

Ю. С. Быховский, В. Е. Шатерников,  
М. С. Нерубай

## БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ АМПЛИТУДЫ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

В технике промышленного применения ультразвуковых колебаний для воздействия на технологические процессы большое значение имеет проблема измерения параметров ультразвуковых установок.

Одним из важнейших параметров является амплитуда вибрации ультразвуковых колебаний магнитострикционных преобразователей. Как показали проведенные исследования [4], полезный эффект обработки жаропрочных и титановых сплавов при введении в зону резания вынужденных ультразвуковых колебаний в значительной степени определяется величиной их амплитуды (рис. 1).

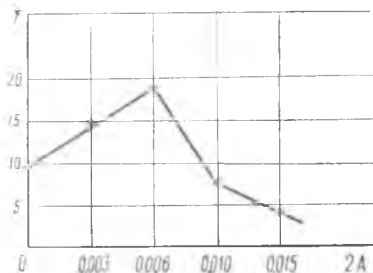


Рис. 1.

В частности при точении жаропрочного сплава ЭИ-437Б стойкость инструмента в зависимости от амплитуды может увеличиваться почти в 2 раза ( $v = 8$  м/мин;  $s = 0,2$  мм/об;  $t = 2$  мм;  $2A = 0,003$  мм;  $f_{\text{вибр}} = 20$  кгц) или уменьшается в 1,4 раза ( $v = 8$  м/мин;  $s = 0,2$  мм/об;  $t = 2$  мм;  $2A = 0,01$  мм;  $f_{\text{вибр}} = 20$  кгц). К измерителю амплитуды вибрации ультразвуковых колебаний предъявляется целый ряд специфических требований — чувствительность датчика должна обеспечивать измерение вибраций с амплитудой от 0,5 до 20 мк при частоте до 40 кгц. Одновременно большая напряженность магнитного поля и переменная диэлектрическая проницаемость смазывающе-охлаждающей жидкости не должны влиять на показания прибора.

В настоящее время в качестве бесконтактных измерителей амплитуды вибрации в основном используются оптические приборы и электрические измерительные устройства с емкостными датчиками. Но эти устройства не позволяют производить измерения при применении ультразвука в некоторых технологических процессах — ультразвуковая очистка деталей в агрессивных средах, обработка металлов, стекла и пластмасс с наложением ультразвуковых колебаний и т. д., так как они имеют много существенных недостатков. Оптические устройства обладают известной субъективностью и позволяют производить измерения высокой точности при отсутствии загрязнений на измеряемом объекте, кроме того они громоздки и могут быть использованы в лабораторных условиях. Емкостные же преобразователи чувствительны к изменениям диэлектрических свойств среды между пластинкой датчика и вибрирующей поверхностью.

Поэтому наиболее целесообразно для бесконтактного измерения амплитуды вибрации применять токовихревые преобразователи, принцип работы которых основан на обратном воздействии на первичную катушку вихревых токов, возникающих в проводящей поверхности под действием высокочастотного электромагнитного поля датчика. Основной особенностью токовихревых преобразователей является то, что связь с измеряемым объектом осуществляется посредством электромагнитного поля.

Благодаря этому преобразователь ничтожно влияет на измеряемый объект, а питание его высокочастотным током позволяет изготовить датчик в виде малогабаритной катушки и считать его почти безинерционным. Токовихревой преобразователь может работать в различных непроводящих средах — воде, масле, эмульсиях и растворах, так как в определенном диапазоне частот изменение диэлектрической проницаемости не влияет на его параметры.

Принцип действия токовихревых преобразователей основан на том, что при наличии вблизи проводящей поверхности возбуждающей высокочастотной катушки (датчика) ее параметры изменяются в зависимости не только от электромагнитных свойств металла (удельной проводимости —  $\sigma_2$  и магнитной проницаемости —  $\mu_2$ ), но и от величины зазора  $\delta$  — расстояния от датчика до проводящей поверхности, т. е. активное сопротивление увеличивается на величину  $R_{вн}$  вносимого активного сопротивления, а индуктивность катушки уменьшается на величину  $L_{вн}$  вносимой индуктивности (для немагнитных металлов). При измерении зазоров и перемещений частота тока, питающего датчик, выбирается такой, чтобы обеспечить минимальное проникновение вихревых токов в проводящую среду, что характеризуется коэффициентом  $\lambda = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_2 \sigma_2}}$  (называемым эффектной глубиной проникновения электромагнитной волны в металл) и максимальное отражение энергии на границе раздела, в результате чего уменьшается влия-

ние электромагнитных свойств металла и увеличивается чувствительность к изменениям зазора.

