

А. К. Блев

ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СИЛ РЕЗАНИЯ НА ТОКАРНОМ И СТРОГАЛЬНОМ СТАНКАХ

Существующие методы измерения усилий резания

Для измерения усилий резания применяются различные методы и приборы. Усилия резания можно измерить непосредственно или определить расчётно, зная расходуемую мощность или крутящий момент. Большой интерес представляют методы и приборы первой группы, состоящие из трёх основных частей: механической части, датчика и приемника. В качестве приемника, в зависимости от типа датчика, могут быть использованы стрелочные приборы или самописцы. Для приборов, работающих на электрическом принципе, при работе миллиампером или ациллографом можно использовать специальную электроаппаратуру: усилитель, выпрямитель и стабилизатор напряжения.

По принципу работы датчика существующие приборы можно разделить на:

- 1) гидравлические (так называемые гидравлические месдозы);
- 2) пьезокварцевые;
- 3) электроконденсаторные;
- 4) индуктивные;
- 5) проволочные датчики активного сопротивления и др.

Схема измерительного устройства

Прибор должен, не внося искажений, точно воспроизводить всю динамику процесса резания. Процесс резания может искажаться за счёт отжимов и собственных колебаний прибора. Это основное условие выдвигает ряд требований, которым должны удовлетворять приборы, применяемые для измерения усилий резания, а именно:

- 1) высокая чувствительность и безинерционность;
- 2) точность и стабильность показаний;
- 3) несложность конструкций и удобства в эксплуатации.

Хорошо удовлетворяют этим требованиям приборы с электрическими датчиками. На приборах могут быть использованы датчики, работающие на различных принципах.

Пьезоэлектрические и ёмкостные датчики, обладая высокой чувствительностью, имеют существенные недостатки, затрудняющие применение их при проведении длительных испытаний. Лучше себя зарекомендовали индуктивные датчики с линейно-перемещающимся якорем. Поскольку реактивное сопротивление даже при больших перемещениях якоря-датчика изменяется на очень малую величину, удобнее измерять не величину сопротивления, а его изменение включением активного датчика в схему Уитсона или потенциометрическую схему.

Нами была использована схема мостика переменного тока, работающая на принципе модуляции несущей частоты, при которой на измерительную

диагональ моста поступает переменное напряжение несущей частоты с амплитудой, промодулированной в соответствии с изменением сопротивления датчика.

Вследствие прогиба упругого элемента изменяется сопротивление датчика, нарушающее настройку мостика, и в диагонали мостика возникает ток.

Значение измеряемых величин определяется по огибающей тока несущей частоты. Для их регистрации применяли шлейфовый осциллограф и миллиамперметр.

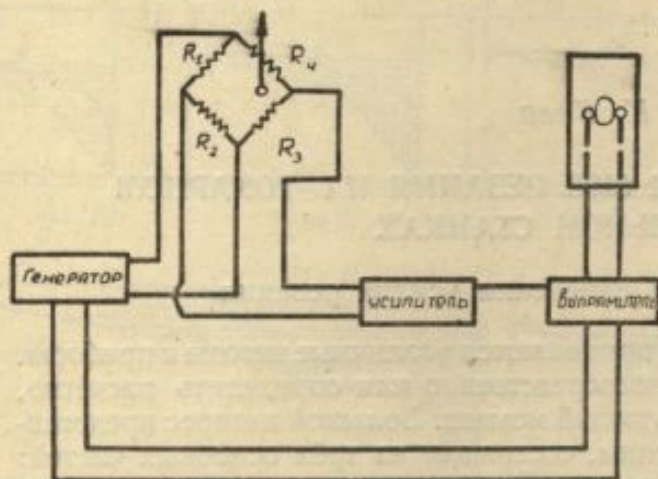


Рис. 1.

дом, работающим на лампе типа 6К7, включённой триодом. Контур генератора Т-1 намотан на железном (шихтованном) сердечнике и связан с катушкой 2, от которой напряжение звуковой частоты подаётся на сетку лампы типа 6Ф6. Лампа работает как усилитель мощности. В анодной цепи лампы включён выходной трансформатор Т-2, имеющий три обмотки. С обмотки 2 подаётся напряжение на мост, состоящий из двух плеч датчика и сопротивлений.

Сопротивление R_3 служит для грубой, а R_4 для плавной регулировки баланса моста. С обмотки 3 трансформатора Т-2 подаётся напряжение на круговой детектор.

Напряжение с диагонали моста подводится к трёхкаскадному усилителю (см. рис. 2) звуковой частоты, настроенный на частоту генератора. Первый каскад усиления работает на лампе 6Ж7.

Питание на анод подаётся через развязывающий фильтр, состоящий из конденсатора $0,25 \mu F$ и сопротивление $40 \text{ T}\Omega$. Второй каскад работает на триоде 6Ф5 и последний каскад — на мощном пентоде типа 6Ф6.

В анодной цепи оконечного каскада включён выходной трансформатор Т-3. С его вторичной обмотки усиленное напряжение подаётся на круговой детектор. Выпрямленное напряжение подаётся на миллиамперметр или шлейф осциллографа через фильтр-пробку, состоящий из дросселя $D-1$ и конденсатора $0,1 \mu F$. Фильтр настроен в резонанс с генератором звуковой частоты и отсеивает высокочастотную составляющую выпрямленного напряжения.

Усилитель и генератор питаются от выпрямителя (рис. 3), работающего на кенотроне типа 5Ц4.

Выпрямитель питает два усилителя и два генератора. Для устранения влияния одного усилителя на другой они работают на разных частотах и питаются через отдельные ячейки фильтра-выпрямителя (дросселя $D-2$ и $D-3$).

Напряжение переменного тока на выпрямитель подаётся стабилизированное от феррорезонансного стабилизатора напряжения (см. рис. 3).

По этой схеме создана установка для измерения усилий резания на токарном станке (рис. 4).

