

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТЕЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ЗА СЧЕТ ВАРИАЦИИ И ЛИНЕАРИЗАЦИИ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

214-222

Ларин Виталий Юрьевич, м.н.с.

Донецкий государственный технический университет

Предложенные результаты исследований способов повышения точности технических измерительных средств, построенных на основе магнитоупругих первичных преобразователей позволяют значительно уменьшить составляющие погрешностей, возникающих за счет вариации и линеаризации статических характеристик и выбрать метод линеаризации в зависимости от принципа и структуры реализации системы

The offered results of researches ways of increase of accuracy the technical measuring means constructed on a basis of magnitoelastic primary converters allow considerably reduced components of errors, arising at the expense of a variation and linearization of the static characteristics and to choose a method of linearization depending from a principle and structure of system realization.

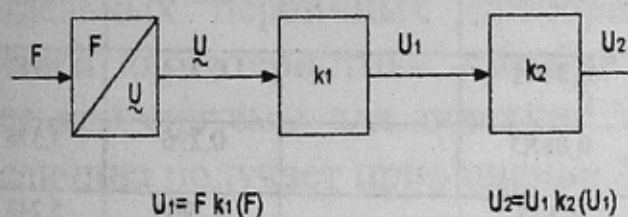
В измерительных средствах, чувствительные элементы (ЧЭ) которых построены на основе магнитоупругих первичных преобразователей (МПП), источником погрешности обусловленной вариацией выходной величины, являются две основные причины: гистерезис и не идентичность статических характеристик (СХ). От вариации за счёт гистерезиса избавляются путём тренировки измерительного средства. Экспериментально установлено, что при оптимальных усилиях сжатия пакета, достаточно 2-х нагружений. Для устранения не идентичности СХ за счёт конструктивных особенностей должны быть выполнены следующие условия: выдержан заданный размер пакетов; ЧЭ набраны из одинакового количества идентичных по магнитным свойствам и расположенных поочередно вдоль и поперек проката пластин листопрокатной стали; усилие сжатия пластин – одинаковое; их число равно расчетному; воздушные зазоры между

пластинами отсутствуют; расположение идентичных обмоток – строго ориентированное; силовведение от объекта с или без силовводящего элемента – притертое.

Рассмотрим возможность оценки не исключенного остатка погрешности вариации, вызванной различием СХ МПП. Экспериментальные измерения значений выходной величины (напряжения U_1) получены при соблюдении условий репликации при повторяющейся постоянной входной величине - силе $F_i = const$. Примем в качестве СХ МПП следующую функцию:

$$U_1 = k_1 \cdot F, \quad \text{откуда } k_1 = \frac{U_1}{F} \text{ или } k_1(F) = \frac{U_1}{F}.$$

На рис.1 показана структурная схема исследуемого средства измерений силы на основе МПП, состоящая из преобразователя силы F в напряжение и преобразовательных звеньев $k_1(F)$ и $k_2(U_1)$.



Сигнал на выходе измерительного средства можно определить как $U_2 = U_1 \cdot k_1(F) \cdot k_2(U_1)$, причём U_2 - будет линейной функцией входной величины F при $k_1(F) \cdot k_2(U_1) = A = const$ или при выполнении условия:

$$k_2(U_1) = \frac{A}{k_1(F)}$$

На основании зависимости $k_1(U)$ могут быть определены требования к $k_2(U)$, при выполнении которых функция прямого преобразования $U_2(F)$ будет линейной. При этом вариация СХ не исключается. Вариацию можно исключить только при полном равенстве характеристик преобразования первичных преобразователей. Из-за несовершенства конструкции ЧЭ в существующей в настоящее время системе невозможно исключить погрешности вариации СХ при градуировке. Следовательно, невозможно получить достоверную номинальную характеристику прямого преобразования. Незнание этой характеристики исключает возможность определения требований к кор-

ректирующему звену. Система будет отвечать требуемым нормируемым характеристикам при условии жёсткого однообразия СХ МПП.

Для определения условий исключения погрешности и дальнейшей линеаризации СХ МПП выполним нагружения различных ЧЭ. На основании данных эксперимента (табл.1) вычислим коэффициенты $k_1(F)$ и $k_2 = \frac{U}{k_1(F)}$.

