

## МИКРОПРОЦЕССОРЫ, МИКРОЭВМ И ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

### 18.1. ПРОГРАММИРУЕМЫЕ УПРАВЛЯЮЩИЕ ЦИФРОВЫЕ УСТРОЙСТВА. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ

*Программируемые управляющие цифровые устройства* представляют собой универсальные технические средства, применяемые в системах управления различными технологическими процессами. Аппаратные средства таких устройств содержат совокупность взаимосвязанных цифровых устройств различного функционального назначения, реализуемых в виде отдельных или общих интегральных схем. К ним относятся арифметико-логическое устройство, регистры общего назначения, устройство управления, запоминающие устройства, устройство ввода—вывода, генератор тактовых импульсов и др.

*Арифметико-логическое устройство* (АЛУ) — это логический комбинационный автомат в виде набора модулей для выполнения над многоразрядными цифровыми кодами (словами) на своих информационных входах арифметических и логических операций в зависимости от значения цифрового кода (команды) на управляющих входах. Схема АЛУ содержит комбинационные логические устройства (см. подразд. 17.2); генераторы логических функций (см. рис. 17.5), полусумматоры (см. рис. 17.6) и сумматоры (см. рис. 17.7). На рис. 18.1 приведен пример условного обозначения модуля четырехразрядного АЛУ для арифметических и логических операций над входными словами  $A$  и  $B$  в зависимости от сигналов на управляющих входах  $M$ ,  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  и переноса  $P_0$ .

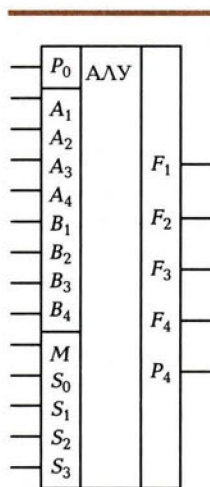


Рис. 18.1

Результат операции определяется совокупностью сигналов на выходах  $F$  и переноса  $P_4$  из старшего разряда. При  $M = 0$  выполняются арифметические (сложение  $A$  и  $B$ , сложение  $A$  и  $B$  с добавлением  $P_0$  в младший разряд и т.д.), а при  $M = 1$  — логические ( $F = \bar{A}$ ,  $F = \bar{B}$  и т.д.) операции. Комбинация сигналов  $S_0$ — $S_3$  определяет, какая именно операция выполняется.

Регистры общего назначения (РОН) представляют собой разновидность программно-доступных сдвиговых регистров (см. рис. 17.12) и позволяют придать работе АЛУ большую универсальность. Обычно их число равно шести, они обозначаются прописными буквами латинского алфавита  $B, C, L, E, H, I$  и имеют 8 разрядов, т.е. 1 байт, каждый.

Покажем применение РОН на следующем примере. Пусть требуется реализовать логическую функцию  $F = x_1x_2 \vee x_2x_3$ . Вначале вычисляется значение  $F_1 = x_1x_2$  с помощью генератора логических функций, настроенного на выполнение этой операции и находящегося в АЛУ. Полученный результат передается в РОН  $B$ . Затем вычисляется и запоминается в РОН  $C$  значение  $F_2 = x_2x_3$ . Далее значения  $F_1$  и  $F_2$  извлекаются из РОН  $B$  и РОН  $C$  и подаются на информационные входы АЛУ для выполнения логического сложения  $F = F_1 \vee F_2$ . Таким образом, выполнение сложных логических и арифметических операций разделяется на микрооперации: подключение сигналов к информационным входам АЛУ, формирование цифрового кода управляющих сигналов и подключение их к управляющим входам АЛУ, запись результатов в РОН и т.д.

Среди программно-доступных регистров особо выделен один, который называется *аккумулятор* и обозначается  $A$  (рис. 18.2).

