## И З В Е С Т И Я ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

Том 96

1961

# ИЗ ОПЫТА ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОТОРСИОГРАФА С ИНДУКЦИОННЫМ ДАТЧИКОМ

### В. К. НЕЧАЕВ, А. Т. БОЛГОВ, Е. Н. НЕВСТРУЕВ

Современная техника экспериментальных исследований крутильных колебаний валов силовых установок с поршневыми двигателями характеризуется широким применением электроторсиографов с различного рода датчиками [1, 2, 4, 5, 8, 9, 12]. Однако в области электроторсиографирования в настоящее время нельзя считать окончательно решенным целый ряд вопросов, связанных с выбором типа и конструктивного оформления датчиков, схем усилительной и регистрирующей аппаратуры и особенно с методикой электроторсиографирования, тарировкой, анализом возникающих при торсиографировании погрешностей, а также с методикой обработки опытных данных. Кроме того, в процессе доводки прибора всегда имеют место отдельные мелкие неполадки, на ликвидацию которых затрачивается немало времени, которые, однако, можно избежать, если известны заранее возможные их источники. Эти обстоятельства побудили нас поделиться в настоящей статье некоторым опытом по применению электрического торсиографа с индукционным датчиком, созданного и использованного нами в лаборатории двигателей внутреннего сгорания Томского политехнического института <sup>1</sup>).

### Описание электроторсиографа

Блок схема электроторсиографа с регистрацией колебаний при помощи катодного и магнитоэлектрического осциллографов приведена на фиг. 1.

Устройство датчика торсиографа показано на фиг. 2. Алюминиевый корпус датчика состоит из двух частей 1 и 2, стянутых тремя стяжными болтами 3. Стальной башмак 4 вместе с приклеенной к нему катушкой 5 зажат своим буртиком между частями 1 и 2 корпуса. В корпусе на шариковых подшипниках расположен постоянный магнит (сейсмическая масса) 6 цилиндрической формы. Магнит соединен с корпусом двумя эластичными спиральными пружинами 7 с противоположным направлением спиралей. Внутренние концы пружин закреплены в зажиме 8, соединенном с магнитом. Крепление наружных концов пружин к корпусу выполнено с помощью скоб 9 и шпильки с гайкой 10.

1) Мы не останавливаемся здесь на обосновании выбранного типа датчика.

Датчик крепится к торцу вала торсиографируемого двигателя с помощью переходника 11 и монтажной втулки 12 со стопорным болтом 13.

Один вывод катушки соединен с контактным кольцом 14, изолированным от корпуса, второй вывод—с корпусом. Контактное кольцо выполнено из латуни. Токосъем с кольца осуществляется тремя медно-графитовыми щетками, смонтированными на специальной державке.

Напряжение, индуцируемое в катушке, пропорционально мгновенной угловой скорости колебательного движения торсиографируе-



Фиг. 1. Блок-схема электроторсиографа.

мого сечения вала. Для получения сигналов, пропорциональных угловым перемещениям этого сечения при крутильных колебаниях, выходное напряжение датчика подвергается интегрированию. В каче-



Фиг. 2. Устройство датчика торсиографа.

стве интегрирующего контура нами была использована простейшая ячейка RC.

Выходное напряжение интегрирующего контура подается на вход усилителя постоянного тока (фиг. 3).

Питание усилителя производится от отдельного выпрямителя с электронной стабилизацией анодного напряжения.

Выходное напряжение усилителя подается непосредственно на одну из пар горизонтальных выход

пластин двухлучевого катодного осциллографа.

Второй луч катодного осциллографа используется для записи отметок времени и оборотов двигателя. При этом нами применялся электронный коммутатор, в котором в качестве "переключателя" использовались два триода 6Н8, работающие на общую нагрузку. Управление работой триодов осуществляется импульсами напряжения, вырабатываемыми симметричным мультивибратором, собранным на лампах 6П6.



Фиг. 3. Принципиальная схема усилителя постоянного тока.

