем это выражает сокращение ошибок и в нижней δS_1, и в верхней δ_2 диапазона.

7. Расчет шкальных приборов

В этом пункте будут рассмотрены вопросы расчета в проектировании пневматических КИП, значит, и налаживании при заданных условиях, когда:

1. ΔS_1 — максимальна.

2. $\Delta S_1 = \Delta S_2$.

Следует только иметь в виду, что в процессе проектирования можно сопоставить разные сочетания почти всех параметров механизма.

1. **Расчет по заданной** ΔS_1 . В этом случае должны быть заданы:

1) предельно допустимое ΔS_1 (в действительности ΔS_1 — всего лишь часть суммарной ошибки измерений);

2) границы измерений δ_m ;

3) номинальные значения *c* и *a*.

При этих условиях необходимо рассчитать:

1) давление H = const в распределительной камере;

2) диаметры сопел;

3) величины зазоров перед соплами.

Задачей предварительного этапа является определение:

1) номинального передаточного отношения

$$J_0 = 10^3 \frac{a}{c}; \quad (61)$$

2) длины шкалы $L_ш = \frac{a}{c} \delta_m$;

3) количества делений m этой длины

$$m = \frac{\delta_m}{c}. \quad (62)$$

При приемлемых значениях $L_ш$ и m, выбирают по таблице параметры k_c и $F_Э$. После сами задают передаточное отношение i_p: теперь легче считать номинальную пневматическую чувствительность пневматического прибора:

$$i_{S0} = \frac{73{,}6 \times \beta \times k_c \times a}{F_Э \times \delta_p \times c}, \quad (63)$$

где $F_Э$— плотность распределения случайной величины;

$\beta = 1{,}2 - 1{,}4$, k_c, i_p, — некоторые коэффициенты, значения которых определяются по таблице.

Если сифонных датчиков два, то k_c увеличивается в два раза.

В формуле (63) номинальная чувствительность i_{SO} равна максимальной величине текущей чувствительности i_S, где

$$i_S = i_S = \left(\frac{dh}{dS}\right)_{S=S}. \tag{64}$$

В случае манометров с ртутными и водяными датчиками:

$$i_{S0} = \frac{\delta ha}{c}.$$

После всего этого приступаем к расчету прибора.

Определяем давление в распределительной камере по формуле:

$$H = \frac{2}{3} i_S \delta S_1 \left(1 + \sqrt{\frac{4 \times \delta S_1}{\Delta S_1} - 3}\right). \tag{65}$$

где $\delta S_2 = 0{,}5\delta_S$.

Вычисляем *B:*

$$B = \frac{64}{27}\left(\frac{i_S}{H}\right)^2. \tag{66}$$

Задавшись диаметром сопел

$$d_u > \frac{4}{\sqrt{3\text{B}}} + \frac{3\text{H}}{i_S}, \tag{67}$$

округляют его до 1 или 1,5 или 2 мм (последние считают нормализованными), тогда диаметр входного сопла

$$d_B = \sqrt[4]{16n^2 K_w \times K_Q \times K_M \frac{d_u^2}{B}}. \tag{68}$$

В (68) коэффициенты K безразмерные и служат как характеристики:

1) скорости потока воздуха в соплах — K_w;
2) сжимаемости воздуха — K_Q;
3) расхода сопел — K_M.

При избыточном результате H, коэффициенты K определяют по специальным формулам. Теперь остается определить разность диаметров $S - S_k$ и сумму $(S + \delta_{S_1})$, где S — диаметр сопла при номинальной чувствительности i_{OS}, S_k — для определения требуется считать K_M, в зависимости от избыточности или абсолютности H, добавляют или отнимают единицу, S определяют по формуле:

$$S = \frac{1}{\sqrt{3\text{B}}}. \tag{69}$$

2. **Расчет по равенству ошибок**. Специфика этого метода в том, что только давление в распределительной камере считается по формуле:

$$H = \theta_1 \times i_S + \delta_{S_1}, \tag{70}$$

все остальные параметры считаются, как и в предыдущем методе.

Основным условием является то, что

$$\Delta S_1 = \Delta S_2 = \Delta S. \tag{71}$$

Задачу облегчает применение итерационного метода, метода последовательных приближений к искомому.

В формуле (70)

$$\theta_1 = \theta + \Psi \tag{72}$$

не известны ни θ_1, ни Ψ. Поэтому в качестве первого итерационного шага предполагают, что $\Psi = 0$, и находят θ по уравнению:

$$\theta^2 = \frac{1}{9}\left(8\frac{\delta_S}{\Delta_S} - 9\Psi^2 + 12\Psi - 16\right). \tag{73}$$

Для определения Ψ пользуются формулой:

$$\Psi = \frac{2}{3 + \dfrac{4\delta_S}{3\theta^2 \times \Delta_S}}. \tag{74}$$

По найденному Ψ по (73) определяют новое θ по (74).

Итерацию нужно продолжать до того шага, пока значения Ψ и θ^2 не будут отличаться от значений в предыдущем шаге; такой результат достигается через несколько шагов. Теперь, когда известны Ψ и θ можно считать (75) $\theta_2 = \theta - \Psi, \theta_1 = \theta + \Psi$, поскольку необходимо определить

$$\delta_{S_1} = \delta\frac{\theta_2}{\theta_1 + \theta_2}. \tag{76}$$

Подставив найденные значения θ_1 и δ_{S_1} в (70), находим давление в распределительной камере *H*.

3. **Расчет по калибрам.** Особенность этого метода — проведение расчета по номограммам: при этом предельные или оптимальные значения установочных калибров задаются.

На номограммах приводятся кривые $h(S)$. Поскольку у графика небольшая кривизна, то расчеты не слишком расходятся при предельных или оптимальных данных.

Поэтому достаточно обойтись изложением расчета по оптимальным данным для калибровки.

Давление *H* считают по формуле:

$$H = \frac{i_{HS}(1 + BS_H^2)}{2BS_H}. \tag{77}$$

Величину S_H находят по графику из номограммы, но для этого требуется определить B и ΔS_2.

Для нахождения B задаются такой величиной δ_{S_2} (погрешность зазора с диаметром S_2)

$$\delta_{S_2} > 0{,}5\delta_S, \tag{78}$$

где S_2 одно из пограничных значений S_1 и S_2, между которыми находится текущий действительный диаметр S.

δ_{S_2} одно и то же, что и ΔS_2.

Поскольку одним из начальных условий калибровки является уравнение $\Delta S_2 = \Delta S_1 = S$, то нетрудно по номограмме определить ΔS_1 по уже известному ΔS_2, а также δ_{S_1}.

Если сумма

$$\delta_{S_1} + \delta_{S_2}\delta_S, \tag{79}$$

то можно переходить к определению S_H, тоже по номограмме. Остальные параметры определяются, как и в случае 1.

8. Динамическая точность

Часто случается так, что одни и те же приборы при измерении одних и тех же величин показывают разные результаты при проведении измерений в разных режимах работы (режим переходный, установившийся); режим статистический.

Такие ошибки называются **динамическими ошибками**. Когда говорят о классе приборов для динамических измерений, то имеют в виду динамическую точность этих КИП.

Кроме динамической точности, пневматические, как и другие КИП, характеризуются временем срабатывания, которое зависит от динамических свойств датчика. Последние, в конечном счете, определяют, например, время установления: стрелки; рычажного контакта; уровня столба ртути.

Как правило, для характеристики динамической точности оперируют переходной функцией. Если рассматривать круговое движение, то для случая $\lambda < w_0$, где λ — коэффициент затухания колебаний, w_0 — круговая частота этих колебаний, то переходная функция имеет следующий вид:

$$L = \frac{P}{Mw_0^2}\left[1 - \frac{w_0}{\Omega}e^{-\lambda t} \times \sin(\Omega t + \varphi)\right], \qquad (80)$$

где φ начальная фаза, причем $\text{tg}\varphi = \frac{\Omega}{\lambda}$;

P -сила, приложенная для вращения, измеряется в кГ;

M — приведенная масса $\frac{\text{кГсек}^2}{\text{см}}$;

w_0 —собственная частота вращения, рад/сек;

λ — коэффициент трения, рад/сек;

Ω — частота затухающих колебаний, рад/сек.

Величина $\frac{P}{Mw_0^2}$ показывает степень установившейся статичности колеблющегося узла датчика, например, пружины.

Если определить разницу переходных функций при двух положениях, то разность $L - L_{CT}$ есть ошибка перемещения

$$\delta L(t) = L - L_{CT} = -\frac{P}{Mw_0\Omega}e^{-\lambda t}\sin(\Omega t + 4). \qquad (81)$$

Определив экстремизм $\Delta L(t)$, увидим, что

$$\Delta L(t)_{\max} = \frac{P}{Mw_0\Omega}e^{-\lambda t}, \qquad (82)$$

то есть

$$\sin(\Omega t + 4) = -1. \qquad (83)$$

При определении самой переходной функции исходим из того, что $\lambda < w_0$. При $\lambda = w_0$, формула (81) превращается в

$$\Delta L(t) = -\frac{P}{K}e^{-\lambda t}(1 - \lambda t). \qquad (84)$$

Если же $\lambda > w_0$, то затухание замедляется, согласно закону

$$\Delta L(t) = -\frac{P}{K} e^{-\lambda t}(1-\lambda t). \quad (85)$$

Недостатком в формулах (83)—(85) является то, что в них не учтены диаметры сопел и объемы камер; их учет значительно уменьшил бы ошибки. Что касается времени срабатывания прибора tп, то оно равно сумме времени.

tg — время в формулах (83)—(85);

tп — время заполнения камер и трубопроводов.

ЛЕКЦИЯ № 4. Электрические элементы КИП

1. Контакты: материалы, расчет и конструирование

Вряд ли можно найти какой-нибудь КИП или СА (средства автоматики), в котором не было бы контакта.

Поэтому, насколько чрезвычайно важное значение имеют КИП и СА для современного производства, настолько же важное значение имеют для самих КИП и СА контакты в них, особенно материалы, из которых изготавливаются контакты.

Надежность контактов в КИП и СА, в конечном счете, — это точность самих КИП и СА, следовательно, эффективное производство каких угодно изделий.

Различают контакты следующих типов.

1. **Разрывные,** которые служат для применения при резком изменении параметров (включить или отключить, переключить). свою очередь, этот тип контактов делится на **нормальные**, состоящие из разных по форме (точечных, линейных и плоскостных) геометрических исполнений, и **специальные**, состоящие из разных (ртутных (свинца), вакуумных и спусковых) технологических исполнений.

Контакты I типа, рассчитаны на 4—30 А при напряжении 220 В. Их срок службы составляет до 2 млн размыканий высокого порядка: ~10^{-5}мм рт. ст. Такой вакуум позволяет при включении—размыкании избегать образования дуги и выдержать до 5 млн замыканий.

Если механизм медленно перемещается при выполнении технологии производства, то во избежание горения дуги требуется быстрое размыкание, поэтому применяют спусковые контакты.

Первые два типа контактов выходят из строя в силу негативного воздействия электрических разрядов на стекло, вследствие разрушения твердых электродов, по другим причинам.

Для 3-го типа такой причиной является износ металла.

2. **Скользящие (неразрывные) контакты**. Технология производства разных изделий нередко требует:

1) не резкого замыкания-размыкания, но плавного изменения параметров цепи;

2) связи подвижных элементов с неподвижными, но так, чтобы между ними не разрывалась гальваническая связь.

Для этих целей и служат скользящие контакты: они миниатюрны, но дороги из-за покрытия поверхности контактов сравнительно дорогими металлами.

3. В производстве радиоэлектронных узлов в приборостроении применяют также **разъемные (или штепсельные) контакты**: они используются для гальванического соединения съемных узлов и элементов обесточенных цепей.

Из-за вышеуказанной специфики контактов в радиоэлектронных узлах, а через них — в КИП и СА, при производстве их контактирующих поверхностей применяются благородные металлы (серебро, золото, платина, палладий, осмий, иридий, радий, их сплавы в разных сочетаниях), а также вольфрам, молибден, уголь, графит и пр.

Такие металлы, как медь, никель и железо не используются при изготовлении контактов. Требования, предъявляемые при изготовлении контактов, определяются их спецификой. Эти требования следующие:

Размеры контактов, в зависимости от условий их температурной выносливости.

Если окисляющиеся контакты при длительной работе не имеют температуру 50—75°С, то для неокисляющихся контактов этот показатель равен 100—125 °С; площадь поверхности контактов определяется по формуле:

$$S_0 = \frac{0{,}121 i^2 r_k}{C\theta} см^2, \quad (86)$$

где i — ток, протекающий через контакты при длительной работе, измеряется в А;

r_k — переходное сопротивление, M_{OM};

C — коэффициент охлаждения;

θ — допустимое охлаждение температуры, °С.

Сила контактного нажатия. Чем выше чувствительность контакта, тем меньше эта сила, измеряемая в Г; в вибрационных регуляторах она доходит до 500 Г.

У контактов, которые находятся в процессе непосредственной работы, имеется характеристика — переходное сопротивление контактов; его рассчитывают по формуле, которая дает примерные результаты:

$$r_k = \frac{150}{F_{k^в}}, \tag{87}$$

где r_k — сила нажатия, $Г$;

$в$ — числовой показатель степени ($в$=0,5 — 1) в зависимости от геометрического исполнения контактов.

На практике $r_k = 0{,}001 Ом$.

Падение напряжения. Правильно ли выбрана сила нажатия? Характеристикой этого служит падение напряжения. Критерием правильности является выполнение условия:

$$U_k < (0{,}3 / 0{,}5)U_{k\max}, \tag{89}$$

причем при $U_{k\max}$ начинается размягчение контактов. Для его определения существуют таблицы.

Ход контактов (например, в реле). Имеется в виду максимальное расстояние между разомкнутыми контактами. Это расстояние должно быть таким, чтобы обеспечить надежное обесточивание и невозможность случайного пробоя.

Для выполнения этого требования руководствуются электрическими данными. Это расстояние может изменяться в пределах (0,01—20 мм). Чем больше значение тока, тем больше должно быть это расстояние.

Срок службы контактов, определяется количеством переключений. Последнее зависит от материала поверхности контактов.

В зависимости от того, из какого материала изготовлена поверхность контакта, число переключений варьируется в пределах от 9 до 100 млн.

