

## СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СТЕПЕНИ НЕРАВНОМЕРНОСТИ УГЛОВОЙ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ

Е.А. Кононова, к.т.н. Ю.И. Кушнерук, к.т.н. Ю.И. Рафальский  
(представил д.т.н., проф. Б.Т. Кононов)

*Описывается временный способ определения степени неравномерности угловой частоты вращения вала двигателя внутреннего сгорания. Показано, что этот показатель может быть использован для оценки технического состояния двигателя. Приведена схема устройства, реализующего предложенный способ. Изложено описание работы устройства для измерения степени неравномерности, использующего в своём составе систему фазовой автонастройки частоты.*

**Постановка проблемы.** При оценке технического состояния дизелей и двигателей внутреннего сгорания возможно в качестве диагностического параметра использовать такой показатель как степень неравномерности частоты вращения. Под степенью неравномерности  $\delta$  частоты вращения будем понимать отношение разности между максимальной  $\Omega_{\max}$  и минимальной  $\Omega_{\min}$  угловыми частотами вращения к средней угловой частоте  $\Omega_{\text{ср}}$  вала двигателя, имеющее место в течение одного периода неравномерного движения

$$\delta = \frac{\Omega_{\max} - \Omega_{\min}}{\Omega_{\text{ср}}} \quad (1)$$

Численные значения скоростей  $\Omega_{\max}$  и  $\Omega_{\min}$  обусловлены неравномерностью процессов выработки и потребления энергии. В те моменты времени, когда количество вырабатываемой энергии больше количества потребляемой энергии, возникающий избыток энергии вызывает увеличение кинетической энергии и вал установки начинает вращаться ускоренно. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока вновь не наступит равновесие между вырабатываемой и потребляемой энергией. В этот момент времени в установке достигается максимальная угловая частота вращения, после чего в случае, если потребление энергии превысит её производство, начнётся процесс уменьшения угловой частоты вращения.

Сказанное иллюстрируется графиком (рис. 1), по оси абсцисс которого

отложен угол поворота вала ( $\alpha = \Omega t$ ), а по оси ординат – характер изменения крутящего момента  $M$  – источника и приёмника энергии (соответственно сплошной и пунктирной линией). В точках А, В, С, D, Е, F имеет место равенство вырабатываемой и поглощаемой энергии. В другие моменты времени наблюдается или избыток вырабатываемой энергии (между точками А и В, С и D, Е и F) или её недостаток (между точками В и С, D и Е, F и А). Под графиком изменения крутящего момента изображён график изменения угловой частоты вращения вала установки, где показано, что в точках В, D, F имеют место максимальные, а А, С, Е – минимальные угловые частоты вращения.

Из графика, приведенного на рис. 1 степень неравномерности  $\delta$  можно оценить, используя для этого площади  $f$  заштрихованных зон между вырабатываемым и потребляемым моментами. Таким образом,  $\delta_{\max}$  будет равна

$$\delta_{\max} = \frac{900 f_{\max}}{\pi^2 n^2 \sum_{i=1}^k J_i}, \quad (2)$$

где  $f_{\max}$  [кГсм сек<sup>2</sup>] – площадь наибольшей из заштрихованных площадок;  $\sum_{i=1}^k J_i$  [кГсм сек<sup>2</sup>] – суммарный момент инерции всех вращающихся масс;  $n = (30/\pi)\Omega$  – число оборотов вала в минуту.

Из (2) следует, что степень неравномерности частоты вращения является весьма информированным параметром, с помощью которого возможно оценить не только общее состояние двигателя, но и состояние каждого из его цилиндров, а также состояние кривошипно-шатунного механизма и коленчатого вала. Очевидно также, что измерение величины  $\delta$  с использованием соотношения (2) практически не представляется возможным. Таким образом, для определения степени неравномерности частоты вращения вала двигателя необходимо измерять мгновенные значения его угловой частоты вращения.