Отметки оборотов вала двигателя и сигналы для синхронизации генератора развертки осцил-



Фиг. 4. Схема индукционного датчика электрических импульсов синхронизации и отметок мертвых точек. лографа получаются с помощью установленного на этом валу отметчика оборотов и синхронизатора электромагнитного типа, схема которого изображена на фиг. 4. Здесь: 1—постоянный магнит, 2—сердечники, 3—катушка синхронизатора, 4—катушка отметчика оборотов, 5—стальной стержень, 6—вал двигателя, 7—втулка с фланцем, укрепленная на валу 6.

Стержень 5 прикреплен болтами к фланцу 7 (по возможности ближе к узлу колебаний валопровода системы) таким образом, что момент прохождения стержня 5 между сердечниками 2 совпадает с моментом прохода поршня первого цилиндра двигателя через верхнюю мертвую точку.

Отметки времени получались с помощью звукового генератора ЗГ-2А, установленного на желательную (с точки зрения удобства последующей обработки осциллограмм) частоту колебаний.

Для определения масштаба записи колебаний перед экраном осциллографа помещается миллиметровая сетка, выполненная на прозрачной основе.

Изображения кривой колебаний вала (собственно торсиограммы) и вспомогательных кривых на экране осциллографа вместе с масштабной миллиметровой сеткой фотогра-

S\*,

фировались на узкую пленку с помощью зеркального фотоаппарата, установленного перед экраном. Шторный затвор аппарата был установлен на постоянное открытие и необходимая экспозиция съемки обеспечивалась дополнительным центральным затвором, установленным перед объективом фотоаппарата.

Необходимость малой экспозиции при съемке торсиограмм и зеленое свечение экрана использованного нами импортного осциллографа затрудняли съемку. Удовлетворительные результаты были получены при применении отечественной фотопленки типа "Изопанхром", чувствительностью 250-350 единиц по ГОСТу. Фотопленка обрабатывалась в специальном осциллографическом проявителе.

Кроме покадровых съемок с экрана нами производилась также непрерывная регистрация колебаний вала с помощью магнитоэлектрического осциллографа МПО-2. При такой записи использовался отдельный электронный усилитель с низкоомным выходом, позволивший применить при осциллографировании шлейф первого типа, имеющий собственную частоту колебаний в воздухе 5000 герц.

Приводим сводку основных характеристик описанного выше электроторсиографа.

Габаритные размеры датчика: диаметр (наружный)—100 мм, длина—95 мм, вес датчика—2,5 кг; собственная частота колебаний датчика—около 7 герц; практический диапазон измеряемых колебаний 900— —6000 циклов в минуту (при более высоких частотах колебаний прибор авторами не использовался); практический диапазон амплитуд (угловых) измеряемых колебаний 0,067—5,00 град.; чувствительность датчика

$$\eta = 4.0 \ \frac{MB}{rpa\partial/ce\kappa} ;$$

вид успокоения подвижной системы датчика: трение в подшипниках якоря-магнита; число витков в катушке датчика—2000.

### Тарирование электроторсиографа

Для приборов с индукционным датчиком, как правило, необходима динамическая тарировка—с целью определения масштаба записи колебаний при различных частотах, с учетом характеристик всего электрического тракта от датчика до экрана осциллографа.

В литературе описано несколько типов калибраторов для динамической тарировки [5, 6, 9, 12].

Мы использовали калибратор кулачкового типа, основным преимуществом которого является простота его конструкции.

Схема разработанного и изготовленного в лаборатории ДВС ТПИ калибратора приведена на фиг. 5. Здесь: 1—цилиндрический кулачок, эксцентрично насаженный на ось вала электромотора постоянного тока, 2—ролик, 3—рычаг, 4—фланец, жестко связанный с рычагом, 11—пружина. При тарировке описанный выше датчик (фиг. 2) прикрепляется к фланцу 4. При вращении электромотора, а, следовательно, и кулачка корпусу датчика сообщается гармоническое колебательное движение с заданной частотой в пределах от 200 до 6000 цикл/мин и амплитудой от 10 минут до 5,0°. Регулирование частоты этих колебаний производится плавно путем изменения числа оборотов электромотора при помощи реостатов.

