

УСТАНОВКА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ В ЛОБОВЫХ ЧАСТЯХ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Г. А. СИПАЙЛОВ, В. И. ПОПОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Умение правильно определять электродинамические усилия, возникающие в отдельных элементах конструкции электрических машин, является одной из основных задач их проектирования. Особенно это относится к ударным генераторам, в которых электродинамические усилия существенно превосходят усилия, возникающие в элементах электрических машин обычного исполнения при нормальном режиме их работы.

Наибольшие трудности как с точки зрения расчета электродинамических усилий, так и их преодоления возникают при конструировании лобовых частей обмоток статора. Это обусловлено сложным пространственным распределением стержней обмотки в зоне лобовых частей и влиянием окружающих ферромагнитных поверхностей.

Обычно при расчетах электродинамических усилий в лобовых частях, с целью облегчения, принимаются упрощающие допущения, которые естественно вносят погрешности в результаты расчета [1, 2, 3]. С другой стороны, уменьшение количества допущений приводит к усложнению методики расчета в такой мере, что ее применение становится возможным лишь с помощью ЭЦВМ [5, 4].

Таким образом, задача достаточно точного расчета электродинамических усилий в лобовых частях обмоток электрических машин требует дальнейшего теоретического и экспериментального исследования. В связи с этим предполагается на основе экспериментальных исследований электродинамических усилий, возникающих в проводниках, моделирующих лобовые части однослойной концентрической обмотки и расположенных в различных средах, дать достаточно полную и приемлемую с точки зрения трудоемкости методику расчета. В настоящей статье дается описание установки и излагается методика экспериментальных исследований. В дальнейшем будет дана методика расчета электродинамических усилий в лобовых частях обмоток как без учета, так и с учетом влияния окружающих поверхностей.

С целью отработки техники эксперимента и определения в дальнейшем долевого влияния на величину усилий ферромагнитных и других поверхностей, окружающих лобовые части, на первой стадии эксперименты проводились на моделях, состоящих из проводников, расположенных в воздухе. Одна из таких моделей, в которой расположение проводников соответствует конфигурации лобовой части однофазной однослойной концентрической обмотки двухполюсного ударного генератора, представлена на рис. 1, а. С целью исключения из результатов эксперимента влияния закручивания, величина которого зависит от

длины криволинейной части, все проводники с помощью специального крепления были поставлены в одинаковые условия.

Для определения сил, действующих на проводники, и оценки прочности проводников необходимо знать механические напряжения, возникающие в них. Однако механические напряжения непосредственно не могут быть измерены. Их можно определить, если известны силы, приложенные к проводнику, и геометрические размеры проводника или если известны деформации проводника и их распределение. Так как деформация проводника связана с изменением его размеров, то она может быть непосредственно измерена.

Для измерения различных механических величин, преобразуемых в деформации, применяют проволоочные преобразователи — тензометры сопротивления, наклеиваемые на испытываемую деталь. Относительно малые размеры, простая форма, легкость, возможность применения в местах, трудно доступных во время работы, надежность и малая погрешность измерения открывают большие возможности их использования при экспериментальном исследовании.

В качестве датчиков деформации в рассматриваемой установке, схема которой представлена на рис. 1, использовались проволоочные тензодатчики типа ПКБ-10-200 с базой 10 мм и сопротивлением 200 ом. При включении датчиков по схеме уравновешенного моста (рис. 1, б), в случае деформации детали, в измерительной диагонали моста появляется напряжение разбалансировки ΔU вследствие изменения сопротивления тензодатчиков за счет деформации

$$\Delta U = \frac{1}{4} U_{KT} \varepsilon,$$

где U — напряжение питания моста,

K_T — коэффициент тензочувствительности тензодатчика,

ε — измеряемая относительная деформация.

Одной из основных характеристик, определяющих качество тензодатчика, является его коэффициент тензочувствительности k_T . Необходимо, чтобы все тензодатчики, отобранные для проведения экспериментальных исследований, имели одинаковый коэффициент k_T , с тем чтобы измеряемый сигнал, снимаемый с тензодатчиков, был пропорционален только деформации. Поэтому перед наклейкой тензодатчиков на исследуемую модель у 10 проц. партии тензодатчиков, отобранных для опыта, была снята зависимость $k_T = f(n_T)$ (рис. 2, а), которая подтвердила, что коэффициент тензочувствительности может быть принят постоянным и для данной партии равным $k_T = 1,96$.