В число мероприятий, увеличивающих срок службы контактов, входят: комплекс мер по устранению дребезгов (натяг контактных пружин, применение фрикционных успокоителей), правильный выбор полярности, а также мероприятия, устраняющие дуги искры. Чтобы увеличить скорость срабатывания, применяют спусковые контакты. Для гашения дуг и искры контакты шунтируют, такая мера увеличивает срок службы, но расходуется лишняя энергия и объект отключается не полностью.

При выполнении мероприятий по устранению гашении искр и дуг исходят из формул:

$$U_k = U\frac{R_ш}{R_н}, \tag{90}$$

где U_k — максимальное напряжение на контактах при размыкании.

$$U_{ky} = U\frac{R_ш}{R_ш + R_н}. \tag{91}$$

В формулах (90), (91):

U — напряжение сети, $R_ш$ — сопротивление шунта, R_H — сопротивление нагрузки.

Разность $U_k - U$ — перенапряжение, как правило

$$R_ш = (5/10)R_н. \tag{92}$$

Проблему лишнего расхода энергии можно устранить, подключив емкость или лампу тлеющего разряда последовательно с шунтирующим сопротивлением.

Если $U_k \leq 300$В, значения C и $R_д$ (дополнительное сопротивление) определяют по следующим формулам:

$$C = L_н\left[\frac{2\mathrm{U}}{R_н(300 + U)}\right]^2, \tag{93}$$

$$R_д = \frac{300}{U} R_н. \qquad (94)$$

При этом процесс получается апериодическим, зато нет лишнего расхода энергии.

Условием апериодичности является:

$$\left(\frac{R_д + R_н}{2L_н}\right)^2 > \frac{1}{L_н C}. \qquad (95)$$

Приемлемым считают C < 2*мкор*.

Если *C* подобрана правильно, то находят

$$R_д = \frac{U_c^2}{a} Ом, \qquad (96)$$

эту формулу часто называют **формулой Крюгера**.

В формуле (96) U_c — напряжение на *C* перед замыканием, *a* — константа, зависит от материала.

При подключении в шунт лампы, она не должна гореть. Должен быть установлен порог, при превышении которого лампа пропускает импульс шунтирующего тока.

2. Электромагниты: расчет и конструирование. Теория подобия магнитных систем

Оставляя самому читателю подробно разобраться с теорией магнетизма, сразу начнем с вопроса электромагнитов как приборов.

Если классифицировать электромагниты, то это приведет к составлению длительного списка: их классификацию можно проводить по многим параметрам. Например, в нормали ВНИИЭП содержится 32 типа и 109 типоразмеров только для самих постоянных магнитов.

Предлагаем читателю разобраться с теорией магнетизма, с теорией проектирования постоянного магнита, используя специальную литературу.

Что касается электромагнитов как приборов, то их применяют в качестве коммутирующих устройств, в виде реле и удерживающих устройств.

Электромагнит-реле — устройство, которое состоит из постоянного электромагнита, из контактов для замыкания—размыкания, а также из обмотки возбуждения. Электромагнит срабатывает, замыкает или размыкает, в зависимости от появления тока в возбуждающей обмотке.

Для того, чтобы приводить в действие более мощные реле, для формирования выдержки времени, кодов и в других целях, нецелесообразно использовать только одно реле, для этого применяют как бы каскад из электромагнитных реле с различной мощностью.

Первичное реле — это то, которое срабатывает от первичного управляющего сигнала.

Вторичное реле служит для усиления сигнала первичного реле, для других целей. Можно использовать и следующие по порядку электромагнитные реле.

В конце каскада находится исполнительное реле, которое и управляет объектом, его выходной сигнал достаточен для этого. Реле, которое находится между исполнительным устройством и первичным реле, называется промежуточным: оно усиливает слабый выходной сигнал от первого реле до величины, достаточной для возбуждения обмотки исполнительного реле.

Если реле возбуждается при большем токе, чем задан, то его называют максимальным реле. Если наоборот, то минимальным. Если реле срабатывает по знаку или фазе управляющего сигнала, то его называют реле направленного действия.

Как достичь коммутации для требуемых мощностей, объяснено выше: путем усиления слабого сигнала через промежуточное реле.

Кроме вопроса коммутации мощности, существует вопрос о времени срабатывания электромагнитных устройств.

Время срабатывания бывает на отключение и включение и обозначаетс.

$$t_c = t_{mp} + t_{\partial в}, \tag{97}$$

где $t_{тр}$ — время, которое проходит с момента подачи сигнала до начала движения якоря;

$t_{дв}$ — время с момента начала движения якоря до полного срабатывания электромагнитного реле.

Время срабатывания $t_с$ зависит от тока $J_в$ обмотке реле:

$$t_c = f(I), \tag{98}$$

t_c регулируют механическим и электрическим способами.

Если требуется большая выдержка времени, например $t_p > 1$ сек, то требуется увеличить $t_{дв}$, с этой целью применяют демпфирующие устройства — это механический способ. Характер движения электромагнитного якоря зависит от вида по связи с демпфером: если эта связь жесткая, то якорь движется в течение всего периода, если гибкая, то движение якоря ускоряется.

При электрическом способе возбуждение оказывается на $t_{тр}$ в (97): этот способ служит для убыстрения или замедления коммутации электромагнитных цепей.

Итак, мы затронули основные вопросы, на которые необходимо обратить внимание при проектировании приборов с электромагнитными узлами, не вдаваясь в детали, более подробная информация приводится в специальной литературе. Теперь приводим основные теоремы теории подобия магнитных систем.

Достоинством этой теории является то, что облегчается расчет магнитных систем из-за неизменения основных параметров магнитной системы, если изменить ее масштабы.

Эти теоремы следующие:

1. Если две и более магнитные системы одинаковы по геометрии, то они имеют одинаковые конфигурации магнитных полей.

2. Если изменить конфигурацию магнитной системы в n раз, то, во-первых магнитный поток изменится в n^2 раз, но напряженность магнитного поля и магнитная индукция не изменятся; во-вторых, изменение тока в n раз приводит к увеличению плотности тока во столько же раз и к уменьшению во столько же раз выделения тепла,

теплоотдачи, условий охлаждения. В третьих, увеличение тока в n раз вызывает уменьшение плотности тока в магнитной системе во столько же раз, увеличение тех же параметров, которые перечислены выше (тепло и теплоотдача) во столько же раз.

3. Если увеличить геометрические размеры электромагнита в n раз, оставив неизменным условие охлаждения и число витков в обмотке, то при увеличении тока в $\sqrt{n^3}$ раз напряженность поля H и магнитная индукция В возрастут в n^2 раз, потребляемая мощность — в n^2 раз, а насыщение магнитного поля не наступит.

3. Трансформаторы и дроссели

Основными вопросами в проектировании радиоэлектронных узлов в приборостроении являются: потребление мощности; выделение тепла; экранирование от полей электрических сигналов и прочее.

На примере трансформаторов и дросселей рассмотрим, как решаются эти вопросы.

Составные части трансформатора.

Сердечник, который имеет очень много разновидностей. **Магнитопровод** высокого качества, если сердечники замкнутого типа, но тогда затрудняется наматывание катушек. Из-за этого предпочитают разъемные сердечники.

Катушки: они характеризуются тем, как расположены и размещены обмотки, каким способом реализована укладка.

В зависимости от поставленной задачи существуют различные виды укладки: **многослойная, секционная; галет** и др.

По расположению обмотки (катушки) делятся на **чередующиеся** и **концентрические**, второй тип сложнее, но с меньшим рассеянием. Следовательно, их лучше применять в выходных и импульсных трансформаторах.

Каркасы — следующий элемент трансформатора. В зависимости от исполнения каркасы делят на **целые** и **сборные**, первые — надежнее и дешевле. Бывают и бескаркасные катушки.

Пользуются следующими способами **намотки**:

1) рядовая — витки в одном ряду плотно расположены один к другому;

2) шахматная — витки вышележащего ряда лежат над промежутками нижестоящего;

3) дикая — витки расположены рядом, как и в рядовом способе намотки, но нет той точности.

В производстве трансформаторов и катушек, кроме всех прочих электрических параметров, важнейшим параметром является коэффициент заполнения.

Этот коэффициент характеризует, сколько витков разместится в катушке.

Если взять шахматный способ намотки, то расстояние между серединами двух соседних слоев можно определить по формуле:

$$x = \sqrt{d_1^2 - \frac{d_1^2}{4}} = 0{,}86 d_1 , \tag{99}$$

где d_1 — диаметр проволоки с изоляцией.

С учетом (99) число витков при шахматной намотке

$$w_1 = \frac{h_n l_n}{0{,}86 d_1^2}. \tag{100}$$

В формуле (100), h_n, l_n — линейные размеры пространства катушек, которое заполняется витками.

Для рядовой намотки число витков:

$$w_2 = \frac{h_n l_n}{d_1^2}. \tag{101}$$

Если взять отношение двух способов намотки, то

$$\frac{w_1}{w_2} = 1{,}16 . \tag{102}$$

Для грамотного расчета катушек оперируют понятиями:

1) коэффициент укладки $K_у$, характеризующий число витков верхнего ряда, приходящих в промежутки витков нижнего ряда;

2) коэффициент выпучивания $K_{вып}$, который характеризует уменьшение числа витков из-за неаккуратной намотки.

На практике пользуются табличными данными этих коэффициентов. Они зависят от толщины проводов, а число витков считается по формуле:

$$w = \frac{w_2}{K_у K_{вып}}. \qquad (102)$$

Промышленный выпуск трансформаторов и дросселей таков:

1) открытый, когда ни катушки, ни сердечники не защищены;
2) защищенный, когда катушки частично закрыты;
3) закрытый, когда все изделие помещено в закрытый кожух.

Мощность рассматриваемых изделий определяется толщиной проводов.

Вопросы экранирования будут рассмотрены в вопросе № 4 в этой же главе.

4. Герметизация, амортизация, экранирование

Эти вопросы являются завершающими в изготовлении радиоэлектронных узлов механизмов и приборов. Тем не менее значимость этих вопросов настолько высока, что без их разрешения ни одно изделие нельзя считать работоспособным. Именно эти вопросы определяют износ и срок службы, качество работы (экранирование) радиоэлектронных узлов.

Рассмотрим их подробнее по отдельности.

Герметизация служит для защиты радиоэлектронных узлов (или оборудования) от избыточного или недостаточного давления, от агрессивных сред, влажности, температуры.

Принцип герметизации реализуется следующими способами.

1. **Плотная вакуумная герметизация:** с заполнением и без заполнения инертными газами.

2. **Уплотнение различных частей кожуха.**

3. **Заливка компаундами и специальными заливками.**

Кроме вышеперечисленных, для пропитки кожуха используются специальные масла, смолы, битум, воск или поверхность покрывают специальными лаками, компаундами.

Однако при герметизации возникает логичный вопрос: как решать вопросы охлаждения? Возникает проблема защиты от влаги приборов у подводных механизмов.

Для решения этих вопросов существуют специальные методы, рассматривающие определенные конструкции.

Для того, чтобы впитывать избыточную влагу внутри радиоэлектронных узлов, используют, к примеру, силикагель: он впитывает в себя гораздо больше влаги, чем поваренная соль. Что касается системы охлаждения, то мероприятия по герметизации должны обеспечить своей конструкцией допустимый предел температуры.

Особенность системы охлаждения в том, что она должна работать непрерывно, пока работает радиоэлектронный узел механизма (прибора). Поэтому широко распространен метод воздушного охлаждения встроенными вентиляторами. Например, ни один системный блок не выпускается ЦП без установленного сверху сверхминиатюрного вентилятора.

В конечном счете, вопрос охлаждения — это вопрос срока службы радиоэлектронной аппаратуры, и во многом определяется не только свойствами среды, но и самой потребляемой мощностью радиоэлектронного узла. Термины «радиоэлектронная аппаратура» и «радиоэлектронный узел», встречающиеся в тексте, практически приводятся в одинаковом смысле.

Пограничные данные по нагреву радиоэлектронных элементов, из которых состоит радиоэлектронная аппаратура, приводятся в справочниках.

Следующим вопросом защиты готового изделия является амортизация, которая служит для защиты от ударов и вибрации. В защитных мероприятиях по амортизации исходят из условий, что надежная амортизация достигается, если

$$f = (2{,}5 \,/\, 5) f_0, \qquad (103)$$

где f — частота внешней вибрации;

f_0 — собственная частота механизма.

Ясно, что система с f_0 противостоит среде с частотой вибрации f; следовательно, для нейтрализации внешнего вибрационного воздействия тратится энергия. Эта энергия тем больше, чем больше амортизаторы поглощают энергию вибрации, которую необходимо нейтрализовать.

При $f = 2{,}5\ f_0$ доля поглощаемой энергии составляет 81% от энергии вибрации, при $f = 5\ f_0$ — 96% (104).

Совпадение $f \sim f_0$ — опасное явление. Возникновение совместного резонанса с внешним воздействием разрушительно даже для построек, не говоря уже о радиоэлектронной аппаратуре. По этой причине возрастает роль способа крепления аппаратуры на шасси, часто используютсяприведенные ниже способы: антиударные амортизаторы: твердые опоры; антивибрационные амортизаторы: мягкие опоры; цельные крепления — защиту обеспечивает жесткость самой конструкции.

Как очевидно из вышеизложенного, в связи с вкладом в потребляемую мощность, вопрос об амортизации, кроме всего прочего, является вопросом стоимости изделия, который стоит на одном из первых мест при выборе изделий.

Экранирование в производстве, а еще в большей степени в эксплуатации, решает задачу защиты от внешних помех, наводок.

Как известно, чем больше точность в радиоэлектронной аппаратуре, тем меньше ток. Следовательно, меньше и его собственное электромагнитное «тело» (поле), которое бы противостояло внешним.

Для сравнения: высоковольтные линии ЛЭП не нуждаются в экранировании. А вот в осциллографах без экранирования не обойтись. Другими словами, вопрос об экранировании в приборостроении — прежде всего и в первую очередь вопрос о точности измерений. Следовательно, требует к себе пристального внимания.