Необходимая амплитуда колебаний корпуса задается установкой кулачков с определенной величиной эксцентриситета. При тарировании выходное напряжение датчика подается на осциллограф через ту же цепь (при фиксированном усилении усилителя), что и при торсиографировании.

Число оборотов кулачка (частота колебаний) определяется при обработке тарировочных торсиограмм на основе отметок оборотов и времени, которые получаются так же, как и при торсиографировании. При предварительном установлении желательного числа оборотов кулачка в процессе тарирования (т. е. частоты вынужденных



Фиг. 5. Схема калибратора электроторсиографа.

тармонических колебаний корпуса тарируемого датчика) нами использовался приставной тахометр центробежного типа.

Схема устройства для измерения угловых амплитуд колебаний датчика при тарировке также приведена на фиг. 5.

Здесь: 5-фасонный стержень, жестко прикрепленный к фланцу 4 калибратора и электрически изолированный от последнего, 6-контактная пластина, 7-контактная вилка, 8-микрометрический винт, 9-микрометрический нониус, 10-неоновая лампа, 12-источник постоянного тока.

Измерение амплитуд производилось следующим образом. Контактная вилка 7 с помощью микрометрического винта перемещается сначала вверх (вниз) и по нониусу устройства производится отсчет  $K_1$ , соответствующий моменту вспышки неоновой лампы (моменту контакта ножки вилки с контактной пластиной). Аналогичное проделывается при движении контактной вилки вниз (вверх)—отсчет  $K_2$ .

Удвоенная линейная амплитуда колебаний фланца датчика (на радиусе) определяется по выражению

$$2 \Phi_{A} = H - S - (K_{1} - K_{2}), MM$$

где *S* — толщина контактной пластинки 6, *H* — расстояние между контактами вилки 7.

Величины *H* и *S* измерялись при каждом из опытов. Теперь угловая амплитуда колебаний датчика будет равна<sup>1</sup>)

$$\Phi_T = \frac{\Phi_A}{r}$$
радиан =  $\frac{180}{\pi} \cdot \frac{\Phi_A}{r}$  60 минут

или в нашем случае при r = 105 мм

$$\Phi_T = 16,4 [H - S - (K_1 - K_2)]$$
 минут. (a)

<sup>1)</sup> В лабораторни ДВС ТПИ была разработана и оптическая тарировка (см. статью В. К. Нечаева и А. Т. Болгова "К определению гистерезисных потерь энергии в валах", "Известия ТПИ", том 85, Томск, 1956 г).

Как показали многократные измерения, амплитуда  $\Phi_T$  корпуса датчика оказывалась одинаковой во всем интересовавшем нас интервале частот колебаний (до 6000 колебаний в мин), т. е. интервале скоростей вращения кулачка и вала электромотора. Это следует считать свидетельством достаточной жесткости всего показанного на фиг. 5 тарировочного устройства и достаточной затяжки пружины, прижимающей ролик к кулачку. Теперь, имея уверенность в независимости величины  $\Phi_T$  от скорости вращения кулачка, можно было Снять частотную характеристику всего измерительного тракта: датчик—интегрирующий контур—усилитель-осциллограф. Для этого было достаточно замерить величины отклонений В (мм) луча на экране катодного осциллографа (или луча на пленке при использовании шлейфового осциллографа) при одном и том же кулачке, т. е. неизменной, как показано ранее, угловой амплитуде колебаний корпуса тарируемого датчика и различных числах оборотов этого кулачка. Конечно, положение регулировочных ручек электронного усилителя, включенного между датчиком и осциллографом (фиг. 1), сохранялось при этом все время неизменным.

