

МОСТОВОЙ ПРИБОР ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ КОЛЛЕКТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Л. Я. ЗИННЕР, А. И. СКОРОСПЕШКИН

(Рекомендована семинаром кафедры электрических машин
и общей электротехники)

К настоящему времени для исследования влияния механических факторов на работу коллекторных электрических машин разработан ряд профилометров, использующих тот или иной метод измерения.

Наиболее удачные схемы разработанных профилометров [1, 2] работают на принципе измерения частоты резонансного контура. В качестве датчика используется один из элементов контура L и C . Возможны и другие схемы, не имеющие, однако, принципиального отличия [3].

Общим для всех этих разработок является то, что они, обладая хорошей чувствительностью, дают значительную погрешность при измерениях малых перемещений и неповторяемость результатов от опыта к опыту. Это объясняется, прежде всего, наличием в колебательном контуре таких нелинейных элементов, как радиолампа и полупроводник, параметры которых зависят от таких факторов, как старение, температурная зависимость, разброс характеристик, нестабильность источника питания. Однако принципиально возможно свести к минимуму указанные погрешности путем усложнения измерительных схем, введением глубоких обратных связей и повышением стабильности источников питания. С другой стороны, усложнение прибора влечет за собой уменьшение его надежности и требует специальных знаний при обслуживании.

Следовательно, необходим такой прибор, который был бы свободен от недостатков, присущих ранее разработанным, обеспечивал достаточную чувствительность к изменению измеряемого параметра и был нечувствителен к внешним полям и паразитным связям.

Таким требованиям на первый взгляд лучше всего отвечают мосты переменного тока, имеющие значительные преимущества перед другими. Это, прежде всего, простота настройки, отсутствие нелинейных элементов, простота измерительных схем, нечувствительность к нестабильности частоты питающего генератора и стабильности источника питания. Однако существенным недостатком обычных мостов переменного тока является их чувствительность к внешним полям и паразитным емкостным связям, особенно резко проявляющимся при работе на высоких частотах.

Защита мостов от паразитных внешних связей представляет собой достаточно сложную задачу и влечет за собой значительное увеличение габаритов прибора, что не всегда желательно [4].

Для облегчения условий защиты целесообразным является ис-

пользование в качестве измерительной ячейки моста с тесной индуктивной связью, который одновременно имеет более высокую чувствительность по сравнению с обычными мостами переменного тока.

Одним из элементов расчета мостовой схемы является определение ее относительной чувствительности. Этому вопросу посвящен ряд работ [5, 6, 7], однако, все они рассматривают общий случай измерения комплексного сопротивления и тангенса угла потерь конденсаторов.

Исходя из вышеизложенного, авторами был произведен анализ трех возможных схем измерительной ячейки, создан и экспериментально опробован опытный образец мостовой измерительной ячейки с емкостным датчиком малых перемещений.

В данной работе приводятся основные расчетные формулы для мостовых измерительных ячеек, блок-схема и краткое описание мостового профилометра, а также некоторые результаты его испытаний.

Рассматриваемые возможные схемы исполнения измерительной ячейки изображены на рис. 1.

На рис. 1 а, б измеряемое сопротивление Z_1 и образцовое Z_2 соединены последовательно с обмотками L_1 и L_2 .

Измеряемая емкость C_d рис. 1 в включена в параллель с емкостью C и сопротивлением R . В схемах рис. 1 б, в R — чисто активное сопротивление, служащее для точной балансировки моста, облегчения условий защиты моста от попадания пульсирующего напряжения с коллектора в измерительную цепь и, как будет показано в дальнейшем, способствующее увеличению чувствительности моста.

Генератор напряжения питания включен в диагональ ab моста и указатель к обмотке L_3 .

Для упрощения расчета приняты следующие допущения: паразитные емкостные связи отсутствуют, активные сопротивления обмоток равны нулю и коэффициент связи между обмотками $K=1$.

Последнее тем более справедливо, если при изготовлении обмоток применены бифилярный способ намотки и сердечник трансформатора выполнен из ферритового тороида с большой магнитной проницаемостью.

