

Ю. М. ГОРСКИЙ, Ю. П. НОВИКОВ

(Иркутск)

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В ЦИФРОВОЙ КОД ФАЗОВЫХ КООРДИНАТ

Ряд задач технической диагностики, например распознавание аварийных ситуаций в системах с периодическими процессами, специальной локации и т. д., сводится к распознаванию на ЦВМ формы периодических импульсных сигналов и фазовых сдвигов этих сигналов относительно опорных импульсов.

Поскольку при постоянстве формы импульсных сигналов и фазовых сдвигов этих сигналов относительно опорных импульсов период их следования может меняться в значительных пределах, то в качестве основной информации, выводимой на поле рецепторов распознающей машины [1, 2], в этих случаях целесообразно использование фазовых координат, которые представляют собой величины импульсного сигнала в отдельные дискретные моменты времени и фазовые сдвиги этих дискрет относительно опорного импульса.

Отсюда для ввода в ЦВМ информации о периодическом импульсном процессе при решениях указанных выше задач необходимо осуществлять преобразование импульсных сигналов в цифровой код фазовых координат.

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ В ЦИФРОВОЙ КОД ФАЗОВЫХ КООРДИНАТ

Получение фазовых координат периодического импульсного процесса можно производить в два этапа:

а) последовательно осуществляя дискриминацию импульсного сигнала $U_p(t)$ по m эталонным уровням и выполняя для всех моментов равенства величины $U_p(t)$ эталонным уровням $U_{эт1} - U_{этm}$, измерение временных интервалов по отношению к опорному импульсу $U_{оп}$, а также измеряя период следования этих опорных импульсов T , получать значения:

$$\begin{aligned} & t_{11}, t_{21}, \dots, t_{k1}, T_1; \\ & t_{12}, t_{22}, \dots, t_{l2}, T_2; \\ & \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ & t_{1m}, t_{2m}, \dots, t_{am}, T_m, \end{aligned}$$

с работой ЦВМ, т. е. на основе априорной информации об импульсном процессе задавать переменный шаг дискриминации импульсного сигнала и работать в том темпе, который определяется скоростью изменения импульсного процесса и темпом решения задачи на ЦВМ. При этом роль входного устройства в основном сводится к выполнению функций компарирования, накопления информации о временных интервалах и формирования импульсов управления.

В зависимости от программных и конструктивных особенностей ЦВМ, а также специфики решаемых задач возможны три модификации метода преобразования импульсных сигналов в цифровой код фазовых координат:

1) информация от входного устройства об уровнях дискриминации и временных сдвигах сначала накапливается в основном ЗУ ЦВМ, затем производится преобразование временных интервалов в фазовые сдвиги и решение основной задачи;

2) информация от входного устройства об уровнях дискриминации и временных сдвигах накапливается в буферном ЗУ и используется ЦВМ по мере решения основной задачи;

3) информация от входного устройства об уровне дискриминации и временном сдвиге после каждого момента измерения используется для преобразования временного интервала в фазовый сдвиг и решения основной задачи.

В соответствии с этим могут быть разные требования к точности и быстродействию входного устройства, а также к условиям его согласования с ЦВМ.

В случае преобразования импульсных сигналов в цифровой код по первой или второй модификации минимальный временной интервал

между двумя соседними моментами сравнения напряжения импульсного сигнала $U_p(t)$ с одним и тем же эталонным уровнем будет определяться условием

$$\tau_{\min} \geq \Delta t, \quad (6)$$

где Δt — время, необходимое на считывание информации с входного устройства после каждого измерения временного сдвига.

При преобразовании импульсных сигналов в цифровой код по третьей модификации τ_{\min} будет соответствовать выражению

$$\tau_{\min} \geq \Delta t + t_{\text{пр}} + t_p, \quad (6a)$$

где $t_{\text{пр}}$ — время преобразования временного интервала в фазовую координату; t_p — время решения основной задачи на ЦВМ.

Блок-схема преобразователя периодических импульсных сигналов в цифровой код фазовых координат представлена на рис. 1.

