

## ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Л. Я. ЗИННЕР, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Для изучения влияния механических факторов на коммутацию коллекторных машин в настоящее время разработан ряд приборов, использующих тот или иной метод. Нами ранее предлагался профилометр, использующий метод амплитудной модуляции [1, 2]). В качестве чувствительных к малым перемещениям элементов использовались токовихревой и емкостный датчики с мостовым и трансформаторным включением в измерительную цепь.

В случае трансформаторного включения выходной величиной датчика является э. д. с. измерительной обмотки, при этом измерительная схема реагирует на один из параметров э. д. с., которым может быть амплитуда, фаза, действительная и мнимая составляющие. Токовихревой датчик обеспечивает наибольшую чувствительность к малым нарушениям поверхности коллектора при настройке в резонанс на частоту генератора. В этом случае измерительная схема реагирует как на изменение э. д. с. сигнальной обмотки, так и на изменение импеданса и добротности ее.

Профилометр с трансформаторным включением токовихревого датчика, обеспечивая высокую чувствительность, страдает рядом существенных недостатков. Это, прежде всего, необходимость обеспечить высокую стабильность тока задающего генератора и линеаризацию характеристики преобразования датчика, что приводит к увеличению схемной погрешности.

Профилометр с мостовым включением емкостного датчика [2] во многом свободен от недостатков, присущих вышеописанному.

Последнее заключается в том, что профилометр с емкостным датчиком обеспечивает большую надежность, более высокую разрешающую способность и меньшую схемную погрешность. Испытания, проведенные на заводе «Электромашина», показали, что профилометр с емкостным датчиком удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к измерителям малых перемещений. Однако, несмотря на высокие эксплуатационные качества, данный прибор также не свободен от недостатков, заложенных в самом методе измерения амплитуды, так как контроль по амплитуде не обеспечивает необходимой точности при непрерывных измерениях из-за действия дестабилизирующих факторов, кроме того, измерение амплитуды трудно производить с достаточной точностью.

На практике обычно измерения производятся по частоте, так как стабильность частоты даже при параметрической стабилизации значительно выше стабильности по амплитуде, и, следовательно, измерения частоты обеспечивают большую точность.

Учитывая вышеизложенное, нами разработан профилометр, основанный на измерении частоты генератора при изменении одного из параметров сеточного контура  $L$  или  $C$ . В качестве преобразователя используется однообмоточный токовихревой и емкостный датчик с охраным кольцом.

Следует указать, что в настоящее время уже имеется прибор для измерения нарушений поверхности коллектора, использующий метод измерения девиации частоты [3]. Однако описанный прибор страдает одним важным недостатком, заключающимся в наличии только одного измерительного генератора, что приводит к нестабильности во времени частоты. Уход частоты в основном определяется температурной нестабильностью элементов контуров генератора и нестабильностью источника питания, что особенно важно в данном случае, когда емкость датчика составляет несколько единиц, а измеряемые отклонения емкости сотые и тысячные доли пикофарад.

С целью уменьшения погрешности, обусловленной уходом частоты измерительного генератора, нами использована схема на биениях (рис. 1), где принцип сравнения осуществляется не в контуре, содержащем датчик, а в самой измерительной схеме.

В применении к емкостному и индуктивному датчикам метод основан на сравнении частот измерительного и опорного генераторов.

Непосредственно измерительная схема состоит: из опорного генератора  $L_2$  (6С4П), работающего на частоте  $f_1$ ; измерительного генератора  $L_1$  (6С4П) с частотой  $f_2$ , изменяющейся в функции измеряемого перемещения; двух катодных повторителей  $L_3, L_4$  (6Ж1П); смесителя  $L_5$  (6И1П), в анодном контуре которого выделяется промежуточная частота; усилителя-ограничителя промежуточной частоты ( $L_6$  (6Ж1П); ограничителя  $L_7$  (6Ж1П); дискриминатора  $L_8$  (6Х2П и двух каскадов видеоусилителя  $L_{9,10}$  (6Н1П).

