

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ КРИВЫХ ТОКА И Э. Д. С. КОРОТКОЗАМКНУТОЙ СЕКЦИИ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ИХ РАБОТЕ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Ф. А. СЕРДЮК

(Представлено научно-методическим семинаром электромеханического факультета)

Характер коммутационного процесса определяется тесной взаимосвязью между физическими процессами, происходящими в щеточном контакте и в коммутируемой секции, в период коммутации.

Для объяснения процессов, имеющих место в неподвижном контакте, был выдвинут ряд теорий [11, 12, 13]. Положения, изложенные в них, с некоторыми поправками можно распространить и на скользящий контакт, так как он отличается от неподвижного тем, что в нем точки непосредственного соприкосновения двух поверхностей находятся во взаимном перемещении.

Существует несколько гипотез [2, 3, 10] и взглядов [1], объясняющих поведение скользящего контакта. Анализ и экспериментальная проверка различными учеными теорий, гипотез и взглядов показывает, что для объяснения поведения скользящего контакта следует пользоваться вместе взятыми второй и третьей гипотезами с некоторыми дополнениями.

Что касается физических процессов, происходящих в коммутируемых секциях, то выяснению этого процесса был посвящен также ряд работ [1÷6], причем в некоторых из них дается общая теория коммутаций для всех типов машин.

Однако опыты, проведенные в сравнительно недавнее время рядом ученых (М. Ф. Карасев и др.), показывают, что единая теория коммутации для всех типов машин не приемлема.

Учитывая вышеизложенное, можно считать, что аналитические выражения кривых тока и э. д. с. короткозамкнутой секции одного типа машин будут отличаться от таковых для другого типа машин. На характер этих выражений будет также оказывать влияние применяемый сорт щеток.

Универсальные двигатели обладают целым рядом особенностей. Они предназначены для работы как на постоянном, так и на переменном токе, имеют сверхсинхронные скорости вращения, снабжаются твердыми сортами щеток, отдельные их секции обладают значительными активными и индуктивными сопротивлениями.

Несомненно, что эти особенности будут оказывать определенное влияние на протекание коммутационного процесса в этих двигателях,

а следовательно, и на характер аналитических выражений величин, отображающих ход коммутационного процесса. Обычно при выводе уравнений для тока и э. д. с. самоиндукции короткозамкнутой секции пренебрегают сопротивлением петушков и активным сопротивлением секций. Так как отдельные секции универсальных двигателей имеют довольно большое значение активного сопротивления, то, несомненно, ими пренебрегать нельзя, а что касается сопротивлений петушков, то они в общей сумме сопротивлений составляют небольшую часть, поэтому для простоты ими мы будем пренебрегать.

На характер изменения кривых тока и э. д. с. короткозамкнутой секции оказывают существенное влияние сопротивления набегающего r_1 и сбегающего r_2 края щетки, поэтому до получения этих уравнений необходимо выяснить закон изменения этих сопротивлений. Можно считать доказанным [1, 7], что плавное изменение этих сопротивлений, принятое в классической теории коммутации [2], не имеет места в действительности.

Е. М. Синельников [9] при выводе критерия безыскровой работы машин постоянного тока считал, что „сопротивления контакта не зависят от поверхности соприкосновения щетки с коллектором“.

И. С. Елохин [1], пользуясь результатами собственных опытов и результатами опытов О. Г. Вегнера [10] и Stine [3], пришел к выводу, что сопротивления контакта остаются постоянными и не зависят от поверхности щетки.

Ю. Е. Неболюбов [8] на основании экспериментов, произведенных на моделях, воспроизводящих машины переменного тока, также приходит к заключению, что рабочая поверхность щетки не оказывает существенного влияния на процессы замыкания и размыкания щеткой коллекторных пластин.

Отдельные секции двигателей универсального типа обладают высоким значением активного сопротивления, превышающим в несколько раз значение переходных сопротивлений щеток при рабочих плотностях, поэтому главную роль в большую часть периода коммутации будут они и выполнять, а лишь только в самом начале и в конце короткого замыкания секций будут оказывать некоторое влияние и переходные сопротивления щеток.