Для определения $U_{\text{вых}}$, считая, что входное сопротивление указателя $Z_{\text{вых}} = \infty$ и внутреннее сопротивление генератора равно нулю, составим уравнения Кирхгофа, для контурных токов схемы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_1 (Z_1 + j\omega L_1) - \dot{I}_2 j\omega \sqrt{L_1 L_2} &= \dot{U}_r, \\ -\dot{I}_1 j\omega \sqrt{L_1 L_2} + \dot{I}_2 (Z_2 + j\omega L_2) &= \dot{U}_r. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Очевидно, что эта система уравнений справедлива для всех трех схем рис. 1.

Совместное решение этих уравнений дает выражение для определения контурных токов.

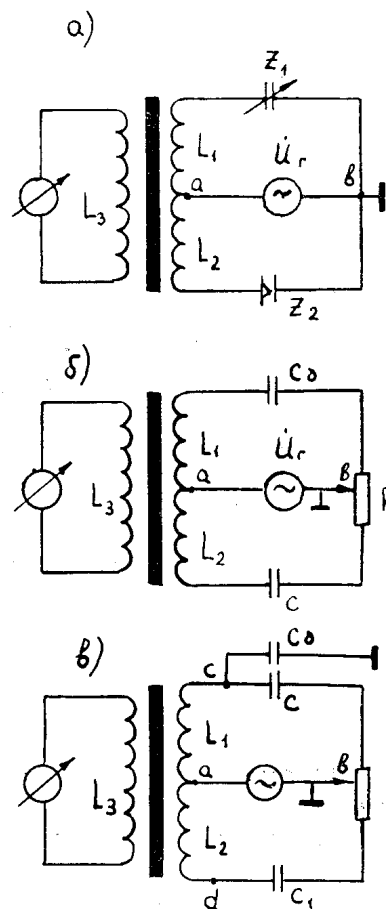


Рис. 1. Схема измерительных ячеек.

$$i_1 = \dot{U}_r \cdot \frac{Z_2 + j\omega L_2 + j\omega \sqrt{L_1 L_2}}{Z_1 Z_2 + j\omega (Z_1 L_2 + Z_2 L_1)}, \quad (2)$$

$$i_2 = \dot{U}_r \cdot \frac{Z_1 + j\omega L_1 + j\omega \sqrt{L_1 L_2}}{Z_1 Z_2 + j\omega (Z_1 L_2 + Z_2 L_1)}. \quad (3)$$

Найдем выходное напряжение мостовой схемы для случая, когда входное сопротивление указателя бесконечно велико и он подключен к указательной обмотке L_3 . В этом случае

$$U_{\text{вых}} = i_1 j\omega \sqrt{L_1 L_3} - i_2 j\omega \sqrt{L_2 L_3}. \quad (4)$$

Подставив в выражение (4) значения i_1 и i_2 , получим:

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_r \cdot \frac{j\omega (Z_2 \sqrt{L_1 L_3} - Z_1 \sqrt{L_2 L_3})}{Z_1 Z_2 + j\omega (Z_1 L_2 + Z_2 L_1)}. \quad (5)$$

В случае симметричного трансформатора с тесной индуктивной связью между плечами отношения $L_1 = L_2 = L$. Выражение для $\dot{U}_{\text{вых}}$ примет вид:

$$U_{\text{вых}} = U_r \cdot \frac{\sqrt{L_3} (Z_2 - Z_1)}{\left(Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{j\omega L} \right) \cdot \sqrt{2}}. \quad (6)$$

Очевидно, что при неизменном значении индуктивностей первичной и вторичной обмоток трансформатора отношение $\frac{\sqrt{L_3}}{\sqrt{L}}$ можно заменить отношением количества витков

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_r \cdot \frac{n_3 \left(1 - \frac{Z_1}{Z_2} \right)}{n \left(1 + \frac{Z_1}{Z_2} + \frac{Z_1}{j\omega L} \right)}. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива для всех трех разновидностей измерительных ячеек. Для схемы рис. 1, а предполагается, что сопротивления Z_1 и Z_2 имеют чисто емкостный характер

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_d}, \quad Z_2 = \frac{1}{j\omega C}, \quad \text{где} \quad (8)$$

$$C_d = \frac{S\epsilon_0}{d} \text{ — емкость датчика,}$$

S — площадь обкладки датчика,

d — расстояние между обкладкой датчика и поверхностью коллектора,

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная воздуха.

