

## КОММУТАЦИОННАЯ РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА С ГЛУБОКИМ РЕГУЛИРОВАНИЕМ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ

А. И. Скороспешкин, Э. Г. Чеботков

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и  
общей электротехники)

В машинах постоянного тока с глубоким регулированием скорости вращения ослаблением поля н. с. коммутационной реакции якоря  $F_K$  составляет значительную долю от н. с. главного полюса. Например, для машины П50 при  $n=3000$  об/мин и  $I_A=20$  а н. с.  $F_K$  равна примерно 22% от н. с. главного полюса. Поэтому в машинах с глубоким регулированием скорости ослаблением поля определение и учет  $F_K$  необходимы.

В [1] предложен способ расчета н. с.  $F_K$  применительно к машинам постоянного тока при регулировании скорости вращения от 600 до 2000 об/мин. В общем случае машины с ослаблением поля имеют больший диапазон регулирования скорости. Поэтому целью настоящей работы является получение аналитического метода расчета  $F_K$  при регулировании скорости вращения от 400 до 3200 об/мин.

Н. с. коммутационной реакции якоря равна

$$F_K = i_{дср} w_{с\dot{я}}, \quad (1)$$

где

$i_{дср}$  — средний добавочный ток коммутации,

$w_{с\dot{я}}$  — среднее число витков секции якоря.

При этом среднее значение добавочного тока коммутации в расчете на один полюс машины согласно [1] определяется:

для простой петлевой обмотки

$$i_{дср} = 2 \frac{b_{щ} - b_M}{\pi b_K} i_{дм} = m_1 i_{дм}, \quad (2)$$

для простой волновой обмотки

$$i_{дср} = 2 \frac{b_{щ} - b_M + (b_K - \tau + y_K b_K)}{\pi \cdot b_K} i_{дм} = m_2 i_{дм}, \quad (3)$$

где

$b_{щ}$  — ширина щетки,

$b_K$  — коллекторное деление,

$b_M$  — межламельное расстояние,

$\tau = \frac{\pi D_K}{p}$  — полюсное деление по окружности коллектора,

$y_K$  — шаг обмотки по коллектору,

$i_{дм}$  — амплитудное значение добавочного тока, соответствующее оптимальной коммутации.

Таким образом,

$$F_K = i_{дср} \cdot w_{с\dot{я}} = m i_{дм} \cdot w_{с\dot{я}}, \quad (4)$$

где коэффициент  $m$  в зависимости от типа обмотки определяется из выраженной (2) или (3).

Экспериментальное определение  $F_K$  в [1] проводилось с использованием методики [2]. Однако применение ее на испытуемой машине выявило значительную погрешность эксперимента. Эта погрешность заключается в следующем.

Согласно [2] снимается зависимость н. с. главного полюса  $F_{гп}$  от тока подпитки попеременно в генераторном и двигательном режиме. Из-за остаточного намагничивания возможно смещение зависимостей  $F_{гп}=f(I_{п}/I_{я})$  параллельно самим себе. Поэтому точка пересечения прямых  $F_{гп}=f(I_{п}/I_{я})$ , соответствующая прямолинейной коммутации, может сместиться в ту или иную сторону от истинной, что вызывает значительную погрешность в определении  $F_K$ . Эта погрешность особенно велика, когда машина в силу каких-либо причин имеет значительную величину н. с. продольной реакции якоря, например, из-за несимметрии магнитной системы. Так, для машины П50 н. с.  $F_K$ , определенная по методике [2], представлена на рис. 1, где прямые 1, 1' и  $F_{K1}$  получены при первом испытании, прямые 2, 2' и  $F_{K2}$  — при повторном испытании, прямые 1, 2 соответствуют двигательному режиму работы машины, прямые 1', 2' — генераторному.

Расхождение между  $F_{K1}$  и  $F_{K2}$  составляет около 40%. Погрешность может быть устранена, если для определения  $F_K$  использовать следующий способ.

