

Г. М. Кузьмичев, В. М. Шляндин

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ВОЛЬТМЕТРОВ ПРЯМОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ

Одним из перспективных методов уравнивания, используемых в электромеханических цифровых вольтметрах, является метод прямого уравнивания [1, 2], так как он обеспечивает при одинаковой степени точности более высокое быстродействие (на один-два порядка выше), более низкие требования к точности выполнения ряда элементов и простоту схемного решения. Цифровые вольтметры, выполненные с использованием этого метода, мало чем уступают осваиваемым в настоящее время вольтметрам Щ-1311 и Р339, а по ряду параметров превосходят их. Процесс измерения при методе прямого уравнивания заключается в том, что вначале осуществляется приблизительная оценка измеряемой величины декадой элементов сравнения с релейными характеристиками, пороги срабатывания которых дискретно возрастают от $U_{x\min}$ до $U_{x\max}$. Так как измеряемая величина подается одновременно на все элементы сравнения, то отсутствует операция последовательного уравнивания измеряемой величины, которая характерна для приборов со следящим и развертывающим уравниванием. Это приводит к сокращению времени уравнивания. В таблице 1 приведены временные соотношения для коммутации цепей одного разряда при использовании различных методов уравнивания (с учетом времени на срабатывание нуля-органа или реле «поправок»).

Как видно из таблицы, наибольшее быстродействие среди электромеханической группы цифровых приборов обеспечивается при использовании метода прямого уравнивания, а предельно возможное — при использовании метода прямого уравнивания с системой «поправок» в цепи компенсационной схемы.

Структурная схема цифрового вольтметра, в котором использован метод прямого уравнивания, изображена на рис. 1. Как

Таблица 1

№ п/п.	Метод уравнивания	Время измерения на разряд	Примечание
1	При методе развертывающего уравнивания	$10(\tau_1 + \tau_2)$	Здесь τ_1 — время срабатывания релейного элемента. τ_2 — время срабатывания пульт-органа. Декадная система отработки.
2	При методе следящего уравнивания	$10(\tau_1 + \tau_2)$	
3	При методе кодового развертывающегося уравнивания	$4(\tau_1 + \tau_2)$	При использовании четырехзначного кода.
4	При методе прямого уравнивания с системой поправок в цепи элементов сравнения	5τ	$t_{\text{разряда}} = 2\tau_1 + \tau_{\text{отп. р.}} + \tau_{\text{с. в. р.}} + \tau_{\text{ср. р.}} = 5\tau$, τ_1 — время на срабатывание реле. $\tau_{\text{отп. р.}}$ — время отпускания реле. $\tau_{\text{с. в. р.}}$ — время срабатывания вспомогательно-го реле. $\tau_{\text{ср. р.}}$ — время срабатывания дополнительно-го реле.
5	При методе прямого уравнивания с системой поправок в цепи компенсационной схемы.	2τ	$t_{\text{разряда}} = \tau_1 + \tau_2 = 2\tau$, где τ_1 — время срабатывания реле сравнения. τ_2 — время срабатывания реле поправок. Возможен квазиследящий режим.