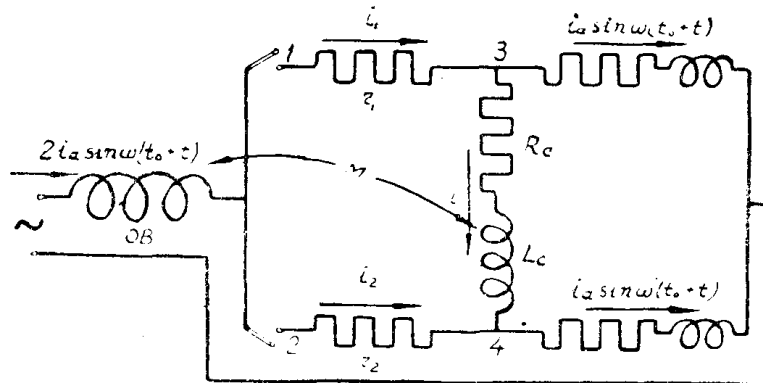
Учитывая этот факт и используя экспериментальные выводы некоторых авторов [1], в первом приближении допустим, что переходные сопротивления щеточного контакта являются постоянными и равными между собой ($r_1 = r_2 = \text{const}$).

Допущение постоянства и равенства переходных сопротивлений набегающего r_1 и сбегающего r_2 краев щетки до некоторой степени является физически необоснованным [7], но, учитывая, что значения этих сопротивлений малы по сравнению с активными сопротивлениями секций и при расчете берутся из кривых зависимости их от тока нагрузки, на уравнение коммутации универсальных двигателей они не окажут существенного влияния.

При выводе уравнений тока и э. д. с. короткозамкнутой секции будем также считать, что ширина щетки равна ширине коллекторной пластины; изоляционная прокладка между коллекторными пластинами бесконечно мала; коллектор и щеточный аппарат выполнены механически совершенными; емкость между коллекторными пластинами и отдельными секциями мала; действительный процесс коммутации состоит из двух этапов—начального и конечного, причем начальный этап начинается при замыкании секции щеткой накоротко и продолжается до начала размыкания секции, а конечный происходит в чрез-

вычайно короткое время, когда короткозамкнутая секция размыкается щеткой [1, 5, 8].

В этом случае схема замещения универсального двигателя при коммутации может быть представлена фиг. 1.



Фиг. 1.

На фигуре: r_1 и r_2 — переходные сопротивления набегающего и сбегающего краев щетки;

$i_a \sin \omega(t_0 + t)$ — ток параллельной ветви обмотки якоря;

R_c и L_c — сопротивление и индуктивность секции;

M — взаимоиндуктивность между обмоткой возбуждения (О.В.) и короткозамкнутой секцией в период коммутации;

i — ток короткозамкнутой секции.

Контакт 1 заменяет набегающий край щетки. Коммутация начинается в тот момент, когда происходит замыкание этого контакта (при замкнутом контакте 2).

На основании первого закона Кирхгофа для узловых точек 3 и 4 можно записать, что

$$i_1 = i_a \sin \omega(t_0 + t) + i,$$

$$i_2 = i_a \sin \omega(t_0 + t) - i.$$

Эти токи вызывают в контакте следующие падения напряжения:

$$i_1 r_1 = [i_a \sin \omega(t_0 + t) + i] r_1,$$

$$i_2 r_2 = [i_a \sin \omega(t_0 + t) - i] r_2.$$

Кроме этих падений напряжения в короткозамкнутой секции, будут иметь место падения напряжения в сопротивлении секции и сопротивлении соединительных проводов

$$R_c \cdot i, R_v \cdot i_1, R_v \cdot i_2.$$

Пренебрегая сопротивлением соединительных проводов и принимая во внимание, что кроме указанных выше падений напряжения в цепи короткого замыкания действует э. д. с. самоиндукции и осуществляется индуктивная связь между главным током двигателя и короткозамкнутой секцией, будем иметь

$$\begin{aligned} & [i_a \sin \omega(t_0 + t) + i] r_1 + i R_c - [i_a \sin \omega(t_0 + t) - i] r_2 = \\ & = -L_c \frac{di}{dt} + M \frac{d}{dt} \left\{ 2 i_a [\sin \omega(t_0 + t)] \right\}. \end{aligned}$$

