

**А.Н. БОРИСЕНКО**, д-р техн. наук, проф. НТУ «ХПИ»;  
**А.Б. БОГАЕВСКИЙ**, д-р техн. наук, проф. ХНАДУ, Харьков;  
**Б.И. КУБРИК**, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХПИ»  
**О.В. ЛАВРИНЕНКО**, преп.-стаж., НТУ «ХПИ»

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ТАКТОВОЙ ЧАСТОТЫ ФАЗОМЕТРА ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

В статье исследуется среднеквадратичная погрешность цифрового интегрирующего фазометра и предлагается способ ее уменьшения за счет реализации определенного соотношения между тактовой частотой входных импульсов, между которыми измеряется фазовый сдвиг. Авторами показано, что минимально возможное значение данной погрешности можно получить, обеспечив соблюдение соотношения между частотой квантования и частотой указанных последовательностей в любом диапазоне изменения последней.

**Ключевые слова:** угол сдвига фаз, тактовая частота, фазометр, двигатель внутреннего сгорания.

**Постановка проблемы.** Довольно часто на практике 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, газотурбинных 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 рисунке 1 представлена блок-схема устройства измерения угла сдвига фаз между двумя последовательностями.

Генератор 1 вырабатывает электрический импульс, который преобразуется с помощью первого 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 7 совпадения.

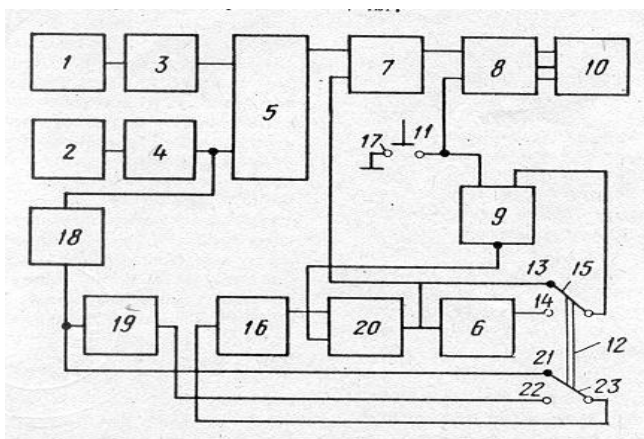


Рис. 1 – Блок-схема фазометра с оптимальной по точности частотой квантования.

Спустя некоторое время генератор 2 вырабатывает электрический импульс, который с помощью второго формирователя 4 импульсов сигнал датчика 2 преобразуется в прямоугольный импульс нормированных 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 7 совпадения 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 16 прямоугольных импульсов. Последний генерирует импульсы с частотой следования  $F_3$ , пропорциональный напряжению на его входе.

Импульсы управляемого генератора 16 поступают на первый вход второй схемы 20 совпадения, 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 11 сброса, в результате которого первый 8 и второй 9 регистры устанавливаются в нулевое состояние. При этом на табло блока 10 индикации высвечиваются нули, а с инверсного выхода второго регистра 9 поступает единичный сигнал на второй вход второй схемы 20 совпадения. Последняя отпирается, и на второй вход первой схемы 7 совпадения, 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 7 совпадения открыта, т.е. 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 20 совпадения 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 10 индикации. За промежуток времени  $t_3$ , в течение которого происходит запись указанных чисел, коленчатый вал дизеля совершает количество оборотов, равное  $m = t_3F$ . При этом числа  $N_1$ , и  $N$  можно представить выражениями

$$N_1 = mt_u f_3; \quad N = mf_3 F^{-1},$$

где  $N_1$  – показания блока 10 индикации;

$t_u$  – длительность выходного импульса первого триггера 5, а отношение указанных чисел запишем следующим образом:

$$\frac{N_1}{N} = \frac{mt_u f_3 F}{mf_3} = \frac{t_u \omega}{2\pi} = \frac{\theta}{2\pi},$$

где  $\omega$  – угловая частота импульсов генераторов 1 и 2;

$\theta$  – угол сдвига фаз между импульсами генераторов 1 и 2;

$2\pi$  – 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)

$$\theta = \frac{2\pi N_1}{N}$$

или

$$\theta = \frac{360N_1}{N}.$$

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

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

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

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 - погрешностью дискретизации, вызванной некрatностью  $t_3$  и периода указанных последовательностей (низкочастотная составляющая погрешности). Учитывая, что  $t_3 = Nf_K^{-1}$ , последнее выражение приведем к виду

$$\sigma = 60\sqrt{6}(F / f_K N + f_K^2 / 30F^2 N^2)^{0.5}. \quad (2)$$

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  $\sigma$  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

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

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

Именно такой и должна быть частота  $F_3$

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

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

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 11 сброса.

