

В. П. Лукачев, В. Р. Стуканов, Г. В. Уваров

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ И УСКОРЕНИЙ — ИСУ-2

1. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ ПРИБОРА

Прибор для измерения угловых скоростей и ускорений — ИСУ-2 — представляет собой тахометрическое устройство, предназначенное для быстрого измерения угловых скоростей и ускорений вала двигателей внутреннего сгорания и других машин и механизмов при переменных скоростных режимах [1]. По измеренным с помощью прибора ИСУ-2 величинам скорости и ускорения вала при свободном выбеге можно определить:

- 1) мощность механических потерь при известном моменте инерции движущихся масс;
- 2) момент инерции движущихся масс при известной мощности механических потерь;
- 3) одновременно как момент инерции, так и мощность механических потерь.

Помимо этого, прибор позволяет определить инерционную мощность двигателей внутреннего сгорания на переходных режимах их работы.

Принцип действия прибора ИСУ-2 заключается в том, что в результате применения в схеме высокостабильного генератора временных импульсов и двух дискретных электронных счетчиков можно определить время двух следующих друг за другом оборотов вала двигателя. Счетчики включаются и выключаются электронным переключателем так, что за время первого измеряемого оборота временные импульсы от генератора частоты поступают на первый счетчик, за время второго оборота — на второй счетчик.

Управляющие импульсы создаются электромагнитным индукционным датчиком, который может быть выполнен в стационарном или переносном варианте.

БЛОК-СХЕМА ПРИБОРА

На рис. 1 показана блок-схема прибора ИСУ-2, а на рис. 2 — временная диаграмма прибора. От датчика оборотов 1 (рис. 1) управляющие импульсы (рис. 2, А) поступают на усилитель 2, в котором они усиливаются и ограничиваются, приближаясь по форме

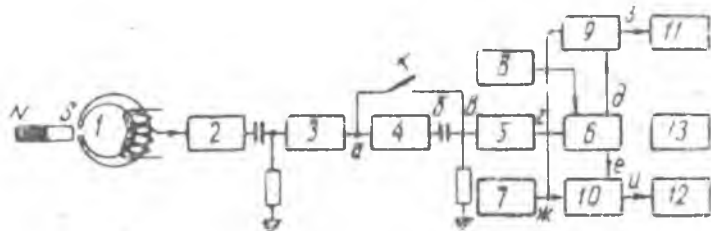


Рис. 1.

к прямоугольным. После дифференцирования эти импульсы поступают на формирователь 3. В этом каскаде формируются отрицательные импульсы определенной формы и длительности, не зависящие от формы и длительности входных импульсов.

Сформированные отрицательные импульсы (рис. 2, а) поступают на триггер деления 4 (рис. 1), который этими импульсами перебрасывается из одного положения в другое. Выходное напряжение (рис. 2, б) дифференцируется (рис. 2, в) и поступает на вход формирователя 5 (рис. 1). Этот формирователь, аналогичный формирователю 3, срабатывает только от отрицательных импульсов и, как видно из рис. 2, г, производит деление входных импульсов на 2 (т. е. пропускает их через один).

Делитель 4 (рис. 1) может быть выключен переключателем К и тогда на вход формирователя 5 будут поступать все импульсы.

Отрицательные импульсы с выхода формирователя 5 поступают на коммутатор 6, который от первого импульса подает повышенное напряжение на электронный ключ № 1 (9 на рис. 1) до прихода второго импульса (рис. 2, д). После прихода второго импульса коммутатор подает повышенное напряжение на электронный ключ № 2 (10 на рис. 1) до прихода третьего импульса (рис. 2, е).

