

УДК 621.314–621.391

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ КВАНТУЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ ЦИФРОВОГО ИНТЕГРИРУЮЩЕГО ФАЗОМЕТРА ПО МИНИМУМУ СРЕДНЕКВАДРАТИЧЕСКОЙ ОШИБКИ

А.Н. Борисенко, доктор технических наук, профессор Национального технического университета “Харьковский политехнический институт” (НТУ “ХПИ”)

Е.В. Сосина, ассистент НТУ “ХПИ”, г. Харьков



А.Н. Борисенко



Е.В. Сосина

Исследуется среднеквадратическая погрешность цифрового интегрирующего фазометра и предлагается способ ее уменьшения за счет реализации определенного соотношения между тактовой частотой квантующих импульсов и частотой импульсных последовательностей, между которыми измеряется фазовый сдвиг.

There is examined the mean-square error of the digital integrating phase meter and there is proposed the method of its reduction by means of the implementation of certain correlation between the clock frequency of quantizing pulses and the frequency of pulse patterns between which the phase shift is measured.

Постановка проблемы. Довольно часто на практике приходится измерять угол сдвига фаз между двумя импульсными последовательностями, частоты которых, оставаясь одинаковыми, могут изменяться в несколько раз. Такие задачи возникают, например, в системах автоматического регулирования турбин, двигателей внутреннего сгорания, электроприводов и т.д.

Анализ литературы [1–6] показывает, что тактовая частота в фазометрах постоянна или имеет ряд дискретных значений, не зависящих от частоты следования импульсных последовательностей, между которыми измеряется сдвиг фаз.

Цель работы – найти оптимальную по минимуму среднеквадратической ошибки тактовую частоту фазометра во всем диапазоне частот входных импульсных последовательностей.

Основная часть. На рис. 1 приведена блок-схема аналого-цифрового фазометра, позволяющего определять сдвиг фаз между двумя импульсными последовательностями равных частот, которые могут изменяться [3].

Временные диаграммы, иллюстрирующие работу фазометра, приведены на рис. 2, при этом индекс

