

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИИ ЭМУ ПОПЕРЕЧНОГО ПОЛЯ С ГЛАДКИМ ЯКОРЕМ

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Б. И. КОСТЫЛЕВ, Г. Г. КОНСТАНТИНОВ

(Рекомендована семинаром кафедр электрических машин  
и общей электротехники)

Многочисленные исследования коммутации коллекторных электрических машин показывают, что из большого числа факторов, влияющих на коммутационный процесс, основными являются электромагнитные. При удовлетворительном механическом состоянии коллекторно-щеточного узла именно электромагнитные факторы приводят к неидентичности коммутации отдельных секций, расположенных в одном пазу. Это существенно ограничивает настройку коммутации, так как воздействие коммутирующего поля должно быть не одинаковым для различных секций. Кроме того, расположение секций в пазах приводит к тому, что секции обладают значительной индуктивностью, а следовательно, и реактивной э. д. с. во время коммутации.

Указанные особенности можно исключить или существенно ослабить, если изготовить якорь коллекторной машины гладким [1]. В этом случае параметры всех секций будут одинаковыми, то есть электромагнитные причины неидентичности исключаются, а индуктивности секций значительно уменьшаются.

Так как коммутационный процесс в машине с гладким якорем принципиально протекает так же, как и в машине с зубчатым якорем, то для исследования его можно применить методы, проверенные на обычных коллекторных машинах.

Нами были проведены аналитические и экспериментальные исследования коммутации трех моделей ЭМУ поперечного поля с гладким якорем. Некоторые результаты этих исследований и приводятся в настоящей работе.

Модели выполнялись на базе стандартного электромашинного усилителя типа ЭМУ-12. Две с асинхронным приводом, имеющие скорость вращения  $n=2900$  об/мин., минимальную мощность  $0,7$  квт, номинальное напряжение  $30$  и  $60$  в и соответственно число витков в секции  $1$  и  $2$ . Третья модель с приводом постоянного тока имеет скорость вращения  $3500$  об/мин., мощность  $1$  квт, напряжение  $115$  в и  $3$  витка в секции. Коллекторно-щеточный узел для всех трех моделей взят от стандартного ЭМУ без изменений, то есть коллектор имеет  $87$  ламелей, щетки марки ЭГ-8 размером  $5 \times 15$  мм по две на щеточный болт, щеточное перекрытие  $\beta=1,5$ . Обмотка для всех моделей простая петлевая, так как усилители имеют двухполюсное исполнение.

Аналитическое исследование коммутации в ЭМУ с гладким якорем проводилось по методике [2], предложенной для расчета коммутации коллекторных машин с зубчатым якорем. Аналитические методы расчета коммутации с учетом взаимоиндуктивных связей и нелиней-

ности щеточного контакта, которые, к сожалению, к настоящему времени не отработаны, имеют очень большое значение при проектировании коллекторных электрических машин. Такие методы, дающие достаточную достоверность, позволили бы прогнозировать коммутационную надежность машины во время проектирования, определить электромагнитные загрузки, параметры секций, марку щеток с точки зрения обеспечения удовлетворительной коммутации.

Учитывая сложность коммутационного процесса, можно с полной уверенностью сказать, что эти методы расчета осуществимы только с использованием электронных вычислительных машин. В последнее время появились работы, посвященные расчету коммутации на аналоговых и цифровых вычислительных машинах [2, 3, 4]. Естественно, ряд положений этих методов расчета должен быть проверен на многих машинах, а сами методики должны быть окончательно отработаны таким образом, чтобы могли использоваться проектировщиками коллекторных электрических машин.

Наиболее объективную оценку методов расчета может дать только опыт. Поэтому в настоящее время необходимы многочисленные аналитические и экспериментальные исследования коммутации различных машин, чтобы завершить начатую работу по аналитическому решению коммутационного процесса.

Методика составления дифференциальных уравнений коммутации принципиально во всех методиках одинакова и подробно изложена в [2, 3, 4]. Алгоритм и программа расчета коммутации ЭМУ, принятые при исследованиях, описаны в [2]. Программа рис. 1 очень проста и универсальна, успешно может применяться для расчета коммутации как машин постоянного тока, так и переменного тока. Система урав-

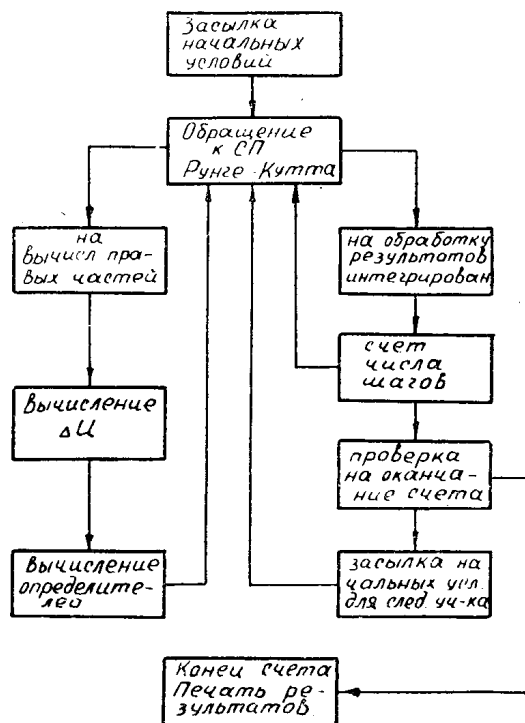


Рис. 1. Блок-схема программы расчета процесса коммутации.