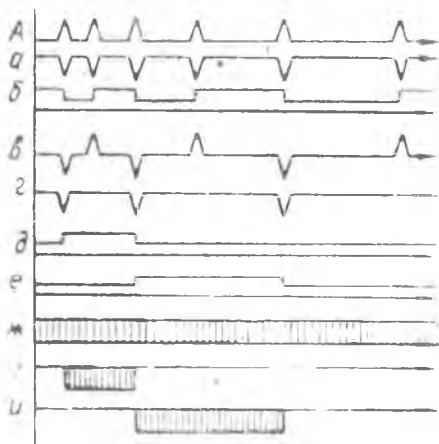


Рис. 2.

На входы ключей также подаются постоянные импульсы частотой 100 кГц (рис. 2, ж) с генератора 7. Когда с коммутатора на ключ подано повышенное напряжение, импульсы имеют возможность проходить на соответствующий счетчик.

Таким образом, после прихода первого управляющего импульса открывается ключ № 1 и импульсы с генератора поступают на счетчик № 1 (11 на рис. 1). После прихода второго управляющего импульса ключ № 1 закрывается, а ключ № 2, открываясь, пропускает импульсы на счетчик № 2 (12 на рис. 1). С третьим импульсом ключ № 2 закрывается. В результате этого на счетчике № 1 зафиксировано число импульсов генератора, прошедших за интервал времени между первым и вторым управляющими импульсами (рис. 2, з). Аналогично на счетчике № 2 зафиксировано число импульсов генератора, прошедших за интервал времени между вторым и третьим управляющими импульсами (рис. 2, и).

Реле времени 8 служит для задержки поступления импульсов на счетчики № 1 и № 2 после выключения зажигания двигателя (или подачи топлива в цилиндры).

Питание прибора подается от блока питания 13, с которого снимаются все необходимые для работы напряжения.

3. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРА

Индукционный датчик служит для создания управляющих сигналов от каждого оборота вала д. в. с. Он изготовлен на базе универсальной магнитофонной головки, катушки которой намотаны проводами ПЭВ-0,09 до заполнения (примерно, 2×2500 витков).

На вращающемся валу (маховике) двигателя закреплен постоянный стержневой магнит, который при вращении вала проходит над зазором датчика. Магнитный зазор в датчике из предварительных экспериментов выбран равным 0,5 мм. Радиальный зазор между полюсом магнита и головкой устанавливается в пределах $0,3 \div 0,5$ мм.

При оборотах двигателя $500 \div 4000$ об/мин. передний фронт импульсов датчика составляет $20 \div 80$ мксек. напряжением $20 \div 45$ в.

Усилитель-ограничитель собран на лампе А16Ж1П (рис. 3). На входе усилителя включен диод Д₁ для получения только положительной полярности входных сигналов.

Ток лампы выбран достаточно большим для получения некоторого ограничения импульсов на выходе.

Формирователи собраны на двойных триодах Л₂, Л₄ типа 6Н1П. Левый триод в нормальном положении проводит ток за счет подачи на управляющую сетку положительного потенциала с помощью делителя из сопротивлений R_6 , R_7 и R_{18} , R_{20} . Отрицательные импульсы, поступающие на вход, запирают левые триоды и положительный импульс через конденсаторы C_5 и C_{12} поступают на управляющие сетки правых триодов. На их анодах возникают отрицательные импульсы определенной формы и

длительности, не зависящие от формы и длительности входных сигналов. Для лучшей работы в цепь сеток правых триодов включены диоды Д₂ и Д₃.

Триггер деления собран на двойном триоде Л₃6Н1П. Это обычный триггер с двумя устойчивыми состояниями. В анодную цепь включено общее сопротивление, на которое с формирователя подаются отрицательные импульсы, перебрасывающие триггер.

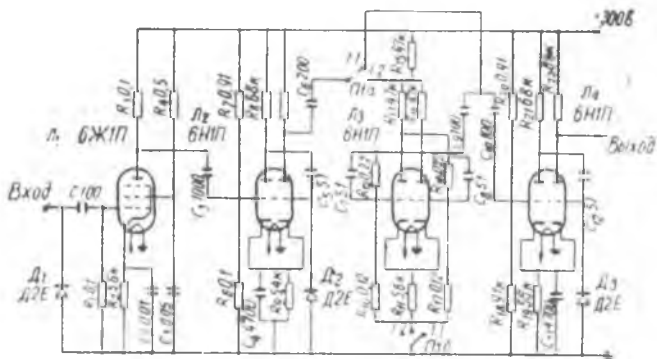


Рис. 3.

