# МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ, КУЛЬТУРЫ И ЗДРАВООХРАНЕНИЯ

# РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

# ВУЗ АВИЭК

### ФАКУЛЬТЕТ ИНФОРМАТИКИ

ДИСЦИПЛИНА: «Стандартизация и измерительные технологии»

### *КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА*: «АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ.»

Выполнил:

Ст-т гр. ЗПОС-96-1

Гринев М.В.

Принял:

Доцент, к.т.н.

Нурманов М.Ш.

### 

Алматы 2000 г.

# ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМИ АНАЛОГОВЫМИ ВОЛЬТМЕТРАМИ

Электронные аналоговые вольтметры являются первым приме­ром электронных измерительных приборов, рассматриваемых в курсе. Среди них встречаются как вольтметры прямого преобразо­вания, так и вольтметры сравнения. Рассмотрим принцип работы, структурные схемы и основные функциональные узлы аналоговых вольтметров прямого преобразования и сравнения.

### АНАЛОГОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ ПРЯМОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Структурная схема электронного аналогового вольтметра пря­мого преобразования соответствует типовой схеме рис. 2.1 и, как видно из рис. 3.13, в самом общем случае включает входное уст­ройство (ВУ), на вход которого подается измеряемое напряжение *Ux,* ИП и магнитоэлектрический прибор, применяемый в качестве ИУ.

*Входное устройство* представляет в простейшем случае дели­тель измеряемого напряжения — аттенюатор, с помощью которого расширяются пределы измерения вольтметра. Помимо точного де­ления *Ux,* ВУ не должно снижать входной импеданс вольтметра, влияющий, как уже неоднократно подчеркивалось, на методическую погрешность измерения *Ux-* Таким образом, использование ВУ в виде аттенюатора является, в дополнение к добавочным



Р и с. 3.13. Обобщенная структурная схе­ма аналогового вольтметра прямого пре­образования.

сопротивлениям и измерительным трансформаторам напряжения, еще од­ним способом расширения пределов измерения вольтметров. Имен­но этот способ применяется в электронных вольтметрах и других радиоизмерительных приборах.

В качестве ИП в вольтметрах постоянного тока (В2) применя­ется усилитель постоянного тока (УПТ), а в вольтметрах перемен­ного и импульсного тока (ВЗ и В4) —детектор в сочетании с УПТ или усилителем переменного тока. Более сложную структуру имеют преобразователи в вольтметрах остальных видов. В частности, преобразователи селективных вольтметров (В6) должны обеспе­чить, помимо детектирования и усиления сигнала, селекцию его по частоте, а преобразователи фазочувствительных вольтметров (В5) — возможность измерения не только амплитудных, но и фа­зовых параметров исследуемого сигнала.

Структурная схема аналогового вольтметра постоянного тока соответствует обобщенной схеме рис. 3.13. Основным функциональ­ным узлом таких вольтметров является УПТ. Современные вольт­метры постоянного тока разрабатываются в основном как цифро­вые приборы.

Вольтметры переменного и импульсного тока в зависимости от назначения могут проектироваться по одной из двух структур­ных схем (рис. 3.14), различающихся типом ИП. В вольтметрах первой модификации (рис. 3.14, *а)* измеряемое напряжение *Ux^* преобразуется в постоянное напряжение *Ux=,* которое затем изме­ряется вольтметром постоянного тока. Наоборот, в вольтметрах второй модификации (рис. 3.14, *б)* измеряемое напряжение сначала усиливается с помощью усилителя переменного тока, а затем де­тектируется и измеряется. При необходимости между детектором и ИУ может быть дополнительно включен УПТ.