Согласно методике расчета параметров накладной катушки вихревого преобразователя при зазорах соизмеримых с ее размерами, подробно описанной в литературе [2], имеем следующие зависимости вносимого активного сопротивления и вносимой индуктивности  $L_{вн}$  от зазора  $\delta$  с учетом электромагнитных свойств проводящей поверхности:

$$R_{вн} = \frac{1}{80\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu_1}{2\epsilon_1}} \cdot C; \quad (1)$$

$$L_{вн} = 0,05 a \mu_1 D \sqrt{\frac{2\epsilon_1}{80\pi}} \cdot C, \quad (2)$$

где  $\omega$  — угловая частота питания датчика;  
 $a$  — средний радиус катушки;  
 $\mu_1$  — магнитная проницаемость среды, в которой находится датчик;  
 $\epsilon_1$  — магнитная проницаемость проводящей поверхности;  
 $\sigma_1$  — удельная электропроводность проводящей поверхности;  
 $C$  и  $D$  — нелинейные функции, зависящие только от величины относительных зазоров  $\frac{\delta}{a}$ , определяются методом графо-аналитического интегрирования или путем приближенной аппроксимации кривых:  $C = f\left(\frac{\delta}{a}\right)$  и  $D = f\left(\frac{\delta}{a}\right)$  с помощью функций типа:

$$C = K_p l^p \frac{\delta}{a} \quad (3)$$

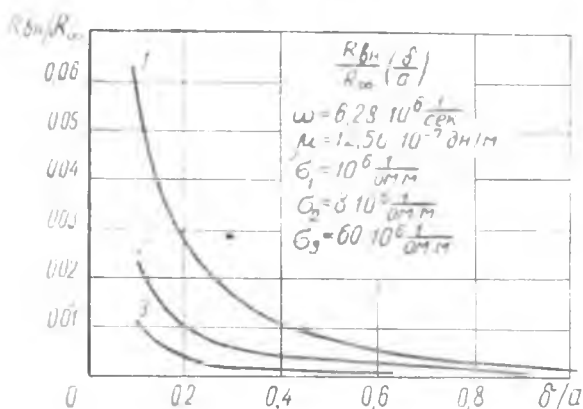


Рис. 2.

$$D = K_D l^{-p_D} \frac{\delta}{a} \quad (4)$$

где коэффициенты  $K_e$ ,  $K_D$ ,  $p_e$  и  $p_D$  берутся из таблицы, приведенной в [2].

Теперь предыдущие выражения после подстановки приводятся к следующим:

$$R_{вн} = \frac{1}{80\pi} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{2\sigma_0}} K_e l^{-p_e} \frac{\delta}{a} \quad (5)$$

$$L_{вн} = 0,05 a \mu_0 K_D l^{-p_D} \frac{\delta}{a} - \frac{1}{80\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{2\omega \sigma_0}} K_C l^{-p_C} \frac{\delta}{a} \quad (6)$$

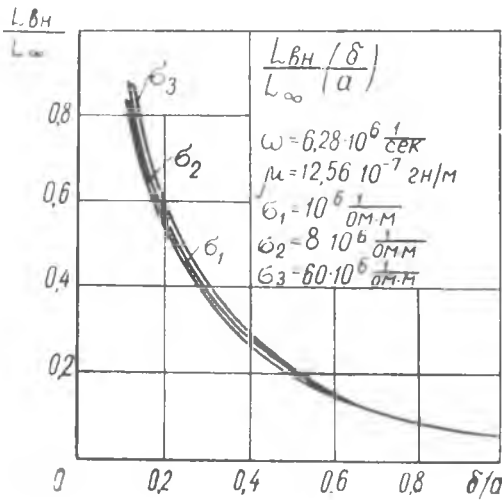


Рис. 3.

описанными в [3]. Из анализа кривых (изображенных на рис. 2 и 3) следует, что вносимые индуктивности при равных зазорах для разных металлов отличаются незначительно, а вносимые активные сопротивления имеют существенные различия и, следовательно, изменение величины полного вносимого сопротивления

$Z_{вн} = R_{вн} + j\omega L_{вн}$  определяется в основном изменением  $L_{вн}$ .