В цепь запуска включен переключатель П₁ для включения делителя.

В положении переключателя 1 : 1 импульсы, минуя этот триггер, поступают на формирователь 5. Одновременно этот переключатель отключает катодную цепь триггера.

В положении переключателя 1 : 2 с правого анода триггера напряжение поступает на формирователь.

Коммутатор (электронный переключатель) представляет собой 3 триггера, собранных на 3 лампах Л₁, Л₂, Л₃ (рис. 4) типа 6НЗП.

В исходном состоянии левые триоды этих ламп проводят ток, правые заперты, т. к. их сетки через диоды соединены с землей через нормально замкнутые контакты реле Р₁.

В момент замера от первого импульса, поступающего с формирователя через конденсатор С₁, опрокидывается первый триггер. Второй триггер от первого импульса опрокинуться не может, т. к. на него через линию задержки — диод Д₂, конденсатор С₆ и сопротивление R₆ подано уменьшенное анодное напряжение левого триода первого триггера. На третий триггер через такую же цепочку подано пониженное напряжение со второго триггера.

Таким образом, второй триггер не может опрокинуться раньше первого, а третий — раньше второго.

От второго импульса, поступающего с формирователя через конденсатор С₁, опрокидывается второй триггер, а от третьего импульса — третий триггер.

Последующие импульсы никакого влияния на схему не оказывают.

В цепь анодов триггера включены два «клапана» — диод D_1 , сопротивление R_{11} и диод D_3 , сопротивление R_{21} — таким образом, что до опрокидывания триггеров напряжение на выходе обоих

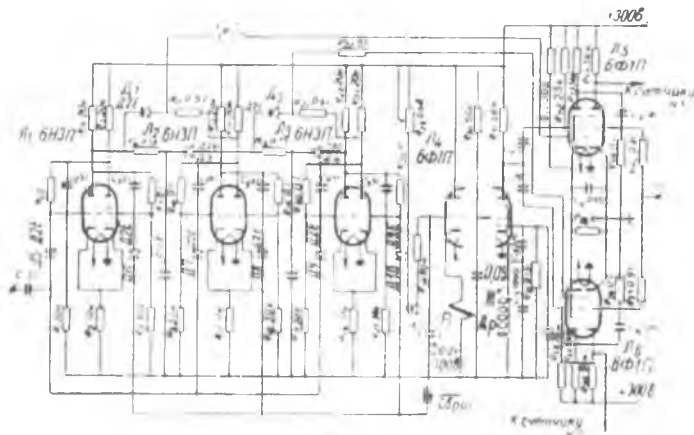


Рис. 4.

«клапанов» низкое В момент прихода первого импульса, когда опрокидывается первый триггер, на выходе первого «клапана» напряжение возрастает. В момент прихода второго импульса, когда опрокидывается второй триггер, на первом «клапане» напряжение падает, а на втором возрастает. После прихода третьего импульса опрокидывается третий триггер и на выходе второго «клапана» напряжение падает.

Эти напряжения с выходов «клапанов» подаются на схемы совпадений (электронные ключи).

Генератор импульсов собран на пентодной части лампы L_4 6Ф1П с кварцевой стабилизацией частоты. Частота генератора $\gamma = 99,921$ кГц. С выхода генератора импульсы с указанной частотой поступают на электронные ключи через конденсаторы C_{10} и C_{11} .

Реле времени собрано на триодной части лампы L_4 6Ф1П и включается нажатием кнопки «замер»; одновременно выключается с помощью дополнительного реле P_2 зажигание двигателя. После некоторой задержки, регулируемой сопротивлением R_{29} в пределах $0,1 \div 2,5$ сек., реле P_1 срабатывает и через нормально замкнутые контакты размыкают цепь диодов, которые замыкали сетки правых триодов коммутатора на землю, удерживая триггеры в исходном положении.