Одним из требований к экранированию является правило не устанавливать вблизи силовых узлов слаботочных цепей, даже внутри одного изделия; провода, питающие их, не могут быть объединены в общий жгут, они должны быть в отдельных жгутах. Кроме того, необходимо избегать пересечения силовых и слаботочных жгутов, если невозможно, то пересечение должно быть под углом в 90 градусов.

Эти меры, как правило, само собой разумеющиеся и не всегда исключают внешние поля. Выходом из ситуации может быть двойное экранирование, как и поступают, например, при изготовлении катушек. Может случиться так, что токи наводки в экране, воздействуя с током в катушке, из-за несоблюдения должного расстояния между экраном и катушкой могут ухудшить электрические параметры катушек (такие как индуктивность и добротность). По этой причине вводят второе экранирование, например, в виде промежуточного или дополнительного слоя витков, заземлив один конец, другой конец оставив свободным.

Однако заземление может привести к нежелательным результатам из-за резкого увеличения емкости обмотки. Если такое увеличение не опасно, то можно прибегать к этому методу.

5. Электровакуумные и полупроводниковые компоненты в приборостроении

При конструировании радиоэлектронной аппаратуры с применением электровакуумных приборов выдвигаются следующие требования:

1. Во избежание паразитных связей, что очень вероятно для электровакуумных приборов, вывод анода первой лампы располагают против вывода сетки второй лампы.

2. Центр тяжести радиоэлектронного узла должен совпадать с его геометрическим центром.

3. Предпринимают другие меры, исключающие или сводящие к минимуму паразитные связи, как в отдельных деталях, так и в функциональных узлах.

Для прикрепления электрических ламп к шасси используют ламповые панели, которые должны обеспечить высокие сопротивления между штырьками лампы и шасси. Лампы должны быть помещены в металлические колпачки в целях статистической экранировки. При конструировании радиоэлектронной аппаратуры с применением электровакуумных приборов используются также трансформаторы, дроссели, резисторы, бумажные (керамические, пленочные, электролитические) конденсаторы, переменные и постоянные сопротивления. Все их крепят на шасси с учетом требований, приведенных выше.

Так, элементы управления не крепят на передней панели.

Кроме этого, на самих панелях (на лепестках вакуумных ламп), колодках прикрепляют мельчайшие радиодетали. Требования по монтажу — общие. Длины материалов, используемых в монтаже, должны быть наименьшими; провода, идущие в одну сторону, должны быть соединены в жгут.

Совершенствование радиоэлектронной аппаратуры привело к появлению полупроводниковых приборов, о них рассказ чуть позже. Однако процесс миниатюризации шел давно. Решения этой проблемы привели к сборке радиоэлектронной аппаратуры из отдельных функциональных узлов. Причем каждый функциональный узел может служить как отдельный прибор. В конце концов, персональные компьютеры, без которых не обходится сегодня ни одна уважающая себя организация, своим появлением обязаны процессу миниатюризации, поскольку именно этот процесс значительно сократил срок разработки новой аппаратуры, одновременно резко повысив надежность.

Кроме этого, функциональный узел выступает как запасная часть, тем самым значительно сокращая срок ремонта. А самое главное, именно вышеуказанный процесс привел к автоматизации производства и к широкому применению средств автоматики.

Но если для конструирования радиоэлектронной аппаратуры используются полупроводниковые приборы, то обостряются вопросы герметизации и теплоотвода. Зато не на один порядок повышается быстродействие и надежность. Все это, в конечном счете, обуславливает повышение точности приборов, снижение многих издержек производства, в том числе себестоимости.

Обострившиеся с появлением и применением полупроводниковых приборов проблемы легко решаются. Для теплоотвода используют как радиаторы, так и вентиляторы. Методы кассетных и двухмерных модулей значительно облегчают сборку и ремонт механизмов: к общей схеме модули присоединяются с помощью разъемов.

6. Вопросы миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры

Вопросы миниатюризации относятся к наиглавнейшим в современном приборостроении не только потому, что и в развитии радиоэлектронной аппаратуры в целом, и в радиоэлектронных узлах это является главным направлением, но также и из-за вопросов повышения конкурентоспособности.

Этот вопрос также является вопросом точности измерения. Выше, в процессе изложения вопросов передачи ошибки из одного узла в другой, было видно, что меньшая ошибка и передается в меньшей степени.

У миниатюрных приборов потребляемая мощность меньше, следовательно, отклонение параметров не так уж и велико; отсюда и незначительность отклонений в других узлах.

В настоящее время в приборостроении наблюдаются следующие тенденции: продолжаются поиски в направлении микромодульной техники; в приборостроение проникают достижения нанотехнологий; развивается технология изготовления радиоэлектронных компонентов на тончайших пленках; осуществляется реализация криотронных схем (речь идет о сверхпроводимости при низких температурах).

Изготовление одного и того же прибора на разном сочетании этих и других технологий — сегодня не исключение. Принцип взаимозаменяемости требует производства таких микромодулей, на базе которых в любом случае можно было бы собрать новый функциональный узел с помощью небольшого присоединения других радиоэлектронных компонентов (подстроечные и постоянные конденсаторы, резисторы). Например, множество плат с БИС (большие интегральные схемы), ОУ (операционные усилители) и прочее могли бы быть примером сказанному.

Но может случиться так, что все эти подстроечные элементы в них уже содержатся.

Достоинством технологий тонких пленок является то, что из-за плоской формы радиодеталей улучшается степень охлаждения, которая позволяет увеличить мощности потребления. Однако такое достоинство осложняется компоновкой миниатюрных радиоэлектронных устройств. Компоненты становятся недоступными. В конечном счете достоинства оказываются большими, чем издержки в миниатюризации. Следовательно, тенденция остается перспективной.

ЛЕКЦИЯ № 5. Электрические и электронные цепи измерительных приборов (ИП)

1. Элементы электронных цепей ИП

Зачем нужны электронные устройства в ИП (измерительных приборах)? Для самых различных целей: от усиления слабых сигналов датчиков до преобразования или генерирования сигналов самых различных форм и частоты.

Наряду с этим нередко требуется передача на расстояние показаний ИП или дистанционное управление каким-либо процессом. В этих целях применяют ТЭУ (типовые электронные устройства) и СА (средства автоматики), такие, как усилители, модуляторы, демодуляторы, переключающие устройства, генераторы, сглаживающие фильтры, стабилизаторы напряжения.

При их изготовлении используют электровакуумные лампы и полупроводниковые приборы, такие, как диоды, триоды и прочие. Эти РЭУ (радиоэлектронные устройства) работают в основном в двух режимах:

1) в режиме большого сигнала, когда при изменении электрических параметров в диапазоне их изменения могут оказаться и нелинейные участки ВАХ (вольтамперная характеристика) приборов;
2) в режиме малого сигнала, когда в диапазоне изменения оказываются в основном линейные участки ВАХ.

Методы расчета для наладки ЭП (электронного прибора) в заданный режим проводятся исходя из работы при больших сигналах.

Теперь коротко разберемся в вышеперечисленных приборах.

Усилители. Основным критерием выбора являются классы усиления, а для этого исходят из энергетического баланса (КПД — коэффициент полезного действия), последний характеризуется коэффициентом использования прибора по мощности

$$K_u = \frac{P_{k\max}}{P_{p\max}}, \qquad (105)$$

где $P_{k\max}$ — максимальная мощность нагрузки;

$P_{p\max}$ — мощность, рассеиваемая во всех усилительных приборах каскада.

Сами классы усиления характеризуются длительностью протекания тока в выходной цепи. Величину этой длительности называют углом отсечки. Если исходить из качественных характеристик классов усилителей, то они различаются в основном величиной нелинейных искажений. По мере перехода от класса *A* к классам *B, C, D* искажения увеличиваются.

Модуляторы служат для преобразования сигналов, независимо от скорости их изменения, в переменные, но такое преобразование требует наличия ряда условий:

1) амплитуда переменного напряжения $\tilde{U} \sim U_{мгн}$ — мгновенное значение напряжения сигнала;

2) частота $\tilde{U}$ определяется модулятором, причем она равна частоте напряжения коммутации U_{kom};

3) угол сдвига по фазе между $\tilde{U}$ на выходе модулятора и U_{kom} изменяется, если изменить полярность напряжения сигнала.

В зависимости от величины и полярности U_{kom}, сопротивление в цепи, являющееся ключевым моментом модулятора, изменяется, и модулятор срабатывает.

Эту цепь называют **синхронным прерывателем**. В зависимости от характера усиления по мощности, различают модуляторы пассивные, если происходит только модуляция без усиления мощности, и активные, если происходят оба процесса.

Демодуляторы, как видно из названия, служат для демодуляции (дешифрации) модулированного сигнала. При этом происходит преобразование переменного сигнала в форму, которая не является синусоидальной, поскольку содержит постоянную составляющую: мы ведем речь только о выходном сигнале.

Для работы модулятора без искажения требуется выполнение следующих условий:

1) постоянная составляющая выходного напряжения $\bar{U}_{вых} \sim \bar{U}_{ср}$, где $\bar{U}_{ср}$ — среднее выпрямленное напряжение;

2) частоты сигнала и коммутированного напряжения равны;

3) модуль $|\bar{U}_{вых}|$ и знак $\pm\bar{U}_{вых}$ зависят от угла сдвига фаз между $\tilde{U}$ и U_{kom}.

Все остальное в основном так же, как и у модуляторов:

1) основной элемент — такой же синхронный прерыватель;
2) они так же активны и пассивны, по тому же принципу
3) однополупериодны и двухполупериодны.

Постоянную составляющую выходного напряжения (для однополупериодного напряжения) выделяют по формуле:

$$U_{1_0} = \frac{1}{\pi} U_{1_m} \cos\varphi, \tag{106}$$

где U_{1_m} — амплитуда первой гармоники, φ сдвиг фаз (см. выше в условиях).

Транзисторные переключающие устройства представляют собой усилители постоянного тока. Для их устойчивой работы и убыстрения переключений существует положительная обратная связь. Кроме того, эта устойчивость зависит от условий насыщения и запирания транзистора.

При насыщении транзистора (*p-n-p* переход) $U_k > U_\delta$. Наряду с этим

$$J_\delta > \frac{J_k}{B}, \tag{107}$$

$$J_k = \frac{U_н}{R_н}, \tag{108}$$

где J_δ, J_k — ток базы и коллектора;

R_H, U_H — сопротивление и на-пряжение нагрузки;

B — параметр.

При запирании транзистора (*p-n-p*)

$$\begin{aligned} &U_э < U_\delta \\ &J_\delta \approx -J_{ko}, \\ &J_k \approx J_{ko} \end{aligned} \tag{109}$$

где J_{ko} — обратный ток коллекторного перехода.

На переходе коллектор-эмиттер для запертого транзистора:

$$U_{кэ.доп} = U_{кб.доп} - U_{бэ}, \tag{110}$$

где индекс «доп» — допустимое.

Режим $J_б = 0$ является недопустимым, поскольку из-за $J_k = (B+1)J_{ko}$, напряжение $U_{кэ}$ резко уменьшается и может произойти пробой транзистора.

Сглаживающие фильтры и стабилизаторы напряжения. Фильтры служат:

1) для приведения выпрямленного напряжения в непрерывный вид;

2) для нейтрализации дуг и искр, возникших в цепи при эксплуатации, например, при замыкании (размыкании) контактов;

3) для других целей, по замыслу конструктора.

Фильтры, которые служат в источниках питания, характеризуются коэффициентом сглаживания:

$$K_c = \frac{K_{n_1}}{K_{n_2}}, \tag{111}$$

где индексы n_1, n_2 указывают на величину пульсаций, соответственно, на входе и выходе.

Чтобы определить коэффициент пульсации, определяют отношение амплитуды *I* гармоники пульсации к амплитуде постоянного компонента входного напряжения.

Различают фильтры следующих типов: емкостные; индуктивно-емкостные (их называют также П-фильтрами); реостатно-емкостные (Г-фильтры).

Выбор фильтров зависит от замысла разработчика радиоэлектронного узла, а также от типа выпрямителей, которые различают от однополупериодных до мостовых. Если выбрать П-фильтр, то его элементы рассчитывают следующим образом:

$$C_1 = C_2 = C = \frac{10^6}{4fR_н K_{n_1}} \text{мкф} \tag{112}$$

$$L_{др} = 68\times 10^3 \frac{R_c + 1}{Cf^2} \text{гн} \tag{113}$$

В этих формулах:

f — частота питающей сети;

$R_н$ — сопротивление нагрузки;

C — емкость (конденсатор);

$L_{др}$ — индуктивность дросселя в цепи;

мкф (микрофарад) и *Гн* (генри) — единицы измерения для емкости и индуктивности.

$K_{n_1} = (1 - 0{,}4)$ для двухполупериодного выпрямителя.

Для Г-фильтра элементы реостатно-емкостной цепи рассчитываются, как

$$R_ф = \frac{U_1 - U_2}{J_н} = R_н \frac{U_1 - U_2}{U_2} \Omega, \tag{114}$$

$$C_ф = 8 \times 10^4 \frac{K_c}{fR_ф} \text{мкф}, \tag{115}$$

где U_1, U_2 — напряжения на входе и выходе фильтра,

R_H, J_H — сопротивление нагрузки и ток через него,

$R_ф$, $C_ф$ — сопротивление и емкость Г-фильтра.

После фильтрации выпрямленного напряжения в радиоэлектронных узлах, для их еще более качественного питания устанавливают параметрические стабилизаторы напряжения.

Для выбора и расчета стабилизатора требуется:

$U_{н\max}$, $U_{н\min}$ — граничные значения напряжения питания;

$J_{c\max}$, $J_{c\min}$ — граничные значения тока стабилизатора;

U_c, J_H — стабилизированное напряжение на нагрузке и ток через нее.

После определения этих параметров по нижеприведенным формулам, выводят еще несколько параметров и выбирают по справочным данным соответствующие радиоэлектронные компоненты.

$$J_{н\max} = \frac{J_{c\max}(U_{н\min} - U_c) - U_{c\min}(U_{н\max} - U_c)}{U_{н\max} - U_{н\min}}. \tag{116}$$

Находят при заданном J_H

$$J_c = \frac{J_н(U_{н\max} - U_{н\min}) + J_{cmin}(U_{н\max} - U_c)}{U_{н\min} - U_c}. \tag{117}$$

При сильных флуктуациях J_H, находят граничные значения J_c и выбирают подходящее. После всего прочего необходимо определить ограничительное сопротивление.

$$R_0 = \frac{U_{n\max} - U_{n\min}}{J_c - J_{c\min}}, \tag{118}$$

а также коэффициент сглаживания самого стабилизатора:

$$K_c \approx \frac{U_c}{U_n} \times \frac{R_0}{r_g}, \tag{119}$$

здесь r_g — дифференциальное сопротивление самого параметрического стабилизатора.