Сравнивая структурные схемы рис. 3.14, можно еще до рас­смотрения схемных решений их функциональных узлов сделать определенные выводы в отношении свойств вольтметров обеих мо­дификаций. В частности, вольтметры первой модификации в отно­шении диапазона частот измеряемых напряжений не имеют таких ограничений, как вольтметры второй модификации, где этот параметр зависит от полосы пропускания усилителя переменного тока. Зато вольтметры второй модификации имеют высокую чувствитель­ность. Из курса «Усилительные устройства» известно, что с по­мощью усилителя переменного тока можно получить значительно больший коэффициент усиления, чем с помощью УПТ, т. е. про­ектировать микровольтметры, у которых нижний предел *Ux^.* огра­ничивается собственными шумами усилителя. За счет изменения



Рис. 3.14. Структурные схемы аналоговых вольтмет­ров переменного и импульсного тока:

а—с детектором на входе; б — с усилителем переменного то­ка на входе.

коэффициента деления ВУ и коэффициента усиления усилителей диапазон измеряемых напряжений может быть большим у вольтмет­ров обеих модификаций.

Тип детектора в структурных схемах рис. 3.14 определяет при­надлежность вольтметров обеих модификаций к вольтметрам амплитудного, среднеквадратического или средневыпрямленного на­пряжения. При этом вольтметры импульсного тока (В4) проекти­руются только как вольтметры первой модификации, чтобы избе­жать искажений формы импульсов в усилителе переменного тока. При измерении напряжения одиночных и редко повторяющихся им­пульсов применяются либо диодно-емкостные расширители им­пульсов в сочетании с детекторами, либо амплитудно-временное преобразование импульсов, характерное для цифровых вольтмет­ров.

Рассмотрим теперь типовую структурную схему селективных вольтметров, которые используются при измерении малых гармо­нических напряжений в условиях действия помех, при исследова­нии спектров периодических сигналов и в целом ряде других слу­чаев. Как видно из рис. 3.15, вольтметр представляет собой по существу супергетеродинный приемник, принцип работы которого поясняется в курсе «Радиотехнические цепи и сигналы».

Частотная селекция входного сигнала осуществляется с помо­щью перестраиваемого гетеродина, смесителя (См) и узкополосного усилителя промежуточной частоты (УПЧ), который обеспечи­вает высокую чувствительность и требуемую избирательность. Если избирательность недостаточна, может быть применено двукратное, а иногда и трехкратное преобразование частоты. Кроме того, в се­лективных вольтметрах обязательно наличие системы автоматиче­ской подстройки частоты и калибратора. *Калибратор —* образцовый

источник (генератор) переменного напряжения определенного уровня, позволяющий исключить систематические, погрешности из-за изменения напряжения гетеродина при его перестройке, измене­ния коэффициентов передачи узлов вольтметра, влияния внешних факторов и т. д. Калибровка вольтметра производится перед изме­рением при установке переключателя П из положения 1 в положе­ние *2.*

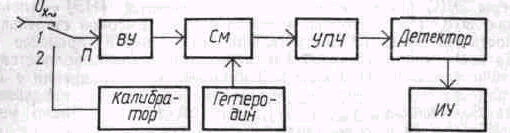


Рис. 3.15. Структурная схема селективного вольтметра.

В заключение отметим, что в одном приборе нетрудно совмес­тить функции измерения постоянных и переменных напряжений, а с помощью дополнительных функциональных узлов и соответст­вующих коммутаций (по аналогии с выпрямительными приборами) образовать комбинированные приборы, получившие название уни­версальных вольтметров (В7). Современные типы таких вольтмет­ров, как правило, проектируются в виде цифровых приборов, что позволяет дополнительно расширить их функциональные возмож­ности и повысить точность. В связи с этим особенности построения структурных схем универсальных вольтметров будут рассмотрены в работах коллег.

### АНАЛОГОВЫЕ ВОЛЬТМЕТРЫ СРАВНЕНИЯ



Рис. 3.16. Схема измерительного по­тенциометра.

Электронные аналоговые вольтметры сравнения в большин­стве своем реализуют наиболее распространенную модификацию метода сравнения — нулевой метод. Поэтому чаще они называются *компенсационными* вольтметрами. По сравнению с вольтметрами прямого преобразования это бо­лее сложные, но и, как подчерки­валось ранее более точные при­боры. Кроме того, из схемы рис. 2.2 видно, что в момент ком­пенсации ΔХ=0 и прибор не по­требляет мощности от источни­ка *X.* Применительно к компенса­ционным вольтметрам это озна­чает возможность измерения не только напряжения, но и ЭДС ма­ломощных источников. В практи­ке электрорадиоизмерений подоб­ные измерения выполняются как с помощью электронных компен­сационных вольтметров, так и электромеханических. Для пояснения применения нулевого метода при измерении ЭДС и напряжения рассмотрим вначале классиче­скую схему электромеханического компенсатора постоянного тока, представленную на рис. 3.16.