Каскады совпадений (электронные ключи) собраны на лампах L_5 и L_6 типа 6Ф1П. На катоды пентодов этих ламп с по-

мощью делителя R_{41}, R_{38} подано +200 в. В исходном состоянии, когда на управляющие сетки подано пониженное напряжение (150 в) с коммутатора, пентоды заперты.

При подаче повышенного напряжения (220 в) с коммутатора пентоды открываются и импульсы, подводимые на экранные сетки, имеют возможность проходить через анодную цепь к счетчикам.

Счетчики собраны по одинаковой схеме. Каждый счетчик имеет одну декаду на 4 лампах 6НЗП (разряд единиц), один декаэлектрон ОГ-3 (разряд десятков) и два декаэлектрона ОГ-4 (разряды сотен и тысяч).

Особых пояснений схема счетчиков не требует, т. к. она неоднократно описывалась в печати.

При положении переключателя делителя 1:1 в результате работы коммутатора и ключей за период между приходом с датчика оборотов первого и второго импульсов на первом счетчике зафиксировано число импульсов, соответствующее времени первого оборота вала. За период между приходом второго и третьего импульсов на втором счетчике зафиксировано число импульсов, соответствующее времени второго оборота вала.

При положении переключателя делителя 1:2 на первом счетчике зафиксировано число импульсов, соответствующее времени двух смежных оборотов, а на втором счетчике — число импульсов, соответствующее времени двух следующих оборотов вала.

Блок питания включает в себя силовой трансформатор и электронный стабилизатор на 300 в. Кроме этого, с него снимается — 150 в, +27 в и 6 в.

4. КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРА И ЕГО КРАТКАЯ ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Прибор заключен в металлический корпус. На лицевую панель выведены клеммы подключения датчика, клеммы коммутации, ручка регулировки реле времени, кнопки «замер» и «сброс» и тумблер включения сети. На лицевой панели размещены также декаэлектронные лампы счетных декад.

Для охлаждения прибора в корпус вмонтирован вентилятор, включаемый в сеть 220 в 50 гц. Предохранитель на 2 а в цепи сети выведен на заднюю стенку прибора.

При частоте генератора импульсов $\nu = 100$ кгц прибор позволяет измерять:

1) угловую скорость в диапазоне 1 000 — 10 000 об/мин. с точностью, приведенной в таблице 1;

2) угловое ускорение с точностью, указанной в таблице 2.

Таблица 1

n , об/мин.	δ_{ω} %
1 000	0,008
3 000	0,025
5 000	0,042
10 000	0,084

Питается прибор от сети переменного тока 220 в, 50 гц.

Потребляемая мощность ~ 180 вт.

Габариты прибора 365x260x320 мм.

Вес прибора 12 кг.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ И УГЛОВОГО УСКОРЕНИЯ. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ И ЛИНЕАРИЗАЦИИ

Определение угловой скорости и углового ускорения с помощью прибора ИСУ-2 рассмотрим применительно к свободному выбегу коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания.

При неустановившемся движении, каким является выбег, кинематические величины (угловая скорость и ускорение) изменяются неперiodически. В силу постоянно действующего момента механических потерь угловая скорость в начале углового периода больше, чем в конце его. Помимо этого, в пределах каждого углового периода имеет место изменение угловой скорости, так как силы, действующие на кривошипно-шатунный механизм даже при отсутствии процесса сгорания в цилиндре двигателя

будут переменными по величине в зависимости от угла поворота коленчатого вала.

Таким образом, изменение скорости при выбеге за соответствующий угловой период, будет носить сложный характер, изучение которого подлжит специальному рассмотрению. В пределах данной работы мы ограничимся рассмотрением вопроса определения угловой скорости на неустановившемся режиме работы двигателя при монотонном ее изменении в процессе выбега в пределах каждого углового периода.