Для определения усилий, действующих на лобовые части модели, в средней части каждого криволинейного проводника с двух его противоположных сторон наклеивались активные датчики своей решеткой вдоль проводника и включались в измерительную цепь по схеме моста. С целью исключения наводок в измеряемом сигнале весь монтаж выполнен экранированным проводом с заземлением экрана. Для питания моста тензодатчиков и приема измеряемого сигнала, пропорционального деформации, использовался 4-канальный тензометрический усилитель УТ4-1, снабженный электротарировочным устройством. Запись деформаций проводилась одновременно для трех проводников вместе с записью тока, питающего модель. В качестве источника питания исследуемой модели лобовой части был применен ударный генератор. Поскольку время между импульсами тока ударного генератора может быть установлено сколь угодно большим, то нет необходимости предусматривать температурную компенсацию тензодатчиков, так как выделение тепла за один импульс незначительно. Это дает возможность использовать схему с двумя активными датчиками. Схема включения и места наклейки активных тензодатчиков указаны на рис. 1.

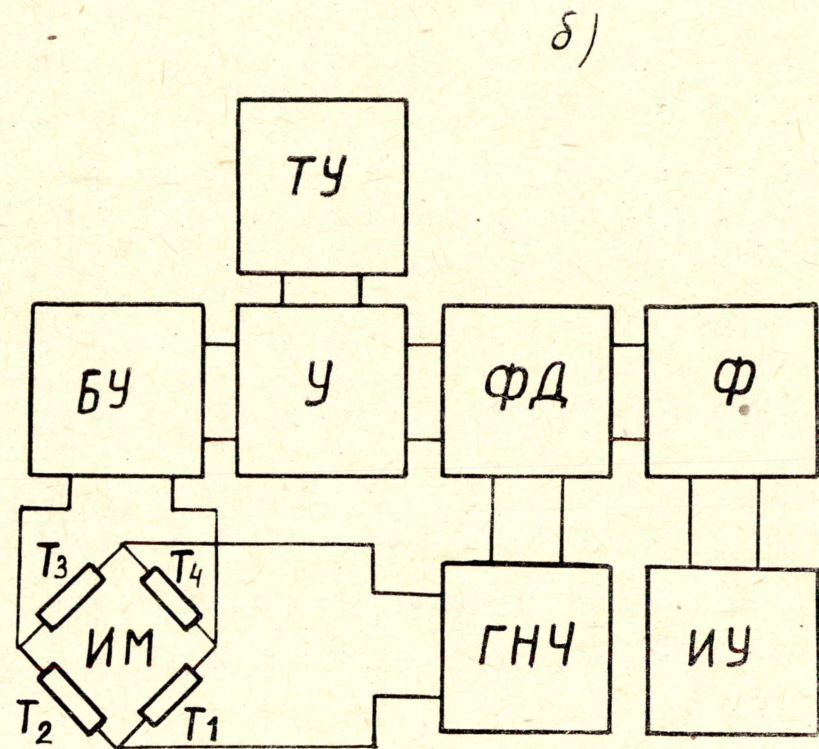
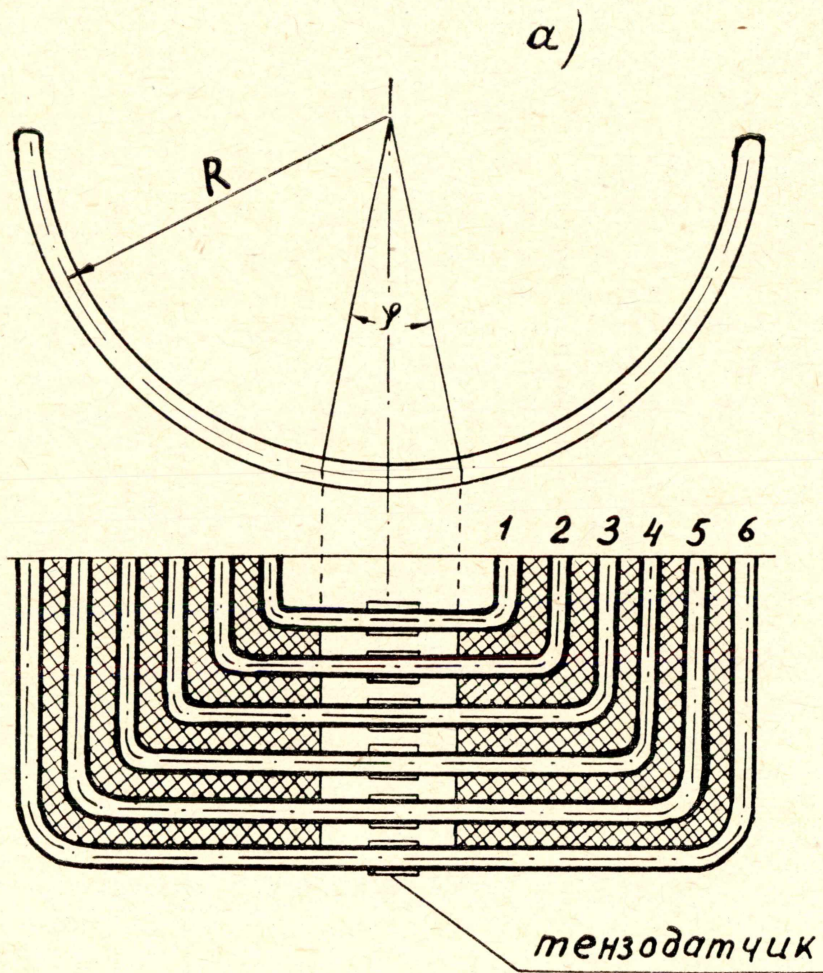