Преобразование производится посредством последовательной дискриминации импульсного сигнала $U_p(t)$ эталонными уровнями, которые задаются ЦВМ. В момент равенства напряжения $U_p(t)$ эталонным уровнем формируются команды на измерение временных интервалов.

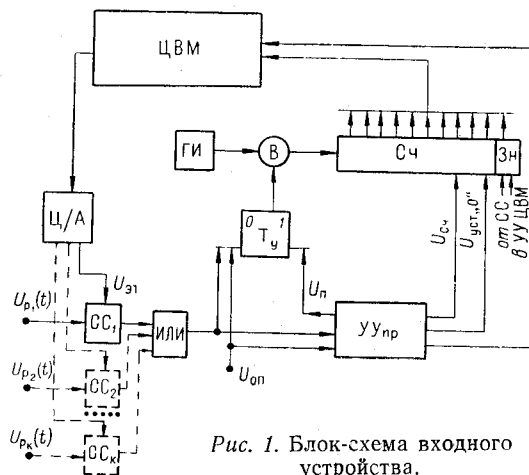


Рис. 1. Блок-схема входного устройства.

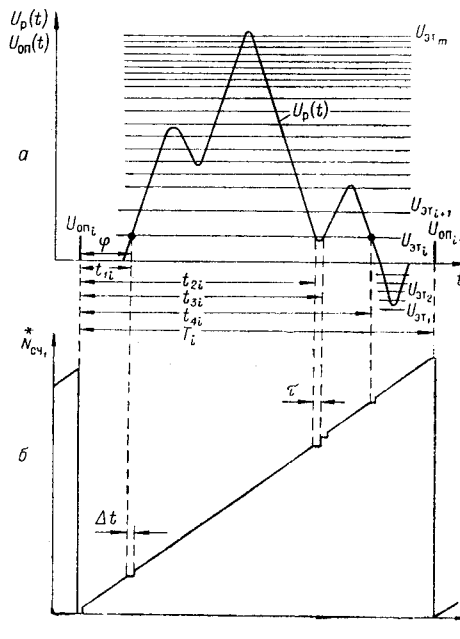
Началом цикла преобразования по i -му уровню является поступление на вход схемы опорного импульса $U_{опi}$, по которому осуществляется выборка из ЗУ ЦВМ кода, соответствующего заданному напряжению эталонного уровня. Этот код посредством преобразователя код — напряжение Ц/А преобразуется в напряжение $U_{эти}$, которое далее поступает на схему сравнения (СС), где и производится дискриминация импульсного сигнала $U_p(t)$. При этом шаг квантования может задаваться переменным на основе априорной информации о форме импульсного сигнала либо изменяться посредством ЦВМ апостериорно в процессе решения задачи. По импульсу пуска $U_{пi}$, вырабатываемому устройством управления преобразователя (УУпр), триггер T_y устанавливается в состояние «1», вследствие чего клапан В открывается и импульсы от генератора тактовых импульсов (ГИ) начинают накапливаться на счетчике (Сч).

Для выявления момента сравнения $U_p(t)$ с $U_{эти}$ используется дифференциальный СС, который положительный импульс вырабатывает при превышении $U_p(t)$ эталонного уровня $U_{эти}$, а отрицательный импульс, если эталонный уровень достигается в процессе уменьшения $U_p(t)$. Тем самым определяется знак производной $\frac{dU_p}{dt}$ в момент сравнения $U_p(t)$ с $U_{эти}$ и триггер знака $T_{зн}$ соответственно устанавливается в положение «0» или «1». При первом равенстве $U_p(t) = U_{эти}$

(рис. 2) в схеме СС вырабатывается импульс $+U_{1i}$, который возвращает триггер T_y в состояние «0», в результате чего поступление импульсов от ГИ на Сч прекращается. Образованный на Сч код временного интервала t_{1i} по импульсу $U_{сч}$ считывается в ЗУ ЦВМ. Далее в УУпр вырабатывается импульс $U_{пi}$, который устанавливает триггер T_y в состояние «1», благодаря чему импульсы от ГИ снова начинают поступать на Сч. Схема работает аналогично и в последующие моменты равенства напряжения импульсного сигнала $U_p(t)$ с эталонным уровнем $U_{эти}$.