2. Электрические цепи измерительных схем и приборов

Теперь, когда мы разобрали вопросы, связанные с радиоэлектронными компонентами на уровне микромодулей и основными функциональными элементами, применяемыми в радиоэлектронной аппаратуре, то сам собой возникает вопрос: как собирать требуемую электрическую цепь, а в конечном счете, сам прибор?

При проектировании вышеприведенной задачи она разлагается на следующие подзадачи:

1. Выбирают конкретную электрическую цепь и определяют точки, к которым надо будет подключить датчики, измерительные приборы и пр.

2. Уточняют значения сопротивлений в выбранной цепи.

3. Определяют другие характеристики этих измерительных приборов.

При решении (1), исходят из данных конкретных справочников, где приводится все необходимое, вплоть до расчетных формул, в них также даются дополнительные рекомендации.

Для решения (2) задачи (т. е. для расчета сопротивлений в цепи) исходят из следующих требований:

1) необходимо обеспечить максимальную добротность участка цепи (узла, прибора) в самой уязвимой, т. е. опасной точке диапазона;

2) выбор сопротивлений должен обеспечить технические требования, предъявляемые к общей мощности, сопротивлению и мощности для датчиков, допустимым значениям температуры.

Если требуется решить и задачу (3), т. е. если у разработчика радиоэлектронной аппаратуры появились другие цели и проблемы, они в любом отдельном случае решаются исходя из специфики этих вопросов.

3. Вопросы дистанционной передачи результатов измерений

В большинстве случаев приходится передавать результаты измерений на какую-то дистанцию. Передаваемую информацию, можно разделить на следующие классы.

1. Системы механических и пневматических данных.
2. Системы передачи электрических данных.
3. Системы передачи результатов телеизмерений.

Во всех системах главными критериями являются скорость и качество передаваемой информации. В настоящей книге речь идет о вопросах производства и наладки отдельных узлов и самого механизма в целом. Поэтому, говоря о скорости передачи данных, имеем в виду скорость передачи таких данных, которые изменяются за одну секунду не больше нескольких десятков процентов от общего диапазона. Этой скорости в рамках завода оказывается достаточно.

Система дистанционной передачи информации включает в себя:

1) датчик, который преобразует снимаемую информацию для следующей дистанционной передачи;

2) линию связи (проводная, кабельная, оптическая или радиочастотная связь);

3) приемник передаваемого сигнала для дальнейшего практического применения.

Существует много разновидностей систем передач сигналов.

К этим системам, также как и к самим узлам прибора (механизма), предъявляются обычные требования: точность, чувствительность и пр.

Однако существуют и специфические требования, такие как:

1. Дистанционность, которая характеризует степень самой возможности передачи данных. Например, в преобразованном в элект-

рический сигнале информации могут произойти искажения из-за угла тока, межпроводной емкости. В численном отношении этот параметр показывает длину кабеля (или жгута) с конкретными параметрами.

2. Реактивное воздействие. Во время работы системы дистанционной передачи преобразователь сигнала от датчика может оказать на сам датчик некоторое реактивное воздействие: помехи, наводки, случайно проскакивающие в цепь датчика. Сама возможность этого дефекта исключается в ходе производства и отладки регулировкой чувствительности датчика.

3. Взаимозаменяемость. Речь идет о допуске, в пределах которого один прибор можно заменить на другой из такого же класса.

ЛЕКЦИЯ № 6. Приборы для измерения неэлектрических величин

1. Приборы для измерения механических величин

Измерение механических величин сводится к измерению параметров движения. Эти параметры, как известно из механики, следующие: перемещение S; скорость v; ускорение a; время движения (перемещения) t.

Измерение последнего будет рассмотрено в следующем вопросе, на этой же лекции.

При измерении механических величин само собой разумеется, что первичное преобразование — механическое. После результаты могут быть преобразованы в другие, как правило, в электрические величины.

Для измерения перемещения требуется измерять длины пути. Для этого используются не только механические, но и опто-электронные и другие принципы измерений.

Для измерения величин v и a требуется измерение времени. Следовательно, для измерения всех указанных величин достаточно измерения перемещений S и времени t. Спецификой измерения первых трех величин является их изменение во времени.

Поэтому принято говорить об их измерении при постоянном и переменном движениях. Как видно, нам придется выяснить принципы измерения перемещения и времени. Прежде чем перейти к подробному изложению измерения перемещений механическим преобразованием, придется рассмотреть три относительно простые средства измерения.

1. Плоскопараллельные концевые меры длины — это такие меры длины, которые постоянны и имеют форму прямоугольного параллелепипеда. При измерении их помещают между двумя плоскостями у детали.

Концевая мера, как часто ее называют, представляет собой брусок. Основной проблемой механического и других видов преобразований измеряемых величин является преобразование больших по величине параметров в пригодные для передачи измерительному устройству, то есть малые.

У средств концевых мер нет такой проблемы: их изготовляют длиной не более 1 м (1000 мм). Наименьший их размер 0,1—0,2 мм. Можно получить практически любой размер концевых мер путем сложения концевых мер; такую конструкцию называют блоком мер.

«Бичом» всех измерительных устройств является температурное расширение материалов, из которых изготавливают части этих приборов (устройств). Концевые меры изготавливаются в основном из стали с температурным коэффициентом расширения $(11{,}5 \pm 0{,}1) \times 10^{-6}$ на 1 °С в пределах $(10\,^{\circ}\mathrm{C} - 30\,^{\circ}\mathrm{C})$, что означает следующее: концевая мера в 1 м изменится на $(11{,}5 \pm 0{,}1)$ мкм, если изменится температура на 10 °С.

Для других мер величину погрешности можно установить, определив кратность относительно 1 метра; на столько же больше будет погрешность.

Точность концевых мер длины определяется допуском при их изготовлении. Совокупность допусков называется классом точности.

В современном отечественном приборостроении установлены семь классов точности для концевых мер измерения длины: 00; 0; 1; 2; 3; 4; 5.

У класса 00 допуск наименьший: следовательно, этот класс наиболее точный. Следующим техническим требованием к концевым мерам являются предельные отклонения от плоскопараллельности: разность между наибольшей и наименьшей длинами меры. Как правило, при переходе из одного класса в другой, значение допуска изменяется в два раза.

Концевые меры длины характеризуются еще и разрядом: разряд — это максимально допускаемая погрешность измерения длины концевой меры.

В Российской Федерации установлены пять разрядов: в технической документации на каждый разряд, как и на класс, приводится максимально допустимая погрешность, которая учитывается при измерениях, поскольку необходимо учитывать внесенную погрешность в измерении самой мерой длины.

Эти приборы служат эталоном для длины и через них передают эти эталоны измерительным приборам. Их применяют при поверке (настройке) измерительных устройств на необходимую шкалу (установка на нуль). Ими устанавливают длину перемещения движущихся узлов станков, в том числе с ЧПУ (числовое программное обеспечение).

Что касается поверки, то в качестве номинальной длины концевой меры измеряют «срединную» длину концевой меры: это длина перпендикуляра, который опущен от одной из точек измерительных поверхностей на противоположную поверхность.

2. Измерительная металлическая линейка — это металлическая полоса, которая заштрихована делениями.

Вряд ли кто-то из студентов не пользовался линейкой, пусть и не металлической; и не воспроизводил разных размеров длины. Как правило, линейкой воспроизводят размер длины, начиная с нулевой отметки: следовательно, с этого конца их можно назвать концевыми мерами длины.

Как и концевые меры длины, линейки также изготавливаются длиной до 1000 мм, но не меньше 150 мм.

Измерение линейкой производится методом прямого прикладывания ее к измеряемому объекту, такой метод называют **непосредственным методом измерений**. Погрешность измерений линейкой обычно 0,5—1 мм. Поверка линеек проводится с помощью штриховых метров: штриховой метр — это такая линейка, на которой имеются деления через 0,2—0,05 мм.

3. Штангенинструмент — это общее название целой группы измерительных средств длины: штангенциркуль; штангенглубиномер; штангенрейсмасс и др.

Особенностью штангенинструмента является то, что у него имеется не только шкала линейки измерения, штанга с точностью до 1 мм, но и вспомогательная шкала — нониус, которая позволяет снять еще и подробную часть длины в пределах 1 мм.

У нониуса число делений 10—20, с ценой 0,9 мм = 1 мм — 0,1 мм.

Нулевые штрихи основной шкалы и нониуса совпадают, однако у нониуса первый штрих нанесен слева от нулевой отметки, в итоге там, где у нониуса кончается, например, деление 1 мм, у основной шкалы только — 0,9 мм.

Показанию основной шкалы в 1 мм соответствует показатель нониуса уже в 1,1 мм. Поэтому возникает впечатление, что у нониуса шкала растянута.

В СССР выпускали измерительные средства с отсчетом 0,02 мм: речь идет о минимальном значении деления нониуса. Но это не привело к минимализации погрешностей.

В современном отечественном приборостроении величина отсчета (цены деления) у нониуса приняты — 0,1 мм; 0,05 мм. Погрешности измерений штангенинструментов зависят от цены деления шкалы; от значения самого измеряемого размера.

Цена деления, как правило, находится в пределах 0,1—0,3 мм в зависимости от характера измерения и конкретной разновидности применяемого измерительного прибора.

Поверки штангенинструмента проводятся с помощью концевых мер длины. В настоящее время как в РФ, так и за рубежом встречаются штангенинструменты с цифровой шкалой отсчета, которая значительно повышает точность измерения длины.

Рассмотрим другие способы измерения, а заодно и угол перемещения. Выше отмечалась проблема механических преобразований; эта проблема преобразований больших перемещений в малые. В современном отечественном приборостроении она устраняется путем применения «отсчетных (измерительных) головок»: именно в них и происходит преобразование большого перемещения в малое.

Измерительные головки не могут быть применены как отдельное устройство — они являются всего лишь дополнением к ИП, представляют собой «присоединительный элемент» в отдельном исполнении, в виде цилиндра с диаметром 8 или 28 мм.

Преобразование в измерительных головках реализуется тремя способами.

1. Механизм преобразования содержит только зубчатые механизмы.

2. Механизмы, в которых преобразование осуществляется рычажно-зубчато, т. е. используются оба способа прикрепления измерительных головок к ИП.

3. Преобразование с помощью пружинных прикреплений измерительной головки к измерительному устройству.

Поскольку речь идет о преобразовании одной величины в другую, другого масштаба, то само собой разумеется, что появляется такая характеристика, как передаточная, то есть передаточное число.

Особенностью первого типа преобразований является то, что в них преобразование перемещений может реализоваться в обоих направлениях: при двух других типах это преобразования невозможно.

С этой целью преобразование реализуется в механизм преобразования, так называемый индикатор часового типа.

В этом механизме не применяются часы, однкао из-за принципа работы, схожего с часами, здесь присутствует слово «часы». При измерениях стрелка шкалы может совершить многократный оборот в обоих направлениях, в пределах диапазона измерения.

Диапазоны измерения — 5 или 10 мм, но в индикаторе с 6—10-миллиметровым диапазоном предусмотрен переход к 5-миллиметровому.

Можно встретить и индикаторы с диапазоном измерений 25 или даже 50 мм. Цена деления у всех — 0,01 мм. Надежное прикрепление измерительного устройства с индикатором часового типа достигается путем прикрепления к измеряемому объекту пружиной, тем самым создается измерительное усилие, которое находится в пределах 0,8—2 Н (Ньютон — единица измерения силы).

Совершенно очевидно, что после погрешности измерений, которую мы рассмотрим ниже, важнейшей характеристикой индикатора является передаточное число, порядком расчета которого мы сейчас и займемся.

В зубчатом механизме отношение чисел зубьев колеса, большего по диаметру, к числу зубьев шестерни, меньшей по диаметру, называется передаточным числом.

Оба колеса с разными диаметрами образуют пару. Если соединены последовательно несколько пар, как в часах, то передаточное число системы пар есть произведение передаточных чисел всех пар, входящих в систему преобразования.

Если рассмотреть передаточное число, преобразующее малое перемещение в большое, т. е. когда передаточное число $u \geq 1$, то для общего случая

$$u = \frac{R}{l}, \tag{120}$$

где R — длина стрелки от оси поворота до ее свободного конца;

φ — величина угла поворота стрелки, градус или радиус;

R — перемещение свободного конца стрелки индикатора, градус, мм;

l — величина перемещения измерительного наконечника (рейки).

Имеется в виду узел индикатора, перемещение которого при измерениях передается путем преобразования через колесо и шестерни к шкале со стрелкой. Наконечник связан с колесом и шестерней, стержнем специальной конструкции, которую называют рейкой. Специальная конструкция рейки позволяет ей зацепиться к колесу и шестерне. В итоге ее перемещение преобразуется в показания стрелки: речь идет о той части перемещения рейки, которую принято называть входным звеном. Другой конец стрелки, который зацепляется с звеном стрелки, называется выходным звеном.

Продолжая расчет передаточного числа, определим:

$$l = rx, \tag{121}$$

где r — радиус большего колеса (его делительной окружности);

x — угол поворота этого колеса (по другому, «гриба») вокруг своей оси.

$$\varphi = \frac{xz_4}{z_5}, \tag{122}$$

где $\frac{z_4}{z_5}$ — передаточное число от большего колеса до стрелки;

z_4, z_5 — число зубьев у оси стрелки и следующего передаточного звена соответственно.

У входного звена, т. е. у гриба, число зубьев обозначим, как z_3. Тогда, выразив r как

$$r = \frac{mz_3}{2}, \tag{123}$$

где m — цена делений, мм;

z_3 — количество (число) зубьев у входного колеса, у которого радиус равен r, получим:

$$u = \frac{2R}{mz_3}\frac{z_4}{z_5}. \tag{124}$$

Как видно из формулы (5), расчет передаточного числа довольно прост: все величины или известны, или их нетрудно пересчитать.

