

Министерство высшего и среднего специального образования
Р С Ф С Р

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. академика С.П.Королева
Кафедра "Автоматизированные системы управления".
Лаборатория автоматизированных систем научных
исследований АН СССР

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСНИ И ИХ КОМПОНЕНТОВ
И ОБУЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЮ АСНИ.
СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСНИ И ИХ КОМПОНЕНТОВ

Лабораторная работа № I

Составители :

доцент Орищенко В.И.
доцент Павлов В.П.
доцент Шеничников В.В.
ст.инж. Прудников И.В.

Рецензент :

доцент Короблин М.А.

Содержание

Стр.

| | |
|---|----|
| 1. Теоретические основы лабораторной работы | 3 |
| 1.1. Методы и средства измерения и оценивания точностных характеристик компонентов АСНИ | 3 |
| 1.2. Методы и средства измерения и оценивания динамических характеристик компонентов АСНИ | 8 |
| 1.2.1. Методы измерений динамических параметров | 13 |
| 1.2.2. Средства измерений динамических параметров | 16 |
| 2. Система измерения и оценивания характеристик АСНИ и их компонентов | 17 |
| 2.1. Назначение | 17 |
| 2.2. Методическое обеспечение | 18 |
| 2.2.1. Методы измерений параметров при оценивании точностных в статике характеристик | 18 |
| 2.2.2. Методы оценивания точностных в статике характеристик | 19 |
| 2.2.2.1. Методы оценивания точностных характеристик при детерминированных концептуальных моделях по точности | 19 |
| 2.2.2.1.1. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса отсутствует или не учитывается | 19 |
| 2.2.2.1.2. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса учитывается | 21 |
| 2.2.2.2. Методы оценивания вероятностных характеристик случайных величин | 24 |
| 2.2.2.2.1. Методы оценивания моментов случайных величин | 25 |
| 2.2.2.2.2. Методы оценивания некоторых функций от моментов случайных величин | 27 |
| 2.2.2.2.3. Методы оценивания доверительных интервалов и вероятностей для статистик, распределенных асимптотически нормально | 29 |
| 2.2.2.2.4. Методы проведения эксперимента по оцениванию вероятностных характеристик случайных величин | 31 |
| 2.2.2.3. Методы оценивания точностных характеристик при вероятностных концептуальных моделях по точности | 31 |
| 2.2.2.3.1. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса отсутствует или не учитывается | 31 |
| 2.2.2.3.2. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса учитывается | 36 |
| 2.2.3. Методы измерений динамических параметров | 40 |
| 2.3. Функциональная организация | 46 |
| 2.4. Техническое обеспечение | 48 |
| 2.5. Программное обеспечение | 51 |
| 2.6. Информационное обеспечение | 52 |
| 2.7. Метрологическое обеспечение | 53 |
| 2.7.1. Метрологические характеристики подсистемы измерений точностных параметров | 53 |
| 2.7.1.1. Метрологические характеристики при измерении значений напряжений | 53 |

| | |
|---|----|
| 2.7.1.2. Метрологические характеристики при измерении значений цифровых данных | 54 |
| 2.7.2. Метрологические характеристики подсистем измерений динамических параметров | 54 |
| 2.7.3. Метрологические характеристики подсистем оценивания точностных характеристик | 55 |
| 3. Описание последующего компонента | 56 |
| 3.1. Методическое обеспечение | 56 |
| 3.2. Программное обеспечение | 59 |
| 3.3. Информационное обеспечение | 59 |
| 4. Анализ последующего компонента и построение концептуальных моделей | 61 |
| 4.1. Концептуальная модель по точности | 61 |
| 4.2. Концептуальная модель по динамике | 62 |
| 5. Оцениваемые характеристики исследуемого компонента ... | 62 |
| 5.1. Точностные характеристики | 62 |
| 5.2. Динамические характеристики | 64 |
| 6. Построение математических моделей компонента и их анализ | 64 |
| 6.1. Математическая модель по точности | 64 |
| 6.2. Математическая модель по динамике | 65 |
| 7. Порядок выполнения лабораторной работы | 66 |
| 8. Контрольные вопросы | 66 |
| Основные термины и определения | 68 |
| Список сокращений | 69 |
| Литература | 70 |
| Приложение. Краткие сведения о модулях КАНАК | 71 |

Цель лабораторной работы:

- изучить методы и принципы построения систем измерения и оценивания точностных и динамических характеристик автоматизированных систем;
- изучить автоматизированную систему измерения и оценивания характеристик АСНИ и ее компонентов;
- провести идентификацию и анализ математических моделей подпрограммы тарировки.

I. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Системы измерения и оценивания характеристик являются составной частью комплексов, предназначенных для идентификации математических моделей компонентов автоматизированных систем /1/.
Функции этих систем при активной идентификации следующие (см. Рис.4 /1/):

- измерение значений факторов $\vec{F} = \vec{V}_{KY}$ и откликов \vec{W} при идентификации прямых моделей компонентов;
- измерение значений факторов $\vec{F} = \vec{V}_{KY}$ и откликов \vec{W} и получение на их основе оценок $\vec{C}(\langle \vec{V}_{KY}, \vec{W} \rangle, \vec{V}_{ин})$ характеристик $\vec{C}(\vec{V}, \vec{W})$ при идентификации косвенных моделей компонентов.

Таким образом, указанные системы реализуют в общем случае процедуры измерения параметров и оценивания характеристик компонентов.

I.I. Методы и средства измерения и оценивания точностных характеристик компонентов АСНИ

Для экспериментального оценивания точностных характеристик применяются два метода :

- метод образцового источника;

- метод образцового компонента.

Метод образцового источника состоит в следующем (см.Рис.1). На вход исследуемого компонента подается заданное образцовое воздействие V_{om} , $m = \overline{1, M}$, которое воспроизводится с высокой степенью точности. Например, для образцовых источников электрических сигналов погрешность воспроизведения воздействия V_{om} должна быть в 3-5 раз меньше погрешности исследуемого компонента по входу и ее составляющ.х. Отклик на выходе компонента

$$W_m = \tilde{f}(V_{om}), \quad m = \overline{1, M},$$

где $\tilde{f}(\)$ - истинная функция преобразования компонента, отличная, в общем случае, от номинальной $f(\)$.

На выходе средства измерения имеем оценку \tilde{W}_m отклика W_m .

На основании экспериментальных результатов погрешности компонента определяются следующим образом:

- оценка погрешности по выходу

$$\tilde{\Delta}_{вых}(V_{om}) = \tilde{W}_m - f(V_{om}), \quad m = \overline{1, M}; \quad (I.1)$$

- оценка погрешности по входу

$$\tilde{\Delta}_{вх}(V_{om}) = \varphi(\tilde{W}_m) - V_{om}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (I.2)$$

где $\varphi(\)$ - функция, обратная номинальной функции преобразования $f(\)$.

Значения $f(V_{om})$ и $\varphi(\tilde{W}_m)$ в (I.1), (I.2) известны заранее или вычисляются.

Метод образцового компонента отличается тем, что воздействие V_m , к которому уже не предъявляются высокие требования по точности воспроизведения, подается одновременно на вход испытуемого и образцового компонента. Образцовый компонент должен воспроизводить номинальную функцию преобразования $f(\)$ с высокой (по сравнению с испытуемым компонентом) степенью точно-

Метод образцового поточника



Рис. 1

сти (см.Рис.2). На выходах испытуемого и образцового компонентов имеем отклики W_m и W_{om} , а на входе средства измерений - их оценки \tilde{W}_m и \tilde{W}_{om} . На основании экспериментальных результатов погрешности компонента определяются следующим образом:

- оценка погрешности по выходу

$$\tilde{\Delta}_{вых}(\tilde{V}_m) = \tilde{W}_m - \tilde{W}_{om}, \quad m = \overline{1, N}; \quad (I.3)$$

- оценка погрешности по входу

$$\tilde{\Delta}_{вх}(\tilde{V}_m) = \varphi(\tilde{W}_m) - \varphi(\tilde{W}_{om}), \quad m = \overline{1, N}; \quad (I.4)$$

где \tilde{W}_m и \tilde{W}_{om} , $m = \overline{1, N}$ - измеренные значения откликов W_m и W_{om} на выходе исследуемого и образцового компонентов;
 \tilde{V}_m - измеренное значение воздействия V_m .

Значения $\varphi(\tilde{W}_m)$ и $\varphi(\tilde{W}_{om})$ в (I.4) вычисляются.

Таким образом, при оценивании точностных характеристик измерений подлежат :

- отклик W_m , $m = \overline{1, N}$, в случае применения метода образцового источника;
- отклики W_m , $m = \overline{1, N}$ и W_{om} , $m = \overline{1, N}$, и воздействие V_m , $m = \overline{1, N}$, в случае применения метода образцового компонента.

Для измерения этих параметров должны применяться высокоточные измерительные средства.

На основании полученных значений погрешностей (I.I)+(I.4) и с учетом принятой концептуальной модели компонента по точности осуществляется оценивание точностных характеристик расчетным путем как правило на ЭВМ.

Метод образцового компонента

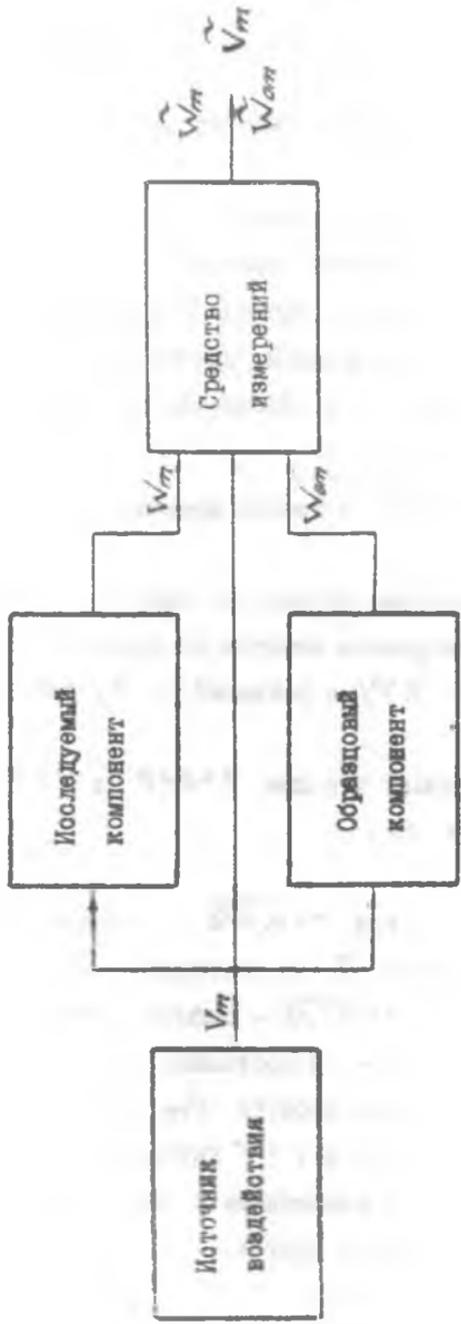


Рис. 2

I.2. Методы и средства измерения и оценивания динамических характеристик компонентов АСНИ

Остановимся предварительно на определении ряда базовых понятий.

Состояние объекта - совокупность значений физических величин, определяющих свойства объекта.

Будем рассматривать объекты, состояние которых определяется одной физической величиной, причем эта величина дискретная и имеет два значения, т.е. множество состояний объекта

$$S = \{S_k\}_{k=0,1} \quad (I.5)$$

Состояние объекта в момент времени t будем обозначать через $S(t)$.

Событие - переход объекта из одного состояния в другое.

Будем рассматривать события на временной оси, на которой выделим открытый $(0, T)$ и закрытый $[0, T]$ интервалы наблюдений (см. Рис.3а).

Также условимся, что при $t=0+0$ и $t=T-0$ объект находится в состоянии S_0 .

Обозначим :

$E_{1l}, l=2n+1$, где $n=\overline{0, L/2}$ - событие, состоящее в l -ом переходе из состояния S_0 в состояние S_1 ;

$E_{0l}, l=2n$, где $n=\overline{0, L/2}$ - событие, состоящее в l -ом переходе из состояния S_1 в состояние S_0 .

Будем считать, что события E_{00} и $E_{1(L+1)}$ происходят в граничных точках $t=0$ и $t=T$ интервала наблюдений и являются условными, т.е. не связанными с реальными переходами из одного состояния объекта в другое.

Отсюда следует, что:

L - количество событий E_{0l} и E_{1l} на интервале $(0, T)$;

Временная диаграмма осязаний объекта

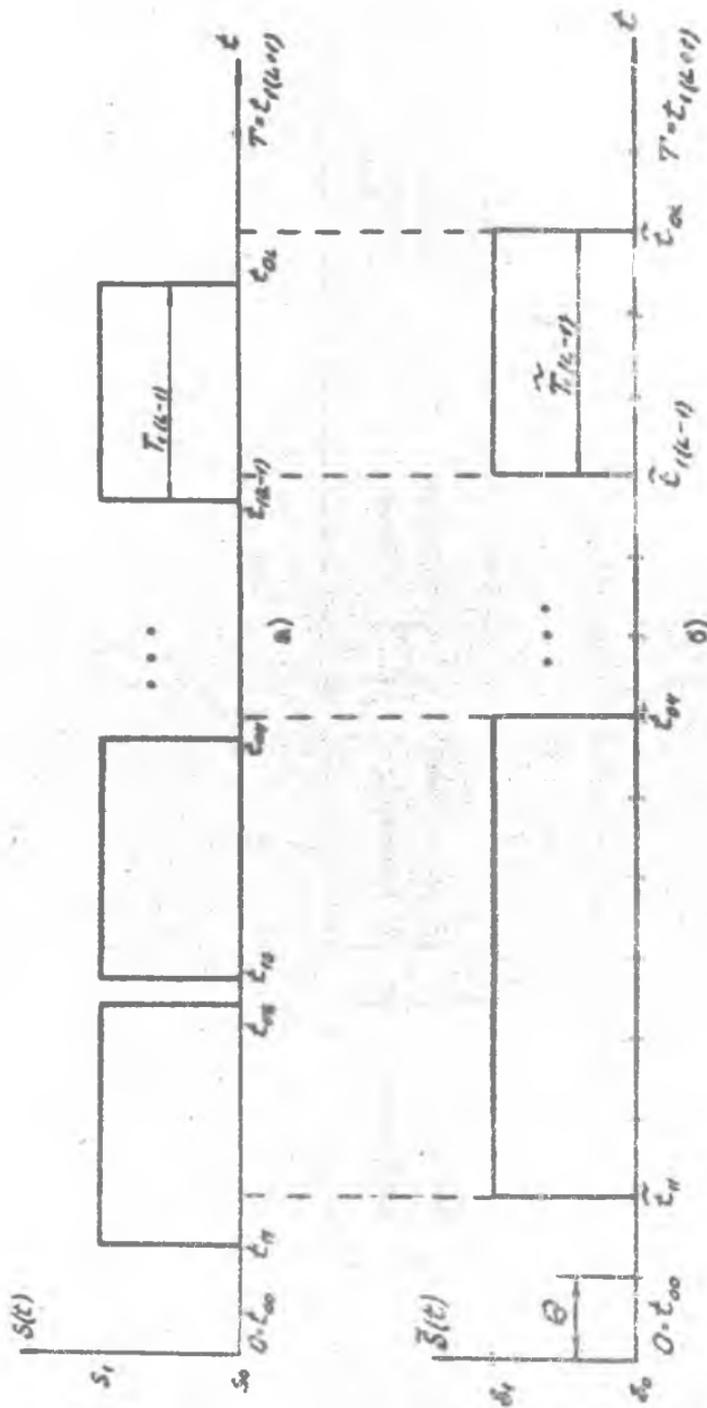


Рис. 3

Событийный метод измерений длительностей интервалов состояний

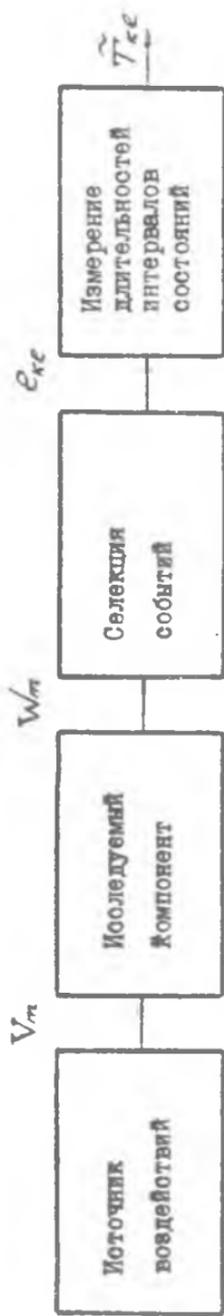


Рис. 4

$L+2$ - количество событий e_{0e} и e_{1e} на интервале $[0, T]$;

$L/2$ - количество событий e_{0e} или e_{1e} на интервале $(0, T)$;

$L/2+1$ - количество событий e_{0e} или e_{1e} на интервале $[0, T]$.