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
 ИМ — измерительный мост, БУ — балансирующее устройство, ТУ — тарировочное устройство, У — усилитель, ФД — фазочувствительный детектор, Ф — фильтр несущей частоты, ГНЧ — генератор несущей частоты, ИУ — измерительное устройство, T_1, T_2 — активные тензодатчики, T_3, T_4 — эталонные тензодатчики

Особенности процесса измерений и свойства элементов измерительной схемы определяют наличие вполне определенных ошибок — погрешностей измерения. Поэтому необходимо заранее реально оценить величину ошибок измерений, так как пренебрежение ими может привести к большому искажению результатов измерений.

Основными источниками погрешностей могут быть:

- а) нестабильность коэффициента тензочувствительности,
- б) нелинейность амплитудной характеристики измерительной схемы [6].

Как было показано (рис. 2, а), для отобранной партии тензодатчиков $k_T = \text{const}$. Что же касается нелинейности амплитудной характеристики, то для ее оценки была снята зависимость выходного тока измерительной схемы в зависимости от относительной деформации (рис. 2, б).

Из данных опыта следует, что нелинейность амплитудной характеристики составляет не более 3 проц. Усилия, действующие на проводники при протекании по ним тока, определялись следующим образом. Перед каждым измерением записывалась тарировочная осциллограмма, вид которой указан на рис. 3, а. Тарировочный сигнал в каждом канале усилителя соответствует $\epsilon_T = 1 \cdot 10^{-4}$ о. е. деформации. Затем при неизменном усилении снималась рабочая осциллограмма при пропускании ударного тока по проводникам модели. Вид осциллограммы указан на рис. 3, б. Из рабочей и тарировочной осциллограмм определялась величина измеренной относительной деформации $\epsilon_{и}$.

Измеренный по схеме двух активных датчиков изгибающий момент, действующий на проводник:

$$M_{и} = \frac{1}{2} \epsilon_{и} E W,$$

где

E — модуль упругости материала, для меди $E = 1,23 \cdot 10^6 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}$,

$W = \frac{1}{6} ab^2$ — момент сопротивления изгибу.

Поскольку участок, на котором измерялся изгибающий момент, мал, то удельную нагрузку можно считать равномерно распределенной. Из теории сопротивления материалов известно, что для балки с равномерной нагрузкой, жестко закрепленной своими концами, изгибающий момент в середине равен

$$M_{и} = \frac{1}{24} F_a l.$$

Так как в нашем случае $\varphi = 57^\circ = 1$ рад, $R = 24$ см, то $l = R\varphi = 24$ см, и $M_{и}$ численно равен F_a в кг. Отсюда.