Так как ток главной цепи изменяется по синусоидальному закону, то

$$\frac{d}{dt} \left\{ 2 i_a [\sin \omega (t_0 + t)] \right\} = 2 \omega i_a \cos \omega (t_0 + t).$$

Обозначая $r_1 + r_2 + R_c = \Sigma r$, $\frac{\Sigma r}{L_c} = K$ и $\frac{2 M i_a}{L_c} = K_1$ и учитывая принятые допущения, после некоторых преобразований получим

$$\frac{di}{dt} + iK = K_1 \omega \cos \omega (t_0 + t).$$

Полученное уравнение является дифференциальным уравнением первого порядка.

В результате решения этого уравнения мы получим выражение для тока короткозамкнутой секции

$$i = -i_a \sin \omega t_0 e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} + \frac{2 M i_a}{L_c \left[1 + \frac{\Sigma r^2}{(\omega L_c)^2} \right]} \left[\sin \omega (t_0 + t) + \right. \\ \left. + \frac{\Sigma r}{\omega L_c} \cos \omega (t_0 + t) - e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} \left(\sin \omega t_0 + \frac{\Sigma r}{\omega L_c} \cos \omega t_0 \right) \right]. \quad (1)$$

Так как э. д. с. самоиндукции $e_s = -L_c \frac{di}{dt}$, то выражение для э. д. с. самоиндукции

$$e_s = -\Sigma r i_a \sin \omega t_0 e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} - \frac{2 M i_a}{\left[1 + \frac{\Sigma r^2}{(\omega L_c)^2} \right]} \left[\omega \cos \omega (t_0 + t) - \right. \\ \left. - \frac{\Sigma r}{L_c} \sin \omega (t_0 + t) + \frac{\Sigma r}{L_c} e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} \left(\sin \omega t_0 + \frac{\Sigma r}{\omega L_c} \cos \omega t_0 \right) \right]. \quad (2)$$

Имея общие выражения для тока и э. д. с. самоиндукции короткозамкнутой секции, легко найти выражения для тока и э. д. с. самоиндукции для различных фаз коммутирования.

Фазой коммутирования при этом будем считать момент времени, когда начинается коммутационный процесс. Например, если коммутационный процесс начинается, когда мгновенное значение тока двигателя равно нулю, то выражение для тока будет

$$i = \frac{2 M i_a}{L_c \left[1 + \frac{\Sigma r^2}{(\omega L_c)^2} \right]} \left(\sin \omega t + \frac{\Sigma r}{\omega L_c} \cos \omega t - \frac{\Sigma r}{\omega L_c} e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} \right), \quad (3)$$

а выражение для э. д. с. самоиндукции

$$e_s = - \frac{2 M i_a}{\left[1 + \frac{\Sigma r^2}{(\omega L_c)^2} \right]} \left(\omega \cos \omega t - \frac{\Sigma r}{L_c} \sin \omega t + \frac{\Sigma r^2}{\omega L_c^2} e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} \right), \quad (4)$$

если коммутационный процесс начинается, когда мгновенное значение тока двигателя равно амплитуде $t_0 = \frac{1}{4} T$, где T —период коммутации, то

$$i = - i_a e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} + \frac{2 M i_a}{L_c \left[1 + \frac{\Sigma r^2}{(\omega L_c)^2} \right]} \left(\cos \omega t - \frac{\Sigma r}{\omega L_c} \sin \omega t - e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} \right), \quad (5)$$

$$e_s = - \Sigma r i_a e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} + \frac{2 M i_a}{\left[1 + \frac{\Sigma r^2}{(\omega L_c)^2} \right]} \left(\omega \sin \omega t + \frac{\Sigma r}{L_c} \cos \omega t - \frac{\Sigma r}{L_c} e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} \right) \text{ и т. д.} \quad (6)$$

В том случае, когда отсутствует трансформаторная связь между обмоткой возбуждения и короткозамкнутой секцией, аналитические выражения для них упрощаются

$$i = - i_a \sin \omega t_0 e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t}, \quad (7)$$

$$e_s = - \Sigma r i_a \sin \omega t_0 e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t}. \quad (8)$$