Таким образом, прерывание

Рис. 2. Временная диаграмма работы преобразователя импульсных сигналов в цифровой код фазовых координат.



накопления тактовых импульсов в Сч происходит только на время Δt , необходимое для считывания кодов временных интервалов N_{fji}^* . Так как $\Delta t = \text{const}$, то это время можно компенсировать путем добавления в Сч кода, соответствующего Δt .

С приходом опорного импульса $U_{опi+1}$ с Сч считывается код периода следования импульсного сигнала $N_{T_i}^*$, после чего Сч устанавли-

ливается в состояние «0» и начинается новый цикл преобразования, но уже с эталонным уровнем $U_{э_{r_i+1}}$.

Если преобразование производится по первой модификации, то сначала коды временных интервалов $\dot{N}_{t_{ji}}$ накапливаются в ЗУ ЦВМ, затем производится преобразование временных интервалов в фазовые сдвиги $\dot{N}_{\varphi_{ji}}$; при этом в ЦВМ выполняются вычисления:

$$\dot{N}_i = 360 / \dot{N}_{T_i}; \quad (7)$$

$$\dot{N}_{\varphi_{ji}} = \dot{N}_{t_{ji}} \dot{N}_i h_{\perp}, \quad (7a)$$

где $h_{+} < 1$ — коэффициент, компенсирующий средневероятностную погрешность СС при положительном знаке $\frac{d U_p}{dt}$; $h_{-} < 1$ — коэффициент, компенсирующий средневероятностную погрешность СС при отрицательном знаке $\frac{d U_p}{dt}$.

Если преобразование производится по второй модификации, то вычисления (7) и (7a) выполняются по мере решения основной задачи. При преобразовании по третьей модификации вычисления (7) и (7a) выполняются после каждого измерения временного интервала.

Точность преобразования периодического импульсного сигнала в цифровой код фазовых координат можно характеризовать погрешностью дискриминации по уровням и погрешностью квантования по времени.

Погрешность дискриминации по уровню в основном определяется погрешностью схемы сравнения $\epsilon_{СС}$ и погрешностью цифро-аналогового преобразователя $\epsilon_{Ц/А}$

$$\epsilon_{\text{диск}} = \sqrt{\epsilon_{СС}^2 + \epsilon_{Ц/А}^2}. \quad (8)$$

При экстремальных значениях импульсного сигнала возможна ошибка, достигающая

$$\epsilon_{\text{диск (max)}} i = \Delta U_i, \quad (9)$$

где ΔU_i — шаг квантования по i -му уровню.

Погрешность квантования по времени определяется частотой тактового генератора

$$\epsilon_t = \frac{1}{f_{\text{ГИ}}}. \quad (10)$$

Отсюда фазовая погрешность, возникающая за счет погрешности квантования по времени, равна

$$\epsilon_{\varphi} = \epsilon_t \frac{360}{T_i}. \quad (11)$$

Кроме того, имеет место еще фазовая погрешность, возникающая за счет погрешности дискриминации по уровню. Ее приближенно можно оценить как

$$\epsilon_{\Delta\varphi} = \frac{k}{\frac{d U_p}{dt_{ji}}} \frac{\epsilon_{\text{диск}} 360}{T}, \quad (12)$$

где $\frac{dU_p}{dt_{ji}}$ — скорость изменения импульсного сигнала в момент сравнения $U_p(t)$ с $U_{этj}$. Отсюда суммарная погрешность по фазе будет равна

$$\epsilon_{\Sigma\varphi} = \sqrt{\epsilon_{\varphi}^2 + \epsilon_{\Delta\varphi}^2}. \quad (13)$$

ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ А—А_{имп}/Ц И ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Рассмотренная блок-схема преобразователя А_{имп}/Ц периодических импульсных сигналов в цифровой код в основном содержит те же элементы, что и стандартный время-импульсный преобразователь А/Ц постоянного напряжения в цифровой код. Действительно, примерно 70% объема оборудования преобразователя А_{имп}/Ц составляет генератор тактовых импульсов, счетчик импульсов и схемы сравнения. Отсюда имеется возможность совмещения преобразователя А_{имп}/Ц с типовым время-импульсным преобразователем А/Ц. Для этого необходимо лишь к преобразователю А/Ц добавить устройство управления преобразователя А_{имп}/Ц и устройство управления переводом с одного режима работы на другой. Комбинированный преобразователь принципиально можно выполнить таким образом, что он будет по программе переходить с одного рода преобразования на другой и при этом посредством пересчетного устройства менять тактовую частоту ГИ, т. е. возможно преобразование как постоянных напряжений в цифровой код, так и импульсных сигналов.