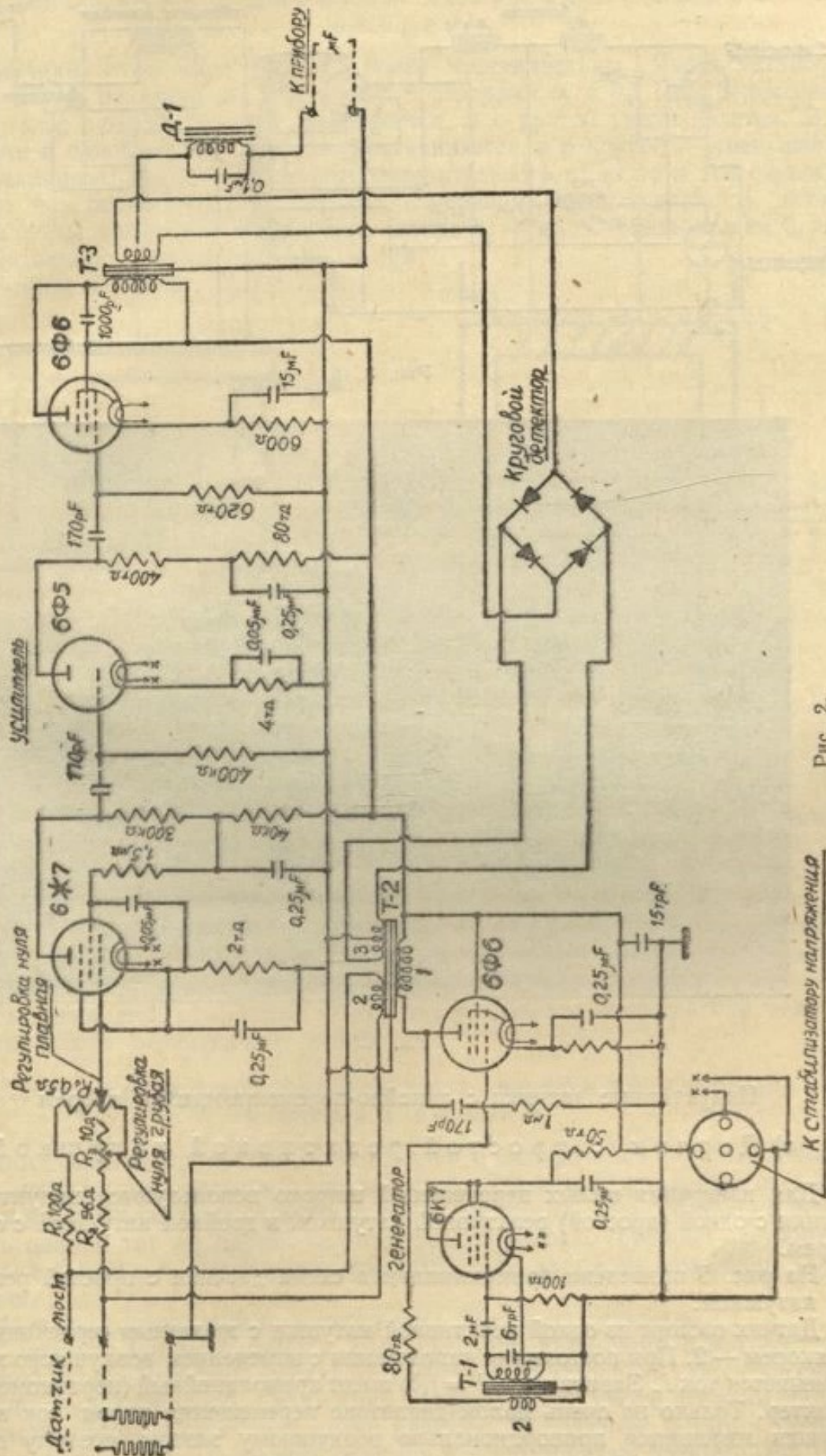


Рис. 2.

К стабилизатору напряжения

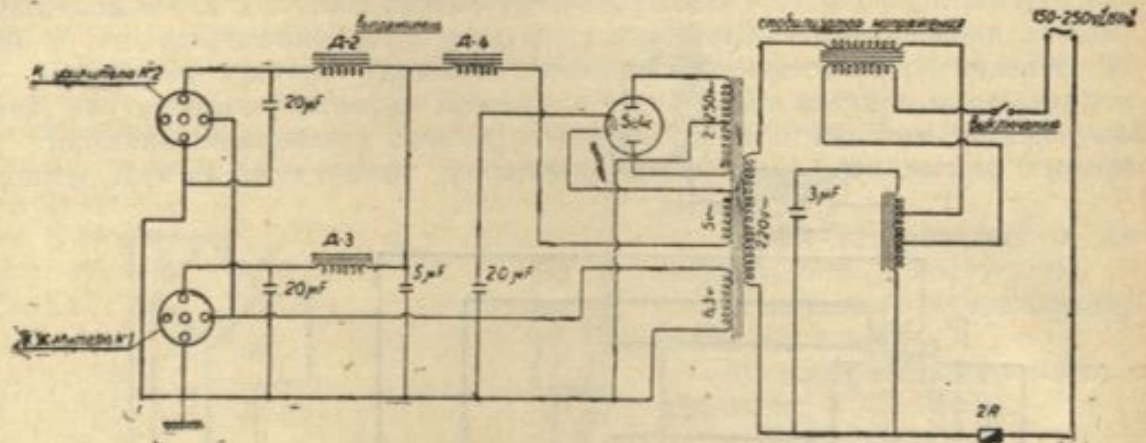


Рис. 3.

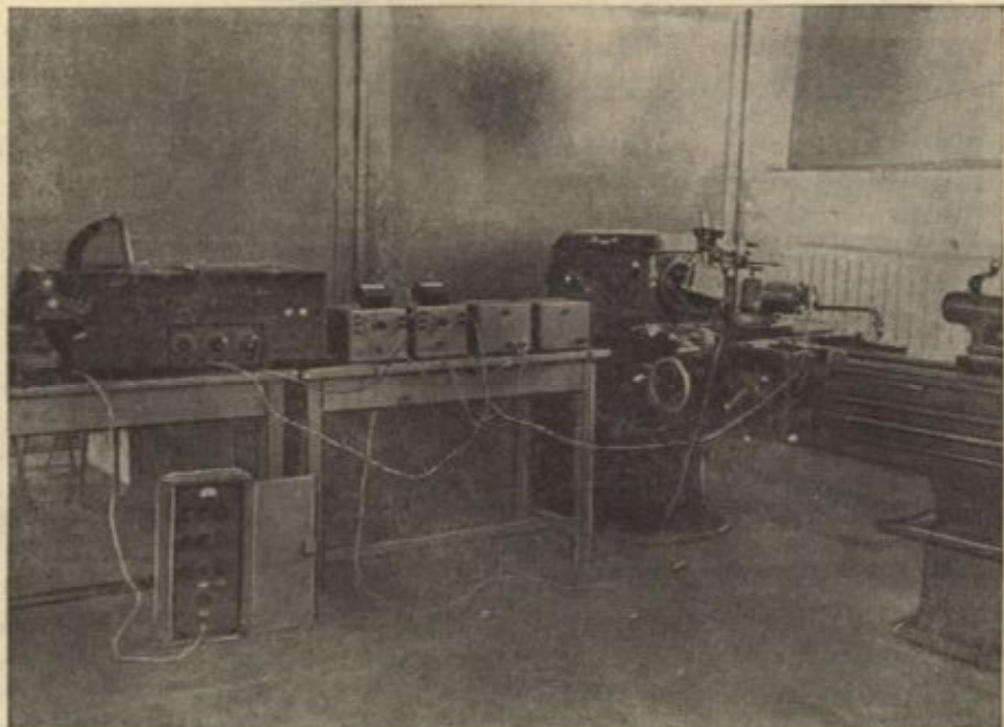


Рис. 4.

