

КОММУТАЦИОННАЯ РЕАКЦИЯ ЯКОРЯ В МАШИНАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ П С РЕГУЛИРУЕМОЙ СКОРОСТЬЮ ВРАЩЕНИЯ

Э. Г. ЧЕБОТКОВ, Ю. П. ГАЛИШНИКОВ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

В машинах постоянного тока обычного исполнения намагничивающая сила коммутационной реакции якоря F_k невелика и составляет около 3—6% от н. с. главного полюса. Однако при глубоком регулировании скорости вращения двигателя путем ослабления главного поля влияние F_k на выходные характеристики машины довольно существенно. Так, на рис. 1 показано изменение скорости вращения в зависимости от настройки коммутации для нормального (кривые I) и ослабленного (кривые II) главного поля при неизменном токе якоря. Кривые получены для двигателя 4-го габарита серии П при изменении характера комму-

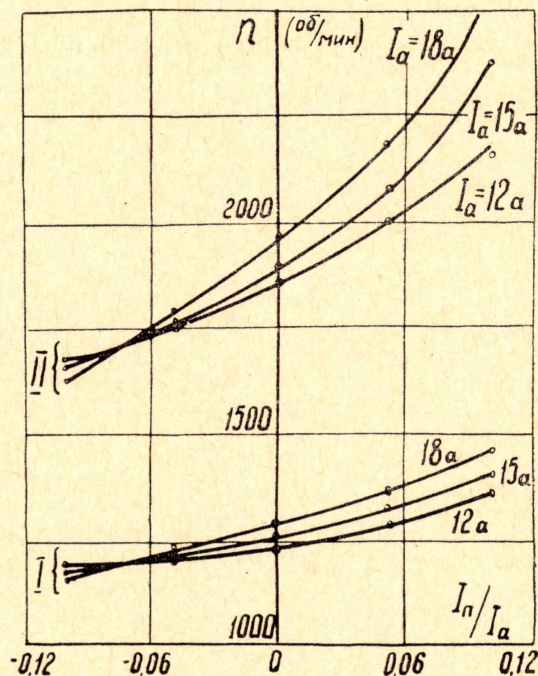


Рис. 1. Влияние н. с. коммутационной реакции якоря на скорость вращения двигателя.

I — при нормальном поле главных полюсов.

II — при ослабленном поле главных полюсов.

тации в пределах зоны безыскровой работы. Как видим, изменение скорости вращения при ослабленном поле достигает 40%. Отсюда ясно, сколь важны определение и учет н. с. коммутационной реакции якоря при регулировании ослаблением поля.

Имеющиеся расчетные методы определения F_k разработаны главным образом применительно к специальным электрическим машинам, например, ЭМУ поперечного поля [1, 2]. Что же касается аналитических методов определения F_k в машинах постоянного тока, то они дают значительную погрешность. К примеру, расчетные значения F_k для 4-полюсного двигателя небольшой мощности, определенные по методу В. Т. Касьянова [3] и Н. М. Немченко [4], отличаются от экспериментальных на 30—70% (табл. 1). Дело объясняется тем, что названные методы не позволяют учесть ряд существенных факторов, в том числе скорость вращения машины.

Таблица 1

I (а)	n [об/мин]	Расчетные значения F_k (а)			Эксперимент
		[3]	[4]	[5]	
12	1250	48	54	5,6	27,5
12	1850	48	54	8,28	37
14	1850	56	63	9,68	41,8

Влияние скорости вращения на величину F_k учитывается выражением, которое было предложено в свое время М. С. Михайловым-Микулинским [5] и имеет следующий вид:

$$F_k = \pm \frac{e_r - e_g}{\Sigma R_{щ}} W_{с-я} = \pm i_{д ср} \cdot W_{с-я}, \quad (1)$$

где $\pm (e_k - e_r)$ — нескомпенсированная э.д.с. секции при коммутации,
 $W_{с-я}$ — среднее число витков секции якоря,
 $i_{д ср}$ — средний добавочный ток коммутации,
 $\Sigma R_{щ}$ — сопротивление контакта щетка-коллектор, определяемое в зависимости от щеточного перекрытия.