Построим зависимость $k_1(F)$ для трёх преобразователей, выполненных при неконтролируемом боковом усилии сжатия пакета и неточном сверлении отверстий для обмоток (рис.2). Различие СХ преобразователей №1 и №2 обусловлено незначительными отклонениями конструкций пакета, – №3 имеет провал из-за того, что вектор магнитной индукции, индуцирующей Э.Д.С. в измерительной обмотке, не совпадает с осью намагничивающей силы обмотки питания МПП.

Таблица 1 - Результаты экспериментальных исследований,

Преобразователь №1, $U_{питания} = 12,67 \text{ В}_{\text{эф}}$				Преобразователь №2, $U_{питания} = 12,67 \text{ В}_{\text{эф}}$			
F	$U_1(F)$	$k_1(F)$	$k_2 = \frac{U}{k_1(F)}$	$U_1(F)$		$k_1(F)$	$k_2(F)$
1,4	0,5	0,3	A 2,753	0,3671		0,254	3,933 A
44	245	63		0,8883		0,296	3,376 A
2,9	1,0	0,3	A 2,98			0,2905	5,248 A
99	061	35		1,443		0,149	6,702 A
7,573	1,886	0,249	A 4,015	2,244		0,13399	7,4629 A
15,04	2,867	0,19	A 5,245	3,022		0,12396	8,066 A
22,553	3,635	0,161	A 6,2	3,165		0,1187	8,4196 A
25,531	3,899	0,152	A 6,54	3,391		0,115	8,695 A
28,551	4,162	0,145	A 6,8599	3,450			
30	4,3	0,1433	A 6,976				

Преобразователь №3, $U_{питания} = 12,67 \text{ В}_{\text{эф}}$			
$F(T)$	$U_1[B]$	$k_1(F)$	$k_2 = \frac{U}{k_1(F)}$
1,444	0,517	0,358	2,793
2,999	0,84	0,28	3,57
7,573	1,69	0,223	4,48
15,04	2,9	0,1928	5,186
22,553	3,614	0,1602	6,240
25,531	3,78	0,1606	6,225
28,551	3,91	0,1369	7,301
30	3,89	0,1296	7,712

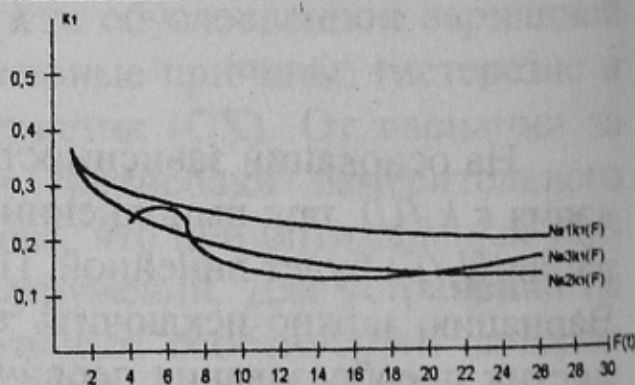


Рисунок 2.- Статические характеристики МПП

Такой провал (рис.2). наблюдается, когда угол между обмотками отличный от 90° и уменьшается в сторону вертикальной оси.

В случае использования трёх преобразователей в одном измерительном устройстве их сигналы суммируются: $U_1 = U_{11} + U_{12} + U_{13}$, или $U_1 = F(k_{11}, k_{12}, k_{13})$. Для выполнения количественной оценки погрешности результата измерений представим изменения выходного сигнала

при малых приращениях силы ΔF :

$$\Delta U_1 = \frac{\partial U_1}{\partial F} \cdot \Delta F + \frac{\partial U_{11}}{\partial k_{11}} \cdot \Delta k_{11} + \frac{\partial U_{12}}{\partial k_{12}} \cdot \Delta k_{12} + \frac{\partial U_{13}}{\partial k_{13}} \cdot \Delta k_{13},$$