После подстановки значений Z_1 и Z_2 в (7) и некоторых преобразований зависимость $U_{\text{вых}}$ от параметров схемы выразится формулой

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_r \cdot \frac{n_3}{n} \cdot \frac{1 - \frac{C}{C_d}}{1 + \frac{C}{C_d} - \frac{1}{\omega^2 L C_d}}. \quad (9)$$

Уравновешивание такого моста может осуществляться двумя способами:

- 1) регулировкой переменной емкости в плече сравнения;
- 2) регулировкой числа витков обмотки трансформатора в плече сравнения.

Уравновешивание моста по второму способу, являясь удобным, имеет существенный недостаток, заключающийся в понижении чувствительности. Это легко показать, воспользовавшись выражением для относительной чувствительности моста к изменению емкости [5].

$$S_c = \frac{2}{(p+1) \sqrt{\left[1 - \frac{1}{(p+1)\omega^2 LC}\right]^2 + \left[\frac{1}{Q} - \frac{2\omega L(p-1)}{Z_u} + \frac{2}{\omega CZ_u}\right]^2}} \quad (10),$$

где P — отношение плеч,

Q — добротность системы,

Z_u — внутреннее сопротивление указателя.

В случае, когда $P=1$, чувствительность моста максимальна.

И тем не менее следует отметить, что уравновешивание моста изменением количества витков целесообразно в тех случаях, когда возникает необходимость в расширении пределов регулирования.

Учитывая ранее принятые допущения, получим выражение для относительной чувствительности моста к изменению емкости:

$$S_c = \frac{1}{1 - \frac{1}{2\omega^2 LC}} \quad (11)$$

Из (11) видно, что при определенных значениях ω , L и C знаменатель может стать равным нулю, а S_c — бесконечности.

Таким образом, выбор оптимальных значений ω , L и C может обеспечить высокую чувствительность мостовой схемы при хорошей линейности шкалы в заданном диапазоне изменения емкости датчика.

Абсолютная чувствительность моста к изменению измеряемого зазора, пересчитанная на 1 вольт напряжения питания, может быть выражена согласно [8]

$$S_d^{U_{\text{вых}}} = \frac{1}{U_r} \cdot \frac{d(U_{\text{вых}})}{d(d)}.$$

Подставив в (9) значение емкости датчика из (8), имеем для $\dot{U}_{\text{вых}}$ и S

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_r \frac{n_3}{n} \cdot \frac{S - Cd}{S + Cd - \frac{d}{\omega^2 L}}; \quad (12)$$

$$S_d^{U_{\text{вых}}} = \frac{n_3}{n} \cdot \frac{S - 2SC\omega^2 L}{\omega^2 L \left(S + Cd - \frac{d}{\omega^2 L}\right)^2}. \quad (13)$$

При малых значениях измеряемых перемещений значение емкости C составляет единицы пикфарад, значение L — единицы мГн, при этом резонансная частота моста составляет 1,5—2 мГц. Мост обеспечивает лучшую линейную зависимость S от изменения зазора, одновременно удовлетворяя требованию высокой чувствительности к малым изменениям зазора, при работе в дорезонансной области.

Исходя из вышеизложенного, можно без заметных погрешностей пренебречь членами $2SC\omega^2 L$ и Cd вследствие их малости, и выражение для абсолютной чувствительности моста примет удобный для практических расчетов вид:

$$S_d^{U_{\text{вых}}} = \frac{n_3}{n} \cdot \frac{S}{d^2} \cdot \omega^2 L. \quad (14)$$

Расчетные формулы для моста типа (рис. 1. б) выводятся аналогичным образом.

Для упрощения расчета считаем, что доли активного сопротивления в сравниваемых плечах равны, и мост разбалансирован ($C \neq C_d$). Тогда зависимость $U_{\text{вых}}$ моста от его параметров выражается формулой

$$\dot{U}_{\text{вых}} = \dot{U}_r \frac{n_3}{n} \frac{1 + \frac{C}{C_d}}{1 + \frac{C}{C_d} + \frac{(Rj\omega C_d - 2) \cdot (Rj\omega C - 2)}{4\omega^2 L C_d}} \quad (15)$$

При уравнивании моста регулировкой R абсолютная чувствительность к изменению R выражается формулой

$$S_R^{U_{\text{вых}}} = \frac{n_3}{2n} \cdot R \omega^2 \frac{C^2}{C_d} \quad (16)$$

Как видно из (16), абсолютная чувствительность моста типа (рис. 1, б) имеет линейную зависимость от R , а в случае уравнивания моста изменением емкости в плече сравнения, как легко показать, абсолютная чувствительность нелинейно зависит от величины уравнивающей емкости.