**Анализ литературы.** Известные методы [1 – 6] определения величины степени неравномерности базируются на измерении либо ускорения, либо текущего значения угловой частоты. Ускорение при этом измеряют в узком диапазоне углов поворотов коленчатого вала двигателя либо в режиме прокрутки, либо в режимах разгона и торможения. В ходе решения задачи измеряют время и путь разгона в пределах заданных

частот и сравнивают результаты с эталонным значением. При измерении текущей угловой частоты вращения определяют разницу между максимальным и минимальным значениями угловой частоты вращения и

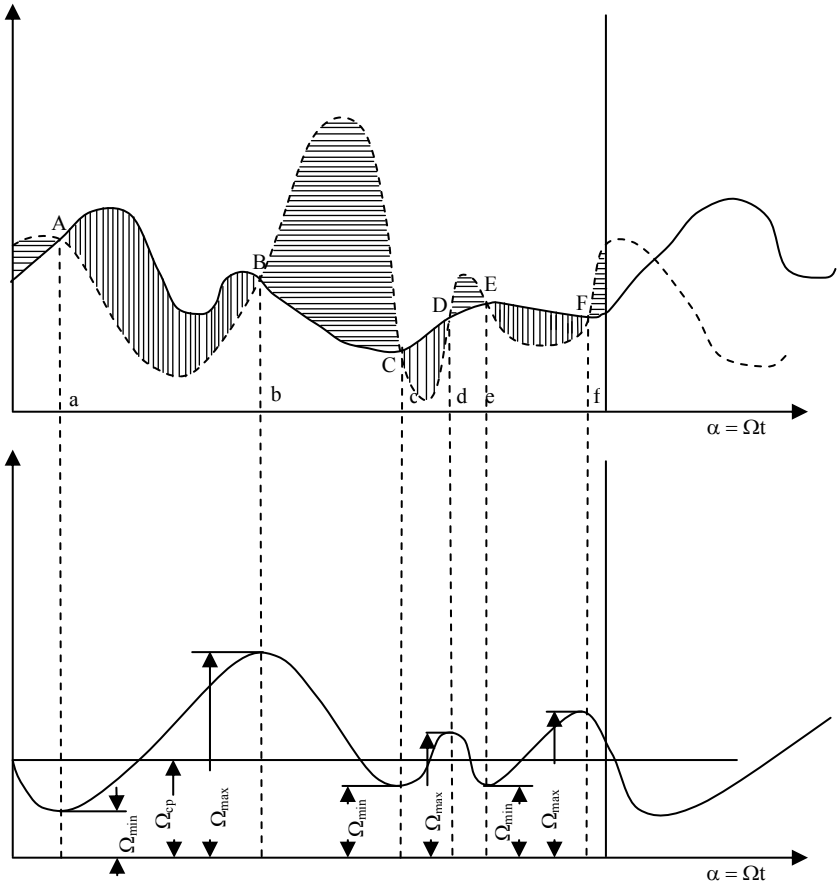


Рис. 1. Неравномерное вращение вала под действием неравномерных крутящих моментов источника и приемника энергии устанавливают допустимые границы этой разности.

Общим недостатком известных методов является необходимость проведения измерений в специально организованных режимах работы двигателя, что не всегда возможно в условиях эксплуатации. Применение известных методов, кроме того, не позволяет получить необходимую информацию о техническом состоянии двигателя в процессе его текущей работы.

**Цель статьи** состоит в разработке способа определения величины неравномерности частоты вращения и устройства для реализации этого

способа.

**Основной материал.** Для определения степени неравномерности угловой частоты вращения предлагается использовать временной метод, основанный на измерении отрезков времени, в течение которых происходит поворот коленчатого вала двигателя на заданный угол.

В связи с тем, что значения мгновенной угловой частоты вращения вала, соответствующие рабочему ходу поршня в том или ином цилиндре, неодинаковы из-за неодинаковой мощности, развиваемой отдельными цилиндрами, время поворота вала  $t_i$  на угол, равный углу между вспышками  $\varphi_{всп}$  в соседних цилиндрах, будет неодинаковым. Действительно

$$t_i = \varphi_{всп} / \Omega_i . \quad (3)$$

Для измерения величины  $t_i$  предлагается измерять число импульсов  $N_i$ , поступающих за время  $t_i$  с выхода генератора импульсов, вырабатывающего стабильную частоту  $f_r$ . Число импульсов  $N_i$  за время  $t_i$  будет равно

$$N_i = t_i / T_r = \varphi_{всп} f_r \Omega_i , \quad (4)$$

где  $T_r$  – период следования импульсов с выхода генератора импульсов.