Важнейшим достоинством у индикаторов часового типа является то, что при перемещении наконечника всего на 1 мм, стрелка совершает один оборот, то есть $\varphi = 2\pi$.

Этот факт значительно уменьшает число вариантов, из которых придется выбирать наиболее подходящий, и обеспечивает наиболее достоверную точность.

В практике отечественного приборостроения принято: $z_3 = 16$; $z_4 = 100$; $z_5 = 10$. После пересчета можно определить m. Принято также, что $u = 157$.

Погрешность при рассматриваемом способе преобразований не превышает цену делений в рассматриваемом диапазоне и равна 5—22 мкм.

Чем меньше диапазон измерений, тем меньше и погрешность.

Для поверки индикаторов часового типа способов много. Но в основном используют концевые меры длины и оптические приборы с оптической шкалой.

Измерительные головки второго типа состоят из рычажной и зубчатой пар: наконечник прикрепляется к малому плечу рычага.

У этих типов преобразователей шкалы измерений 25—50 мм (зависит от цены делений). Различие от предыдущего типа индикатора в том, что они в основном однооборотны.

Цена деления — 0,01—0,002 мм. Диапазон показаний — 0,8 мм (для делений с ценой 0,01 мм); 0,2 мм (0,002 мм).

Передаточное число для рычажно-зубчатых индикаторов можно вычислить двумя способами:

1) $$u = \frac{l\ z_3 z_5}{R z_4 z_6}, \tag{125}$$

где l — длина плеча последнего рычага; R — длина плеча первого рычага; $\frac{z_3}{z_4} \times \frac{z_5}{z_6}$ — произведение передаточного числа зубчатых пар.

2) $$u = \frac{l}{R} \frac{d_3 \times d_5}{d_4 \times d_6}, \tag{126}$$

где l, R — длина плеча последнего и первого рычага соответственно; $d_3 - d_6$ — диаметры соответствующих колес в механизме.

Погрешность измерений для рассматриваемого типа преобразования — (0,005—0,015) мм при цене делений 0,01 мм.

Поверка рычажно-зубчатых индикаторов проводится по концевым мерам длины или другим способом. Наибольшую точность дает поверка с помощью микронных средств измерения (микрометр, микроскоп). Точность рычажно-зубчатых индикаторов можно повысить, использовав их в сочетании с рычажно-зубчатыми головками. В них передаточный механизм состоит из пар рычажных (входных) и пар зубчатых (выходных).

Повышение точности достигается с возможностью изготовления точных рычажных средств: следовательно, уже на входе меньше ошибок, и передаваясь, они не достигают большей величины, размножаясь.

Передаточное число для рычажно-зубчатых головок определяют по формулам: если головки однооборотные (две рычажные и одна зубчатая пары), то

$$u = \frac{R_{cmp}}{\rho} \frac{l - r}{r} \frac{z_1}{z_2}, \tag{127}$$

для многооборотных (также две рычажных и одна зубчатая пары)

$$u = \frac{R_{стр}}{\rho} u_{k1} u_{k2} \frac{z_1}{z_2}. \qquad (128)$$

Величины передаточных чисел кулисных передач.

$$u_{k1} = \frac{r}{r - l}, \qquad (129)$$

$$u_{k2} = \frac{L + R}{R}. \qquad (130)$$

При цене делении 0,001 принято:

для однооборотных головок $u \approx 1050$;

для многооборотных — $u = 960$.

Удвоение цены деления приводит к уменьшению передаточного числа в два раза, например, при цене делений 0,002 соответствует передаточное число (это в случае двухоборотной головки).

Однооборотная головка обозначается как *иг*, многооборотная (например, двухоборотная) — *Миг*. Погрешность рассматриваемых головок — (1—6) мкм для *иг*, и (1,5—6) мкм для *Миг*, в зависимости от цены деления и диапазона измерений.

Поверка как *иг*, так и *Миг* проводится в основном концевыми мерами длины.

Наконец, о третьем способе механических преобразований, о преобразовании с пружинным механизмом.

Характерной особенностью этих механизмов является то, что передаточным механизмом измеряемой величины является полоска металлической ленты.

Следовательно, в расчетах используются упругие свойства скрученной пружинной ленты.

Разновидностей этих механизмов очень много. Не вдаваясь в подробности, во избежание переполнения содержания книги информацией, которую можно получить из специальной литературы, сразу приводим технические требования, предъявляемые к этим типам механизмов преобразования при измерении перемещений.

Эти ленты имеют параметры (толщина × ширина, мм):

$$0,004 \times 0,08; 0,06 \times 0,1; 0,008 \times 0,12.$$

Изготавливают их в основном из бронзы в составе:

1) олово — 3,5—4%;

2) цинк — 2,7—3,3%;

3) медь — остальное.

Передаточное число измеряется в единицах угловых градусов (мкм: перемещения в 1 мкм конца пружины, ее средняя часть поворачивается на (1—10) угл. град/мкм).

Передаточное число может быть определено двумя способами:

1) теоретически

$$u_л \approx 0,45\frac{E}{Q}\frac{1}{t}\frac{1}{\left(\frac{a}{b}\right)^2 + 13,2\left(\frac{b}{t}\right)^2}, \tag{131}$$

где I — модуль упругости материала, из которого изготовлена лента, ГПа;

Q — модуль сдвига материала ленты, ГПа;

a, b — толщина и ширина ленты, мм;

t — шаг спирали, мм;

$л$ — в индексе, показывает принадлежность параметров к ленте;

2) эмпирически

$$u_м = \frac{0,0175Ru_р}{\frac{0,001}{u_л} + \eta\frac{\Delta Ql^2}{3EJ}}, \tag{132}$$

где R — длина стрелки, мм;

$u_р$ — передаточное число рычажной системы, которая находится между стержнем и пружиной;

$u_л$ — передаточное число ленты;

η — поправочный коэффициент;

ΔQ — усилие, соответствующее среднему сечению ленты на:

J — момент инерции поперечного сечения ленты, мм;

l — свободная длина свернутой ленты, мм.

Для каждого вида (микрокаторы, оптикаторы, микаторы, миникаторы) пружинных механизмов преобразования могут быть и, как правило, есть свои формулы для расчета передаточного числа.

Требования к погрешности такие же: они не должны повысить цены деления. Цены деления — от 5×10^{-4} до 10^{-3} мм.

В зависимости от цены деления, поверка этого типа приборов проводится и с помощью концевых мер длины, и даже с интерферометрами: последний способ дает возможность осуществлять настройку по точности с помощью длины волны света.

Более точного эталона современная наука и техника не знает.

2. Приборы времени

Эти приборы в виде различных часов, как и весы, являются первыми известными приборами в истории человечества с незапамятных времен.

Сегодня перечисление только их разновидностей в быту заняло бы не одну страницу.

Приборы времени различают по принципу действия и по назначению.

Их разделяют на следующие классификационные группировки: механические; электромеханические; электронномеханические; атомно-молекулярные; синхронные; часы с непериодическим процессом.

Как видно из вышеприведенного списка, измерение времени проводится маятником в механических часах и временем разрядки или зарядки конденсатора до заданной емкости в электронных. В этом промежутке есть приборы, измеряющие время, которые используют импульсы электрического тока; квантовые свойства вещества; роторы электродвигателей и многое другое.

В каждом случае вопросы точности и погрешности измерений имеют свою специфику. Во всех случаях измерение времени сводится (или исходит) к установлению соответствия между двумя или более системами колебаний.

Поэтому, говоря о метрологических характеристиках часов, в первую очередь имеют в виду постоянство частоты колебаний (или автоколебаний), с которым связано измерение: точность измерений задается именно этим постоянством.

Кроме этого, внешнего источника сигнала времени, немаловажна точность колебаний собственной колебательной системы: а это — вопросы проектирования и производства.

Для приборов, предназначенных для показания текущего времени, введен параметр поправки показаний прибора:

$$U = T_1 - T_{пр}, \tag{133}$$

в которой T_1 — точное время; $T_{пр}$ — показания прибора.

Это измерение называют **суточным ходом прибора**.

$$w = U_2 - U_1, \tag{134}$$

для разных часов $180 > w > 10^{-7}$сек.
где U_1, U_2 — поправки, соответствующие началу первых и следующих суток.

Если $w < 0$ — часы спешат; $w > 0$ — часы отстают.

Для оперирования в быту и решения технических вопросов параметры U, w оказываются достаточными. Но там, где требуется наибольшая точность (астрономия, авиация, ВМФ, мореходство и др.) пользуются и другими параметрами.

В их основе — вариация.

$$V = w_2 - w_1, \tag{135}$$

где w_2, w_1 — суточные ходы для следующих одни за другими суток;

V — отклонение.

$$l_k = w_k - w_{cp}, \tag{136}$$

где l_k — отклонения суточного хода за K-ые сутки; $K = 1, 2, ..., n.$;

w_{cp} — средний суточный ход за n суток.

$$w_{cp} = \frac{w_1 + w_2 + ... + w_n}{n}. \tag{137}$$

Поправка U определяется по эталонным часам: без этого параметра рассчитать величины w, l_k невозможно (формулы (15)—(17)).

На точность часов также влияет температура среды, которая характеризуется коэффициентом C; из-за этого явления возникает вторичная ошибка S.

Коэффициент C и его последствие — ошибка S — вычисляются по формулам:

$$C = \frac{w_{36} - w_4}{32}, \tag{138}$$

$$S = \frac{w_{36} + w_6}{2} - w_{20}. \tag{139}$$

В этих формулах цифры в индексах показывают сутки, для которых определены коды приборов.

Коэффициент температурного расширения зависит от технических свойств материала, от самой конструкции прибора и находится в границах

$$0{,}0005 \le C \le 0{,}5\ , \tag{140}$$

измеряется в сек./град.

Следующая характеристика приборов времени — это барометрический коэффициент.

$$R = \frac{w_2 - w_1}{p_2 - p_1}, \tag{141}$$

где w_1, w_2 — суточные ходы часов при соответствующих давлениях p_1, p_2 .

Обычно $0{,}01 < K < 0{,}25$ (сек) на изменение давлений 1 мм рт. ст.

Несмотря даже на такую отрегулированность, если отрегулировать прибор с $K = 0{,}02$ сек. при нормальном атмосферном давлении, то в вакууме он даст отклонение в 15 секунд

Причина в том, что как выше было отмечено, для работы приборов времени источником первичного толчка служит внешний сигнал: колебательные системы этого источника и своя собственная, определяют разрешительную способность прибора.

Поэтому их показания изменяются по скачкам, а не непрерывно: этот скачок определяется (по времени) периодом или полупериодом колебаний.

3. Приборы для измерения параметров движения

Рассмотрим такие параметры движения, как скорость, ускорение, угловые скорость и ускорение.

Для измерения скорости поступательного перемещения достаточно знать длины пути и времени. Тогда средняя скорость:

$$V_{cp} = \frac{\Delta S}{\Delta t}, \tag{142}$$

где ΔS — длина пути;

Δt — промежуток времени.

Погрешность измерений, само собой разумеется, складывается из погрешностей измерений перемещений и времени

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\delta(\Delta S)}{\Delta S} + \frac{\delta(\Delta t)}{\Delta t}. \tag{143}$$

Измерение ускорения при поступательном перемещении измеряется точно так же:

$$a = \frac{d}{dt}\left[f(t)\right], \tag{144}$$

где $f(t) = V = \frac{\Delta S}{\Delta t}$.

Погрешность измерения ускорений также определяется погрешностями, допущенными при измерении величины перемещения и времени, затраченного на это перемещение.

Для измерения скорости перемещения поступательного движения часто пользуются приборами, которые преобразуют угловую скорость в линейную.

Сперва разберемся с угловой скоростью: это измерение угла поворота x за время Δt; эту величину называют средней угловой скоростью.

$$w_{cp} = \frac{x}{\Delta t}. \qquad (145)$$

Если взять производную по времени, то получим угловое ускорение.

Для измерения линейной скорости применяются различные приборы с электрическими датчиками. Наиболее надежными из них являются приборы с индукционными датчиками: чувствительность — 0,07 мА/мм; погрешность — 12 мм при при 1 см/сек.

Для измерения угловых скоростей применяются различные тахометры: механические, гидравлические, магнитные, электрические (обоих типов тока), импульсные и др.

Для измерения линейных ускорений при поступательном движении применяют акселерометры; наибольшей точностью из них обладают те, у которых имеются индуктивные датчики. Чуть выше приведена чувствительность прибора, имеющего такой же датчик, который позволяет фиксировать высокочастотные ускорения (нескольких килогерц).

Для измерения угловых ускорений используют инерционные приборы с упругим стержнем, с инерционным диском и пружиной. Во всех вышеперечисленных приборах погрешность вносится не только при измерении перемещения и времени, но и при градуировке шкалы, например, акселерометров.

Перемещения в виде смещений и все другие параметры движения имеют место также при вибрации. Измеряются также частота и амплитуда вибраций, а также фаза, с этой целью применяются виброметры.

4. Измерение сил, моментов и напряжения

Общие методы измерения этих величин следующие.

1. Измерение проводится непосредственно путем обеспечения прямого контакта прибора с измеряемой величиной.

2. Измеряют деформации (в детали или в ее модели), после пересчитывают напряжение, исходя из значения деформации.

При этом к измерениям предъявляются следующие требования: силы измеряют, в целях сведения к минимуму погрешностей, при наименьших перемещениях; упругие перемещения, с той же целью, при минимальных изменениях сил, вызывающих деформацию.

При этом для измерения сил пользуются динамометрами; давлений — манометрами; моментов кручения — крутильными динамометрами; перемещений при деформации — взвешиванием, измерением давления и т. д.

Остановимся подробнее на измерениях механических параметров косвенным методом — **методом измерения деформаций**. К слову, взвешивание также является одним из методов, применяемых для определения механических величин и тоже пользуется закономерностями деформации. Но при этом измерение прямое.

Назовем несколько наиболее часто применяемых методов измерений деформаций в деталях (эти методы универсальны):

1. **Тензометрия.** Тензометром называется прибор, которым измеряют параметры деформации, он устанавливается прямо на детали. Тензометр — прибор с системой разветвленных датчиков. Для сравнения, точно по такой же схеме «работают» глаза человека: сигналы, собранные нервами от краев радужной оболочки глаз, суммируются, и формируется результирующий сигнал.