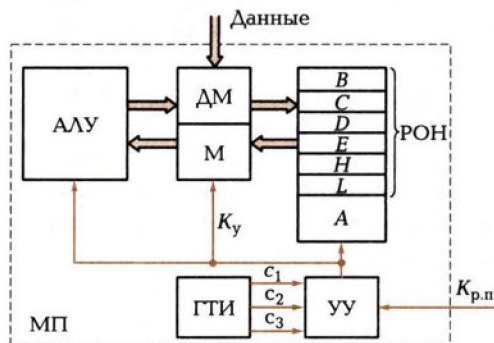


Рис. 18.2

При выполнении арифметических и логических операций в нем хранится один из операндов. Например, при сложении двух чисел одно из них записывается в аккумулятор. После выполнения операции сложения результат записывается снова в аккумулятор, предшествующее содержимое которого стирается. Источник внешних данных, аккумулятор и РОН подключаются к входным и выходным выводам АЛУ с помощью программно-доступных мультиплексоров М и демультимплексоров ДМ. Последовательность взаимодействия всех этих устройств осуществляет устройство управления.

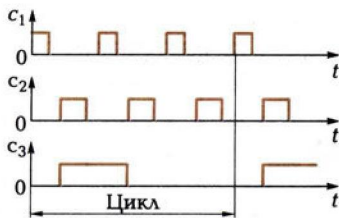


Рис. 18.3

Устройство управления представляет собой логический автомат, который дешифрует содержание команд рабочей программы  $K_{р.п}$  и формирует команды управления  $K_y$  работой АЛУ, РОН и устройств их взаимодействия между собой и источником внешних данных. Микрооперации в АЛУ выполняются последовательно, и каждая из них требует определенного времени, поэтому УУ должно иметь устройство, позволяющее разделить время выполнения операций на интервалы выполнения микроопераций. Это устройство — генератор тактовых импульсов (ГТИ), который обычно формирует тактовые импульсы частотой 0,5—40 мГц на трех  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$  и более выходах. Устройство управления по команде рабочей программы  $K_{р.п}$  в течение нескольких тактов работы ГТИ формирует команды  $K_y$  для выполнения одной микрооперации, затем в течение нескольких других тактов — выполнение следующей микрооперации и т. д. Процесс выполнения одной микрооперации называется *циклом* (рис. 18.3). Таким образом, выполнение одной команды  $K_{р.п}$  происходит за несколько циклов (один—пять), каждый из которых содержит несколько (три—пять) тактов работы ГТИ.

Совокупность устройств, отмеченных на рис. 18.2 внутри штриховой линии, выполненных в виде интегральных схем и размещенных в нескольких корпусах или одном корпусе, называется *микрпроцессором* (МП).

Несмотря на то что МП обладает большими функциональными возможностями, для его эффективного применения необходимы дополнительные устройства, такие как запоминающие устройства (см. подразд. 17.4): постоянные для хранения неизменных частей

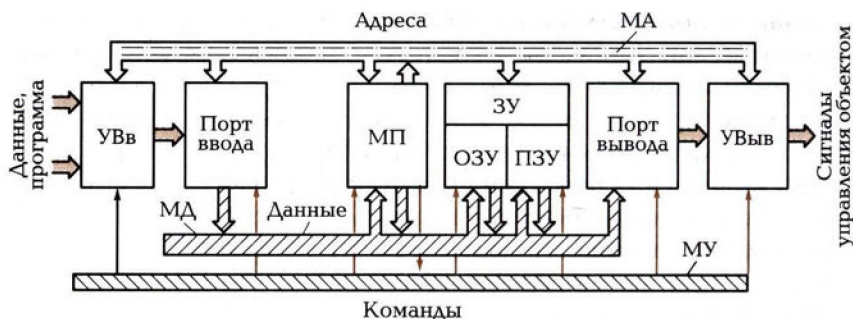


Рис. 18.4

рабочей программы и оперативные для временного хранения данных и программ и устройства ввода и вывода информации. Совокупность МП и дополнительных устройств называется *микропроцессорной системой* (рис. 18.4).

Среди МП-систем различают управляющие микроЭВМ и контроллеры. Четкую грань между ними провести трудно, но обычно контроллеры обладают меньшими функциональными и вычислительными возможностями.

*Устройство ввода (УВв) и вывода (УВыв)* МП-систем представляет собой совокупность усилителей, программно-доступных регистров и ключей для подключения дисплея, принтера и т. п. Каждый регистр устройства ввода — вывода называется *портом*. Порты служат для кратковременного хранения информации в процессе ее ввода и вывода. Совокупность аппаратных и программных средств УВв и УВыв называется *интерфейсом*.