Для установления рабочей точки дискриминатора и начального зазора датчика в схему профилометра введен ламповый милливольтметр  $L_{14}$  (6Н1П), снабженный микроамперметром М-24.

Одновременно милливольтметр служит для измерения общего боя коллектора в статике.

Питание профилометра осуществляется от электронного стабилизатора напряжения, собранного на лампах  $L_{11}$  (6НЗ),  $L_{12}$  (6Ж1П),  $L_{13}$  (СГ-4С).

С целью стабилизации накалов ламп и емкости катод — нить накала в цепи накала введены дроссели 5  $\mu\text{кгн}$  и емкости 1500  $\text{пф}$ .

Вышеперечисленные мероприятия позволили свести к минимуму схемную погрешность.

Относительная погрешность измерения емкости и индуктивности датчиков равна удвоенной погрешности определения частоты:

$$\begin{aligned} \frac{dC}{C} &= -2 \frac{df}{f}, \\ \frac{dL}{L} &= -2 \frac{df}{f}. \end{aligned} \tag{1}$$

При работе на частоте 105  $\text{мг}$ , как это имеет место в данном приборе,  $\frac{df}{f}$  весьма мало, чувствительность к изменению зазора велика, а относительная погрешность может быть доведена до тысячных долей процента.

На практике обычно прибегают к кварцеванию опорного генератора, что не исключает влияния всех дестабилизирующих факторов на частоту измерительного генератора.

