

ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

УДК 621.317.7.083.92

В. И. СОЛОНЕНКО

(Новосибирск)

СРАВНЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ С РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ УРАВНОВЕШИВАНИЯ ПО ПОТРЕБЛЕНИЮ ЭНЕРГИИ ОТ ИСТОЧНИКА ИЗМЕРЯЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ И БЫСТРОДЕЙСТВИЮ

Известно, что в измерительной технике важное значение имеет учет потребления средствами измерения энергии от источника измеряемой величины (ИВ). В этом направлении опубликованы работы В. Н. Мильштейна [1], Г. Кейната [2], П. В. Новицкого [3]. Сюда же следует отнести и работу Л. Бриллюэна [4], где подчеркивается важность энергетических соотношений в физическом эксперименте. В этих работах в основном рассматриваются приборы непосредственной оценки и подчеркивается, что точность и чувствительность измерительного прибора зависят от потребления им энергии от источника ИВ. Оценка же энергетических соотношений при измерении с помощью цифровых приборов, основанных на компенсационных методах, не проводится.

В статье рассматриваются энергетические соотношения для некоторых типов цифровых вольтметров постоянного тока, основанных на компенсационных методах измерений. Рассматриваются только такие приборы, которые имеют одинаковую длительность такта (элементарной операции сравнения) и устройства сравнения. Обычно в цифровых вольтметрах используются устройства сравнения с двумя устойчивыми состояниями по выходу. Иногда (например, при следящем уравнивании) устройство сравнения имеет три устойчивых состояния по выходу (больше, меньше, равно). Обычно такое устройство сравнения реализуется в виде двух устройств сравнения с двумя устойчивыми состояниями каждое, включенных по входу параллельно. Дальше считается, что все рассматриваемые устройства сравнения с двумя устойчивыми состояниями физически одинаковы, а устройство сравнения с тремя устойчивыми состояниями выполнено из двух таких устройств сравнения с двумя состояниями каждое. Таким образом, далее рассматриваются, по сути дела, только «двухпозиционные» устройства сравнения.

Такое сужение задачи вызывается тем, что в настоящее время существует очень большое количество разновидностей цифровых вольтметров и анализ всех разновидностей представляется весьма трудоемкой задачей. Поэтому данная работа представляет собой попытку охватить только часть вопроса.

При рассмотрении цифровых приборов, основанных на компенсационных методах, возникают некоторые вопросы, не существующие для

приборов непосредственной оценки. Например, входное сопротивление цифрового измерительного прибора (ЦИП) в общем случае непостоянно, что приводит к усложнению нашей задачи.

В работе анализируются приборы, использующие метод развертывающего уравнивания, метод совпадения, метод поразрядного двоичного уравнивания, метод следящего уравнивания, а также приборы, использующие некоторые комбинации указанных методов (например, совпадение плюс развертывающее уравнивание, следящее уравнивание со сбросом в некоторую определенную точку в конце каждого измерения). Заметим, что на целесообразность использования комбинированных методов указывалось уже давно (например, [5]), и в настоящее время известно значительное количество таких «комбинированных» приборов.

Разбирается случай, когда значение ИВ на интервале между соседними отсчетами неизменно (обычно выбирают быстродействие прибора таким, чтобы это условие выполнялось; иногда применяют для этой цели фиксацию уровня ИВ). Количество квантов в диапазоне измерения и цена кванта для всех рассматриваемых приборов одинаковы. Используется еще одно допущение: реальная непрерывная ИВ, постоянная во время измерения, заменяется дискретной ИВ, дискреты отстоят друг от друга на интервал квантования и попадают (для определенности) на начало кванта. Погрешности прибора, за исключением погрешности квантования, не учитываются. Такая замена не приводит к существенным ошибкам, так как результаты на выходе ЦИП будут теми же, что и для реальной ИВ, а погрешности учета энергии при большом количестве квантов будут незначительными. Вычисления же существенно упростятся. Еще одно допущение: значения ИВ, отстоящие друг от друга на интервал времени, равный наименьшему интервалу между двумя соседними измерениями или больше его, считаются некоррелированными. Закон распределения ИВ взят равномерный в пределах диапазона измерения, что приводит к более простым выражениям. Полученные для такого случая результаты могут быть полезны и для случая коррелированности соседних отсчетов, а также для другого закона распределения ИВ, если учесть эти отличия от равномерного закона.