Рассмотренную блок-схему преобразователя А_{имп}/Ц при добавлении некоторых элементов вычислительного оборудования можно использовать и для осуществления параллельного ввода импульсных сигналов в ЦВМ. Практически это представляет интерес в двух случаях: 1) необходимо осуществлять ввод в ЦВМ нескольких периодических импульсных сигналов, 2) требуется преобразовывать однократные импульсные сигналы.

В первом случае принцип преобразования сохраняется прежним: посредством последовательной дискриминации эталонными уровнями периодических импульсных сигналов и фиксации моментов сравнения напряжения импульсного сигнала с эталонными уровнями. При этом число СС должно быть равно числу одновременно вводимых импульсных сигналов. В этом случае каждый СС должен дополнительно вырабатывать признак, указывающий, с каким импульсным сигналом произошло сравнение $U_{эт}$ (эталонные напряжения, подаваемые на СС, могут быть разными, что исключает необходимость нормирования входных импульсных сигналов).

Для преобразования однократного импульсного сигнала в цифровой код необходимо осуществлять параллельную дискриминацию m эталонными уровнями этого сигнала $U_p(t)$ и измерение временных интервалов между моментами равенства величины $U_p(t)$ с эталонными уровнями $U_{эт1} - U_{этm}$ и опорным импульсом $U_{оп}$, например:

$$t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1m}, t_{2m}, \dots, t_{22}, t_{21}. \quad (14)$$

Преобразование однократного импульсного сигнала $U_p(t)$ в цифровой код фазовых координат требует m схем сравнения, каждая из кото-

рых вырабатывает импульс сравнения $U_p(t)$ с $U_{эти}$ и указывает, с каким эталонным уровнем произошло сравнение $U_p(t)$.

При параллельном преобразовании минимальный временной интервал между моментом сравнения $U_p(t)$ с $U_{эти}$ и моментом сравнения $U_p(t)$ с $U_{эти+1}$ соответствует выражению (6), если преобразование производится по первой или второй модификации. Если же преобразование производится по третьей модификации, то τ_{\min} соответствует выражению (6а). Отсюда вытекают требования к частоте тактового генератора ГИ и ограничения к крутизне фронтов преобразуемых импульсов.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ $A_{\text{имп/Ц}}$ ВО ВХОДНОМ УСТРОЙСТВЕ МАШИНЫ «ДНЕПР»

Функциональная схема ввода в машину «Днепр» периодических импульсных сигналов, в которой используются элементы У, Т, ГК [3] типового время-импульсного преобразователя УСО машины «Днепр», представлена на рис. 3. Преобразование периодического импульсного сигнала $U_p(t)$ осуществляется путем последовательной дискриминации $U_p(t)$ эталонными уровнями, задаваемыми ЦВМ через блок А (преобразователь Ц/А), и измерения временных интервалов t_{ji} , T_i , которые

