

Ю. П. ГАЛИШНИКОВ, А. И. СКОРОСПЕШКИН

## К РАСЧЕТУ КОММУТАЦИИ И КОММУТАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ЭВМ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Основная цель расчета коммутации МПТ состоит, как известно, в нахождении реактивной э.д.с., согласно которой определяются параметры дополнительных полюсов. Однако не менее важной задачей является расчет коммутационной устойчивости машины на стадии ее проектирования. Значение подобного расчета трудно переоценить, особенно при проектировании высокоиспользованных машин. Тем не менее предложенные к настоящему времени методы уточненного расчета не нашли широкого практического применения прежде всего по той причине, что принятые посылки о поведении щеточного контакта при коммутации не имеют достаточно глубокого физического обоснования и, как следствие, ведут к значительным расхождениям между расчетными и опытными данными.

Одна из первых попыток практического применения ЭВМ для расчета коммутации МПТ изложена в работе Альджера и Бьюли [1]. В качестве основного критерия для оценки качества коммутации здесь принята величина межламельного напряжения, что само по себе представляется правильным. Однако расчет этого напряжения производится при допущении постоянства контактного сопротивления. Последнее противоречит результатам экспериментального исследования характеристик скользящего контакта и, в частности, данным, изложенным авторами в предыдущей статье настоящего сборника.

Известна также работа [2], посвященная принципам моделирования процесса коммутации МПТ на аналоговой машине. При моделировании использована статическая вольт-амперная характеристика щеточного контакта, хотя, как отмечалось в [4], подобная характеристика описывает скользящий контакт лишь при равномерном распределении тока по лицевой поверхности щетки, что имеет место только при прямолинейной коммутации, тогда как на практике подавляющее большинство машин постоянного тока работает в режиме перекоммутации.

Наконец, одной из самых последних по времени ее появления является работа О. Г. Вегнера [3]. Расчет зоны безыскровой работы приводится здесь на базе основного допущения автора  $\Delta U_{щ} = \text{const}$ . Следует отметить, что удобство и наглядность принятого автором способа аппроксимации динамических характеристик скользящего контакта отнюдь не компенсируют вероятную погрешность расчетов, поскольку в расчет вводится, по существу, частная вольт-амперная характеристика.

Обычным в практике расчетов и моделирования коммутации на ЭВМ является использование некоторой вольт-амперной характеристики,

получаемой путем усреднения характеристик анодно- и катодно-поляризованной щеток, что далеко не справедливо. В самом деле, анализ экспериментального материала для щеток ЭГ-4Э показывает, что расхождение между напряжениями, соответствующими анодной и катодной щеткам, достигает относительных значений 1,5 и выше.

Ясно, таким образом, что усреднение характеристик, а также использование статических или полученных в произвольных токовых условиях динамических вольт-амперных характеристик, резко снижает точность проводимых расчетов. Потенциальные возможности ЭВМ в этом отношении остаются нереализованными, а сами расчеты не могут претендовать на точное количественное решение. С другой стороны, некоторое усложнение расчета при использовании истинных характеристик контакта, обусловленное сложностью самого исследуемого процесса, не является непреодолимым препятствием при современном уровне вычислительной техники.

Предлагаемый в настоящей статье способ расчета коммутации и коммутационной устойчивости МПТ базируется на использовании семейства частных естественных вольт-амперных характеристик щеточного контакта, полученных экспериментально при широком изменении условий формирования контакта и соответствующим образом обработанных. Более подробно эти характеристики рассмотрены в предыдущей статье. Расчетный вариант выражения обобщенной вольт-амперной характеристики выглядит следующим образом:

$$U = \left( C_1 - C_2 \frac{j_0 - j_{t_k}}{t_k} \right) \cdot j^m, \quad (1)$$

где  $C_1$  и  $C_2$  — постоянные коэффициенты,  
 $j_0$  — плотность тока в контакте в начале контактирования,  
 $j_{t_k}$  — плотность тока через  $t_k$  мксек после начала контактирования,  
 $t_k$  — коллекторный период.  
 Соответствующие графики для

$$U_0 = C_1 - C_2 \frac{j_0 - j_{t_k}}{t_k} \quad (2)$$

приведены на рис. 1. Коэффициент  $m$  в выражении (1) для анодно- и катодно-поляризованной щеток равен соответственно 0,3 и 0,4.