Точно такой же принцип реализован в полярископе, которым исследуется распределение напряжения, например, в динамометрическом кольце; полярископы в группу тензометров не входят, но принцип регистрации сигналов такой же.

Структурная схема тензометра следующая: датчик > усилитель-преобразователь > регистратор.

Тензодатчик, у которого много ножек с острием, может быть приклеен на поверхность. Назовем длины участка между ножками тензометра, где определяется измеряемый параметр, длиной тензочувствительной части со средней длиной S.

При этом относительная линейная деформация

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} = \frac{\Delta}{mS}, \tag{146}$$

где ΔS — изменение длины тензочувствительной части;

Δ — приращение показаний регистратора;

m — масштаб тензометра.

Длину тензочувствительного участка часто называют базой прибора; эта длина может дойти до 25 мм.

Чувствительность, а также точность тензометров зависит от того, в каких целях они применяются, а также от самих требований пользователя: какую погрешность можно считать приемлемой?

Погрешность определяется по формуле:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\delta}{E},$$

где $\Delta\varepsilon$ — величина погрешности базы тензометра;

$\Delta\delta$ — линейное напряжение поверхности;

E — модуль упругости.

Допустимые значения погрешности таковы: при измерении линейного напряжения — 2—5%, редко до 10%, при измерении сил и моментов (например, в силовесоизмерительных приборах) от верхнего предела шкалы — 0,1—1,0%.

Возникает вопрос: показания (данные) датчика для визуального восприятия ничтожны; как обеспечить увеличение?

Решение этой проблемы зависит от следующих факторов: значений относительной деформации; шкалы регистратора; базы тензометра.

Определяют его по следующей величине:

$$V = \frac{En}{\delta_{\max} S}, \tag{147}$$

где V — показатель увеличения тензометра;

$\delta_{\max} S$ — максимальное значение линейного напряжения по длине S (база тензометра);

n — число делений шкалы регистратора;

E — модуль упругости.

На погрешность тензометров влияют многие факторы, такие, как издержки в самом механизме тензометра; температура окружающей среды расстраивает масштаб шкалы регистратора — эту причину можно устранить, изготавливая сам тензометр из одинакового с исследуемой деталью материала. В отечественном машиностроении применяются разновидности тензометров от механических и оптических до современных электронных.

Для каждого вида, кроме приведенных выше, существуют и свои собственные технические требования. Например, у динамо-метров, которые применяются для измерения сил, давления и моментов, и в которых тоже используются тензодатчики, возникают большие трудности при обеспечении соответствия между датчиком и измеряемым параметром: деформацией или перемещением. Для устранения этой трудности прибегают к специальным, не характерным для других видов тензометров, техническим приемам: к приведению базы тензометра в соответствие со шкалой регистратора (статистическая тарировка).

Вопросы поверки этих приборов также решаются путем тарировки. С этой целью, кроме статистической, применяется и динамическая тарировка: это значит, что тензометр настроен на минимальную погрешность при измерении деформации с наибольшей гармоникой (частотой). При такой частоте изменения деформаций динамометр (тот же тензометр) не должен иметь погрешностей больше заданных. Из наиболее точных тензометров хотелось бы отметить оптико-механические, электрические (датчик формирован из матрицы сопротивлений), полярископы.

Кроме этих, с меньшей точностью используют механические индуктивные, струнные и пневматические тензометры.

Их различия, в основном, в технологии преобразования сигнала в пригодную для восприятия или дальнейшего использования форму, содержащую в себе информацию об искомом параметре.

5. Определение механических свойств материалов

При рассмотрении предыдущих вопросов мы убедились, какое важное значение для точности измерений, для срока службы имеет выбор материала.

Но, чтобы выбрать материал, требуется знать его свойства при испытаниях на прочность, выносливость, вязкость, твердость и т. п.

В качестве материалов могут применяться металлы, пластмассы, древесина, текстиль, кожа и многое другое.

Во-первых, следует запомнить, что практически все механизмы для испытаний свойств материалов, независимо от прочих условий, состоят из одних и тех же основных узлов: самовозбудительный механизм; зажимные устройства; силоизмерительный механизм; отчетное устройство.

Во-вторых, наличие в некоторых из них дополнительных устройств служит для надлежащего исполнения функций тех же основных узлов; например, диаграммные и программные устройства; деинфирующие и предохранительные приспособления, и другие устройства.

В третьих, каким бы тщательным способом ни провести испытания, элементы случайности остаются, и они могут дать знать о себе в самых безобидных ситуациях.

В этих устройствах самовозбудительные механизмы при статистических испытаниях имеют следующие пределы: механические — $1-10^4$ кГ ; гидравлические — 10^4 кГ < (выше)10^4 кГ.

В зависимости от того, какой материал и на какой предмет испытать, самовозбудительные механизмы делят на множество других категорий.

Рассмотрим наиболее распространенные из них.

Самовозбудительные механизмы рычажно-маятникового типа. Эти механизмы служат для испытаний металлических и полимерных материалов на растяжение, но если их дополнить специальными узлами, то можно применять и для статистических испытаний и других свойств, например, сжатие, изгиб и прочее.

При измерении параметра (испытании) формируется система специальных узлов силоизмерителя.

Эта система обладает собственной частотой

$$f_0 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{C}{M}}, \tag{148}$$

где C — постоянная упругости испытуемого образца;

M — приведенная масса.

$$M = f^2 m, \tag{149}$$

где m — масса маятника;

f — отношение радиусов инерции и маятников.

У данных типов самовозбудительных механизмов низкая частота f_0 и большой момент инерции M. То есть при быстроизменяющихся нагрузках они не пригодны для рычажно-маятниковых и гидравлико-маятниковых силоизмерителей.

$$f_0 = 1{,}25 - 1{,}75 \text{ гц}, \tag{150}$$

$$f_0 = 0{,}5 - 1{,}5 \text{гц}. \tag{151}$$

1) Испытатель с рычажным силоизмерителем. Выполняются в виде одно-, двух- и трехрычажных. Обладают высокой точностью в пределах $1—10^5$ кГ.

Если для однорычажных машин шкала силоизмерителя считается по формуле:

$$x = \frac{P_a}{Q}, \tag{152}$$

где P_a — усилие на грузе;

a — плечо рычага;

Q — вес передвижного груза, то для многорычажных

$$x = \frac{Pacl}{Qdb}, \tag{153}$$

где a, c, l, d, b — плечи рычагов.

2) Маятниковый силоизмеритель. У этих машин шкала не линейна и применяются они с пределом измерения до 150 кГ, то есть, когда требуется испытание на разрыв не очень прочных материалов.

Уравнение шкалы для этих машин имеет вид:

$$P = \frac{QR}{r} \sin\alpha, \tag{154}$$

в этой формуле R — длина маятника до центра тяжести груза; r — радиус сектора подвеса верхнего зажима; Q — вес маятника; x — угол поворота маятника, зависит от веса маятника.

Как любому прибору, силоизмерителям также свойственна случайная погрешность, которая зависит от самых разнообразных факторов.

Кроме этого, имеется систематическая погрешность, которая определяется фиксацией маятника от конструктивных элементов.

Для сравнения: доля случайной ошибки составляет примерно 0,7% от значения измеряемой величины.

Если требуется испытание материалов на большую прочность ($150 < P < 500$ кГ), то пользуются силоизмерителями с равномерной шкалой. Как правило, такие машины имеют корректировку; расчет этих машин проводится по формуле:

$$P = \frac{QR}{r} \times \frac{\sin x}{\cos(\beta - x)}, \tag{155}$$

где R — длина маятника до центра тяжести;

r — длина плеча подвеса;

Q — вес маятника;

p — измеряемое усилие;

β — угол между горизонтальной прямой, соединяющей оси подвеса маятника и точку подвеса верхнего зажима перед нагружением образца;

x — угол поворота маятника.

Равномерность шкалы обеспечена, если углы $x = \beta$.

3. Силоизмерители гидравлико-маятникового типа, применяются для испытаний материалов на изгиб, растяжение, сжатие и т. д.

Предел измерений — 20—1500 m.

Расчет для этих силоизмерителей производится по формуле:

$$P = \frac{QL\cos x_0}{hl} x, \tag{156}$$

где Q — вес маятника;

l — длина короткого плеча;

L — длина маятника;

x_0 — угол первоначального наклона к горизонту малого плеча.

$x = htgx_0 + htg(x_x - x_0)$ — перемещение рейки.

x_x — текущий угол между вертикалью и маятником;

P — сила, приложенная к испытываемому образцу.

Поршень рабочего цилиндра развивает усилие

$$P_0 = \frac{QL}{lh} x \cos x_0 \left(\frac{D}{d} \right)^2, \qquad (157)$$

где d — диаметр поршня в измерительном цилиндре;

D — диаметр рабочего поршня.

Кроме вышерассмотренных, пользуются еще следующими видами машин по типам силоизмерителей: манометрические или испытательные прессы (применяются для проверки свойств сжатия или изгиба строительных материалов); торционные силоизмерители (их преимуществом является возможность проведения испытаний свойств материалов с высокой частотой системы «прибор — образец»):

$$f_0 = 10 - 50 \text{ Гц} \ —$$

такая частота позволяет провести испытания при больших частотах погружения.

Электротензометрические силоизмерители; их преимуществами являются небольшая инерционность, позволяющая регистрировать текущие процессы, и отсутствие сил трения, которое позволяет измерять небольшие нагрузки, например, у резины.

6. Методы измерения температуры и классификация приборов

Специфика среды, в которой мы живем, такова, что не обойтись без знаний термодинамических данных, каковыми являются температура, давление, объем.

Измерение объема сводится к установлению линейных параметров, чем мы уже занимались выше.

Вопросами измерения давления мы займемся сразу после рассмотрения текущего вопроса.

В настоящем вопросе разберемся с методами измерения температуры в приборостроении. Для измерения температуры используются следующие методы:

1. **Контактные методы** — предполагают наличие надежного контакта с предметом, у которого снимается температура. При таком контакте пределы измерения измеряемой температуры определяются механическими (жаропрочность) и химическими свойствами материала, из которого изготовлен чувствительный элемент термометра.

Верхний предел измеряемых температур ограничен из-за ограничения вышеназванных свойств материала датчика с показателем 2500—3000 °С.

Поскольку при измерении температуры пользуются одним из свойств материала, зависящим от температуры, при этом индикатор показывает температуру самого датчика, то погрешность измерения температуры в основном вносится степенью надежности контакта. Например, жидкостный медицинский термометр, который известен каждому из нас, работает на принципе расширения жидкости по объему при повышении температуры, и наоборот. Если сперва объем капельки ртути в нем имел одно значение, то после изменения температуры становится другим: лишний объем ртути выталкивается из шарика, указывая на численное значение температуры. При снижении температуры происходит обратный процесс.

Однако объем стеклянного шарика и ртути в нем не изменяется, из чего следует:

$$V_ш = \pi r^2 h = V_ш(1 + \beta t)\,, \qquad (158)$$

где $V_ш$ — объем стеклянного шарика с ртутью;

r —радиус капилляра-столбика;

h —высота столбика;

β —температурный коэффициент расширения.

Следовательно, чувствительность термометра (на 1 °C)

$$\frac{dh}{dt} = \frac{V_ш \beta}{\pi r^2}, \tag{159}$$

измеряется в миллиметрах.

Формула (159) показывает: манипулируя градуировкой индикатора, можно увеличить диапазон считывания информации о температуре предмета.

У других типов контактных термометров, которые называют термометрами сопротивления, принцип измерения зависит от степени чистоты, от примеси металлов и полупроводников, поскольку работа термометров определяется плавным изменением электрического сопротивления этих материалов R при изменении температуры. В таких термометрах датчики и другие части изготавливаются из этих металлов, или из их сочетания, или из полупроводников, а также из их примесей.

Для измерения низких температур используют полупроводниковые датчики. Несмотря на такие их достоинства, как значительный отрицательный коэффициент сопротивления (значительно больше, чем у металлов), малая теплоинерция, большое номинальное сопротивление при массовом производстве, не удается воспроизводить показания эталонных характеристик; поэтому их производство осуществляется в небольшом количестве. Их основная характеристика — температурный коэффициент сопротивления:

$$x = -\frac{B}{T^2}, \tag{160}$$

где B — некоторая постоянная, определяется по таблице и измеряется в кельвинах,

T — температура, К.

Чувствительный элемент у термометров сопротивления — это проволока, намотанная на жесткий изоляционный каркас.

В качестве металла используются все виды драгметаллов и редких металлов, а также молибден, вольфрам, никель, медь, железо и др.: отдельно или в виде сплавов.

Поскольку сопротивление металлов изменяется по закону (в зависимости от температуры)

$$R = r_0(1 + xt), \tag{161}$$

где R_0 —сопротивление до начала измерения;

t —измеряемая температура, то, какими бы точными ни были изготовлены термометры, со временем даже золото и платина окисляются (например, окисью углерода CO), и в результате нарушается точность показаний прибора (термометра).

Для повышения устойчивости работы термометров, например, с платиновым датчиком, изготавливают проволоку с диаметром больше 1 мкм и регистрируют показания датчика с помощью моста из сопротивлений.

Для повышения чувствительности пользуются датчиками из термисторов: это проволока-бусинка из оскидов металлов Cu, Mn, Mg, Co, Ni.

Такой датчик применяется для регистрации температуры в очень узком диапазоне, поэтому шкала индикатора не линейна: сопротивление чувствительного элемента меняется по закону:

$$R = R_0 e^{a/T}, \tag{162}$$

где R, R_0 — см. формулу (161);

$e^{a/T}$ — экспонента, T — температура;

a — линейные размеры датчика.

Кроме вышеуказанных датчиков, широкое применение нашли термодатчики. Это сплавы двух металлов, которые могут быть использованы в разных сочетаниях.

На участке контакта двух металлов под действием изменения температуры в замкнутой цепи появляется термическая электродвижущая сила, а на концах провода, соединяющего датчик из сплава с регистраторами, возникает разность потенциалов.

Термическая электродвижущая сила меняется по закону:

$$\varepsilon = x(T_1 - T_2), \tag{163}$$

где T_1, T_2 — начальная и конечная (рабочая) температуры датчика при измерении, x — коэффициент термической электродвижущей силы, Мв/градус.