Индуктивные датчики с линейно-перемещающимся якорем

а) Датчик с простой реактивной катушкой

Для измерения малых перемещений широко используются индуктивные датчики с одной (простой) реактивной катушкой и двойной катушкой с общим якорем.

На рис. 5 приведена принципиальная схема датчика с простой реактивной катушкой.

Датчик состоит из одной реактивной катушки с железным сердечником — 1 и якорем — 2. При постоянном напряжении с изменением воздушного зазора δ изменяется ток I . Зависимость $I = f(\delta)$ имеет криволинейный (неравномерный) характер. Только на очень малом диапазоне перемещения якоря ток в цепи катушки изменяется пропорционально воздушному зазору, поэтому шкала отсчитывающего прибора получается неравномерной.

б) Датчик с двойной катушкой и общим якорем

Датчики этого типа (рис. 6) более чувствительны. Якорь установлен между двумя реактивными катушками с зазорами δ_1 и δ_2 . При перемещении якоря зазор с одной стороны уменьшается, а с другой увеличивается. В результате в одной из катушек ток увеличивается, а в другой — уменьшается, что увеличивает вращающий момент измерительного прибора и тем самым повышает чувствительность и точность измерений. Чувствительность датчика определяется величиной суммарного зазора $\delta_1 + \delta_2$. С уменьшением $\delta_1 + \delta_2$ чувствительность увеличивается, а при увеличении, наоборот, падает.

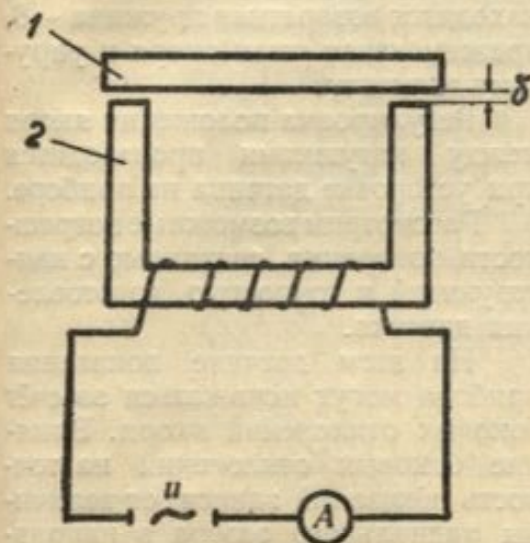


Рис. 5.

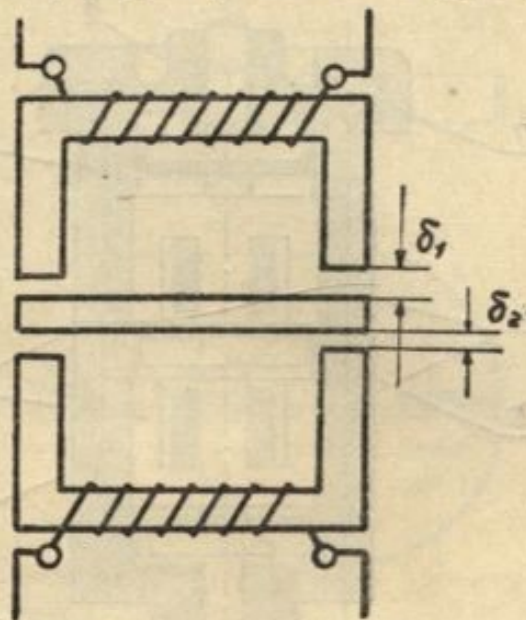


Рис. 6.

При уменьшении зазора, наряду с повышением чувствительности, снижается точность измерения, то есть работа датчика становится нестабильной. Точность может снижаться за счёт смещения положения якоря относительно катушек и изменения линейных размеров под влиянием температуры. Влияние температуры можно исключить тарировкой датчика до и после испытания. Влияние смещения якоря относительно катушек тоже можно уменьшить за счёт конструкции и точности изготовления датчика.

Рекомендуется суммарный зазор делать равным пятикратной величине максимального перемещения якоря.

в) Конструкции датчиков с двойной катушкой и общим якорем

Автором сконструирован и изготовлен в лаборатории резания Харьковского авиационного института ряд датчиков. Они выполнены в виде отдельных независимых от остальной части прибора элементов. Это позволяет использовать один и тот же датчик на различных приборах, упрощает настройку на чувствительность и регулировку на требуемый диапазон измерения усилий резания.

На рис. 7 представлена конструкция одного из датчиков.

В корпусе 1 между жёстко соединёнными катушками 3 находится подвижный якорь. Величина суммарного воздушного зазора регулируется сменой дистанционного кольца 6. Сердечники катушек и сам якорь набраны из шихтованного железа. Сердечники имеют плоскую Ш-образную форму и крепятся в специальных цилиндрических обоймах 4 с внутренними пазами. При обра-

ботке обойм выдерживалась взаимная параллельность торцев и перпендикулярность их к оси.

Таким же образом обрабатывались торцы прижимного колпака 5 и дистанционного кольца — 6.

Для уменьшения инерции шток якоря изготовлен из электрона. Взаимное положение якоря и катушек фиксируется направляющими по концам и специальным боковым направлением. В точный прямоугольный паз, изготовленный сбоку штока, входит штифт, укрепленный на одной из обойм, чтобы устранять возможные повороты якоря. На измерительном конце штока для уменьшения

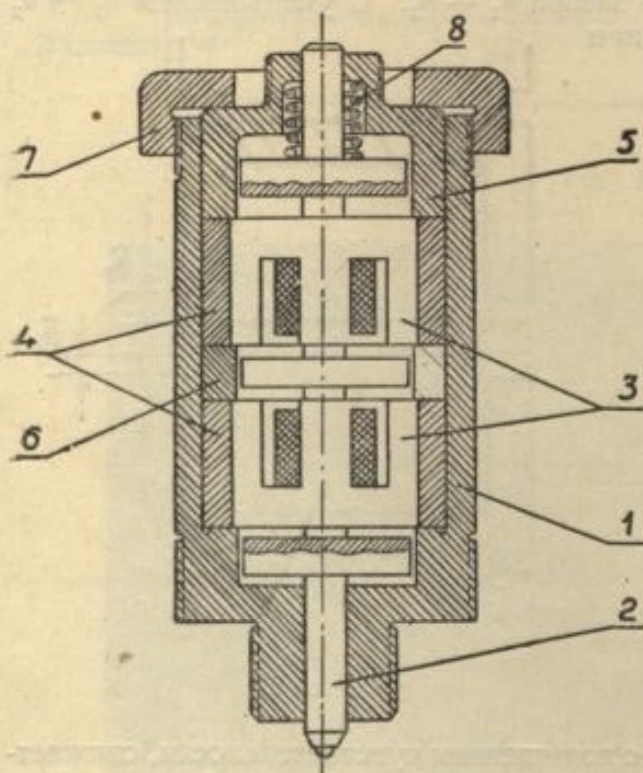


Рис. 7.