Однако для металлов с малой удельной электропроводностью типа нержавеющей стали и титановых сплавов лучше измерять  $R_{вн}$ , т. к. изменение его несколько больше  $L_{вн}$  и при этом увеличивается к. п. д. датчика и мощность на выходе измерительной схемы.

На основании последних выражений можно построить графики (рис. 2 и рис. 3), характеризующие изменение относительных вносимых параметров  $\frac{R_{вн}}{R_x}$  и  $\frac{L_{вн}}{L_{\infty}}$  в зависимости от относительных перемещений  $\frac{\delta}{a}$  для различных металлов с постоянными электромагнитными свойствами, где  $L_{\infty}$  — индуктивность датчика без учета влияния проводящей поверхности и  $R_x$  — активное сопротивление датчика; эти параметры определяются известными методами,

Не менее важной характеристикой токовихревого токообразователя является его чувствительность к малым перемещениям, определяемая как производная от относительной вносимой индуктивности  $\frac{L_{вн}}{L_{\infty}}$  и сопротивления  $\frac{R_{вн}}{R_{\infty}}$  по относительному зазору  $\frac{\delta}{a}$ , т. е.

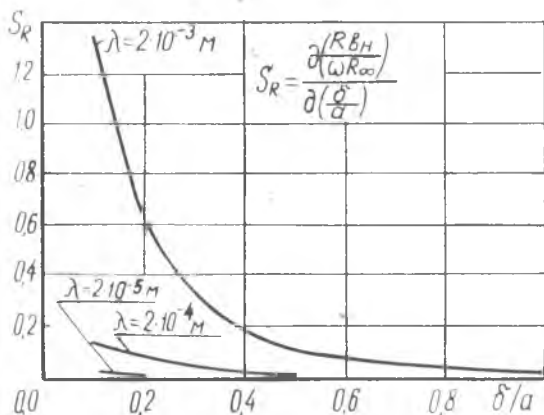


Рис. 4.

$$S_L = \frac{\partial\left(\frac{L_{вн}}{L_{\infty}}\right)}{\partial\left(\frac{\delta}{a}\right)}; \quad (7)$$

$$S_R = \frac{\partial\left(\frac{R_{вн}}{R_{\infty}}\right)}{\partial\left(\frac{\delta}{a}\right)}, \quad (8)$$

где значения  $L_{вн}$  и  $R_{вн}$  определяются из выражений (5) и (6). На рис. 4 и 5 приведены рассчитанные по предыдущим выражениям кривые чувствительности к перемещениям по вносимым па-

раметрам для трех значений коэффициента  $\lambda$ , охватывающего диапазон изменения частоты  $f = (0,1 \div 100)$  мГц и диапазон изменения  $\sigma = (1 \div 60) 10^{-6} \frac{\text{м.м}^2}{\text{о.м. м}}$ .

Из этих графиков видно, что участок максимальной чувствительности датчика лежит в пределах отношения зазора к радиусу датчика  $\frac{\delta}{a} = (0 \div 0,35)$ , следовательно оптимальный радиус катушек должен быть в 3 раза больше зазора  $a \geq 3\delta$  и далее, что чувствительность по изменению вносимой индуктивности  $\delta_L$  в диапазоне частот  $0,3 \div 10$  мГц почти не

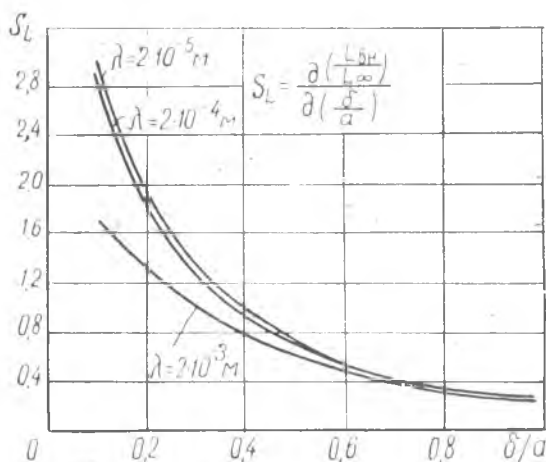


Рис. 5.