Величина степени неравномерности  $\bar{\delta}$ , выраженная в относительных единицах, определяется путём сравнения величин  $N_i$  и  $N_{i+1}$ , т.е.

$$\bar{\delta} = N_i - N_{i+1} = \frac{\varphi_{всп} f_r (\Omega_{i+1} - \Omega_i)}{\Omega_i \Omega_{i+1}} , \quad (5)$$

где  $(\Omega_{i+1} - \Omega_i) / \Omega_i = \delta$ ;  $\partial f_r / \Omega_{i+1} = \bar{\delta}$ .

Возможность реализуемости предлагаемого способа подтвердим на примере разработанной схемы устройства измерения степени неравномерности частоты вращения четырёхцилиндрового двигателя. Устройство обеспечивает измерение времени между вспышками в соседних по порядку работы цилиндрах и реализует соотношения (3) – (5). Схема устройства приведена на рис. 2. Устройство содержит датчик угловых отметок коленчатого вала 1, формирователь импульсов 2, RS-триггер 3, первый 21 и второй 4 генераторы импульсов, первый 5 и второй 16 Т-триггеры, фильтр нижних частот 6, первую 7, вторую 8, третью 9, четвёртую 10, пятую 11, шестую 12, седьмую 13, восьмую 14, девятую 17, десятую 18, одиннадцатую 19, двенадцатую 20, тринадцатую 28, четырнадцатую 29, пятнадцатую 30, шестнадцатую 31, семнадцатую 34, восемнадцатую 35, девятнадцатую 36 и двадцатую 37 схемы совпадения И, схему задержки 15, первую 22, вторую 23, третью 39, четвёртую 41, пятую 43, шестую 45, седьмую 46 и восьмую 47 собирательные схемы ИЛИ, первый 24 и второй 25 счётчики, первый 26, второй 27, третий 32 и четвёртый 33 селекторы, первый 28, вто-

рой 40, третий 42 и четвёртый 44 индикаторы.

Устройство работает следующим образом. Сигналы с датчика угловых отметок коленчатого вала 1 поступают на формирователь импульсов 2.