где $\frac{\partial U_{11}}{\partial k_{11}} \cdot \Delta k_{11} + \frac{\partial U_{12}}{\partial k_{12}} \cdot \Delta k_{12} + \frac{\partial U_{13}}{\partial k_{13}} \cdot \Delta k_{13}$ - погрешности, обусловленные нелинейностью зависимостей $U_{1i}(F_i)$ и $k_{1i}(F)$. На основании чего очевидно, что введением в схему коррекции с целью обеспечения линейности зависимости $U_{\text{вых}}(F)$ невозможно избавиться от погрешностей измерений за счёт нелинейности характеристик преобразования отдельных первичных преобразователей. Обеспечить линейность общей характеристики преобразования можно коррекцией измерительной системы для значений F_i относительно которых измеряемая величина получает приращение ΔF_i при

$$\frac{\partial U_{11}}{\partial k_{11}} \cdot \Delta k_{11} = \frac{\partial U_{12}}{\partial k_{12}} \cdot \Delta k_{12} = \frac{\partial U_{13}}{\partial k_{13}} \cdot \Delta k_{13} = -const.$$

Если это условие не выполняется, корректирующее звено в измерительной системе не имеет смысла.

Рассмотренные условия получения идентичных МПП дают возможность получить нормируемые СХ и при многократном измерении силы F погрешности измерений можно оценить следующим образом:

- аппроксимировать характеристики $k_{1i}(F)$ МПП прямыми;
- записать эти характеристики уравнениями:

$$\begin{cases} k_{11} = k_{11}(0) + \frac{\partial k_{11}}{\partial F_{11}} F_{11} = k_{11}(0) + S_{11} F_{11} \\ k_{12} = k_{12}(0) + \frac{\partial k_{12}}{\partial F_{12}} F_{12} = k_{12}(0) + S_{12} F_{12} \\ k_{13} = k_{13}(0) + \frac{\partial k_{13}}{\partial F_{13}} F_{13} = k_{13}(0) + S_{13} F_{13} \end{cases} \quad (1)$$

- принять следующие распределения измеряемой величины F между преобразователями: $F_{11} = \delta_{11} F$; $F_{12} = \delta_{12} F$; $F_{13} = \delta_{13} F$, а сумму относительных погрешностей: $\delta_{11} + \delta_{12} + \delta_{13} = 1$.

- представить сигнал на выходе преобразователя: $U_1 = U_{11} + U_{12} + U_{13}$ или

$$U_1 = F_{11}[k_{11}(0) + S_{11} F_{11}] + F_{12}[k_{12}(0) + S_{12} F_{12}] + F_{13}[k_{13}(0) + S_{13} F_{13}];$$

- функцию $U_1(F)$ представить:

$$U_1 = \delta_{11} F [k_{11}(0) + S_{11} \delta_{11} F] + \delta_{12} F [k_{12}(0) + S_{12} \delta_{12} F] + \delta_{13} F [k_{13}(0) + S_{13} \delta_{13} F];$$

- считать номинальной при $\delta_{11} = \delta_{12} = \delta_{13} = \frac{1}{3}$ следующую функцию:

$$U_{\text{ном}} = \frac{1}{3} F \left[k_{11}(0) + \frac{1}{3} S_{11} F \right] + \frac{1}{3} F \left[k_{12}(0) + \frac{1}{3} S_{12} F \right] + \frac{1}{3} F \left[k_{13}(0) + \frac{1}{3} S_{13} F \right]. \quad (2)$$

При повторном измерении при $F = \text{const}$ относительные погрешности будут: $\left(\frac{\Delta F}{F} \right) = \frac{(U_1 - U_{\text{ном}})}{F}$ или с учётом (2) получим:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_1}{F} &= [k_{11}(0)\delta_{11} + \delta_{11}^2 S_{11} F + k_{12}(0)\delta_{12} + \delta_{12}^2 S_{12} F + k_{13}(0)\delta_{13} + \delta_{13}^2 S_{13} F - \\ &- \frac{1}{3} k_{11}(0) - \frac{1}{9} S_{11} F - \frac{1}{3} k_{12}(0) - \frac{1}{9} S_{12} F - \frac{1}{3} k_{13}(0) - \frac{1}{9} S_{13} F] \text{ или} \\ \frac{\Delta U_1}{F} &= [k_{11}(0) \cdot \left(\delta_{11} - \frac{1}{3} \right) + k_{12}(0) \cdot \left(\delta_{12} - \frac{1}{3} \right) + k_{13}(0) \cdot \left(\delta_{13} - \frac{1}{3} \right) + \\ &+ S_{11} F \left(\delta_{11}^2 - \frac{1}{9} \right) + S_{12} F \left(\delta_{12}^2 - \frac{1}{9} \right) + S_{13} F \left(\delta_{13}^2 - \frac{1}{9} \right)] \end{aligned}$$