Момент наступления события - момент времени, в который происходит переход объекта из одного состояния в другое.

Моменты наступления событий e_{ke} , $k=0,1$, $\ell=\overline{0, L+1}$

будем обозначать через t_{ke} . Очевидно, что $t_{00}=0$ и $t_{1(L+1)}=T$.

Если при рассмотрении событий является несущественным, в какое состояние переходит объект, то события будем обозначать через e_ℓ , $\ell=\overline{0, L+1}$, а моменты времени, в которые они происходят, t_ℓ , $\ell=\overline{0, L+1}$.

Интервал состояния - интервал времени, в течение которого состояние объекта остается неизменным.

ℓ -й интервал состояния, в течение которого объект находится в состоянии S_0

$$I_{0e} = (t_{0e}, t_{1(e+1)}) = \left\{ t : (t_{0e} < t \leq t_{1(e+1)}) (S(t) = S_0) \right\}, \quad (I.6)$$

$$\ell = 2n, \quad n = \overline{0, L/2};$$

ℓ -й интервал состояния, в течение которого объект находится в состоянии S_1

$$I_{1e} = (t_{1e}, t_{0(e+1)}) = \left\{ t : (t_{1e} < t \leq t_{0(e+1)}) (S(t) = S_1) \right\}, \quad (I.7)$$

$$\ell = 2n+1, \quad n = \overline{0, L/2-1}$$

Длительность интервала состояния - значение интервала состояния.

Длительности интервалов состояний (I.6) и (I.7)

$$T_{0e} = t_{1(e+1)} - t_{0e}, \quad \ell = 2n, \quad n = \overline{0, L/2}; \quad (I.8)$$

$$T_{1e} = t_{0(e+1)} - t_{1e}, \quad \ell = 2n+1, \quad n = \overline{0, L/2-1}. \quad (I.9)$$

Суммарная длительность состояния - сумма длительностей интервалов состояния на интервале наблюдения.

Суммарные длительности состояний S_0 и S_1 на интервалах наблюдений $(0, T)$ и $[0, T]$

$$T_0 = \sum_{\substack{c=2n, \\ n=0, 1/2}} T_{0c} \quad (I.10)$$

$$T_1 = \sum_{\substack{c=2n+1, \\ n=0, 1/2-1}} T_{1c} \quad (I.11)$$

где T_{0c} и T_{1c} определяются из (I.8) и (I.9).

Динамический параметр объекта - параметр, характеризующий изменение состояния объекта во времени.

К динамическим параметрам, например, относятся моменты наступления событий, длительности интервалов состояний, количество событий на интервале наблюдений.

При измерениях динамические параметры представляются в двух формах :

- электрический сигнал состояния;
- кодовое представление события.

Сигнал состояния - сигнал, информативный параметр которого функционально связан с состоянием объекта.

Информативным параметром сигнала состояний при измерении, например, длительности интервала состояния является длительность сигнала состояния.

Множеству состояний объекта $S = \{S_k\}_{k=0,1}$ соответствует множество значений сигнала состояний

$$Z = \{z_k\}_{k=0,1}$$

Кодовое представление (код) события - результат кодирования события, определенный в момент наступления последнего.

Код события e_{kc} , $k=0,1$, $c=0, 1/2-1$ будем обозначать через K_k .

Кодовое представление события может использоваться либо непосредственно для измерения динамических параметров (например, количества событий на интервале), либо для формирования сигнала состояния.

1.2.1. Методы измерений динамических параметров. Ограничимся рассмотрением методов измерений длительностей интервалов состояний.

Для измерения длительностей интервалов состояний применяются два метода :

- событийный,
- выборочный.

Событийный метод состоит в следующем (см.Рис.4). На вход исследуемого компонента подается воздействие $V_m, m = \overline{1, M}$. На его выходе наблюдается отклик $W_m, m = \overline{1, M}$, в форме, позволяющей осуществить селекцию (отбор) интересующих событий e_{kc} . При этом определение длительностей T_{kc} интервалов состояний I_{kc} может осуществляться :

- прямым измерением,
- косвенным измерением.

При прямом измерении на основании событий e_{kc} осуществляется формирование сигнала состояний $Z(t)$. Информативным параметром сигнала состояний является его длительность T_{Zkc} , которая и измеряется. В этом случае событийный метод называют интервальным.

При косвенном измерении длительностей интервалов состояний осуществляются прямые измерения моментов t_{kc} наступления событий e_{kc} . Длительности интервалов состояний по измеренным значениям t_{kc} определяются расчетным путем в соответствии с (1.8), (1.9). При этом промежуточной формой представления изме-

рительной информации является трасса событий $e_{k\ell}$, которая представляет собой множество $\{ \langle k_{\ell}, t_{k\ell} \rangle \}_{\ell=1,2}$ пар $\langle k_{\ell}, t_{k\ell} \rangle$, где k_{ℓ} - код события $e_{k\ell}$, $t_{k\ell}$ - момент наступления события $e_{k\ell}$. В этом случае событийный метод называют методом трасс.

Выборочный метод измерения состоит в периодическом контроле текущего состояния $S(t)$ компонента в заранее определенные моменты времени t_n , $n = \overline{1, N}$, на интервале наблюдения $[0, T]$ (см. Рис.5). Моменты времени t_n могут разделяться интервалами постоянной или переменной длины. На основании полученной информации $\{ S(t_n) \}_{n=1, N}$ о состояниях компонента в моменты времени t_n , $n = \overline{1, N}$, определяются длительности интервалов состояний.

Пример I.I. Рассмотрим применение выборочного метода для измерения длительностей $T_{i\ell}$ интервалов состояния S_i , приведенных на Рис.3а. Пусть осуществляется контроль состояний компонента через интервалы времени постоянной длительности θ , т.е. $t_n = n\theta$, $n = \overline{1, N}$. Временная диаграмма состояний объекта, полученная выборочным методом, представлена на Рис.3б. Из него видно, что события e_{02} и e_{13} , происходящие в моменты времени t_{02} и t_{13} , оказываются невыявленными. В результате этого зарегистрированное число состояний S_i компонента на интервале наблюдений $(0, T)$ оказывается отличным от истинного числа $L/2$. Это приводит к существенной погрешности измерения длительностей интервалов состояний. Очевидно, для ее уменьшения необходимо уменьшать θ .

Оценивание характеристик длительностей интервалов состояний осуществляется с учетом принятой концептуальной модели компонента обычно на ЭВМ с использованием специальных программ обработки.

Выборочный метод измерения длительности интервалов состояний

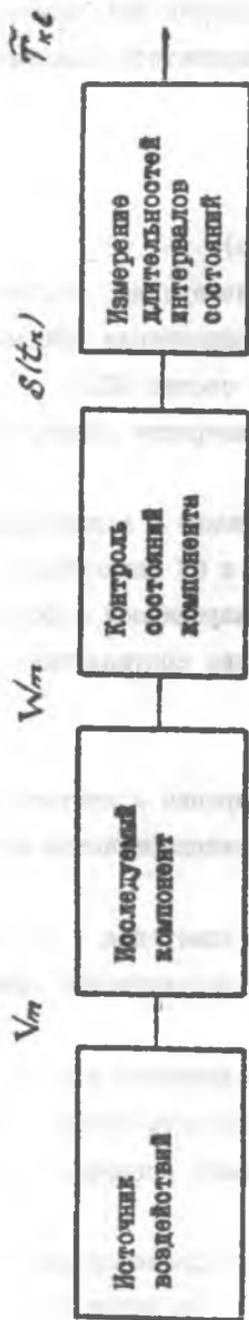


Рис. 6

1.2.2. Средства измерений динамических параметров. Системы измерений (СИ) динамических параметров компонентов АСНИ подразделяются на:

- программные,
- аппаратные,
- программно-аппаратные (гибридные).

Программные СИ осуществляют измерение исключительно программными средствами, т.е. путем выполнения специальных программ на ресурсах ЭВМ, входящей в состав АСНИ.

Аппаратные СИ осуществляют измерение аппаратными средствами, добавляемыми к АСНИ.

Гибридные СИ включают программные и аппаратные средства.

Произведем сравнение методов и СИ динамических параметров по точностным характеристикам и разрешающей способности.

Погрешность измерений имеет две составляющие:

- методическую,
- инструментальную.

Методическая погрешность измерения - составляющая погрешности измерения, происходящая от несовершенства метода измерения.

Инструментальная погрешность измерения - составляющая погрешности измерения, зависящая от погрешностей применяемых средств измерений.

Инструментальная погрешность включает в свою очередь составляющую, обусловленную взаимодействием средства измерений с объектом измерений. Ее будем называть погрешностью взаимодействия.

Разрешающая способность СИ определяется максимальной частотой появления событий, при которой они могут быть еще различимы.

При использовании дифференциального метода измерения методичес-

кая составляющая как правило меньше, чем при использовании выборочного метода. Во втором случае уменьшить методическую погрешность можно путем уменьшения длительности интервала θ (см. Рис.3б). Однако, это ведет к увеличению погрешности взаимодействия, по крайней мере для программных и гибридных СИ.

Наименьшую погрешность взаимодействия (в пределе равную нулю) обеспечивают аппаратные СИ, а наибольшую имеют программные СИ. Гибридные СИ занимают промежуточное положение.

Разрешающая способность аппаратных СИ как правило выше, чем программных. Гибридные СИ по разрешающей способности также занимают промежуточное положение.

2. СИСТЕМА ИЗМЕРЕНИЯ И ОЦЕНИВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АСНИ И ИХ КОМПОНЕНТОВ,

Система измерения и оценивания характеристик АСНИ и их компонентов (СИО) входит в состав автоматизированного комплекса для оценивания характеристик АСНИ и их компонентов (АК-ОИ) /1/.

2.1. Назначение.

СИО предназначена для:

- измерения воздействий и откликов и оценивания точности в статике характеристик программных (ПРК) и программно-аппаратных (ПАК) компонентов;
- измерения длительностей временных интервалов выполнения ПРК.

Перечень оцениваемых характеристик компонентов при различных концептуальных моделях по точности и динамике приведен в Таблице I.

Таблица I

Оцениваемые характеристики компонентов

| Концептуальная модель компонента по точности или динамике | Точностные характеристики компонента в статике | Динамические характеристики компонента |
|---|---|--|
| Дискретная или непрерывная детерминированная величина; один влияющий фактор | 1. Погрешность или систематическая погрешность (абсолютное, относительное, приведенное значения). 2. Вариация (абсолютное, относительное, приведенное значения). | 1. Длительность временного интервала выполнения процесса, реализуемого компонентом |
| Непрерывная, случайная величина; один влияющий фактор | 1. Систематическая составляющая погрешности (абсолютное, относительное, приведенное значения). 2. Среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности (абсолютное, относительное и приведенное значения). 3. Вариация (абсолютное, относительное и приведенное значения). 4. Доверительные вероятности оценивания систематической составляющей погрешности, среднеквадратического отклонения случайной составляющей погрешности и вариации. | |

2.2. Методическое обеспечение

2.2.1. Методы измерений параметров при оценивании точностных в статике характеристик. Для экспериментального оценивания точностных характеристик в АК-ОИ применяются методы образцового источника и образцового компонента. При этом измеряемыми параметрами являются воздействия V_m и отклики W_m (см. Рис. I и 2).

В лабораторном практикуме оцениваются точностные характе-

ристики ПРК и ПАК, у которых информация на входе (воздействие) и выходе (отклик) представлена в форме :

- электрических сигналов напряжения;
- данных в виде целых и вещественных чисел

При исследовании ПАК осуществляются прямые измерения статических сигналов напряжения цифровым программно-управляемым вольтметром Ф-30.

Поскольку в АК-ОИ исследуемые ПАК и ПРК реализуются в той же вычислительной среде, что и СИО, операции измерений значений цифровых данных на входе и выходе компонентов являются вырожденными и сводятся по существу к перезаписи данных со входа и выхода компонента в СИО. Для действительных чисел при этом формат представления либо не изменяется, либо изменяется с увеличением длины слова до 8 байт. При этом погрешность не привносится.

2.2.2. Методы оценивания точностных в статике характеристик.

2.2.2.1. Методы оценивания точностных характеристик при детерминированных концептуальных моделях по точности.

2.2.2.1.1. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса отсутствует или не учитывается.

Определяются следующие характеристики погрешности в статике:

1. Оценка абсолютной погрешности

$$\bar{\Delta}(V_{om}) = \bar{\Delta}_{вых}(V_{om}) \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad (2.1)$$

или

$$\bar{\Delta}(V_{om}) = \bar{\Delta}_{вх}(V_{om}) \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad (2.2)$$

где

$$\bar{\Delta}_{вых}(V_{om}) = \bar{W}_m - f(V_{om}) \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad (2.3)$$

- оценка абсолютной погрешности по выходу;

$$\bar{\Delta}_{\text{вх}}(V_{\text{ом}}) = \Psi(\bar{W}_m) - V_{\text{ом}} \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.4)$$

- оценка абсолютной погрешности по входу;

$V_{\text{ом}}$ - образцовое воздействие;

\bar{W}_m - измеренное значение отклика iW_m ;

$f(\cdot)$ - номинальная функция преобразования;

$\Psi(\cdot)$ - функция, обратная номинальной функции преобразования.

Величины $f(V_{\text{ом}})$ и $\Psi(\bar{W}_m)$ в (2.3) и (2.4) либо заранее известны, либо вычисляются.

2. Оценка предельной абсолютной погрешности

$$\bar{\Delta}_n = \max_m |\bar{\Delta}(V_{\text{ом}})| \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.5)$$

где $\bar{\Delta}(V_{\text{ом}})$ определяется из (2.1) или (2.2).

3. Оценка относительной погрешности

$$\bar{\delta}(V_{\text{ом}}) = \bar{\delta}_{\text{вых}}(V_{\text{ом}}) \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.6)$$

или

$$\bar{\delta}(V_{\text{ом}}) = \bar{\delta}_{\text{вх}}(V_{\text{ом}}) \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad ; \quad (2.7)$$

где

$$\bar{\delta}_{\text{вых}}(V_{\text{ом}}) = \frac{\bar{\Delta}_{\text{вых}}(V_{\text{ом}})}{|f(V_{\text{ом}})|} \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.8)$$

- оценка относительной погрешности по выходу;

$$\bar{\delta}_{\text{вх}}(V_{\text{ом}}) = \frac{\bar{\Delta}_{\text{вх}}(V_{\text{ом}})}{|V_{\text{ом}}|} \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.9)$$

- оценка относительной погрешности по входу.

Значения $\bar{\Delta}_{\text{вых}}(V_{\text{ом}})$ и $\bar{\Delta}_{\text{вх}}(V_{\text{ом}})$ в (2.8) и (2.9) определяются из (2.3) и (2.4), а $f(V_{\text{ом}})$ либо заранее известны, либо вычисляются.

4. Оценка предельной относительной погрешности

$$\bar{\delta}_n = \max_m |\bar{\delta}(V_{\text{ом}})| \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.10)$$

где $\bar{\delta}(V_{\text{ом}})$ определяется из (2.6) или (2.7).