На рис. 5 показан характер изменения угловой скорости коленчатого вала двигателя при выбеге за два угловых периода.

Точка «0» соответствует моменту включения первого счетчика прибора; точка «1» — моменту выключения первого счетчика и моменту включения второго счетчика; точка «2» — моменту выключения второго счетчика.

При работе прибора за время t_1 , соответствующее повороту коленчатого вала на угол α_1 (участок 0—1), на счетном устройстве первого счетчика регистрируется число импульсов f_1 . При дальнейшем повороте коленчатого вала на угол α_2 за время t_2 (участок 1—2) на счетном устройстве второго счетчика регистрируется число импульсов f_2 . Если принять равными угловые периоды, т. е.

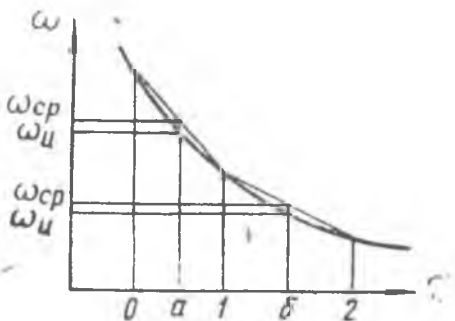


Рис. 5.

$\alpha_1 = \alpha_2$, то при выбеге время второго углового периода будет больше времени первого углового периода, т. е. $\tau_2 > \tau_1$, а следовательно, при постоянной частоте генератора временных импульсов $v = \text{const}$ число импульсов, отсчитанных вторым счетчиком, будет больше числа импульсов, отсчитанных первым счетчиком, т. е. $f_2 > f_1$.

Для дальнейшей математической обработки криволинейный характер изменения угловой скорости в пределах каждого углового периода с приемлемой степенью точности можно заменить прямолинейным, а значение угловой скорости можно принять средним в пределах каждого углового периода.

При данном допущении зависимость между углом поворота коленчатого вала и временем выражается соотношением

$$\tau = \frac{\alpha}{6n} = \frac{\pi\alpha}{6 \cdot 30 \cdot \omega} \text{ сек.} \quad (1)$$

где α — угол поворота коленчатого вала в градусах;
 n — число оборотов коленчатого вала в минуту;
 ω — средняя угловая скорость за угловой период.

Время поворота коленчатого вала на угол α может быть выражено через число импульсов f и их частоту v

$$\tau = \frac{f}{v} \text{ сек.} \quad (2)$$

Из соотношений (1) и (2) получим формулу для определения угловой скорости

$$\omega = \frac{\pi v}{6 \cdot 30 \cdot f} \tau. \quad (3)$$

Если принять, что угловой период равен одному обороту коленчатого вала, т. е. $\tau_1 = \tau_2 = 360^\circ = 2\pi$, тогда

$$\omega = \frac{360 \pi v}{6 \cdot 30 \cdot f} = 2\pi \frac{v}{f}, \frac{1}{\text{сек}}, \quad (4)$$

где v — частота генерируемых импульсов;
 f — число импульсов, отсчитанных счетчиком за один оборот коленчатого вала.

При включенном делителе, когда каждый из счетчиков измеряет время двух смежных оборотов коленчатого вала, угловая скорость может быть определена по выражению (4) для соответствующих величин углового периода 4π и числа импульсов f , отсчитанных счетчиком за этот угловой период.

Для определения углового ускорения коленчатого вала двигателя при выбеге производится измерение времени двух следующих друг за другом угловых периодов. Средняя угловая скорость, определяемая уравнением (4) за первый угловой период, будет больше средней угловой скорости за второй угловой период, т. е. $\omega_1 > \omega_2$ (см. рис. 5).