Одним из основных функциональных узлов любого компенсатора является высокоточный переменный резистор *R,* по шкале которого отсчитывают измеря­емое значение ЭДС *(Ех)* или напряжения *(Ux).* Поэтому компенсаторы принято называть по ГОСТ 9245—79 измерительными *потенциометрами.* В качестве об­разцовой меры ЭДС применяется *нормальный элемент* (НЭ) — электрохимиче­ский источник, ЭДС *(Еа)* которого известна с очень высокой степенью точности. Однако емкость НЭ невелика, и длительное сравнение в процессе измерений *Ex(Ux)* с *Ен* невозможно. Поэтому схема потенциометра дополняется вспомога­тельным источником ЭДС (Еo) большой емкости. Для сравнения с *Ex(Ux)* ис­пользуется падение напряжения на образцовом резисторе *Rн.,* создаваемое током от источника *Eо—*рабочим током (Iр), который предварительно устанавлива­ется. Таким образом, процесс измерения *Ex{Ux)* должен состоять из двух этапов.

На первом этапе устанавливается требуемое значение Iр. Для этого пере­ключатель устанавливается в положение 1 и с помощью потенциометра *Rp* до­биваются нулевого показания индикатора И (как правило, магнитоэлектрический гальванометр). Как видно из рис. 3.16, этому соответствует *IpRн=Eн,* т. е. ра­бочий ток Iр, который далее должен оставаться постоянным, будет воспроизво­дить в процессе измерений значение *Ен.*

На втором этапе измеряют значение Ex(Ux). Для этого переключатель пере­водится в положение *2,* и изменением сопротивления потенциометра *R* вновь до­биваются нулевого показания И. При Iр = const этому соответствует *Ex (Ux)* = *IpR,* т. е. искомое значение *Ex(U^}^.R* и может быть отсчитано по шкале *R.*

Таким образом, метрологические характеристики измерительных потенцио­метров постоянного тока определяются параметрами НЭ, образцовых резисто­ров, индикатора и источника *Еу.* В качестве НЭ применяются насыщенные и не­насыщенные обратимые гальванические элементы, положительный электрод которых образуется ртутью, а отрицательный — амальгамой кадмия. Классы точности НЭ регламентируются ГОСТ 1954—82 в пределах 0,0002...0,02 и опре­деляют класс точности потенциометра в целом. Потенциометр *R* выполняется по специальной схеме, обеспечивающей постоянство /р при изменении *R* и необхо­димое число знаков (декад) при отсчете *Ex(Ux).* Этим требованиям удовлет­воряют схемы с замещающими и шунтирующими декадами.

Измерительные потенциометры могут использоваться и для измерения пере­менных напряжений. Однако компенсирующее напряжение необходимо в этом случае регулировать не только по модулю, но и по фазе. Поэтому такие потен­циометры имеют более сложную схему, чем потенциометры постоянного тока, а по точности значительно уступают им из-за отсутствия на переменном токе образцовой меры, аналогичной по своим характеристикам НЭ. В практике электрорадиоизмерений они полностью вытеснены электронными компенсационными вольтметрами.

В компенсационных вольтметрах измеряемое напряжение (по­стоянное, переменное, импульсное) сравнивается с постоянным компенсирующим напряжением, которое в свою очередь точно измеряется вольтметром постоянного тока и является мерой *Ux.* Типовая структурная схема такого вольтметра приведена на рис. 3.17.