На фиг. 6 в качестве примера приводится тарировочный график, полученный при регистрации колебаний с помощью катодного осциллографа.

Для, проверки линейности всего измерительного тракта от датчика до экрана осциллографа нами снимались амплитудные характеристики



Фиг. 6. Тарировочный график электроторсиографа.

электроторсиографа. Одна из таких характеристик дана на фиг. 7 (изменение амплитуд Ф обеспечивалось сменой кулачков с различным эксцентриситетом).

Из фиг. 6 и 7 видно, что описываемый электроторсиограф с катодным осциллографом обладает хорошей линейной характеристикой.

Аналогичная хорошая линейная характеристика была получена нами при работе этого электроторсиографа на шлейфовый осциллограф.

Для получения надежных результатов тарировки желательно, чтобы тарировочное устройство за давало тарируемому датчику чистые моногармонические угловые колебания. Анализ искажений формы колебаний, обусловленных конструкцией калибратора, мы проделали по-

М. Э. Гарфу [3]. Коэффициент искажения формы колебаний тарировочного устройства К ф определяется выражением

$$\mathbf{K}_{\mathbf{p}} = \frac{u_{1_{\text{MAKC}}} - u_{2_{\text{MAKC}}}}{u_{2_{\text{MAKC}}}} \cdot 100\%,$$

где *и*<sub>1</sub>—фактические ускорения, получаемые датчиком от тарировочного устройства;

и<sub>2</sub>—ускорения, вычисленные по фактической амплитуде корпуса датчика (измеренной неоновым индикатором), в предположении строгой синусоидальности колебаний.



Фиг. 7. График амплитудной тарировки электроторсиографа.

86-2

Описываемое тарировочное устройство, выполненное по схеме



Фиг. 8. Действительная (a) и эквивалентная ( $\sigma$ ) схемы тарировочного устройства.

фиг. 8а, представим в виде шатунно-кривошипного механизма по фиг. 8б. Для этого механизма имеем

$$\mathbf{K}_{qp} = \left(\frac{\varepsilon_{\kappa}}{l_p} / \frac{\varepsilon_{\kappa}}{1 - \left(\frac{\varepsilon_{\kappa}}{l_p}\right)^2} \operatorname{arcsin} \frac{\varepsilon_{\kappa}}{l_p} - 1\right) \cdot 100\%.$$

Значения коэффициента  $K_{cb}$ , подсчитанные по последнему выражению для описываемого тарировочного устройства (в нашем случае  $l_p = 80 \text{ мм}$ ; ( $\varepsilon_{\kappa}$ )<sub>макс</sub> = 3,5 мм), не превышают 0,37%. Это свидетельствует о том, что принятия конструкция калибрагора при выбранных нами размерах обеспечивает получение практически чистых моногармонических колебаний. Небольшие высокочастотные "накладки", имевшие место при тарировке, объясняются в основном погрешностями наготовления и сборки механизма калибратора.

### Токосъем при электроторсиографировании

Скольжение щеток токосъемного устройства, как правило, ведет к некоторой нестабильности переходного сопротивления, которое может искажать результаты торсиографирования. В нашем случае датчик при тарировке на описанном выше устройстве (фиг. 5) не вращается. Это может привести к дополнительной ошибке.

Мы проверяли работу токосъемного устройства по схеме, изображенной на фиг. 9. При проверке из датчика извлекался магнит. На корпусе датчика монтировалось второе токосъемное кольцо. К этому кольцу подсоединялся тот вывод катушки, который в рабо-



Фиг. 9. Схема проверки работы щеток токосъемного устройства.

чем состоянии соединен с массой. Датчик закреплялся на валу электромотора тарировочного устройства и приводился во вращение. В цепь катушки датчика через щетки включался звуковой генератор и усилитель. Поскольку в цепь звукового генератора включены последовательно щетки, то при наличии существенных колебаний переходного сопротивления в месте контакта щетки с кольцом на экране осциллографа будут наблюдаться искажения формы или амплитудная модуляция синусоиды. При испытании токосъемного устройства в интервале скоростей от нуля до 2000 об/мин не было заметно никаких искажений формы и величины напряжений на выходе усилителя.