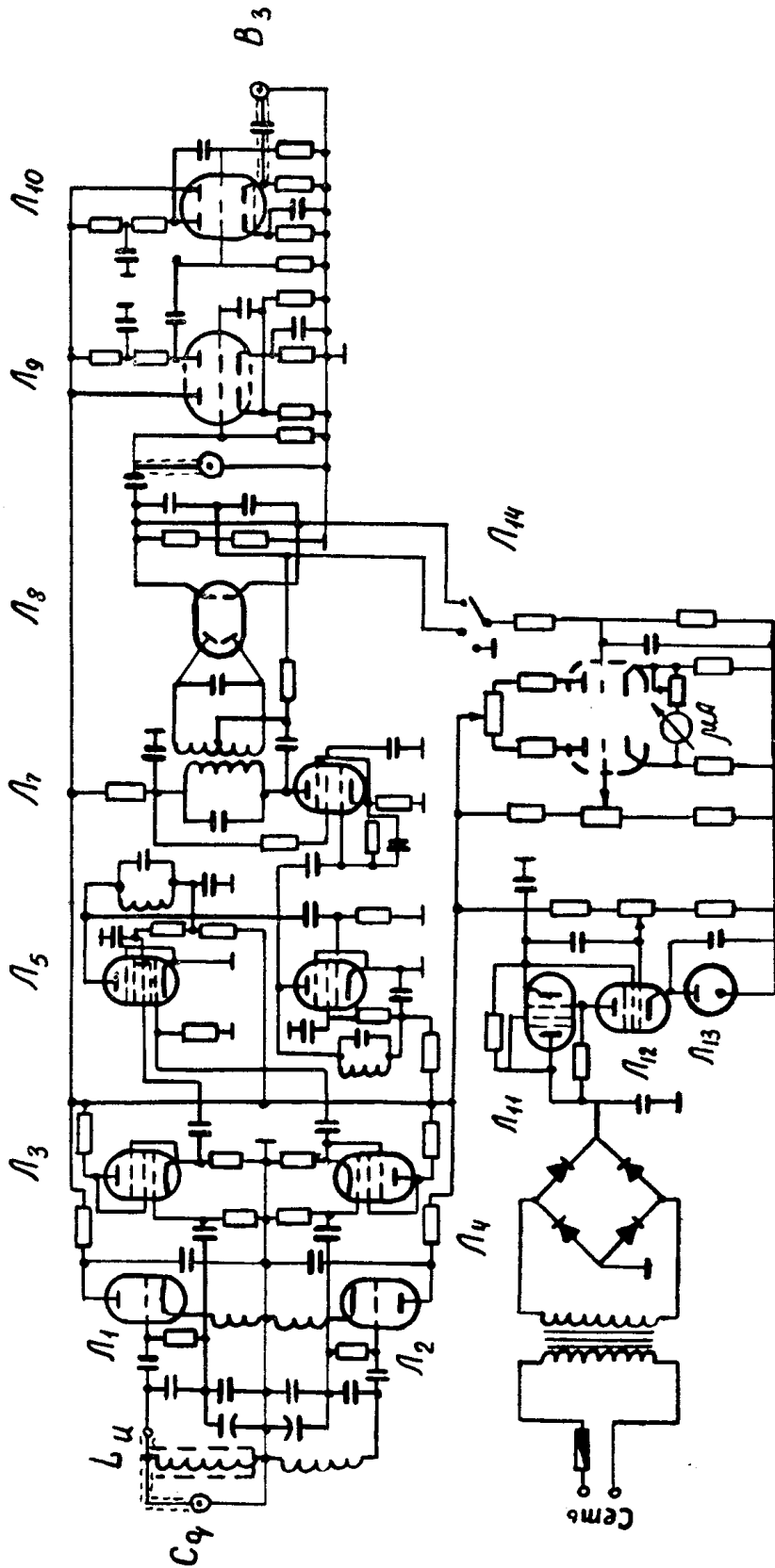


Рис. 1. Принципиальная схема измерителя малых перемещений.

На наш взгляд, более эффективно применение двух генераторов — измерительного и опорного, идентичных по схеме исполнения, монтажу и использованным деталям, благодаря чему компенсируется изменение частоты, вызванное дестабилизирующими факторами. В качестве индикатора изменения частоты при изменении малых перемещений в схеме используется частотный дискриминатор с парой индуктивно связанных контуров  $L_3(6X2П)$ , дающего на выходе напряжение, пропорциональное уходу частоты от резонансной.

$$U_{\text{вых}} = k(f - f_{\text{рез}}). \quad (2)$$

Контур дискриминатора настроен на промежуточную частоту 500 кГц и индуктивно связан с контуром ограничителя  $L_7(6Ж1П)$ .

$$U_{\text{вых}} = U_0 \cos \theta \Psi(a), \quad (3)$$

где  $U_0$  — напряжение на контуре ограничителя,

$\theta$  — угол отсечки диодного детектора,

$\Psi(a)$  — функция, зависящая от параметров связанных контуров.

Из (3) вытекает необходимость ввести в схему ограничитель, так как выходное напряжение дискриминатора зависит не только от ухода частоты, но и от напряжения на контуре.

Чувствительность схемы к изменению емкости или индуктивности датчика определяется крутизной характеристики дискриминатора, которая повышается с увеличением резонансной частоты.

Однако при выборе резонансной частоты необходимо учитывать тот факт, что с ее повышением уменьшается диапазон измеряемых перемещений.

Зависимость выходного напряжения для данной схемы от изменения емкости и индуктивности датчиков при изменении зазора определяется подстановкой в (2) выражения для  $f$  через параметры контура;

$$U_{\text{вых}} = \frac{k}{V L_{\text{рез}}} \left( \frac{1}{V C_{\text{рез}}} - \frac{1}{V C_{\text{рез}} + \Delta C} \right); \quad (4)$$

$$U_{\text{вых}} = \frac{k}{V C_{\text{рез}}} \left( \frac{1}{V L_{\text{рез}}} - \frac{1}{V L_{\text{рез}} + \Delta L} \right), \quad (5)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности,

$L_{\text{рез}}, C_{\text{рез}}$  — резонансные значения параметров контура в мкГн и пФ.

$\Delta L, \Delta C$  — приращения емкости и индуктивности датчиков при изменении зазора.

Для (4), выразив  $\Delta C$  через изменение зазора между коллекторами и обкладкой датчика, имеем

$$U_{\text{вых}} = \frac{k}{V L_{\text{рез}} C_{\text{рез}}} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{h}{d - \delta}}} \right), \quad (6)$$

где  $d$  — начальный зазор в м,

$h$  — изменение зазора в м.