смятия завальцован закалённый стальной шарик. С обратной стороны, между штоком и колпачком, находится возвратная пружина — 8, прижимающая шток якоря к упругому элементу.

Регулировка положения якоря между катушками производится при установке датчика на приборе.

Рассмотрим возможные погрешности измерения, связанные с конструкцией и точностью изготовления датчика.

На этом датчике показания прибора могут искажаться за счёт боковых отклонений якоря. Влияние боковых отклонений на точность показаний зависит от величины радиального зазора в направляющих штока и условий эксплуатации датчика. Если при измерении усилий датчик не движется, влияние боковых отклонений ничтожно. Для уменьшения влияния боковых отклонений при дви-

жущемся датчике, например, на строгальном станке, требуется особо тщательное изготовление, чтобы зазор в направляющих штоках был минимальным.

На поперечно-строгальном станке направление оси штока якоря совпадает с направлением движения датчика, поэтому влияние боковых отклонений может быть устранено и регулировкой натяжения возвратной пружины. Увеличивая натяжение пружины, можно создать довольно жёсткий контакт штока с якорем. Однако с увеличением натяжения пружины растёт нормальное давление на поверхности контакта штока с упругим элементом, что приводит к смятию металла. Смятие может изменить положение якоря относительно катушек и искажает показания прибора. Поэтому для уменьшения влияния смятия на измерительной конец штока завальцован закалённый стальной шарик и весьма тщательно отполированы поверхности контакта. Смятие может происходить в начальный момент контакта, в период приработки соприкасаемых поверхностей, а затем почти полностью отсутствует.

Из приведённого анализа следует, что на этом датчике погрешности могут быть вызваны боковой качкой якоря. Влияние боковой качки было устранено точностью изготовления датчика и регулировкой натяжения возвратной пружины.

Представляет интерес и датчик, приведённый на рис. 8.

В корпусе — 1, как и на первом датчике, механическим путём жёстко закреплены катушки. В этом датчике с каждой стороны якоря имеются две диа-

метриально расположенные катушки. Катушки плоские, имеют П-образную форму и крепятся в диске с помощью конических шпилек, как показано на рис. 9.

Как и в первом датчике, суммарный воздушный зазор регулируется дистанционным кольцом.

В этом датчике конструкция штока якоря гораздо проще.

Якори набраны из шихтованного железа и крепятся в противоположных концах штока таким же образом, как и катушки в дисках. Окончательная обработка штока производилась после крепления якорей.

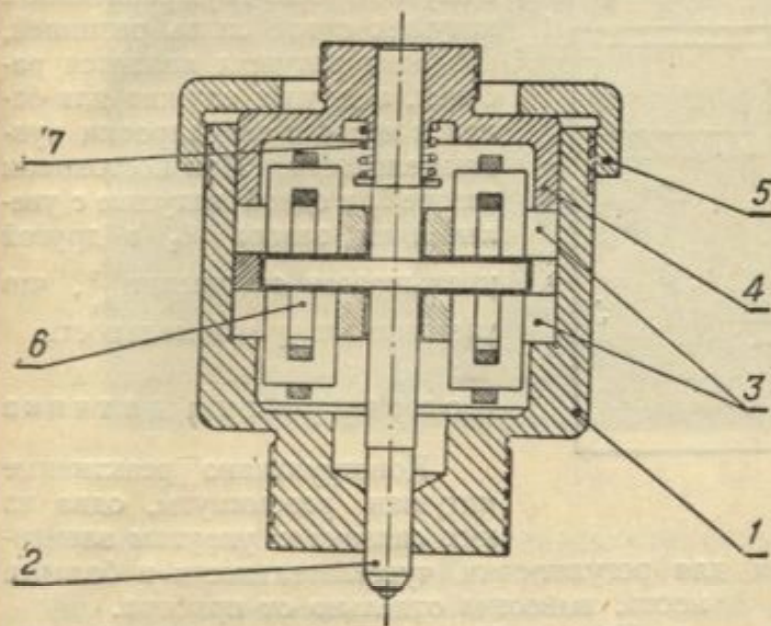


Рис. 8.

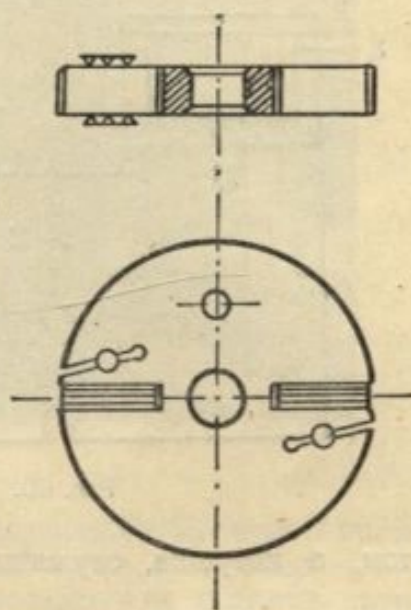


Рис. 9.

Катушки на каждом диске соединяются последовательно и включаются в разные плечи моста.

Конструкция датчика с четырьмя катушками имеет то преимущество, что автоматически устраняет влияние боковой качки штока на показания прибора.

В рассмотренных датчиках для уменьшения инерции подвижная часть штока изготовлялась из лёгкого металла и увеличивалось натяжение возвратной пружины.

Индуктивные датчики с двумя реактивными катушками

Для исследования быстро протекающих процессов, например, характера изменения усилия при высокой скорости резания, желательно применять датчики без подвижной части.

Как видно из выше данного анализа, в схеме с простой реактивной катушкой подвижная часть отсутствует, и роль якоря выполняет упругий элемент. Основным недостатком такой схемы является низкая чувствительность.

Автором использована схема с двумя реактивными катушками, но с существенным изменением. Обычно по этой схеме (рис. 10) строятся приборы, применяемые для относительных измерений.

Один воздушный зазор δ_1 остаётся постоянным, а другой δ_2 изменяется. Зазор δ_1 соответствует образцовому размеру, а зазор δ_2 зависит от размера измеряемой детали. Логометр показывает отклонение размера от номинала в ту или другую сторону.

Для измерения малых перемещений и, соответственно, усилия резания, данная схема не применялась, хотя она имеет большие преимущества по сравне-

нию с другими. Схема сохраняет преимущество метода простой реактивной катушки. В отличие же от простой реактивной катушки данная схема позволяет повышать чувствительность за счёт регулировки зазора в нерабочей катушке.

Чувствительность датчика зависит не только от величины воздушного зазора, но и от отношения $\frac{\delta_2}{\delta_1}$. Чем меньше это отношение, тем выше чувствительность.