С помощью датчика эдс Холла, закрепленного на середине главного полюса, снимается зависимость  $F_{гп}=f(I_{п}/I_{я})$  для любого режима работы машины при  $n=\text{const}$  и  $I_{я}=\text{const}$ . Полученная зависимость с помощью метода наименьших квадратов аппроксимируется в уравнение прямой вида

$$F_{гп} = a + bx. \quad (5)$$

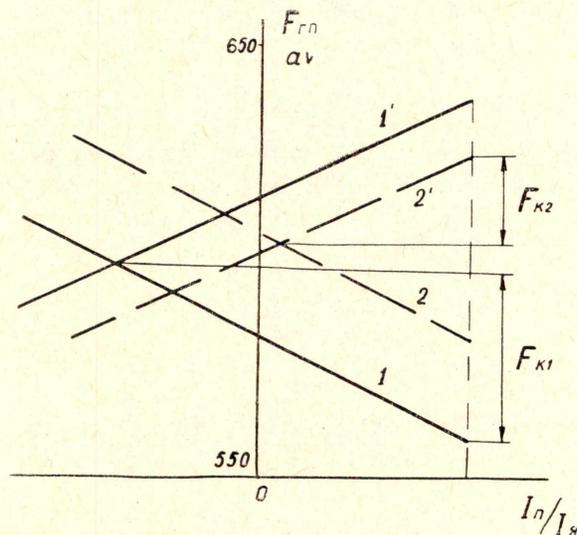


Рис. 1

Используя (5), н. с. коммутационной реакции якоря (рис. 2) равна

$$F_K = b(P - M), \quad (6)$$

где  $P$  — значение  $I_{п}/I_{я}$ , соответствующее оптимальной коммутации и определяемое из безыскровых зон работы машины.

$M$  — значение  $I_{п}/I_{я}$ , соответствующее прямолинейной коммутации.

Значение тока подпитки, соответствующее прямолинейной коммутации, может быть определено с помощью метода потенциальных щеточных диаграмм в виде [3]. Однако при небольшой ширине щетки данный метод может вызвать значительную погрешность из-за неодинакового

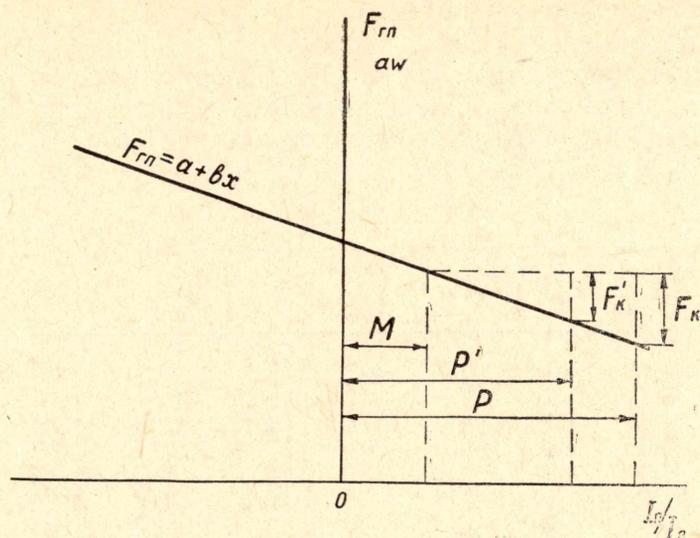


Рис. 2

удаления от краев щетки заделанных в нее проводников. Поэтому на сбегаящий и набегающий края щетки наклеивались полоски медной фольги толщиной 0,05 мм. Для изоляции от обоймы щеткодержателя фольга обклеивается капроновой пленкой. Припаянные к фольге проводники выводятся к измерительному прибору.

Экспериментальное определение  $F_k$  проводилось с использованием изложенного способа при работе испытуемой машины в двигательном режиме. В качестве испытуемой применялась машина постоянного тока серии П 5-го габарита с глубоким регулированием скорости вращения ослаблением поля.

Номинальные данные испытуемой машины

Напряжение питания — 220 в.

Выходная мощность 2,2 квт.

Скорость вращения 750/3000 об/мин.

Ток возбуждения 1/0,1 а.

Измерение  $F_k$  производилось при регулировании скорости вращения от 400 до 3200 об/мин и тока якоря от 5 до 20 а. Для устранения случайной погрешности при определении точки прямолинейной коммутации устанавливались одновременно четыре препарированных щетки.