Сравнивая выражения для тока и э.д.с. самоиндукции при наличии трансформаторной связи и без нее (7, 8), можно видеть, что первый член в выражении (1) представляет собой ток, вызванный э.д.с. самоиндукции i_s , а второй—ток, вызванный трансформаторной э.д.с. i_t , то есть

$$i_s = - i_a \sin \omega t_0 e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t}, \quad (9)$$

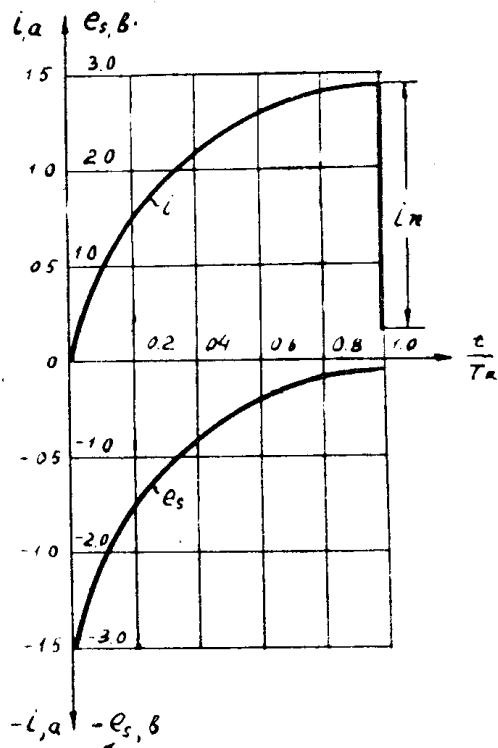
$$i_t = \frac{2 M i_a}{L_c \left[1 + \frac{\Sigma r^2}{(\omega L_c)^2} \right]} \left[\sin \omega (t_0 + t) + \frac{\Sigma r}{\omega L_c} \cos \omega (t_0 + t) - e^{-\frac{\Sigma r}{L_c} t} \left(\sin \omega t_0 + \frac{\Sigma r}{\omega L_c} \cos \omega t_0 \right) \right]. \quad (10)$$

Следовательно, выражение для тока короткозамкнутой секции может быть представлено как сумма двух токов

$$i = i_s + i_t. \quad (11)$$

В результате исследования² полученных уравнений установлено.

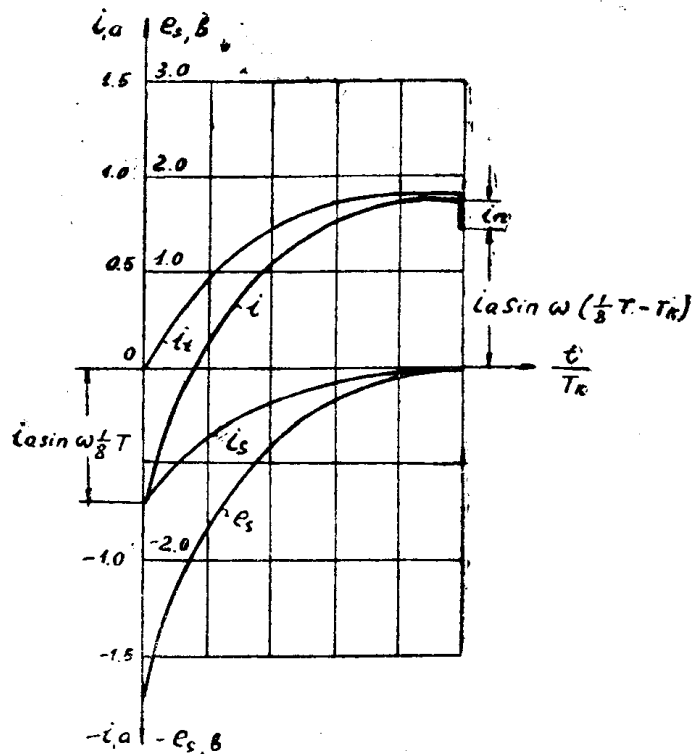
1. Для фазы первой при $\omega t_0 = 0^\circ$ ток короткозамкнутой секции i достигает своего максимального значения по окончании начального этапа коммутации, а затем резко падает до значения тока той параллельной ветви, в которую переключается секция по окончании конечного этапа коммутации. Максимальная величина этого тока превышает амплитудное значение тока якоря, ток переключения i_n велик и составляющая тока, вызванная э. д. с. самоиндукции i_s , не имеет места (фиг. 2).