5. Оценка приведенной погрешности

$$\tilde{y}(Vom) = \tilde{y}_{вых}(Vom) \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.11)$$

или

$$\tilde{y}(Vom) = \tilde{y}_{вх}(Vom) \quad , \quad m = \overline{1, N} \quad , \quad (2.12)$$

где

$$\tilde{y}_{вых}(Vom) = \frac{\tilde{\Delta}_{вых}(Vom)}{C_{вых}} \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.13)$$

- оценка приведенной погрешности по выходу;

$$\tilde{y}_{вх}(Vom) = \frac{\tilde{\Delta}_{вх}(Vom)}{C_{вх}} \quad , \quad m = \overline{1, N} \quad , \quad (2.14)$$

- оценка приведенной погрешности по входу;

$C_{вых}$ и $C_{вх}$ - некоторые нормирующие константы.

Значения $\tilde{\Delta}_{вых}(Vom)$ и $\tilde{\Delta}_{вх}(Vom)$ в (2.13) и (2.14) определяются из (2.3) и (2.4), а $C_{вых}$ и $C_{вх}$ задаются для каждого компонента.

6. Оценка предельной приведенной погрешности

$$\tilde{y}_n = \max_m |\tilde{y}(Vom)| \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.15)$$

где $\tilde{y}(Vom)$ определяется из (2.11) или (2.12).

2.2.2.1.2. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса учитывается.

Определяются следующие характеристики погрешности в статике.

1. Оценка систематической погрешности

$$\tilde{\Delta}_c(Vom) = \tilde{\Delta}_{свых}(Vom) \quad , \quad m = \overline{1, M} \quad , \quad (2.16)$$

или

$$\tilde{\Delta}_c(Vom) = \tilde{\Delta}_{свх}(Vom) \quad , \quad m = \overline{1, N} \quad ; \quad (2.17)$$

где

$$\tilde{\Delta}_{свых}(Vom) = \frac{1}{2} (\Delta_{вых}^M(Vom) + \Delta_{вых}^B(Vom)) \quad , \quad m = \overline{1, N} \quad ; \quad (2.18)$$

- оценка систематической погрешности по выходу;

$$\tilde{\Delta}_{свх} (V_{om}) = \frac{1}{2} (\Delta_{свх}^N (V_{om}) + \Delta_{свх}^E (V_{om})) , \quad m = \overline{1, M} , \quad (2.19)$$

- оценка систематической погрешности по входу;

V_{om} - образцовое воздействие;

$$\tilde{\Delta}_{свх}^N (V_{om}) = \tilde{W}_m^N - f(V_{om}) , \quad m = \overline{1, M} , \quad (2.20)$$

- оценка погрешности по выходу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны меньших значений;

$$\tilde{\Delta}_{свх}^E (V_{om}) = \tilde{W}_m^E - f(V_{om}) , \quad m = \overline{1, M} , \quad (2.21)$$

- оценка погрешности по выходу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны больших значений;

$$\tilde{\Delta}_{свх}^N (V_{om}) = \psi(\tilde{W}_m^N) - V_{om} , \quad m = \overline{1, M} . \quad (2.22)$$

- оценка погрешности по входу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны меньших значений;

$$\tilde{\Delta}_{свх}^E (V_{om}) = \psi(\tilde{W}_m^E) - V_{om} , \quad m = \overline{1, M} , \quad (2.23)$$

- оценка погрешности по входу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны больших значений;

\tilde{W}_m^N и \tilde{W}_m^E - измеренные значения отклика при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны меньших и больших значений;

$f(\)$ - номинальная функция преобразования;

$\psi(\)$ - функция, обратная номинальной функции преобразования.

ния.

Величины $f(V_{om})$, $\psi(\tilde{W}_m^N)$ и $\psi(\tilde{W}_m^E)$ в (2.20)+(2.23) либо заранее известны, либо вычисляются.

2. Оценка предельной систематической погрешности

$$\tilde{\Delta}_{сн} = \max_m | \tilde{\Delta}_c (V_{om}) | , \quad m = \overline{1, M} , \quad (2.24)$$

где $\tilde{\Delta}_c(V_{om})$ определяется из (2.16) или (2.17).

3. Оценка относительной систематической погрешности

$$\tilde{\delta}_c(V_{om}) = \tilde{\delta}_{c\text{вых}}(V_{om}), \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.25)$$

или

$$\tilde{\delta}_c(V_{om}) = \tilde{\delta}_{c\text{вх}}(V_{om}), \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.26)$$

где

$$\tilde{\delta}_{c\text{вых}}(V_{om}) = \frac{\tilde{\Delta}_{c\text{вых}}(V_{om})}{|f(V_{om})|}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.27)$$

- оценка относительной систематической погрешности по выходу;

$$\tilde{\delta}_{c\text{вх}}(V_{om}) = \frac{\tilde{\Delta}_{c\text{вх}}(V_{om})}{V_{om}}, \quad m = \overline{1, M}; \quad (2.28)$$

- оценка относительной систематической погрешности по входу.

Значения $\tilde{\Delta}_{c\text{вых}}(V_{om})$ и $\tilde{\Delta}_{c\text{вх}}(V_{om})$ в (2.27) и (2.28) определяются из (2.18) и (2.19), а $f(V_{om})$ либо заранее известны, либо вычисляются.

4. Оценка предельной относительной систематической погрешности

сти

$$\tilde{\delta}_{c\text{пр}} = \max_m |\tilde{\delta}_c(V_{om})|, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.29)$$

где $\tilde{\delta}_c(V_{om})$ определяется из (2.27) или (2.28).

5. Оценка приведенной систематической погрешности

$$\tilde{\gamma}_c(V_{om}) = \tilde{\gamma}_{c\text{вых}}(V_{om}), \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.30)$$

или

$$\tilde{\gamma}_c(V_{om}) = \tilde{\gamma}_{c\text{вх}}(V_{om}), \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.31)$$

где

$$\tilde{\gamma}_{c\text{вых}}(V_{om}) = \frac{\tilde{\Delta}_{c\text{вых}}(V_{om})}{C_{\text{вых}}}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.32)$$

- оценка приведенной систематической погрешности по выходу;

$$\tilde{\gamma}_{c\text{вх}}(V_{om}) = \frac{\tilde{\Delta}_{c\text{вх}}(V_{om})}{C_{\text{вх}}}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.33)$$

- оценка приведенной систематической погрешности по входу;

$C_{вых}$ и $C_{вх}$ - некоторые нормирующие константы.

Значения $\tilde{\Delta}_{C_{вых}}(Vom)$ и $\tilde{\Delta}_{C_{вх}}(Vom)$ в (2.32) и (2.33) определяются из (2.18) и (2.19), а $C_{вых}$ и $C_{вх}$ задаются для каждого компонента.

6. Оценка предельной приведенной систематической погрешности

$$\tilde{y}_{сн} = \max_m |\tilde{y}_c(Vom)|, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.34)$$

где $\tilde{y}_c(Vom)$ определяется из (2.30) или (2.31).

7. Оценка вариации

$$\tilde{H}(Vom) = \tilde{H}_{вых}(Vom) \quad (2.35)$$

или

$$\tilde{H}(Vom) = \tilde{H}_{вх}(Vom), \quad (2.36)$$

где

$$\tilde{H}_{вых}(Vom) = |\Delta_{вых}^M(Vom) - \Delta_{вых}^E(Vom)|, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.37)$$

- оценка вариации по выходу;

$$\tilde{H}_{вх}(Vom) = |\Delta_{вх}^M(Vom) - \Delta_{вх}^E(Vom)|, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.38)$$

- оценка вариации по входу;

$\Delta_{вых}^M(Vom)$, $\Delta_{вых}^E(Vom)$, $\Delta_{вх}^M(Vom)$, $\Delta_{вх}^E(Vom)$ имеют тот же смысл, что и в (2.18), (2.19).

Оценки предельной вариации \tilde{H}_n , относительной $\tilde{b}_n(Vom)$ и приведенной $\tilde{y}_n(Vom)$ вариации \tilde{y}_n их предельных значений $\tilde{b}_{нп}$ и $\tilde{y}_{нп}$ определяются из соотношений, аналогичных (2.24) и (2.34).

2.2.2.2. Методы оценивания вероятностных характеристик случайных величин.

Методы оценивания точностных и динамических характеристик компонентов при вероятностных концептуальных моделях в значительной степени используют результаты теории оценивания - раздела

математической статистики. Поскольку эти результаты носят универсальный характер, отвлеченный от конкретной (физической) сущности случайной величины, их целесообразно рассмотреть отдельно.

Пусть :

X - непрерывная случайная величина (СВ) с конечными k -ми начальными

$$\mu_{kx} = EX^k < \infty \quad (2.39)$$

и центральными

$$\mu_{kx} = E(X - EX)^k < \infty \quad (2.40)$$

моментами, где E - символ математического ожидания;

X_n , $n = \overline{1, N}$ - выборочные значения случайной величины X , полученные в результате N независимых опытов.

Обозначим :

$$C_{kx}(N) = \sum_{n=1}^N X_n^k ; \quad (2.41)$$

D_x - дисперсия СВ X .

Из (2.41) следует рекуррентное соотношение

$$C_{kx}(N) = C_{kx}(N-1) + X_N^k \quad (2.42)$$

2.2.2.2.1. Методы оценивания моментов случайной величины.

а) Оценка k -го начального момента СВ X /2/

$$\hat{\mu}_{kx}(N) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n^k = \frac{1}{N} C_{kx}(N) \quad (2.43)$$

Математическое ожидание оценки (2.43) /2/

$$M_1 \hat{\mu}_{kx} = E \hat{\mu}_{kx}(N) = \mu_{kx} , \quad (2.44)$$

Дисперсия оценки (2.43) /2/

$$M_2 \hat{\mu}_{kx}(N) = D_{\hat{\mu}_{kx}}(N) = \frac{1}{N} (\mu_{2kx} - \mu_{kx}^2) , \quad (2.45)$$

Оценка (2.43) является несмещенной, состоятельной и распределена асимптотически при $N \rightarrow \infty$ нормально со средним (2.44) и дисперсией (2.45).

б) Оценка дисперсии СВ X при неизвестном ее математическом ожидании /2/

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{2x}(N) &= \hat{D}_x(N) = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (X_n - \hat{\mu}_{1x}(N))^2 = \\ &= \frac{N}{N-1} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n \right)^2 \right] = \\ &= \frac{1}{N-1} \left[C_{2x}(N) - \frac{1}{N} C_{1x}^2(N) \right]. \end{aligned} \quad (2.46)$$

Математическое ожидание оценки (2.46) /2/

$$M \hat{\mu}_{2x} = E \hat{\mu}_{2x}(N) = \mu_{2x} = D_x, \quad (2.47)$$

Дисперсия оценки (2.46) /2/

$$\begin{aligned} M_2 \hat{\mu}_{2x}(N) &= D_{\hat{D}_x} = \\ &= \frac{N(\mu_{4x} - \mu_{2x}^2)}{(N-1)^2} = \frac{2(\mu_{4x} - 2\mu_{2x}^2)}{(N-1)^2} + \frac{\mu_{4x} - 3\mu_{2x}^2}{N(N-1)^2} \end{aligned} \quad (2.48)$$

Оценка (2.46) является несмещенной, состоятельной и распределена асимптотически при $N \rightarrow \infty$ нормально со средним (2.47) и дисперсией (2.48). Аналогичным свойством обладает оценка среднеквадратического отклонения $\hat{\sigma}_x(N) = \sqrt{\hat{D}_x(N)}$.

в) Оценка четвертого центрального момента СВ X при неизвестном ее математическом ожидании /2/

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_{4x}(N) &= \frac{N^2 - 2N + 3}{(N-1)(N-2)(N-3)} \sum_{n=1}^N (X_n - \hat{\mu}_{1x}(N))^4 = \\ &= \frac{3(2N-3)}{N(N-1)(N-2)(N-3)} \left[\sum_{n=1}^N (X_n - \hat{\mu}_{1x}(N))^2 \right]^2 = \end{aligned}$$

$$= \frac{(N^2 - 2N + 3)}{(N-1)(N-2)(N-3)} \left(C_{yx}(N) - \frac{4}{N} C_{3x}(N) C_{1x}(N) + \frac{6}{N^2} C_{2x}(N) C_{1x}^2(N) - \right. \\ \left. - \frac{3}{N^3} C_{1x}^3(N) - \frac{3(N-3)}{N(N-1)(N-2)(N-3)} (C_{2x}(N) - \frac{1}{N} C_{1x}^2(N))^2 \right) \quad (2.49)$$

Оценка (2.49) является несмещенной и состоятельной /2/.

г) Определим оценку дисперсий СВ Y и Z по выборочным значениям Y_n и Z_n , $n = \overline{1, N}$, полученным в N независимых опытах, при условии равенства их дисперсий $D_Y = D_Z = D$.

За оценку дисперсии D примем

$$\hat{\mu}_2(N) = \hat{D} = \frac{1}{2} (\hat{D}_Y(N) + \hat{D}_Z(N)), \quad (2.50)$$

где $\hat{D}_Y(N)$ и $\hat{D}_Z(N)$ - оценки дисперсий D_Y и D_Z , определяемые из соотношения вида (2.46).

Математическое ожидание оценки (2.50)

$$M_1 \hat{\mu}_2 = E \hat{\mu}_2(N) = D \quad (2.51)$$

Дисперсия оценки (2.50)

$$M_2 \hat{\mu}_2 = D_{\hat{D}} = \frac{1}{4} (D_{\hat{D}_Y} + D_{\hat{D}_Z}), \quad (2.52)$$

где $D_{\hat{D}_Y}$ и $D_{\hat{D}_Z}$ определяются из соотношения вида (2.49).

Оценка (2.50) является несмещенной, состоятельной и распределена асимптотически при $N \rightarrow \infty$ нормально со средним (2.51) и дисперсией (2.52).

2.2.2.2.2. Методы оценивания некоторых функций от моментов случайных величин.

В дальнейшем нам потребуются оценки ряда функций от случайных величин.

а) Определим оценку функции, равной среднеарифметическому математических ожиданий независимых СВ Y и Z ,

$$d_{1x} = \frac{1}{2} (d_{1y} + d_{1z}) \quad (2.53)$$

где d_{1Y} и d_{1Z} - математические ожидания СВ Y и Z ,
в виде

$$\hat{d}_{1X}(N) = \frac{1}{2} (\hat{d}_{1Y}(N) + \hat{d}_{1Z}(N)), \quad (2.54)$$

где $\hat{d}_{1Y}(N)$ и $\hat{d}_{1Z}(N)$ - оценки математических ожиданий СВ Y
и Z , определяемые из соотношения вида (2.43) при $k=1$.

Математическое ожидание оценки (2.54)

$$d_{1\hat{d}_{1X}} = E\hat{d}_{1X}(N) = \frac{1}{2} (d_{1Y} + d_{1Z}). \quad (2.55)$$

Дисперсия оценки (2.54)

$$\mu_{2\hat{d}_{1X}} = D\hat{d}_{1X} = \frac{1}{4N} (D_Y + D_Z), \quad (2.56)$$

где D_Y и D_Z - дисперсии СВ Y и Z .

Оценка (2.54) является несмещенной, состоятельной и распределена асимптотически при $N \rightarrow \infty$ нормально с математическим ожиданием (2.55) и дисперсией (2.56).

б) Определим оценки функции, равной разности математических ожиданий независимых случайных величин Y и Z ,

$$d_{1X} = d_{1Y} - d_{1Z}, \quad (2.57)$$

где d_{1Y} и d_{1Z} - математические ожидания СВ Y и Z , в виде

$$\hat{d}_{1X}(N) = \hat{d}_{1Y}(N) - \hat{d}_{1Z}(N), \quad (2.58)$$

где $\hat{d}_{1Y}(N)$ и $\hat{d}_{1Z}(N)$ - оценки математических ожиданий СВ Y
и Z , определяемые из соотношения вида (2.43) при $k=1$.

Математическое ожидание оценки (2.58)

$$d_{1\hat{d}_{1X}} = E\hat{d}_{1X}(N) = d_{1Y} - d_{1Z}. \quad (2.59)$$

Дисперсия оценки (2.58)

$$\mu_{2\hat{d}_{1X}} = D\hat{d}_{1X} = \frac{1}{N} (D_Y + D_Z) \quad (2.60)$$

Оценка (2.58) является несмещенной, состоятельной и распределена асимптотически при $N \rightarrow \infty$ нормально с математическим

ким ожиданием (2.59) и дисперсией (2.60).