Как видно из рис. 3.17, основу вольтметра составляет компен­сационный ИП, состоящий из измерительного диода *V с* нагрузкой *R,* регулируемого источника постоянного компенсирующего напря­жения -Ек, усилителя и индикатора с двумя устойчивыми состояниями. При отсутствии *Ux* индикатор, реализуемый с помощью

функциональных узлов находится в первом устойчивом состоянии, а при некотором пороговом значении переходит во второе состояние. Процесс измерения *Ux* как раз и сводится к постепенному увеличению *Ек* до тех пор, пока индика­тор не перейдет во второе устойчивое состояние. Значение *Ек,* со­ответствующее моменту перехода, измеряется вольтметром посто­янного тока и является мерой *Ux.*

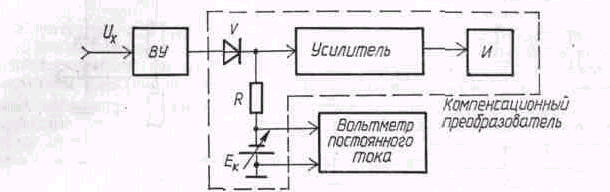


Рис. 3.17. Структурная схема компенсационного вольт­метра.

В сочетании с другими схемны­ми решениями (применение индикатора с малым пороговым напряжением, лампового измерительного диода со стабильной ха­рактеристикой и др.) оказывается возможным проектировать вы­сокоточные компенсационные вольтметры.

Недостаток рассмотренной схемы — необходимость установки *Ей* вручную. Поэтому в большинстве вольтметров схему ИП услож­няют, обеспечивая автоматическую компенсацию *Ux* и *Ек.* Авто­компенсационные вольтметры являются прямопоказывающими приборами и более удобны в эксплуатации.

### ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ АНАЛОГОВЫХ ВОЛЬТМЕТРОВ

Рассмотрим схемные решения основных функциональных узлов, определяю­щих метрологические характеристики аналоговых вольтметров. Большинство этих узлов применяются и в других видах электронных измерительных приборов.

## Входное устройство

Как уже указывалось выше, ВУ предназначено для расширения пределов измерения вольтметра. В простейшем случае оно представляет собой аттенюа­тор, выполненный по резистивной (рис. 3.18, а), емкостной (рис. 3.18, б) или ком­бинированной (рис. 3.18, в) схемам.

Наиболее простой и универсальной (для U*х=* и U*x~)* является схема, пред­ставленная на рис. 3.18, а, но на высоких частотах существенное влияние начи­нают оказывать паразитные емкости. Поэтому на высоких частотах переходят либо к емкостной схеме, либо к комбинированной, которая при *R1C1 = R2C2* ока­зывается частотно-компенсированной (коэффициент деления *k* = *R2/(R1 + Р2),* как и для схемы, изображенной на рис. 3.18, а).

Выполнение остальных требований и прежде всего обеспечение высокого входного сопротивления и минимальной входной емкости вольтметра приводит в ряде случаев к усложнению структуры ВУ. Наиболее универсальным и часто применяемым в современных вольтметрах переменного тока является ВУ, струк­турная схема которого представлена на рис. 3.19.

Принципиальной особенностью данной схемы является изменение Uв с помощью низкоомного резистивного аттенюатора с постоянным входным и выходным импедансом. Это повышает точность измерения *Ux~,* но требует введения в структу­ру ВУ преобразователя импеданса (ПИ), обеспечивающего трансформацию высо­кого входного сопротивления вольтметра в малое входное сопротивление атте­нюатора. В качестве ПИ наиболее часто используют повторитель напряжения на полевом транзисторе с глубокой отрицательной обратной связью. С помощью

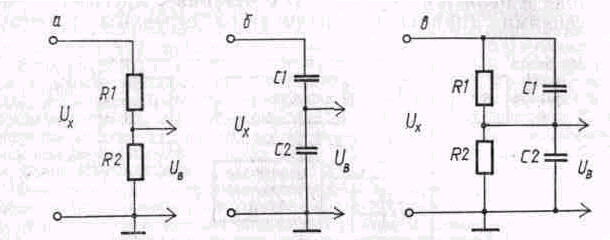


Рис. 3.18. Схемы аттенюаторов вольтметров:

а—на резисторах; б — на конденсаторах; в — комбинированная.