Изменение угловой скорости за два угловых периода, когда $\alpha_1 = \alpha_2 = 2\pi$, будет определяться следующим выражением

$$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2 = 2\pi \frac{\nu}{f_1} - 2\pi \frac{\nu}{f_2} = 2\pi\nu \frac{f_2 - f_1}{f_1 \cdot f_2} \quad (5)$$

Если в качестве интервала времени $\Delta\tau$ принять среднее арифметическое значение из времени первого и второго угловых периодов, т. е.

$$\Delta\tau = \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} = \frac{f_1 + f_2}{2\nu}, \quad (6)$$

то угловое ускорение коленчатого вала двигателя в пределах двух смежных оборотов можно определить как отношение изменения угловой скорости к соответствующему интервалу времени, т. е.

$$\varepsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta\tau} = 4\pi\nu^2 \frac{f_2 - f_1}{f_1 \cdot f_2 (f_1 + f_2)}, \quad \frac{1}{\text{сек}^2}. \quad (7)$$

Если угловая скорость каждым из счетчиков импульсов определяется за два оборота коленчатого вала, когда $\alpha_1 = \alpha_2 = 4\pi$ (при включенном делителе), то изменение угловой скорости за четыре оборота будет равно

$$\Delta\omega = 4\pi\nu \frac{f_2 - f_1}{f_1 \cdot f_2}. \quad (5')$$

Определяя интервал времени ($\Delta\tau$) по выражению (6), угловое ускорение будет определяться как

$$\varepsilon = 8\pi\nu^2 \frac{f_2 - f_1}{f_1 \cdot f_2 \cdot (f_1 + f_2)}, \quad \frac{1}{\text{сек}^2}. \quad (7')$$

При измерении малых интервалов времени прибором ИСУ-2 неизбежно возникают погрешности, обуславливающие точность определения угловой скорости и углового ускорения вала. В общем виде погрешности будут складываться из погрешностей прибора и погрешностей линеаризации.

Основными погрешностями прибора являются: погрешности датчика, вызванные нестабильностью амплитуды управляющего сигнала; погрешности генератора импульсов; погрешности, обусловленные самим методом дискретного отсчета и погрешности, зависящие от ширины зоны чувствительности счетчика.

Общая относительная погрешность измерения прибором малых интервалов времени может быть найдена по формуле

$$\delta = \frac{\Delta\tau_1 + \Delta\tau_2 + \Delta\tau_3 + \Delta\tau_4}{\tau}, \quad 100\%. \quad (8)$$

Абсолютная погрешность $\Delta\tau_1$ зависит от нестабильности крутизны переднего фронта управляющего сигнала от датчика входных сигналов. Проведенные нами исследования показали, что эта

погрешность не превышает $\pm 0,5$ периода колебаний генератора импульсов.

Абсолютная погрешность $\Delta\tau_2$ складывается из погрешности, допущенной при настройке генератора в некоторых нормальных условиях, и погрешности, вызванной изменением внешних условий к моменту измерения. В обычных условиях величина неточности определения собственной частоты калибратора не превосходит $5 \cdot 10^{-6}$ периода [2]. При измерении малых одиночных интервалов времени погрешность, вызванная нестабильностью пьезокварцевого осциллятора без термостатирования, обычно находится в пределах $10^{-6} - 10^{-7}$ сек [3]. При измерении интервалов времени следующих друг за другом оборотов вала абсолютными погрешностями изменения частоты можно пренебречь.

Точность измерения малых интервалов времени зависит, главным образом, от абсолютной погрешности, обусловленной самим методом дискретного счета. Это значит, что результаты отсчетов могут отличаться друг от друга только на целое число периодов генератора импульсов. Абсолютная погрешность $\Delta\tau_3$, вызванная дискретностью получаемых данных, по литературным источникам [2] не превышает половины периода, т. е. при частоте генератора 100 кГц $\Delta\tau_3 \leq 5$ мк сек.