нений решается методом Рунге-Кутты, так как он относительно прост, дает достаточную точность вычислений, кроме того, для него имеется стандартная подпрограмма для ЭЦВМ «Минск-1».

Вольт-амперная характеристика щеточного контакта аппроксимируется показательной функцией вида

$$\Delta U = aj^k,$$

где  $\Delta U$  — падение напряжения в щеточном контакте,

$j$  — плотность тока в щеточном контакте,

$a$  и  $k$  — коэффициенты аппроксимирующего выражения.

Для исследуемых усилителей временная диаграмма коммутации представлена на рис. 2. При этом предполагается, что коммутация

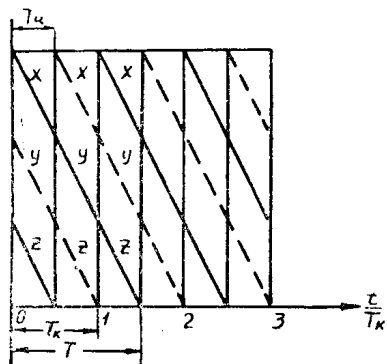


Рис. 2. Временная диаграмма коммутации:

$T_{ц}$  — расчетный цикл коммутации,

$T_{к}$  — коллекторный период,

$T_{ц}$  — время замыкания секций щетками.

под анодной и катодной щетками протекает одинаково. Так как в гладком якоре можно считать, что число элементарных пазов равно числу реальных, то есть  $u_{п} = 1$ , то согласно [2] расчетный цикл будет равен

$$T_{ц} = u_{п} \frac{T_{к}}{2} = \frac{T_{к}}{2},$$

где  $u_{п}$  — число секционных сторон в пазу,

$T_{к}$  — время, соответствующее повороту якоря на одно коллекторное деление.

Действительно, в гладком якоре коммутация всех секций протекает одинаково и, как следует из временной диаграммы рис. 2, достаточно просчитать кривые тока коммутации трех секций на интервале  $\frac{T_{к}}{2}$ ,

что дает полное представление о всей кривой тока за время  $1,5 T_{к}$ .

Система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$L \frac{dx}{dt} + M_{вн} \frac{dy}{dt} + M \frac{dz}{dt} = \Sigma e - R_x - \Delta U_1 + \Delta U_2,$$

$$L \frac{dy}{dt} + M_{вн} \frac{dx}{dt} + M \frac{dz}{dt} = \Sigma e - R_y - \Delta U_3 + \Delta U_4,$$

$$L \frac{dz}{dt} + M_{вн} \frac{dy}{dt} + M \frac{dx}{dt} = \Sigma e - R_z - \Delta U_5 + \Delta U_1.$$

где  $R$  — сопротивление секции;

$L$  — индуктивность коммутируемых секций;

$M_{вн}$  — взаимоиндуктивность между секциями, коммутируемыми противоположными щетками;

$M$  — взаимоиндуктивность между секциями, коммутируемыми одной щеткой;

$\Sigma e$  — суммарная э. д. с. вращения коммутируемой секции;

$\Delta U_1 \div \Delta U_5$  — падения напряжения в щеточном контакте.

Расчеты проводятся, исходя из приближенных начальных условий, которые определяются из прямолинейной кривой тока коммутации.

Вычисленные значения токов в конце интервала служат начальными условиями для следующего интервала или для рассматриваемого примера начальными условиями второго приближения. Расчет проводится несколько раз (не более 3—4), пока не будет получена достаточная сходимость результатов двух последовательных одинаковых интервалов.

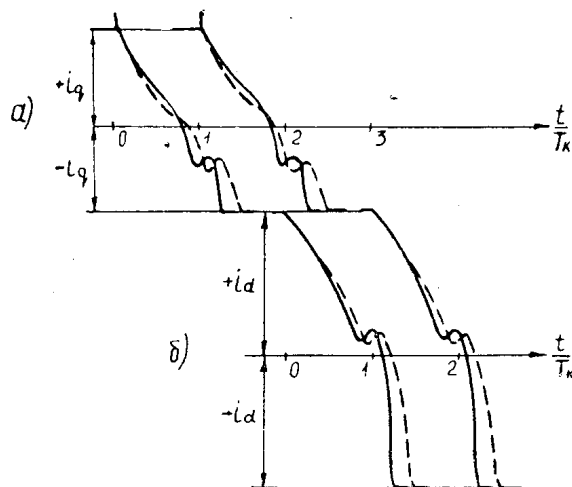


Рис. 3. Расчетные (пунктирные линии) и экспериментальные (сплошные линии) кривые тока:  
 а — для поперечной цепи при  $I_q = 5,6$  а;  
 б — для продольной цепи при  $I_d = 8,7$  а.

