

## ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МЕТОДОВ К ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

П. М. АЛАБУЖЕВ

### Введение

Теоретическое и экспериментальное исследование рабочего процесса электропневматического молотка освещено в работах [1—5]. В целях проверки некоторых ранее полученных выводов и значений ряда коэффициентов, необходимых для расчета при выборе параметров электропневматического бурильного молотка, в порядке творческого содружества между Томским электромеханическим заводом (ТЭМЗ) и Политехническим институтом (ТПИ) был заключен договор, согласно которому завод изготовил специальную экспериментальную установку—стенд для испытания электропневматических перфораторов (СИП), на котором бригадой ТПИ в составе доцента Алабужева П. М., инж. Алимова О. Д., механика Гынгазова К. Г. и старшего лаборанта Золотарева И. Д. было выполнено в ТПИ исследование ряда режимов. В отчете, представленном заводу, были указаны оптимальные параметры молотка для проектирования опытного промышленного образца. В настоящей статье дается описание установки для исследования электропневматических перфораторов и излагаются некоторые вопросы дальнейших исследований с применением электрических методов и соответствующей аппаратуры, которая и была выполнена в ТПИ. Итоги работы и ряд отдельных вопросов будут изложены в следующих статьях.

Электрические методы измерения неэлектрических величин достаточно полно освещены в литературе [10; 15; 16; 17; 22].

Преимуществом электрических методов, в сравнении с другими методами измерений, являются:

- 1) простота, удобство наблюдения и отсчета;
- 2) легкость выбора оптимального масштаба наблюдаемых и регистрируемых величин;
- 3) малое воздействие измерительного устройства на изучаемый процесс и возможность создания безинерционной аппаратуры, что особенно важно при изучении быстропротекающих процессов;
- 4) возможность передачи и наблюдения изучаемых процессов на некотором расстоянии от объекта изучения;
- 5) возможность одновременно наблюдать и регистрировать не только функциональные связи интересующих явлений, но производные от них и интегралы.

Применение электрических методов измерения в двигателях внутреннего сгорания показано в работах [6; 8; 9; 18]. Радиотехнические методы в настоящее время имеют разнообразное применение в экспериментальной физике [7]. Особо важное значение для наблюдения и регистрации изуча-

емых процессов имеет катодный осциллограф, как прибор, обладающий целым рядом бесспорных преимуществ (по сравнению с другими измерительными приборами и устройствами), главным из которых является удобство наблюдения при исследовании разнообразных явлений и процессов.

При конструировании осциллографа мы использовали литературу [14; 19, 20, 21].

Наблюдение и регистрацию неэлектрических процессов на экране катодного осциллографа можно провести лишь в том случае, если имеются чувствительные приборы—датчики, служащие для преобразования значения интересующих нас физических величин в электрические величины.

Теория электрических датчиков и электроакустических аппаратов изложена в использованной нами литературе [12; 17; 22; 23].

Особо важное значение имеет вопрос о влиянии выбранного метода измерения на результаты измерения, т. е. учет влияния различного рода помех на точность и надежность исследования. В этом вопросе мы руководствовались указаниями, данными в работах [10; 11; 13; 14; 17; 20].

### Датчики

Литература по теории регистрирующих приборов и различного рода преобразователей (в том числе и ряда электрических датчиков) является изложением дальнейшего развития и углубления работ акад. А. Н. Крылова [13] и член-корр. АН УССР А. А. Харкевича [23]. С. И. Кирпатовский пишет: „Выведенные проф. А. А. Харкевичем исходные уравнения настолько общи, что на их основе может быть развита не только теория преобразователей, но также и общая теория электрических датчиков [12, стр. 235]. В этой же работе указывается, что „с целью создания общей теории электрических датчиков, как базы их классификации, сравнения и выбора для того или другого практического назначения, необходимо разрабатывать теорию конкретных типов датчиков на единой методической основе“ [12, стр. 252]. В указанной статье не затронут вопрос сравнения и выбора датчиков для определенных целей и отмечается, что „это достаточно обширный вопрос и представляет самостоятельную тему“ [12, стр. 252].

Достаточно полная и удобная классификация датчиков приведена в работе Н. П. Раевского [17, стр. 10].

Ознакомившись с электрическими методами измерения и схемами существующих датчиков [8; 16; 17; 22], мы остановили свой выбор на емкостном методе измерения для датчиков давления, крутящего момента и единичного удара. Имея в виду, что достоинством емкостных датчиков является высокая их чувствительность, сравнительно малая погрешность (порядка 0,5—1,0%), безинерционность и, наконец, легкость градуировки, которая осуществляется статическим способом.

При эксплуатации датчика весьма важно в практическом отношении (в целях сравнения и обработки экспериментального материала) иметь линейную функцию преобразования выходной величины  $M$  от входной величины  $N$  (т. е. иметь линейную зависимость:  $M = f(N)$ ).

В развитии схем емкостных датчиков известны три направления: электростатические схемы, схемы с амплитудной модуляцией, несущей частоты, и схемы с частотной модуляцией, несущей частоты. Мы использовали метод частотной модуляции. Этим же путем, несколько ранее нас, шел П. В. Аксютин [6], применяя емкостный метод для датчика крутящего момента на валу двигателя. Полученные нами результаты этим методом несколько отличны от указанного [6] по схеме и конструкции прибора, а так же и тем, что П. В. Аксютин использовал для регистрации шлейфовый осциллограф, мы же пошли по пути конструирования катодного осциллографа с возможностью одновременного наблюдения и регистрации нескольких процессов.

### а) Емкостный датчик давления

На рис. 1 приведена принципиальная схема емкостного датчика, который состоит из генератора высокой частоты, собранного на лампе  $L_1$  и контуре  $L_1, C_1$  по схеме индуктивной трехточки и частотного детектора.

Генерируемая частота (порядка  $\approx 5$  мГц) определяется параметрами контура  $L_1, C_1$  генератора, близка к собственной частоте контура и находится по известной формуле  $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}}$ . Чувствительный элемент-конденсатор  $C_1$  образован емкостью мембраны относительно основания корпуса датчика. Расстояние между пластинами конденсатора порядка  $\approx 0,05$  мм. В качестве диэлектрика используется слюдяная прокладка. При давлении воздуха на мембрану (рис. 3) изменяется расстояние между основанием корпуса датчика и мембраной, тем самым изменяется емкость  $C_1$  и, как следствие, — генерируемая частота.

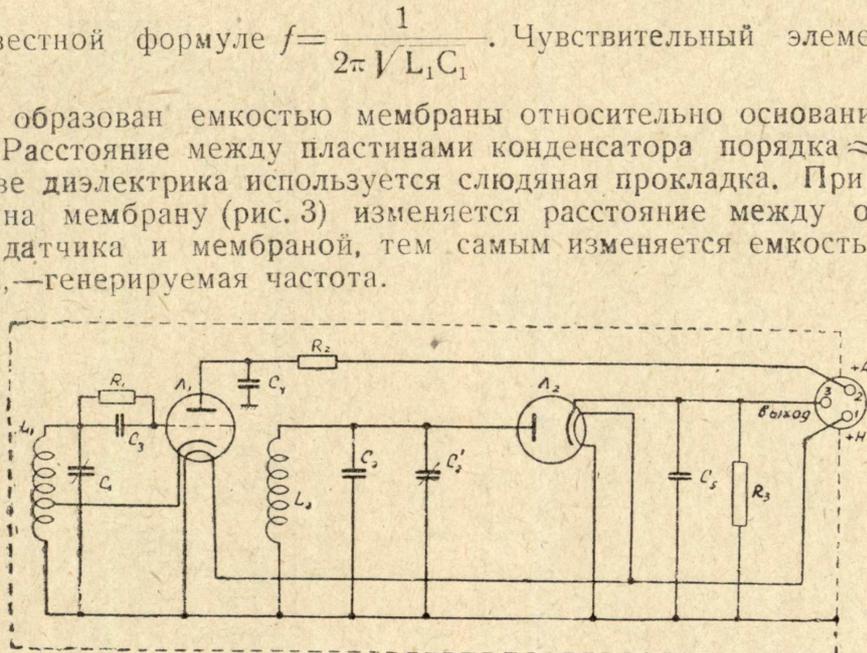


Рис. 1

Индуктивно с контуром генератора связан контур частотного детектора  $L_2, C_2$ , который относительно частоты генерируемой лампой  $L_1$  расстроен таким образом, что точка на оси абсцисс, соответствующая частоте генератора  $f_0$  (см. рис. 2), лежит в почти „линейной“ части половины резонансной кривой контура.