В [1] выражение для амплитудного значения добавочного тока коммутации.

$$i_{dm} = c \left( \frac{I_a}{2a} \right)^\eta \cdot n^x \quad (7)$$

получено при работе машины в диапазоне скоростей 600—2000 об/мин. При скорости более 2000 об/мин  $i_{dm}$  изменяется по иному закону, а не по выражению [7]. Зависимость же любой сложности может быть представлена полиномом соответствующего порядка. Исходя из этого, был составлен рототабельный план эксперимента второго порядка [4] для двух независимых переменных  $x_1$  и  $x_2$ , где

$$x_1 = \frac{n - 1814}{1000}, \quad (8)$$

$$x_2 = \frac{i_a - 6,25}{2,655}, \quad (9)$$

$n$  — скорость вращения в об/мин,

$i_a$  — ток параллельной ветви якоря.

Матрица планирования и результаты эксперимента сведены в табл. 1, где  $y_1$  и  $y_1'$  н. с. коммутационной реакции якоря для щеток ЭГ-63;  $y_2$  и  $y_2'$  — для ЭГ-74, соответственно для плотностей тока через щетку  $1,25-5 \text{ а/см}^2$  —  $y_1$  и  $y_2$ ;  $2,5-10 \text{ а/см}^2$  —  $y_1'$ ,  $y_2'$ .

Таблица 1

$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_1x_2$	$y_1$	$y_1'$	$y_2$	$y_2'$
+1	+1	-1	+1	+1	+1	7,3	7,3	5,9	6,2
+1	+1	-1	+1	+1	-1	11	11	11	10,9
+1	-1	+1	+1	+1	-1	18,6	18,6	18,5	18,7
+1	+1	+1	+1	+1	+1	27	27	26,3	26,7
+1	-2	0	+2	0	0	9,5	9,4	4,4	4,5
+1	+2	0	+2	0	0	20,8	20,8	17,2	17,5
+1	0	-2	0	+2	0	7,7	7,7	3,5	4,2
+1	0	+2	0	+2	0	32	32	25,6	26,3
+1	0	0	0	0	0	19	19	15,9	15,9
+1	0	0	0	0	0	19	19	15,9	15,9
+1	0	0	0	0	0	19	19	15,9	15,9
+1	0	0	0	0	0	19	19	15,9	15,9

Интервалы варьирования независимых переменных приведены в табл. 2.

Таблица 2

	$x_1$	$x_2$
Основной уровень ( $x_1=0$ )	1814	6,25
Интервал варьирования	1000	2,65
Верхний уровень ( $x_1=+1$ )	2814	8,905
Нижний уровень ( $x_1=-1$ )	814	3,6

По результатам экспериментов определяются уравнения регрессий вида

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2, \quad (10)$$

где коэффициенты регрессии:

$$b_0 = 0,25(Oy) - 0,125 \sum_{i=1}^k (i iy),$$

$$b_1 = 0,125 (iy),$$

$$b_{11} = 0,125 (i iy) + 0,03125 \sum_{i=1}^k (i iy) - 0,125 (Oy),$$

$$b_{12} = 0,25 (ijy),$$

$$(Oy) = \sum_u y_u,$$

$$(iy) = \sum_u x_{iu} \cdot y_u,$$

$$(i iy) = \sum_u x_{iu}^2 \cdot y_u,$$

$$(ijy) = \sum_u x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u.$$

Анализ полученных уравнений производим с помощью множественного коэффициента корреляции

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_R}{\sum y^2}}, \quad (11)$$

где  $S_R = \sum y^2 - \sum_{i=0}^k b_i \cdot (iy)$  — остаточная сумма квадратов, обусловленная неучтенными факторами и ошибкой опыта.

Для ЭГ-63 при  $j = 1,25 - 5 \text{ а/см}^2$  имеем

$$R = 0,993,$$

при  $j = 2,5 - 10 \text{ а/см}^2$

$$R = 0,994,$$

для ЭГ-74 при  $j = 1,25 - 5 \text{ а/см}^2$

$$R = 0,993$$

при  $j = 2,5 - 10 \text{ а/см}^2$

$$R = 0,991.$$

На основе этих результатов можно сделать вывод, что уравнение регрессии достаточно точно описывают результаты эксперимента.