Замечание. Поскольку все полученные в п.п.2.2.2.2.1 и 2.2.2.2.2 оценки выражаются через суммы (2.41), имеющие рекуррентное представление (2.42), то для их практического определения могут быть использованы рекуррентные методы. Их достоинство состоит в том, что нет необходимости запоминать в памяти ЭВМ все выборочные значения случайных величин, а достаточно только накапливать в соответствии с (2.42) и запоминать суммы вида (2.41).

2.2.2.2.3. Методы оценивания доверительных интервалов и доверительных вероятностей для статистик, распределенных асимптотически нормально.

Если $\hat{\Gamma}(N)$ есть некоторая асимптотически нормально распределенная точечная оценка параметра Γ , то /2/

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P \left\{ x_1 \leq \frac{\hat{\Gamma}(N) - \Gamma}{\sqrt{D_{\hat{\Gamma}}(N)}} \leq x_2 \right\} = F(x_2) - F(x_1) \quad (2.61)$$

где

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (2.62)$$

- функция распределения стандартной нормальной величины с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией;

$D_{\hat{\Gamma}}(N)$ - дисперсия оценки $\hat{\Gamma}(N)$.

Тогда при достаточно больших N

$$P \left\{ x_1 \leq \frac{\hat{\Gamma}(N) - \Gamma}{\sqrt{D_{\hat{\Gamma}}(N)}} \leq x_2 \right\} \approx F(x_2) - F(x_1) \quad (2.63)$$

Если задана допустимая погрешность Δ_{gr} оценивания параметра Γ , т.е. должно выполняться

$$|\hat{\Gamma}(N) - \Gamma| \leq \Delta_{gr} \quad (2.64)$$

и, следовательно, доверительный интервал для параметра Γ

$$I_{gr}(N) = [\hat{\Gamma}(N) - \Delta_{gr}, \hat{\Gamma}(N) + \Delta_{gr}], \quad (2.65)$$

то доверительная вероятность оценивания параметра Γ из (2.63)

$$\begin{aligned} P_{gr}(N) &= P\{\hat{\Gamma}(N) - \Delta_{gr} \leq \Gamma \leq \hat{\Gamma}(N) + \Delta_{gr}\} \approx \\ &\approx F\left(\frac{\Delta_{gr}}{\sqrt{D_{\hat{\Gamma}}(N)}}\right) - F\left(-\frac{\Delta_{gr}}{\sqrt{D_{\hat{\Gamma}}(N)}}\right), \end{aligned} \quad (2.66)$$

где $F(\)$ - определяется из (2.62).

Если задана допустимая относительная погрешность

$$\delta_{gr} = \frac{\Delta_{gr}}{|\Gamma|} \quad (2.67)$$

оценивания относительного значения параметра $\hat{\Gamma}/|\Gamma|$, т.е.

должно выполняться

$$\left| \frac{\hat{\Gamma}(N) - \Gamma}{\Gamma} \right| \leq \delta_{gr}, \quad (2.68)$$

и, следовательно, доверительный интервал для параметра Γ

$$I_{gro}(N) = [1 - \delta_{gr}, 1 + \delta_{gr}], \quad (2.69)$$

то доверительная вероятность оценивания относительного значения параметра Γ из (2.63)

$$\begin{aligned} P_{gro}(N) &= P\{1 - \delta_{gr} \leq \frac{\hat{\Gamma}(N)}{\Gamma} \leq 1 + \delta_{gr}\} \approx \\ &\approx F\left(\frac{\delta_{gr}|\Gamma|}{\sqrt{D_{\hat{\Gamma}}(N)}}\right) - F\left(-\frac{\delta_{gr}|\Gamma|}{\sqrt{D_{\hat{\Gamma}}(N)}}\right), \end{aligned} \quad (2.71)$$

где $F(\)$ - определяется из (2.62).

Если значения Γ и $D_{\hat{\Gamma}}(N)$ в (2.63)+(2.71) не известны,

то в приближенных расчетах их можно заменить на оценки $\hat{\Gamma}(N)$ и $\hat{D}_{\hat{\Gamma}}(N)$. При этом (2.66) и (2.71) примут вид

$$\begin{aligned} P_{gr}(N) &= P\{\hat{\Gamma}(N) - \Delta_{gr} \leq \Gamma \leq \hat{\Gamma}(N) + \Delta_{gr}\} \approx \\ &\approx F\left(\frac{\Delta_{gr}}{\sqrt{\hat{D}_{\hat{\Gamma}}(N)}}\right) - F\left(-\frac{\Delta_{gr}}{\sqrt{\hat{D}_{\hat{\Gamma}}(N)}}\right), \end{aligned} \quad (2.72)$$

$$P_{gr}(N) = P \left\{ 1 - \delta_{gr} \leq \frac{\hat{P}(N)}{P} \leq 1 + \delta_{gr} \right\} \approx$$

$$\approx F \left(\frac{\delta_{gr} |\hat{P}|}{\sqrt{D_{\hat{P}}(N)}} \right) - F \left(- \frac{\delta_{gr} |\hat{P}|}{\sqrt{D_{\hat{P}}(N)}} \right) \quad (2.73)$$

Использование соотношений (2.72), (2.73) становится правомерно при некотором числе опытов $N = N_{min}$, при котором можно считать распределение точечной оценки $\hat{P}(N)$ приближенно нормальным. Обычно полагают $N_{min} = 20+30$.

2.2.2.2.4. Методы проведения эксперимента по оцениванию вероятностных характеристик случайных величин.

Возможно два подхода к проведению экспериментального оценивания вероятностных характеристик случайных величин.

В первом случае число опытов N , т.е. число наблюдаемых реализаций случайной величины и допустимая точность оценивания заданы наперед. При этом доверительная вероятность оценивания определяется по завершению эксперимента.

Во втором случае заданы допустимая точность и доверительная вероятность оценивания. В процессе проведения эксперимента осуществляется последовательное оценивание доверительной вероятности, т.е. после каждого опыта или серии опытов определяется достигнутая доверительная вероятность. Эксперимент прекращается при таком наименьшем числе опытов N , при котором достигнутая доверительная вероятность станет равной или больше заданной.

2.2.2.3. Методы оценивания точностных характеристик при вероятностных концептуальных моделях по точности.

2.2.2.3.1. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса отсутствует или не учитывается.

Определяются следующие характеристики погрешности в статистике.

1. Оценка систематической погрешности, как оценка математического ожидания абсолютной погрешности $\Delta(V_{om})$, может быть найдена из (2.43) при $k=1$

$$\hat{\Delta}_c(V_{om}) = \hat{\Delta}_{свых}(V_{om}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{свых n}(V_{om}), \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad (2.74)$$

или

$$\hat{\Delta}_c(V_{om}) = \hat{\Delta}_{свх}(V_{om}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{свх n}(V_{om}), \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad (2.75)$$

где $\hat{\Delta}_{свых}(V_{om})$ и

$$\bar{\Delta}_{свых n}(V_{om}) = \tilde{W}_{mn} - f(V_{om}), \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad n = \bar{1}, \bar{N} \quad (2.76)$$

- оценки систематической погрешности по выходу и n -ой реализации погрешности по выходу;

$\hat{\Delta}_{свх}(V_{om})$ и

$$\bar{\Delta}_{свх n}(V_{om}) = \psi(\tilde{W}_{mn}) - V_{om}, \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad n = \bar{1}, \bar{N} \quad (2.77)$$

- оценки систематической погрешности по входу и n -ой реализации погрешности по выходу;

\tilde{W}_{mn} - измеренное значение n -й реализации отклика W_m .
Остальные обозначения аналогичны приведенным в (2.1) и (2.2).
Величины $f(V_{om})$ и $\psi(\tilde{W}_{mn})$ в (2.76) и (2.77) либо заранее известны, либо вычисляются.

2. Оценка предельной систематической погрешности

$$\hat{\Delta}_{сн} = \max |\hat{\Delta}_c(V_{om})|, \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad (2.78)$$

где $\hat{\Delta}_c(V_{om})$ определяется из (2.74) или (2.75).

3. Оценка относительной систематической погрешности

$$\hat{\delta}_c(V_{om}) = \hat{\delta}_{свых}(V_{om}), \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad (2.79)$$

или

$$\hat{\delta}_c(V_{om}) = \hat{\delta}_{свх}(V_{om}), \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad (2.80)$$

где

$$\hat{\sigma}_{c_{вых}}^2(V_{om}) = \frac{\hat{\Delta}_{c_{вых}}^2(V_{om})}{|f(V_{om})|}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.81)$$

- оценка относительной систематической погрешности по выходу;

$$\hat{\sigma}_{c_{вх}}^2(V_{om}) = \frac{\hat{\Delta}_{c_{вх}}^2(V_{om})}{V_{om}}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.82)$$

- оценка относительной систематической погрешности по входу.

Значения $\hat{\Delta}_{c_{вых}}^2(V_{om})$ и $\hat{\Delta}_{c_{вх}}^2(V_{om})$ в (2.81) и (2.82) определяются из (2.74) и (2.75), а $f(V_{om})$ либо заранее известны, либо вычисляются.

4. Оценка предельной относительной систематической погрешности

$$\hat{\sigma}_{ср}^2 = \frac{\max_m |\hat{\sigma}_c^2(V_{om})|}{m}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.83)$$

где $\hat{\sigma}_c^2(V_{om})$ - определяется из (2.81) или (2.82).

5. Оценка приведенной систематической погрешности

$$\hat{y}_c^2(V_{om}) = \hat{y}_{c_{вых}}^2(V_{om}), \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.84)$$

или

$$\hat{y}_c^2(V_{om}) = \hat{y}_{c_{вх}}^2(V_{om}), \quad m = \overline{1, M} \quad (2.85)$$

где

$$\hat{y}_{c_{вых}}^2(V_{om}) = \frac{\hat{\Delta}_{c_{вых}}^2(V_{om})}{C_{вых}}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.86)$$

- оценка приведенной систематической погрешности по выходу;

$$\hat{y}_{c_{вх}}^2(V_{om}) = \frac{\hat{\Delta}_{c_{вх}}^2(V_{om})}{C_{вх}}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.87)$$

- оценка приведенной систематической погрешности по входу;

$C_{вых}$ и $C_{вх}$ - некоторые нормирующие константы.

Значения $\hat{\Delta}_{c_{вых}}^2(V_{om})$ и $\hat{\Delta}_{c_{вх}}^2(V_{om})$ в (2.86) и (2.87) определяются из (2.74) и (2.75), а $C_{вых}$ и $C_{вх}$ задаются для каждого компонента.

6. Оценка предельной приведенной систематической погрешности

$$\hat{f}_{c\pi} = \max_m | \hat{f}_c(V_{om}) |, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.88)$$

где $\hat{f}_c(V_{om})$ определяется из (2.86) или (2.87).

7. Доверительные вероятности оценивания систематической погрешности из (2.72) и (2.73) и с учетом асимптотически нормального распределения ее оценок (2.74) и (2.75)

$$\begin{aligned} P_{gc}(N) &= P \{ \hat{\Delta}_c(V_{om}) - \Delta_{gc} \leq \Delta_c(V_{om}) \leq \hat{\Delta}_c(V_{om}) + \Delta_{gc} \} \approx \\ &\approx F \left(\frac{\Delta_{gc}}{\sqrt{\hat{\Delta}_c(N)}} \right) - F \left(- \frac{\Delta_{gc}}{\sqrt{\hat{\Delta}_c(N)}} \right), \quad m = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (2.89)$$

$$\begin{aligned} P_{gc}(N) &= P \{ 1 - \delta_{gc} \leq \frac{\hat{\Delta}_c(V_{om})}{\Delta_c(V_{om})} \leq 1 + \delta_{gc} \} \approx \\ &\approx F \left(\frac{\delta_{gc} | \hat{\Delta}_c(V_{om}) |}{\sqrt{\hat{\Delta}_c(N)}} \right) - F \left(- \frac{\delta_{gc} | \hat{\Delta}_c(V_{om}) |}{\sqrt{\hat{\Delta}_c(N)}} \right), \quad m = \overline{1, M}; \end{aligned} \quad (2.90)$$

где Δ_{gc} и δ_{gc} - допустимые погрешности оценивания систематической погрешности и ее относительного значения;

$\hat{\Delta}_c(N)$ - оценка дисперсии оценки систематической составляющей, которая может быть определена на основании (2.45) при $k=1$ путем замены α_{2x} и α_x на их оценки, т.е.

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_c(N) &= \hat{\Delta}_{свых}(N) = \\ &= \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{свых n}^2(V_{om}) - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{свых n}(V_{om}) \right)^2 \right], \quad m = \overline{1, M}; \end{aligned} \quad (2.91)$$

или

$$\begin{aligned} \hat{\Delta}_c(N) &= \hat{\Delta}_{свх}(N) = \\ &= \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{вх n}^2(V_{om}) - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{вх n}(V_{om}) \right)^2 \right], \quad m = \overline{1, M}; \end{aligned} \quad (2.92)$$

где $\tilde{\Delta}_{свых n}(V_{om})$ и $\tilde{\Delta}_{вх n}(V_{om})$ определяются из (2.76) и (2.77);

$\hat{\Delta}_{свых}(N)$ и $\hat{\Delta}_{свх}(N)$ - оценки дисперсий оценок систематических составляющих погрешности по выходу $\Delta_{свых}(V_{om})$ и

по входу $\Delta_{свх} (Var)$.

8. Оценка среднеквадратического отклонения (СКО) случайной составляющей $\hat{\Delta} (Var) = \Delta (Var) - E\Delta (Var)$ погрешности $\Delta (Var)$ может быть найдена из (2.46)

$$\hat{\sigma}^2 (Var) = \hat{\sigma}_{свх}^2 (Var) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\hat{\Delta}_{свх n} (Var) - \hat{\Delta}_{свх} (Var))^2}, \quad m = \overline{1, N}, \quad (2.93)$$

или

$$\hat{\sigma}^2 (Var) = \hat{\sigma}_{вх}^2 (Var) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (\hat{\Delta}_{вх n} (Var) - \hat{\Delta}_{свх} (Var))^2}, \quad m = \overline{1, N}, \quad (2.94)$$

где $\hat{\sigma}_{свх}^2 (Var)$ и $\hat{\sigma}_{вх}^2 (Var)$ - оценки СКО случайных составляющих погрешностей по выводу $\hat{\Delta}_{свх} (Var)$ и по входу $\hat{\Delta}_{вх} (Var)$; $\hat{\Delta}_{свх n} (Var)$, $\hat{\Delta}_{свх} (Var)$, $\hat{\Delta}_{вх n} (Var)$, $\hat{\Delta}_{свх} (Var)$ определяются из (2.76), (2.74), (2.77), (2.75).

9. Оценка предельной СКО случайной составляющей погрешности

$$\hat{\sigma}_n = \max_m |\hat{\sigma}^2 (Var)|, \quad m = \overline{1, N}, \quad (2.95)$$

где $\hat{\sigma}^2 (Var)$ - определяется из (2.93) или (2.94).

Оценим относительного $\hat{\sigma}_\sigma (Var)$ и приведенного $\hat{\chi}_\sigma (Var)$ СКО случайной составляющей погрешности и их предельные значения $\hat{\sigma}_{\sigma n}$ и $\hat{\chi}_{\sigma n}$ определяются из соотношений аналогичных (2.79)+(2.88).