Здесь, относительные погрешности:

$$[k_{11}(0) \cdot \left(\delta_{11} - \frac{1}{3}\right) + k_{12}(0) \cdot \left(\delta_{12} - \frac{1}{3}\right) + k_{13}(0) \cdot \left(\delta_{13} - \frac{1}{3}\right)]$$

определяются различием начальных нулевых условий - значениями $k_{1i}(0)$ и равенством относительных погрешностей $\delta_{11} = \delta_{12} = \delta_{13}$ при повторяющихся трёх измерениях и $F = const$).

На основании проведенного анализа сделаем выводы.

- начальное уравнивание измерительной системы осуществляется по суммарному сигналу U_1 и это не исключает погрешности за счёт $k_{11}(0) \neq k_{12}(0) \neq k_{13}(0)$;

- составляющая случайной погрешности

$$[S_{11}F \left(\delta_{11}^2 - \frac{1}{9}\right) + S_{12}F \left(\delta_{12}^2 - \frac{1}{9}\right) + S_{13}F \left(\delta_{13}^2 - \frac{1}{9}\right)]$$

обусловлена различием крутизны характеристик $k_{1i}(F_{1i})$ и неравномерным случайным распределением F между МПП;

- при существующей системе преобразования сигнала $U_1 = U_{11} + U_{12} + U_{13}$ и СХ МПП нет способа исключения рассмотренных погрешностей из результатов измерений за счёт характеристик измерительной цепи;

- ЭВМ может обеспечить линеаризацию зависимости $U_{вых}(F)$, но не может обеспечить исключение "вариации выходной величины";

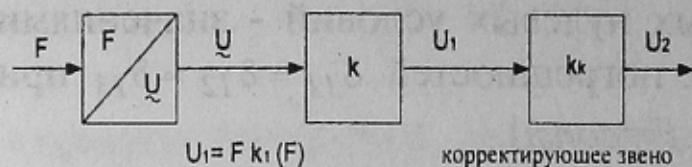
- вариацию СХ можно исключить только при полном равенстве характеристик преобразования МПП, полученных при изготовлении пакета.

Далее определим требуемые характеристики $k_2(U_1)$ - корректирующего звена (КЗ) измерительной цепи для обеспечения линейности преобразования. По экспериментальным данным могут быть определены зависимости требуемых значений $k_2(U_1)$, при которых $U_2(F)$ будет линейной функцией. Линеаризацию надо выполнять на основании характеристики преобразования, полученной при градуировке измерительной системы.

Рассмотрим требования к СХ КЗ, обеспечивающего линейность преобразования $U_2(F)$ для разных структур средств измерения.

Метод 1 - Линеаризация путём выбора соответствующей зависимости $k_2(U_1)$. Для средства измерения (рис 3) СХ преобразования звеньев представим как:

$$U_1 = Fk(F); U_2 = U_1k_k(U_1) = Fk(F)k_k(U_1)$$

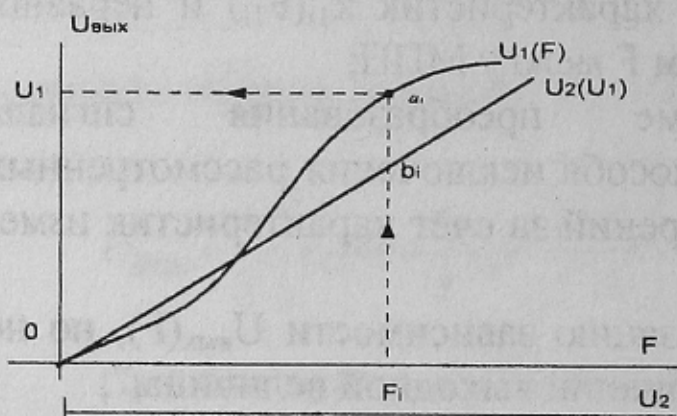


Статический коэффициент
корректирующего звена

$$k_k(U_1) = \frac{U_2(F)}{U_1(F)}$$

Рисунок 3.- Структурная схема коррекции измерительного средства

где $U_1(F)$ - фактическая и $U_2(F)$ - желаемая характеристика средства измерений. Рассмотрим способ получения исходных данных для расчёта требуемого коэффициента $k_k(F)$ или $k_k(U_1)$. На рис. 4 для ряда значений F_i получены точки a_i и b_i , для которых соответственно определены значения U_{1i} и U_{2i} . Определяем зависимости $U_2(U_1)$. Строим