Исходя из этого, предпочтительнее балансировка измерительной ячейки с помощью активного сопротивления, что позволяет просто учитывать изменение чувствительности схемы при переходе с одного предела измерений на другой.

Зависимость чувствительности моста от величины установочного зазора выражается формулой

$$S_d^{U_{\text{вых}}} = \frac{n_3}{n} \cdot \frac{S}{d^2} \cdot \left(\frac{CS}{d} - R^2 \omega^2 C^2 \frac{1}{d} - 4 \right) \omega^2 L \quad (17)$$

Учитывая, что первые два слагаемых в скобках очень незначительно влияют на значение абсолютной чувствительности моста вследствие их малости, выражение для S_d определится как

$$S_d^{U_{\text{вых}}} = \frac{n_3}{n} \cdot \frac{S}{d^2} \cdot \omega^2 L \quad (18)$$

Зависимости $\dot{U}_{\text{вых}}$, $S_R^{U_{\text{вых}}}$ и $S_d^{U_{\text{вых}}}$ для моста типа (рис. 1, в) от его параметров выражаются формулами

$$U_{\text{вых}} = U_r \frac{n_3}{n} \frac{Rj\omega^2 C_1 (C_d - C) + 2\omega (C_1 + C - C_d)}{Rj\omega^2 C_1 (C_d - C) + 2\omega (C_1 - C - C_d) + \frac{R\omega C_1}{j\omega L}}; \quad (19)$$

$$S_R^{U_{\text{вых}}} = \frac{8n_3}{n} \omega^2 L \left(2\omega C - 1 + \frac{1}{2} \frac{C_d}{C} \right); \quad (20)$$

$$S_d^{U_{\text{вых}}} = \frac{1}{2} \frac{n_3}{n} \omega^4 L \frac{S}{d^2} \left[R^2 C^2 + 4 - 8C(L + 1) \right]. \quad (21)$$

Таким образом, независимо от схемы моста и способа уравнивания, чувствительность его к малым перемещениям зависит от соотношения количества витков первичной и вторичной обмоток трансформатора, емкости конденсатора в плече сравнения, угловой частоты и начального установочного зазора.

Из выражений (14) и (17) видно, что мосты типа (рис. 1 а, б) обеспечивают высокую чувствительность к малым перемещениям, однако эти схемы имеют и существенный недостаток. Этим недостатком, ограничивающим возможность их применения в качестве измерительной ячейки при контроле коллекторов электрических машин, является то обстоятельство, что возникают трудности, связанные с необходимостью развязать мост от высокочастотных пульсаций напряжения на переходе щетка-коллектор. Мост (рис. 1 в) в какой-то мере свободен от этого недостатка благодаря использованию высокоомного сопротивления R , отсутствию непосредственного электрического контакта с контролируемым коллектором и, кроме того, он имеет более высокую чувствительность к малым перемещениям. Следует отметить еще одно исключительно важное преимущество моста рис. 1, в перед двумя первыми, заключающееся в том, что он дает возможность одновременно использовать два идентичных датчика, включаемых в противоположные плечи моста, что позволяет проводить раздельное исследование целого ряда взаимосвязанных процессов. Это можно показать на следующем примере. В работающей электрической машине поверхность коллектора характеризуется такими составляющими, как дебаланс якоря, эксцентриситет коллектора, овальность коллектора и, наконец, упругая и неупругая деформация за счет механических усилий при работе на повышенных оборотах. При наличии двух датчиков удастся скомпенсировать влияние эксцентриситета, дебаланса, овальности и получить профилограмму микрорельефа коллектора в чистом виде.

Исходя из вышеизложенного, для выявления возможности использования моста с тесной индуктивной связью изготовлен и экспериментально опробован емкостный профилометр с измерительной ячейкой по схеме рис. 1, в. Блок-схема профилометра приведена на рис. 2.