Управляющие микроЭВМ и контроллеры часто содержат для сопряжения с объектом управления датчики, АЦП и ЦАП.

Различные устройства МП-системы и устройства внутри МП соединяются между собой магистралями. Различают *магистраль адресов (МА)* для передачи адресов ячеек запоминающих устройств, портов, устройств ввода и вывода и других, с которыми МП обменивается данными; *магистраль данных (МД)* для передачи данных внутри МП и вне его; *магистраль управления (МУ)* для передачи команд, определяющих последовательность действия МП и направление передачи адресов и данных по МА и МД.

Входная информация делится на *данные*, над которыми выполняются операции, и *программу*, т. е. последовательность команд, описывающих выполняемые операции. Данные и программа задаются совокупностью слов разной длины в виде двоичных чисел с числом разрядов, кратным 8 (1 байт).

Данные УВв поступают в порт ввода. Сигналы управления выбирают необходимый порт, обеспечивают запись данных, временное хранение в порте, а затем их передачу в магистраль данных, состоящую из совокупности  $m$  проводящих линий, обеспечивающих передачу  $m$ -разрядного слова. При магистральной организации связей элементы МП-системы подключаются к единой магистрали через буферные усилители, которые могут находиться в одном из трех состояний:

- передачи данных в магистраль;
- приема данных из магистрали;
- отключения от магистрали.

Сигналами управления одни элементы МП-системы можно поставить в режим передачи информации в магистраль, другие — в режим приема информации, остальные — отключить.

Для того чтобы работа МП не зависела от быстродействия УВв, данные и программа перед ее выполнением записываются в ОЗУ. Объем ОЗУ для управляющей микроЭВМ составляет единицы и десятки килобайт (1 кбайт =  $2^{10}$  байт, т.е. 1024 восьмиразрядных слова). Кроме того, может подключаться внешняя память, например в виде устройств с магнитными дисками.

В управляющей МП-системе, работающей в автономном режиме, программа размещается в запоминающем устройстве перед запуском ее в работу. Данные от датчиков о значениях контролируемых параметров поступают в УВв непрерывно, т.е. в реальном масштабе времени. После их обработки формируются сигналы управления исполнительными механизмами на выходах УВыв.

Последовательность выполнения МП команд программы обеспечивает находящийся в нем *счетчик команд*.

1. Считывается первая команда из запоминающего устройства; номер ячейки запоминающего устройства, где хранится первая команда, заносится в счетчик команд; после выполнения команды число в счетчике автоматически увеличивается на 1, что обеспечивает последовательность выполнения команд программы.

2. Считывается из запоминающего устройства код операции, выполняемой по данной команде, и числа или их адреса (порта или ячейки запоминающего устройства), над которыми команда выполняется.

3. Выполняется команда.

После выполнения команды «считывание» выполняется команда из следующей ячейки запоминающего устройства, и цикл повторяется.

Кроме последовательного выполнения команд основной программы в МП предусмотрено ее прерывание на некоторое время с последующим возвратом. При этом для временного хранения содержимое РОН, адрес команды основной программы, следующей за точкой прерывания, и некоторая другая информация помещаются в область ОЗУ, называемую стек. Стек позволяет, например, организовать вложение программ, когда основная программа вызывает одну подпрограмму, та, в свою очередь, может вызвать другую и т. д.

## 18.2. АНАЛОГОВЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ВОЛЬТМЕТР ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Типовая схема аналогового электронного вольтметра постоянного напряжения (рис. 18.5) содержит инвертирующий усилитель на основе ОУ с отрицательной последовательной обратной связью по напряжению (см. подразд. 15.6) и отсчетное устройство на основе гальванометра магнитоэлектрической системы, шкала которого градуируется в значениях измеряемого напряжения.

Составим систему уравнений по второму закону Кирхгофа для контура 1 с учетом (15.11) и закону Ома для цепи гальванометра

$$\left. \begin{aligned} U_x + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХОУ}} = 0; \\ U_{\text{ВЫХ}} = (R_G + R_A) I_G, \end{aligned} \right\} \quad (18.1)$$

где  $R_G$  и  $R_A$  — сопротивление цепи гальванометра и добавочного резистора;  $I_G$  — ток в цепи гальванометра.