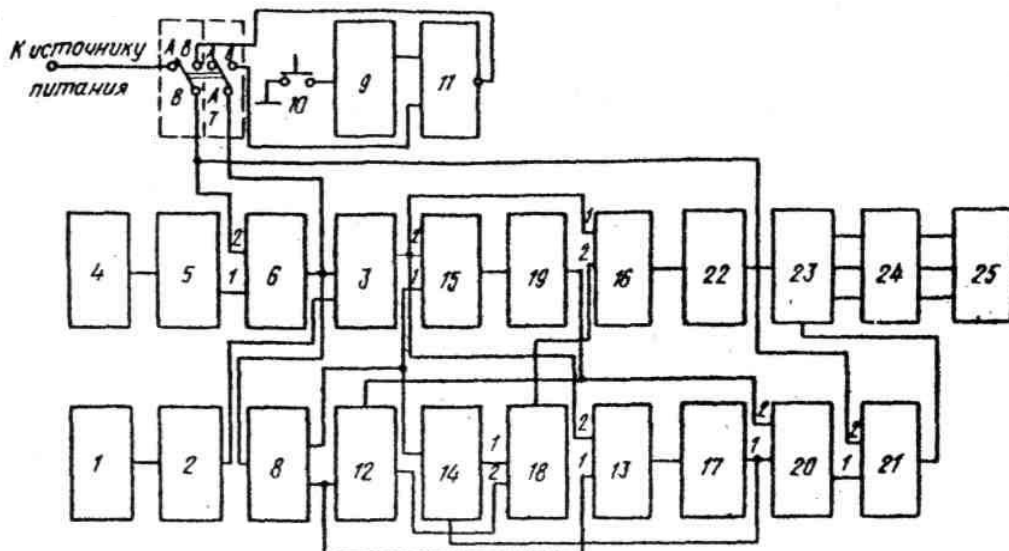


Рис. 1. Блок-схема аналого-цифрового фазометра

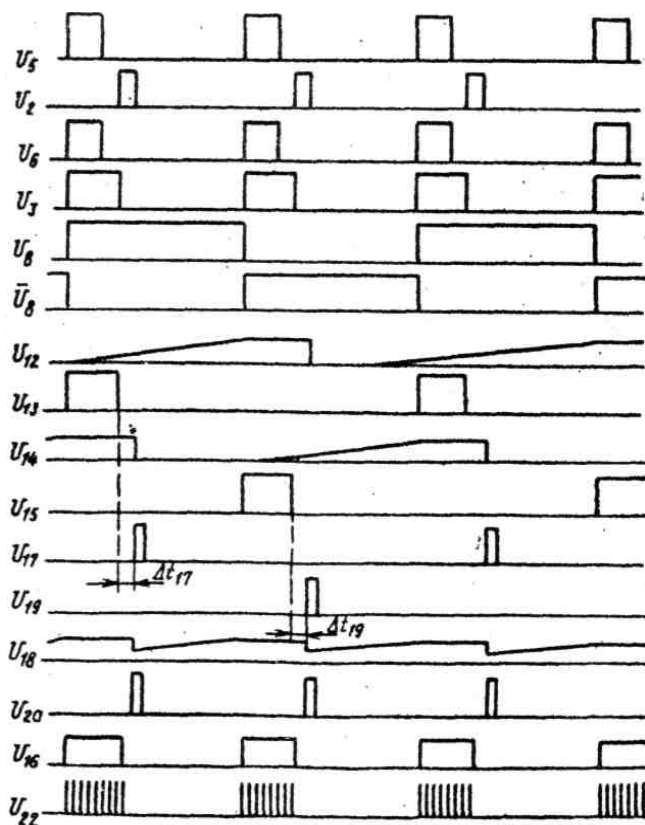


Рис. 2. Временные диаграммы, иллюстрирующие работу аналого-цифрового фазометра

сигнала соответствует номеру элемента, с выхода которого он снимается.

Сигнал U_8 снимается с прямого выхода счетного триггера 8, а сигнал \bar{U}_8 – с инверсного выхода этого триггера.

Устройство может работать в двух режимах: когда угол сдвига фаз измеряется и индицируется блоком индикации 25 в каждом периоде входных последовательностей и когда угол сдвига фаз измеряется и индицируется в каждом периоде до интересующего оператора периода входного сигнала, а значение угла сдвига фаз в интересующем периоде индицируется до тех пор, пока оператор задаст другой номер цикла измерения. При этом во время индикации угла в указанном цикле процесс измерения углов сдвига фаз до следующей команды оператора не производится.

В первом случае двойной переключатель 7 устанавливают в положение А, на вторые входы схем И 6 и 21 подаются входные сигналы от источника питания и эти схемы работают как повторители сигнала, поступающего на их первые входы.

При работе фазометра импульсный сигнал блока 4 с помощью второго формирователя 5 преобразуется в прямоугольный импульс, длительность которого равна длительности измеряемого фазового интервала, а амплитуда равна уровню “Лог. 1”. Выходной импульс формирователя 5 проходит через схему И 6 на единственный вход триггера 3 с установочными входами, устанавливая его в единичное

состояние, и на вычитающий вход реверсивного счетчика 11, однако последний на работу элементов устройства влияния не оказывает, так как переключатель 7 разомкнут. Импульс со схемы И 6 поступает также на вход счетного триггера 8, устанавливая его в одно устойчивое состояние, например, в единичное (на рис. 2 этому состоянию соответствует $t=t_1$). Поскольку счетный триггер 8 взведен, на его выходе устанавливается сигнал с амплитудой “Лог. 1”, который поступает на первый вход второй схемы И 13 и на вход второго интегратора 12, выходной сигнал которого с момента $t=t_1$ линейно нарастает по времени:

$$U_{12} = Kt_1,$$

где K – коэффициент передачи интегратора.

Поскольку на первом и втором входах второй схемы И 13 в этом случае присутствуют единичные сигналы, эта схема открыта и ее выходной сигнал поступает на вход элемента задержки 17. Третья же схема И 15 при этом закрыта. Одновременно с этим выходной сигнал интегратора 12 проходит через первую схему ИЛИ 18 на второй вход делительного устройства 16. Выходной сигнал первого интегратора 14, линейно нарастающий в предыдущем периоде входных импульсов при $t < t_1$, тоже больше нуля и также проходит на второй вход делительного устройства 16.