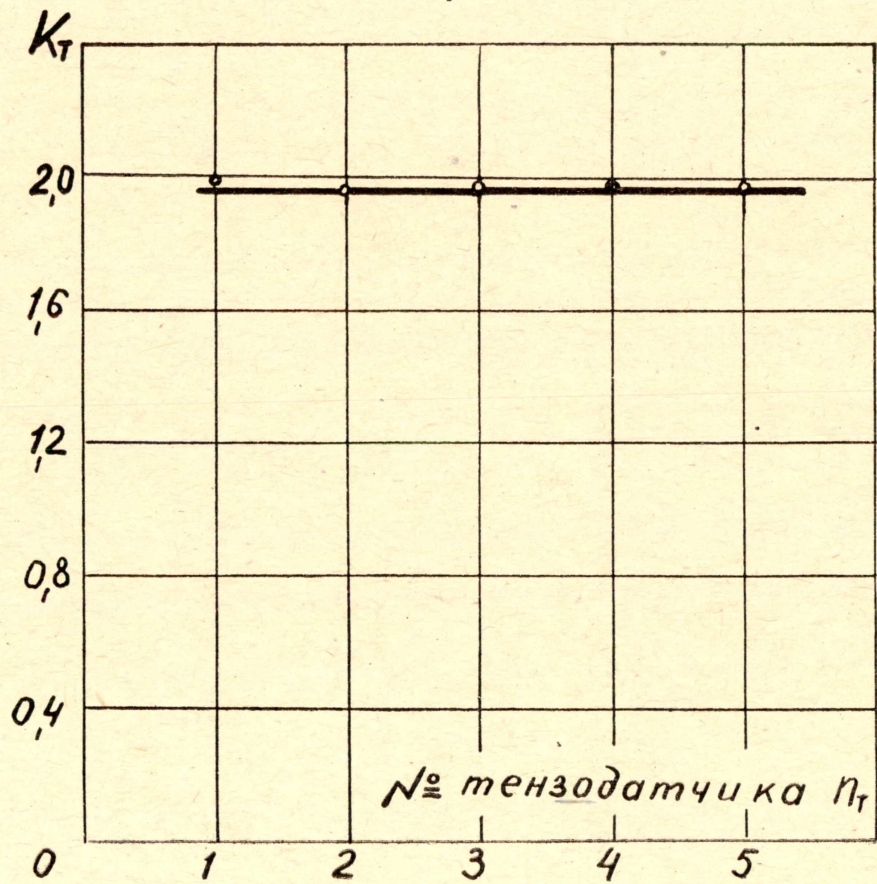
$$F_a = \frac{1}{2} \epsilon_{и} E W.$$

Измеренные по изложенной методике аксиальные усилия, возникающие в проводниках при протекании по ним тока 4000а, представлены в табл. 1; там же для сравнения приведены расчетные данные,

Таблица 1

п	1	2	3	4	5	6
F_a эксп.	9,7	4,80	—	—1,32	—3,95	—10,5
F_a расчет.	9,5	4,45	1,15	—1,33	—4,35	— 9,3

a)



б)