Допустим, что рабочая точка выбрана в середине линейной части половины резонансной кривой, что соответствует генерируемой частоте  $f_0$ ; тогда допустимое изменение частоты, при сохранении линейного масштаба, лежит в пределах от  $f_m$  до  $f_m$ . Если частота генератора изменяется по синусоидальному закону с амплитудой  $\Delta f = \frac{f_m - f_m}{2}$ , то напряжение на контуре детектора будет также изменяться по синусоидальному закону с амплитудой  $\Delta u = \frac{u_2 - u_1}{2}$  [14, стр. 519].

Выбор рабочей точки контура детектора производится с помощью подстроечного конденсатора  $C_2'$ , который является единственным органом настройки датчика при тарировке. В связи с тем, что давление воздуха в электропневматическом молотке изменяется в пределах от 0,5 до 12 атм, для полного использования линейной части половины резонансной кривой, рабочую точку устанавливали в положении  $A^1$  (что соответствует нормальному давлению  $P_0 \approx 1$  атм).

Таким образом, как это следует из вышеизложенного, огибающая высокочастотного напряжения на контуре детектора соответствует изменению

величины давления, приложенного к мембране. Напряжение с контура  $L_2 C_2$  детектируется лампой  $L_2$ . С выхода детектора напряжение, пропорциональное изменению давления воздуха, подается на вход осциллографа. Конденсатор  $C_5$  отфильтровывает составляющую высокой частоты тока детектора; постоянная составляющая тока детектора проходит через сопротивление  $R_3$ , которое можно вынести за пределы датчика, в осциллограф.

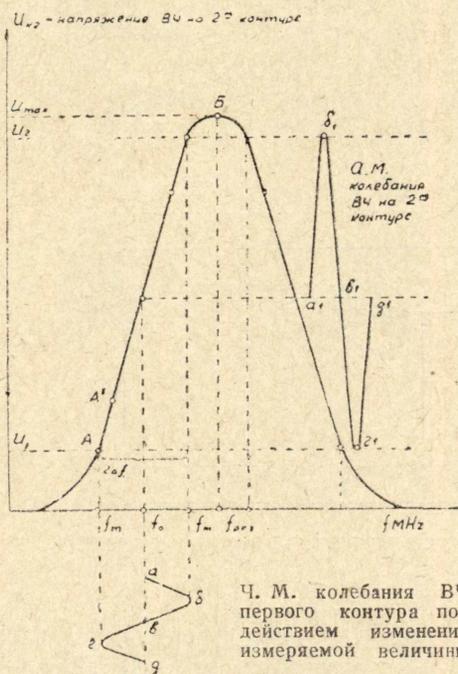


Рис. 2

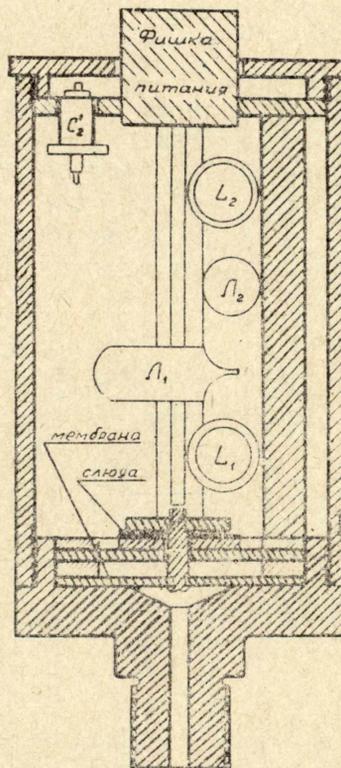


Рис. 3

На рис. 3 представлена конструкция датчика давления, смонтированного в стальном цилиндре.

Параметры электрической схемы следующие:

$$R_1 = R_2 = 22 \text{ ком}, \sim 0,25 \text{ вт}; C_2 = C_3 = C_4 = C_5 = 50 \text{ пф};$$

$L_1$  — 995 (6ЖИС);  $R_3 = 0,5 \text{ мг}$ ;  $C_1 = 50-90 \text{ пф}$  (чувствительный элемент);

$L_2$  — Д—1—Д (миниатюрный диод);  $C_2 = 2-30 \text{ пф}$  (подстроечный конденсатор).

Чувствительность датчика зависит 1) от величины относительного отклонения генерируемой частоты, определяемой соотношением  $-\frac{\Delta C_1}{C_1}$ , где

$C_1 = \frac{\epsilon \cdot S}{4\pi \cdot x}$  — емкость плоского конденсатора ( $S$  — рабочая площадь пластин,  $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная,  $x$  — расстояние между обкладками конденсатора); 2) от выбора параметров мембраны.

При увеличении силы нажатия на мембрану приподнимается соединенный с нею штифт и подвижная пластинка конденсатора (рис. 3), т.е. увеличи-

вается расстояние  $x$ ; при этом происходит уменьшение емкости, а следовательно, и увеличение частоты; обратно за уменьшением силы, действующей на мембрану, следует уменьшение частоты и соответственное изменение напряжения на втором контуре.

Величина прогиба мембраны— $y$  (равного  $\Delta x$ ) в зависимости от давления  $p$ , радиуса  $r$  и толщины ее  $h$  определяется из соотношения:

$$\frac{y}{h} + 0,488 \cdot \left(\frac{y}{h}\right)^3 = \frac{3}{16} \cdot \frac{p}{E} \cdot \left(\frac{r}{h}\right)^4 \cdot (1-\sigma^2) \quad (27, \text{ стр. 275}).$$

Здесь  $E$  модуль упругости мембраны, а  $\sigma$ —коэффициент Пуассона. Как видно из формулы, для одного и того же прогиба можно подобрать ряд значений  $\frac{r}{h}$ .

В нашем случае задача более трудна, так как в центре мембраны находится дополнительный груз и подбор оптимальных значений материала и размеров мембраны был осуществлен экспериментальным путем.

Суммарная погрешность при определении давления воздуха электрическим методом складывается из ошибок, вносимых

- 1) осциллографом и усилителями (порядка  $\approx 5\%$ );
- 2) ошибок тарировочного приспособления ( $\approx 1\%$ );
- 3) погрешностей при обработке кривых (причем погрешность при совмещении кривых, снятых на различные пленки порядка  $1,0-1,5\%$  и при планиметрировании  $0,5\%$ );
- 4) датчиком (чувствительным элементом) при измерении давления.

Ошибки, вносимые датчиком, в основном складываются из следующих:

а) ошибок, вносимых мембраной в изучаемый процесс, при неправильном выборе ее параметров; для уменьшения искажений необходимо, чтобы собственная частота колебаний мембраны была по крайней мере в 10-раз больше частоты возмущающей силы [13, стр. 271].