### Выбор параметров и проверка работы интегрирующей ячейки

Параметры интегрирующей ячейки (величины *R* и *C*) выбирались нами по Г. Л. Шнирману [10], исходя из допустимой величины "масштабных искажении"  $\Delta V$ , равной

$$\Delta V = \frac{100}{2\pi f R C} 2\%,$$

где: f — частота (в герцах) интегрируемого процесса; R — в омах; C — в фарадах.

00

Чтобы получить объективное суждение о качествах принятой интегрирующей ячейки, была проделана проверка ее работы по трем методам.

1. На вход интегрирующей ячейки подаются сигналы П-образной формы от специального мультивибратора. Выходное напряжение интегрирующей цепи через усилитель подается на пластины осциллографа. При хорошем интегрировании П-образное напряжение должно преобразоваться в ячейке в напряжение пилообразной формы.

2. Определяется опытным путем частотная характеристика интегрирующего контура: зависимость амплитуды выходного (проинтегрированного) синусоидального напряжения от частоты его при подаче на вход ячейки напряжения с постоянной амплитудой и переменной частотой от звукового генератора.

Можно показать, что точки указанной характеристики при точном интегрировании располагаются по гиперболе.

3. Определяется сдвиг по фазе между синусоидальным напряжением и его интегралом. При точном интегрировании сдвиг по фазе составляет 90°. Фактическая величина этого угла определяется по фигурам Лиссажу, или на экране двухлучевого осциллографа одновременным наблюдением кривых подводимого к ячейке напряжения и снимаемого с нее.

Все эти использованные нами методы проверки показали, что при значениях  $\Delta V = 5 \div 10\%$  простая интегрирующая ячейка типа *RC* обеспечивает достаточно качественное интегрирование во всем интересующем нас диапазоне частот.

Следует отметить, что в описанном торсиографе некоторая неточность интегрирования на очень низких частотах компенсируется за счет тарирования: при тарировании и торсиографировании сигналы от датчика подаются к осциллографу через одну и ту же цепь.

#### Методика электроторсиографирования поршневого двигателя

Нами была принята следующая методика электроторсиографирования (при использовании катодного осциллографа).

Датчик закреплялся на торце вала торсиографируемого двигателя. Устанавливалось заданное число оборотов вала вблизи расчетного критического числа оборотов двигателя. После синхронизации генератора развертки осциллографа с регистрируемым колебательным процессом (остановка изображения на экране) подбиралось необходимое усиление усилителя так, чтобы полнее использовать поле экрана.

Частота выходного напряжения звукового генератора также синхронизировалась с частотой развертки. Затем производилась фотосъемка изображений осциллограммы на экране с помощью узкопленочного зеркального фотоаппарата. Одновременно в протокол испытания вносились необходимые данные, в частности, частота звукового генератора  $f_3$ .

Сначала на заданном скоростном режиме двигателя съемка производилась 2—3 раза. Экспозиция подбиралась таким образом, чтобы в одном кадре пленки фиксировался только один полный цикл колебания. Позднее оказалось более целесообразным снимать на один кадр несколько циклов колебаний. При этом получается меньший расход фотоматериалов и имеется возможность выяснить, насколько стабильно держится заданный режим работы двигателя, а также режим исследуемых колебаний.

Затем устанавливалось другое желательное число оборотов двигателя и аналогично описанному выше производилась съемка торсиограмм.

Всего вблизи каждого расчетного резонанса снималось не менее 30 торсиограмм.

После завершения намеченной программы торсиографирования датчик снимался с вала двигателя и после установки на тарировочное устройство подвергался контрольной тарировке по описанной выше методике.