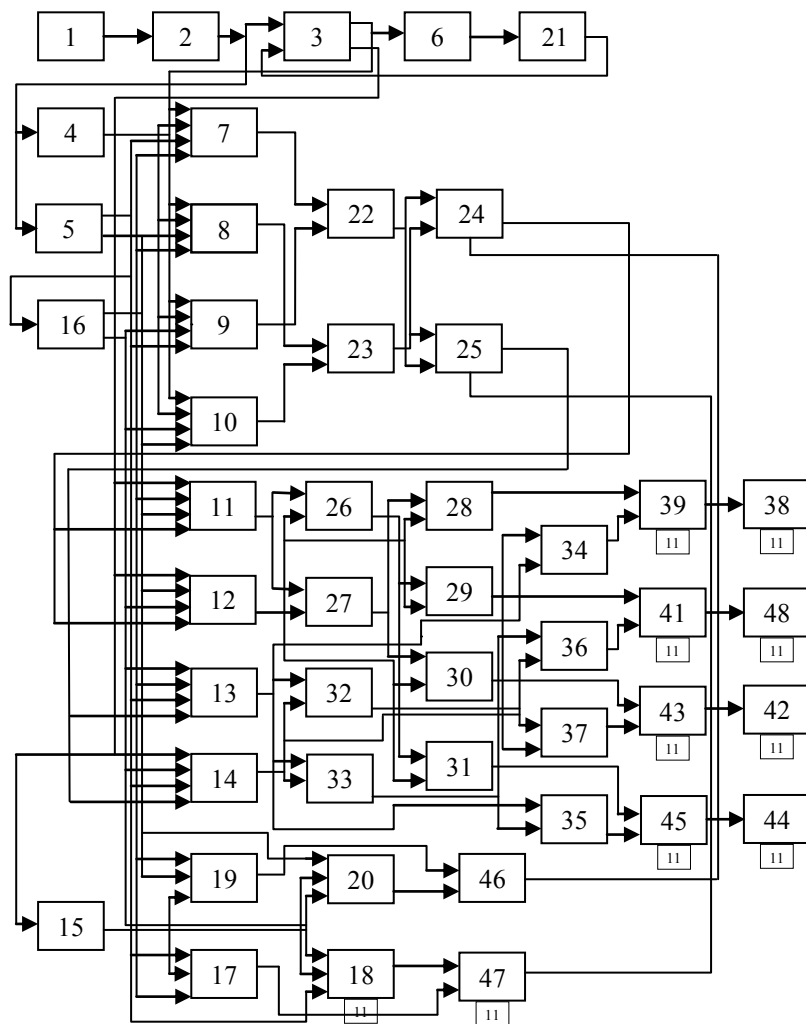


Рис. 2. Схема устройства измерения степени неравномерности частоты вращения четырёхцилиндрового двигателя

С выхода формирователя 2 входная последовательность импульсов, следующих с частотой  $\omega_1$  поступает на S-вход RS-триггера 3, на генератор импульсов 4 и на первый T-триггер 5. RS-триггер 3 запускается импульсами

формирователя 2, а сбрасывается импульсам, поступающими на его R-вход с выхода управляемого генератора импульсов. Частота  $w_0$  следования импульсов 21 при отсутствии управляемого импульса на его входе выбирается заведомо меньшей номинальной частоты  $w_{ном}$  следования импульсов с выхода формирователя импульсов 2. Длительность сигнала высокого уровня на прямом выходе RS-триггера 3 определяется фазовым сдвигом между импульсными последовательностями с выходами управляемого генератора импульсов 21 и с выхода формирователя импульсов 2 и в зависимости от начальной разности частот  $w_1$  и  $w_0$ .

Поясним этот вывод следующими выкладками.

Напряжение с выхода RS-триггера 3 через фильтр нижних частот 6 поступает на вход управляемого генератора импульсов 21. При этом происходит автоматическая подстройка частоты следования импульсов  $w_{21}$  на выходе этого генератора к значению  $w_{21} = w_1$ , т.е. происходит так называемый захват частоты управляемого генератора импульсов

$$w_{21} = w_0 + k_{21}U_6, \quad (6)$$

где  $k_{21}$  – коэффициент передачи управляемого генератора импульсов;  $U_6$  – управляющее напряжение на выходе фильтра нижних частот.

Величина напряжения  $U_6$ , поступающего на вход управляемого генератора импульсов, равна

$$U_6 = k_6 U_{3cp}, \quad (7)$$

где  $k_6$  – коэффициент передачи фильтра нижних частот;  $U_{3cp}$  – среднее напряжение на выходе RS-триггера.

После того, как произошел захват, управляемый генератор импульсов начинает генерировать импульсы с частотой  $w_{21} = w_1$ , сдвинутые по фазе в сторону отставания на угол  $\beta$  по отношению к импульсам  $w_1$  с выхода формирователя импульсов 2. Величина угла сдвига фаз  $\beta$  пропорциональна требуемой величине управляющего напряжения, необходимого для подстройки частоты управляемого генератора импульсов и равного

$$U_{3cp} = k_3 \beta, \quad (8)$$

где  $k_3$  – коэффициент передачи RS-триггера.

В соответствии с (6) – (8) и равенством  $w_{21} = w_1$  находим, что угол  $\beta$  пропорционален скольжению текущей частоты следования импульсов  $w_1$  по отношению к фиксированной частоте  $w_0$  генератора импульсов 21:

$$\beta = \frac{w_1 - w_0}{k_3 k_6 k_{21}}. \quad (9)$$

Таким образом, чем больше частота  $w_1$  отличается от частоты  $w_0$ , тем дольше открыт RS-триггера 3 и тем больше отрезок времени, при

котором есть сигнал высокого уровня на прямом выходе этого триггера.