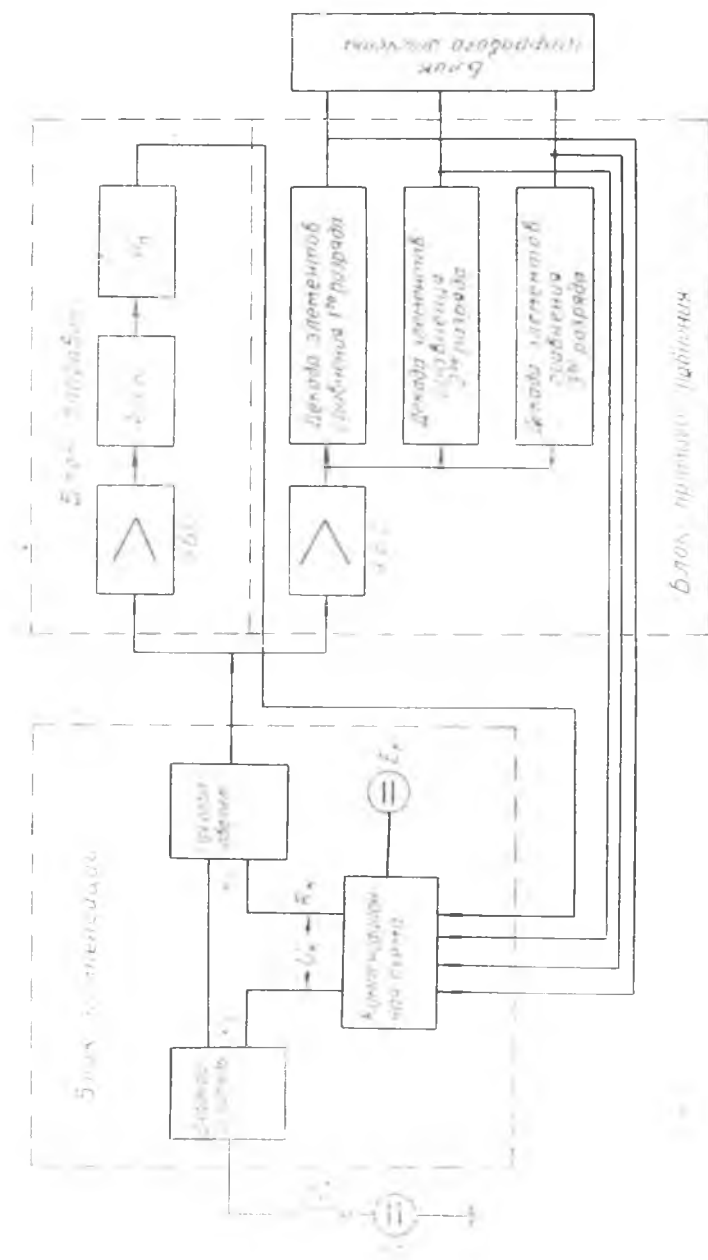


Рис. 1.

видно из структурной схемы, прибор состоит из четырех основных блоков: блока компенсации (компенсационная схема, входной делитель для расширения пределов измерения и преобразователь), блока прямого сравнения (измерительный усилитель и три декады элементов сравнения), блока поправки (усилитель знака переком-пенсации, фазочувствительный каскад, реле «поправок») и блока цифрового отсчета для регистрации результатов измерения. Оценка величины измеряемого напряжения в приборе осуществляется путем компенсации его эталонным, снимаемым с делителей компенса-ционной схемы.

Каждая декада элементов сравнения приближенно (с точностью $\pm 5\%$) оценивает абсолютное значение приложенного к ней напря-жения U_x и, изменяя состояние компенсационной схемы, вводит компенсирующее напряжение, образуя разность $U_x - U_k$. Абсолют-ное значение этой разности приближенно оценивается следующей декадой и, наконец, последней декадой элементов сравнения оце-нивается величина недокомпенсированной разности $U_x - U_{k1} - U_k$ (уже с точностью $\pm 10\%$). Здесь U_{k1} — величина компенсирующе-го напряжения, введенного при оценке знака в первом разряде; U_{k11} — при оценке знака во втором разряде.

Для устранения ложных срабатываний элементов сравнения, настраиваемых на относительно грубо установленные пороговые уровни, вводится система «поправок». Основная сущность этой

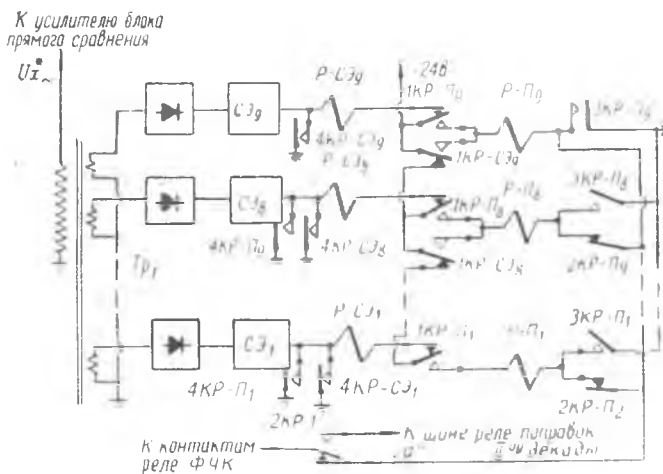


Рис. 2.