На первом входе этого устройства действует выходной сигнал триггера 3, в связи с чем выходной сигнал делительного устройства равен

$$U_{16} = \frac{U_{13}}{U_{18}} = \frac{U_3}{U_{14}U_{17}}.$$

Указанный сигнал поступает на вход управляемого генератора 22 импульсов, который вырабатывает прямоугольные импульсы высокой частоты, поступающие на вход регистра 23. Частота этих импульсов равна

$$f_{22} = K_{22}U_{16},$$

где K_{22} – коэффициент передачи управляемого генератора импульсов 22.

В регистр 23 происходит запись числа, десятичный эквивалент которого, формирующийся с помощью дешифратора 24, индицируется блоком индикации 25. В момент времени $t=t_2$ на выходе блока 1 вырабатывается импульс, который с помощью первого формирователя 2 преобразуется в прямоугольный импульс с амплитудой, соответствующей уровню “Лог. 1”. Под действием этого импульса триггер 3 с установочными входами сбрасывается, схема И 13 закрывается, а схема И 15 сохраняется в прежнем, закрытом состоянии. При запирании схемы И 13 первый элемент задержки 17 начинает формировать короткий прямоугольный импульс, поступающий на первый вход схемы ИЛИ 20 и на шину сброса в нуль первого интегратора 14. Вследствие сброса триггера 3 с установоч-

ными входами единичный сигнал на первом входе делительного устройства 16 исчезает, выходной сигнал этого устройства принимает нулевое значение, генерация высокочастотных импульсов генератором 22 прекращается и запись числа в регистр 23 также прекращается. В связи с этим после сброса триггера 3 состояние ячеек регистра не изменяется и показания блока индикации 25 неизменны.

После задержки времени Δt_{17} элемент задержки времени 17 вырабатывает единичный короткий прямоугольный импульс, сбрасывающий первый интегратор 14 и регистр 23 в нулевое состояние, в результате чего показания блока индикации 25 обнуляются. Сигнал на выходе второго интегратора 12 в течение рассмотренного интервала времени $t-t_3$ линейно растет, так как ко входу этого интегратора приложено единичное напряжение с прямого выхода счетного триггера 8.

В момент времени $t=t_3$ блок впрыска 4 вырабатывает электрический импульс, преобразующийся с помощью второго формирователя 5 в прямоугольный единичный импульс. Последний, пройдя через схему И 6, взводит триггер 3 с установочными входами и сбрасывает счетный триггер 8. В результате этого схема Т 13 закрыта (поскольку на ее первом входе действует нулевой сигнал с прямого выхода триггера 8), а схема И 15 оказывается открытой, так как на ее первом и втором входах действуют единичные сигналы с инверсного выхода триггера 3. Кроме того, под действием единичного сигнала оказывается и первый вход делительного устройства 16, подключенный к входу триггера 3. Так как триггер 6 сброшен, то сигнал на входе первого интегратора 14 единичный и его выходное напряжение начинает расти от нуля по линейному во времени закону, а сигнал на входе второго интегратора 12 равен нулю и его выходное напряжение с момента t_1 до момента t_3 равно нулю. Этот интервал представляет собой период входных импульсов T и его величина определяется выражением

$$U_{12} = KT.$$

Напряжение U_{12} подается на второй вход схемы ИЛИ 18, на первый вход которой поступает сигнал с выхода интегратора 14. Поскольку коэффициент K передачи у обоих интеграторов один и тот же, то за это время t_3-t_4 (которое меньше периода вращения) сигнал на выходе интегратора 14 не успевает вырасти до значения KT и сигнал на первом входе схемы ИЛИ 18 меньше, чем на втором входе. Как известно, на выходе схемы ИЛИ действует наибольший выходной сигнал, вследствие чего на втором входе делительного устройства 16 действует выходной сигнал второго интегратора 12. Следовательно, выходной сигнал делительного устройства равен

$$U_{16} = \frac{U_3}{KT},$$

а частота импульсов управляемого генератора 22 определяется как

$$f_{22} = \frac{K_{22}U_3}{KT}.$$

С помощью этих импульсов в регистр 23 происходит запись числа, десятичный эквивалент которого, формируемый дешифратором 24, индицируется блоком индикации 25.