Погрешность $\Delta\tau_4$ зависит от ширины зоны чувствительности счетчика импульсов и возникающих при этом флуктуаций момента срабатывания счетчика. Применение в приборе формирующих каскадов, преобразующих синусоидальные импульсы в прямоугольные и обеспечивающих получение импульсов с весьма большой крутизной фронтов нарастания и спадания, позволяет снизить эту погрешность до малоощутимой величины.

Из проведенного анализа видно, что суммарная погрешность измерения малых одиночных интервалов времени, в основном, определяется погрешностями $\Delta\tau_1$ и $\Delta\tau_3$. При проведении большого числа измерений времени оборота вала электродвигателя с большой дополнительной маховой массой, работающего на строго постоянном режиме, разность показаний первого и второго счетчиков не превышает двух импульсов. Это еще раз говорит о том, что абсолютная погрешность измерения интервала времени каждым счетчиком не превышает ± 1 периода.

Следовательно, относительную погрешность измерения угловой скорости прибором ИСУ-2 можно определить по формуле

$$\delta_{\omega} = \frac{1}{f}, \quad 100\%. \quad (9)$$

В таблице 1 приведены величины относительных погрешностей измерения угловой скорости при включенном делителе управляющих сигналов оборотов, рассчитанные по формуле 9.

С выключенным делителем управляющих сигналов значения относительных погрешностей вырастает в два раза,

Относительную погрешность измерения углового ускорения можно установить по формуле

$$\delta_{\epsilon} = \left(\frac{\Delta f_2 + \Delta f_1}{f_2} + \frac{\Delta f_1}{f_1} + \frac{\Delta f_2}{f_2} - \frac{\Delta f_1 + \Delta f_2}{f_1 + f_2} \right) 100 \% \quad (10)$$

Анализ формулы (10) показывает, что относительная погрешность, в основном, определяется первым членом правой части равенства. Следовательно, относительную погрешность при измерении углового ускорения можно определить по упрощенной формуле

$$\delta_{\epsilon} = \frac{\Delta f_2 + \Delta f_1}{f_2 - f_1} 100 \% \quad (11)$$

где, как было установлено выше, $\Delta f_1 = \Delta f_2 = 1$.

Значения относительной погрешности приведены в таблице 2.

Таблица 2

$\nu \frac{1}{\text{сек}^2}$	Относительная погрешность в % при оборотах в минуту			
	1000	2000	3000	4000
25	0,581	4,655	15,4	40,0
100	0,145	1,17	3,85	10,0
200	0,073	0,58	1,93	5,0
300	0,049	0,388	1,18	3,35

Из таблицы 2 видно, что относительная погрешность измерения углового ускорения увеличивается с ростом угловой скорости и уменьшением величины углового ускорения. Поскольку численные значения абсолютной погрешности измерения импульсов f_1 и f_2 при этом остаются постоянными, то величина относительной погрешности будет определяться разностью числа импульсов, отсчитанных счетчиками прибора. Разность числа импульсов изменяется пропорционально частоте генератора импульсов. При увеличении коэффициента деления управляющих сигналов оборотов i разность импульсов $f_2 - f_1$ будет увеличиваться в i^2 раз.

Рассмотрим возможные погрешности определения угловой скорости и углового ускорения прибором ИСУ-2, вызванные линеаризацией. При монотонном изменении, обусловленном затуханием угловой скорости по времени при выбеге, истинная величина угловой скорости в середине углового периода ω_u будет всегда меньше средней угловой скорости $\omega_{\text{ср}}$ за этот же период (см. рис. 5).