В датчиках с двойной реактивной катушкой отношение регулируется при установке их на приборе. Фактически такая же регулировка производится

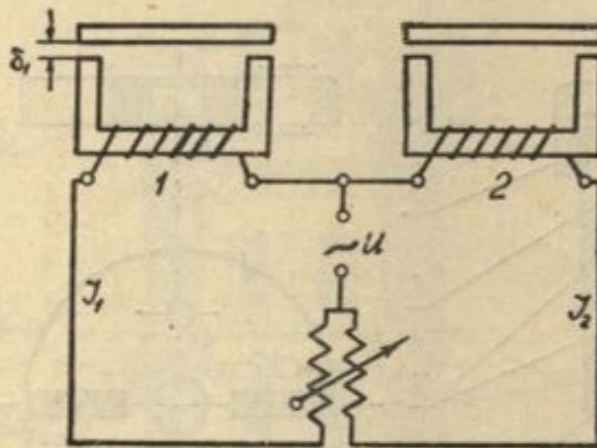


Рис. 10.

в случае просто двух реактивных катушек с той лишь разницей, что одна катушка является рабочей, а другая служит для баланса моста и регулировки чувствительности. При постоянном зазоре δ_2 в одной катушке с увеличением зазора δ_1 в другой уменьшается отношение $\frac{\delta_2}{\delta_1}$, что увеличивает чувствительность.

Конструкция датчика

Конструктивно реактивные катушки разомкнуты, одна из них связана с упругим элементом

мом, а катушка, служащая для регулировки чувствительности и баланса моста, вынесена отдельно от прибора.

На рис. 11 приведена конструкция рабочей катушки. Конец сердечника 1 проточен на конус и вырезан паз, куда вставляется катушка. Крепление катушки в сердечнике осуществляется кольцом 2, которое напрессовывается на конусную часть сердечника.

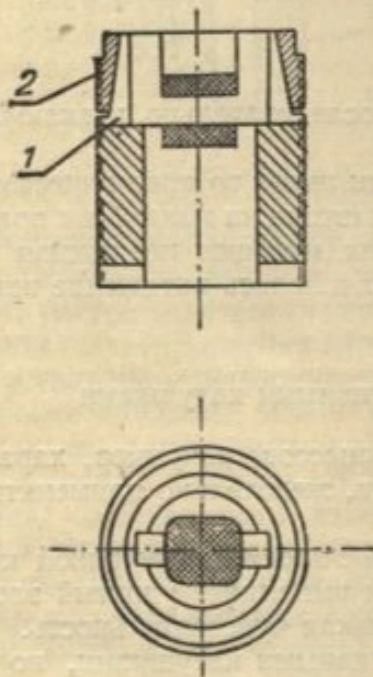


Рис. 11.

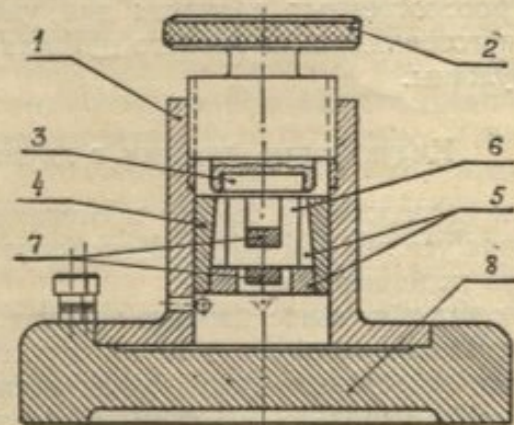


Рис. 12.

Окончательная обработка торца (подрезка и притирка) и нарезка резьбы мелкого шага на сердечнике производились в сборе. Отверстие в сердечнике служит для вывода концов катушки.

Другая реактивная катушка, служащая для баланса моста и регулировки чувствительности, имеет такую же характеристику. При конструктивном

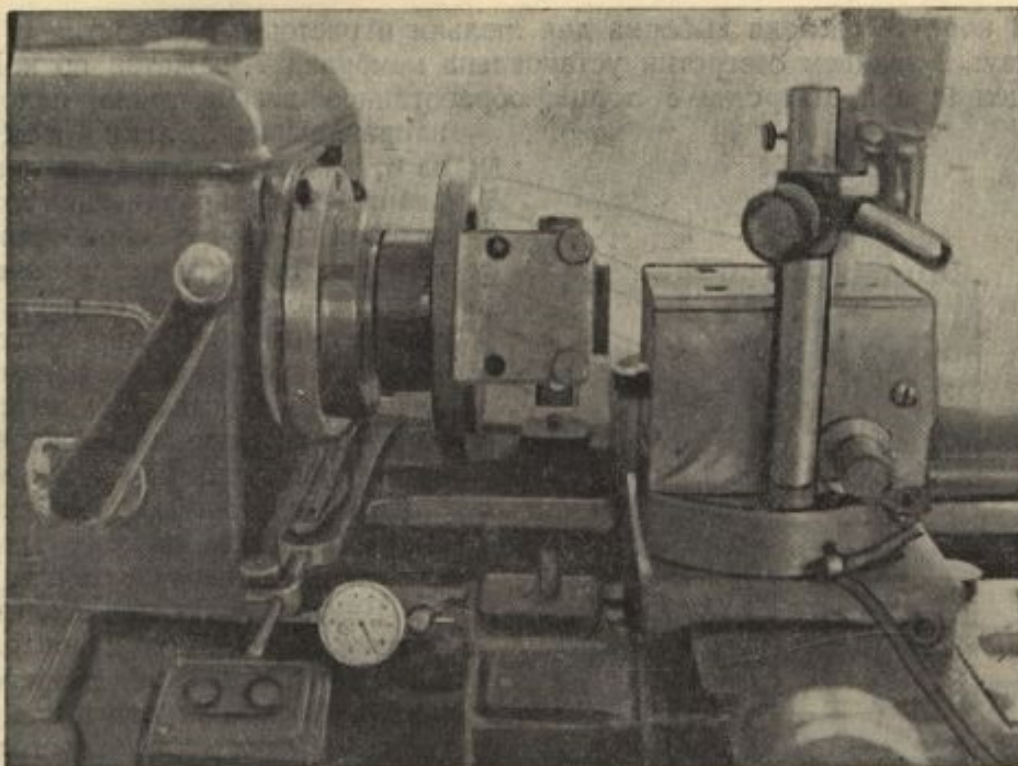


Рис. 13.

оформлении её было предусмотрено удобство пользования и возможность применения на других приборах. Катушка, как и в первом случае, крепится в корпусе (рис. 12). Окончательная обработка торцевой поверхности катушки производилась после запрессовки ее в корпус. Якорем служит винт 2 с завальцованным пяточком из железа «АРМКО». Вся конструкция крепится в боковой части прибора (рис. 13), хотя её можно было бы вместить в корпус самого прибора.

Конструкция механической части двухкомпонентного прибора

Механическая часть прибора может выполнять роль резцовой головки или стола станка. В первом случае в приборе крепится инструмент, а во втором — обрабатываемый материал. При строгании и точении прибор лучше устанавливать на суппорте станка. Такая схема более надёжна и упрощает конструкцию прибора, но не всегда она оказывается приемлемой: например, при фрезеровании и сверлении приборы лучше устанавливать на столе станка.