Преимуществом этих датчиков является то, что разность потенциалов или термической электродвижущей силы не зависит от линейных размеров ни датчика, ни соединительных проводов, определяется только степенью однородности металлов или полупроводников.

Если требуется высокая точность, то следует контролировать температуру и второй спайки точек присоединения соединительных проводов, например, поместив их в среду с известной температурой, в термостат.

Формула (163) также работает в узком интервале.

2. **Бесконтактные методы** измерения температуры. Методы также называют **пирометрами**. Их преимущества перед предыдущими в том, что из-за их малоинерционности, которая повышает точность измерений, становится возможной регистрация температуры быстро изменяющихся объектов.

У пирометров вероятный предел измерения не ограничен: однако это не значит, что их нельзя применять для измерения температур в других диапазонах.

Погрешности в показаниях пирометров, к тому же немалые, вызваны необходимостью введения различных поправок при градуировании шкалы прибора.

Пирометры работают по следующему принципу. Из курса атомной и ядерной физики известно, что если имеется абсолютно черное тело с температурой T, то полная энергия его излучения связана с температурой уравнением:

$$E_T = \delta \times T^4, \tag{164}$$

в котором $\delta = 5{,}75 \times 10^{-12} вт \times см^2 \times град^{-4}$ — постоянная.

При этом имеется такая, которая излучается с площади 1 см^2 черного тела за 1 сек.

Однако ни одно физическое тело в действительности не является абсолютным черным телом.

Поэтому температуру нагретого тела определяют по формуле

$$T = T_p \sqrt[4]{\frac{1}{E_T}}, \tag{165}$$

в которой E_T определяется эмпирически или из таблицы, является коэффициентом черноты полного излучения.

В пирометрах для компенсации изменений в окружающей среде применяются компенсаторы в виде катушек из никелевой проволоки с конструктивным оформлением в виде термобатареи; для повышения точности измерений термоприемник, т. е. чувствительная поверхность, полностью должна быть покрыта изображением источника излучения; для обеспечения предыдущего требования необходимо правильное визирование: это отношение диаметра круга, образованного на плоскости (имеется в виду плоскость пересечения лучистого объема с плоскостью датчика, совпадающая с нагреваемой чувствительной поверхностью) к оптической оси лучистой воронки при условии, что чувствительная поверхность полностью перекрыта изображением источника излучения.

Визирование на расстоянии 1 м от излучателя — это номинальное визирование. Определение погрешности параметра (в °С) сводится к определению

$$\Delta\varepsilon = \left|\varepsilon_2 - \varepsilon_1\right|, \tag{166}$$

где ε_2, — практическая термическая электродвижущая сила черного тела (излучателя);

ε_1 — табличные данные термической электродвижущей силы пирометра с соответствующим телескопом (устройство, которое служит для концентрации излучения источника (черного тела) на термоприемник (датчик), состоит из многослойной термобатареи и оптической системы).

Инерционность пирометра — это время, требуемое для установления термической электродвижущей силы, равной 99% от табличных данных термической электродвижущей силы при комнатной температуре 20 ± 2 °С.

7. Приборы для измерения давления

Давление — это напряженность жидкостей и газов, а также паров, которую формирует некоторое внешнее воздействие на них.

Как измерять эту напряженность?

С этой целью измеряют данные, приходящие на единичную площадь той поверхности, на которую приложено это усилие: причем усилие распределено нормально и равномерно по этой поверхности.

Это усилие определяется с помощью датчика. После данные датчика (датчиков) преобразуются в сигналы упругости, электричества и т. п.

Может случиться, что усилие на поверхности, т. е. напряженность среды, настолько мала, что чувствительность датчиков не может «замечать» это: тогда пользуются другими свойствами среды: теплопроводимостью, степенью ионизации и другими свойствами, связанными с давлением.

Когда измеряется давление газов, то в определенных пределах его изменение с повышением высоты не учитывается.

С жидкостью же, наоборот: из курса «Гидравлика» известно, что увеличение глубины и давления имеют отношение прямой пропорциональности.

$$Ñ= \rho_0 + \gamma z\,; \tag{167}$$

где: P — искомое или измеряемое давление;

ρ_0 — давление, которое воздействует на поверхность жидкости;

γ — удельный вес поверхности, на которую действует давление ρ_0;

z — высота столба жидкости или глубина жидкости относительно поверхности.

Зависимость (120) является одним из основных принципов, по которым измеряется давление не только жидкостей, но и других сред: кстати, уравнение (120) можно применить для создания заданных давлений.

Основным, т. е. наиболее распространенным прибором для измерения давления является **манометр**: он имеет много разновидностей, вплоть до работающих на разности давлений.

Единицах измерения давления: как правило, оно измеряется в 1 кг/см^2;

Однако основной единицей является Н/м^2;

У этих единиц в числителе дроби показана единица измерения усилия; в знаменателе — соответствующая единица площади поверхности, на которое, приложено это усилие.

Кроме приведенных, существуют и другие единицы измерения: мм ртутного столба, мм водяного столба, атм, Па и прочее.

Между ними существуют следующие соответствия:

1) 1 мм вод. ст. = 9,8 Па;

2) 1 мм рт. ст. = 133,3 Па;

3) 1 атм = 760 мм рт. ст.

Для измерения очень сильных давлений пользуются **килобарами (кбар)**, 1 кбар = 1000 атм.

Из формулы (167) видно, что измеряемое (искомое) давление

$$\rho = \gamma h; \qquad (168)$$

откуда (поскольку ρ_0 известно, то мы не рассматриваем его как искомое)

$$\gamma = \frac{\rho}{h}; \qquad (169)$$

Поэтому в случае, если γ_u среды с ρ можно выразить через (удельный вес рабочей жидкости), то формула (121) имеет вид:

$$\rho = (\gamma - \gamma_u)h, \qquad (170)$$

эта формула выражает также перепад давлений в газах, и следовательно, указывает **погрешность** при измерении давлений. Вносятся погрешности при определении удельного веса γ и высоты столба h.

$$\Delta\rho = \Delta\gamma h + \Delta h\gamma; \qquad (171)$$

Можно (124) представить по-другому: тогда будем иметь формулу для **относительной погрешности**.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{\Delta h}{h}. \tag{172}$$

Начальные погрешности в измерение могут вноситься по следующим причинам.

1. **Удельный вес.**

1) степень однородности среды нарушена вследствие нахождения в ней примесей (в том числе и растворимых газов; такие жидкостные среды в гидравлике называются **вязкими жидкостями**. Из-за нарушения этой вязкости и изменяется удельный вес рабочей жидкости);

2) может измениться ускорение силы тяжести: оно не всегда равно 9,8 Н, например, на уровне моря, где напор на поверхности $H = 0$, ускорение $g = 6{,}65$. С учетом этого измерения g, относительная погрешность, вносимая в измерение давления, выражается формулой:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = -0{,}00259\cos 2 - 2\times 10^{-7} H, \tag{173}$$

где φ — значение географической широты.

К изменению плотности приводит изменение не только вязкости, но и температуры, а это требует изменения длины самой шкалы для отсчета высоты столба. Изменение температуры на величину Ät вызывает **температурную погрешность**.

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = (\beta - 3x_m - x_ш)\Delta t, \tag{174}$$

где β — коэффициент температурного расширения по объему;

x_m, $x_ш$ — то же самое, но для линейного расширения узлов прибора (трубы и шкалы).

2. **Высоты столбца.**

1) погрешность введена при изготовлении шкалы, принято показания погрешности считать на ± 0,5 мм; при использовании оптических устройств удается снизить эту погрешность до ±0,01 мм и даже больше;

2) изменение силы поверхностного натяжения также вносит погрешности, поскольку, по законам гидравлики, смачивается поверхность трубки и подъем жидкости увеличивается. Но в зависимости от этой силы, жидкость может не подниматься.

Кроме того, высота жидкости по капиллярности зависит от однородности среды, механических и химических свойств материала, из которого изготовлена трубка, от температуры окружающей среды и самой среды.

Погрешность, вносимую по этим причинам, считают по формуле:

$$\Delta h_{к} = \frac{A}{d}, \tag{175}$$

где A — некоторая постоянная, зависит от вышеуказанных свойств материала, при соблюдении их определенных значений и $t = = (20 \pm 2)$ °С, для воды $A = 30$, для ртути $A = -10$ (поскольку уровень ртути снижается), спирта $A = 10$, толуола $A = 13$.

Уменьшение диаметра до величины < 4 мм тоже вносит погрешность.

3. **Положение манометра**

Если отклонение трубки от вертикали составит угол X, то погрешность увеличивается на:

$$\Delta h = h\left(\frac{1}{\cos x} - 1\right); \tag{176}$$

если угол очень небольшой, то согласно законам тригонометрии:

$$\Delta h \approx \frac{1}{2} h x^{2}; \tag{177}$$

Если манометр изготовлен в 2-трубном исполнении (V-образный), то:

$$\rho = \gamma h = \gamma(h_1 + h_2), \tag{178}$$

где h_1, h_2 — уровни жидкостей в соответствующих трубках.

В **однотрубных манометрах**:

$$\rho = \gamma h_2\left(1 + \frac{f}{F}\right) = \gamma h; \tag{179}$$

где f — площадь поперечного сечения трубки;

F — площадь поперечного сечения сосуда.

Однотрубные манометры распространены больше.

Жидкостные манометры не позволяют измерять значительных давлений: максимальные показания манометра зависят от самих линейных параметров манометра.

Представте себе только: при высоте столба 1,5—2 м можно измерять давления только 2—3 кг/см^2 при ртутном заполнении столба и всего лишь 0,15—0,2 кг/м^2, если заполнение водное.

Поэтому для измерения пользуются специальными приспособлениями: одно из них представляет собой несколько последовательно соединенных однотрубных, или чашечных (как их называют по-другому) манометров.

Особенностью этого манометра является то, что середина змееобразной трубки, которая получается после объединения нескольких однотрубных манометров V-образной формы, заполняется более легкой жидкостью, чем в рабочих концах.

При определении значений давления показания всех однотрубных или чашечных соединяются в одно.

$$\rho = \gamma h_1 + (\gamma - \gamma_1)(h_2 + h_3 + \ldots + \ldots h_n). \tag{180}$$

Как мы убедились выше, погрешность, в основном, вносится в измеряемое значение ρ параметрами γ и h.

Следовательно, нижняя граница измерений задается ценой деления шкалы, например, манометра. Измерения можно проводить до тех пор, пока величина погрешности не сопоставима, точнее, меньше либо равно цене деления.

Для получения более точой высоты столба, пользуются оптическими фото- и электронными следящими системами.

Часто случается так, что нельзя применять стеклянные трубки по разным причинам: из-за агрессивности среды, значительного давления и т. д.

Применение металлических труб в этих случаях имеет свои преимущества: можно применять **индуктивные следящие системы**. Например, поплавок с сердечником изменяют высоту, согласно искомому давлению. Другой путь повышения точности состоит в следующем:согласно формуле (10), при изменении положения манометра по вертикали увеличивается погрешность: но это происходит при $x < 15^oC$.

Когда $x > 15^oC$, точность при наклонных трубках повышается. Более того, повышается **чувствительность** прибора (в этом случае, его называют **микроманометром**):

$$\delta = \frac{x}{\rho} = \frac{1}{\gamma\left(\frac{f}{F} + \sin x\right)}, \qquad (181)$$

где ρ — измеряемое давление;

x — перемещение уровня жидкости в трубке.

Чувствительность может быть повышена еще значительнее, если воспользоваться двухжидкостным манометром: в манометре V-образная трубка переходит в концах в чашечки и заполнена разными жидкостями, близкими по удельному весу.

Для такого манометра, чувствительность в котором

$$\delta = \frac{x}{\rho} = \frac{1}{\frac{f}{F}(\gamma_1 + \gamma_2) + (\gamma_1 - \gamma_2)}, \qquad (182)$$

где - f, F — площади сечений и расширительных камер (чашек).

В производстве пользуются подходящими к условиям производства манометрами. Основное техническое требование, предъявляемое к этим приборам — удобство эксплуатации и точность показаний.

Среди наиболее распространенных манометров следует выделить следующие типы манометров: **поршневые, пружинные**, у которых, в свою очередь, целый ряд разновидностей.

Для измерения **давления в газах** пользуются их свойствами, связанными с плотностью ρ, поскольку $\rho \sim \rho$.

Например, одним из методов является следующее.

По известному из термодинамики закону Бойля—Мариотта, в сжатом капилляре давление газа:

$$\rho = \rho_0 \frac{V_0}{Pd^2 h}, \tag{183}$$

где V_0 — объем, занятый газом, в приборе (как правило, системы шар — капилляр);

d — диаметр капилляра;

$h = H \frac{V_0}{Ðd^2 h}$ — длина (высота) прибора; она нелинейная, поскольку

$$H = \frac{Ðd^2}{V_0} h^2 = \text{const}\, h^2, \tag{184}$$

где ρ_0 — начальное давление газа в приборе, сравнивая с которым, определяют искомое.

Такие манометры называют **компрессионными**.

Из других приборов можно отметить: **термокондуктивные**, работающие на свойствах теплопроводности газов; **ионизационные**, работающие на закономерностях ионизации газов в зависимости от плотности и других характеристик.

8. Средства измерения гидравлических параметров жидкости

Нельзя представить себе ни одного производства без учета жидкостей (газов), применяемых в производственных процессах: эти вещества также требуют учета, так же как, например, электричество.

В промышленности при расчете гидравлических параметров жидкости учитывается ее объемный расход Q_0, массовый расход Q_m, скорость, весовой G, напор (давление) и др.

Все зависит от требований производства. Как правило, говорят о единицах измерения, соотнесенных, например, часу, — которые нетрудно выразить в единицах, соотнесенных минуте или секунде. Взаимосвязь между разновидностями расхода жидкости Q_0, Q_m, G определяется формулами:

$$G = Q_0 \gamma ,$$
$$Q_m = Q_0 \rho , \qquad (185)$$

где γ — удельный вес пробегающего вещества (жидкости);

ρ — плотность того же вещества.

В зависимости от принципа действия приборов для измерения гидравлических параметров можно выделить много. В качестве работы в них применяются принципы, начиная от перепада давлений до самых современных, например, ядерно-магнитного резонанса (ЯМР).