Отклонения угловой скорости в указанных точках углового периода от истинного ее значения будет определяться выражением

$$\Delta \omega = \omega_{\text{ср}} - \omega_u \quad (12)$$

Относительная погрешность при этом за счет линеаризации угловой скорости по времени будет равна

$$\delta = \frac{\Delta\omega}{\omega_u} 100 \%. \quad (13)$$

Истинную величину угловой скорости в точках a и l можно рассчитать с помощью уравнения, в основу которого положен принцип мгновенного равенства системы, когда при свободном вращении вала машины для каждого момента времени справедливо равенство приведенных моментов сил инерции M_j и сил внешнего сопротивления M_m , т. е.

$$M_j = M_m. \quad (14)$$

Момент сил инерции двигателя определяется из соотношения

$$M_j = J_{дв} \frac{d\omega}{d\tau}, \quad (15)$$

где $J_{дв}$ — приведенный момент инерции двигателя;

$\frac{d\omega}{d\tau}$ — угловое ускорение вала двигателя

Момент сил внешнего сопротивления представляет собой затраты крутящего момента на преодоление различных сопротивлений в самом двигателе при осуществлении рабочего цикла и определяется из выражения.

$$M_m = 716,2 \frac{N_m}{n}, \quad (16)$$

где N_m — мощность механических потерь, л. с.;

n — число оборотов коленчатого вала.

По экспериментальным данным, основанным на результатах испытаний двигателя при прокрутке, принимают, что мощность механических потерь двигателей внутреннего сгорания является функцией числа оборотов с показателем степени $m \geq 2$ [4], но постоянным для данного двигателя в широком диапазоне изменения чисел оборотов, т. е.

$$N_m = A\omega^m. \quad (17)$$

С учетом выражения (17) момент механических потерь можно определить из следующего уравнения

$$M_m = 716,2 \frac{\pi}{30} A \frac{\omega^m}{\omega} = B\omega^{m-1} \quad (18)$$

Тогда уравнение (14) с учетом (15) и (18) в общем случае примет вид

$$J_{дв} \frac{d\omega}{d\tau} + B\omega^{m-1} = 0 \quad (19)$$

Последнее уравнение (19) позволяет при известных величинах, входящих в него, определить изменение угловой скорости по времени. Так, при $m < 2$ изменение угловой скорости будет определяться соотношением

$$\frac{\omega_x}{\omega_0} = \left[1 - \frac{2-m}{\omega_0^{2-m}} C\tau \right]^{\frac{1}{2-m}}, \quad (20)$$

где $C = \frac{B}{J_{дв}}$;

при $m = 2$ это изменение будет определяться как

$$\frac{\omega_x}{\omega_0} = \frac{1}{e^{C\tau}}, \quad (21)$$

и при $m > 2$

$$\frac{\omega_x}{\omega_0} = \frac{1}{[1 + (m-2)\omega_0^{m-2}C\tau]^{\frac{1}{2-m}}}. \quad (22)$$

Время измеряемого углового периода τ , входящее в расчетные выражения (20), (21) и (22) с некоторым приближением можно найти из зависимости

$$\tau = \frac{\alpha}{\omega_0} \text{ сек.} \quad (23)$$

Среднюю угловую скорость в пределах каждого углового периода можно найти как среднее арифметическое из значений угловой скорости начала и конца углового периода, найденных по расчетным выражениям (20), (21) и (22).

Результаты определения погрешности линеаризации при $\alpha=2\pi$, $m=1,62$, $J_{дв} = 0,0383 \text{ кг}\cdot\text{м}\cdot\text{сек}^2$ и $C = 3,407$ (что соответствует данным двигателя М-21) приведены в таблице 3.

Таблица 3

Погрешность линеаризации	Угловая скорость ω_0			
	400	300	200	100
$\delta \%$	0,00025	0,003	0,009	0,029

Полученные результаты позволяют утверждать, что погрешностью линеаризации при определении угловой скорости и углового ускорения коленчатого вала двигателей внутреннего сгорания при свободном выбеге можно пренебречь.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Лукачев, Ю. С. Быховский. Авторское свидетельство № 145807, 1962.
 2. Падерно, В. Федоров, «Точное измерение времени», журнал «Радио», № 11, 1961.
 3. П. И. Павленко, «Счетно-импульсный хронометр», Физматгиз, Москва, 1963.
 4. М. М. Масленников и М. С. Рапипорт, «Авиационные поршневые двигатели», Оборонгиз, Москва, 1951.
-