Автором был спроектирован и изготовлен в лаборатории резания и станков Харьковского авиационного института двухкомпонентный динамометр, пригодный для работы на строгальном и токарном станках (рис. 14).

На люльке 2 навинчен точно обработанный полушар 5, который входит в цилиндрическую направляющую 4. Под действием усилий резания люлька имеет подвижность в двух направлениях: сила P_y перемещает в осевом направлении, а P_z стремится повернуть относительно центра полушара.

Усилия P_y и P_z через шарики передаются на соответствующие мембраны 6 и 7, с которыми связаны датчики.

Конструкцией механической части многокомпонентных (двух и трёх) приборов должна быть предусмотрена независимость показаний отдельных составляющих. Это требование должно учитываться при конструировании многокомпонентных приборов. При конструировании механической части данного прибора, кроме этого, необходимо было предусмотреть возможность использования его как на токарном, так и на строгальном станках.

В корпусе сделана выборка для люльки и расточены отверстия с торца и снизу. В нижней отверствии установлена мембрана 7, зажатая по контуру фланцем 9, а в отверстиях с торца, обработанное весьма точно, находятся направляющая люльки 4 и мембрана 6, также зажатые по контуру фланцем 8. Направляющая люльки калёная и точно обработана по контуру. Размеры и состояние внутренней поверхности её периодически должны контролироваться.

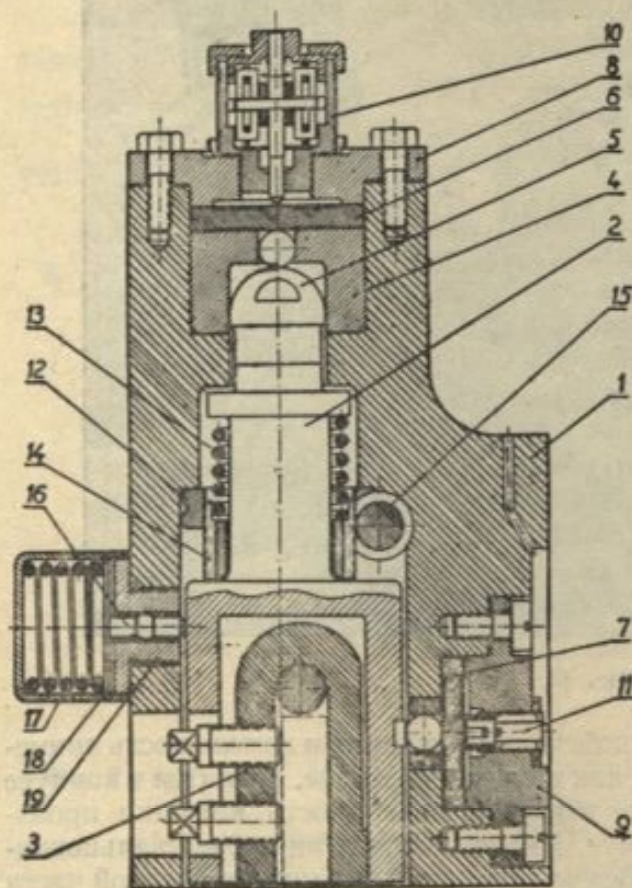


Рис. 14.

Опорные поверхности мембран, фланцев и посадочные места на корпусе прибора шлифовались и притирались, так как наличие гребешков на опорных поверхностях могут ослабить затяжку мембран из-за смятия неровностей.

Внутри люльки на скользящей посадке по торцам и на пальце находится откидной резцедержатель 3. Он предусмотрен для работы с прибором на строгальном станке, на токарном станке — заклинивается. С боков люлька направляется регулируемыми шаровыми опорами.

Спиральные пружины 17 и 13 прижимают люльку к шарикам, в соответствующих направлениях, с определённым начальным давлением. Величина предварительного давления в вертикальном направлении постоянная, а в осевом направлении может регулироваться изменением натяжения пружины 13, которая с одной стороны упирается в люльку, а с другой — в торец шестерни 14. Шестерня 14 входит в зацепление с червяком 15 и благодаря резьбе на поверхности зубьев соединена с муфтой 12, законтренной в корпусе прибора. Поэтому вращением червяка 15 можно регулировать натяжение пружины 13.

Влияние одной составляющей на другую можно устранить, регулируя натяжение пружин 13 и 17. С этой же целью предварительное давление в вертикальном направлении приложено выше точки контакта люльки с шариком, передающим давление на мембрану 7.

Принятая схема прибора является вполне приемлемой. Конструкция его не сложная, обеспечивает довольно жёсткое положение резца и регулировку чувствительности в широких пределах.

Принципиальным положением при конструировании многокомпонентных приборов является правильный выбор схемы передачи усилий резания от резца на упругие элементы, так как этим в основном определяется независимость показания отдельных компонентов. Величина предварительного давления и точка приложения её должны быть выбраны таким образом, чтобы полностью устранить или свести к допускаемым пределам влияние составляющих друг на друга.

Тарировка прибора

Однокомпонентные приборы без особых трудностей можно тарировать весьма точно. Добиться точной тарировки многокомпонентных приборов различными примитивными способами весьма тяжело. Например, для точной тарировки радиальной составляющей двухкомпонентного прибора направление

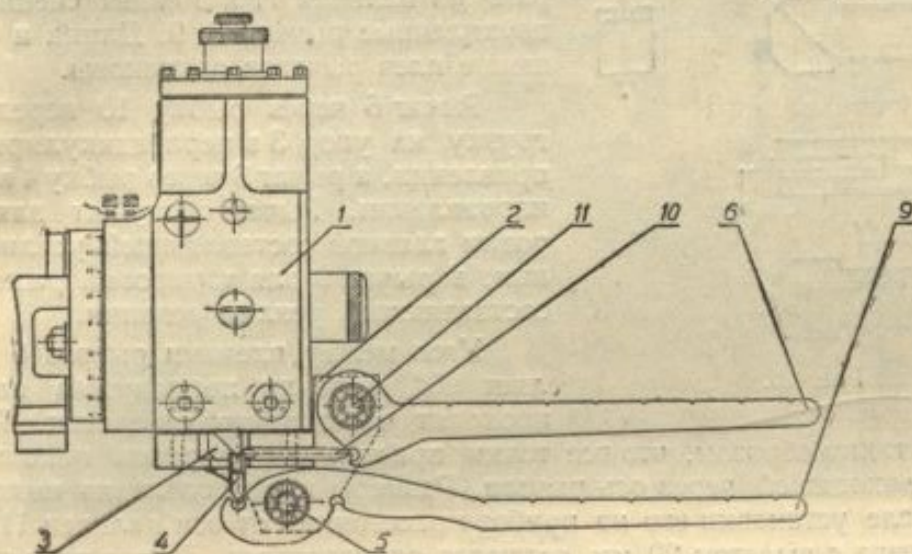


Рис. 15.