10. Доверительные вероятности оценивания СКО случайной составляющей погрешности из (2.72) и (2.73) и с учетом асимптотически нормального распределения оценок (2.93) и (2.94)

$$P_{g\sigma} (N) = P \{ \hat{\sigma}^2 (Var) - \Delta_{g\sigma} \leq \sigma^2 (Var) \leq \hat{\sigma}^2 (Var) + \Delta_{g\sigma} \} = F \left(\frac{\hat{\sigma}^2 (Var) - \max\{0, \hat{\sigma}^2 (Var) - \Delta_{g\sigma}\}}{\sqrt{D_{\hat{\sigma}^2} (N)}} \right) - F \left(\frac{-2 \hat{\sigma}^2 (Var) \Delta_{g\sigma} - \Delta_{g\sigma}^2}{\sqrt{D_{\hat{\sigma}^2} (N)}} \right), \quad (2.96)$$

$$P_{g\sigma}(N) = P\{1 - \delta_{g\sigma} \leq \frac{\hat{\sigma}^2(Vom)}{\sigma^2(Vom)} \leq 1 + \delta_{g\sigma}\} \approx \\ \approx F\left(\frac{(12\delta_{g\sigma} + \delta_{g\sigma}^2)\hat{\sigma}^2(N)}{\sqrt{\hat{\Delta}_g(N)}}\right) - F\left(\frac{(\max\{0, 1 - \delta_{g\sigma}\} - 1)\hat{\sigma}^2(N)}{\sqrt{\hat{\Delta}_g(N)}}\right), \quad (2.97)$$

где $\Delta_{g\sigma}$ и $\delta_{g\sigma}$ - допустимые погрешности оценивания СКО и ее относительного значения;

$\hat{\Delta}_g(N)$ - оценка дисперсии оценки дисперсии случайной составляющей погрешности, которая может быть определена на основании (2.48) путем замены μ_{1x} и μ_{2x} на их оценки.

2.2.2.3.2. Методы оценивания точностных характеристик в случае, когда явление гистерезиса учитывается.

Определяются следующие характеристики погрешности в статье.

I. Оценка систематической погрешности, как оценка математического ожидания систематической погрешности $\Delta_c(Vom)$, может быть найдена на основании (2.43) при $k=1$

$$\hat{\Delta}_c(Vom) = \hat{\Delta}_{cвых}(Vom) = \quad (2.98)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{выхn}^M(Vom) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{выхn}^B(Vom) \right), \quad m = \overline{1, M};$$

или

$$\hat{\Delta}_c(Vom) = \hat{\Delta}_{cвх}(Vom) = \quad (2.99)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{вхn}^M(Vom) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{вхn}^B(Vom) \right), \quad m = \overline{1, M};$$

где $\hat{\Delta}_{cвых}(Vom)$,

$$\hat{\Delta}_{выхn}^M(Vom) = \tilde{W}_{mn}^M - f(Vom), \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}; \quad (2.100)$$

$$\hat{\Delta}_{выхn}^B(Vom) = \tilde{W}_{mn}^B - f(Vom), \quad m = \overline{1, M}, \quad n = \overline{1, N}, \quad (2.101)$$

- оценки систематической погрешности по выходу и n -х реал-

заций погрешностей по выходу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны меньших и больших значений;

$$\hat{\Delta}_{свх} (V_{om}),$$

$$\hat{\Delta}_{свх n}^M (V_{om}) = \varphi(\tilde{W}_{mn}^M) - V_{om}, \quad m = \bar{1}, \bar{M}, \quad n = \bar{1}, \bar{N}, \quad (2.102)$$

$$\hat{\Delta}_{свх n}^S (V_{om}) = \varphi(\tilde{W}_{mn}^S) - V_{om}, \quad m = \bar{1}, \bar{N}, \quad n = \bar{1}, \bar{N}, \quad (2.103)$$

- оценки систематической погрешности по входу и n -х реализаций погрешностей по выходу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны меньших и больших значений;

\tilde{W}_{mn}^M и \tilde{W}_{mn}^S - измеренные значения n -х реализаций отклонков W_m^M и W_m^S при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны меньших и больших значений;

$f(\)$ и $\varphi(\)$ имеют тот же смысл, что и в (2.20)+(2.23).

Оценки предельной систематической погрешности, относительной и приведенной систематической погрешности и их предельных значений могут быть найдены из (2.78)+(2.88), где $\hat{\Delta}_c(V_{om})$ определяется из (2.98) или (2.99).

2. Доверительные вероятности оценивания систематической погрешности из (2.72) и (2.73) и с учетом асимптотически нормального распределения оценок (2.98) и (2.99) определяются из (2.89) и (2.90), где оценка $\hat{D}_c(N)$ дисперсии оценки систематической составляющей в соответствии с (2.56) и (2.45) равна

$$\hat{D}_c(N) = \hat{D}_{свх}(N) =$$

$$= \frac{1}{4N} \left\{ \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{\Delta}_{свх n}^M(V_{om}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{свх n}^M(V_{om}) \right)^2 \right] + \right. \quad (2.104)$$

$$\left. + \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{\Delta}_{свх n}^S(V_{om}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{свх n}^S(V_{om}) \right)^2 \right] \right\}$$

ИЛИ

$$\begin{aligned} \hat{D}_c(N) &= \hat{D}_{c_{\text{вх}}}(N) = \\ &= \frac{1}{4N} \left\{ \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^M(\text{Vom}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^M(\text{Vom}) \right)^2 \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^E(\text{Vom}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^E(\text{Vom}) \right)^2 \right] \right\}, \end{aligned} \quad (2.105)$$

где $\hat{D}_{c_{\text{вх}}}(N)$ и $\hat{D}_{c_{\text{вх}}}(N)$ - оценки дисперсии оценок систематических составляющих по выходу (2.98) и входу (2.99);

$\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^M(\text{Vom})$, $\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^E(\text{Vom})$, $\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^M(\text{Vom})$, $\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^E(\text{Vom})$ имеют тот же смысл, что и в (2.98) и (2.99).

3. СКО случайных составляющих

$$\hat{\Delta}^M(\text{Vom}) = \Delta^M(\text{Vom}) - E\Delta^M(\text{Vom}), \quad (2.106)$$

$$\hat{\Delta}^E(\text{Vom}) = \Delta^E(\text{Vom}) - E\Delta^E(\text{Vom}), \quad (2.107)$$

погрешностей $\Delta^M(\text{Vom})$ и $\Delta^E(\text{Vom})$ полагаются равными. Поэтому оценка СКО может быть получена из (2.50)

$$\hat{\sigma}(\text{Vom}) = \hat{\sigma}_{\text{вх}}(\text{Vom}) = \sqrt{\frac{1}{2} (\hat{D}_{\text{вх}}^M(N) + \hat{D}_{\text{вх}}^E(N))}, \quad (2.108)$$

или

$$\hat{\sigma}(\text{Vom}) = \hat{\sigma}_{\text{вх}}(\text{Vom}) = \sqrt{\frac{1}{2} (\hat{D}_{\text{вх}}^M(N) + \hat{D}_{\text{вх}}^E(N))}, \quad (2.109)$$

где

$$\hat{D}_{\text{вх}}^M(N) = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^M(\text{Vom}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^M(\text{Vom}) \right)^2 \right] \quad (2.110)$$

- оценка дисперсии случайной составляющей (2.106) погрешности по выходу при медленных изменяемых воздействиях Vom со стороны меньших значений;

$$\hat{D}_{\text{вх}}^E(N) = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^E(\text{Vom}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \tilde{\Delta}_{\text{вх}n}^E(\text{Vom}) \right)^2 \right] \quad (2.111)$$

- оценка дисперсии случайной составляющей (2.107) погрешности

по выходу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны больших значений;

$$\hat{D}_{\Delta x}^M(N) = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\bar{\Delta}_{\Delta x n}^M(V_{om}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{\Delta x n}^M(V_{om}) \right)^2 \right] \quad (2.II2)$$

- оценка дисперсии случайной составляющей (2.I06) погрешности по входу при медленных изменениях воздействия V_{om} со стороны меньших значений;

$$\hat{D}_{\Delta x}^S(N) = \frac{1}{N} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\bar{\Delta}_{\Delta x n}^S(V_{om}))^2 - \left(\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{\Delta x n}^S(V_{om}) \right)^2 \right] \quad (2.II3)$$

- оценка дисперсии случайной составляющей (2.I07) погрешности по входу при медленных изменениях воздействий V_{om} со стороны больших значений;

$\bar{\Delta}_{\Delta x n}^M(V_{om})$, $\bar{\Delta}_{\Delta x n}^S(V_{om})$, $\bar{\Delta}_{\Delta x n}^M(V_{om})$, $\bar{\Delta}_{\Delta x n}^S(V_{om})$
определяются из (2.I00)+(2.I03).

Оценки предельного СКО $\hat{\sigma}_n^2$, относительного $\hat{\sigma}_\sigma(V_{om})$ и приведенного $\hat{y}_\sigma(V_{om})$ СКО и их предельные значения $\hat{\sigma}_{en}$ и \hat{y}_{en} определяются из соотношений аналогичных (2.78)+(2.88).

4. Доверительные вероятности оценивания СКО случайных составляющих (2.I06) и (2.I07) из (2.72) и (2.73) и с учетом асимптотически нормального распределения оценок (2.I06) и (2.I07) определяются из (2.96) и (2.97), где оценка $\hat{D}_z(N)$ дисперсии оценки СКО определяется из (2.52) с учетом изменения воздействия V_{om} со стороны меньших и больших значений.

5. Оценка вариации из (2.58) и (2.43) при $k=1$

$$\begin{aligned} \hat{H}(V_{om}) &= \hat{H}_{\Delta x}(V_{om}) = |\hat{H}_{\Delta x}(V_{om})| = \\ &= \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{\Delta x n}^M(V_{om}) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \bar{\Delta}_{\Delta x n}^S(V_{om}) \right|, \quad m = \bar{m}_1 \end{aligned} \quad (2.II4)$$

$$\begin{aligned} \text{или } \hat{H}(V_{om}) &= \hat{H}_{\Delta k}(V_{om}) = |\hat{H}_{\Delta k}(V_{om})| = \\ &= \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{\Delta k n}^M(V_{om}) - \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{\Delta k n}^S(V_{om}) \right|, \quad m = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (2.II5)$$

где $\hat{H}_{\Delta k n}^M(V_{om})$ и $\hat{H}_{\Delta k n}^S(V_{om})$ - оценки вариации по выходу и входу;

$\hat{\Delta}_{\Delta k n}^M(V_{om})$, $\hat{\Delta}_{\Delta k n}^S(V_{om})$, $\hat{\Delta}_{\Delta k n}^M(V_{om})$, $\hat{\Delta}_{\Delta k n}^S(V_{om})$ определяются из (2.I00)+(2.I03).

6. Дозерительные вероятности оценивания вариации (без учета модуля) из (2.72) и (2.73) и с учетом асимптотически нормального распределения оценок $\hat{H}_{\Delta k n}(V_{om})$ и $\hat{H}_{\Delta k}(V_{om})$ в (2.II4) и (2.II5)

$$\begin{aligned} P_{gk}(N) &= \left\{ \hat{H}(V_{om}) - \Delta_{gk} \leq h(V_{om}) \leq \hat{H}(V_{om}) + \Delta_{gk} \right\} \approx \\ &\approx F\left(\frac{\Delta_{gk}}{\sqrt{\hat{D}_h(N)}}\right) - F\left(-\frac{\Delta_{gk}}{\sqrt{\hat{D}_h(N)}}\right), \end{aligned} \quad (2.II6)$$

$$\begin{aligned} P_{gko}(N) &= P\left\{ 1 - \delta_{gk} \leq \frac{\hat{H}(V_{om})}{h(V_{om})} \leq 1 + \delta_{gk} \right\} \approx \\ &\approx F\left(\frac{\delta_{gk} |\hat{H}(V_{om})|}{\sqrt{\hat{D}_h(N)}}\right) - F\left(-\frac{\delta_{gk} |\hat{H}(V_{om})|}{\sqrt{\hat{D}_h(N)}}\right) \end{aligned} \quad (2.II7)$$

где Δ_{gk} и δ_{gk} - допустимые погрешности оценивания величины $h(V_{om})$ и ее относительного значения;

$\hat{D}_h(N) = 4\hat{D}_c(N)$ - дисперсия оценки $\hat{H}(V_{om})$;

$\hat{D}_c(N)$ определяется из (2.I04) или (2.I05).

2.2.3. Методы измерений динамических параметров. В лабораторных работах СИО применяется для прямых, косвенных и совокупных измерений времени выполнения различных ПРК. При этом дополнительно никакие другие характеристики времен выполнения не оцениваются (см. Таблицу I).

Введем два состояния исследуемого ПРК :

S_1 - ПРК выполняется;

S_0 - ПРК не выполняется.

Тогда, в соответствии с п.1.2 задача измерения времен выполнения ПРК сводится к измерению длительностей интервалов состояний.

Рассмотрим применяемый в СИО метод измерения длительностей интервалов состояний на примере одного измерительного канала, т.е. когда измерения проводятся для одного компонента. В общем случае СИО обеспечивает многоканальные измерения.

В СИО используется событийный интервальный метод измерений (см.п.1.2.1). Пусть требуется измерить длительность T_{ic} интервала состояния S_i (см.Рис.6). Для этого формируется интервал наблюдения, на котором выполняется ПРК. Отклик W_m компонента представлен в форме, позволяющей получить информацию о состоянии $S_k, k=0,1$, компонента. Эта информация представлена кодами $K_k = k, k=0,1$, событий $\theta_{kc}, k=0,1$. По кодам событий формируется сигнал состояния $Z_k(t)$, который в СИО представлен в форме напряжения $U_k(t)$, причем $K_0 = 0$ соответствует уровень логического нуля напряжения, а $K_1 = 1$ - уровень логической единицы. Для измерения длительности T_{zkc} сигнала состояния используется метод последовательного счета, при котором подсчитывается число N импульсов тактового генератора на измеряемом интервале. Измеренное значение длительности T_{ic} интервала состояния

$$\tilde{T}_{ic} = N\theta, \quad (2.II8)$$

где θ - период тактового генератора.

Из Рис.6 видно, что:

- погрешность формирования сигнала состояния (инструментальная составляющая погрешности измерения величины T_{ic})

$$\Delta_S = T_{zkc} - T_{ic} = \Delta_1 + \Delta_2 > 0, \quad (2.II9)$$

- погрешность измерения длительности сигнала состояния (методическая составляющая погрешности измерения величины T_{ic})

Метод измерений длительностей интервалов состояний



Рис. 6

$$\Delta_6 = \tilde{T}'_{ic} - T_{zic} = \Delta_3 - \Delta_4 \quad (2.120)$$

- погрешность измерения длительности интервала состояния (длительности T_{ic} интервала выполнения ПРК)

$$\Delta' = \tilde{T}'_{ic} - T_{ic} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 - \Delta_4 \quad (2.121)$$

В (2.118)+(2.121) Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 и Δ_4 положительно определенные величины. Если пренебречь нестабильностью времен формирования кодов событий K_k , $k=0,1$, то составляющие погрешности Δ_1 , Δ_2 и Δ_5 будут постоянные. Т.о. составляющие Δ_1 , Δ_2 и Δ_5 носят систематический характер. Составляющие Δ_3 , Δ_4 и Δ_6 являются случайными, поскольку тактовый генератор не синхронизирован с измеряемым временным интервалом.