Из системы уравнений (18.1) следует, что ток в цепи гальванометра равен

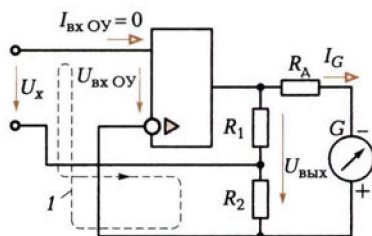


Рис. 18.5

$$I_G = -\frac{R_1 + R_2}{(R_A + R_G)R_2} U_x. \quad (18.2)$$

Подставив формулу (18.2) в формулу (5.4), с учетом полярности подключения вывод гальванометра определим

$$\alpha = \frac{R_1 + R_2}{c_I R_2 (R_A + R_G)} U_x = \frac{1}{c_U} U_x,$$

где  $c_U$  — цена деления шкалы.

Основное достоинство аналогового электронного вольтметра — высокая чувствительность при большом входном сопротивлении (до  $10^{10}$  Ом), наглядность для оператора при считывании показаний на полной шкале отсчетного устройства.

Основной недостаток — невысокий класс точности (не выше 1,5).

### 18.3. ЦИФРОВОЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ВОЛЬТМЕТР ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Структурная схема цифрового вольтметра постоянного напряжения (рис. 18.6) состоит из квантователя 1, преобразователя кодов 2 и отсчетного устройства 3.

*Квантователь* осуществляет квантование измеряемого напряжения  $U_x$  по уровню, т.е. представление его значения цифровым кодом  $N_x$  и дискретизацию по времени, т.е. измерение через равные интервалы времени.

*Преобразователь кодов* преобразует цифровой код  $N_x$  в цифровой код  $N'_x$ , с помощью которого осуществляется управление цифровым отсчетным устройством, а в некоторых случаях — и в цифровой код  $N''_x$  для обмена данными с другими цифровыми устройствами.

Наличие квантователя является принципиальной особенностью цифрового вольтметра постоянного напряжения. Различают кванто-

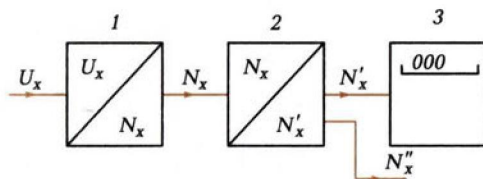


Рис. 18.6

ватели мгновенных (временнйпульсные и кодоимпульсные) и средних за определенный интервал времени (частотно-импульсные и с двухтактным интегрированием) значений измеряемого напряжения. Квантователи среднего значения называются *интегрирующими*. Они малочувствительны к помехам в виде синусоидальных гармоник напряжения, если в интервале времени усреднения измеряемого напряжения содержится целое число их периодов.

Ограничимся знакомством с работой вольтметра на основе временнйпульсного квантователя.

Принцип действия временнйпульсного квантователя иллюстрируют структурная схема и совмещенные временнйе диаграммы одного периода работы ее блоков (рис. 18.7, а и б).

Совместную работу блоков квантователя синхронизирует блок управления, например мультивибратор (см. подразд. 16.5),

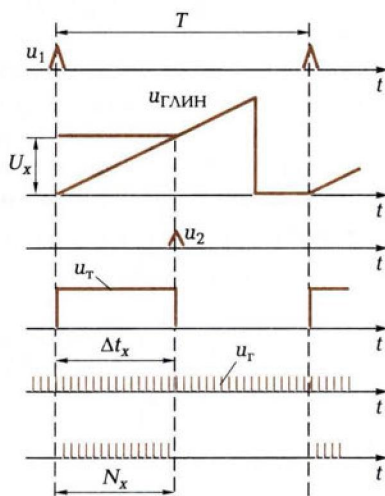
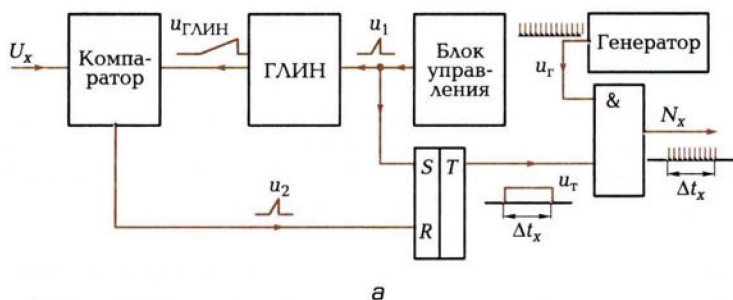