В момент времени $t=t_4$ (рис. 2) на выходе блока 1 вырабатывается импульс, начало которого совпадает с указанным моментом. Этот импульс после преобразования с помощью первого формирователя импульсов 2 в единичный короткий прямоугольный импульс поступает на нулевой вход триггера 3 с установочными входами, устанавливая его в нулевое состояние. Последнее приводит к запиранию схемы И 15, исчезновению единичного сигнала на первом входе делительного устройства 16 и появлению на входе управляемого генератора импульсов 22.

При этом генерация высокочастотных прямоугольных единичных импульсов и процесс их записи в регистр 23 прекращаются. Кодовая комбинация, поступающая с выходов всех разрядов регистра на входы дешифратора 24, преобразуется с помощью последнего из двоичной системы счисления в десятичную и индицируется на табло блока индикации 25. Следовательно, запись импульсов в регистр происходит в течение времени от момента t_3 до момента t_4 (этот интервал представляет собой не что иное, как длительность фазового интервала). Число импульсов, поступающих за это время на вход регистра 23, определяется по формуле

$$N = f_{22}t_{\text{он}} = \frac{K_{22}U_3t_{\text{он}}}{KT},$$

где $t_{\text{он}}$ – длительность фазового интервала.

Если выразить период входных импульсов через угловую частоту ω , последнее выражение примет вид

$$N = \frac{K_{22}U_3t_{\text{он}}\omega}{KT} = \frac{K_{22}U_3t_{\text{он}}\theta}{2\pi K},$$

где 2π – угловой эквивалент периода входных последовательностей; $\theta = t_{\text{он}}\omega$ – угол сдвига фаз между входными последовательностями.

Величины U_3 (уровень “Лог. 1”), K_{22} , K и 2π постоянны, благодаря чему связь между N и θ однозначна, то есть показания блока индикации 25 пропорциональны измеряемому углу сдвига фаз.

Недостатком описанного фазометра является наличие в нем интеграторов, стабильность характеристик которых существенно влияет на точность измерений. Ниже рассматривается более совершенный цифровой фазометр, разработанный авторами. Его блок-схема представлена на рис. 3.

Генератор 1 вырабатывает электрический импульс, который преобразуется с помощью первого

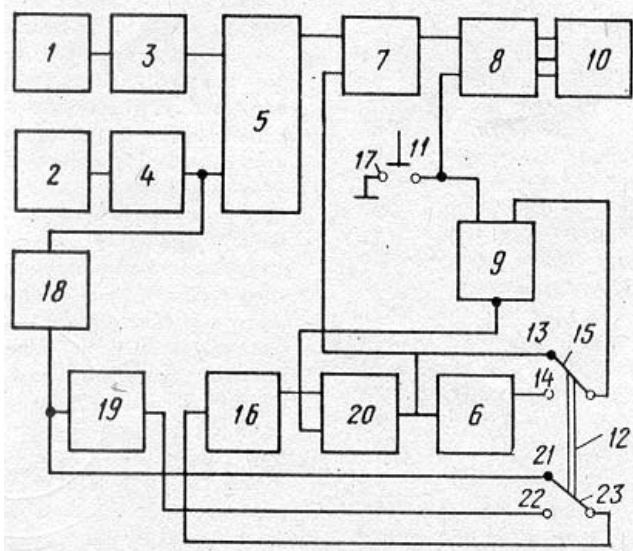


Рис. 3. Блок-схема фазометра с оптимальной по точности частотой квантования

формирователя 3 импульсов в прямоугольный импульс нормированной амплитуды (например, равной уровню логической единицы) и длительности, равной продолжительности импульса генератора 1.