На рис. 1 представлена обобщенная эквивалентная схема рассматриваемого цифрового вольтметра. Пунктиром обозначено сравнивающее устройство. Для метода совпадения имеем $N-1$ устройств сравнения (N — число квантов диапазона измерения), подключенных параллельно в точке б, но точки l_i у них подключены к различным выходам устройства формирования опорного напряжения (УФОН). УУ обозначает устройство управления. Для следящего уравнивания обычно используются два таких устройства сравнения, включенных параллельно в точке б, а точки v_1 и v_2 подключены к соответствующим выходам УФОН. Пороговое устройство имеет два устойчивых состояния по выходу.

Коснемся вопроса учета входного сопротивления $R_{вх}$ прибора. Под ним следует понимать (как это обычно делается) отношение значения ИВ к току i , текущему между точками а и б). Отсюда видно, что

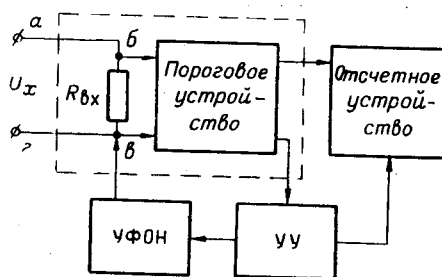


Рис. 1.

$R_{вх} > 0$ при $U_x > U_k$ (U_k — напряжение УФОН), $R_{вх} = \infty$ при $U_x = U_k$ и $R_{вх} < 0$ при $U_x < U_k$ (предполагается, что $U_x > 0$). Такое поведение $R_{вх}$ существенно усложняет расчеты. Применим такой прием: будем рассматривать не $R_{вх}$, а $R_{вх.э}$, которое в первом приближении не зависит от значения ИВ. Под $R_{вх.э}$ понимается отношение разности между U_x и U_k к току, текущему между точками а и б. Энергия, потребляемая от источника ИВ, расходуется только на $R_{вх.э}$, если внутреннее сопротивление источника компенсационного напряжения $R_{ик} \ll R_{вх.э}$ (обычно это условие выполняется). Таким образом, переход от $R_{вх}$ к $R_{вх.э}$ не приведет к ошибкам, так как энергия будет учтена полностью, но вычисления упростятся, потому что $R_{вх.э}$ может считаться в первом приближении постоянным. Как сказано выше, устройства сравнения рассматриваемых приборов одинаковы, т. е. одинаковы их $U_{вх.э}$. Будет находиться среднее количество энергии, расходуемой на $R_{вх.э}$ за интервал времени между отсчетами (усреднение по различным значениям ИВ), а также средняя длительность интервала t , необходимого для проведения одного измерения. Заметим, что ток через $R_{вх.э}$ может течь в обоих направлениях, поэтому на $R_{вх.э}$ может расходоваться как энергия источника ИВ, так и энергия УФОН. Учет обеих энергий проводится в отдельности. Приведем пример подсчета энергии, потребляемой $R_{вх.э}$ в течение одного такта τ (например, за счет источника ИВ): $P_i^+ = \frac{(U_{x_i} - U_{k_j})^2 \tau}{R_{вх.э}}$. Поскольку τ , $R_{вх.э}$ и цена кванта q постоянны, то их можно для простоты положить равными единице, тогда вместо значений U_{x_i} и U_{k_j} можно использовать соответствующие номера интервалов квантования. Тогда $P_i^+ = (n_{x_i} - n_{k_j})^2$. В дальнейшем используются диаграммы состояния УФОН, т. е. зависимость номера кванта $\left(\frac{U_{k_j}}{q} = n_{k_j}\right)$ от времени (время выражается в единицах τ).