Рис. 18.7

б



на выходе которого формируются положительные импульсы напряжения  $u_1$  с периодом повторения  $T$  — *дискретизация по времени*. Эти импульсы напряжения одновременно включают генератор линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН) и устанавливают  $RS$ -триггер в состояние 1 на его выходе (напряжение  $u_T > 0$ ). Линейно нарастающее напряжение на выходе ГЛИН  $u_{\text{ГЛИН}} = St$  подается на вход компаратора (см. подразд. 16.2) и сравнивается с измеряемым постоянным напряжением  $U_x$ .

Через интервал времени  $\Delta t_x$  от начала запуска ГЛИН напряжение на его выходе становится равным измеряемому напряжению, т.е.  $U_x = S\Delta t_x$ , где  $S$  — *крутизна преобразования*. В этот момент времени на выходе компаратора формируется положительный импульс напряжения  $u_2$ , который устанавливает  $RS$ -триггер в состояние 0 на его выходе, и связь между выходом автономного генератора импульсов напряжения  $u_T$  высокой частоты  $f$  (до 1,5 МГц) и выходом квантователя через логический элемент **И** прекращается. Таким образом, во время импульсного квантователя значение измеряемого напряжения сначала преобразуется в пропорциональное значение интервала времени  $\Delta t_x = U_x/S$ , которое затем преобразуется в пропорциональное число импульсов — *квантование по уровню*

$$N_x = \Delta t_x f = f U_x / S.$$

Так как частота  $f$  велика, а крутизна преобразования  $S$  мала, то даже малым значениям измеряемого напряжения  $U_x$  соответствует большое число импульсов  $N_x$ , что обеспечивает высокие чувствительность и точность измерений.

Основные достоинства цифрового электронного вольтметра — высокие чувствительность и класс точности (до 0,1) при большом входном сопротивлении (до  $10^{10}$  Ом), объективность цифрового отсчета показаний, возможность сопряжения с другими цифровыми устройствами для обработки результатов измерения.

Основной недостаток — утомление оператора при длительном наблюдении за цифровым отсчетным устройством.

## 18.4. ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ

Для регистрации быстропротекающих процессов, а также измерения частоты и динамических характеристик элементов электрических цепей (например, петли гистерезиса ферромагнитного

сердечника (см. рис. 3.12)) служит электронно-лучевой осциллограф. По назначению и принципу действия различают осциллографы непрерывного действия, запоминающие и цифровые.

**Осциллограф непрерывного действия.** Важнейшей частью осциллографа является электронно-лучевая трубка (рис. 18.8), которая состоит из электронного прожектора, отклоняющей системы и экрана. Прожектор создает узкий электронный луч и состоит из подогревного катода, управляющего электрода  $У$  и двух анодов  $A_1$  и  $A_2$ .

Электрическое поле, необходимое для ускорения электронов, обеспечивается высокими положительными потенциалами анодов  $A_1$  и  $A_2$ , представляющих собой полые цилиндры с одной или более диафрагмами, задерживающими сильно уклонившиеся от оси луча электроны. Напряжение между первым анодом  $A_1$  и катодом составляет от одной десятой до одной трети напряжения между вторым анодом  $A_2$  и катодом, равно 600—5000 В. Управляющий электрод  $У$  имеет отрицательный потенциал относительно катода и служит для фокусировки луча и при необходимости его запираания.

Для отклонения электронного луча в горизонтальном и вертикальном направлениях служат две пары отклоняющих пластин. Измеряемое периодическое напряжение подается на вертикально отклоняющие пластины, вследствие чего происходит отклонение луча в вертикальном направлении (по оси ординат). Горизонтально отклоняющие пластины необходимы для развертки измеряемого напряжения во времени (по оси абсцисс). В большинстве случаев на эти пластины подается периодическое напряжение генератора линейно изменяющегося напряжения ГЛИН (см. подразд. 16.5).