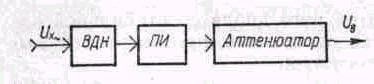


Рис. 3.19. Структурная схема уни­версального входного устройства.

входного делителя напряжения (ВДН) предусматривается дополнительная воз­можность расширения пределов измерения вольтметра. ВДН представляет собой фиксированный делитель резистивно-емкостного типа (см. рис. 3.18, *в)*

На высоких частотах входное сопротивление вольтметра уменьшается, а входная емкость и индуктивности проводников образуют последовательный ко­лебательный контур, который на резонансной частоте имеет практически нулевое сопротивление. Для нейтрализации этих эффектов ПИ конструктивно выполня­ется как выносной *пробник* с ВДН в виде насадки.

## Усилители

Усилители постоянного тока, как видно из структурных схем (см. рис. 3.13 и 3.14, о), обеспечивают получение мощности, достаточной для приведения в дей­ствие ИМ магнитоэлектрического прибора, и согласование входного сопротивле­ния ИУ с выходным сопротивлением ВУ или детектора. К УПТ предъявляются два основных требования: высокое постоянство коэффициента усиления и пре­небрежимо малые флюктуации выходной величины при отсутствии *Ux=* (Дрейф нуля). Поэтому все практические схемы УПТ имеют глубокую отрицательную обратную связь (ООС), обеспечивающую стабильную работу их и нечувствитель­ность к перегрузкам. Радикальными методами борьбы с дрейфом нуля являются его периодическая коррекция, а также преобразование *Uх=* в переменное напря­жение с последующим усилением и выпрямлением этого напряжения.

Усилители переменного тока в соответствии со своим функциональным на­значением (см. рис. 3.14, б) должны иметь высокую чувствительность, большое значение и высокую стабильность коэффициента усиления, малые нелинейные искажения и широкую полосу пропускания (за исключением УПЧ селективного вольтметра). Удовлетворить этим противоречивым требованиям могут только многокаскадные усилители с ООС и звеньями для коррекции частотной харак­теристики. В некоторых случаях применяются логарифмические усилители для получения ^линейной шкалы в децибелах. Если ставится задача минимизации аддитивной погрешности вольтметра, усилители могут быть двухканальными с усилением основного сигнала и сигнала, корректирующего аддитивную погреш­ность. Для расширения функциональных возможностей многие вольтметры име­ют специальный выход усилителя и могут использоваться как широкополосные усилители. Более того, усилители могут выпускаться как самостоятельные из­мерительные приборы, образуя подгруппу У.

Детально усилители постоянного и переменного тока рассматриваются в курсе «Усилительные устройства».

## Детектор

Тип детектора определяет, как уже указывалось, принадлежность вольтмет­ров переменного тока к вольтметрам амплитудного, среднеквадратического или средневыпрямленного напряжения. В соответствии с этим сами детекторы клас­сифицируются следующим образом: по параметру *Ux~^* которому соответствует ток или напряжение в выходной цепи детектора: пиковый детектор, детекторы среднеквадратического и средневыпрямленного значений напряжения; по схеме входа: детекторы с открытым и закрытым входом по постоянному напряжению;

по характеристике детектирования: линейные и квадратичные детекторы.

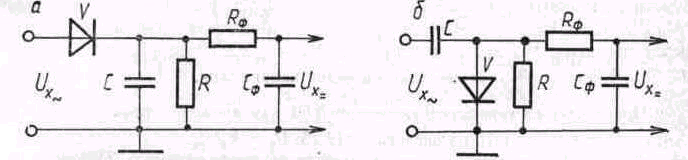


Рис. 3.20. Схемы пикового детектора:

А — с открытым входом; *Б — с* закрытым входом.

*Пиковый детектор —* это детектор, выходное напряжение которого непосред­ственно соответствует t/max или <7min *(Ов* или *Us).* Пиковый детектор относит­ся к линейным и может иметь открытый (рис. 3.20, а) или закрытый (рис. 3.20, б) вход по постоянному напряжению.