**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.

**Список литературы:** 1. Marine application of emission methods law speed diesel engines/Grohe Ote//Hansa.-1990.-127,№22. – с.1526-1530. Англ. 2. *Котиков Ю.Г., Горев А.Э., Блянкинштейн Н.М.* Цифровые системы автоматического управления силовыми установками автомобилей с дизельными двигателями (обзор). Двигателестроение, №4, 1985. 3. Итоги науки и техники. Двигатели внутреннего сгорания. Т.4. *В.А. Лурье, В.А. Мангушев, И.В. Маркова, Б.Я. Черняк.* – М.:1985 – 284с. 4. *Пинский Ф.И., Мельдзин Н.Х.* Структурные особенности электронных адаптивных систем управления дизелем. Двигателестроение. 1988, №6, с. 14-16. 5. *Пинский Ф.И.* Оптимизация режима работы дизелей электронным управлением впрыска топлива. – Автореф. дис. доктора техн. наук. – Харьков, М., 1987. – 32с. 6. *Долгих И.Д.* Разработка систем автоматического непрерывно дискретного регулирования транспортных дизелей. – Автореф. дис. доктора техн. наук. – Харьков, ХИИТ., 1993. - 47с. 7. *Лиханов В.А., Сайкин А.М.* Снижение токсичности автотракторных дизелей. – М.:ВО АГРОПРОМИЗДАТ, 1991. 208с. 8. *Атаке М., Фалб П.* Оптимальное управление. – М.: Машиностроение, -1968. -764с. 9. *Борисенко А.М.* Теория и практика компьютеризованных информационно-вимірювальних систем для управління та діагностики дизель-генераторів: Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора техн. наук/ Інститут електродинаміки НАН України. – Київ, 2010. – 31с.

**Bibliography (transliterated).** 1. Marine application of emission methods law speed diesel engines/Grohe Ote//Hansa.-1990.-127, NO22. – p.1526-1530. Engl. 2. *Kotikov Ju.G., Gorev A.Je., Blyankinshtejn N.M.* Cifrovye sistemy avtomaticheskogo upravlenija silovymi ustanovkami avtomobilej s dizel'nymi dvigateljami (obzor). Dvigatelistroenie, NO 4, 1985. 3. Itogi nauki i tehnik. Dvigateli vnutrennego sgoranija. Vol.4. *V.A. Lur'e, V.A. Mangushev, I.V. Markova, B.Ja. Chernjak.* – Moscow:1985 – 284p. 4. *Pinskij F.I., Mel'dzin N.H.* Strukturnye osobennosti jelektronnyh adaptivnyh sistem upravlenija dizelem. Dvigatelistroenie. 1988, NO 6, p. 14-16. 5. *Pinskij F.I.* Optimizacija rezhima raboty dizel'ej jelektronnym upravleniem vpryska topliva. – Avtoref. dis. doktora teh. nauk. – Khar'kov, 1987. – 32p. 6. *Dol'gih I.D.* Razrabotka sistem avtomaticheskogo nepreryvno diskretnogo regulirovanija transportnyh dizel'ej. – Avtoref. dis. doktora teh. nauk. – Khar'kov, HIIT., 1993. – 47p. 7. *Lihanov V.A., Sajkin A.M.* Snizhenie toksichnosti avtotraktornyh dizel'ej. – Moscow:VO AGROPROMIZDAT, 1991. - 208p. 8. *Atake M., Falb P.* Optimal'noe upravlenie. – Moscow: Mashinostroenie, -1968. -764p. 9. *Borisenko A.M.* Teorija i praktika komp'juterizovanih informacijno-vmirjuval'nih sistem dlja upravlinnja ta diagnostiki dizel'-generatoriv: Avtoreferat disertacii na zdobuttja naukovogo stupenja doktora teh. nauk/ Institut elektrodinamiki NAN Ukraїni. – Kiїv, 2010. – 31p.

Поступила (received) 22.12.2014