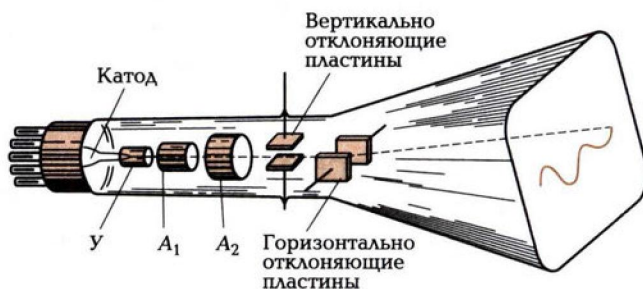


Рис. 18.8

Экран покрыт слоем люминофора, на котором действием движущегося электронного луча образуется светящийся след зависимости измеряемого напряжения от времени.

Структурная схема осциллографа (рис. 18.9) состоит из блоков и ключей, с помощью которых получают различные режимы его работы.

Различают режимы работы осциллографа: с внутренней синхронизацией, с внешней синхронизацией, автоматический и со специальной разверткой.

В режиме с внутренней синхронизацией замкнуты ключи  $K_1$ ,  $K_4$  и напряжение входного сигнала  $u_{вх}$  через аттенюатор, т. е. калиброванный делитель напряжения, подается на входы усилителя и ГЛИН, запуская последний в работу. Напряжение с выхода ГЛИН подается на горизонтально отклоняющие пластины  $x-x$  осциллографа, и след электронного луча на экране начинает двигаться в горизонтальном направлении. Для того чтобы входной сигнал, поступающий после усиления на вертикально отклоняющие пластины  $y-y$ , был расположен в центре экрана, его необходимо задержать на некоторое время  $\Delta t$  с помощью линии задержки (рис. 18.10, а).

Недостатком режима с внутренней синхронизацией является возможное искажение входного сигнала линией задержки.

В режиме с внешней синхронизацией замкнуты ключи  $K_2-K_4$  и запуск ГЛИН осуществляется специальным импульсом синхронизации  $u_{с.и.}$ , который предшествует входному сигналу  $u_{вх}$  на время  $\Delta t$  (рис. 18.10, б). В этом случае линия задержки не нужна и возможно более точное воспроизведение входного сигнала.

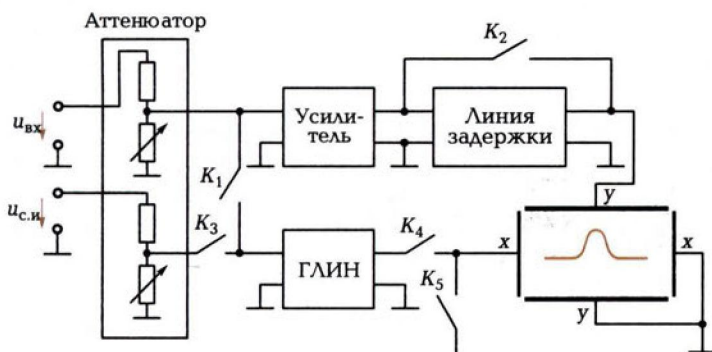


Рис. 18.9

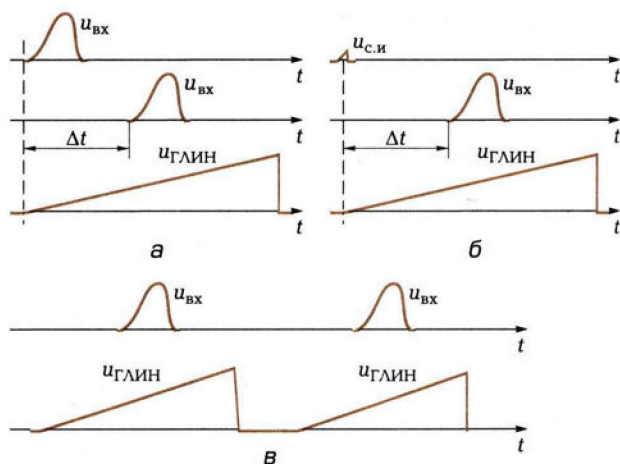


Рис. 18.10

В автоматическом режиме замкнуты ключи  $K_2, K_4$  и на выходе ГЛИН формируется пилообразное напряжение с частотой  $f_T$ . Если частота  $f_T$  совпадает с частотой  $f$  периодического напряжения на входе осциллографа или кратна ей, то на экране осциллографа наблюдается неподвижное изображение (рис. 18.10, в).