Для случая, когда используется токовихревой датчик, получение выражения, описывающего зависимость  $U_{\text{вых}}$  в функции от измеряемого зазора, связано со значительными трудностями, тем более, что используется датчик с ферритовым сердечником. Имеющиеся в настоящее время работы [4, 5, 6, 7] дают решение поля накладного датчика в общем виде и не позволяют выбрать оптимальные размеры датчика и параметры питания с целью обеспечения максимальной чувствительности к измеряемому параметру.

В случае использования датчика с магнитным экраном и феррито-

вым концентратором решение вносимого импеданса связано с непреодолимыми математическими трудностями, что приводит к необходимости в каждом конкретном случае опытным путем выбрать параметры датчика и питания для достижения максимальной чувствительности.

Для качественного представления зависимости  $U_{\text{вых}}$  от девиации частоты возьмем простейший случай, когда датчик представляет собой маловитковую катушку конечных размеров.

Для этого случая индуктивность датчика в воздухе может быть определена как

$$L_0 = \pi \mu_0 n^2 \frac{D}{l} k_A \dots, \quad (7)$$

где  $\mu_0$  — магнитная проницаемость вакуума,

$n$  — количество витков обмотки датчика,

$D$  — диаметр датчика,  $m$ ,

$l$  — высота намотки,  $m$ ,

$k_A$  — коэффициент, который находится по табл. 6—2 [8].

Внесенный импеданс при установке датчика над контролируемой поверхностью определим из выражения для внесенной э.д.с. [4]:

$$Z_{\text{вн}} = - \frac{E_{\text{вн}}}{I_1} = j\omega \mu_0 n^2 D e^{-6 \frac{h}{D}} F_1(\beta_0), \quad (8)$$

где  $h$  — зазор между датчиком и контролируемой поверхностью,  $m$ ,

$$jF_1(\beta_0) = \frac{1}{2\beta_0^2 + j + 2\beta_0 \sqrt{\beta_0^2 + j}} \quad (9)$$

— функция, несущая информацию о свойствах материала контролируемой поверхности;

$$\beta_0 = \frac{3}{D \sqrt{\omega \mu_0 \delta}} \quad \text{— обобщенный параметр;}$$

$\delta$  — электропроводность материала поверхности.

Как показано Шкарлетом [4], функция  $\delta F_1(\beta_0)$  с погрешностью 5% может быть аппроксимирована экспонентой вида

$$jF_1(\beta_0) = 1,55\beta_0 e^{-2\beta_0} - j e^{-2\beta_0}. \quad (10)$$

После подстановки (10) в (8) и некоторых преобразований получим выражение для вносимой индуктивности:

$$L_{\text{вн}} = \mu_0 n^2 D e^{-\left(6 \frac{h}{D} + 2\beta_0\right)}. \quad (11)$$

Считая, что выходное напряжение дискриминатора равно нулю при удалении датчика от проводящей поверхности, резонансная частота генератора определится из выражения

$$f_2 = \frac{1}{1,77 n D \sqrt{\frac{\mu_0}{l} k_A C_{\text{рез}}}}. \quad (12)$$

При установке датчика над проводящей поверхностью новое значение индуктивности датчика будет

$$L = \mu_0 n^2 D \left[ \frac{k_A}{l} D - e^{-\left(6 \frac{h}{D} + 2\beta_0\right)} \right] \quad (13)$$

и новое значение частоты генератора

$$f_2' = \frac{1}{\sqrt{C_{\text{рез}} \left[ \mu_0 \frac{\pi k_A}{l} - \frac{1}{D} \mu_0 e^{-\left(6 \frac{h}{D} + 2\beta_0\right)} \right]}}. \quad (14)$$

Исходя из (12) и (14), найдем выражение, описывающее зависимость  $U_{\text{вых}}$  от изменения параметров датчика:

$$U_{\text{вых}} = \frac{k}{1,77D} \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \frac{k_A}{l} C_{\text{рез}}}} \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\pi D k_A} e^{-\left(6 \frac{h}{D} + 2\beta_0\right)}}} \right]. \quad (15)$$