При этом передний фронт выходного импульса формирователя 3 совпадает с моментом начала импульса генератора 1, а задний фронт импульса этого формирователя совпадает с моментом окончания сигнала генератора 1. Под действием переднего фронта выходного импульса второго формирователя 4 импульсов первый триггер 5 устанавливается в единичное состояние, вследствие чего его выходной сигнал, равный, например, уровню логической единицы, поступает на первый вход первой схемы совпадения 7.

Спустя некоторое время генератор 2 вырабатывает электрический импульс, который с помощью второго формирователя импульсов 4 сигнал датчика 2 преобразует в прямоугольный импульс нормированной амплитуды и длительности, причем передний фронт этого импульса формируется в момент начала сигнала генератора 2, а задний – в момент окончания этого сигнала.

При действии переднего фронта выходного импульса второго формирователя 4 первый триггер 5 переходит в нулевое состояние и единичный сигнал на первом входе первой схемы совпадения 7 исчезает.

Импульсы второго формирователя 4, вырабатываемые в каждом обороте вала, поступают на вход фильтра 18 низкой частоты, который формирует постоянное (по знаку) напряжение, пропорциональное частоте следования импульсов. Это напряжение поступает через замкнутые второй подвижный 23 и третий неподвижный 21 контакты дополнительной секции переключателя 12 на вход управляемого генератора прямоугольных им-

пульсов 16. Последний генерирует импульсы с частотой следования F_3 пропорционально напряжению на его входе.

Импульсы управляемого генератора 16 поступают на первый вход второй схемы совпадения 20, которая пропускает импульсы на связанные с ее выходом элементы только в том случае, когда на ее втором входе действует единичный сигнал.

Цикл измерения угла опережения подачи топлива начинается с момента нажатия кнопки сброса 11, в результате которого первый 8 и второй 9 регистры устанавливаются в нулевое состояние. При этом на табло блока индикации 10 высвечиваются нули, а с инверсного выхода второго регистра 9 поступает единичный сигнал на второй вход второй схемы совпадения 20. Последняя отпирается, и на второй вход первой схемы совпадения 7, на счетный вход второго триггера 6 и на вход второго регистра 9 поступают импульсы, вырабатываемые генератором 16 и имеющие частоту $f_3 = F\sqrt[3]{15N}$. На вход первого регистра 8 импульсы поступают только тогда, когда первая схема совпадения 7 открыта, то есть при наличии на выходе первого триггера 5 единичного импульса. Цикл измерения продолжается до тех пор, пока в регистры идет запись кодов. Как только во второй регистр 9 записывается заранее известное число N , равное емкости этого регистра, на его инверсном выходе вместо единичного сигнала устанавливается нулевой сигнал, в результате чего вторая схема совпадения 20 закрывается и поступление импульсов на входы регистров прекращается. От момента нажатия кнопки 11 до момента записи числа N во второй регистр 9 в первый регистр 8 записывается число N_1 , значение которого в десятичной системе счисления высвечивается на табло блока индикации 10. За промежуток времени t_3 , в течение которого происходит запись указанных чисел, входные импульсы последовательно проходят число периодов, равное $m = t_3 F$. При этом числа N_1 и N можно представить выражениями

$$N_1 = m t_u f_3; N = m f_3 F^{-1},$$

где N_1 – показания блока индикации 10; t_u – длительность выходного импульса первого триггера 5. Отношение указанных чисел запишем следующим образом:

$$\frac{N_1}{N} = \frac{m t_u f_3 F}{m f_3} = \frac{t_u \omega}{2\pi} = \frac{\theta}{2\pi},$$

где ω – угловая частота импульсов генераторов 1 и 2; θ – угол сдвига фаз между импульсами генераторов 1 и 2; 2π – период следования импульсов генераторов 1 и 2.

Из последнего выражения получают формулу для вычисления угла сдвига фаз между импульсами генераторов 1 и 2 (предполагая, что преобразования интервалов времени в коды происходят без погрешности):

$$\theta = \frac{2\pi N_1}{N}, \text{ или } \theta = \frac{360 N_1}{N}.$$

Задавая $N=360 \cdot 10^K$ и выбирая любые величины K , угол сдвига фаз получают из показаний блока индикации 10 путем переноса запятой на K знаков влево.