системы состоит в том, что в случае ложного срабатывания эле-мента сравнения меняется знак разности $U_x - U_k$, что сейчас же отмечается фазочувствительным каскадом. Поправка вводится либо путем отпускания i -ого и срабатывания $i-1$ реле эле-

ментов сравнения с помощью вспомогательных и дополнительных реле (при методе введения «поправки» в цепи элементов сравнения, рис. 2), либо путем коммутации цепей в компенсационной схеме непосредственно контактами реле блока «поправок» (при методе введения поправок в цепи компенсационной схемы, рис. 3). При

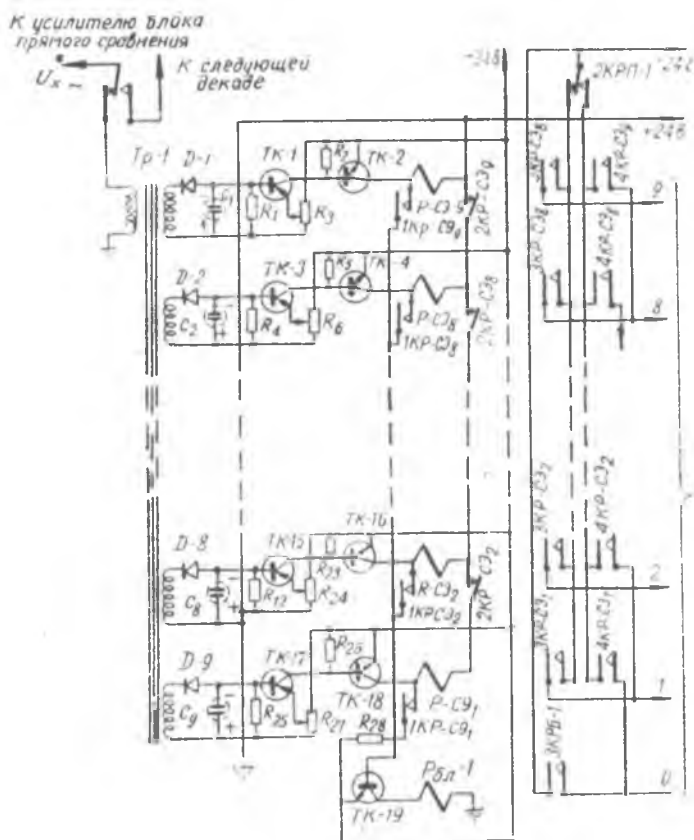


Рис. 3.

обоих методах введения поправки происходит уменьшение на одну единицу компенсирующего напряжения данного разряда. Введение в прибор системы поправок, выполняющей в некоторой степени функции нуль-органов цифровых приборов, приводит к снижению требований к точности настройки элементов сравнения, а также стабильности коэффициента передачи сигнала от блока компенсации до обмотки реле элемента сравнения. Действительно, для нормальной работы схемы вольтметра необходимо лишь обеспечить такую настройку элементов сравнения, чтобы выполнялось условие:

$$U_{э.с.i}^* = \frac{U_{x_i} - U_{x_{i-1}}}{2} + U_{x_{i-1}}, \quad (1)$$

где $U_{э.с.i}^*$ — напряжение настройки срабатывания i -ого элемента сравнения декады;

U_{x_i} — напряжение, соответствующее переходу границы срабатывания от i -ого к $i + 1$ элементам сравнения;

$U_{x_{i-1}}$ — напряжение, соответствующее переходу границы срабатывания от $i - 1$ к i -му элементам сравнения.

Тогда при подаче сигнала с блока компенсации $U_{x,к}$ такой величины, что выполняется неравенство

$$U_{э.с.i}^* > U_{x,к} > U_{x_{i-1}}, \quad (2)$$

срабатывает $i - 1$ элемент сравнения и разность $U_{x,к} - U_{x_{i-1}} > 0$ с абсолютной величиной менее половины знака, которая затем компенсируется на следующей декаде. При условии же введения $U_{x,к} > U_{э.с.i}^*$ срабатывает i -ый сравнивающий элемент и разность $U_{x,к} - U_{x_i} < 0$, что сейчас же отмечается системой поправок, т. к. разностный сигнал изменяет знак. Основным источником погрешностей является блок компенсации, который представляет, по существу, компенсационную схему с неполным уравниванием. Анализ показывает, что основная статическая погрешность цифрового вольтметра прямого уравнивания состоит из следующих составляющих:

а) погрешности компенсирующей величины

$$\delta U_k = f(\delta R_k, \delta E_k, \delta I_k, \delta R_{ш.к}), \quad (3)$$

где δR_k — погрешность подгонки сопротивлений компенсационной схемы;

δE_k — погрешность из-за нестабильности источника компенсационного напряжения;

δI_k — погрешность установки рабочего тока;

$\delta R_{ш.к}$ — погрешность, обусловленная шунтированием компенсационной схемы сопротивлением остальной части блока компенсации.