Следует отметить, что принятое автором [5] при определении добавочного тока коммутации допущение $R_{щ} = \text{const}$ весьма слабо отвечает современным представлениям о скользящем контакте и, как видно из табл. 1, приводит к значительному расхождению расчетных и экспериментальных данных.

Ниже излагается иной способ расчета среднего значения добавочного тока коммутации и н. с. коммутационной реакции якоря применительно к машинам постоянного тока серии П младших габаритов.

Анализ осциллограмм тока коммутации показывает, что без особой погрешности можно принять синусоидальный закон изменения добавочного тока. Тогда для простой петлевой обмотки изменение добавочного тока под щеткой, например при щеточном перекрытии $\frac{b_{щ}}{b_k} = 3$, можно представить, как на рис. 2. При этом среднее за один оборот коллектора значение добавочного тока в расчете на один полюс машины определяется следующим образом:

$$i_{д ср} = \frac{K}{t_{об}} 2 \int_0^{\pi/2} i_{дм} \sin \omega t dt = 2 \frac{b_{щ} - b_m}{\pi b_k} \cdot i_{дм} = m_1 \cdot i_{дм}, \quad (2)$$

где $i_{дм}$ — амплитудное значение добавочного тока;

K — число коллекторных пластин;

$\omega = \frac{\pi}{T}$ — угловая частота, соответствующая периоду коммутации;

$T = \frac{b_{щ} - b_{м}}{100v_{к}}$ — период коммутации секции;

$b_{м}$ — ширина щетки;

$b_{к}$ — межламельное расстояние;

$v_{к}$ — коллекторное деление.

$t_{об} = \frac{K \cdot b_{к}}{100v_{к}}$ — время 1 оборота коллектора.

$b_{к}$ — коллекторное деление.

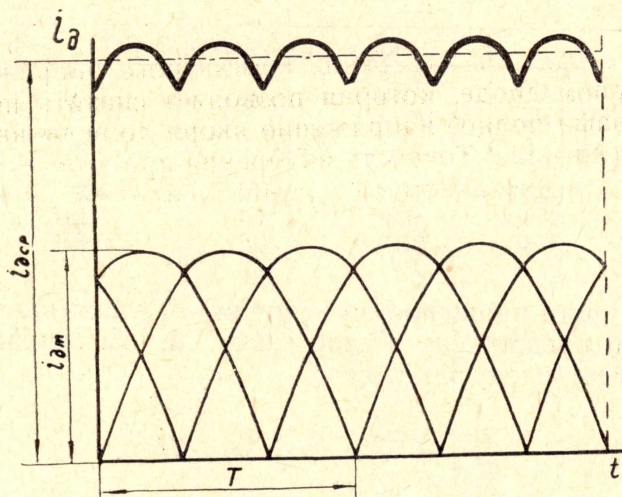


Рис. 2. К определению среднего значения добавочного тока коммутации.

Аналогичное выражение для простой волновой обмотки имеет вид:

$$i_{д\text{ ср}} = 2 \frac{b_{щ} - b_{м} + (b_{к} - \tau + y_{к} b_{к})}{\pi b_{к}} i_{дм} = m_2 i_{дм}, \quad (3)$$

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

$y_{к}$ — шаг обмотки по коллектору.

Таким образом,

$$F_{к} = i_{y_{к\text{ ср}}} \cdot W_{с} = m \cdot i_{дм} W_{с}. \quad (4)$$

В общем случае величина $i_{дм}$ в выражениях (2) и (3) может изменяться в весьма широких пределах в зависимости от настройки коммутации каждой конкретной машины. Однако в подавляющем большинстве случаев коммутация с теми или иными отклонениями соответствует середине зоны безыскровой работы машины, так что в дальнейших рассуждениях под $i_{дм}$ понимается амплитудное значение добавочного тока, соответствующего оптимальной коммутации.