Согласно теории упругости, для круглой пластинки, закрепленной по контуру, собственная частота определяется формулой

$$f_0 = \frac{10,2}{r^2} \sqrt{\frac{g \cdot D}{\gamma h}}, \quad [26, \text{ стр. 171}],$$

где  $\gamma$ —удельный вес материала пластины (мембраны);  
 $g$ —ускорение силы тяжести;

$$D = \frac{Eh^3}{12 \cdot (1-\sigma^2)} \text{ — жесткость пластины на прогиб.}$$

В изготовленных нами датчиках собственная частота была порядка  $f_0 = 1400-1800$  герц; при числе ударов в минуту  $z = n = 1400$ ; частота

возмущающей силы  $f_s = \frac{n}{60} = 23,4$  герц, тогда отношение частот

$$\frac{f_0}{f_s} = 60-77.$$

Следовательно, ошибкой из-за частотных искажений, вносимых мембраной, можно в первом приближении пренебречь;

б) ошибки за счет паразитных наводок были практически исключены применением экранированных проводов. Питание накалов ламп производилось от аккумуляторов;

в) ошибка при индицировании возникает за счет вибрации и тряски во время работы ударной машины, которые помимо искажений сравнительно

быстро выводят лампы из строя. Поэтому мы были вынуждены соединить индикатор давления с цилиндром молотка при помощи резинового шланга длиной  $l$  и диаметра  $d$ . В этом случае погрешность при определении давления выражается формулой.

$$\Delta p = \frac{n}{1250000} \cdot \frac{l}{d} p_{max} \quad [18, \text{стр. 156}]$$

при  $n = 1400$  об/мин.  $d = 4$  мм;  $l = 80$  мм и  $p_{max} = 10$  кг/см<sup>2</sup>,

$$\Delta p = 0,22 \text{ кг/см}, \text{ т. е. погрешность } \frac{\Delta p \cdot 100}{p_{max}} = 2,2\%$$

Вследствие наличия дополнительного объема воздуха в резиновом шланге возникают еще колебания давления, которые накладываются на основную кривую и вносят также искажения (в виде зубчиков на кривой давления). Эта погрешность обусловлена спецификой работы машины ударного действия. Несомненно, было бы желательно исключить и эту погрешность, поставив чувствительный элемент датчика в корпус машины за подлицо с поверхностью цилиндра, и вынести электрическую часть отдельно.

а) Поршневой масляный манометр б) Ртутный мановакуумметр

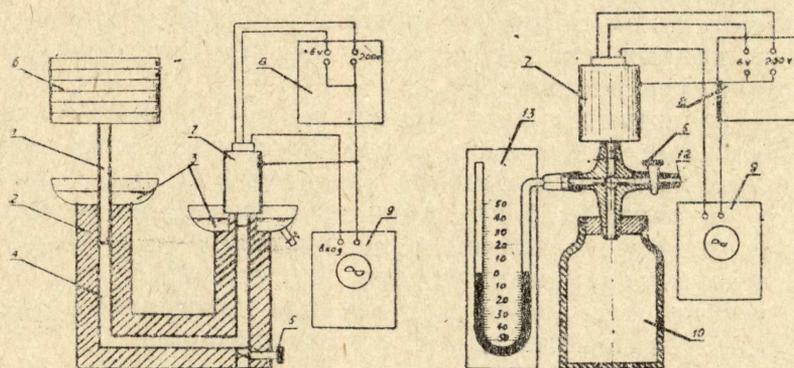


Рис. 4. Схема тарировочного устройства датчиков давления.

Схема тарировочного устройства датчиков давления представлена на рис. 4. Избыточное давление над атмосферным определялось поршневым масляным манометром, разрежение — ртутным мановакууметром. На рис. 4а стальной шлифованный поршень 1 входит в канал колонки прессы 2, заполненного маслом 4, которое заливается в пресс через верх 3 и выпускается через кран 5. Груз 6 создает необходимое давление в датчике 7, к которому подведено питание (+6 и +200 в) от прибора 8. Отклонение луча при заданном грузе, наблюдаем на экране осциллографа 9. Разрежение получалось (рис. 4 б) в баллоне 10, из которого насосом через кран 12 выкачивался воздух. Давление как в баллоне, так и в датчике измерялось ртутным манометром 13. Правильность тарировки проверялась до и после опыта. Линейная зависимость между давлением и отклонением луча получена в пределах до 7—8 атм (рис. 5). Погрешность тарировки давления грузовыми манометрами порядка 1% и состоит в основном из погрешности при определении площади стержня 1.

Для выполнения „линейности“ тарировочной кривой необходимо, чтобы выполнялись соотношения;

$$\frac{dp}{p} = \frac{dx}{x} = - \frac{dc}{c} = \frac{2df}{f};$$

т. е. чтобы изменения расстояния между пластинами конденсатора были линейно связаны с изменением давления ( $p = kx$ ), остальные соотношения легко выводятся из уже написанных формул. В самом деле, из формулы

$$c = \frac{\epsilon s}{4\pi x} \text{ следует, что } dc = -\frac{\epsilon \cdot s \cdot dx}{4\pi \cdot x^2}, \text{ откуда получаем: } \frac{dc}{c} = -$$

$$-\frac{dx}{x}; \text{ из формулы } f = \frac{1}{2\pi \sqrt{Lc}} \text{ следует } \frac{df}{dc} = -\frac{1}{4\pi \cdot \sqrt{L} \cdot c^{3/2}} = -\frac{f}{2c},$$

$$\text{откуда получаем, что } \frac{dc}{c} = -\frac{2df}{f}.$$

Диаграмма тарирования  
датчика давления.

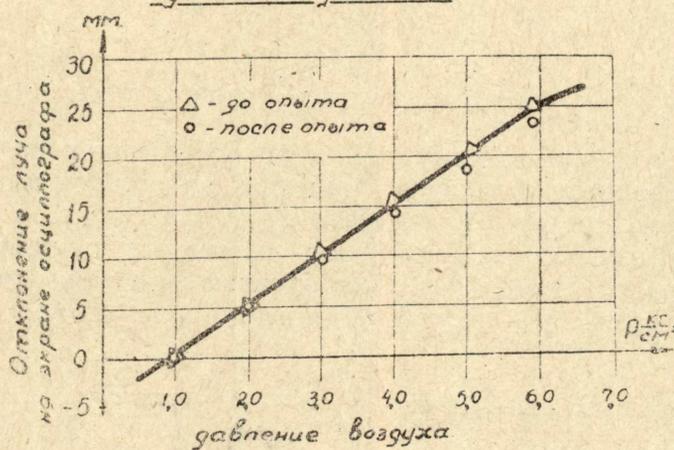


Рис. 5

Кроме того, как совершенно правильно отмечает Н. П. Раевский [22, стр. 23], „Линейности показаний датчика способствует применение материалов с высокой диэлектрической постоянной (например, слюды), и там же указывается, что экспериментально можно подобрать такое соотношение между величиной воздушного зазора и толщиной слюдяной прокладки между пластинами, при котором характеристика датчика в известных пределах) будет почти линейной. (В нашем случае слюдяная прокладка порядка 0,04—0,05 мм).

Применение датчиков емкостного типа для измерения крутящего момента и исследования явления удара может быть осуществлено за счет конструктивного изменения емкостного чувствительного элемента и несколько иного размещения и монтажа всей схемы.

#### б) Датчик для измерения угловой скорости

Угловую скорость вращающегося вала можно измерить различными способами. В результате ознакомления с литературной [10; 15; 16; 22; 24] и своих собственных экспериментов мы остановились на генераторе постоянного тока.

В качестве датчика угловой скорости нами использован умформер типа РУ—11. При этом э.д.с. в обмотках наводилась за счет остаточного магнитного потока машины.

Кривая зависимости  $u = f(n)$ , представлена на рис. 6.

Влияние коллектора и щеток сказывалось в наличии „зубчиков“ на кривой угловой скорости.

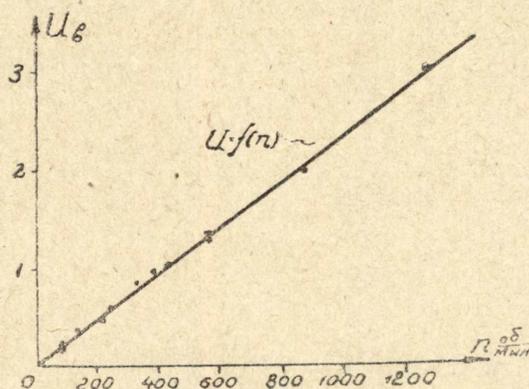


Рис. 6

### в) Датчик синхронизирующих импульсов

Он состоит из стержня на хомутке, который насажен на вал кривошипа (рис. 7). В телефонных катушках, надетых на полюса магнита, при прохождении мимо них стержня, наводятся импульсы э.д.с. Синхронизирующий импульс подается на генератор развертки осциллографа и тем самым задает начало развертки. Поворачивая хомутки, мы можем фиксировать начало развертки в любой точке по углу поворота кривошипа.