Погрешности δR_k , δE_k , δI_k характерны для любого компенсатора, зависят от вида компенсационной схемы и определяются обычными способами. Для оценки величины погрешности $\delta R_{ш.к}$ следует определить максимальную величину выходного сопротивления компенсационной схемы $R_{k_{\max}}$ и учесть величину шунтирующего сопротивления $R_{ш}$.

$$R_{ш} = \frac{U_k}{U_g} (R_{k_{\max}} + R_{g_{\max}} + R_n) - R_{k_{\max}}, \quad (4)$$

где $U_g = U_x - U_k$ — напряжение недокомпенсации;
 $R_{k_{\max}}$ — максимальное выходное сопротивление компенсационной схемы;
 $R_{g_{\text{вых}}}$ — выходное сопротивление делителя напряжения для расширения пределов измерения вольтметра;
 R_{Π} — эквивалентное сопротивление преобразователя.

б) погрешность делителя для расширения пределов измерения.

$$\delta K_g = f(\delta K_{\Pi}, \delta K_{\text{ш } g}, \delta K_{R_x}), \quad (5)$$

где δK_{Π} — погрешность подгонки сопротивлений делителя;
 $\delta K_{\text{ш } g}$ — погрешность из-за шунтирования нижнего плеча делителя выходным сопротивлением компенсационной схемы и входным сопротивлением преобразователя;
 δK_{R_x} — методическая погрешность за счет наличия конечного сопротивления у источника измеряемой э. д. с.

Как показывает анализ, оценка погрешности входного делителя имеет очень важное значение для цифровых приборов, т. к. допущенные ошибки при его выполнении вызывают ухудшение таких характеристик, как точность, возможность использования прибора в высокоомных цепях, снижение быстродействия. Принципиально нового в подходе к оценке этих погрешностей в цифровых вольтметрах прямого уравнивания нет.

в) погрешность сравнения.

$$\delta C = f_3(\delta K_{R_g}, \delta K_{R_k}, \delta K_{R_{\Pi}}, \delta K_{\text{н.у.}}, \delta K_{\text{е.э.}}, \delta D_{\text{искр.}}), \quad (6)$$

где δK_{R_g} — погрешность, вызванная непостоянством выходного сопротивления делителя;
 δK_{R_k} — погрешность, вызванная непостоянством выходного сопротивления компенсационной схемы;
 $\delta K_{R_{\Pi}}$ — погрешность, вызванная непостоянством входного сопротивления преобразователя;
 $\delta K_{\text{н.у.}}$ — погрешность из-за нестабильности коэффициента передачи сигнала через измерительный усилитель;
 $\delta D_{\text{искр.}}$ — погрешность дискретности;
 $\delta K_{\text{э.с.}}$ — погрешность, вызванная нестабильностью коэффициента передачи сигнала через элемент сравнения.

Погрешности сравнения особенно характерны для приборов прямого уравнивания. В приборах развертывающего и следящего уравнивания эта погрешность обусловлена конечной величиной чувствительности нулевого органа. В приборах прямого уравнивания она зависит от целого ряда факторов и имеет важное значение, так как ошибка может возникнуть не только в последних знаках, но и в старших разрядах числа, что не всегда

может быть исправлено блоком поправок. Тогда погрешность сравнения приводит к максимальной погрешности измерения не в 0,01%, а в 10% при точности 0,1% и четырехзначном отсчете. Можно доказать, что максимально допустимая величина погрешности сравнения должна лежать в пределах $\pm 5\%$ от номинального значения сигнала, подаваемого на декаду элементов сравнения.