Экспериментальное определение $F_{к}$ проводилось с использованием известного метода М. А. Алябьева, усовершенствованного применением датчиков э.д.с. Холла [7]. Как показал анализ вероятной погрешности при определении $F_{к}$ данным методом, обусловленной смещением средней линии токосъема при реверсе машины и качаниях щетки в колодце

щеткодержателя, ее величина не превышает 8—10%. Все исследования F_k проводились на машине постоянного тока серии П 4-го габарита.

Номинальные данные испытуемой машины

Напряжение питания

320/175 в.

Выходная мощность

3,4/1,4 квт.

Скорость вращения

1875/1250 об/мин.

Ток якоря

14,3/11,8 а.

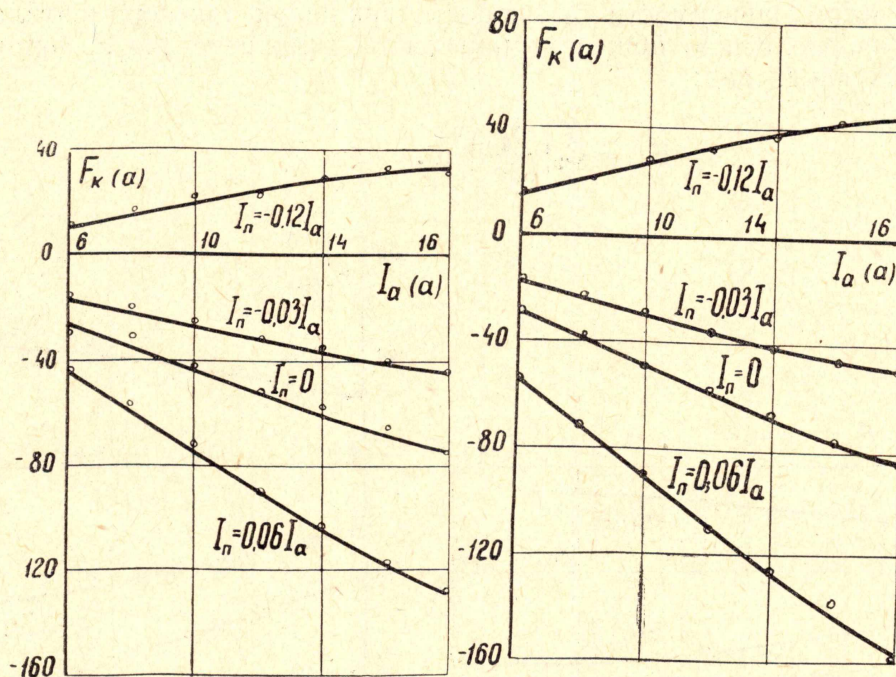


Рис. 3. Зависимость $F_k = F_k(I_a)$ *
 а) скорость вращения 1300 об/мин,
 б) скорость вращения 2000 об/мин.

Измерения F_k производились в различных режимах работы машины при изменении ее скорости вращения от 600 до 2000 об/мин, осуществляемом путем изменения магнитного потока главных полюсов, а также при токах якоря от 6 до 18 а. Опытные значения F_k представлены в масштабе н. с. возбуждения в пересчете на 1 полюс главной магнитной цепи машины.

На рис. 3 (а, б) приведены опытные зависимости F_k от тока якоря, полученные для скорости вращения 1300 и 2000 об/мин при различных токах подпитки дополнительных полюсов. Обработка экспериментальных кривых методом равных площадей дает следующую зависимость:

$$F_k = C_1 \left(\frac{I_a}{2a} \right)^\eta, \quad (5)$$

где I_a — ток якоря,

a — число пар параллельных ветвей обмотки якоря,

C_1 — величина, изменяющаяся для различных скорости вращения и тока подпитки дополнительных полюсов.