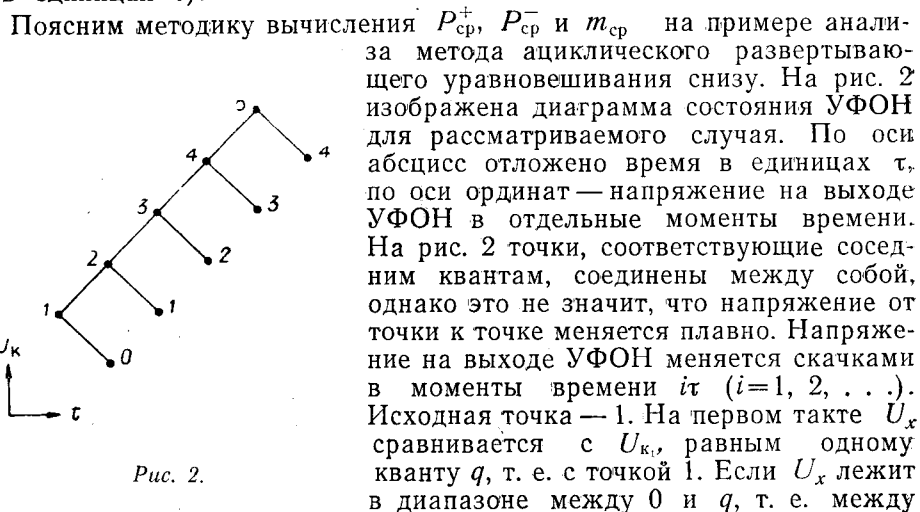


Рис. 2.

Поясним методику вычисления $P_{ср}^+$, $P_{ср}^-$ и $m_{ср}$ на примере анализа метода ациклического развертывающего уравнивания снизу. На рис. 2 изображена диаграмма состояния УФОН для рассматриваемого случая. По оси абсцисс отложено время в единицах τ , по оси ординат — напряжение на выходе УФОН в отдельные моменты времени. На рис. 2 точки, соответствующие соседним квантам, соединены между собой, однако это не значит, что напряжение от точки к точке меняется плавно. Напряжение на выходе УФОН меняется скачками в моменты времени $i\tau$ ($i=1, 2, \dots$). Исходная точка — 1. На первом такте U_x сравнивается с U_k , равным одному кванту q , т. е. с точкой 1. Если U_x лежит в диапазоне между 0 и q , т. е. между 0 и 1 (или приблизительно 0 по условию), то $U_x < U_k$ и в конце первого такта УФОН перейдет в точку 0 и выдаст отсчет 0 (значение U_x присваивается нижней границе кванта). При этом энергия на $R_{вх.э}$ выделяется за счет УФОН ($U_x < U_k$) и $P_0^- = (U_{k_1} - U_{x_0})^2 = 1^2$. От источника ИВ энергия не потреблялась, поэтому $P_0^+ = 0$. Измерение

потребовало времени, равного τ , т. е. 1. Если $U_x = 1$ (на втором кванте), то на первом такте $U_x = U_k$, при этом пороговое устройство находится в положении «добавить», УФОН в конце первого такта добавляет единицу, т. е. $U_k = 2$. Далее на втором такте $U_x < U_k$, следовательно, пороговое устройство через УУ сбросит единицу и выдаст отсчет 1. На первом такте от источника ИВ энергия не потреблялась, на втором — тоже, поэтому $P_1^+ = 0$. Для P_1^- получаем 1; эта энергия была израсходована за счет УФОН на втором такте. Число тактов теперь $m_1 = 2$. Легко видеть, что P_i^- при любом i (i — значение ИВ) равна 1, так как вниз всегда делается только один шаг; P_i^+ возрастает с ростом i . Результаты вычисления P_i^+ , P_i^- и m_i для случая $N=5$ приведены в табл. 1. Здесь m_i — необходимое число тактов работы прибора до получения отсчета (от начала измерения), соответствующее U_{xi} ($i=1, 2, 3, 4$), а P_i^+ и P_i^- — соответствующая энергия; $P_{ср N}^+ = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} P_i^+$. Аналогично определяются $P_{ср N}^-$ и $m_{ср N}$. Результаты

вычислений для случаев различных N сведены в табл. 2. Поясним отличия в вычислениях для каждого из рассматриваемых методов.

Таблица 1

U_{xi}	P_i^+	m_i	P_i^-
0	0	1	1^2
1	0	2	1^2
2	1^2	3	1^2
3	1^2+2^2	4	1^2
4	$1^2+2^2+3^2$	5	1^2

А. Циклическое развертывающее уравнивание снизу. Диаграмма состояния УФОН не отличается от рассмотренной, но УФОН последовательно проходит все состояния и результат выдается прибором только

в конце цикла. Естественно, при таком методе m_i не зависит от значения ИВ. $P_{ср N}^+$ не отличается от $P_{ср N}^+$ для ациклического метода, $P_{ср N}^-$ же отличается, так как теперь во время измерения U_k может значительно превышать U_x .