Чувствительность схемы к изменению расстояния от проводящей поверхности до емкостного и индуктивного датчиков определим как

$$S_c = \frac{d}{d-h} \cdot \frac{k}{\sqrt{L_{\text{рез}} C_{\text{рез}} \frac{(d-2h)^3}{d-h}}}, \quad (16)$$

$$S_L = \frac{31 k e^{-\left(6 \frac{h}{D} + 2\beta_0\right)}}{k_1 \left[ 1 - \frac{1}{\pi D k_A} e^{-\left(6 \frac{h}{D} + 2\beta_0\right)} \right]^{3/2}}, \quad (17)$$

где

$$k_1 = 1,77 k_A D^3 n \sqrt{\mu_0 \frac{k_A}{l} C_{\text{рез}}}. \quad (18)$$

Таким образом, из выражений для чувствительности и  $U_{\text{вых}}$  токовихревого датчика видно, что на величину ее влияют как изменение зазора  $h$ , так и изменение электропроводности материала. Однако, считая неоднородность материалов коллектора незначительной, тем более, что на рабочей частоте 10 мГц чувствительность схемы к изменению электропроводности пренебрежимо мала, можно ограничиться рассмотрением влияния на  $U_{\text{вых}}$  и  $S_L$  диаметра катушки датчика, количества витков и зазора.

Увеличение чувствительности за счет увеличения диаметра катушки датчика не представляется возможным, так как это противоречит необходимости обеспечения высокой разрешающей способности по ширине ламели коллектора. Изменение витков датчика также ограничивается выбором рабочей частоты и отстройкой от влияния электропроводности.

Таким образом, на величину  $U_{\text{вых}}$  в разработанном измерителе перемещений влияет только изменение расстояния от коллектора до датчика, определяющее, в свою очередь, и чувствительность схемы. Следует также отметить, что, хотя изменение индуктивности датчика с изменением зазора происходит по экспоненте, всегда можно выбрать участок характеристики датчика, где зависимость  $U_{\text{вых}}$  от зазора будет практически линейной.

Необходимая разрешающая способность для различения отдельных коллекторных пластин достигается экранировкой токовихревого датчика и использованием ферритового концентратора для локализации электромагнитного поля. В случае использования емкостного датчика последний изготавливается с охранным кольцом, что позволяет устранить краевой эффект и тем самым обеспечить необходимую разрешающую способность.

На рис. 2 приведена зависимость  $U_{\text{вых}}$  от изменения зазора между коллектором и емкостным датчиком для установочного зазора 310 мк.

При этом на зазоре 370 мк  $U_{\text{вых}}$  равно нулю и дальнейшее увеличение зазора связано с изменением полярности выходного сигнала. Как видно из рис. 2, разработанный прибор обеспечивает хорошую линейность характеристики преобразования и постоянную высокую чувствительность 10 мВ/мк в диапазоне ожидаемых изменений поверхности коллектора.

На рис. 3 приведена развертка профиля коллектора машины П-42, снятая с помощью вышеописанного профилометра. Из рис. 3 видно, что профилометр обеспечивает хорошую разрешающую способность и дает возможность различить относительное выступание как группы пластин, так и двух рядом лежащих пластин. При необходимости увеличить разрешающую способность прибора обкладка емкостного датчика может быть сведена к точечному щупу.

Таким образом, обобщая вышеизложенное, можно сказать, что разработанный авторами профилометр во многом свободен от недостатков ранее предлагавшихся профилометров и обладает высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