Показатель степени $0 < \eta < 1$ в выражении (5) практически постоянен при имевшихся условиях опыта и равен в данном случае 0,97. Таким образом, зависимость F_k от тока якоря отнюдь не прямолинейна, как это вытекает из выражения (1). Это объясняется, по-видимому, тем обстоятельством, что сопротивление щеточного контакта не остается по-

стоянным при изменении тока якоря и, соответственно, плотности тока в скользящем контакте. Убедительным подтверждением последнего являются кривые 1 и 2, приведенные в [6] на рис. 2 (а, б), которые получены при номинальной плотности тока в контакте 6 и 12 а/см², соответственно. Следует отметить, что при определении F_k контактная плотность тока не превышала 4 а/см², чем и объясняется сравнительно слабая нелинейность зависимости $F_k(I_a)$. Ясно, что чем больше номинальная плотность тока в щеточном контакте, тем сильнее η в выражении (5) должно отличаться от 1.

С учетом зависимости от скорости вращения (экспериментальные кривые на рис. 3 и 4) общее эмпирическое выражение для F_k приобретает следующий вид:

$$F_k = C_2 \left(\frac{I_a}{2a} \right)^\eta n^\alpha. \quad (6)$$

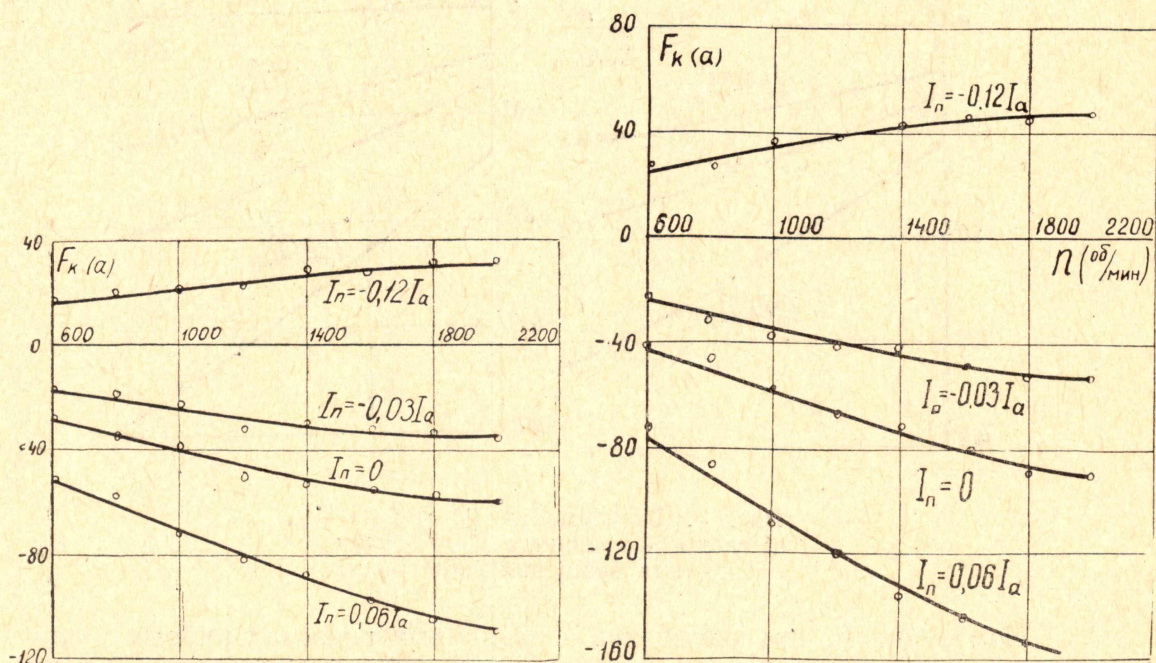


Рис. 4. Зависимость $F_k = F_k(n)$.
а) ток якоря 12 а,
б) ток якоря 18 а.