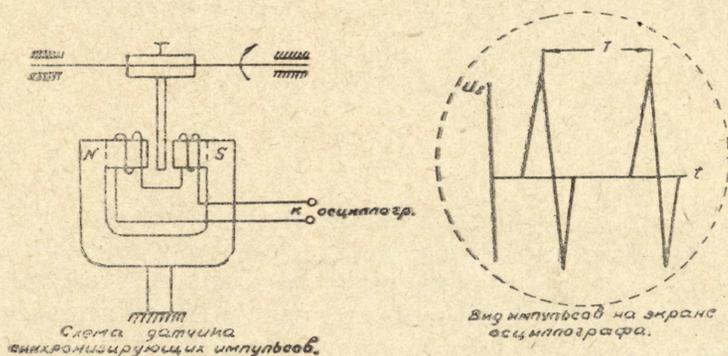


Рис. 7

В случае необходимости иметь отметки по углу поворота кривошипа через определенный угол можно данное приспособление осуществить в виде шестерни с зубьями, расположенными через заданный угол.

### г) Измерение угловых ускорений

Поскольку ускорение  $\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$ , то, применив электрическое дифференцирование к напряжению, соответствующему угловой скорости  $\omega$ , можно одновременно получить и кривую ускорения вала кривошипа. Электрические методы интегрирования и дифференцирования весьма обстоятельно (применительно к шлейфовому осциллографу) рассмотрены Л. Г. Шнирманом [25] и применительно к различным цепям освещены в работах [7; 8; 14; 16; 17].

Мы приняли дифференцирующую цепочку, состоящую из емкости и сопротивления.

Полученные на экране осциллографа графики зависимостей  $\omega = f(t)$  и  $\varepsilon = f_1(t)$  изображены на рис. 8. Одновременное наблюдение кривых велось на экране осциллографа ЭО-5 с применением собранного нами электронного коммутатора на усилителях постоянного тока, описанного ниже.

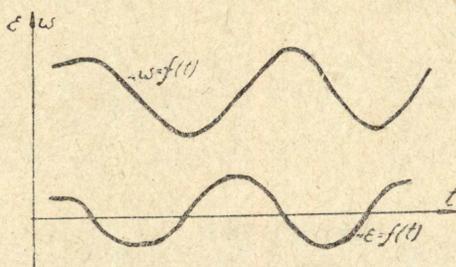


Рис. 8

## Осциллограф

Проводимые работы по исследованию динамики работы электропневматических машин ударного действия привели к необходимости иметь прибор, позволяющий одновременно наблюдать за целым рядом величин, характеризующих работу машины. На основании уже имеющегося опыта решено было разработать и практически осуществить свой катодный осциллограф для одновременного наблюдения четырех процессов.

Необходимо, чтобы осциллограф, предназначенный для исследования сравнительно медленно изменяющихся процессов, удовлетворял ряду специфических особенностей и требований; основные из них следующие:

1) осциллограф должен иметь усилители постоянного тока; 2) длительность периода развертки должна быть достаточно большой; 3) возможность одновременной регистрации нескольких изучаемых процессов путем фотографирования как в установившемся, так и неустойчившемся режимах работы машины.

В нашем распоряжении имелась двухлучевая трубка ( $D = 100$  мм), чувствительность 1 мм/в по  $x$  и  $y$  с зеленым свечением.

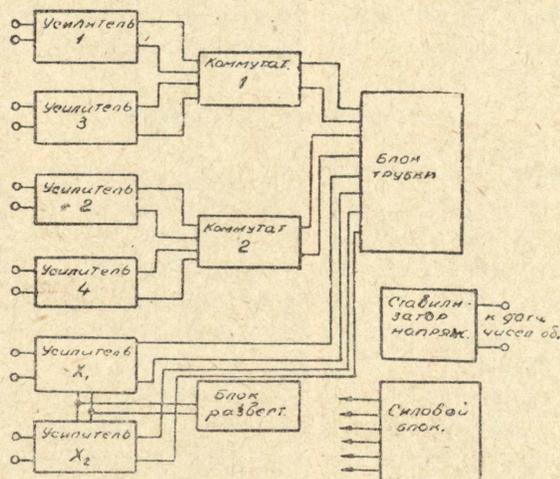


Рис. 9. Блок-схема осциллографа

Для возможности одновременного исследования 4 процессов мы решили применить электронные коммутаторы, апробированные нами в предыдущих работах с дифференцирующей цепочкой. В результате разрешения предъявленных практикой требований при конструировании осциллографа мы остановились на блок-схеме, показанной на рис. 9. В эту схему входят уси-

лители по оси  $x$  и по оси  $y$ , коммутаторы, блок-развертки, блок-трубки и силовой блок.

Осциллограф собран на сварном корпусе из уголкового железа. Из условий удобства эксплуатации и наладки в основу конструкции положена блочная система: усилители с коммутатором, работающие на каждый луч, собраны в общем блоке.

Для обеспечения бесперебойной работы осциллографа, а также для получения возможности наблюдений (при наличии дополнительного однолучевого осциллографа) еще двух процессов, предусмотрен запасной блок усилителей с коммутатором. В этом случае одновременно можно изучать шесть процессов.

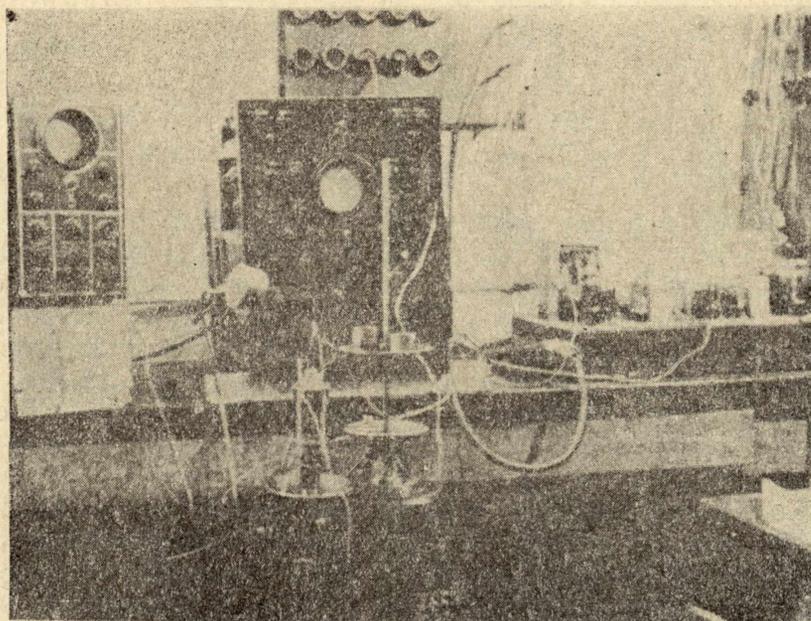


Рис. 10

Общий вид осциллографа ЭО-5 (слева) и осциллографа, выполненного в ТПИ (в середине), и силового блока (справа), во время тарировки датчика давления на масляном прессе, представлен на рис. 10.

### Особенности схемы

1) В осциллографе как для отклонения по оси  $y$ , так и для отклонения по оси  $x$  применены однотипные балансные усилители. Для электронной коммутации связь на вторую лампу здесь осуществлена не через общее катодное сопротивление, как у целого ряда аналогичных схем балансных усилителей, а за счет падения напряжения на сопротивлении  $R_{g2}$  в цепи экранной сетки (рис. 11). Такая схема обеспечивает линейную амплитудную характеристику в больших пределах.