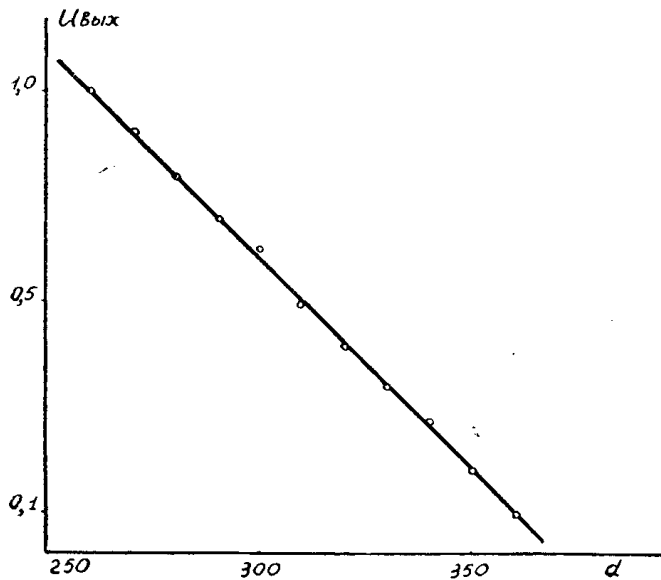


Рис. 2. Зависимость  $U_{\text{вых}}$  от зазора.

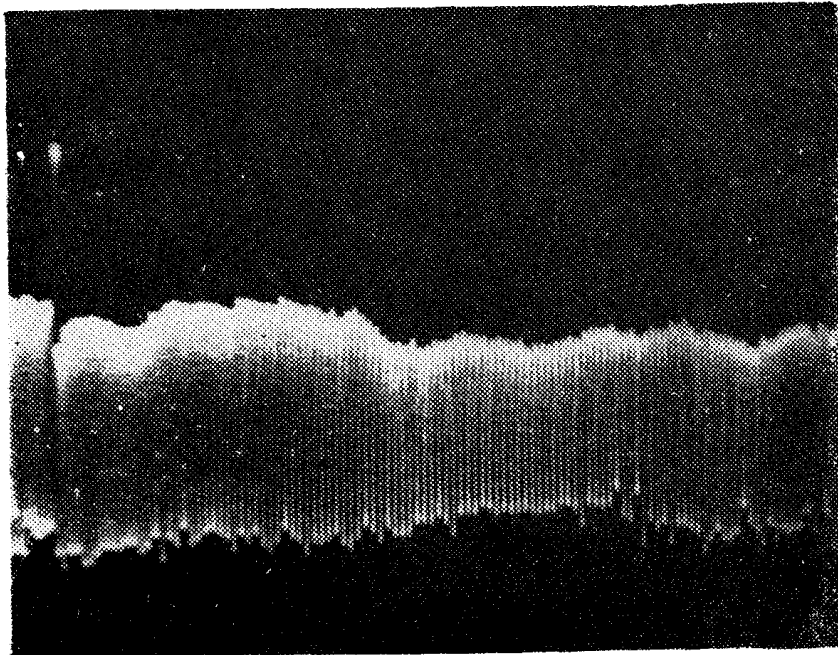


Рис. 3. Профилограмма коллектора машины П-42.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Скороспешкин, Л. Я. Зиннер, А. И. Прошин. Прибор для исследования механических факторов в коллекторных электрических машинах. Известия ТПИ, том 160, 1967.
2. Л. Я. Зиннер, А. И. Скороспешкин. Мостовой прибор для исследования динамики коллекторов электрических машин. Известия ТПИ, том 160, 1966.
3. К. К. Намитов, В. Ф. Чепура, В. Г. Брезинский. Прибор для исследования динамических изменений формы поверхности коллекторов электрических машин. Электромеханика, № 1, 1966.
4. Ю. М. Шкарлет. Неразрушающие методы контроля материалов и изделий. Оптиприбор, 1964.
5. В. В. Ключев. Некоторые вопросы расчета высокочастотных накладных датчиков вихревого тока. Дефектоскопия, № 4, 1966.
6. И. И. Кифер, В. С. Фастрицкий. О выборе режимов работы накладного датчика, расположенного над ферромагнитным полупространством. Дефектоскопия, № 4, 1966.
7. В. С. Соболев. О выборе параметров датчиков для бесконтактных измерений электропроводности материалов методом вихревых токов. Измерительная техника, № 3, 1964.
8. П. Л. Камантаров, Л. А. Цейтлин. Расчет индуктивностей. Госэнергоиздат, 1955.