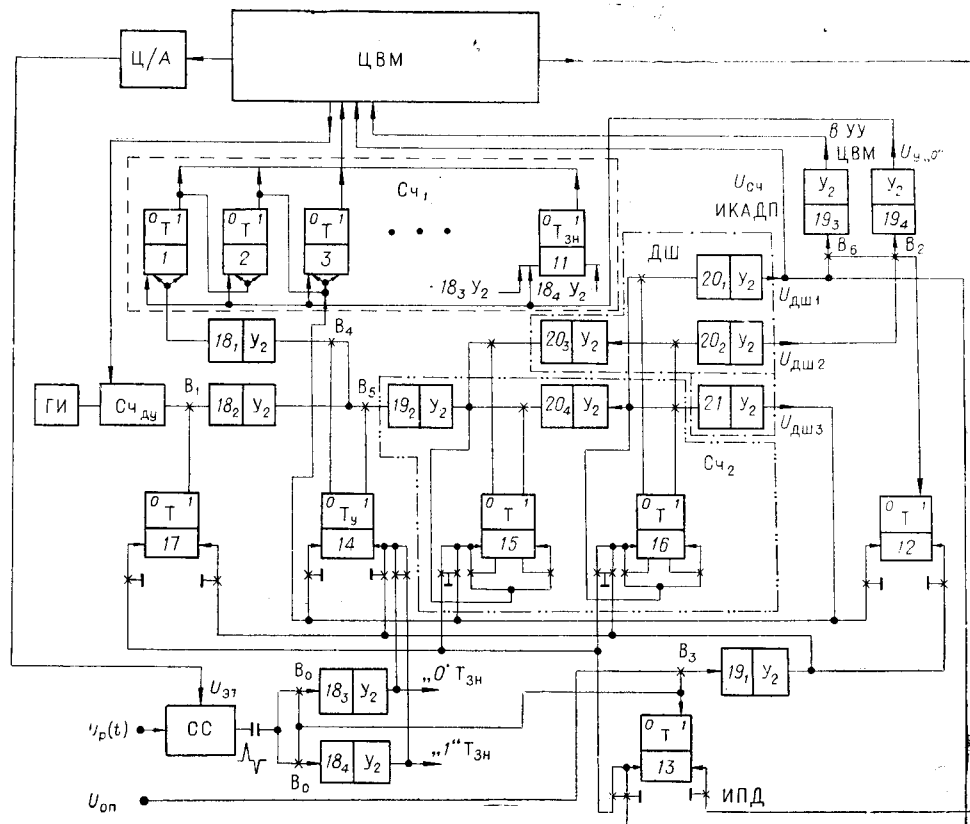


Рис. 3. Функциональная схема преобразователя А/Ц для ЦВМ «Днепр».

вследствие чего вентили B_3 и B_6 открываются, импульсы $U_{дш1}$ поступают на вход преобразователя $A_{имп}/Ц$ устанавливает триггеры T_{12} , T_y в состояние «1», в результате вентили B_2 , B_5 , B_6 открываются, а вентиль B_4 закрывается, тем самым прекращается поступление импульсов от ГИ в $Сч_1$, и они начинают поступать в устройство управления преобразователя $A_{имп}/Ц$. Устройство управления УУпр, обеспечивающее синхронную работу преобразователя $A_{имп}/Ц$ с ЦВМ, содержит счетчик $Сч_2$, потенциалы которого управляют работой дешифратора ДШ (последний вырабатывает импульсы управления: $U_{дш1}$, $U_{дш2}$, $U_{дш3}$).

По импульсу $U_{дш1}$, который является импульсом конца аналого-дискретного преобразования (ИКАДП), осуществляется считывание со $Сч_1$ кода T_{i-1} в ЗУ и установка T_{13} в положение «0»; при этом подается команда в УУ ЦВМ на выборку из ЗУ кода, соответствующего эталонному уровню $U_{эти}$ на выходе преобразователя Ц/А. Импульс $U_{дш2}$ устанавливает $Сч_1$ в состояние «0», а импульс $U_{дш3}$ переводит триггеры T_y , T_{12} , T_{14} и T_{15} , T_{16} в состояние «0», благодаря чему импульсы от ГИ снова начинают поступать в $Сч_1$. Одновременно по импульсу $U_{дш3}$ осуществляется занесение в $Сч_1$ кода коррекции, соответствующего временному интервалу

$$\Delta t = 2^n \frac{1}{f_{ГИ}},$$

где Δt — время остановки счетчика $Сч_1$; n — число разрядов $Сч_2$. Такая коррекция $Сч_1$ производится путем подачи $U_{дш3}$ на счетный вход триггера третьего разряда $Сч_1$, так как в данной схеме $n=2$.