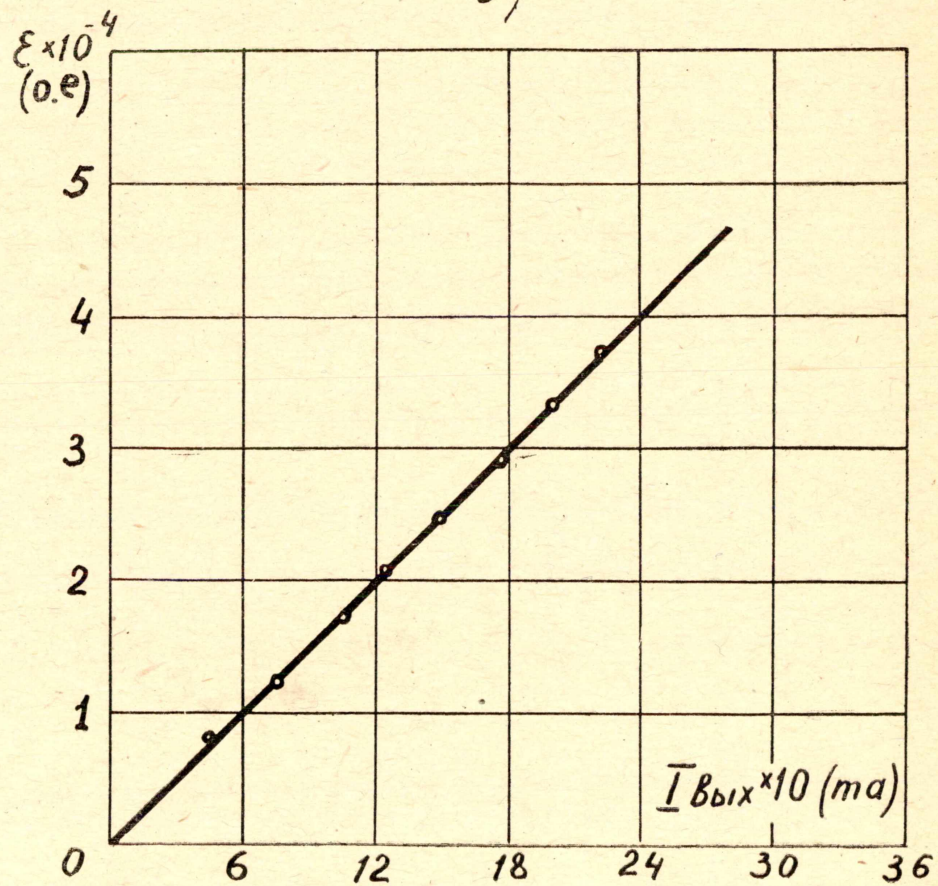


Рис. 2. Характеристики оценки погрешности измерений

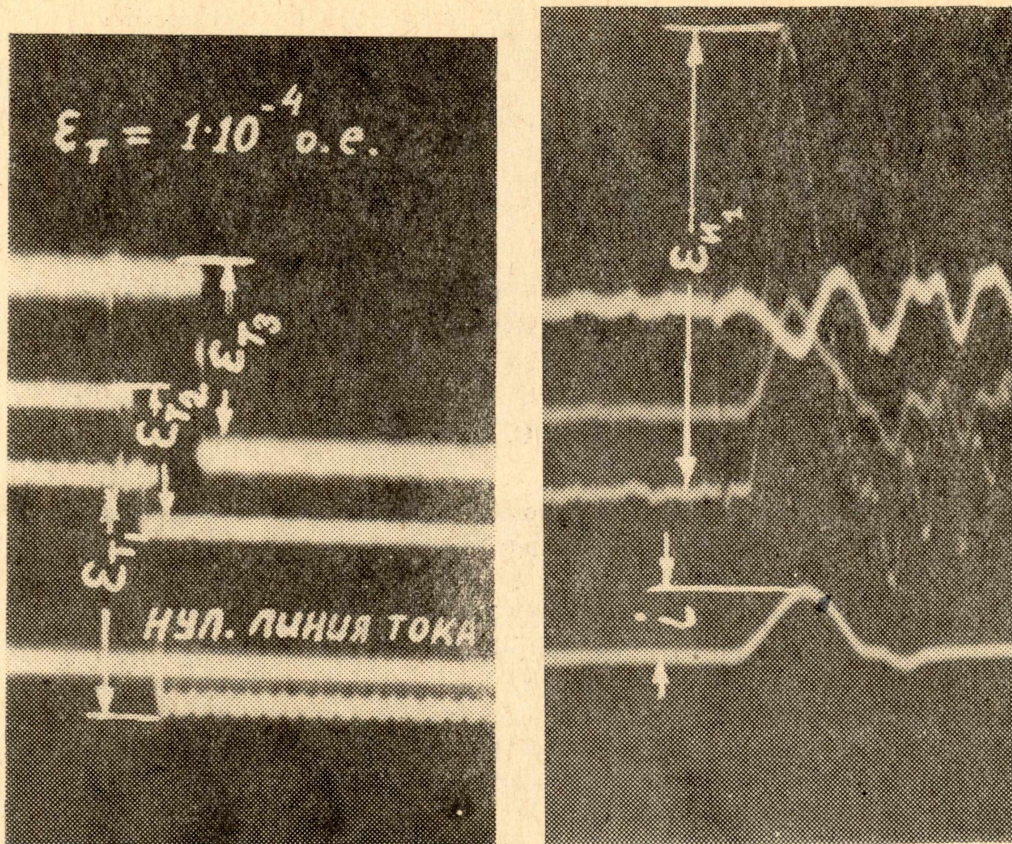


Рис. 3. Осциллограммы: а — тарифовочная, б — рабочая

Удовлетворительное совпадение результатов расчета и опыта, полученное для сравнительно простого расположения проводников, легко поддающегося расчету, подтверждает возможность применения экспериментальной установки для определения усилий во всех других случаях, в том числе и таких, для которых пока не существует достаточно точной методики расчета. Достоверность экспериментальных данных позволит достаточно полно учесть влияние ферромагнитных и других поверхностей, окружающих лобовые части обмоток, при расчете электродинамических усилий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Б. Холявский. Расчет электродинамических усилий в электрических аппаратах. ГЭИ, 1962.
2. I. F. Calvet. Forces in Turbine Generator Stator Windings. Trans. of the A.I.E.E. 1931. 50 p 173.
3. D. Harrington. Forces in Machine End Windings. Trans. of the A.I.E.E., 1952. Vol. 71, Part III, p. 849—859.
4. А. И. Верхотуров, Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Методика расчета усилий в лобовых частях однослойной обмотки с помощью ЭЦВМ. Известия ТПИ, т. 139, 1965.
5. А. И. Верхотуров, Г. А. Сипайлов, К. А. Хорьков. Усилия в лобовых частях обмотки статора ударного генератора. Известия ТПИ, т. 145, 1965.
6. З. Рuzга. Электрические тензометры сопротивления, ГЭИ, 1961.