зависит от частоты и определяется только величиной зазора при неизменных электромагнитных свойствах металла. Таким образом, при использовании высокочастотного индуктивного датчика в качестве бесконтактного измерителя зазоров и амплитуд вибрации можно создать схемы, чувствительные только к изменениям зазоров и почти нечувствительные к изменениям электромагнитных свойств металла в диапазоне частот 0,3—10 мГц.

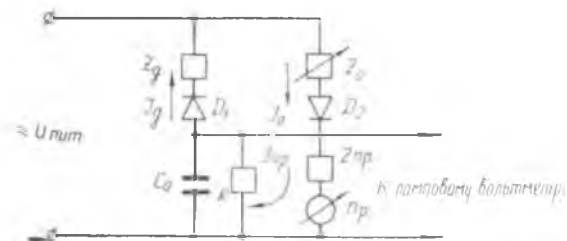


Рис. 6. Принципиальная измерительная схема прибора.

Дальнейший анализ графиков (рис. 2, 3, 4, 5) показывает, что изменение активного и реактивного сопротивления катушки, обусловленное малыми изменениями зазоров, составляет несколько процентов от сопротивления катушки без учета влияния проводящей поверхности. Поэтому в качестве измерительной схемы целесообразно применять не полностью уравновешенную схему сравнения, приведенную на рис. 6.

В этой схеме происходит сравнение полного сопротивления датчика  $Z_g$  и эталонного сопротивления  $Z_0$ . Питание датчика осуществляется пульсирующим током  $I$  с частотой близкой к резонансной частоте датчика.

Измерительный прибор реагирует на разность токов, протекающих через  $Z_g$  и  $Z_0$ , т. е. ток прибора равен:  $I_{пр} = I_g - I_0$

При установке определенного постоянного зазора от 1,35 до 1,55 мм между металлической поверхностью и катушкой датчика регулировкой сопротивления  $Z_0$  добиваются равенства постоянных составляющих токов, проходящих через диоды  $D_1$  и  $D_2$ . Изменение величины зазора вызывает изменение полного вносимого сопротивления датчика.

При этом стрелка прибора М-24 (0÷100) мкА отклоняется на всю шкалу при изменении зазора на 10 мк и общем зазоре между датчиком и металлической поверхностью 1,5 мм.

Для повышения чувствительности измерительной схемы и увеличения тока питания датчика применяется параллельный резонанс; в качестве резонирующей емкости используется собственная емкость датчика и емкость коаксиального подводящего кабеля. Такое включение датчика не только значительно повышает чувствительность (приблизительно в  $Q^2$  раз, где  $Q$  — добротность катушки датчика), но и позволяет варьировать характер шкалы прибора.

На основании вышеизложенного была разработана схема прибора для бесконтактного измерения малых перемещений и

амплитуды вибрации, блок-схема которого приведена на рис. 7, а принципиальная схема на рис. 8. Прибор питается постоянным напряжением от стабилизированного блока, который состоит из полупроводникового выпрямителя, собранного по мостовой схеме на диодах Д7Ж и электронного стабилизатора напряжения. Высокочастотный генератор мощностью около 7 вт собран на лампе 6П3С по одноконтурной схеме с самовозбуждением с трансформаторной обработкой через катушки  $L_1$  и  $L_2$ .

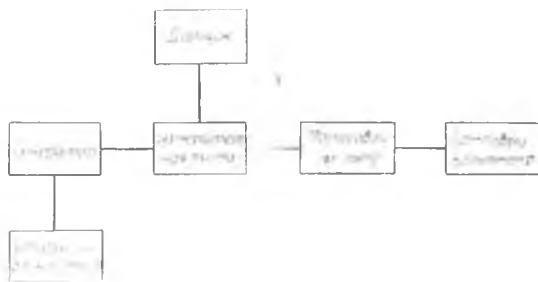


Рис. 7. Блок-схема прибора.