Для уменьшения систематической составляющей погрешности Δ_5 используется следующий прием (см.Рис.7). Осуществляется последовательное формирование кодов событий K_k , $k=0,1$, а затем - соответствующего сигнала состояния $Z_k(t)$. Производится измерение длительности сигнала состояния методом последовательного счета. В результат измерения (2.118) вносится поправка, равная измеренному значению $\tilde{\Delta}_5$ длительности сигнала состояния Δ_5 , т.е. окончательный результат измерения

$$\tilde{T}_{ic} = \tilde{T}'_{ic} - \tilde{\Delta}_5 \quad (2.122)$$

имеет погрешность

$$\Delta = \tilde{T}_{ic} - T_{ic} = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 - \Delta_4 - \tilde{\Delta}_5 = \Delta_5 + \Delta_6 - \tilde{\Delta}_5 < \Delta' \quad (2.123)$$

Функциональная схема измерений длительностей интервалов состояний, по одному каналу приведена на Рис.8. Селекция событий e_{ic} , $e_{o(k+1)}$ осуществляется программно процедурой вывода кодов событий K_k , $k=0,1$ на асинхронный триггер T_z , используемый для формирования сигнала состояния $Z(t)$ исследуемого компонента. Сигнал состояния формируется на выходе триггера в виде

Формирование сигнала состояния
при измерении составляющей погрешности

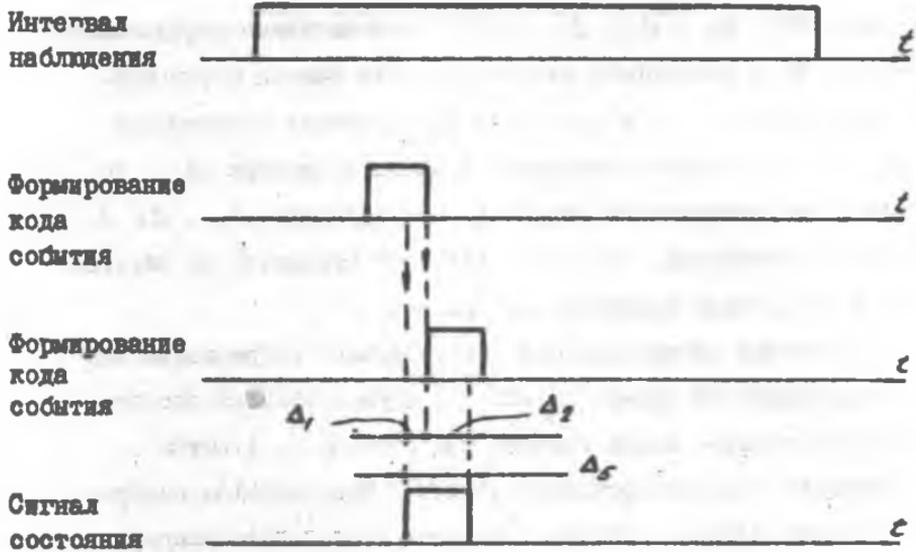


Рис. 7

Функциональная схема измерений длительностей интервалов выполнения программных компонентов

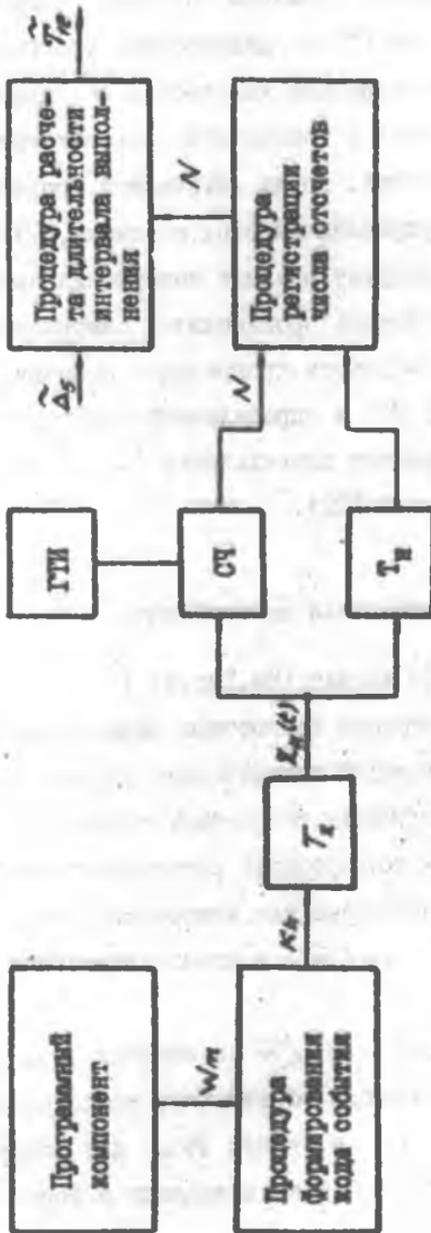


Рис. 8

двухуровневого сигнала напряжения $U_R(t)$, $k=0,1$. Измерение длительности T_{2AC} сигнала состояния методом последовательного счета осуществляется двоичным счетчиком импульсов СЧ, генератором тактовых импульсов ГТИ и асинхронным триггером T_N . Счетчик используется для подсчета количества N импульсов, поступающих на его счетный вход с генератора тактовых импульсов. Подсчет осуществляется в случае, когда логический уровень сигнала состояния, подаваемого на управляющий вход счетчика, $U_R(t)=1$. Асинхронный триггер T_N формирует признак завершения интервала наблюдения, при появлении которого производится считывание числа N зарегистрированных импульсов программной процедурой регистрации. По найденному числу N и определенной предварительно величине $\bar{\Delta}_c$ осуществляется расчет длительности \bar{T}_c интервала выполнения ПРК в соответствии с (2.122).

2.3. Функциональная организация

В состав СИО входят (см.Рис.9) :

- подсистема измерений точностных параметров (ПСИТП);
- подсистема измерений динамических параметров (ПСИДИ);
- подсистема оценивания точностных характеристик (ПСОТХ);
- подсистема протоколирования результатов эксперимента (ПСП).

ПСИТП предназначена для измерений (см.п.2.2.1) :

- отклика W_m , $m = \overline{1, N}$, в случае применения метода образцового источника;
- воздействия V_m , $m = \overline{1, N}$ и отклика W_m , $m = \overline{1, N}$, в случае применения метода образцового компонента.

Воздействие V_m и отклик W_m для исследуемых в лабораторных работах ПРК и ПАК представлены в форме :

- сигналов напряжения,

Функциональная схема системы измерения и оценивания характеристик АСНУ и их компонентов

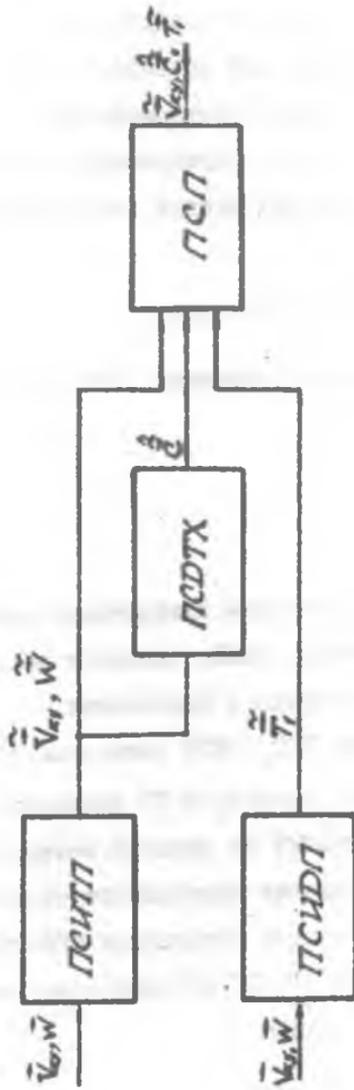


Рис. 9

- данных в виде целых и вещественных чисел.

ПСИДЦ предназначена для измерений времен выполнения ПРК событийным интервальным методом (см. п.2.2.3).

ПСОТХ предназначена для оценивания точностных характеристик ПРК и ПАК в соответствии с соотношениями, приведенными в п.2.2.2.

ПСЦ предназначена для формирования и вывода протоколов экспериментов в требуемой для каждой лабораторной работы форме.

2.4. Техническое обеспечение

Комплекс технических средств (КТС) СИО включает :

- КТС ПСИП;
- КТС ПСИДЦ;
- КТС ПСОТХ;
- КТС ПСЦ.

СИО реализована на базе измерительно-вычислительного комплекса ИВК-2 и аппаратуры КАМАК. Основные характеристики применяемых КАМАК-модулей приведены в Приложении.

Структурная схема КТС ПСИП приведена на Рис.10. Цифровой программно-управляемый авометр Ф-30 применяется в режиме измерения статических напряжений на пределе измерения 10 В. Управление авометром Ф-30 и считывание измеренного значения напряжения осуществляется через модуль управления МУФ-30М.

Структурная схема КТС ПСИДЦ приведена на Рис.11. КТС включает следующие модули КАМАК :

- выходной регистр 350;
- генератор импульсов 730 А;
- счетверенный двоичный счетчик 401;
- регистр прерываний 303.

Триггеры выходного регистра 350 выполняют функции триггера

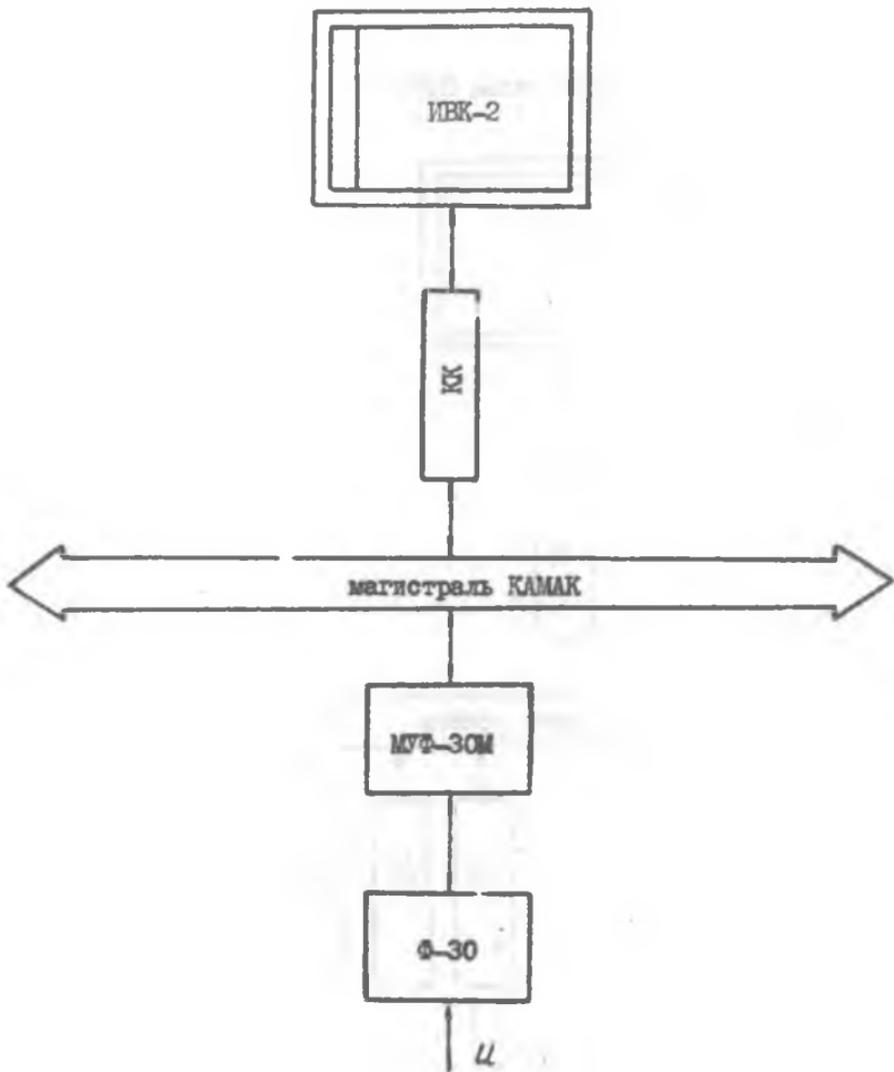


Рис. 10

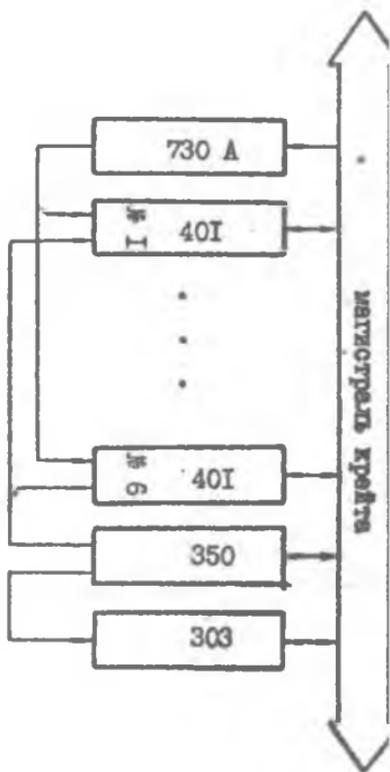
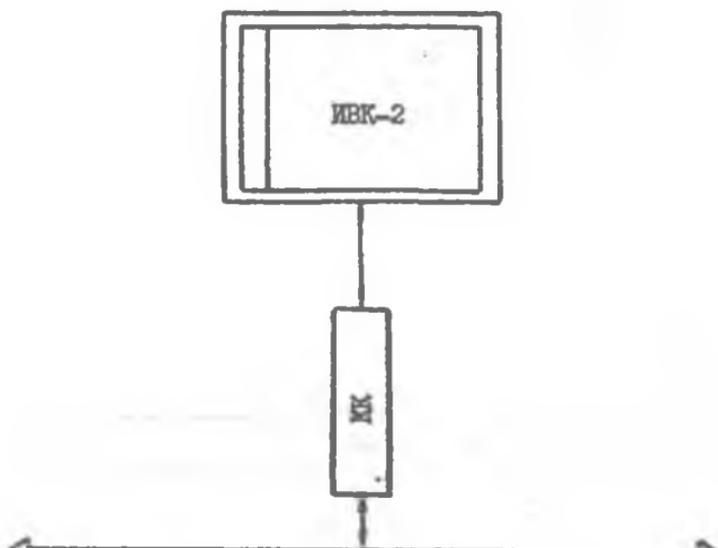


Рис. II

Структурная схема ПСИДП



T_z (см. Рис.8). При этом сигнал состояния $Z(t)$ по каждому измерительному каналу формируется одновременно на выходах двух триггеров. Выходной сигнал первого триггера подается на управляющий вход *INHIBIT* одного из счетчиков модуля 401, а выходной сигнал второго триггера — на вход соответствующего триггера модуля 303. Это сделано с целью исключения шунтирующего влияния входных интегрирующих цепей модуля 303 на вход счетчика 401. На счетный вход *INPUT* каждого счетчика модуля 401 подаются тактовые импульсы генератора 730А с частотой $1/\theta$. Триггеры модуля 303 выполняют функции триггера T_N .

Число измерительных каналов ПСИДЦ определяется числом триггеров модулей 350 и 303 и числом модулей 401. Если использовать по одному модулю 350 и 303 и шесть модулей 401, то возможно измерение времен выполнения ПРК по 24 каналам.

КТС ПСОТХ и ПСП включает ИБК-2 без аппаратуры КАМАК (см. Рис.6 /I/).

2.5. Программное обеспечение

Программное обеспечение СИД состоит из ПО четырех подсистем: ПСИДЦ, ПСИТЦ, ПСОТХ и ПСП.

ПО ПСИДЦ осуществляет выбор и вывод кодовых слов K_A на соответствующие триггеры выходного регистра 305 в моменты наступления событий e_{Ac} . По завершении измерений ПО ПСИДЦ осуществляет регистрацию в буфер содержимого N счетчиков 401, определение по ним времен выполнения ПРК в соответствии с (2.122) и приведение модулей КАМАК подсистемы в исходное состояние.

ПО ПСИТЦ осуществляет управление цифровым авометром Ф-30 через модуль МУФ-30М. Управление прибором Ф-30 состоит в запуске преобразования измеряемого напряжения U , ожидании завершения

преобразования и считывании цифрового значения измеренного напряжения.

ПО ПСОТХ осуществляет оценивание характеристик исследуемого компонента в соответствии с методами, приведенными в п.2.2.2.

ПО ПСП осуществляет вывод результатов эксперимента в заданной для каждой лабораторной работе форме.

2.6. Информационное обеспечение

СИО собственной базы данных не имеет и использует базу данных системы управления и диалогового взаимодействия, которая обеспечивает ввод, хранение и передачу исходных данных соответствующим программным модулям, а также обмен данными между ними.

Входными данными подсистем ПСИДЦ и ПСИТЦ являются :

1. Адреса используемых модулей КАМАК :

- регистра управления и состояния кредит-контроллера КК;
- модуля 350 (с нулевым субадресом и субадресом соответствующего выходного регистра);
- модуля 40I (с нулевым субадресом и субадресом или субадресами соответствующего счетчика или счетчиков);
- модуля 303 (с нулевым субадресом);
- модуля МУФ-30М (с нулевым субадресом);
- коды признаков завершения интервала наблюдения модуля 303;

2. Период θ генератора тактовых импульсов 703А.