Принцип работы пиковых детекторов специфичен и заключается в заряде конденсатора С через диод *V* до максимального (пикового) значения Ux~*,* кото­рое затем запоминается, если постоянная времени разряда С (через *R)* значитель­но превышает постоянную времени заряда. Полярность включения *V* определяет соответствие Ux=, либо *Umax(Uв),* либо Umin(Uн), а возможные пульсации U*х=* сглаживаются цепочкой *Рф,* Сф. Если детектор имеет открытый вход, U*х=* определяется суммой U и *Uв(Uн),* т. е. соответствует Umax (Umin) При закрытом входе U*х=* соответствует *Uв(Uн).* Если же *Ux~* не содержит посто­янной составляющей, то схемы, изображенные на рис. 3.20, а, б, идентичны, а U*х=* соответствует *Um*. В некоторых случаях применяют двухполупериодные пи­ковые детекторы с удвоением напряжения, позволяющие прямо измерять значе­ние размаха напряжения.

Существенным достоинством пиковых детекторов являются большое входное сопротивление (равное *R/2* для схемы на рис. 3.20, *а* и *R/3—*для схемы на рис. 3.20, *б)* и наилучшие по сравнению с другими типами детекторов частотные свойства. Поэтому пиковые детекторы наиболее часто применяют в вольтметрах первой модификации (см. рис. 3.14, о), конструктивно оформляя совместно с ВУ в виде выносного пробника. В этом случае по кабелю, соединяющему пробник с прибором, передается *Uх=.*

*Детектор среднеквадратического значения—*это преобразователь переменно­го напряжения в постоянный ток (напряжение), пропорциональный *U2ск .* Харак­теристика детектирования в этом случае должна быть квадратичной, а при на. личии U- необходим детектор с открытым входом. В современных типах вольт­метров применяются в основном квадратичные детекторы с термопреобразовате­лями, аналогичными преобразователям термоэлектрических амперметров. Основ­ным недостатком их, как отмечалось ранее, является квадратичный характер шкалы прибора. В вольтметрах этот недостаток устраняется применением диф­ференциальной схемы включения двух (или более) термопреобразователей, как показано на рис. 3.21.

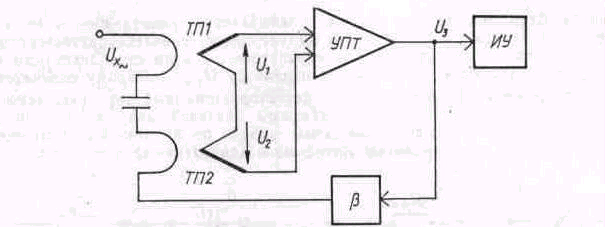


Рис. 3.21. Структурная схема детектора среднеквад­ратического значения напряжения.

При подаче на термопреобразователь ТП1 измеряемого напряжения *Uх~* выходное напряжение ТП1 по аналогии с (3.26) U1=ktU2ск .

Кроме ТП1, в схеме имеется второй термопреобразователь ТП2, включен­ный встречно с ТП1. На ТП2 подается напряжение обратной связи, поэтому его

выходное напряжение *U2* == ktBU23.

Таким образом, на входе УПТ имеет место результирующее напряжение

U1 - *U2* = kt(U2ск - BU23)

чему соответствует

U3 = kуптkт(U2ск - BU23).

Если параметры схемы выбрать так, чтобы

kуптkт BU23>> U3,

то тогда окончательно *U3 ≡ Uск,* т. е. шкала ИУ будет равномерной.

*Детектор средневыпрямленного значения—* это преобразователь переменного напряжения в постоянный ток, пропорциональный Uсв. Схемно он базируется на двухполупериодном полупроводниковом выпрямителе, рассмотренном при анализе выпрямительных амперметров (см. § 3.4.1). Необходимо, однако, добавить, что линейность характеристики таких детекторов будет тем лучше, чем больше *Uх~* (при малых *Ux~* детектор становится квадратичным). Поэтому детекторы средневыпрямленного значения, как правило, применяют в вольтметрах второй моди­фикации (рис. 3.14, б).