Б. Ациклическое развертывающее уравнивание сверху. При этом методе исходное состояние УФОН — точка $(N-1)$. Пороговое устройство выдает сигнал «сбросить 1» при $U_x < U_k$ и «оставить результат» при $U_x \geq U_k$. Измерение заканчивается, как только изменится состояние порогового устройства.

В. Циклическое развертывающее уравнивание сверху. Диаграмма состояния та же, что и в случае Б, особенности ее те же, какими отличается случай А от случая, рассмотренного первым.

Метод совпадения. В отличие от рассмотренных выше методов, прибор, работающий по методу совпадения, имеет не одно, а $(N-1)$ устройств сравнения. Сравнение производится с одной из границ интервала (например, с правой). Все сравнения производятся одновременно, измерение занимает по времени всего один такт. Суммируется энергия, затрачиваемая на каждом из $(N-1)$ $R_{вх.э}$ для определенного U_{xi} , затем усредняются результаты по различным U_{xi} .

Комбинированный метод: совпадение плюс ациклическое развертывающее уравнивание снизу. Вначале по методу совпадения грубо определяется, в каком из L интервалов диапазона находится искомого значения ИВ. При этом используется $(L-1)$ устройств сравнения.

Методы уравнивания		N = 1000							P ⁺ _{ср} · 10 ⁶		Выигрыш, раз	
		P ⁺ _{ср} · 10 ⁶	Выигрыш, раз	P ⁻ _{ср} · 10 ⁶	Выигрыш, раз	P ^{ср} · 10 ⁶	Выигрыш, раз	m _{ср}				
Развертывающее	а)	83	1	10 ⁻⁶	83 · 10 ⁶	83	2,01	501	10	1		
	б)	83	1	84	1	167	1	1000	10	1		
	в)	0	∞	83	1,01	83	2,01	501	0	8		
	г)	83	1	83	1,01	166	1	999	10	1		
Совпадение + развертывающее	а)	L=1	83	1	83	1,01	166	1	1	10	1	
		L=2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
	б)	L=3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
		L=4	—	—	—	—	—	—	—	0,20	51	
		L=5	0,92	902	0,27	313	1,2	141	102	0,15	71	
		L=6	0,73	1144	0,35	241	1,1	155	85	0,13	78	
		L=7	0,66	1249	0,43	195	1,1	153	73	0,14	76	
		L=8	0,67	1244	0,51	164	1,2	142	64	—	—	
Следящее	а)	33	2,5	33	2,5	67	2,5	334	4,2	2,5		
	б)	10,4	8	11	8	21	8,0	251	1,3	8,0		
Двоичное поразрядное		0,05	1610	0,06	1394	0,11	1494	10	0,01	803		

Затем по методу, описанному первым, определяется номер кванта, в котором находится значение ИВ. $P_{ср N}^+$, $P_{ср N}^-$ и $m_{ср N}$ определяются как сумма соответствующих величин на каждом из двух этапов.

Следящее уравнивание. Диаграмма состояния отличается тем, что исходное состояние УФОН не фиксировано, а меняется от одного отсчета к другому. Уравнивание каждый раз начинается от предыдущего отсчета. Используется одно устройство сравнения с тремя устойчивыми состояниями. Как сказано выше, такое устройство сравнения имеет входное сопротивление, равное $\frac{1}{2} R_{вх.э.}$. Можно для этого случая использовать диаграмму состояния развертывающего уравнивания, но с переменной начальной точкой. Усреднение P_i^+ , P_i^- , m_i производится дважды: один раз по U_{x_i} , другой раз по различным предыдущим состояниям $U_{x_{i-1}}$, т. е., по существу, двойное усреднение по различным U_{x_i} . Затем нужно учесть, что сопротивление входа в 2 раза меньше, чем в предыдущих случаях.

Следящее уравнивание со сбросом в точку $\frac{N-1}{2}$. Это, по сути дела, развертывающее уравнивание, но в зависимости от U_x уравнивание либо снизу, либо сверху. Устройство сравнения с тремя состояниями, поэтому входное сопротивление равно $\frac{1}{2} R_{вх.э.}$

Двоичное поразрядное уравнивание. Для этого метода отдельно суммируются частные энергии по отдельным разрядам для различных U_{x_i} , затем суммируются предыдущие суммы и результат делится на общее число квантов диапазона N .