Частота генератора около 2,5 мГц и может быть изменена в небольших пределах конденсатором  $C_6$ . Высокочастотные колебания подаются на измерительную схему, которая состоит из двойного диода 6Х2П, эталонных сопротивлений  $R_{10}$  и  $R_{11}$ , контура

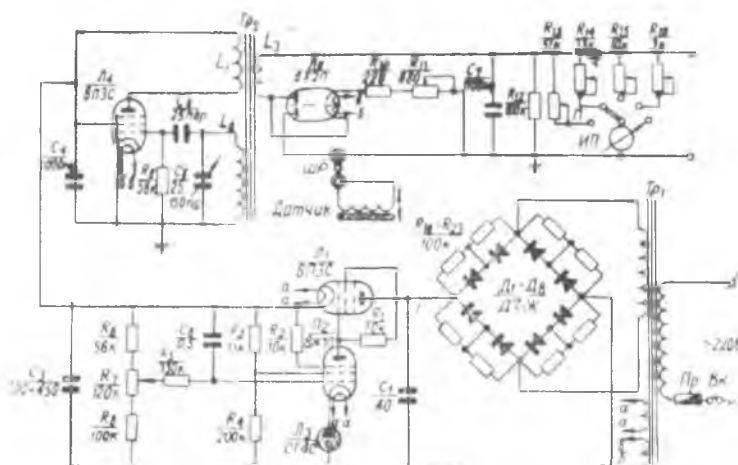


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема прибора.

датчика с емкостью коаксиального кабеля, конденсатора  $C_7$ , нагрузочного сопротивления  $R_{12}$  и добавочных сопротивлений  $R_{13}$  —  $R_{16}$  и измерительного прибора. Прибор позволяет измерять как медленные (статические) перемещения в трех диапазонах:  $0 \div 10$  мк,  $0 \div 50$  мк и  $0 \div 100$  мк, так и динамические (вибрации). На выходе измерительной схемы на сопротивлении  $R_{12}$  в результате вибрации проводящей поверхности появляется переменное напряжение,

имеющее основную частоту равную частоте вибрации. Для выделения напряжения, пропорционального амплитуде вибрации и устранения влияния на результат измерения вибраций станка, фундамента и биения детали, используется полосовой фильтр

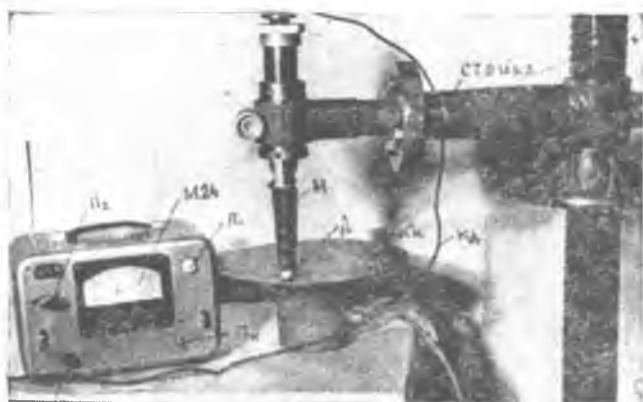


Рис. 9. Общий вид прибора с измерительной стойкой для тарировки,

- $И_к$  — переключатель сети;
- $И_в$  — переключатель диапазонов измерения;
- $Л$  — сигнальная лампочка;
- $Д$  — датчик;
- $М$  — микроинт;
- $К_д$  — подводящий кабель датчика;
- $К_ц$  — концентратор.

с полосой пропускания  $2000 \div 50000$  гц. Это напряжение измеряется с помощью измерительного прибора, в качестве которого может использоваться и ламповый вольтметр типа МВЛ-2М.

Для наблюдения формы кривой в приборе предусмотрена возможность подачи напряжения с зажимов 1-2 на осциллограф.

В случае негармонических колебаний вибрирующей поверхности можно с помощью узкополосного нерестранвающего фильтра измерять амплитуды гармоник сложного колебания от 0,5 до 100 мк.

Прибор позволяет измерять почти с одинаковой чувствительностью статические и динамические перемещения с частотой до 50 кгц. Это следует из того, что рабочая частота напряжения питания датчика почти в 50 раз выше максимальной частоты вибраций.

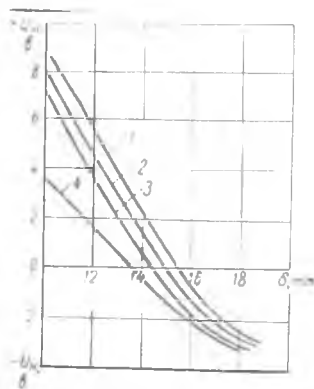


Рис. 10.