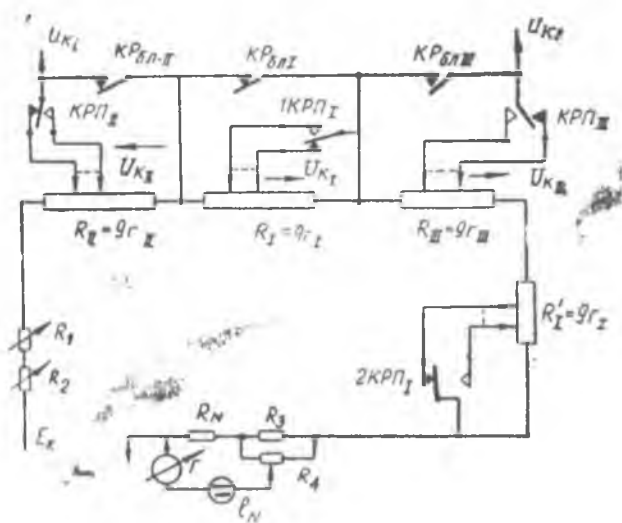


Рис. 4.

Компенсационная схема цифровых вольтметров выполняется с использованием последовательных делителей, хотя возможно использование и параллельных делителей. В простейших приборах с трехзначным отсчетом лучше использовать последовательные делители. Для четырехзначного отсчета можно предложить последовательный делитель с одной декадой замещения, структурная схема которого изображена на рис. 4, и схему делителя на принципе моста с плавающими диагоналями питания и измерения (рис. 5). В обоих случаях поправка осуществляется в цепи компенсационной схемы. Анализ схем показывает, что они могут быть использованы в приборах класса 0,5 и 0,02.

Особенность метода прямого уравнивания заключается также в том, что оценка знака в каждом разряде осуществляется по напряжению, выделяемому на сопротивлении R до введения компенсирующего напряжения. После окончания процесса сравнения вводится компенсирующее напряжение и наступает следующий этап сравнения $U_x - U_k$ по напряжению, выделяемому на зажимах преобразователя. По этой причине желательно выбирать $R \gg R_k + R_g$, так как иначе уменьшается чувствительность блока компенсации.

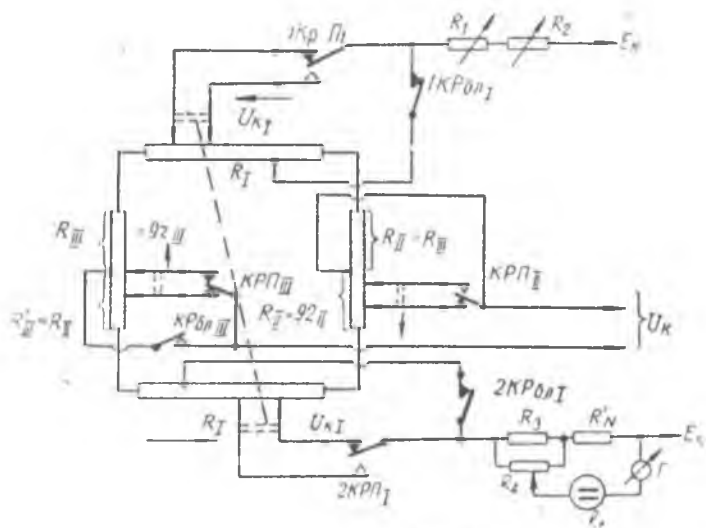


Рис. 5.

$$S_{6.к.}^U = \frac{\Delta U_{R_{II}}}{\Delta(U_V - U_K)} = \frac{R_{II}}{R_{II} R_X S_R} \quad (7)$$

Важное значение в цифровом вольтметре прямого уравнивания имеет блок поправок. Параметры блока поправок влияют не только на точность работы прибора, но и определяют такой важный фактор, как быстродействие, т. к. для повышения надежности работы прибора и снижения требований к нему вероятность введения поправок равна 0,5. Блок поправок возможно выполнить почти полностью на полупроводниковых триодах, кроме одной сверхминиатюрной лампы 6Н17Б во входном каскаде. Для устранения перегрузок при изменении уровня сигнала на входе в пределах $60 \div 80$ гб усилитель выполняется в виде чередующихся цепочек усиления ограничения. Чувствительность блока поправок зависит от количества цепочек (при двух цепочках чувствительность имеет порядок $0,5 \div 1,0$ мв). В качестве преобразователя входного сигнала $U_x - U_k$ желательно использовать контактный преобразователь, например, на базе реле типа РП-5, т. к. в этом случае возможно обеспечить высокие показатели входных характеристик блока поправок и сравнения.