Описанный случай работы цифрового фазометра подробно рассмотрен в работе [7], согласно которой суммарная среднеквадратическая погрешность измерения сдвига фаз равняется

$$\sigma = \frac{360}{\sqrt{6}} \sqrt{\frac{F}{f_K^2 t_3} + \frac{1}{30 F^2 t_3^2}}. \quad (1)$$

Первое слагаемое под знаком радикала в выражении (1) обусловлено погрешностью квантования временного сдвига между импульсными последовательностями и представляет собой высокочастотную составляющую погрешности фазометра, а второе обусловлено погрешностью дискретизации, вызванной некротностью t_3 и периода указанных последовательностей (низкочастотная составляющая погрешности). Учитывая, что $t_3 = N f_K^{-1}$, последнее выражение приведем к виду

$$\sigma = 60 \sqrt{6} \left(\frac{F}{f_K N} + \frac{f_K^2}{30 F^2 N^2} \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Из полученного соотношения видно, что существенным резервом повышения точности фазометра является повышение объема регистра, однако в большинстве практических случаев это неприемлемо в связи с усложнением устройства. Более целесообразна минимизация σ за счет рационального выбора f_K , от которой высоко- и низкочастотная составляющие зависят по-разному. Продифференцировав (2) по f_K и приравняв производную нулю, после соответствующих математических операций найдем

$$f_{ко} = F \sqrt[3]{15N}, \quad (3)$$

где $f_{ко}$ – оптимальная частота квантования.

Именно такой и должна быть частота F_3 .

Минимальная величина среднеквадратической погрешности измерения угла сдвига фаз может быть получена после подстановки (3) в (2):

$$\sigma_{мин} = \frac{360}{\sqrt{6}} \sqrt{\frac{F}{N F \sqrt[3]{15N}} + \frac{F^2 \sqrt[3]{(15N)^2}}{30 F^2 N^2}} = \frac{180}{\sqrt{N \sqrt[3]{15N}}}. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что минимальное значение погрешности измерения угла сдвига фаз не зависит от частоты следования импульсов, между которыми этот сдвиг определяется.

Для повторения цикла измерения необходимо снова нажать кнопку сброса 11.

Рассмотрим работу устройства при измерении сдвига фаз между каждым первым импульсом генератора 1 и каждым вторым импульсом генератора импульсов 2.

В этом случае переключатель 12 переводится во второе (нижнее по схеме) положение, а импульсы поступают на единичный вход первого триггера 5 с частотой, равной $0,5F$. Частота следования импульсов на нулевой вход первого триггера 5 остается равной F . В связи с этим на выходе указанного триггера появляется один прямоугольный импульс, длительность которого равна временному сдвигу между импульсами генераторов 1 и 2.

Цикл измерения начинается с нажатия кнопки сброса 11, в результате которого оба регистра 8 и 9 сбрасываются и на цифровом табло блока индикации 10 высвечиваются нули. После сброса второго регистра 9 на его инверсном выходе устанавливается единичный сигнал, отпирающий вторую схему совпадения 20. Поскольку переключатель 12 переведен во второе положение, то на вход второго регистра 9 поступают импульсы с выхода второго триггера 6, а на вход управляемого генератора 16 поступает сигнал с выхода делителя напряжения 19. Так как фильтр низкой частоты 18, делитель напряжения 19 и управляемый генератор прямоугольных импульсов 16 в этом случае соединены последовательно, то частота f_3 на выходе генератора 16 и частота F на выходе второго формирователя импульсов 4 связаны соотношением

$$f_3 = F \sqrt{\frac{15N}{4}}.$$

Поскольку на вход второго регистра 9 импульсы поступают с выхода второго триггера 6, то частота импульсов записи в этом регистре вдвое ниже частоты импульсов на входе первого регистра 8. При записи во второй регистр 9 заранее известного числа N , равного емкости этого регистра, на его инверсном выходе устанавливается нулевой сигнал, запирающий вторую схему совпадения 20. В результате этого поступление импульсов на входы регистров 8 и 9 и вместе с ним процесс измерения прекращаются. За время записи в первый регистр 8 записывается число N_1 , значение которого в десятичной системе счисления индицируется блоком индикации 10. Поскольку в рассматриваемом случае запись во второй регистр 9 происходит частотой $0,5f_3$, то время записи равно