Подставляя в (10) значение переменных  $x_1$  и  $x_2$  из (8), (9) и учитывая (4), имеем:

$$F_K = m w_{сч} [b_0' + b_1' n + b_2' i_a + b_{11}' n^2 + b_{22}' i_a^2 + b_{12}' n \cdot i_a], \quad (12)$$

что после преобразований дает

$$F_K = m w_{сч} [b_0'' + b_{11}'' D_a n + b_{22}'' i_a + b_{11}'' D_K n^2 + b_{22}'' i_a^2 + b_{12}'' D_a n i_a]. \quad (13)$$

Выражение (13) может быть применено для расчета  $F_K$  при любой настройке коммутации. Действительно, пусть имеем коммутацию, соответствующую точке  $P'$  рис. 2. Тогда н. с. коммутационной реакции якоря определяется выражением вида

$$F_K' = \frac{P' - M}{P - M} F_K, \quad (14)$$

где  $F_K$  определяется выражением (13), коэффициенты полинома которого представлены в табл. 3.

Из анализа коэффициентов полинома можно сделать следующие выводы.

При неизменном токе якоря н. с.  $F_K$  с увеличением скорости вращения возрастает нелинейно. Эта нелинейность обуславливается коэффициентом  $b_{11}''$ . Отрицательный знак и наличие коэффициента  $b_{11}''$  можно объяснить тем, что с увеличением скорости вращения сопротивление щеточного контакта увеличивается. Действительно, с увеличением скорости вращения время формирования контактной проводимости уменьшается, что ведет к увеличению удельного сопротивления контакта.

Н. с. коммутационной реакции якоря  $F_K$  в функции от тока якоря при неизменной скорости вращения имеет незначительную нелинейность, так как коэффициент  $b_{22}''$  на три порядка ниже чем  $b_2''$ . Поэтому коэффициентом  $b_{22}''$  в расчетах н. с.  $F_K$  можно пренебречь.

Кроме того, из экспериментальных данных следует, что н. с.  $F_K$  может составлять значительную часть н. с. главного полюса. Так, в эксперименте № 4 табл. 1, соответствующем работе машины при  $F_{гп} = 150 \text{ ав}$ , н. с.  $F_K$  составляет 18% н. с. главного полюса.

Таблица 3

Сорт щенок	j	$b_0''$	$b_1''$	$b_2''$	$b_{11}''$	$b_{22}''$	$b_{12}''$
ЭГ-63	1,25— 5	-1,11	$7,85 \cdot 10^{-5}$	0,298	$-0,214 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$
	2,5 —10	-1,11	$7,88 \cdot 10^{-5}$	0,298	$-0,212 \cdot 10^{-8}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$0,39 \cdot 10^{-5}$
ЭГ-74	1,25— 5	-1,7	$8,3 \cdot 10^{-5}$	0,33	$-0,18 \cdot 10^{-8}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$0,22 \cdot 10^{-5}$
	2,5 —10	-1,6	$8,1 \cdot 10^{-5}$	0,33	$-0,17 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$0,25 \cdot 10^{-5}$

В целом в результате выполненной работы предлагается аналитический метод определения н. с. коммутационной реакции якоря, который может быть использован при определении  $F_k$  машин постоянного тока с глубоким регулированием скорости вращения при любой настройке коммутации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Г. Чеботков, Ю. П. Галишников. Коммутационная реакция якоря в машинах постоянного тока серии П с регулируемой скоростью вращения. Известия ТПИ, т. 172, 1967.

2. В. А. Лифанов, А. Г. Дорм. Исследование коммутационной реакции якоря в машинах постоянного тока с помощью датчиков Холла. «Электромеханика», 1961, № 3.

3. М. Ф. Карасев и др. Оптимальная коммутация машин постоянного тока. Изд-во «Транспорт», 1967.

4. В. В. Налимов, Н. А. Чернова. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. Изд-во «Наука», 1965.

---