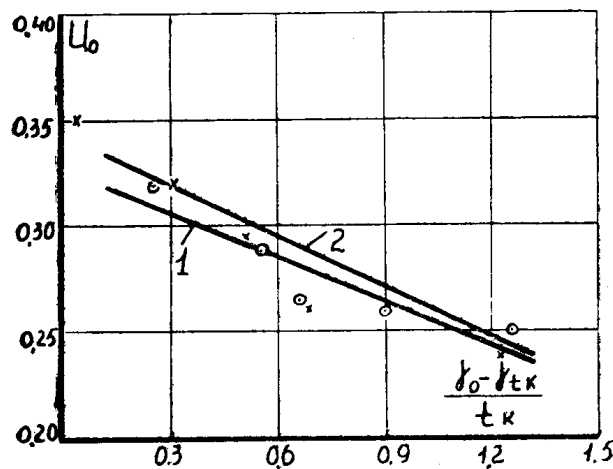


Рис. 1. Зависимость  $U_0 = U_0 \left( \frac{j_0 - j_{t_k}}{t_k} \right)$  для щеток ЭГ-4Э

В качестве примера рассмотрим составление дифференциальных уравнений коммутируемых секций для 2-полюсного двигателя постоянного тока небольшой мощности. Обмотка якоря — простая петлевая с диаметральным шагом. В одном реальном пазу — 4 элементарных. Число одновременно перекрываемых щеткой пластин 3.

В табл. 1 приведены токи секций, коммутируемых одновременно анодной и катодной щетками.

Таблица 1

Щетка	Слой паза	0— $t_k$	$t_k$ — $2t_k$	$2t_k$ — $3t_k$	$3t_k$ — $4t_k$	$4t_k$ — $5t_k$	$5t_k$ — $6t_k$
+	нижний	$i_1$	$i_1 i_2$	$i_1 i_2 i_3$	$i_2 i_3 i_4$	$i_3 i_4$	$i_4$
	верхний	$i_1'$	$i_1' i_2'$	$i_1' i_2' i_3'$	$i_2' i_3' i_4'$	$i_3' i_4'$	$i_4'$
—	нижний	$i_1'$	$i_1' i_2'$	$i_1' i_2' i_3'$	$i_2' i_3' i_4'$	$i_3' i_4'$	$i_4'$
	верхний	$i_1$	$i_1 i_2$	$i_1 i_2 i_3$	$i_2 i_3 i_4$	$i_3 i_4$	$i_4'$

Индексы 1, 2, 3, 4 относятся к секциям, коммутируемым анодной щеткой.

Индексы 1', 2', 3', 4' относятся к секциям, коммутируемым катодной щеткой.

Система дифференциальных уравнений контуров, коммутируемых щетками обеих полярностей за период от 0 до  $6t_k$ , имеет вид:

$$\begin{aligned}
 L \frac{di_1}{dt} + M_{HH} \left( \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} \right) + M_{BH} \left( \frac{di_1'}{dt} + \frac{di_2'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} \right) &= \\
 &= e_{K1}(t) - R_{c1}i_1 - \Delta U_2 + \Delta U_1. \\
 L \frac{di_2}{dt} + M_{HH} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_3}{dt} + \frac{di_4}{dt} \right) + M_{BH} \frac{di_1'}{dt} + \frac{di_2'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} + \frac{di_4'}{dt} &= \\
 &= e_{K2}(t) - R_{c2}i_2 - \Delta U_3 + \Delta U_2. \\
 L \frac{di_3}{dt} + M_{HH} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_4}{dt} \right) + M_{BH} \left( \frac{di_1'}{dt} + \frac{di_2'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} + \frac{di_4'}{dt} \right) &= \\
 &= e_{K3}(t) - R_{c3}i_3 - \Delta U_4 + \Delta U_3. \\
 L \frac{di_4}{dt} + M_{HH} \left( \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} \right) + M_{BH} \left( \frac{di_2'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} + \frac{di_4'}{dt} \right) &= \\
 &= e_{K4}(t) - R_{c4}i_4 - \Delta U_5 + \Delta U_4. \tag{3} \\
 L \frac{di_1'}{dt} + M_{HH} \left( \frac{di_2'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} \right) + M_{BH} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} \right) &= \\
 &= e_{K1}'(t) - R_{c1}'i_1' - \Delta U_2' + \Delta U_1'. \\
 L \frac{di_2'}{dt} + M_{BH} \left( \frac{di_1'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} + \frac{di_4'}{dt} \right) + M_{BH} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \right. & \\
 \left. + \frac{di_3}{dt} + \frac{di_4}{dt} \right) &= e_{K1}'(t) - R_{c1}'i_2' - \Delta U_3' + \Delta U_2'. \\
 L \frac{di_3'}{dt} + M_{HH} \left( \frac{di_1'}{dt} + \frac{di_2'}{dt} + \frac{di_4'}{dt} \right) + M_{BH} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \right. & \\
 \left. + \frac{di_3}{dt} + \frac{di_4}{dt} \right) &= e_{K1}'(t) - R_{c1}'i_3' - \Delta U_4' + \Delta U_3'. \\
 L \frac{di_4'}{dt} + M_{BH} \left( \frac{di_1'}{dt} + \frac{di_2'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} \right) + M_{BH} \left( \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} + \right. & \\
 \left. + \frac{di_3}{dt} + \frac{di_4}{dt} \right) &= e_{K1}'(t) - R_{c1}'i_4' - \Delta U_5' + \Delta U_4'.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{di_3}{dt} + \frac{di_4}{dt} \Big) = e_{к3}'(t) - R_c \cdot i_3' - \Delta U_4' + \Delta U_3' \\
L \frac{di_4'}{dt} + M_{\text{нн}} \left( \frac{di_1'}{dt} + \frac{di_3'}{dt} \right) + M_{\text{вн}} \left( \frac{di_2}{dt} + \frac{di_3}{dt} + \frac{di_4}{dt} \right) = \\
& = e_{к4}'(t) - R_c \cdot i_4' - \Delta U_5' + \Delta U_4'
\end{aligned}$$