зависимость $k_2(U_1) = U_2/U_1$. Она является требуемой стат. функцией преобразования. Рассмотрим пример расчёта требуемого $k_k(U_1)$ для зависимости $U_1(F)$

Рисунок 4.- Линеаризация за счёт выбора СХ КЗ (рис.4, табл.2).

Таблица 2. Данные для определения k_k

F	U_1	U_2	$k_k = U_2/U_1$
1	0,5	1	2
2	2,5	2	0,8
3	4,6	3	0,652
4	5,5	4	0,727
5	6	5	0,833
6	6,1	6	0,983
7	6,2	7	1,12

Для получения линейной функции

$U_2(F)$ необходимо выполнить условие $k(F) \cdot k_k(U_1) = const$ или

$$k_k(U_1) = \frac{A}{k(F)}$$

где A - заданное число.

Метод 2. Линеаризация за счёт суммирования U_1 и U_{1k} . (рис.5).

Для суммирующего усилителя примем $k_{\Sigma} = 1$ $U_2 = U_1 + U_{1k}$ По данным табл.3 определим характеристику КЗ (рис.6).

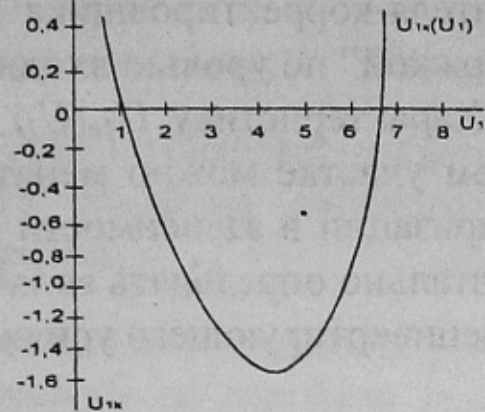
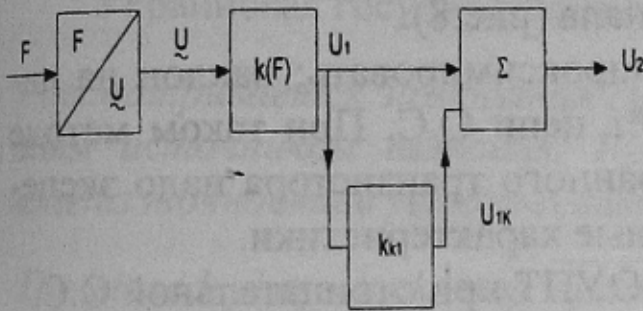


Рисунок 5.- Структурная схема корректировки выходной величины за счёт суммирования U_1 и U_{1k}

Рисунок 6.- Характеристика КЗ: $U_{1k}(U_1)$ для схемы с суммированием

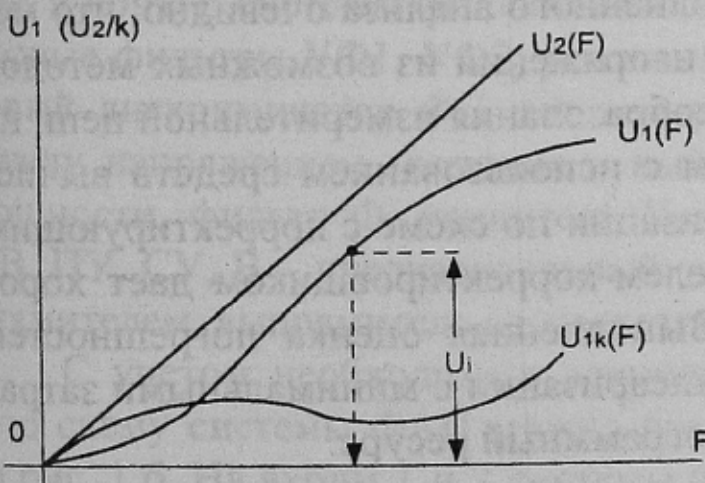
Таблица 3 Определение U_{1k}

U_2	U_1	$U_{1k} = U_2 - U_1$
0,5	1	0,5
2,5	2	-0,5
4,6	3	-1,6
5,5	4	-1,5
6	5	-1
6,1	6	0,1
6,2	7	0,12

Из приведенного примера очевидно, что

при малой крутизне $\frac{\partial U_1}{\partial F}$ необходимо добавлять, при большой крутизне $\frac{\partial U_1}{\partial F}$ - вычитать корректирующее значение относительно выходной величины.