Таблица 2

$N = 500$					$N = 100$						
$P_{\text{ср}}^- \cdot 10^6$	Выигрыш, раз	$P_{\text{ср}} \cdot \text{обш} \cdot 10^6$	Выигрыш, раз	$m_{\text{ср}}$	$P_{\text{ср}}^+ \cdot 10^4$	Выигрыш, раз	$P_{\text{ср}}^- \cdot 10^4$	Выигрыш, раз	$P_{\text{ср}} \cdot \text{обш} \cdot 10^4$	Выигрыш, раз	$m_{\text{ср}}$
10^{-6}	$11 \cdot 10^6$	10	2,02	251	8	1	10^{-4}	$8 \cdot 10^4$	8	2,08	51
11	1	21	1	500	8	1	8,6	1	16,7	1	100
10	1,01	10	2	251	0	∞	8,3	1,04	8,3	2	51
10	1,01	21	1	499	8	1	8,3	1,04	16,4	1,02	99
10	1,01	21	1	1	8	1	8,3	1,04	16,3	1,02	1
—	—	—	—	—	1	8	0,04	202	1,04	16	27
—	—	—	—	—	0,38	21	0,12	75	0,49	34	18
0,05	223	0,25	83	64	0,29	27	0,19	45	0,48	34	14
0,07	157	0,21	98	52	0,31	25	0,27	32	0,59	28	12
0,09	120	0,22	95	45	—	—	—	—	—	—	—
0,11	97	0,25	85	38	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,2	2,5	8,4	2,5	168	3,5	2,3	3,45	2,5	6,9	2,4	34
1,3	7,9	2,6	7,9	126	1,0	7,7	1,13	7,7	2,2	7,7	26
0,015	698	0,03	746	9	0,03	266	0,12	72	0,15	111	7

Формулы для $P_{\text{ср}N}^+$, $P_{\text{ср}N}^-$ и $m_{\text{ср}N}$ приведены в табл. 3 для различных рассмотренных методов. В табл. 2 приведены численные результаты, полученные по формулам табл. 3 для различных N .

В работе методика количественного учета энергетических затрат как источника ИВ, так и УФОН, необходимых при измерении некоторыми типами ЦИП постоянного тока, что позволяет сравнить различные методы уравнивания с количественной стороны.

Показано, что в общем случае следует учитывать затраты не только источника ИВ, но и затраты источника вспомогательной энергии, причем для самого процесса измерения несущественно, энергией какого источника «оплачивается» процесс измерения.

Заметим, что часто говорят о том, что прибор уравнивания в идеале не потребляет энергии, т. е. при получении информации об ИВ можно, казалось бы, обойтись без энергетических затрат. С этим нельзя согласиться. Даже при измерении идеальным прибором до момента уравнивания происходит обмен энергией между источником ИВ и прибором; без этого обмена само измерение невозможно.

Из табл. 2 и 3 видно, что по обмену энергией между источником ИВ и ЦИП рассмотренные виды развертывающего уравнивания и метод совпадения примерно одинаковы (ациклические виды несколько более экономичны, чем циклические и метод совпадения). Для приборов с числом квантов $N=1000$ метод следящего уравнивания дает выигрыш примерно в 2,5 раза, метод двоичного поразрядного уравнивания — около 1500 раз. Здесь и далее если выигрыш оценивается по сравнению с методом циклического развертывающего уравнивания. Видно, что метод двоичного поразрядного уравнивания с точки зрения обмена энергией очень резко отличается от других методов уравнивания.