При такой разнице частот как сопротивление датчика, так и сопротивление нагрузки измерительной схемы можно считать постоянными для всех частот измеряемых вибраций, т. е. от 0 до 50 кГц.

Общий вид прибора со стойкой показан на рис. 9. Для измерения амплитуд вибрации датчик, (выполненный в виде плоской катушки, намотанной па каркасе из фторопласта), крепится на специальной стойке, с помощью которой он устанавливается на расстоянии 1,5 мм над вибрирующей поверхностью. При повороте этого винта па один оборот датчик перемещается на 50 мк.

Использование этого винта при статической тарировке прибора позволяет создавать перемещения с точностью до 0,5 мк. Для градуировки прибора используются прямолнейные и параллельные участки кривых (рис. 10), характеризующих зависимость напряжения на нагрузочном сопротивлении  $U_n$  от зазора  $\delta$  для различных металлов. Так как наклон кривых одинаков, то чувствительность прибора к зазорам почти постоянна для всех немагнитных металлов, а первоначальная балансировка схемы сравнения производится по несколько отличным друг от друга зазорам для разных металлов. При измерении амплитуд вибраций установка нуля несущественно сказывается на чувствительности прибора, т. е. изменение электромагнитных свойств металла, например из-за температуры, не повлияет на результат измерения.

Необходимо также отметить почти линейную зависимость напряжения от зазора в диапазоне от 1,0 до 1,65 мм. Эта линейность позволяет применять прибор с одной равномерной шкалой для разных металлов и широким диапазоном изменения амплитуды вибрации, а также отдельно и независимо друг от друга измерять все составляющие сложного колебания.

Точность статической градуировки прибора проверялась в



Рис. 11. Измерение амплитуды вибрации реза.

$D$	датчик;
$P_3$	резец;
$K_H$	концентратор;
$Z_T$	заготовка.

динамическом режиме с помощью оптических средств, при этом погрешность прибора была менее 8%.

В настоящее время прибор применяется при наладке технологических процессов для измерения амплитуды колебаний поверхности магнитострикционных излучателей, в частности для измерения амплитуды вибрации резца при токарной обработке жаропрочных и титановых сплавов с наложением вынужденных ультразвуковых колебаний (рис. 11) для измерения амплитуды

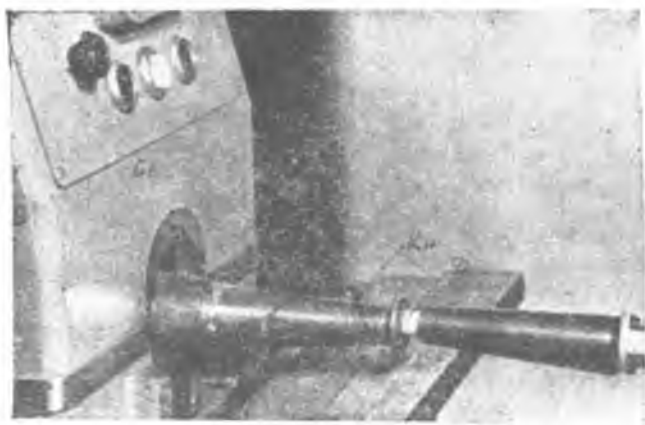


Рис. 12. Измерение амплитуды вибрации сварочного инструмента,

$C_B$  сварочный аппарат;  
 $D$  датчик;  
 $K_H$  концентратор.

колебаний сварочной головки при ультразвуковой сварке (рис. 12) для определения амплитуды колебаний поверхности плоских концентраторов, расположенных в ультразвуковой ванне для очистки трубопроводов и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Л. Бенькович, Ю. С. Быховский, Ю. В. Пшеничников, О. П. Скобелев. «Измерение ультразвуковой мощности» ГОСИНТИ. «Сборник докладов Всесоюзной конференции по применению ультразвука в промышленности», г. Москва, 1960.
2. Ю. С. Быховский. «Токовихревой преобразователь для измерения перемещений». Диссертационная работа. г. Куйбышев. 1963.
3. П. Л. Калантаров и Л. А. Цейтлин. «Расчет индуктивностей» (справочник). ГЭИ. 1955.
4. М. С. Нерубай. «Резание жаропрочных и титановых сплавов с помощью ультразвука» Куйбышевское книжное издательство, 1963.