Фиг. 2.

Кривая э. д. с. самоиндукции следует закону

$$e_s = -L_c \frac{di}{dt}.$$



Фиг. 3.

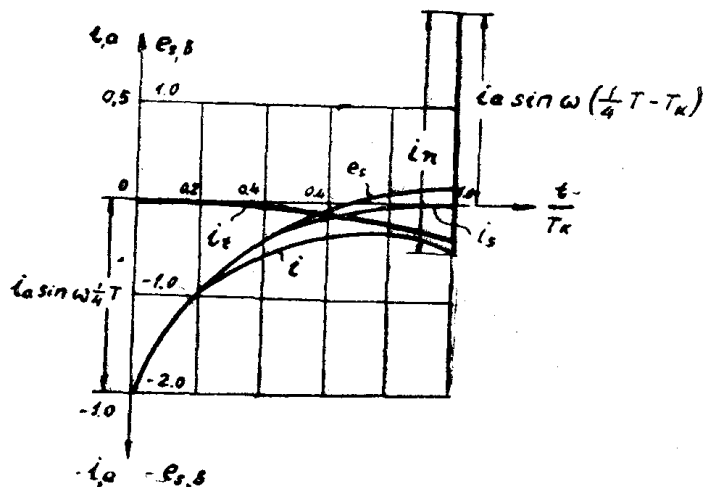
2. Для фазы второй при $\omega t_0 = 45^\circ$ характер изменения кривой тока и э. д. с. самоиндукции такой же, но ток переключения имеет незначительную величину—максимальная его величина меньше амплитудного значения (фиг. 3).

3. Для фазы третьей при $\omega t_0 = 90^\circ$ ток переключения имеет большую величину, и его значение тем больше, чем меньше период коммутации. Ток, вызванный трансформаторной э. д. с., имеет отрицательное значение.

Кривая э. д. с. самоиндукции пересекает ось абсцисс и приобретает положительное значение (фиг. 4).

Для того, чтобы можно было судить, насколько предложенные уравнения для кривой тока короткозамкнутой секции подтверждаются

экспериментально, было произведено сравнение расчетных и опытных данных, полученных на искусственном аппарате для некоторых фаз коммутирования.

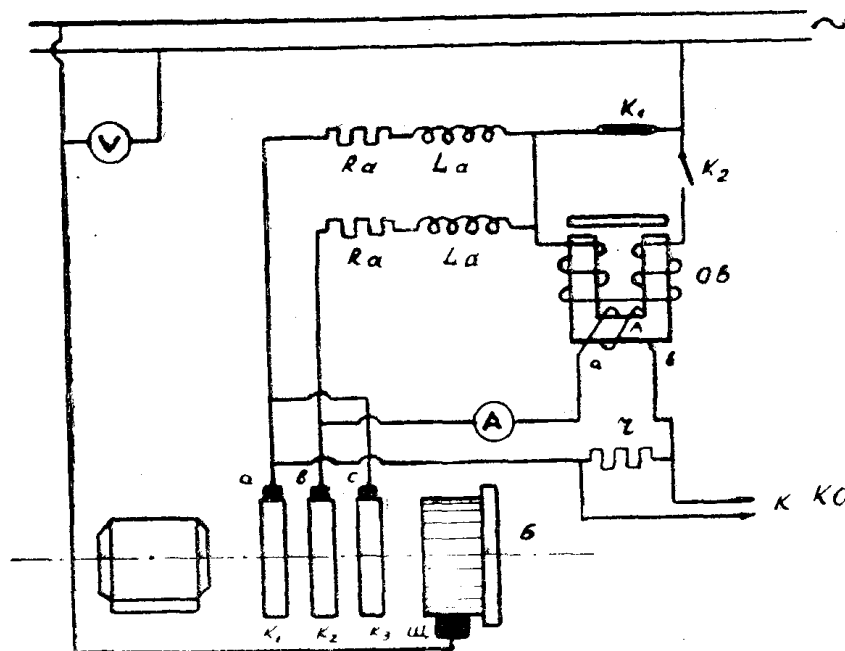


Фиг. 4.