2) Усилители подключены к отклоняющим пластинам (см. рис. 12) через делитель, состоящий из сопротивлений  $R_8, R_{15}, R_7$  и  $R_{16}$ . Это подключение устанавливает средний потенциал отклоняющих пластин равным потенциалу земли, что обеспечивает устранение астигматизма луча на краях экрана трубки и дает возможность непосредственного подключения на отклоняющие пластины цепей, у которых средний потенциал равен потенциалу земли, которые и встречаются обычно.

Емкости  $C_7$  и  $C_8$  улучшают частотную характеристику осциллографа и способствуют уменьшению наводок от других цепей, так как уменьшают сопротивление цепей отклоняющих пластин относительно земли. Завал

на самых низких частотах при такой схеме включения не превышает 5% от максимальной величины коэффициента усиления.

3) Для обеспечения большого входного сопротивления на входе усилителя применен катодный повторитель. Схема перехода с катодного повторителя на усилительный каскад обеспечивает смещение луча в ши-

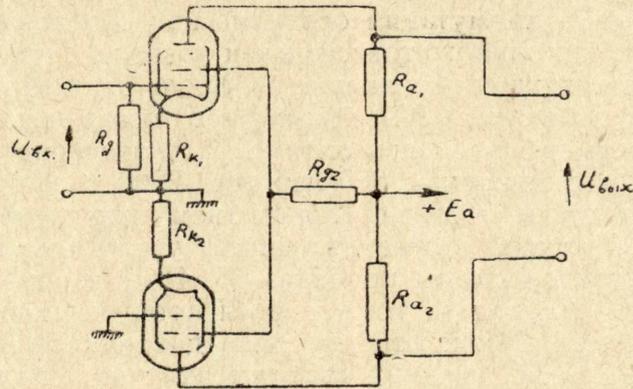


Рис. 11

роках пределах при небольших смещающих напряжениях. При этом, независимо от смещения исследуемой кривой, отклонение луча (в пределах экрана) пропорционально приложенному напряжению на вход.

4) В качестве коммутирующего элемента схемы используется симметричный мультивибратор, собранный на лампах Л<sub>6</sub> и Л<sub>7</sub>. Коммутация дости-

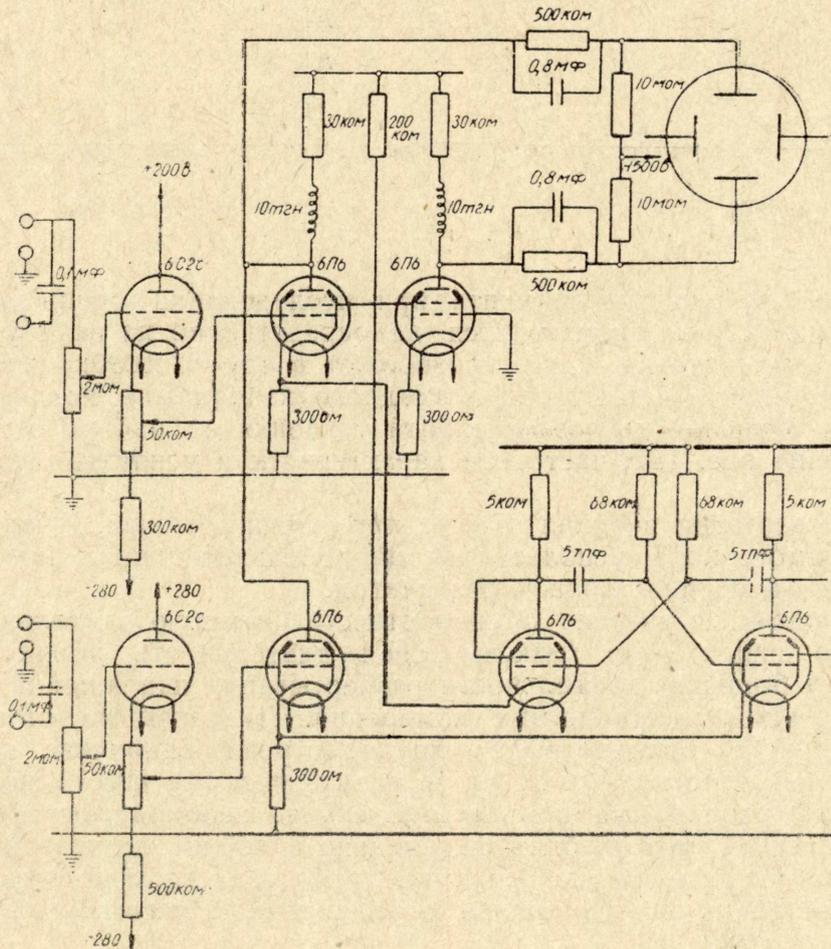


Рис. 12

гается путем поочередного запираания ламп усилителей за счет тока соответствующих ламп мультивибратора, протекающего через общие катодные сопротивления соответствующих ламп усилителя. Такая схема коммутатора с катодной связью практически обеспечивает независимую работу коммутируемых усилителей. К одной из основных особенностей данной схемы коммутации можно отнести применение общей балансной лампы  $L_3$  на оба усилителя. Такая схема коммутации особенно целесообразна в случае применения усилителей постоянного тока, так как позволяет при непосредственной подаче напряжения на отклоняющие пластины осциллографа применить балансную схему в обоих каналах: Коммутатор позволяет менять частоты коммутации и тем самым выбирать оптимальное значение их. Имеющиеся частоты коммутации следующие: 500 пер/сек; 2000 пер/сек; 5500 пер/сек. Выключение коммутаторов производится снятием напряжения накала с ламп мультивибратора, а также соответствующей усилительной лампы. Коэффициент усиления данной схемы порядка—25. Полоса пропускания осциллографа до 100 кГц. Высшая частота полосы пропускания ограничивается не столько усилителями, как конструкцией двухлучевой трубки, не рассчитанной для работы на сравнительно высоких частотах. Конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  (предусмотрены для удобства работы с осциллографом) предохраняют от выхода из строя входные потенциометры в случае возможного попадания на них больших постоянных потенциалов при подготовке эксперимента.

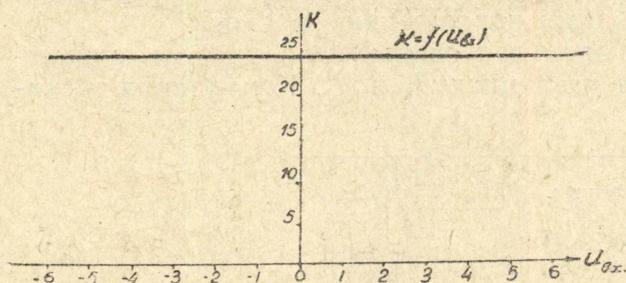


Рис. 13-а

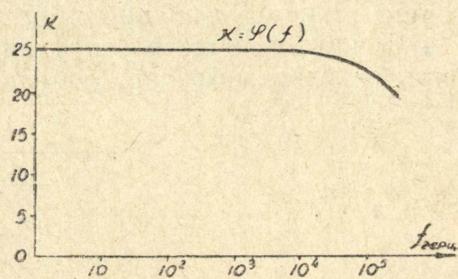


Рис. 13-б

Для целей самого эксперимента при исследовании очень медленных процессов включение производится непосредственно на вход усилителя; кроме того, конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  позволяют в случае необходимости выделить переменную составляющую входного напряжения, подаваемого на осциллограф. Зависимость коэффициента усиления от входного напряжения показана на рис. 13а; частотная характеристика усилителя изображена на рис. 13б.

5) Схема развертки в осциллографе применена обычная. В качестве напряжения прямого хода используется пилообразное напряжение, образованное разрядом конденсатора через пентод.

К особенностям развертки можно отнести большую длительность развертываемого напряжения (максимальная длительность порядка 6 сек.). Сравнительно большие длительности развертывания напряжений вызваны самой спецификой механических измерений. Диапазон частот развертки 0,15—500 герц. В осциллографе предусмотрена единичная развертка, включаемая тумблером  $K_7$  (см. общую схему, рис. 14), что позволяет фотографировать переходные процессы. В случае необходимости схема без особых трудностей может быть переведена в режим ждущей развертки. Применением усилителей по оси  $x$  предусмотрена возможность рассмотрения определенной части кривой в увеличенном масштабе по времени (примерно в 3 раза).