Показатель степени α , полученный при обработке экспериментальных данных, равен 0,6. Итак, несмотря на прямую пропорциональность между $e_{дез} = e_k - e_r$ и скоростью вращения машины, при росте последней F_k , а следовательно, и добавочный ток коммутации увеличиваются нелинейно. Отсюда с очевидностью вытекает, что суммарное сопротивление щеточного контакта увеличивается с повышением скорости вращения коллектора. Этим еще раз подтверждается, что естественная динамическая вольт-амперная характеристика скользящего контакта тесно связана с условиями его формирования. В самом деле, при увеличении скорости вращения время формирования контактной проводимости пропорционально уменьшается, что ведет в результате к увеличению удельного контакта сопротивления.

Выражение (6) запишем в виде:

$$F_k = C_2 \left(\frac{I_a}{2a} \right)^\eta n \cdot n^{\alpha-1}, \quad (7)$$

что после несложных преобразований дает

$$F_k = C_4 \left(\frac{I_a}{2a} \right)^\eta \frac{D_a}{D_k^{1-\kappa}} n^\kappa. \quad (8)$$

Из сопоставления (4) и (8) получаем

$$i_{dm} = C \left(\frac{I_a}{2a} \right)^\eta \frac{D_a}{D_k^{1-\kappa}} n^\kappa W_c, \quad (9)$$

где численное значение $C = 0,208 \cdot 10^3$.

Таким образом, общее выражение F_k имеет вид:

$$F_k = mC \left(\frac{I_a}{2a} \right)^\eta \frac{D_a}{D_k^{1-\kappa}} n^\kappa W_c, \quad (10)$$

для простой петлевой обмотки

$$m_1 = 2 \frac{b_{ш} - b_m}{\pi b_k}, \quad (11)$$

а для простой волновой обмотки

$$m_2 = 2 \frac{b_{ш} - b_m + (b_k - \tau + y_k b_k)}{\pi b_k}. \quad (12)$$

Коэффициенты η и κ в выражении (10) определяются характеристиками щеточного контакта. Определенные опытным путем для щетки ЭГ-4Э при номинальной плотности тока $1,5-4$ а/см², эти коэффициенты равны соответственно 0,97 и 0,6.

Итак, исходя из оптимальной коммутации, получено расчетное выражение для F_k , которое может быть использовано при определении н. с. коммутационной реакции якоря машин постоянного тока небольшой мощности, работающих с большим диапазоном изменения скорости вращения при номинальной плотности тока в щеточном контакте $1,5-4$ а/см². Значения коэффициентов C , η , κ , соответствующих более высоким плотностям тока в контакте, будут получены в ходе дальнейших экспериментальных исследований коммутационной реакции якоря.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Радин. Реакция коммутационных токов в ЭМУ с поперечным полем. Электричество, № 9, 1957.
2. А. И. Скороспешкин. К вопросу реакции коммутационных токов в электромашинных усилителях с поперечным полем. ИВУЗ, Электромеханика, № 12, 1958.
3. В. Т. Касьянов. Реакция якоря машины постоянного тока. ВЭП, № 2, 1940.
4. Н. М. Немченко. Новый способ расчета реакции добавочных токов. Труды Кубанского с/х института, вып. 2, 1955.
5. М. С. Михайлов-Микулинский. Реакция добавочного тока коммутации на главное поле машины постоянного тока. ВЭП, № 7, 1949.
6. Ю. П. Галишников, А. И. Скороспешкин. Естественные вольт-амперные характеристики скользящего контакта угольная щетка-коллектор. Известия ТПИ, том 172, 1967.
7. В. А. Лифанов, А. Г. Дорм. Исследование коммутационной реакции якоря в машинах постоянного тока с помощью датчиков Холла. ИВУЗ, Электромеханика, № 3, 1961.