Принципиальная схема аппарата, применяемого для снятия кривых тока и э. д. с. самоиндукции, представлена на фиг. 5, где

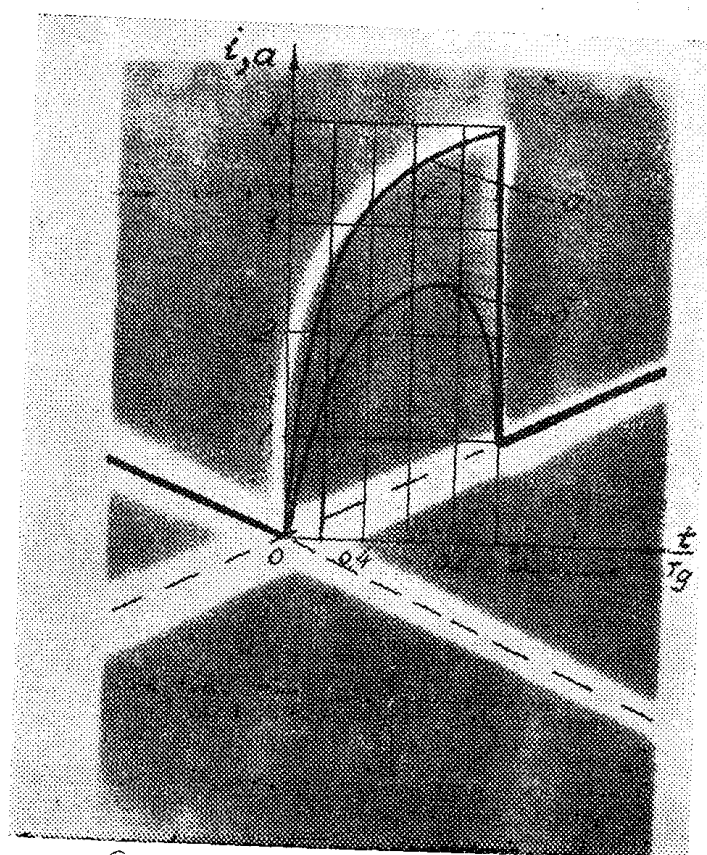
B —коллектор, имеющий 28 пластин, изолированных между собой изоляционными прокладками;

L_a, R_a —индуктивность и активное сопротивление, имитирующие параметры параллельных ветвей;

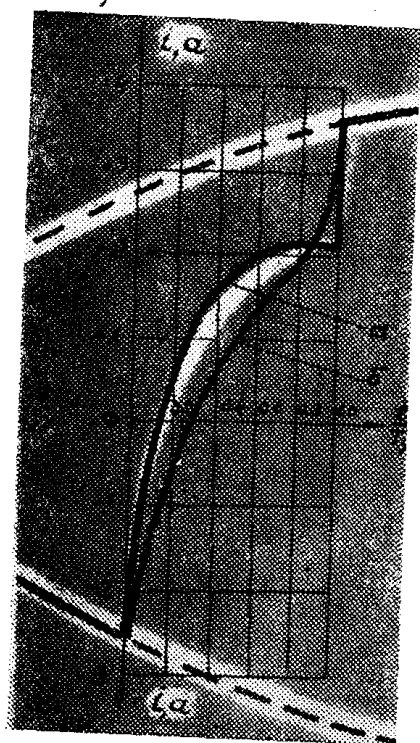


Фиг. 5.