Схема электронного осциллографа.

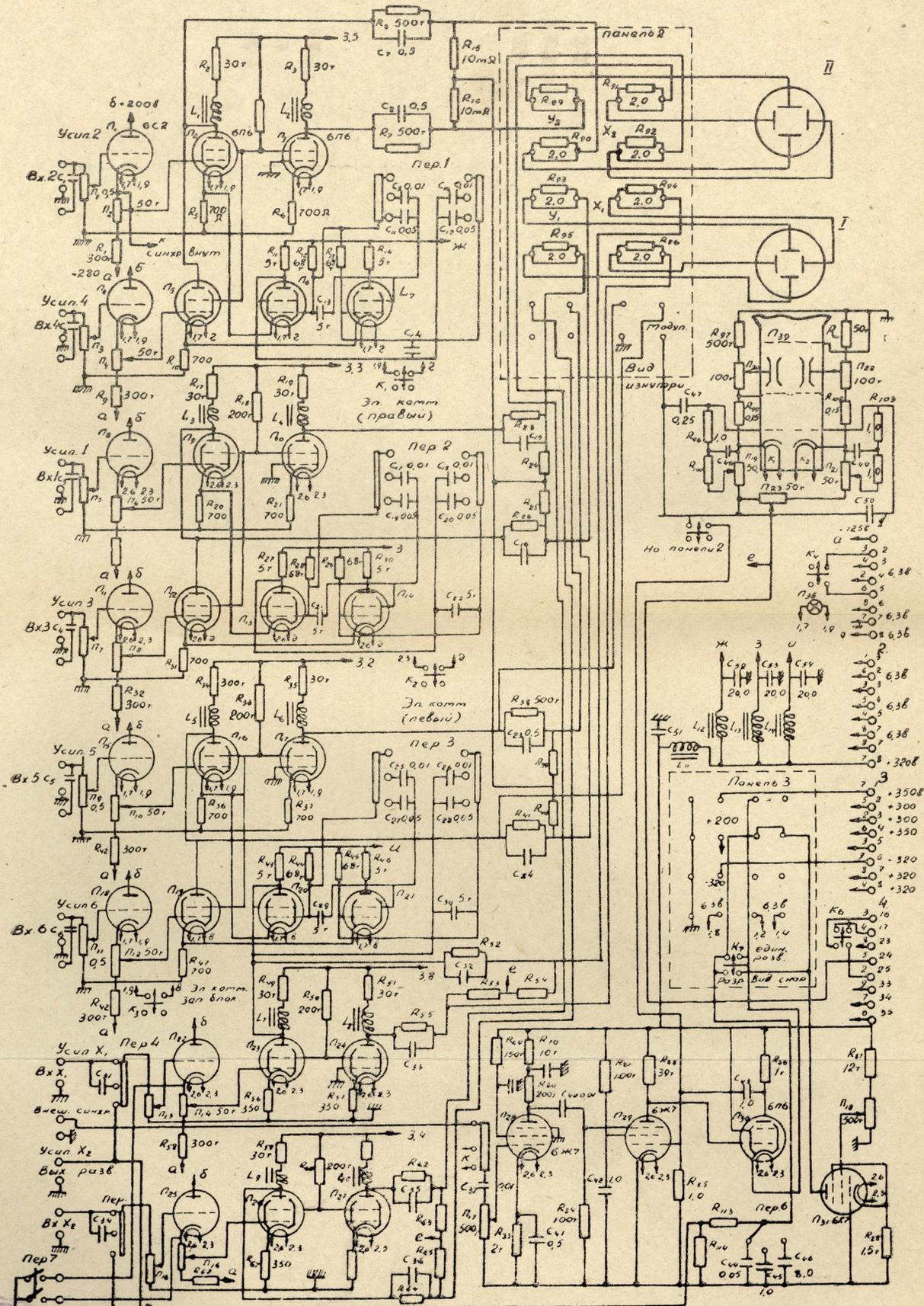


Рис. 14



6) Для целей фотографирования в осциллографе предусмотрена возможность подачи повышенного напряжения на ускоряющие электроды трубки тублером. Для синхронного фотографирования кривых с осциллографа и кривых перемещения поршня и бойка (где применен оптический метод) к осциллографу в качестве приставки применена механическая развертка на особом барабане, соединенном синхронной связью при помощи сельсинов (самосинов) с другим барабаном, на котором и фотографируются кривые пути бойка и поршня.

Для включения луча в определенный момент времени, соответствующий началу фотографирования пути поршня и бойка, служит переключатель пер. 7, соединенный механически с затвором прибора, фотографирующего путь поршня и бойка.

Силовой блок сделан повышенной мощности ( $N = 0,7$  квт) для обеспечения питанием любых дополнительных приставок, усилителей постоянного тока, в случае применения датчиков с малым напряжением на выходе и т. п. Для питания имеющихся емкостных датчиков предусмотрен электронный стабилизатор напряжения, дающий  $\pm 200$  в.

При тщательном подборе параметров и рациональном выборе оптимальных режимов работы отдельных блоков осциллограф работает устойчиво и надежно. Изготовленный осциллограф показал себя как прибор весьма гибкий, обладающий большими возможностями.

Схема осциллографа разработана в апреле 1951 года ст. лаборантом И. Д. Золотаревым. По отдельным вопросам схемы мы получили консультацию от проф. СФТИ А. Б. Сапожникова, доц. ТПИ Е. И. Фиалко, инж. П. П. Болтрукевич. По вопросам фотографирования с осциллографа мы пользовались консультациями доц. А. И. Зайцева и доц. А. Ф. Городецкого. Переходим к описанию стенда.

### Экспериментальный стенд для исследования рабочего процесса электропневматического перфоратора (СИП)

Экспериментальная установка, спроектированная нами совместно с инженерно-техническими работниками конструкторского бюро ТЭМЗ, была изготовлена ТЭМЗ.

Схема установки представлена на рис. 15а, б, электродвигатель, ударный и поворотный узлы машины, а также необходимая измерительная аппаратура расположены на стальной плите 1, укрепленной на ручном винтовом податчике 2, который устанавливался на вертикальной распорной колонке 3. Перемещение стенда вперед (подача к забою) осуществлялась грузом 4, подвешенным через блок 5 на тросе, а отвод стенда от забоя вручную при помощи винта 7 и гайки 8. Разрушаемая порода 9 устанавливалась на фундаменте 10 и крепилась зажимным устройством 11. Бурению подвергались куски гранита, диабазы и мрамора, весом от 400 до 1000 кг.

Ряд сравнительных исследований различных режимов работы машины при переменных параметрах был предварительно проведен при ударе по металлической скалке, замещающей бур 15 и закрепленной на другой колонке зажимом (развиваемые силы трения между скалкой и зажимом порядка 2700 кг).