На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные кривые тока коммутации в продольной и поперечной цепях третьей модели ЭМУ.

Исходные данные для расчета:

$$R = 0,19 \text{ ом}; L = 4 \cdot 10^{-6} \text{ гн}; M = 3,4 \cdot 10^{-6} \text{ гн}; M_{\text{вн}} = 1,29 \cdot 10^{-6} \text{ гн}; \\ \Delta U = (0,5j)^{0,5}$$

$\Sigma e = 0$  для коммутируемых секций продольной цепи,

$\Sigma e = 0,935$  для секций поперечной цепи.

Ток продольной цепи  $I_{\text{дн}} = 8,7$  а; поперечной цепи —  $I_{\text{qn}} = 5,6$  а.

Выражение вольт-амперной характеристики получено при аппроксимации опытной характеристики для щеток ЭГ-8, снятой на замкнутном коллекторе стандартного ЭМУ-12А. Остальные параметры определены расчетным путем по существующим методикам, так как при проектировании машины это единственный путь их определения. Определение же параметров опытным путем возможно в изготовленной машине, что не соответствует основной задаче расчета коммутации в процессе проектирования.

Осциллографирование кривых тока коммутируемых секций и поля производилось при помощи бифилярных витков.

Сравнение кривых тока на рис. 3 показывает удовлетворительную сходимость расчета и опыта, особенно в характере кривых. В основном, расхождения обусловлены несоответствием действительного периода коммутации расчетному за счет неустойчивости контакта на завершающем этапе. Поэтому в дальнейшем предполагается ввести в расчет уменьшение времени контактирования на основании вероятностных методов. Нарушение плавности кривой изменения тока обусловлено магнитными связями между секциями и соответствует моменту вступления или выхода другой секции из процесса коммутации.

Из кривых тока рис. 3 также видно, что характер изменения тока в секциях близок к прямолинейному. Несколько большее отклонение кривых в сторону замедления наблюдается для поперечной цепи, что

объясняется действием э. д. с. вращения от поля реакции якоря. Если судить по кривым тока, то коммутация должна проходить вполне удовлетворительно. Наблюдения за искрением и состоянием щеточного контакта при эксперименте также подтверждают это. При номинальной нагрузке усилителя искрение под щетками совершенно отсутствует. Даже при многократных перегрузках в первых двух моделях отсутствует искрение, а в третьей не превышает 1 балла по шкале ГОСТ, хотя плотность тока под щеткой значительно превышает номинальную.

Исследования показали, что в рассмотренных усилителях с гладким якорем отпадает необходимость в добавочных полюсах по продольной оси, поэтому в первой и третьей моделях они были удалены. В этом случае также и компенсационная обмотка не играет роль фактора, существенно влияющего на коммутацию, как это имеет место в стандартных усилителях [5].

Аналитические и экспериментальные исследования еще раз подтвердили, что электромагнитные факторы являются одними из основных. Поэтому в коллекторных машинах прежде всего должны быть обеспечены соответствующие электромагнитные условия коммутации, и предложенная методика расчета, по нашему мнению, вполне может способствовать этому.

### Выводы

1. Проведенные исследования подтверждают возможность применения предлагаемой методики расчета коммутации в процессе проектирования коллекторных электрических машин.

2. Электромагнитные условия коммутации являются определяющими и их необходимо обеспечивать при проектировании машины.

3. Замена зубчатого якоря коллекторных электрических машин гладким, несомненно, значительно повышает их коммутационную надежность как с точки зрения снижения индуктивности секций, так и с точки зрения идентичности коммутационных циклов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Скороспешкин, Ю. А. Степанов. ЭМУ поперечного поля с гладким якорем. *Электромеханика*, № 10, 1964.

2. Б. И. Костылев. Исследования ЭМУ поперечного поля при работе с переменным сигналом управления. Диссертация, Томск, 1965.

3. Е. М. Синельников, А. Г. Назикян, В. В. Клейменов, Ф. И. Чернявский. Применение счетных машин непрерывного действия для исследования коммутации машин постоянного тока, *Электромеханика*, № 10, 1960.

4. О. Г. Вегнер. Расчет процесса коммутации и ширины области безыскровой работы машин постоянного тока при помощи ЭЦВМ, *Электромеханика*, № 4, 1966.

5. А. И. Скороспешкин. О коммутации электромашинных усилителей с поперечным полем. *Электромеханика*, № 6, 1959.