3. Воздействия \vec{V} и отклики \vec{W} (см.Рис.9).

Выходными данными ПСИТЦ и ПСИДЦ являются измеренные значения \vec{V}_m , \vec{W}_m и \vec{T}_{re} воздействий, откликов и длительностей интервалов состояний, которые в свою очередь представляют собой выходные данные для ПСОТХ и ПСП.

Входными данными ПСОТХ также являются :

- параметры номинальной функции преобразования $f(x)$ исследуемого компонента;
- допустимые погрешности оценивания точностных характеристик;
- доверительные вероятности оценивания точностных характеристик;
- предельное число опытов и шаг увеличения числа опытов.

Выходными данными ПСОТХ являются оценки $\hat{C}_{\text{т.н.}}$ точностных характеристик, которые в свою очередь представляют собой входные данные для ПСП.

Выходными данными ПСП являются полученные оценки характеристик и исходная информация, определяющая конкретный эксперимент.

2.7. Метрологическое обеспечение

Определим предельные значения абсолютных погрешностей измерений и оценивания подсистем СИО.

2.7.1. Метрологические характеристики подсистемы измерений точностных параметров.

2.7.1.1. Метрологические характеристики при измерении значений напряжений.

В форме статических напряжений представлены отклики W_m , $m = \overline{1, M}$ ПАК. Измерение напряжений осуществляется цифровым авометром Ф-30 на пределе измерений 10 В, для которого погрешность измерений $\delta/3$

$$\delta(u_m) = [0,06 + 0,02 \left(\frac{10}{u_m} - 1 \right)] \% , \quad m = \overline{1, M} , \quad (2.124)$$

где u_m - показание прибора в вольтах.

При этом выходное сопротивление измеряемой цепи должно быть не более 1 мОм. Из (2.124) абсолютная погрешность

$$\begin{aligned} \Delta(u_m) &= \delta(u_m) \cdot u_m / 100 = \\ &= [0,06 u_m + 0,02(10 - u_m)] / 100 = (0,002 + 0,0004 u_m) \text{ В} , \quad m = \overline{1, M} , \end{aligned} \quad (2.125)$$

Предельное значение абсолютной погрешности достигается при $U = 10 \text{ В}$ и равно

$$\Delta_n = \max_m \Delta(U_m) = 0,006 \text{ в} , m = 1, \overline{M} . \quad (2.126)$$

2.7.1.2. Метрологические характеристики при измерении значений цифровых данных. В форме целых и вещественных чисел представлены воздействия V_m , $m = 1, \overline{M}$ и отклики W_m , $m = 1, \overline{M}$, при исследовании ПРК и ПАК.

Как отмечалось в п.2.2.1 погрешность измерений цифровых данных отсутствует, т.е.

$$\Delta_n = 0 \quad (2.127)$$

2.7.2. Метрологические характеристики подсистемы измерений динамических параметров. Из (2.123) абсолютная погрешность измерений времен выполнения ПРК

$$\Delta = \Delta_S + \Delta_C - \overline{\Delta}_S \quad (2.128)$$

Величины $\Delta_S - \overline{\Delta}_S$ и Δ_C представляют собой методические погрешности измерений длительностей Δ_S и $T_{\text{вкл}}$ временных интервалов методом последовательного счета (см.Рис.6 и 7). Следовательно, если при измерении Δ_S и $T_{\text{вкл}}$ частота генератора тактовых импульсов одна и та же и равна $1/\theta$, то предельные погрешности измерений в обоих случаях одинаковы. Тогда из (2.128) предельное значение абсолютной погрешности измерений времен выполнения ПРК

$$\Delta_n = \max \Delta = 2 \Delta_{\text{сн}} = 2 \max |\Delta_S - \Delta_C| = 2\theta , \quad (2.129)$$

где $\Delta_{\text{сн}}$ - предельное значение погрешности Δ_C , определяемой из (2.120); θ - период генератора тактовых импульсов T_{30A} .

При выводе выражения (1.129) учтено, что $0 \leq \Delta_S < \theta$ и $0 \leq \Delta_C < \theta$.

2.7.3. Метрологические характеристики подсистемы оценивания точностных характеристик. Погрешность оценивания произвольной характеристики $C(W)$ компонента

$$\begin{aligned} \Delta_c(W_m) &= \hat{C}(\tilde{W}_m) - C(W_m) = \\ &= \hat{C}(W_m + \Delta_w(W_m)) - \hat{C}(W_m) + \hat{C}(W_m) - \hat{C}(W_m) + \hat{C}(W_m) - C(W_m) = (2.130) \\ &= \tilde{f}_c(W_m + \Delta_w(W_m)) - \tilde{f}_c(W_m) + \tilde{f}_c(W_m) - f_c(W_m) + f_c(W_m) - C(W_m) = \\ &= \Delta_{TC}(W_m) + \Delta_{IC}(W_m) + \Delta_{NC}(W_m), \quad m = \overline{1, M}, \end{aligned}$$

где W_m и \tilde{W}_m - истинное и измеренное значения отклика компонента;

$\Delta_w(W_m)$ - погрешность измерения отклика W_m ;

$C(W_m)$ - истинное значение оцениваемой характеристики;

$\hat{C}(\tilde{W}_m)$ и $\tilde{C}(W_m)$ - оценка характеристики $C(W_m)$, полученные на основании реальных \tilde{W}_m и абсолютно точных W_m результатов измерений отклика W_m компонента при неидеальной реализации метода оценивания;

$\tilde{C}(W_m)$ - оценка характеристики $C(W_m)$, полученная на основании абсолютно точных результатов W_m измерений отклика W_m компонента при идеальной реализации метода оценивания;

$f_c(\)$ и $\tilde{f}_c(\)$ - номинальное и истинное преобразования ЦОТХ при оценивании характеристики $C(W_m)$;

$$\Delta_{TC}(W_m) = \tilde{f}_c(W_m + \Delta_w(W_m)) - \tilde{f}_c(W_m), \quad \Delta_{IC}(W_m) = \tilde{f}_c(W_m) - f_c(W_m),$$

$\Delta_{NC}(W_m) = f_c(W_m) - C(W_m)$ - трансформированная, инструментальная и методическая составляющие погрешности $\Delta_c(W_m)$.

В ЦОТХ вычисление всех характеристик компонентов осуществляется с двойной точностью. При этом инструментальной составляющей $\Delta_{NC}(W_m)$ можно пренебречь и (2.130) примет вид

$$\Delta_c(W_m) = \Delta_{TC}(W_m) + \Delta_{IC}(W_m), \quad m = \overline{1, M}. \quad (2.131)$$

При детерминированных концептуальных моделях компонентов по точности специальные процедуры формирования оценок точностных характеристик отсутствуют, поскольку оценивание производится в прямом соответствии с определениями характеристик (см. п.2.2.2.1). Тогда $\Delta_{mc}(W_m) = 0$ и (2.131) примет вид

$$\Delta_c(W_m) = \Delta_{rc}(W_m), \quad m = \overline{1, N}. \quad (2.132)$$

Пример 2.1. Погрешность оценивания абсолютной погрешности по выходу (2.3) из (2.132)

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta_{вых}}(V_{om}) &= \bar{\Delta}_{\Delta_{вых}}(V_{om}) - \Delta_{\Delta_{вых}}(V_{om}) = \\ &= \tilde{W}_m - W_m = \Delta(V_{om}), \quad m = \overline{1, N}; \end{aligned} \quad (2.133)$$

где \tilde{W}_m и W_m - измеренное и истинное значение отклика W_m компонента;

$\Delta(V_{om})$ - погрешность измерения отклика W_m .

Предельное значение погрешности оценивания абсолютной погрешности по выходу (2.3)

$$\begin{aligned} \Delta_{\Delta_{вых}n} &= \max_m \Delta_{\Delta_{вых}}(V_{om}) = \max_m \Delta(V_{om}) = \\ &= \Delta_n, \quad m = \overline{1, N}; \end{aligned} \quad (2.134)$$

где Δ_n - предельное значение погрешности измерения отклика W_m .

Пример 2.2. Погрешность оценивания систематической погрешности по выходу (2.98) из (2.131)

$$\Delta_{\Delta_{свех}}(V_{om}) = \Delta_{\Gamma\Delta_{свех}}(V_{om}) + \Delta_{N\Delta_{свех}}(V_{om}), \quad (2.135)$$

где $\Delta_{\Gamma\Delta_{свех}}(V_{om})$ и $\Delta_{N\Delta_{свех}}(V_{om})$ - трансформированная и методическая составляющие погрешности оценивания.

$$\begin{aligned}
 \Delta_{\text{ТД}_{\text{СВЫХП}}} (V_{\text{отн}}) &= \hat{\Delta}_c (V_{\text{отн}}) - \hat{\Delta}_c (V_{\text{отн}}) = \\
 &= \frac{1}{2} \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tilde{\Delta}_{\text{СВЫХП}}^{\text{н}} (V_{\text{отн}}) - \Delta_{\text{СВЫХП}}^{\text{н}} (V_{\text{отн}})) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tilde{\Delta}_{\text{СВЫХП}}^{\text{с}} (V_{\text{отн}}) - \Delta_{\text{СВЫХП}}^{\text{с}} (V_{\text{отн}})) \right] = \\
 &= \frac{1}{2N} \left[\sum_{n=1}^N (\tilde{W}_{\text{отн}}^{\text{н}} - W_{\text{отн}}) + \sum_{n=1}^N (\tilde{W}_{\text{отн}}^{\text{с}} - W_{\text{отн}}) \right] = \quad (2.136) \\
 &= \frac{1}{2N} \left(\sum_{n=1}^N \Delta_{\text{отн}}^{\text{н}} (V_{\text{отн}}) + \sum_{n=1}^N \Delta_{\text{отн}}^{\text{с}} (V_{\text{отн}}) \right) ,
 \end{aligned}$$

где $\Delta_{\text{отн}}^{\text{н}} (V_{\text{отн}})$ и $\Delta_{\text{отн}}^{\text{с}} (V_{\text{отн}})$ - погрешности измерений отклика $W_{\text{отн}}$ при медленных измерениях водефотной $V_{\text{отн}}$ со стороны меньших и больших значений.

Предельное значение составляющей погрешности (2.136)

$$\Delta_{\text{ТД}_{\text{СВЫХП}}} = \max_m \Delta_{\text{ТД}_{\text{СВЫХП}}} (V_{\text{отн}}) = \Delta_{\text{л}} , \quad (2.137)$$

где $\Delta_{\text{л}}$ - предельное значение погрешностей $\Delta_{\text{отн}}^{\text{н}} (V_{\text{отн}})$ и $\Delta_{\text{отн}}^{\text{с}} (V_{\text{отн}})$ измерений отклика $W_{\text{отн}}$.

Предельное значение методической составляющей погрешности

$$\Delta_{\text{МД}_{\text{СВЫХП}}} = \Delta_{\text{дс}} , \quad (2.138)$$

где $\Delta_{\text{дс}}$ - допустимая погрешность оценивания систематической погрешности.

Окончательно, из (2.135), (2.137) и (2.138) предельное значение погрешности оценивания систематической составляющей по выводу

$$\Delta_{\text{СВЫХП}} = \Delta_{\text{л}} + \Delta_{\text{дс}} , \quad (2.139)$$

где $\Delta_{\text{л}}$ - предельное значение погрешности измерений отклика

W_m , определяемое из (2.125) или (2.127) в зависимости от конкретного исследуемого компонента.

Причем погрешность оценивания (2.135) не превышает своего предельного значения (2.139) с вероятностью, равной доверительной вероятности $P_{gc}(N)$ оценивания систематической погрешности.

3. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМОГО КОМПОНЕНТА

В лабораторной работе иллюстрируется применение СИО на простом примере - при идентификации математических моделей подпрограммы тарировки по точности и динамике. Операция тарировки является составной частью процесса обработки измерительной информации в АСНИ /4/.

3.1. Методическое обеспечение

Подпрограмма тарировки номинально должна осуществлять преобразование

$$\hat{x} = f_T(\hat{u}), \quad \hat{u} \in D_{\hat{u}} = \overline{\hat{u}_{min}, \hat{u}_{max}}, \quad (3.1)$$

где \hat{u} - цифровое представление на выходе АЦП напряжения u , подаваемого на вход АЦП;

$D_{\hat{u}}$ - множество значений \hat{u} ;

\hat{u}_{min} и \hat{u}_{max} - предельные значения \hat{u} ;

\hat{x} - оценка измеряемого физического параметра x .

В лабораторной работе рассматривается подпрограмма тарировки

TAR4, входящая в линейный измерительный канал измерения температуры $t \in D_t = [t_{min}, t_{max}]$, где D_t - диапазон измерений. При этом (3.1) принимает вид

$$\hat{t}^{\circ} = b_0 + b_1 \hat{U} \quad , \quad \hat{U} \in D_U \quad (3.2)$$

Метод определения коэффициентов b_0 и b_1 приведен в /4/.

3.2. Программное обеспечение

Подпрограмма *TAR4* реализована на языке *FORTRAN IV* и выполняет :

1. Контроль принадлежности цифрового представления \hat{U} множеству допустимых значений D_U . При выходе \hat{U} из D_U признаку ошибки присваивается соответствующий код, а выходное значение оценки \hat{t}° температуры обнуляется;

2. Преобразование значения \hat{U} в четырехбайтовое представление с плавающей точкой;

3. Расчет оценки \hat{t}° в соответствии с (3.2) и обнуление признака ошибки.

Обращение к подпрограмме *TAR4*

CALL TAR4(B0, B1, UDMIN, UDMAX, UD, T, ERR).

3.3. Информационное обеспечение

Входные параметры подпрограммы :

B0, B1 - коэффициенты b_0, b_1 действительные переменные, представленные четырьмя байтами с плавающей точкой;

UD - значение цифрового представления \hat{U} - целая переменная, представленная двумя байтами с фиксированной точкой;

UDMIN, UDMAX - нижняя и верхняя границы множества D_U - целые переменные, представленные двумя байтами с фиксированной точкой.

Выходные параметры подпрограммы :

T - оценка \hat{t}° - переменная, представленная четырьмя байтами с плавающей точкой;

Текст подпрограммы *TAR4*

```

C      SUBROUTINE TAR4(B0,B1,UDMIN,UDMAX,UD,T,ERR)
C
C      *** И/ИЛИ ДИМЕРНОЙ ТАРИРОВКИ ***
C
      INTEGER UDMIN,UDMAX,UD,ERR
      REAL U
      IF (UD.LT.UDMIN.OR.UD.GT.UDMAX) GOTO 10 0
      U=UD
      T=B0+B1*U
      ERR=0
      GOTO 200
100    T=0
      ERR=8193
200    CONTINUE
      RETURN
      END
```

Рис. I2

ERR - признак ошибки - целая переменная, представляемая двумя байтами с фиксированной точкой.

4. АНАЛИЗ ИССЛЕДУЕМОГО КОМПОНЕНТА И ПОСТРОЕНИЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

4.1. Концептуальная модель по точности

Подпрограмма *TAR4* осуществляет преобразование

$$\tilde{\xi} = \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 \tilde{U} \quad (4.1)$$

которое отличается от номинального (3.2). Это объясняется тем, что исходные данные b_0 , b_1 и U и промежуточные результаты вычислений представлены в ЭВМ с конечной разрядной сеткой, т.е. имеют погрешность представления. Величины b_0 , b_1 и U представлены с плавающей запятой (см.п.3.3). Операции сложения и умножения - операции с плавающей запятой.