Генератор импульсов 4 генерирует сигналы высокой частоты, поступающие через первый-четвертый элементы И 7 – 10 на входы первого и второго реверсивных счетчиков 24 и 25 и обеспечивающие измерение угловых отрезков  $\beta$ . Первый импульс с выхода формирователя импульсов 2 обеспечивает переход в единичное состояние обоих Т-триггеров 5 и 16, открытие первого элемента И 7, который через первый элемент ИЛИ 22 обеспечивает запись в первом реверсивном счетчике 24 и считывание во втором реверсивном счетчике 25 числа импульсов  $N_1$  за время прохождения углового отрезка  $\beta_1$ .

Второй импульс с выхода формирователя 2 устанавливает единичный сигнал на инверсном выходе первого Т-триггера 5, при этом открывается второй элемент И 8, который через второй элемент ИЛИ 23 обеспечивает считывание в первом реверсивном счетчике 1 и запись во втором реверсивном счетчике числа  $N_2$ , пропорционального скольжению частоты вала в течение рабочего хода во втором по порядку работы цилиндре. В результате этого число, оставшееся в первом реверсивном счетчике 24, пропорционально величине относительной степени неравномерности работы цилиндров.

Если число, оставшееся в первом реверсивном счетчике 24, превышает допустимое значение, то этот факт фиксируется одним из селекторов 26, 32 или 27, 33. Селекторы 26, 32 настроены на положительное число, селекторы 27, 33 – на отрицательное число. При сравнении чисел  $N_1$  и  $N_2$  возможны три исхода. В первом случае разность чисел положительна и превышает допустимое значение, соответствующее настройке первого селектора 26; во втором случае разность  $N_1 - N_2$  отрицательна и превышает допустимое значение, соответствующее настройке второго селектора 27; в третьем случае абсолютная величина разности  $N_1 - N_2$  не превышает допустимое значение. В первом случае после включения селектора 26 и четырнадцатого элемента И 29 через четвертый элемент ИЛИ 41 включается индикатор 40 неисправности второго по порядку работы цилиндра. Во втором случае после включения селектора 27 и тринадцатого элемента И 28 через третий элемент ИЛИ 39 включается индикатор 38 неисправности первого по порядку работы цилиндра. В третьем случае селекторы 26 и 27 не срабатывают и индикаторы неисправности не включаются.

Для рассматриваемого устройства характерны два режима работы: вычисления и индикации. Режим вычисления имеет место на угловом отрезке  $\beta$ , а режим индикации – на угловом отрезке  $2\pi - \beta$ . С приходом первого импульса открывается первый элемент И 7, на угловом отрезке

$\beta$  есть единичный сигнал на прямом выходе RS-триггера 3. В счетчике 24 записывается число  $N_1$ , в счетчике 25 число  $N_1$  вычитается из записанного там ранее числа  $N_n$ , характеризующего угловую частоту вращения в такте рабочего хода четвертого по порядку работы цилиндра. На угловом отрезке  $2\pi - \beta$  единичный сигнал с прямого выхода RS-триггера 3 снимается, появляется единичный сигнал на прямом выходе RS-триггера 3, запускается элемент задержки 15, открывается седьмой элемент И 13, готовится к включению девятый элемент И 17 и закрывается первый элемент И 7, прекращая тем самым запись в счетчике 24 и считывание в счетчике 25. После открытия седьмого элемента И 13 второй реверсивный счетчик 25 подключается к третьему и четвертому селекторам 32 и 33. Если число, оставшееся в счетчике 25, по абсолютному значению больше допустимого, то в зависимости от его знака включается либо третий селектор 32 (число положительное), либо четвертый селектор 33 (число отрицательное). В случае включения третьего селектора 32 одновременно с ним через семнадцатый элемент И 34 и третий элемент ИЛИ 39 включается индикатор 38 неисправности первого по порядку работы цилиндра двигателя. В случае включения четвертого селектора 33 одновременно с ним через восемнадцатый элемент И 35 и шестой элемент ИЛИ 45 включается индикатор 44 неисправности четвертого по порядку работы цилиндра. Спустя время, равное выдержке времени элемента 15 задержки, появляется сигнал на его входе, обеспечивая срабатывание девятого элемента И 17 и установку второго реверсивного счетчика 25 в нулевом состоянии.