Схема ударного узла аналогична схемам, применяемым в кузнечных воздушно-вакуумных молотках и электрических отбойных молотках типа ЗЭРТ и двойного действия. На стенде возможно исследование и других схем ударных узлов. Ударный узел состоит из цилиндра 12, в котором движутся поршень 13 и боек 14. Движение поршня осуществляется от электродвигателя переменного тока 16, через клиноременную передачу 17, кривошипный вал 18, шатун 19, ползун 20 и шток 21. При движении поршня слева направо создается разрежение в пространстве между порш-

нем и бойком. В результате избыточного давления атмосферного воздуха боек начинает двигаться ускоренно вслед за поршнем; затем при ходе поршня справа налево происходит сжатие воздуха между бойком и поршнем, в результате чего боек изменяет направление движения и в конце рабочего хода ударяет по хвостовику бура 15, передавая большую часть

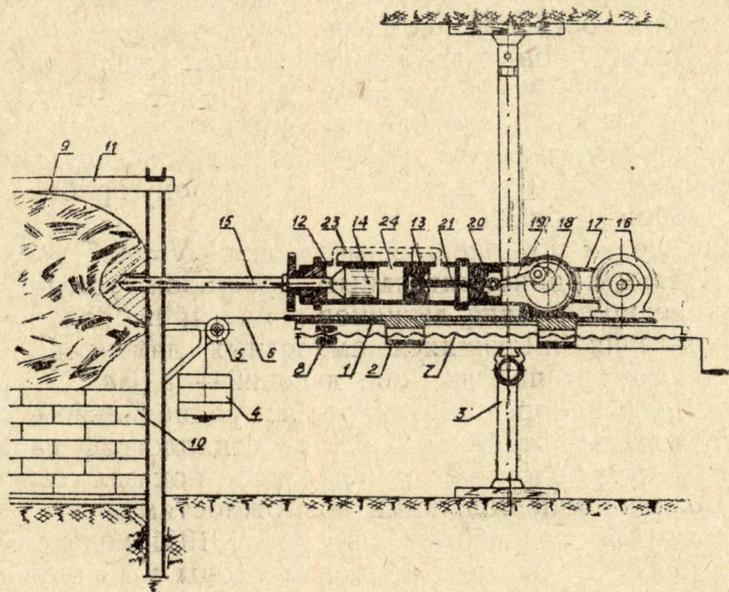


Рис. 15-а

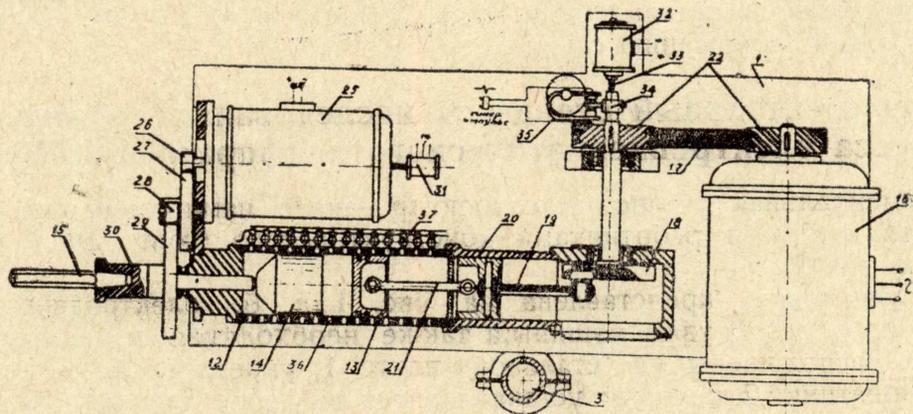


Рис. 15-б

энергии, и за счет упругой деформации отскакивает обратно с некоторой скоростью, после чего описанный нормальный цикл повторяется снова.

Конструкция экспериментального стенда позволяла изменять:

- 1) длину хода поршня за счет изменения радиуса кривошипа;
- 2) длину воздушной подушки за счет изменения длины штока 21 и различной длины хвостовика бура 15, а также длины бойка;
- 3) вес бойка (силу подачи);
- 4) угловую скорость кривошипа за счет изменения передаточного числа (переменного диаметра шкива и шестерен), скорости вращения электродвигателя; кроме того, имелась возможность применения двигателя постоянного тока;
- 5) компенсацию утечек воздуха из пространства между бойком и поршнем путем изменения размера и местоположения отверстия 24 в стенке цилиндра;

6) число оборотов бура при помощи специально поставленного электродвигателя постоянного тока 25 и системы зубчатых колес.

Для записи кривых, характеризующих ход движения бойка и поршня, в стенках цилиндра молотка 12 были просверлены сквозные отверстия 36, в которые на резьбе ввертывались пробки из прозрачного плексигласа. С одной стороны к цилиндру молотка 12 прикреплялся рефлектор с установленными вдоль цилиндра электрическими лампочками, с другой стороны устанавливался прибор для фотографирования. Описание методики записи кривых оптическим способом и определение энергии удара дано в работе [4]; 31—электрический счетчик оборотов электродвигателя—25 (Э<sub>2</sub>).

Измерение угловой скорости осуществлялось при помощи таходинамо постоянного тока 32, соединенной с валом кривошипа муфтой 33. Для контрольных замеров пользовались центробежным тахометром класса 2. Синхронизирующий импульс угла поворота осуществлялся вращающимся в поле магнита 35 отметчиком 34, жестко связанным при помощи муфты 34 с валом кривошипа.

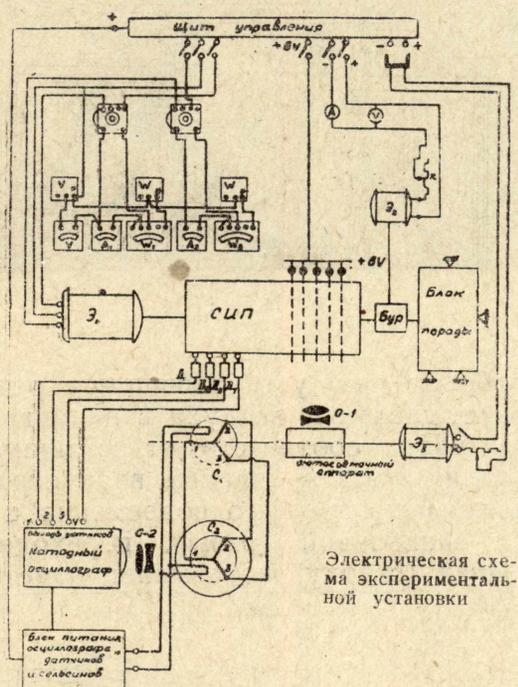


Рис. 16

Давление воздуха в цилиндре молотка измерялось построенными нами датчиками емкостного типа; наблюдения велись на экране катодного осциллографа, описанного выше.

Измерение активной мощности трехфазного тока, потребляемой электродвигателем Э<sub>1</sub> (16), проводилось двумя ваттметрами класса 1 (применялся комплект малогабаритных приборов КМП-10).

Электрическая схема экспериментальной установки представлена на рис. 16.

Здесь С<sub>1</sub> и С<sub>2</sub>—сельсины (самосины), дающие возможность дистанционно синхронизировать наблюдаемые и регистрируемые процессы на катодном осциллографе с фотозаписью кривых движения пути бойка и поршня.

Сельсин С<sub>1</sub> жестко соединен с валом фотосъемочного аппарата, приводимого в движение специальным электродвигателем постоянного тока—Э<sub>3</sub>. Объективы: 0—1 и 0—2—„Юпитер—3“.

В качестве иллюстрации снятых кривых с экрана осциллографа приводим ниже фотографии: на рис. 17 показаны кривые давления с двух сторон бойка. Верхняя кривая (почти прямая) покрывает противодействие воздуха, которое при достаточном числе отверстий равно атмосферному; на рис. 18 показаны три кривых движения луча: средняя линия (2) является нулевой линией отсчета, верхняя кривая (1) показывает изменение угловой