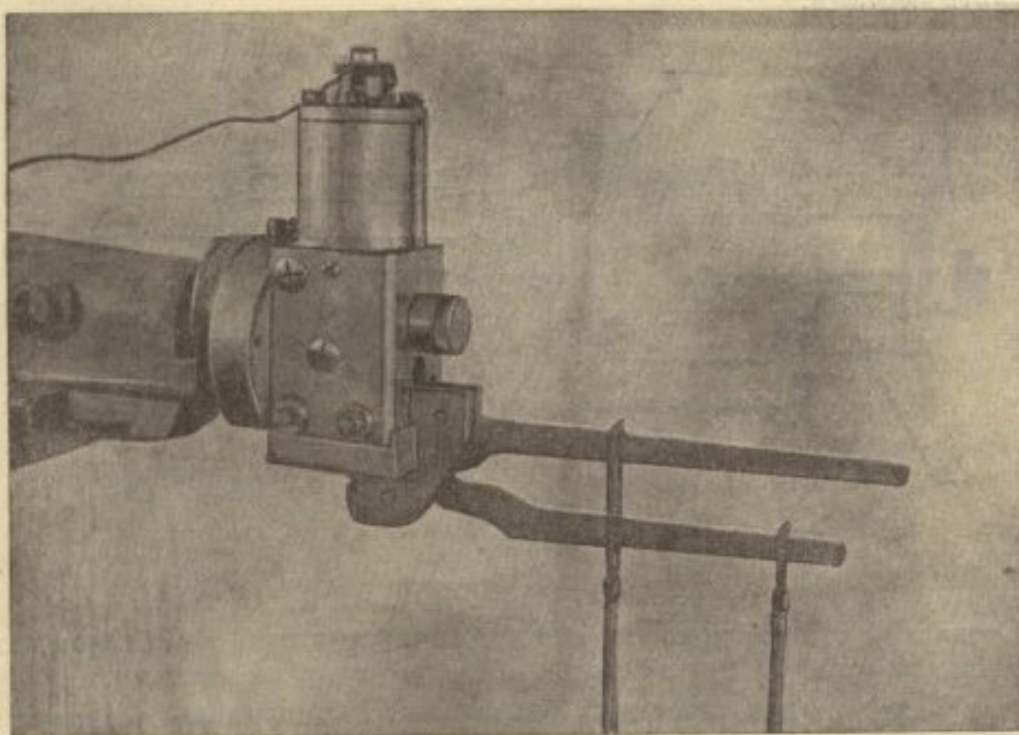


Рис. 15а.

нагрузки должно быть постоянным и совпадать с осью люльки. Выдержать эти требования можно, если тарировку производить специальным тарировочным приспособлением.

Для тарировки двухкомпонентного прибора спроектировано специальное приспособление, которое было изготовлено в лаборатории резания и станков Харьковского авиационного института.

На переднюю часть прибора крепится корпус 2 тарировочного приспособления (рис. 15).

В корпусе приспособления со стороны прибора сделана выборка для упора 3. Упор (рис. 16) фиксирует рабочее положение вершины резца. Перпендикулярно передней части приспособления за одно целое изготовлены два поперечных ребра. Между этими ребрами на пальцах 11 и 5 сидят специальные двухплечные рычаги 6, 9. Длина и соотношение плеч рычагов одинаковы.

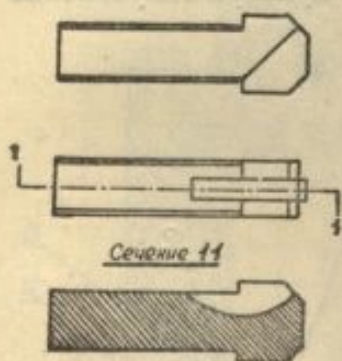


Рис. 16.

Рычаг 6 через рыбку 10 передаёт нагрузку на упор 3 в перпендикулярном направлении, а рычаг 9 через рыбку 4 в осевом направлении. Рычаг 6 служит для тарировки главной составляющей усилия резания, а рычаг 9 для тарировки радиальной составляющей усилия резания.

Угол между плечами рычага 6 составляет 90° , и точки приложения нагрузок проходят через центр отверстия. Рычаг 9

изготовлен таким образом, что все точки приложения нагрузок находятся на прямой, проходящей через ось рычага. Размеры приспособления выдержаны так, что после установки его на приборе расстояния от оси пальцев 11 и 5 до вершины резца с вылетом 20 мм остаются одинаковыми. Длина плеч рычагов со стороны рыбок одинакова и равна этому расстоянию, что позволяет рычаги менять местами.

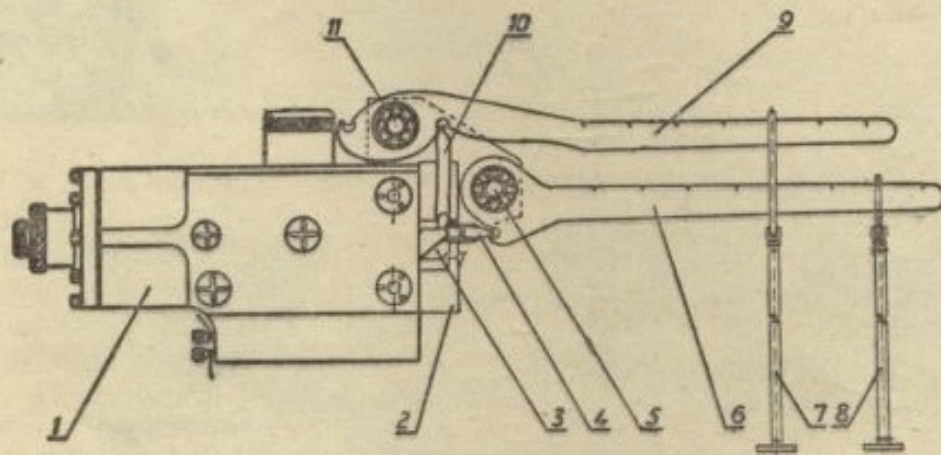


Рис. 17.

На токарном станке приспособление крепится таким же образом, как и на строгальном (рис. 17 и 17а), только рычаги меняются местами.

Рычаг 6 служит для тарировки радиальной составляющей, а рычаг 9 — для тарировки вертикальной составляющей усилия резания.

Каждая составляющая тарировалась в отдельности, причём при тарировке одной датчик другой включался, чтобы можно было контролировать влияние одной составляющей на другую.

Тарировочные графики во всех случаях имели прямолинейный и стабильный характер (рис. 18 и 19). Как видно из графиков, показания при нагрузке и разгрузке совпадают.