Рассмотрим вариант коррекции с суммированием напряжений



выходной $U_1(F)$ и требуемой (линейной) $U_2(F)$ характеристик (рис. 7):

$$U_2 = U_1 + U_{1k} \quad U_{1k} = U_2 - U_1$$

По характеристикам $U_2(F)$ и $U_1(F)$ определяется характеристика КЗ $U_{1k}(U_1)$.

Если k_{Σ} не равен 1 при построении требуемой (линейной) характеристики,

$$\text{принимаем } U_2' = \frac{U_2}{k_{\Sigma}}$$

Рисунок 7.- Определение требуемой корректирующей характеристики

Метод 3 Линеаризация по схеме с корректирующим усилителем и отдельным усилителем-корректировщиком. Для суммирующего усилителя коэффициент передачи принимаем равным 1. В качестве усилителя-корректировщика может быть использован усилитель с "задержкой" по уровню входного сигнала (рис.8).

Характеристику $U_{1к}(U_1)$ надо аппроксимировать: наклон на линейном участке можно менять за счёт цепи О.С. При таком методе линеаризации в зависимости от выбранного транзистора надо экспериментально определять вольт-амперные характеристики. Для неинвертирующего усилителя на ОУПТ при отрицательной О.С.

$$k = \frac{k_{\alpha}}{1 + \beta k_{\alpha}}; \quad \beta(U_1) = \frac{1}{A \cdot k_k \cdot (U_1)'} ,$$

где $\beta(U_1)$ - требуемое значение для линеаризации характеристик.

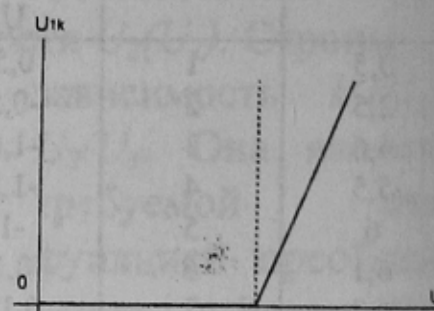
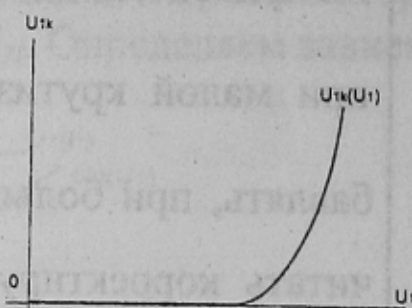
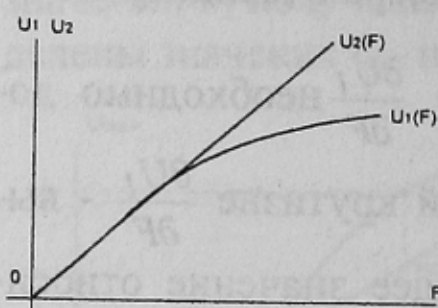


Рисунок 8.-Линеаризация с использованием усилителя с зоной нечувствительности

Рисунок 9.- Аппроксимация $U_{1к}(U_1)$

Выводы. На основании выполненного анализа очевидно, что метод коррекции с суммированием напряжений из возможных методов линеаризации характеристики преобразования измерительной цепи на основе МПП реально осуществим с использованием средств вычислительной техники, метод линеаризации по схеме с корректирующим усилителем и отдельным усилителем-корректировщиком дает хорошие практические результаты. Выполненная оценка погрешностей МПП позволяет выбрать метод линеаризации с минимальными затратами на аппаратные средства и программный ресурс.

Список источников.

1. Э. Бауманн. Измерение сил электрическими методами. М.: "Мир" 1978г.