Рассмотрим некоторые приборы, которые наиболее популярны.

1. **Приборы с принципом работы на перепаде давления**.

Перепад (разность) давлений измеряется дифференциальным манометром, который называют **дифманометром-расходомером**.

Перепад давлений можно рассчитать по формулам:

$$Q = xEF\sqrt{\frac{2g\Delta\rho}{\gamma}}\text{м}^3\text{сек}, \qquad (186)$$

$$G = xEF\sqrt{2g\gamma\Delta\tilde{n}}\,\text{кГ/сек}, \qquad (187)$$

где x — коэффициент расхода сужающего устройства;

E — поправочный множитель на расширение измеряемой среды (для жидкостной среды $E = 1$);

F — площадь отверстия сужающего устройства;

γ — удельный вес измеряемой среды в рабочем процессе;

g — ускорение свободного падения;

$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2$ — перепад давления в сужающем устройстве.

На практике применяют упрощенные виды (186) и (187):

$$Q_0 = 0{,}01252xEd^2\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\gamma}}\text{ м}^3/\text{ч}, \tag{188}$$

$$G = 0.01252xEd^2\sqrt{\gamma\Delta\text{ñ}}\text{ кг/ч}, \tag{189}$$

в этих формулах:

d — диаметр сужающего отверстия, мм;

$\Delta\rho$ — искомый перепад давлений, кг/м^2;

γ — удельный вес вещества, кг/ч.

Если выразить диаметр через внутренний диаметр D трубопровода:

$$m = \frac{d^2}{D}, \tag{190}$$

где m — модуль сужающего устройства, то:

$$Q_0 = 0{,}01252xEmd^2\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\gamma}}\text{ м}^3/\text{ч}, \tag{191}$$

$$G = 0{,}01252xEmD^2\sqrt{\gamma\Delta\rho}\text{ кг/ч}. \tag{192}$$

Часто в вышеприведенных формулах удельный вес γ заменяют на плотность среды ρ, с учетом того, что единицы измерения заменяемых γ и ρ те же — кг/м^3.

Метод измерений гидравлических параметров на перепаде давлений — самый распространенный из-за ряда достоинств: универсальность, широкая номенклатура сред, большой диапазон измерения температуры и многие другие.

В то же время, ограничивают их применение следующие недостатки: высокая погрешность измерений, доходящая до ± 3—4 %; узкий диапазон измерений (диапазон отношений потоков в трубопроводе и в сужающем устройстве — (3 : 1) — (5 : 1)); невозможность проведения измерений для ряда потоков; значительное влияние на результаты измерений механико-химических свойств среды и другие.

В некоторые расходомерах встроены различные устройства, облегчающие измерения: например, устройства извлечения квадратного корня из $\Delta\rho$ без дополнительных усилий.

Эти корнеизвлекающие устройства могут быть как механическими, так и электронными.

Если расходомер работает на перепаде давлений, то датчиком искомого давления является поплавок, который помещен в поток измеряемой среды: на поплавок снизу действует выталкивающая его сила и открывает проходное отверстие. В результате устанавливается перепад давлений. Поскольку этот перепад давлений не зависит от самого расхода, то его перемещение принимается за меру расхода.

Такие расходомеры называют **ротаметрами**.

Существуют еще **электромагнитные, ультразвуковые, ионизационные, тепловые, массовые** и другие виды расходомеров, работающие по разным принципам. Среди них особо следует выделить расходомеры с **ядерно-магнитным резонансом:** малая инерционность, отсутствие других устройств в трубопроводе, линейность шкалы, широкий диапазон (20 : 1) измерений.

Однако ядерно-магнитный резонанс требует наличия сильного магнитного поля. Поэтому их невозможно применять для измерения расходов в трубопроводах с малым диапазоном. С этой точки зрения их можно относить к той же группе, что и дифманометры — расходомеры.

Поверх всех расходометров, проводят относительные погрешности, сравнивая и настраивая их с эталонными.

$$\delta = \frac{V_0}{V_h}\left(1 - \frac{q}{Q}\right) - 1, \tag{193}$$

где $\delta \le 0{,}1 - 1$;

V — измерительный объем жидкости;

V_0 — объем жидкости, соответствующее одному обороту стрелки;

h — количество V_0 в объеме V: столько же движется стрелка, отсчитывая V_0;

Q — количество расхода расходометров;

q — потери расхода.

Работа с этими расходомерами требует установки предварительного фильтра. Диапазоны измерений у них 45 : 1, счетчики (расходомеры) подвергаются поверке на специальных установках, которые обеспечены мерными баками или весами: в обоих случаях, в конечном счете, определяют объем жидкости, сопоставляется эталонный и протекший объем жидкости.

Бывает, что для поверки применяют жидкость-заменитель, когда невозможно использование рабочей жидкости.

Из-за разных динамических вязкостей μ_1 и μ_2 жидкостей, их погрешности по измерению объема δ_1 и δ_2, связаны между собой как:

$$\delta_2 = C + (\delta_1 - C)\frac{\Delta\rho_2\mu_1}{\Delta\rho_1\mu_2}, \qquad (194)$$

где C — постоянная счетчика;

$\Delta\rho$ — перепад давления, где $\Delta\rho = f\left(\frac{Q}{\upsilon d};\frac{Q\mu}{dG};\frac{\mu C_p}{\lambda}\right)$, все параметры в скобке безразмерны;

d, G — диаметр и вес рабочего органа счетчика;

υ — кинематическая вязкость жидкости;

C_p — теплоемкость жидкости;

λ — теплопроводность жидкости.

Заключение

1. Проектирование систем контроля и автоматического регулирования

Системы контроля и автоматического регулирования, конечным результатом которых являются сегодня орбитальные космические станции, межпланетные орбитальные станции, годами находящиеся на расстоянии сотни тысяч километров, являются высшим полетом современной инженерной мысли. Все это всего лишь каких-то 40—50 лет назад было мечтой всего человечества. Чтобы реализовать эти достижения, пришлось разработать, спроектировать более сложные средства, используя уже имеющиеся. В нашей последней заключительной лекции попробуем разобраться с вопросами проектирования средств автоматического регулирования и контроля. Из выше изложенного уже ясно, что основной задачей проектирования является:

1) разработка схемы;
2) обеспечение выбора аппаратуры для технологического контроля при производстве;
3) оформление принятых решений в виде технической документации, соответствующей ГОСТ.

В задачу проектирования входят вопросы, которые должны обеспечить проектные материалы; выяснить, каким методом произвести монтаж САР и контроля промышленным способом; каков ожидаемый эффект от выбранного способа выполнения заказа.

Если за советом и примером обращаться к природе, то увидим: жизнеспособны и долговечны только те материальные, в том числе биологические, системы, которые расходуют наименьшее количество энергии. Другими словами, чем менее энергоемка система, тем она более долговечна и живуча.

Мы изложили универсальный закон природы, который проявляет себя во всех сферах жизни как один из основных. Применительно к рассматриваемому нами вопросу, из этого закона следует, что производство изделий должно обойтись предприятию с наименьшими затратами. Для этого количество приборов должно быть, как можно, меньше: нестандартные средства для данного проекта могут быть допущены только после тщательной проработки (как теоретически, так и экспериментально). Даже в этом случае предпочтение должно быть отдано тем специальным эле-ментам и узлам, которые уже выпускаются или выпускались серийно на данном предприятии. Необходимо думать не только о наименьшем количестве затрат при производстве, но и о надежности последующей эксплуатации, вопрос гарантийного обслуживания и ремонта выпускаемых изделий также является вопросом себестоимости, а самое главное, вопросом престижа предприятия; монтаж электропроводных линий и родственных конструкций, как правило, составляет 80 % объема всех монтажных работ. Поэтому удачный выбор монтажа имеет большое значение. Обеспечение реализации выбранного проекта наиболее рациональными, простыми и дешевыми способами является не только производственной, но и общегосударственной задачей, с точки зрения обеспечения произведенными САР и контроля не только технологических процессов, но и систем обеспечения в структурах безопасности. Проектная документация, которая является итогом проектирования САР и контроля, как правило, состоит из двух частей:

1) на стадии «задание на проектирование» изучаются вопросы, связанные с самим объектом; вопросы основных характеристик технологии и технологических установок; изучаются коммуникационные схемы; чертежи необходимого оборудования, требуемых помещений и т. д.

Должны быть исчерпывающе выяснены вопросы, связанные с качественными показателями, такие, как допуск, точность, другие вопросы, связанные с разбросом необходимых параметров.

Кроме вышеперечисленных, самым сложным и ответственным вопросом являются проблемы оперативного управления производством с применением САР. Для успешного выбора схемы производства при выполнении задания на проектирование должны быть привлечены специалисты непосредственно из технологического процесса.

2) Следующая стадия — проектное задание. На этой стадии проектируются и оформляются в специальной технологической документации следующие вопросы: структурные схемы управления автоматизируемым объектом; принципиальная схема контроля и автоматизации; заявочные ведомости (на регуляторы, электрооборудование, кабели, провода, трубы и пр.).

Рабочие чертежи — это вторая часть проектной документации. После завершения первой части все принятые решения переносятся на бумагу в виде чертежей, после чего оформляется техническая документация. Какие требования предъявляются к рабочим чертежам? В них должен быть исчерпывающий ответ на вопросы, связанные с производством данного изделия. Кроме всего прочего, они служат основой для заявочных ведомостей (см. выше).

Пояснительная записка. Этим документом завершается проектирование САР. Она должна быть составлена как можно более кратко, но должна содержать самую конкретную информацию: никаких второстепенностей, повторений и ненужных подробностей. Пояснительная записка содержит перечень материалов, информацию о технологии производства и основных характеристиках объекта, другие основные требования, но ни в коем случае не математические выкладки. В пояснительную записку могут быть включены различные приложения, содержащие самую разнообразную информацию, например, о перечне необходимых исследовательских и экспериментальных работ. Проектная документация включает в себя документы о спецификации и о сметно-финансовых расчетах. Рассмотрим еще один вопрос, вопрос о методике выбора аппаратуры; хотя этот вопрос не входит в проектирование, но играет чрезвычайно важную роль для реализации требований, вытекающих из задания на проектирование. Очевидно, что речь идет о критерии, на основе которого делается выбор: этим критерием является ответ на вопрос о том, в какой степени данная аппаратура может обеспечить заданную погрешность: речь идет о выборе датчиков преобразователей и пр.

При выборе учитывают требуемую точность измерения, расстояние до датчика, условия производства, количество одноименных контролируемых величин, диапазон измерений, габаритные размеры приборов и прочее.

2. Современные тенденции в приборостроении

Представить быт современного человека без использования технического оснащения невозможно. Этими средствами являются не только современные персональные компьютеры, включая ноутбуки и карманные ПК, но и мотоблоки, многие другие мини-трактора и разнообразные механические и радиоэлектронные устройства.

Средствами технического оснащения являются не только небольшие, но и огромные турбины в ГЭС, конвейеры в крупных машиностроительных заводах, космическая промышленность, которая позволяет строить и эксплуатировать от многоразовых космических кораблей до межпланетных станций.

Все эти достижения современного человечества состоят, в основном из механических, радиоэлектронных, гидравлических, пневматических и прочих частей.

И все имеющиеся в быту приборы усовершенствуются чуть ли не с каждым днем.

Всего 20 лет назад о современном уровне компьютеризации страны можно было только мечтать, сегодня все это реальность. В связи со всеми этими новшествами сам собой возникает вопрос: в каком направлении развивается приборостроение? Что за горизонтом? В каком направлении будет развиваться отечественное приборостроение? Во-первых, приходится отметить, что отечественное приборостроение как составная часть машиностроения до сих пор занимает одну из первых позиций в мире. Наука и техника, НИИ, в которых идут фундаментальные исследования, основы которых были заложены еще во времена СССР, стоят на таком прочном фундаменте, что катаклизмы прошлых десятилетий их как бы обошли стороной. Традиции советской системы образования, которое в свое время являлось одним из сильнейших, живут до сих пор: наши студенты продолжают побеждать на самых престижных международных олимпиадах. Получение в 2000-м году академиком Алферовым Нобелевской премии явилось признанием российской науки международным научным сообществом. В настоящее время наука поддерживается государством на самом высоком уровне, лично Президентом страны. Наряду с прежними направлениями (космос, медицина, фундаментальная атомная и ядерная физика), российские ученые вышли вперед в области высоких технологий, нанотехнологий. Что касается приборостроения в целом, то оно долго развивалось в направлении повышения точности. Но сегодня, кажется, достигнут предел: погрешности в приборах стали сравнимыми с размерами атомов — это 1 А°, то есть 10^{-8} см. Что будет следующим наиточнейшим эталоном погрешности? Может быть, период полураспада какого-то только что открытого химического элемента? Очень даже может быть. Сегодня науке известно уже 111 элементов. Долгожителями из новых элементов являются «тяжелые», но даже они живут в течение доли секунды. Но уже начиная со 105-го элемента, вещества делятся с такой скоростью, которую ни один современный прибор измерять не может: не существует приборов с такой точностью. Вот куда, во-первых, идет приборостроение. Этот фактор настоятельно требует — уже сегодня нужно начинать преподавать в средних школах, специальных учебных заведениях, ВУЗах основы микро- и наноэлектроники, как и основы ВТ. И естественно, зададимся вопросом: что дальше? То есть вычислительная техника на наших глазах внесла значительный вклад в эволюцию человечества. К чему приведет, с этой точки зрения, бурное развитие нанотехнологий? Это во-вторых. В-третьих, проблемы передачи сигнала на расстояние без искажений и без потерь все же остаются актуальными. Четвертое направление — проблема источников питания, связи с дальнейшей миниатюризацией РЭА. Требуются новые адекватные источники питания. Пятое. Сегодня скорость света является базовой для точности измерения многих параметров. Остается ли она такой же? В свете вышеуказанных проблем приборостроения, не исключено, что появится новый эталон в измерениях: может быть, им станет какой-то параметр одной из элементарных частиц. Шестое. Это проблема самой электроники, проблемы сверхпроводимости. А это вопросы управления и эксплуатации низкотемпературной плазмы. Отрадно, что отечественное приборостроение уже сегодня является флагманом не только в отрасли приборостроения. Задача сегодняшнего студенчества — продолжать славные традиции советско-российской науки и техники.

Содержание