Затем пленки (с основными и тарировочными торсиограммами) проявлялись, кадры на них нумеровались. Увеличенные фотокопии торсиограмм подвергались дальнейшей обработке.

При обработке тарировочных торсиограмм определялись полные размахи колебаний луча на экране *B* в *мм* с помощью масштабной сетки и обороты кулачка калибратора (частота колебаний) и строился тарировочный график.

Число оборотов кулачка определялось по выражению



Отметки времени

Фиг. 10. Пример записи торсиограммы.  $n_{\kappa} = \frac{60f_3}{m}, \quad \text{об/мин}, \quad (1)$ 

где *m*—число периодов на линии отметок времени, приходящееся на один оборот вала.

На основании тарировочного графика определялся масштаб записи амплитуд колебаний и формуле

$$\mu_{\phi} = \frac{2 \Phi_T \text{ MWH}}{B \text{ MM}}.$$
 (2)

Обработка торсиограмм, снятых с вала установки, проводилась следующим образом.

1. Определялось число оборотов вала *n* по выражению (1).

2. Производился гармонический анализ торсиограмм по графическому методу Фишер-Хиннена; все вспомогательные построения делались непосредственно на фотокопии торсиограммы.

3. Строились резонансные кривые для вала двигателя.

4. По резонансным кривым определялись резонансные числа оборотов двигателя  $n_{pes}$  и резонансные амплитуды  $\Phi_{pes}$  для торсиографируемого сечения вала. Амплитуды колебаний торсиографируемого сечения вала при обработке торсиограмм определялись по выражению

$$\Phi = \overline{\Phi} \cdot \mu_{\phi} = \overline{\Phi} \frac{2 \Phi_T}{B} (\text{минуты}), \tag{3}$$

где  $\overline{\Phi}$  — отрезок (в *мм*) на торсиограмме, соответствующий искомому значению амплитуды. На фиг. 10 приведена для примера торсиограмма, снятая с вала одной экспериментальной моторной установки в лаборатории ДВС ТПИ <sup>1</sup>).

На фиг. 11 представлена одна из резонансных кривых для той же экспериментальной установки при резонансах второго (h = 2) и третьего (h = 3) порядков.

Торсиографирование с использованием шлейфового осциллографа менее трудоемко. Мы проводили непрерывное торсиографирование "на-



Фиг. 11. Резонансная кривая, вала моторной установки.

проход через резонанс" дважды: с повышением и понижением числа оборотов торсиографируемого вала. В этом случае отпадает необходимость изготовления фотокопий. Амплитуды колебаний и обороты вала определяются непосредственно по кривым на пленке. Обработка торсиограмм оканчивается также построением резонансных кривых.

### Анализ ошибок торсиографирования

Как известно, предельная абсолютная ошибка функции нескольких (*p*) независимых переменных вида

$$y = F(x_1, x_2, x_3, \dots, x_p)$$
(4)

определяется выражением

<sup>1)</sup> См. статью А. Т. Болгова "К вопросу о зависимости характеристик демифирующих сил в моторных установках от момента инерции маховика", "Известия ТПИ", том 85, 1956 г.

$$\delta_{y} = \pm \sum_{i=1}^{l=p} \left| \frac{\partial F(x_{1}, x_{2}, x_{3}, \dots, x_{p})}{\partial x_{i}} \delta x_{i} \right|,$$
(5)

где д  $x_i$  — погрешность определения независимой переменной  $x_i$ . Предельная относительная ошибка функции (4) определяется так:

$$(\delta_y)_{om\mu} = \pm \frac{\delta y}{y} \ 100\%.$$
 (6)

Предельная абсолютная ошибка  $\delta_n$  каждого отдельного определения числа оборотов вала *n* на основании (1) и (5) равна

$$\delta_n = \pm 60 \left( \frac{\delta f_3}{m} + \frac{f_3}{m^2} \delta m \right) \text{ об/мин.}$$

Здесь:  $\delta f_3$  — предельная абсолютная ошибка отсчета частоты  $f_3$  по шкалам звукового генератора ЗГ-2А;

*д т* — предельная абсолютная ошибка оценки величины *т* при обработке торсиограмм.