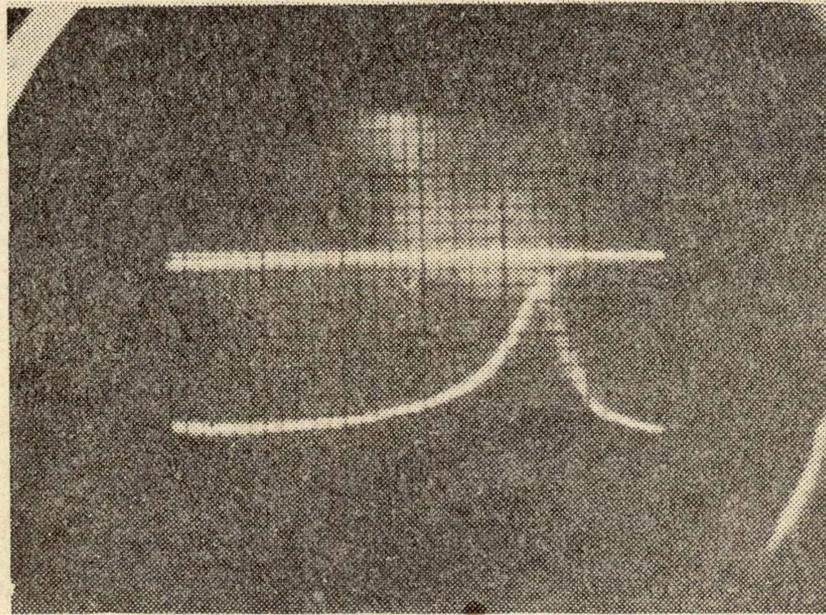


Рис. 17

скорости за один оборот при установившемся режиме работы, нижняя кривая (3) соответствует давлению воздуха в цилиндре молотка (между бойком и поршнем). Два кадра соответствуют различному значению компенсации воздуха при одних и тех же прочих параметрах машины; на рис. 19 представлены шесть кривых, снятых одновременно с применением механической развертки с синхронной связью, переходного режима работы молотка: первая кривая (сверху) показывает отметки датчика синхронизирующих импульсов; вторая показывает изменение угловой скорости; третья является нулевой линией отсчета на осциллографе; четвертая показывает изменение давления воздуха в цилиндре молотка; пятая кривая изображает путь поршня в функции времени; нижняя кривая представляет путь бойка.

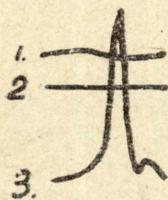


Рис. 18

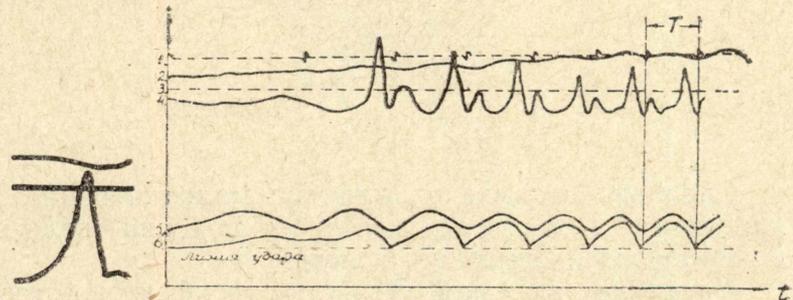


Рис. 19

зирующих импульсов; вторая показывает изменение угловой скорости; третья является нулевой линией отсчета на осциллографе; четвертая показывает изменение давления воздуха в цилиндре молотка; пятая кривая изображает путь поршня в функции времени; нижняя кривая представляет путь бойка.

После 5—6 оборотов, при одних и тех же условиях опыта, устанавливается определенный режим работы машины.

## Заключение

1. Электрические методы, ввиду присущей им гибкости и универсальности, как мощные методы исследования, проникают во все области науки и техники и с успехом могут быть использованы при изучении рабочего процесса различных машин ударного действия.

2. Разработанная нами аппаратура и методика могут быть использованы и применительно к исследованиям в смежных (сопредельных) областях техники, как-то: в двигателях внутреннего сгорания, компрессорах, пневматических машинах ударного действия и др.

3. Особенности аппаратуры является ее безинерционность и надежность в лабораторных условиях.

В выполненном катодном осциллографе предусмотрены:

а) коммутация на усилителях постоянного тока; б) возможность рассмотрения части кривой в увеличенном масштабе; в) возможность создавать повышенное напряжение во время работы при фотографировании; г) наличие в нем разверток: обычной (пилообразной), единичной и механической, что дает возможность исследовать не только установившиеся, но и переходные процессы.

4. Мы не считаем исчерпанными возможности как осциллографа, так и датчиков, на разработанном принципе которых предполагается создание других типов датчиков для непосредственной регистрации с экрана осциллографа пути бойка и пути поршня (измерения удара и крутящего момента при бурении и т. д.); кроме того, предполагается дополнительно сделать еще ряд приставок к осциллографу, как то: дифференцирующий и интегрирующий контуры (с возможностью двукратного интегрирования и дифференцирования медленно изменяющихся процессов) и приставку с возможностью использования магнитофона для записи кривой давления и др.

В заключение мы выражаем глубокую благодарность всем товарищам, оказавшим в той или иной форме помощь в выполнении работы; особенно велика и ощутима была работа, сделанная инженерами Алимовым О. Д., Сербуленко М. Г. и Золотаревым И. Д. в конструировании и установке стенда, в оснащении его измерительной аппаратурой, а также в разработке методики исследования.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А л а б у ж е в П. М. Исследование рабочего процесса электроотбойного молотка с упругой воздушной связью. Изв. ТПИ, т. 61, в. 1, 1947.
2. А л а б у ж е в П. М. и Ю д и н И. П. Экспериментальное исследование электропневматического молотка. Труды ЗСФАН, вып. 8, 1950.
3. А л а б у ж е в П. М. Применение теории подобия и размерностей к исследованию (моделированию) машин ударного действия. Изв. ТПИ, т. 73, 1952.
4. А л а б у ж е в П. М. и А л и м о в О. Д. Определение энергии бойка в машинах ударного действия. Изв. ТПИ, т. 76, 1954.
5. А л а б у ж е в П. М. Медлина Е. К., Невструев Е. Н. К методике исследования электропневматических молотков. Изв. ТПИ, т. 76, 1954.
6. А к с ю т и н П. В. Исследование пуска быстроходных дизелей электрическим способом. Научные записки Львовского политех. института, вып. X, серия электротехн. № 6, 1949.
7. Бонч-Бруевич А. М. Применение электронных ламп в экспериментальной физике. ГИТТЛ, М.—Л., 1950.
8. В о л ч е к Л. Я. Электрические методы измерений в двигателях внутреннего сгорания. ЦНИДИ, кн. 8, Машгиз, М.-Л., 1948.
9. В о л ч е к Л. Я. Исследование рабочего процесса свайного молота внутреннего сгорания. ЦНИДИ, № 20, Машгиз, М.-Л., 1952.
10. К о б р и н с к и й Н. Е. Методы и приборы для измерения угловых скоростей, АН СССР, М.-Л., 1941.
11. К а р а н д е е в К. Б. Методы электрических измерений. Госэнергоиздат, М.-Л., 1952.

12. Кирпатовский С. И. К теории электрических датчиков. Львовский политех. институт, Научные записки, вып. X, серия электротехн. № 6, 1949.
13. Крылов А. Н. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики, имеющих приложение в технических вопросах, изд. 5, ГИИТЛ, М.—Л., 1950.
14. Крылов А. Н. Теоретические основы радиотехники. Изд. „Морской транспорт“, М.—Л., 1951.
15. Павлов М. П. Техника измерения скоростей и времени. Машгиз, М., 1950.
16. Пфлиер П. М. Электрическое измерение механических величин. Машгиз, М., 1948.
17. Раевский Н. П. Методы экспериментального исследования механических параметров машин. АН СССР, М., 1952.
18. Сороко-Новицкий В. И. Испытания автотракторных двигателей. Машгиз, М., 1950.
19. Стекольников И. С. Электронный осциллограф. Госэнергоиздат, М., 1949.
20. Справочник по радиотехнике под общей редакцией Б. А. Смиренина. Госэнергоиздат, М.—Л., 1950.
21. Современный катодный осциллограф. Сборник статей ч. I и II, изд. ин. лит., М., 1951.
22. Темников Ф. Е. и Харченко Р. Р. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, М.—Л., 1948.
23. Харкевич А. А. Теория электроакустических аппаратов. Связьиздат, М., 1940.
24. Чистяков Н. И. Электрические авиационные приборы. Оборонгиз, М., 1950.
25. Шнирман Г. Л. Электрические методы интегрирования и дифференцирования. Труды сейсмологического института АН СССР, № 105, М., 1940.
26. Экспериментальные методы исследования процессов горения в двигателях. Сборник статей—Химические основы работы двигателя. Изд. ин. лит., М., 1948.
27. Энциклопедический справочник. Машиностроение, т. I, кн. 2, Машгиз, 1947.