Каждая декада элементов сравнения состоит из выпрямителя и усилителя постоянного тока УПТ на двух германиевых триодах П13 и П9 (рис. 3). На входе УПТ включены электромагнитные реле. Стабильность работы элементов сравнения достигнута за счет того, что релейный элемент работает лишь, когда величина сигнала на его выходе превысит величину опорного напряжения $U_{оп}$ (рис. 6).

Все элементы сравнения выполняются идентично. Развязка входных цепей элементов сравнения осуществляется за счет использования входного трансформатора с девятью обмотками.

Усилитель блока прямого сравнения представляет собой ламповый или полупроводниковый усилитель, охваченный для повышения стабильности коэффициента передачи отрицательной обратной связью.

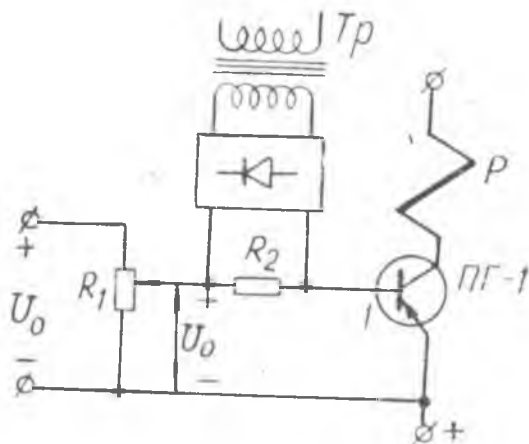


Рис. 6.

Разработка цифровых вольтметров прямого уравнивания привела к созданию двух схем.

1. Цифровой электро-механический вольтметр прямого уравнивания с системой поправок в цепи элементов сравнения ВАВ-1.

Прибор может быть использован для изменения постоянных напряжений с высокой степенью точности в заводских и лабораторных условиях. При некотором изменении схемы такой вольтметр применяется в качестве преобразователя аналоговых величин в цифровые в математических моделирующих установках.

Внешний вид прибора изображен на рис. 7.



Рис. 7.

Технические характеристики прибора

1. Пределы измерения 0—10 в, 0—100 в, 0—1000 в постоянного напряжения.

2. Основная погрешность измерения $\pm 0,1\%$; ± 1 знак.

3. Время одного измерения порядка 0,3 сек.

4. Имеется автоматический выбор и сигнализация полярности измеряемого напряжения;

5. Питание от сети 220 в $\pm 10\%$.

6. Входное сопротивление 1 мом.

II. Квазиследящий электромеханический цифровой вольтметр прямого уравнивания с системой поправок в цепи компенсации схемы ВАБ-2.

Прибор выполняет операции, аналогичные отмеченным выше, отличаясь более высоким быстродействием и надежностью в работе. Отличие построения данного вольтметра состоит в том, что при срабатывании основного реле в измерительную схему подключается необходимое компенсирующее напряжение и одновременно дополнительная цепь, с которой может быть снято компенсирующее напряжение, уменьшенное на единицу декады, а также в том, что вместо системы вспомогательных реле (по 9 в каждой декаде), в прибор введен общий для всех декад канал поправок, включающий в себя преобразователь напряжения, усилитель-ограничитель, фазочувствительный каскад и реле поправок, по одному на каждую декаду. Контакты этих реле при введении поправок путем подключения дополнительных цепей уменьшают на единицу данной декады величину компенсирующего напряжения и показание отсчетного устройства. Для расширения возможностей вольтметра введен квазиследящий режим работы, для чего элементы сравнения последней (младшей декады) выполняются без устройств самоблокировки и поправок и, кроме того, введены концевые реле, которые при выходе значения U_x за пределы диапазона последней декады обеспечивают автоматическое повторение всего цикла измерения. Последняя схема вольтметра имеет принципиально предельно достижимое для электромеханических цифровых приборов быстродействие, большую простоту за счет значительного сокращения количества электромагнитных реле, удобство в эксплуатации и малую изнашиваемость элементов. Блок-схема вольтметра изображена на рис. 8.

Технические характеристики прибора

1. Пределы измерения 0—10 в, 0—100 в, 0—1000 в постоянного напряжения.