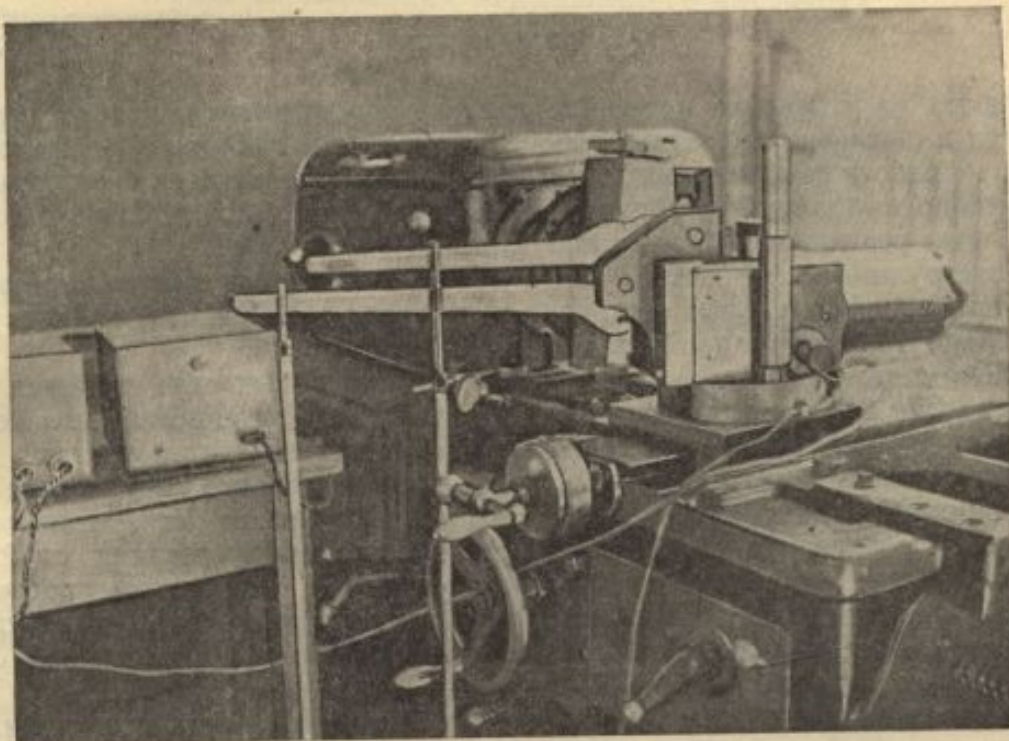


Рис. 17а.

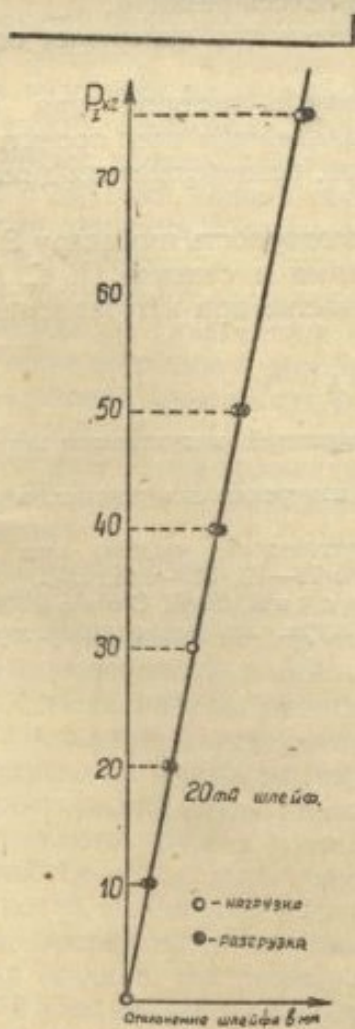


Рис. 18.

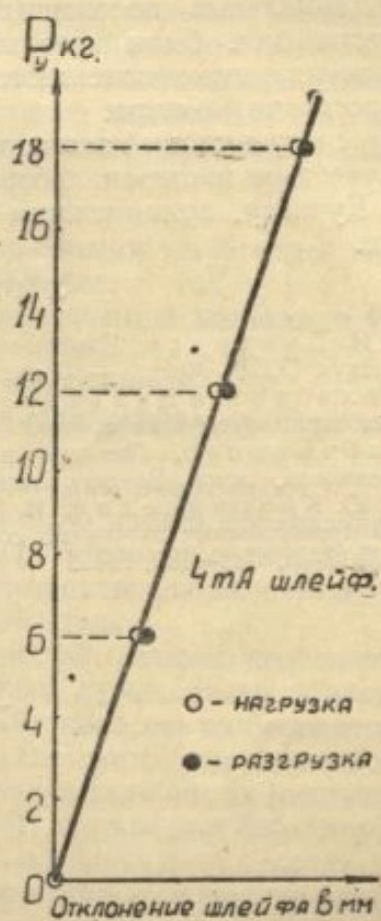


Рис. 19.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа на установке в течение длительного времени показала хорошие качества в отношении чувствительности, точности и стабильности показаний. Хорошая работа измерительной установки в значительной степени определена удачно выбранной конструкцией механической части прибора и довольно удачным решением вопроса с индуктивными датчиками.

Конструкция механической части прибора позволила получить независимость показаний отдельных составляющих усилия резания, что является большим преимуществом данной измерительной установки.

Схема с двумя реактивными катушками, из которых одна является рабочей, а другая служит для регулировки чувствительности, обеспечила необходимую точность измерения при довольно мощных упругих элементах.

Возможность замены упругих элементов и регулировка чувствительности в широких пределах значительно расширила диапазон измерения усилий резания. Исследования показали, что диапазон усилий резания от 2 кг до 2000 кг может хорошо обеспечиваться упругими элементами, рассчитанными на максимальные усилия благодаря регулировке зазора в катушках. Это обстоятельство является большим преимуществом предложенной схемы индуктивных датчиков.

Наличие мощных упругих элементов обеспечило жёсткое и стабильное положение резца в процессе работы. Можно с полной гарантией утверждать, что прибор не вносит искажений в динамику процесса резания.

Прибор с успехом может быть приспособлен и для измерения осевой составляющей усилия резания — R_x .

Принципиальные положения, разработанные автором при создании данной установки, были использованы в дальнейшем при проектировании и изготовлении однокомпонентного динамометра, резцедержателя-динамометра и фрезерного динамометра.

Автор считает своим долгом выразить благодарность инженеру В. К. Скорикову, учебным мастерам лаборатории резания и станков П. С. Манжосу и И. М. Кучневу, принимавшим активное участие при изготовлении данной установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. И. Дмитриев. Измерение малых перемещений индуктивным методом. Изд. Академии Наук СССР, Москва — Ленинград, 1945.
2. Шальброх и Бальцер. Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов на металлорежущих станках.
3. Бабчинер. Применение магнитно-эластической мессдозы при обработке металлов резанием, журн. Вестник машиностроения, № 11—12, 142—145, 1943.
4. Ю. Ю. Колочинский, И. Г. Коровянский, В. А. Орлов. Измерение деформаций проволоочными датчиками сопротивления, журн. Заводская лаборатория, № 6, 602—612, № 7—8, 719—729, 1946.