С приходом второго импульса с выхода формирователя 2 импульсов открывается второй элемент И 8 и на угловом отрезке  $\beta$  в счетчике 24 из числа  $N_1$  вычитается число  $N_2$ , одновременно с этим число  $N_2$  записывается в счетчик 25. На угловом отрезке  $2\pi - \beta$  изменение показаний счетчиков 24 и 25 прекращается (появляется единичный сигнал на инверсном входе RS-триггера 3), запускается элемент 15 задержки, открывается пятый элемент И 11 и готовится к включению одиннадцатый элемент И 19. Пятый элемент И 11 подключает первый реверсивный счетчик 24 к первому и второму селекторам 26 и 27. Если число, оставшееся в счетчике 24, по абсолютному значению больше допустимого, то в зависимости от его значения появляется сигнал на входе первого (число положительное) 25 или второго (число отрицательное) селекторов 26 и 27. В случае включения первого селектора 26 одновременно с ним через четырнадцатый элемент И 29 и четвертый элемент ИЛИ 41 включается индикатор 40 неисправности второго по порядку работы цилиндра двигателя. В случае



включения второго селектора 27 одновременно с ним через тринадцатый элемент И 28 и третий элемент ИЛИ 39 включается индикатор 38 неисправности первого по порядку работы цилиндра двигателя.

Спустя время, равное выдержке времени элемента 15 задержки, появляется сигнал на его выходе, и через одиннадцатый элемент И 19 первый реверсивный счетчик 24 устанавливается в нулевое состояние.

Оценка технического состояния третьего и четвертого цилиндра производится после прихода от формирователя 2 третьего и четвертого импульсов.

**Выводы.** 1. В качестве показателя оценки технического состояния двигателя внутреннего сгорания можно использовать величину степени неравномерности угловой частоты вращения его вала.

2. Временной способ определения степени неравномерности угловой частоты вращения вала позволяет определять искомую величину в естественных эксплуатационных режимах работы двигателя.

3. Разработанное устройство для определения степени неравномерности угловой частоты вращения вала двигателя подтверждает реализуемость предложенного временного способа определения степени неравномерности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Техническая диагностика машин / Под ред. В.И. Кирси. – К.: Урожай, 1975. – 352 с.*
2. *Магдалевский А.В., Гаскаров Д.В. Техническая диагностика. – М.: Высш. шк., 1975. – 208 с.*
3. *Павлов В.П. Актуальная диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1970. – 220 с.*
4. *Говорущенко Н.Я. Диагностика технического состояния автомобилей. – М.: Транспорт, 1970. – 256 с.*
5. *Диагностика автотракторных двигателей / Под ред. Н.С. Жаковского. – Л.: Колос, 1977. – 264 с.*
6. *Карпов Л.Н. Диагностика и техническое обслуживание тракторов и комбайнов. – М.: Техника, 1972. – 320 с.*

Поступила 1.09.2004

**КОНОНОВА Елена Анатольевна**, научный сотрудник ОНИИ ВС. В 1992 году окончила Курский политехнический институт. Область научных интересов – электромеханика.

**КУШНЕРУК Юрий Иванович**, канд. техн. наук, доцент кафедры Военного института ВВ МВД. В 1971 году окончил ХГУ. Область научных интересов – исследование операций.

**РАФАЛЬСКИЙ Юрий Иванович**, канд. техн. наук, начальник факультета Харьковского университета Воздушных сил. В 1991 году окончил Военную командную академию ПВО им. Жукова. Область научных интересов – электромеханика.