Погрешность градуировки шкалы генератора ЗГ-2А равна  $\pm 2\% \pm \pm 2$  герца.

Погрешность градуировки лимба расстройки  $\pm 3\% \pm 3$  герца. Отсчет по лимбу расстройки был меньше 50 герц, т. е. меньше половины всего интервала шкалы лимба (100 герц). Поэтому принимаем ошибку отсчета по лимбу расстройки равной 4 герц. Тогда общая ошибка отсчета частоты составляет

$$\delta f_3 = \pm (0,02 f_3 + 6)$$
 герц.

Ошибку отсчета величины *m* считаем равной 0,5. Окончательно имеем

$$\delta m = \pm 60 \left( \frac{0.02 f_3 + 6}{m} + \frac{0.5 f_3}{m^2} \right) \text{ об/мин.}$$
 (7)

Предельная абсолютная ошибка каждого отдельного определения величины амплитуды колебаний Ф на основании (3) и (5) равна

$$\delta \Phi = \pm 2 \left( rac{\Phi_T}{B} \delta \overline{\Phi} + rac{\overline{\Phi}}{B} \delta \Phi_T + rac{\overline{\Phi} \overline{\Phi}_T}{B^2} \delta B 
ight)$$
 минут.

Здесь:  $\delta \Phi$ ,  $\delta \Phi_T$ ,  $\delta B$  — предельные абсолютные ошибки определения соответственно отрезка на торсиограмме (в *мм*), угловой амплитуды колебаний рычага при тарировке (в минутах) и полного размаха колебаний луча на экране (на пленке) при тарировке (в *мм*).

Ошибки измерения величин  $\Phi$  и *В* определяются в основном погрешностью отсчета этих величин по торсиограммам (основной и тарировочной). При аккуратной обработке торсиограмм (и достаточном увеличении торсиограмм при печатании фотокопий) с помощью масштабной миллиметровой сетки, снятой на торсиограммах, можно брать отсчеты с точностью до 0,5 мм. Для надежности полагаем  $\delta \overline{\Phi} = \delta B = 1$  мм.

На основании (а) и (5) имеем

$$\delta \Phi = \pm 16,4$$
 ( $\delta H + \delta S + 2\delta K$ ) (минуты),

где  $\delta H$ ,  $\delta S$  — ошибки аттестации размеров H и S, а  $\delta K$ —ошибка отсчета по микрометрическому нониусу (см. фиг. 10).

Размер H при тарировке измерялся следующим образом. Сначала размер H воспроизводился (снимался) с помощью регулируемого калибра, а затем по калибру измерялся с помощью пассаметра с ценой деления 0,002 *мм* (инструмент 2-го класса точности). Предельная абсолютная погрешность показаний пассаметров  $\pm$  0,002 *мм* в пределах всей шкалы (0  $\div$  15 *мм*), см. [11].

Размер S измерялся с помощью микрометра с коническими наконечниками и ценой деления 0,01 *мм* (инструмент 2-го класса точности). Предельная абсолютная ошибка микрометров 2-го класса равна  $\pm$  0,008 *мм*.

Микрометрическое устройство для измерения амплитуд представляло собой микрометрическую пару отсчетного микроскопа и поэтому должно быть отнесено к инструментам 1-го класса точности. Однакоучитывая, что отсчет по микрометрическому нониусу берется в условиях некоторой тряски калибратора, принимаем точность отсчета K = +0,008 мм равной точности инструментов 2 го класса.

Теперь  $\delta \Phi_T = \pm 16,4$  (0,002 $\div$ 0,008 $\div$ 2 $\cdot$ 0,008) = 0,427 минут. Для надежности полагаем

$$\delta \Phi_T = 0.5$$
 минут.