Погрешность

$$\Delta_{\xi} = \tilde{\xi} - \xi \quad (4.2)$$

реализации преобразования (3.2) зависит от погрешностей

$$\Delta_{b_0} = \tilde{b}_0 - b_0 \quad (4.3)$$

$$\Delta_{b_1} = \tilde{b}_1 - b_1 \quad (4.4)$$

$$\Delta_U = \tilde{U} - U \quad (4.5)$$

представления величин b_0 , b_1 , U и определяется погрешностями выполнения операций сложения и умножения. Из (3.2), (4.1)+(4.5)

$$\Delta_{\xi} = \Delta_{b_0} + \Delta_{b_1} \tilde{U} + \Delta_{b_1} \Delta_U + 2 \Delta_U \quad (4.6)$$

где Δ_U - погрешность округления промежуточных результатов при выполнении операций сложения и умножения. Из (4.6) следует, что при детерминированном цифровом представлении U погрешност:

Δ_{ϵ} - есть детерминированная величина, зависящая от \dot{U} ,

$$\Delta_{\epsilon} = \Delta_{\epsilon}(\dot{U}) . \quad (4.7)$$

Это и определяет косвенную концептуальную модель подпрограммы *TAR 4* по точности.

4.2. Концептуальная модель по динамике

В ЭЕМ время выполнения операций зависят от значений операндов. Это обусловлено тем, что значения операндов и промежуточных результатов подвергаются анализу и влияют на порядок и количество машинных тактов, затрачиваемых на реализацию операции. Если пренебречь нестабильностью выполнения машинных операций, то время их выполнения является детерминированной величиной, зависящей от значений операндов.

Время выполнения любой программы зависит от режима работы ЭЕМ и времени выполнения операций. Полагая, что программа в ЭЕМ выполняется без прерываний, можно считать, что время ее выполнения есть детерминированная величина, зависящая от значений исходных данных. Следовательно, время выполнения T подпрограммы *TAR 4* - детерминированная величина, зависящая от величины \dot{U} .

$$T = T(\dot{U}) . \quad (4.8)$$

Это и определяет косвенную концептуальную модель по динамике.

5. ОЦЕНИВАЕМЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИССЛЕДУЕМОГО КОМПОНЕНТА

5.1. Точностные характеристики

В соответствии с концептуальной моделью по точности (4.7) погрешность $\Delta_{\epsilon}(\dot{U})$ подпрограммы тарировки *TAR 4* есть

детерминированная величина, зависящая от \dot{U} . Явление гистерезиса при программной реализации подпрограммы TARY отсутствует. Учтем также, что измерение отклика $W = \dot{\varepsilon}^0$ подпрограммы, как для всякого программного компонента осуществляется без погрешности (см. п.2.2.1). Поэтому в качестве оцениваемых точностных характеристик подпрограммы будем рассматривать следующие (см. п.2.2.2.1.1).

1. Абсолютная погрешность и ее предельное значение

$$\Delta_{\varepsilon^0}(\dot{U}_m) = \dot{\varepsilon}_m^0 - t_m^0 = \bar{f}(\dot{U}_m) - f(U_m) , \quad m = \overline{1, M} \quad (5.1)$$

$$\dot{U}_m \in D_{\dot{U}} = \{\dot{U}_m\}_{m=\overline{1, M}} \subset D_{\dot{U}} ;$$

$$\Delta_{\varepsilon^0} = \max_m |\Delta_{\varepsilon^0}(\dot{U}_m)| , \quad m = \overline{1, M} ; \quad (5.2)$$

где $\bar{f}(\)$ - истинная функция преобразования подпрограммы TARY, определяемая соотношением (4.1).

2. Относительная погрешность и ее предельное значение

$$\delta(\dot{U}_m) = \frac{\Delta_{\varepsilon^0}(\dot{U}_m)}{|\dot{\varepsilon}^0|} , \quad m = \overline{1, M} ; \quad (5.3)$$

$$\delta_n = \max_m |\delta(\dot{U}_m)| , \quad m = \overline{1, M} ; \quad (5.4)$$

3. Приведенная погрешность и ее предельное значение

$$\gamma(\dot{U}_m) = \frac{\Delta_{\varepsilon^0}(\dot{U}_m)}{t_{\max}^0 - t_{\min}^0} , \quad m = \overline{1, M} , \quad (5.5)$$

$$\gamma_n = \max_m |\gamma(\dot{U}_m)| , \quad m = \overline{1, M} . \quad (5.6)$$

При оценивании точностных характеристик используется метод образцового компонента. Поэтому значения t^0 в (5.1) вычисляются с двойной точностью. При этом представление целых переменных \dot{U}_m , $m = \overline{1, M}$ в формате с плавающей запятой осуществляется без погрешности, т.е. образцовые воздействия воспроизводятся абсолютно точно. Характеристики (5.1), (5.3), (5.5) вычисляются с двойной точностью и поэтому погрешность арифмети-

ческих операций здесь пренебрегаем.

5.2. Динамические характеристики

В соответствии с концептуальной моделью по динамике (4.8) время выполнения $T(\dot{U})$ подпрограммы *TAR4* есть детерминированная величина, зависящая от \dot{U} . Поэтому в качестве динамической характеристики подпрограммы *TAR4* будем рассматривать время выполнения и его предельное значение

$$\tilde{T}(\dot{U}_m), \quad m = \overline{1, M}, \quad (5.7)$$

$$\tilde{T}_n = \max_m \tilde{T}(\dot{U}_m), \quad m = \overline{1, M}. \quad (5.8)$$

6. ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ИССЛЕДУЕМОГО КОМПОНЕНТА И ИХ АНАЛИЗ

6.1. Математическая модель по точности.

В качестве математической модели подпрограммы *TAR4* по точности примем предельное значение (5.6) приведенной погрешности (5.5)

$$\gamma_n = \max_m |\gamma(\dot{U}_m)|, \quad m = \overline{1, M}. \quad (6.1)$$

Адекватность математической модели (6.1) определим следующим образом (см. (I.6) /1/)

$$\delta_n = \frac{\max_m |\gamma_n - |\gamma(\dot{U}_m)||}{\gamma_n} \leq \delta_{an} \quad (6.2)$$

Поскольку исходные данные (результаты измерений отклика $\mathcal{W}_m = \mathcal{E}_m^*$) при оценивании точностных характеристик представлены абсолютно точно, то характеристика чувствительности математической модели теряет смысл.

6.2. Математическая модель по динамике .

В качестве математической модели подпрограммы *TAR4* по динамике примем оценку (5.8) предельного значения времени выполнения $T(\dot{U})$ подпрограммы

$$\tilde{T}_n = \max_m \tilde{T}(\dot{U}_m) , \quad m = \overline{1, N} . \quad (6.4)$$

Адекватность математической модели (6.4) определим следующим образом (см. (I.6) /I/)

$$\delta_x = \frac{\max_m |\tilde{T}_n - \tilde{T}(\dot{U}_m)|}{\tilde{T}_n} \leq \delta_{ок} \quad (6.5)$$

Чувствительность математической модели (6.4) определим в виде (см. (I.9) /I/)

$$S_x = \frac{\tilde{T}_n - T_n}{T_n} , \quad (6.6)$$

где \tilde{T}_n определяется из (6.4);

$T_n = \max_m T(\dot{U}_m)$ - предельное время выполнения подпрограммы, определенное на основании истинных значений

$$T(\dot{U}_m) , \quad m = \overline{1, N} .$$

Оценим величину \tilde{T}_n сверху

$$\begin{aligned} \tilde{T}_n &= \max_m \tilde{T}(\dot{U}_m) = \max_m (T(\dot{U}_m) + \Delta(\dot{U}_m)) \leq \\ &\leq \max_m T(\dot{U}) + \max_m \Delta(\dot{U}_m) = T_n + \Delta_n = T_n + 2\theta , \quad m = \overline{1, N} ; \end{aligned} \quad (6.7)$$

где Δ и Δ_n - погрешность ИСИИ при измерении времени выполнения $T(\dot{U}_m)$ и ее предельное значение, определяемое из (I.I29);

θ - период тактового генератора.

Из (6.6), (6.7) получим оценку сверху для функции чувствительности (6.6)

$$S_x \leq \frac{2\theta}{T_n} = \frac{2\theta}{\tilde{T}_n} . \quad (6.8)$$

7. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

При выполнении лабораторной работы студент должен сделать следующие :

1. Получить у преподавателя номер индивидуального задания на лабораторную работу.
2. Изучить методические указания к лабораторной работе. Подготовить ответы на контрольные вопросы.
3. Подготовить исходные данные для выполнения лабораторной работы в соответствии с требованиями, приведенными в /5/.
4. Отчитаться преподавателю по изученному материалу.
5. Провести экспериментальное исследование характеристик подпрограммы тарировки на АК-01. Порядок запуска лабораторного эксперимента в диалоговом режиме приведен в /5/.
6. Провести анализ полученных результатов и построить математические модели компонента по точности и динамике в соответствии с п.6.
7. Определить адекватность и чувствительность полученных математических моделей компонента по точности и динамике в соответствии с п.6.
8. Оформить отчет по лабораторной работе в соответствии с требованиями, изложенными в п.5 /1/.
9. Отчитаться по лабораторной работе.

8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие функции выполняют системы измерения и оценивания и идентификации математических моделей компонентов АСУМ ?
2. Приведите примеры точностных и динамических характеристик

компонентов АСНИ.

3. Что отражает концептуальная модель компонента ?
4. В чем сущность методов образцового источника и образцового компонента ?
5. К какому типу относится ПСИДП ?
6. Проведите сравнительный анализ методов измерений длительностей интервалов состояний.
7. Из каких подсистем состоит СИО ?
8. Какие метрологические характеристики нормируются для ПСИТЦ, ПСИДП и ПСОТХ ? От чего они зависят ?
9. Каково назначение применяемых в СИО модулей КАМАК ?
10. Объясните, почему подпрограмма тарировки *TAR4* является ПКК ?
11. Какие точностные и динамические характеристики подпрограммы *TAR4* исследуются в лабораторной работе ?
12. Что характеризуют адекватность и чувствительность математической модели ?

Основные термины и определения

Длительность интервала состояния - значение интервала состояния.

Длительность состояния суммарная - сумма длительностей интервалов состояния на интервале наблюдения.

Интервал состояния - интервал времени, в течении которого состояние объекта остается неизменным.

Момент наступления события - момент времени, в который происходит переход объекта из одного состояния в другое.

Параметр объекта динамический - параметр, характеризующий изменение состояния объекта во времени.

Представление (код) события кодовое - результат кодирования события, определенный в момент наступления последнего.

Погрешность измерения инструментальная - составляющая погрешности измерения, зависящая от погрешностей применяемых средств измерений.

Погрешность измерения методическая - составляющая погрешности измерения, происходящая от несовершенства метода измерений.

Сигнал состояния - сигнал, информативный параметр которого функционально связан с состоянием объекта.

Событие - переход объекта из одного состояния в другое.

Состояние объекта - совокупность значений физических величин, определяющих свойства объекта.

Список сокращений

- АК - автоматизированный комплекс
- АСНИ - автоматизированная система научных исследований
- АЦП - аналого-цифровой преобразователь
- ГТИ - генератор тактовых импульсов
- ИБК - измерительно-вычислительный комплекс
- КТС - комплекс технических средств
- ПАК - программно-аппаратный компонент
- ПО - программное обеспечение
- ПРК - программный компонент
- ПСД - подсистема документирования
- ПСИДП - подсистема измерений динамических параметров
- ПСИТП - подсистема измерений точностных параметров
- ПСОТХ - подсистема оценивания точностных характеристик
- ПСР - подсистема протоколирования результатов эксперимента
- СВ - случайная величина
- СИ - система измерения
- СЧ - двоичный счетчик импульсов
- СИО - система измерения и оценивания
- СКО - среднеквадратическое отклонение

Литература

1. Автоматизированный комплекс для оценивания характеристик АСНИ и их компонентов и обучения проектированию АСНИ. Общие принципы построения. Методические указания к лабораторному практикуму по курсу "Проектирование АСНИ". -Куйбышев: КуАИ, 1986. -58 с.
2. Крамер Г. Математические методы статистики. -М.: Мир, 1975. -648 с.
3. Ампервольтметр цифровой Э30. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. -84с.
4. Автоматизированный комплекс для оценивания характеристик АСНИ и их компонентов и обучения проектированию АСНИ. Подсистема измерений. Лабораторная работа № 5. -Куйбышев:КуАИ, 1986.
5. Автоматизированный комплекс для оценивания характеристик АСНИ и их компонентов и обучения проектированию АСНИ. Варианты индивидуальных заданий по лабораторным работам и порядок проведения экспериментальных исследований. -Куйбышев: КуАИ, 1986.

ПРИЛОЖЕНИЕ

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О МОДУЛЯХ КАМАК

1. Модуль 303 - регистр прерываний, предназначен для приема информации и послыки запроса \angle на магистраль крейта в случае подачи сигнала запроса на любой из 24 входов, выведенных на многоконтактный разъем *INPUT*, установленный на передней панели модуля (см. Рис. I3). Регистр обеспечивает возможность программного маскирования запросов с любого входного разряда. Сигналы на входах 5...24 интегрируются с целью подавления помех. Постоянная времени интегрирования 50 мкс. Сигналы на входах 1...4 не интегрируются. Кроме того, входы 1,2 модуля выведены параллельно на коаксиальные разъемы типа *LEMO* (гнезда *INPUT 1,2* на передней панели).

2. Модуль 350 - выходной регистр, предназначен для параллельной послыки информации с магистрали крейта к другим устройствам. Модуль содержит два 24-разрядных регистра. Выход каждого регистра выведен на соответствующий разъем передней панели: разъем *REG 1* - выход регистра 0, разъем *REG 2* - выход регистра 1 (см. Рис. I4). Кроме того, на переднюю панель выводятся сигналы управления, при помощи которых обеспечивается синхронизация при послыке информации к внешнему устройству с выхода одного из регистров. Для выдачи сигналов синхронизации служат гнезда *ST 1*, *ST 2* на передней панели.

Модуль может работать в двух режимах: синхронном и асинхронном.

Передняя панель модуля 303

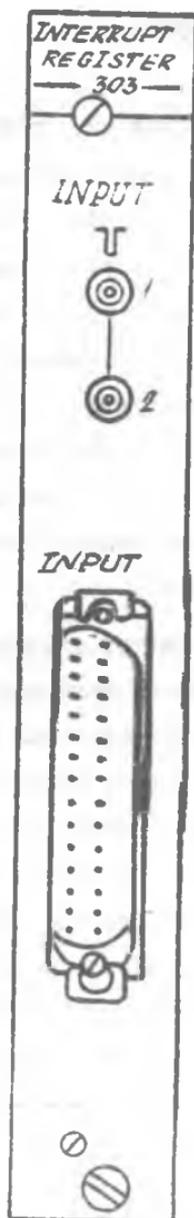


Рис. 13

Передняя панель модуля 350



Рис. I4

3. Модуль 401 - двоичный счетчик, предназначен для счета импульсов, поступающих на его счетный вход. Содержит четыре 16-разрядных двоичных счетчика. Возможно последовательное соединение счетчиков путем перепайки соответствующих перемычек в модуле. Максимальная частота сигналов на счетном входе счетчика - 15 МГц. Каждый счетчик имеет управляющий вход, на который может подаваться сигнал, стробирующий счетный вход счетчика.

Счетные входы счетчиков 1...4 выведены на гнезда *INPUT1* ... *INPUT4* на передней панели модуля (см.Рис.15). Управляющие входы счетчиков 1...4 выведены на гнезда *INHIBIT1* ... *INHIBIT4*. Сброс счетчиков может осуществляться вручную с помощью кнопки *RESET*.

4. Модуль 730A - генератор тактовых импульсов, предназначен для генерации тактовых импульсов продолжительностью 0,5 сек и периодом повторения от 1 мкс до 1 с по декадному подразделению частот. Внутренний источник частоты - высокостабильный осциллятор частот 1 МГц. Модуль может работать и в режиме декадного делителя тактовой частоты внешнего источника до 10 МГц. В этом режиме существует возможность разрешения прохождения входных импульсов внешним сигналом, подаваемым на управляющий вход *EXT INN* (см.Рис.16). Режим работы модуля (от внутреннего или внешнего генератора импульсов) задается переключателем *INT/EXT*. Сигналы от внешнего генератора импульсов подаются на гнездо *IN*. Гнездо *EXT INN* - управляющий вход для внешних сигналов. Выходы *OUTPUT* (7 гнезд - выходы декадного делителя частоты).

Передняя панель модуля 401



Рис. 15

Передняя панель модуля 730А



Рис. 16