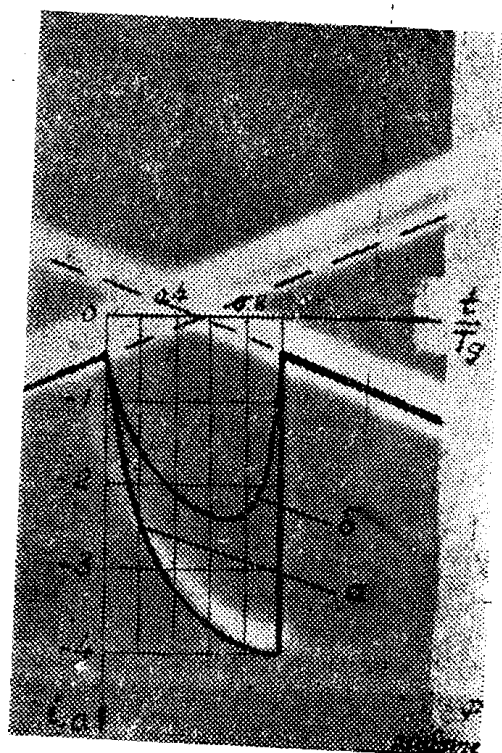
OB — ненасыщенный дроссель с воздушным зазором, изменяя который можно получить различную силу тока. На дроссель наматывается несколько испытуемых секций A с различными числами витков и активными сопротивлениями;



Фиг. 6.



Фиг. 7.



Фиг. 8.

r — шунт, падение напряжения на котором подается на один из лучей катодного осциллографа и снимается сила тока;

K_1, K_2, K_3 — три дополнительных контактных кольца с наложенными на них щетками a, b и c . Коллекторные пластины коллектора соединены таким образом, что за один его оборот совершается два коммутационных цикла.

Индуктивность и активное сопротивление параллельных ветвей взяты во много раз больше индуктивности и активного сопротивления секции.

Коммутационный аппарат позволил производить осциллографирование кривых тока и э.д.с. самондукции короткозамкнутой секции.

На фиг. 6—8 представлены осциллограммы тока короткозамкнутой секции для щетки марки УГ-2 для различных фаз коммутирования, полученные на аппарате при следующих условиях: $\omega_k = 40$ витков, $L_c = 0,36$ мГн, $j = 6,8$ а/см², $e_t = 5,38$ в., $T_d = 0,953 \cdot 10^{-3}$ сек, $M = 2,63$ мГн, $\Sigma r = 1,394$ ом, а также кривые тока, полученные расчетом по предложенным формулам (3,5) и по классической теории коммутации.

Сравнение кривых тока, полученных по предложенным уравнениям (1, 3, 5) с осциллограммами тока, и с кривыми, полученными расчетом по классической теории коммутации, показывает, что эти уравнения хорошо согласуются с опытными данными, а уравнения, полученные по классической теории, не подтверждаются экспериментально.

Выводы

1. Классическая теория коммутации не приемлема при расчете коммутации универсальных двигателей.

2. При расчете коммутации универсальных двигателей следует исходить из допущения постоянства и равенства сопротивлений щеточного контакта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карасев М. Ф. Коммутация машин постоянного тока. Госэнергоиздат 1955.
2. Арнольд Э. и Ла-Кур. Машинны постоянного тока, Гостехиздат, 1931.
3. Нейкирхен И. Угольные щетки и причины непостоянства условий коммутации машин постоянного тока. ОНТИ, НКТП СССР, 1935.
4. Сосновская М. С. Явления в щеточном контакте. Электричество, № 5, 1934.
5. Карасев М. Ф. Природа щеточного контакта электрических машин постоянного тока. Электричество № 10, 1948.
6. Гейрих В. Проблема скользящего контакта. 1935.
7. Вегнер О. Г. Вопросы современной теории коммутации тока в коллекторных машинах. Электричество № 7, 1956.
8. Небользов Ю. Е. Моделирование процесса коммутации в однофазных коллекторных двигателях переменного тока. Электричество, № 3, 1953.
9. Синельников Е. М. К вопросу коммутации машин постоянного тока, Электричество № 5, 1952.
10. Вегнер О. Г. О некоторых вопросах коммутации при помощи коллектора и щеток. Труды Ленинградского индустриального ин-та, № 7, 1938.
11. R. Holm Die Technische, Physik der Electricischen Kontakte I, Springer, 1941.
12. P. F. Sommer, B. Sc, Ph. D. Carbon-brush Contact Phenomena in Electrical Machinery. The Proceedings of the Institution of El. Eng. vol 96, Part II, № 52, August, 1949.
13. W. Shallichlin Contact Resistance of Electric Switching Apparature, Electric Journal, 8, 1928.