Окончательно имеем

$$\delta \Phi_T = \pm 2 \left( \frac{\Phi_T}{B} + \frac{0.5 \overline{\Phi}}{B} + \frac{\overline{\Phi} \cdot \Phi_T}{B^2} \right)$$
 минут.

В табл. 1 приведены значения предельных относительных ошибок отдельных измерений чисел оборотов и амплитуд, определенные поизложенной методике для наиболее неблагоприятных условий торсиографирования, имевших место в нашей работе<sup>1</sup>).

В этой же таблице приведены погрешности торсиографирования в тех же условиях с помощью обычного механического торсиографа типа Гейгера. Методика анализа этих ошибок приведена в [13].

Таблица 1

| Тип<br>торсиографа                               | Предельная относительная<br>ошибка отдельного опреде-<br>ления числа оборотов вала<br>в % | Предельная относительная<br>ошибка отдельного определения<br>резонансной амплитуды колебаний<br>в % |
|--|---|---|
| Электрический с<br>катодным осцилло-<br>графом   | до б  | до 20   |
| Электрический со<br>шлейфовым осцил-<br>лографом | до 7  | до 25   |
| Механический<br>(Гейгера)                        | до 10   | до 35   |

<sup>1</sup>) Наибольшие относительные ошибки получаются, очевидно, при торсиографировании колебаний с малой амплитудой при малых оборотах. В нашем случае имеем,  $n_{nea} = 700$  об/мин и ( $\Phi_{nea}$ ) = 12 ÷ 15 минут.

and the

Из табл. 1 видно, что электроторсиографирование обеспечивает значительно большую точность измерений по сравнению с торсиографированием прибором Гейгера.

Продолжительное применение описанного электроторсиографа показало, что он надежен в работе, показания его стабильны. С помощью электроторсиографа можно получить торсиограмму больших размеров, удобную для обработки. Все это дает основание рекомендовать торсиографы описанного выше типа для широкого практического использования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев И. В., Беляев М. М. Техника измерения колебаний. ЦАГИ, изд. Бюро новой техники, 1947.

2. Волчок Л. Я. Электрические методы измерений в двигателях внутреннего сгорания. НИДИ. Книга 8, Машгиз, 1948.

3. Гарф М. Э. Искажения формы колебаний в испытательных установках. АН УССР. Научные труды института машиноведения и сельскохозяйственной механики. Том III. Динамика и прочность конструкций. Киев, 1951.

4. Измерение механических величин электрическими методами. Сборник работ, опубликованных в иностранной литературе. Под ред. Пригоровского. Машгиз. М., 1952.

5. Карась В. З. Резиновые гасители крутильных колебаний. НАМИ, выпуск 59, Машгиз. М., 1951.

6. Малкин Л. А. Эвольвентное зацепление для получения периодически меняющихся скоростей. "Вестник машиностроения". т. ХХ∨І, № 7—8, 1946.

7. Менли Р. Анализ и обработка записей колебаний. Машгиз. М.-Л., 1948.

8. Раевский Н. П. Методы экспериментального исследования механических параметров машин. АН СССР. М., 1952.

9. Раевский Н. П. Датчики механических параметров машин. АН СССР. М., 1959.

10. Шаталов К. Т. Вопросы экспериментальных исследований крутильных колебаний валов двигателей. Сборник "Динамика и прочность коленчатых валов". АН СССР, М.-Л. 1948.

11. Шнирман Г. Л. Электрические методы дифференцирования и интегрирования. АН СССР. Труды сейсмологического института, № 105, М.-Л., 1940.

12. Контроль средств измерения размеров в машиностроении. Сборник материалов и инструкций. Комитет по делам мер и измерительных приборов при СМ СССР, М., 1948.

13. Evaluation of Effects of torsional Vibration. SAE. War Engineering Board, NY, 1945.

14. Болгов А. Т. О некоторых характеристиках демпфирования крутильных колебаний валов установок с поршневыми ДВС. Канд. диссертация. Томск, ТПИ, 1956.