Для всыпной обмотки без большой погрешности можно принять  $L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L_1' = L_2' = L_3' = L_4' = L$ . Коэффициент  $M_{\text{нн}}$  характеризует взаимоиндуктивную связь между секциями, стороны которых расположены в одинаковых слоях паза. В данном случае опытное значение  $M_{\text{нн}} = 0,7-0,8L$ . Для секций, стороны которых лежат в разных слоях паза (секции, коммутируемые щетками разной полярности),  $M_{\text{вн}} = 0,3-0,4L$ . При циклическом методе расчета система уравнений (3) может быть легко сведена к 6 уравнениям с соответствующим количеством неизвестных величин.

Как известно, коммутация машины в целом определяется поведением самостоятельно коммутируемых секций якоря. Согласно определению [6], самостоятельными называют секции, заканчивающие коммутировать в отсутствие короткозамкнутых контуров, имеющих с первыми тесную магнитную связь. Для простой петлевой обмотки с диаметральной шаг самостоятельной является каждая последняя секция паза, поскольку ее магнитная связь с замкнутыми накоротко в этот период времени секциями соседнего паза весьма слаба. Самостоятельно коммутируемые секции якоря весьма критичны к величине и распределению поля дополнительного полюса. Таким образом, для определения коммутационной устойчивости машины необходимо и достаточно оценить поведение каждой четвертой секции паза.

В соответствии с этим в качестве критерия для оценки качества коммутации авторами принято падение напряжения между щеткой и коллекторной пластиной, выходящей из состояния контакта со щеткой при разрыве последней секции паза. В уравнениях (3) эта величина для анодной и катодной щеток обозначена как  $\Delta U_4$  и  $\Delta U_4'$ .

Анализ осциллограмм контактного падения напряжения показывает, что искрению 1 1/4—1 1/2 балла соответствует напряжение под сбегавшей частью щетки, равное примерно 4 в. Аналогичное значение напряжения искрения, как слабой формы дуги, приводится в работе [5], посвященной экспериментальному исследованию искрения и дугообразования в коллекторных машинах. Таким образом, контактное напряжение 4 в может с достаточным основанием характеризовать границы зоны безыскровой работы машины. Условием оптимальной коммутации в этом случае является равенство нулю потенциала (относительно щетки) коллекторной пластины, связанной с последней секцией паза и выходящей из состояния контакта со щеткой в момент завершения коммутации этой секции.

Резюмируя, следует отметить, что в данной работе предлагается новый способ уточненного расчета коммутации и коммутационной устойчивости МПТ, основанной на использовании естественных вольт-амперных характеристик щеточного контакта, полученных экспериментально для широкого диапазона изменения условий коммутации и представленных в виде аналитических выражений, которые описывают семейства частных кривых для анодно- и катодно-поляризованной щеток по раздельности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. I. Alger, D. Bewley. Анализ коммутации машин постоянного тока, *Power Appar. and Syst.*, 31, 1957.
2. В. М. Синельников, А. Г. Назикян, В. В. Клейменов, В. И. Чернявский. Применение счетных машин непрерывного действия для исследования коммутации машин постоянного тока. *Известия вузов, «Электромеханика»*, 1960, № 10.
3. О. Г. Вегнер. Расчет процесса коммутации и ширины области безыскровой работы машин постоянного тока при помощи ЭЦВМ. *Известия вузов, «Электромеханика»*, 1966, 4.
4. Ю. П. Галишников, А. И. Скороспешкин. К вопросу о неустойчивости динамических вольт-амперных характеристик скользящего контакта угольная щетка—коллектор. *Известия ТПИ*, том 160, 1967.
5. B. Swinerton, M. Turner, I. Thompson. Дугообразование в переходном слое между графитом и медью, *Conf. Commut. Rotat. Mach.*, London, 1964.
6. L. Dreyfus. Коммутация крупных машин постоянного тока. Теория коммутационных нарушений, *Acta Polytechnica*, 1954.