Таблица 3

Метод работы	$P_{\text{ср}}^+ N$	$P_{\text{ср}}^- N$	$m_{\text{ср}} N$
Развертывающее ациклическое уравновешивание снизу	$\frac{(N-1)^2(N-2)}{12}$	1	$\frac{N}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{N}$
Развертывающее циклическое уравновешивание снизу	$\frac{(N-1)^2(N-2)}{12}$	$\frac{(N+1)^2(N+2)}{12}$	N
Развертывающее ациклическое уравновешивание сверху	0	$\frac{N(N^2-1)}{12}$	$\frac{N}{2} + \frac{1}{2} - \frac{1}{N}$
Развертывающее циклическое уравновешивание сверху	$\frac{(N-1)^2(N-2)}{12}$	$\frac{N(N^2-1)}{12}$	1
Совпадение	$\frac{(N-1)^2(N-2)}{12}$	$\frac{N^2(N^2-1)}{12}$	1
Совпадение плюс развертывающее ациклическое уравновешивание снизу	$\frac{(N-1)(N-l)(N-l-1)}{12l} + \frac{(l-1)^2(l-2)}{12}$	$\frac{(N+1)(N-l)(N-l-1)}{12l} + 1$	$\frac{l+3}{2}$
Следящее уравновешивание	$\frac{(N-1)}{60N}(2N^3+7N^2+7N+2)$	$\frac{(N-1)}{60N}(2N^3+7N^2+7N+2)$	$\frac{N^2+3N-1}{3N}$
Следящее уравновешивание со сбросом	$\frac{N(N^2-4)}{96}$	$\frac{(N+2)^2(N+4)}{96}$	$\frac{N}{4} + 1$
Двоичное поразрядное уравновешивание	$\sum_{n=1}^m \left\{ \left[\frac{N}{2^n} \right] \sum_{k=1}^{2^{n-1}-1} K^2 + \right.$ $2^{n-1} + N - 2^n \left[\frac{N}{2^n} + 1 \right] \left. + \sum K^2 \right\},$ <p>где $[N]$ — целая часть от N</p>	$\sum_{n=1}^m \left\{ \left[\frac{N}{2^n} + 1 \right] \sum_{k=1}^{2^{n-1}} K^2 - \right.$ $2^n \left[\frac{N}{2^n} + 1 \right] - (2^{n-1} + N + 1) \left. - \sum K^2 \right\}$	$\lceil \log_2 N + 1 \rceil$

только поразрядному двоичному уравниванию.

Метод следящего уравнивания со сбросом при равномерном законе распределения ИВ дает существенный (более чем в 3 раза) выигрыш по сравнению с обычным следящим уравниванием. Если закон распределения ИВ изменится, но значение ИВ в соседние моменты отсчетов будут по-прежнему некоррелированными, то следящее уравнивание со сбросом в точку, соответствующую математическому ожиданию ИВ, по-прежнему будет лучше обычного следящего уравнивания в смысле обмена энергией. Если же соседние отсчеты ИВ коррелированы, то энергетический обмен может быть существенно меньше для обычного следящего уравнивания и последнее может мало отличаться от метода двоичного поразрядного уравнивания и иногда даже превосходить его. Заметим, однако, что с точки зрения получения информации об ИВ такой режим измерения, когда соседние значения ИВ жестко коррелированы, не представляет большого интереса, так как каждый новый отсчет несет очень малое количество информации об ИВ по сравнению со случаем некоррелированных отсчетов.

По быстродействию картина изменится несущественно, за исключением того, что на первое место выходит метод совпадения, для которого среднее число тактов уравнивания равно 1. Затем идет двоичное поразрядное уравнивание, далее комбинированные методы совпадения и развертывающего уравнивания, затем следящее развертывающее уравнивание.

Заметим, что метод совпадения, наряду с уникальным быстродействием, имеет крупный недостаток — прибор в момент отсчета имеет значительно больший обмен энергией с источником ИВ, чем приборы, использующие другие рассмотренные методы, что может вносить систематическую (и трудноучитываемую) ошибку из-за недостаточно высокого входного сопротивления прибора.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании новых приборов, когда имеются ограничения на энергетический обмен между источником ИВ и прибором. Изложенная методика может быть использована при анализе других цифровых приборов.

В заключение хочу поблагодарить проф. М. П. Цапенко за постановку данной работы и полезные советы при ее выполнении.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Мильштейн. Энергетические соотношения в электроизмерительных приборах. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960.
2. Г. Кейнат. Электроизмерительная техника. КУБУЧ, 1935.
3. П. В. Новицкий. Основы информационной теории измерительных устройств. Л., «Энергия», 1968.
4. Л. Бриллюэн. Наука и теория информации. М., Физматгиз, 1960.
5. М. П. Цапенко. О классификации цифровых измерительных приборов.— Измерительная техника, 1961, № 5.

*Поступила в редакцию
16 сентября 1968 г.*