Параметры измерительной ячейки следующие:

$$n=40, n_3=150, C=C_1=(2 \div 30) \text{ пф}, R=680 \text{ ком.}$$

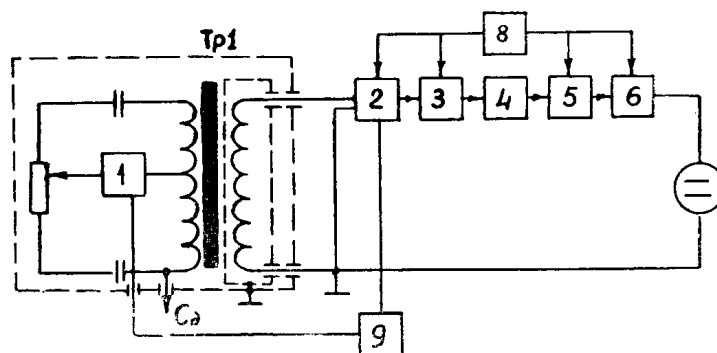


Рис. 2. Блок-схема мостового профилометра.

В качестве магнитопровода использован ферритовый тороид Ф1000 диаметром 55 мм. Вторичная обмотка трансформатора экранировалась от полей рассеяния первичной и весь трансформатор экранировался для стабилизации паразитных емкостных связей. Измерительная ячейка с генератором гармонических колебаний 1 и эмиттерным повторителем 2 (рис. 2) монтировалась в виде приставки на текстолитовой плите, которая крепится на окне машины. На этой же плите крепится емкостный датчик C_d таким образом, чтобы его обкладка находилась над продольной осью коллектора и была строго параллельна ей. Для установки датчика на определенный начальный зазор он снабжен микрометрическим винтом, который одновременно позволяет прокалибровать профилометр. Измерительная ячейка питалась от генера-

тора 1 напряжением 1,5 в и частотой 1 мГц. Сигнал разбаланса моста снимается со вторичной обмотки трансформатора Тр 1 и подается на вход измерительного устройства, состоящего из двух эмиттерных повторителей 2 и 6, резонансного каскада усиления — 3, детектера — 4, видеоусилителя — 5 и электронного осциллографа.

Для балансировки моста и контроля напряжения генератора в схему введен милливольтметр — 9. Схема питается от стабилизированного источника — 8.

По предварительным испытаниям емкостного профилометра получены следующие результаты. При установочных зазорах 75, 100, 150 мк схема обеспечивает постоянную чувствительность 1 мВ/мк при изменении зазора в широких пределах и высокую разрешающую способность. На меньших установочных зазорах чувствительность схемы в значительной мере нелинейно зависит от изменения зазора, что объясняется нелинейностью характеристики преобразования емкостного шупа.

Таким образом, емкостный профилометр с измерительной ячейкой в форме моста с тесной индуктивной связью является прибором, дающим возможность комплексного исследования механических и динамических свойств коллекторно-щеточного аппарата в электрических машинах. Обладая высокой чувствительностью и разрешающей способностью, он позволяет значительно снизить погрешность измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. К. К. Намиток, В. Ф. Чепура, В. Г. Брозинский. Прибор для исследования динамических изменений формы поверхности коллекторов электрических машин. *Электромеханика*, 1, 1966.
2. К. В. Чернышев. Прибор для измерения малых амплитуд. *Приборы и техника эксперимента*, 6, 1959.
3. D. A. Kennedy. The measurement of Commutator Profiles. Conf. Commut. Potat. Mach, London, 1964.
4. К. М. Соболевский, Ю. А. Шакола. Защита мостов переменного тока. Издательство АН УССР, Киев, 1957.
5. Г. В. Гессен. О чувствительности некоторых мостовых цепей с индуктивно связанными плечами. *Труды ВНИИМ*, 67 (127), 1962.
6. К. Б. Карандеев. Мостовые методы измерений. Гостехиздат УССР, 1953.
7. К. Б. Карандеев, Ф. Б. Гриневиц, К. М. Соболевский. О свойствах одной схемы моста со взаимной индуктивностью между двумя соседними плечами. *Доклады Львовского политехнического института*, т. 1, вып. 2, 1955.
8. А. В. Чеботарев, Е. Ю. Неболюбов. Об определении чувствительности измерительных схем цифровых мостов с индуктивно связанными плечами. Датчики и схемы влагомеров и уровнемеров для нефтехимической промышленности. Издательство «Илим», 1965.