2. Основная погрешность измерения $\pm 0,1\%$;

3. Время одного измерения 50—100 мсек;

4. Имеется возможность прямого слежения в пределах изменения U_x до 1% от $U_{x, \max}$ при скорости слежения 10—20 мсек на один знак;

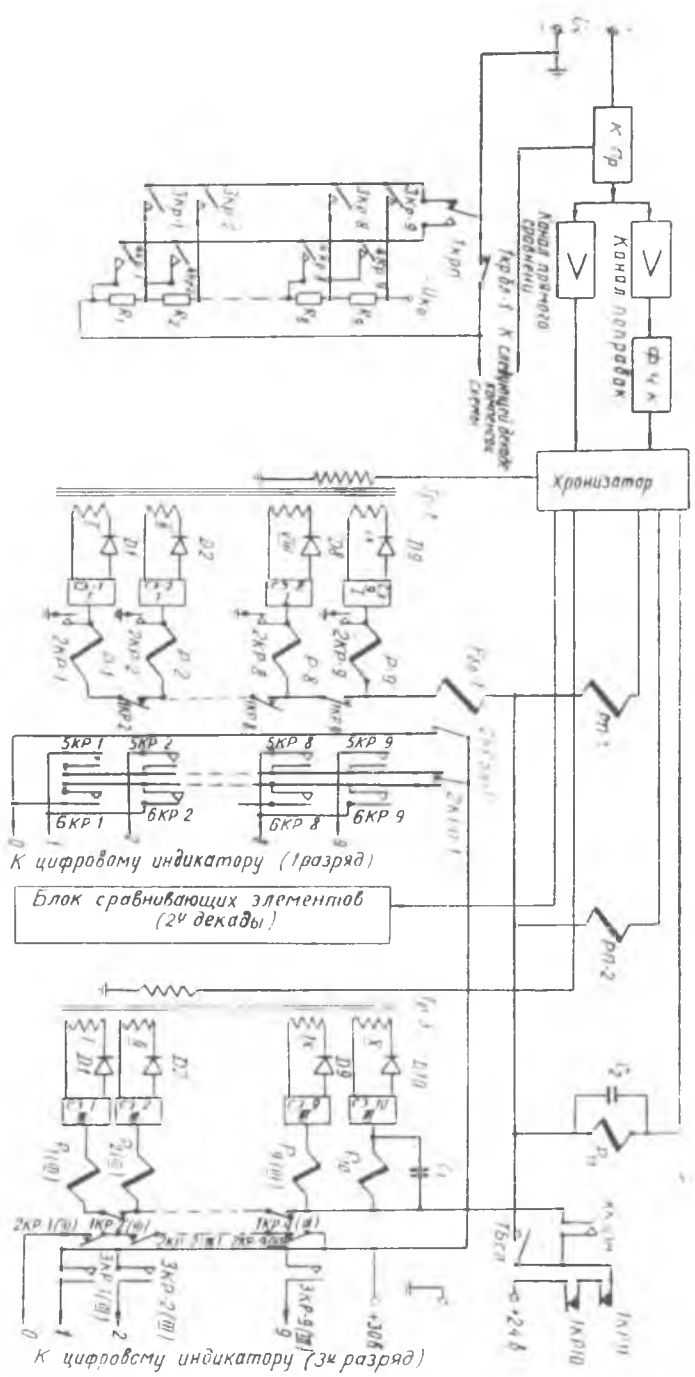


Рис. 8.

5. Имеется возможность квазиследящего режима при изменении U_x свыше 1% от $U_{x_{max}}$ при скорости слежения около 100 мсек на каждый цикл;

6. Имеется автоматический выбор и сигнализация полярности измеряемого напряжения;

7. Питание от сети 220 в $\pm 10\%$;

8. Входное сопротивление 1 мом.

Исследования метода прямого уравнивания применительно к цифровым электромеханическим вольтметрам постоянного тока позволяют сделать следующие выводы:

1. Метод прямого уравнивания в цифровых вольтметрах позволяет получить наивысшее быстродействие при одинаковой степени точности и степени автоматизации основных операций прибора, чем при любых других методах (развертывающего или следящего уравнивания).

2. Степень сложности схем примерно одинакова со схемами, основанными на других методах уравнивания.

3. Квазиследящий режим при методе прямого уравнивания по сравнению со следящим имеет неоспоримые преимущества.

4. Принципы построения цифровых вольтметров прямого уравнивания уже сейчас могут быть использованы для создания промышленных образцов приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Шляднн. «Быстродействующий электромеханический цифровой вольтметр». Журнал «Измерительная техника» № 4, 1961 г.
2. Описание авторского свидетельства № 137187.