Для выявления момента сравнения $U_p(t)$ с $U_{эти}$ используется СС с дифференцированными выходными импульсами $+U_{ji}$ и $-U_{ji}$, которые соответственно устанавливают триггер знака $T_{3н}$ в состояние «1» или «0». Моменту сравнения $U_p(t)$ с $U_{эти}$ предшествует поступление импульса ИПД в схему преобразователя $A_{имп}/Ц$. Импульс ИПД, который указывает на готовность ЦВМ к приему информации от преобразователя $A_{имп}/Ц$, устанавливает триггер T_y в состояние «1», в результате чего прекращается поступление импульсов ГИ в $Сч_1$ и начинается накопление этих импульсов в $Сч_2$.

В $Сч_1$ фиксируется код временного интервала t_{1i} . Вырабатываемые УУпр импульсы управления $U_{дш1}$, $U_{дш2}$, $U_{дш3}$ производят те же операции, что и в начале цикла — по импульсу $U_{опi}$; только в этом случае после считывания кода t_{1i} $Сч_1$ не переводится в состояние «0» и не производится смены эталонного уровня. Аналогично схема работает и в последующие моменты равенства $U_p(t)$ с $U_{эти}$. С приходом $U_{опi+1}$ со

$Сч_1$ считывается код N_{Ti}^* , после чего $Сч_1$ устанавливается в состояние «0» и начинается преобразование $U_p(t)$ по эталонному уровню $U_{эти+1}$. После определения таким образом временных интервалов по всем эталонным уровням в ЦВМ производятся вычисления по уравнениям (7) и (7а).

УСО машины «Днепр» имеет ГИ, работающий на частоте 8 Мгц, и соответствующий 10-разрядный счетчик. Если работать на указанной частоте, то максимальный период импульсного сигнала, который может быть преобразован, не должен превышать $T=0,125$ мсек. Кроме того, вследствие особенностей программы обращения к УСО, время между двумя соседними моментами равенства $U_p(t)$ с $U_{эт_i}$ или этих равенств относительно $U_{оп}$ должно быть не менее 0,025 мсек, т. е. $\tau_{min} = 0,025$ мсек. При этом обеспечивается абсолютная погрешность преобразования: $\epsilon_{(t)} = 0,125$ мсек, $\epsilon_\varphi = 20'$.

Исходя из практических задач, которые предполагается решать на машине «Днепр», целесообразно тактовую частоту снизить до 250—50 кгц посредством управляемого пересчетного устройства, обозначенного на рис. 3 Сч_{ду}. При этом можно вводить в ЦВМ импульсные сигналы с периодом от 4 до 20 мсек. Обеспечиваемая в этом случае погрешность будет равна $\epsilon_t = 4—20$ мсек. Следует отметить, что ϵ_φ , $\epsilon_{дис}$, τ_{min} остаются прежними. Если преобразуются импульсные сигналы с достаточно большим T , то можно работать по третьей модификации, т. е. после каждого измерения временного интервала осуществлять его преобразование в фазовую координату и решать основную задачу.

В заключение следует отметить, что на базе рассмотренного принципа преобразования периодических импульсных сигналов в цифровой код фазовых координат можно создать цифровой измерительный прибор фазометр-дискриминатор. Такой прибор дает возможность оператору путем многократных измерений получать фазовые координаты периодического импульсного сигнала, по которым затем можно строить его фазовые диаграммы. Созданный в Энергетическом институте СО АН СССР фазометр-дискриминатор рассчитан на частоту входных импульсных сигналов 5—100 гц и амплитуду 0,1—5 в. Получаемая при этом погрешность составляет $\epsilon_\varphi = 1—0,5\%$; $\epsilon_{дис} = 1\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Аркадьев, Э. М. Браверман. Обучение машины распознаванию образов. М., «Наука», 1964.
2. Ю. Л. Барабаш и др. Вопросы статистической теории распознавания. М., «Советское радио», 1967.
3. В. А. Гнатюк и др. Общее техническое описание управляющей машины широкого назначения. Киев, 1962.

Поступила в редакцию
14 декабря 1966 г.,
окончательный вариант —
10 мая 1967 г.