$$t_3 = \frac{N}{0,5 f_3} = \frac{2N}{f_3},$$

а входные импульсные последовательности проходят число периодов

$$m = t_3 F = \frac{2NF}{f_3}. \quad (5)$$

Число, записанное в этом случае в первый регистр 8, определяется (без учета погрешности квантования) выражением

$$N_1 = \frac{1}{2} m t_u f_3$$

(множитель 1/2 поставлен потому, что на выходе первого триггера 5 один импульс вырабатывается каждые два периода входных импульсов). После подстановки выражения (5) в последнее соотношение получают

$$N_1 = NFt_u = \frac{Nt_u}{T} = \frac{Nt_u\omega}{T\omega} = \frac{Nt_u\omega}{2\pi}$$

При этом угол сдвига фаз в радианах можно представить следующим образом:

$$\theta = \frac{2\pi N_1}{N}, \text{ или в градусах } \theta = \frac{360N_1}{N}$$

Минимальная величина среднеквадратической погрешности измерения угла сдвига фаз между импульсами генераторов 1 и 2, согласно работе [7], может быть выражена следующей зависимостью:

$$\begin{aligned} \sigma_{\min} &= \frac{360}{\sqrt{6}} \cdot \frac{F}{4NF \cdot \sqrt[3]{\frac{15N}{4}}} + \frac{F^2 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{15N}{4}\right)^2}}{30F^2N^2} = \\ &= \frac{90}{\sqrt{N \cdot \sqrt[3]{\frac{15N}{4}}}} \end{aligned} \quad (6)$$

Из выражения (6) так же, как и из выражения (4), следует, что минимальное значение погрешности измерения угла сдвига фаз не зависит от частоты импульсных последовательностей, между которыми измеряется этот сдвиг.

Выводы. Минимально возможную среднеквадратическую погрешность измерения фазового сдвига между двумя импульсными последовательностями можно получить, обеспечив соблюдение соотношения между частотой квантования и частотой указанных последовательностей в любом диапазоне изменения последней.

1. *Борисенко А.Н.* Анализ и пути повышения точности специализированных преобразователей частоты в фазу импульсов для систем регулирования дизель-генераторов / А.Н. Борисенко // Украинський метрологічний журнал. – 1998. – Вып. 4. – С. 29–31.
2. *Борисенко А.Н.* Оптимизация рабочей частоты электромагнитного датчика топливopодачи для системы диагностирования и регулирования дизельного двигателя / А.Н. Борисенко, О.Ю. Кропачек, В.Г. Свистун // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков, 2000. – Вып. 92. – С. 155 – 159.
3. *Ле Ван Дием.* Модели и алгоритмы технического диагностирования судовых дизельных установок в процессе эксплуатации: автореф. дис. ... к.т.н. / Ван Дием Ле. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, 2006. – 24 с.
4. *Борисенко А.Н.* Анализ характеристик измерителя сдвига фаз между импульсными последовательностями / А.Н. Борисенко, В.П. Самсонов, А.Ф. Еникеев // Техническая электродинамика. – К., 1986. – № 1. – С. 92–94.
5. А.с. № 1379676 СССР, МКИ G01M15/00/. Устройство измерения угла опережения впрыска топлива в дизель / А.Н. Борисенко, В.Н. Соболев, В.Н. Зайончковский [и др.]; заявл. 29.09.86; опубл. 07.03.88, Бюл. № 9. – 5 с.
6. Цифровые методы измерения сдвига фаз / под ред. С.Ф. Корндорфа. – Новосибирск: Наука, 1989. – 288 с.
7. *Борисенко А.Н.* Теория и практика компьютеризированных информационно-измерительных систем для управления и диагностики дизель-генераторов: автореф. дис. ... д.т.н. / А.Н. Борисенко. – К.: Институт электродинамики НАН Украины, 2010. – 31 с.