В режиме со специальной разверткой замкнуты ключи  $K_2, K_5$  и на горизонтально отклоняющие пластины осциллографа подается какое-либо специальное периодическое напряжение  $u_x$ . Поэтому с помощью осциллографа можно проводить некоторые специальные измерения. Например, если напряжение на пластинах  $x-x$  синусоидальное  $u_x = U_{m,x} \sin 2\pi f_x t$ , то можно измерить частоту  $f$  входного напряжения, если оно также синусоидальное и его частота кратна частоте  $f_x$ . В зависимости от кратности отношения частот  $f/f_x$  на экране осциллографа наблюдаются различные фигуры (рис. 18.11).

Чувствительностью осциллографа называется отношение вертикального отклонения светового пятна на экране в миллиметрах к значению входного напряжения в вольтах. Чувствительность

самой трубки без усилителя относительно низкая 0,5 — 1 мм/В. Однако применение усилителя повышает чувствительность осциллографа до 1 мм/мВ.

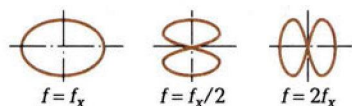


Рис. 18.11

**Осциллограф с запоминающей трубкой.** В запоминающем осциллографе используются два электронных прожектора для записи и воспроизведения исследуемого сигнала. При записи электронный луч наносит по следу своего движения электрические заряды на экране, создавая невидимое изображение исследуемого сигнала.

Воспроизводящий прожектор по запросу оператора преобразует невидимое изображение в светящееся. Возможно построчное преобразование записанного сигнала и представление его совокупностью светящихся точек, координаты которых могут использоваться для цифровой обработки.

Основная область применения запоминающих осциллографов — исследование быстропротекающих однократных процессов.

**Цифровой осциллограф.** В цифровом осциллографе исследуемый непрерывный во времени сигнал представляется на основе аналого-цифрового преобразования (см. подразд. 17.6) с тактовой частотой до нескольких десятков мегагерц последовательностью точек с соответствующими значениями сигнала и времени в цифровом эквиваленте. Цифровые эквиваленты размещаются в ячейках оперативного запоминающего устройства и используются для аппаратной и программной обработки.

Для визуализации изображения применяются различные электронно-лучевые трубки и матричные индикаторные панели с большим числом малогабаритных управляемых световых элементов. Последовательное возбуждение световых элементов с координатами, соответствующими координатам последовательности точек исследуемого сигнала, дает его видимое изображение.

Основные достоинства цифровых осциллографов — высокая точность измерения вследствие исключения усилителей и других устройств обработки непрерывных сигналов, возможность долговременного хранения, оперативного воспроизведения и математической обработки результатов на основе сопряжения с ПК.

Основной недостаток — ограниченная полоса частот вследствие ограниченной тактовой частоты аналого-цифрового преобразования.

Для регистрации значений медленно изменяющихся во времени величин (с частотой до 10 Гц) применяются электромеханические самопишущие приборы. Запись текущего значения регистрируемой величины производится на движущейся бумажной ленте в координатах «измеряемая величина — время». Значение измеряемой величины определяется положением подвижной части измерительного механизма, например магнитоэлектрического.

Для регистрации информации в цифровой и буквенной формах применяются алфавитно-цифровые печатающие устройства, магнитофоны и дисплеи.

### **КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

---

1. Какие основные цифровые устройства входят в состав аппаратных средств программируемых управляющих цифровых устройств?
2. Назовите основные функции арифметико-логического устройства.
3. Из каких основных устройств состоит микропроцессор?
4. Какие составные части образуют микропроцессорную систему?
5. Какие функции в микропроцессорной системе выполняют магистраль адресов, данных и управления?
6. Из каких частей состоит структурная схема электронного цифрового вольтметра?