

## О НЕКОТОРЫХ ВОПРОСАХ КОММУТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

А. И. СКОРОСПЕШКИН, Б. И. КОСТЫЛЕВ, Ю. П. ГАЛИШНИКОВ

(Рекомендовано семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники.)

В современных условиях развития коллекторных электрических машин проблема коммутации выступает наиболее остро. Это связано с повышением электромагнитных нагрузок, увеличением скорости вращения, предъявлением более жестких эксплуатационных требований с работой в самых различных условиях.

Хотя проблема коммутации является старой, она возникает, как правило, всегда в новом аспекте. Это происходит потому, что коллекторные электрические машины имеют сложную систему цепей. Кроме того, процесс коммутации отличается сложностью и потому, что на работу скользящего контакта влияют самые разнообразные факторы (материал щетки, коллектора, особенности конструкции, характер нагрузки, механические факторы и др.).

Уравнения коммутации содержат нелинейности. Поэтому их трудно изучить до конца аналитическим методом. В целом сложность коммутационного процесса затрудняет аналитические и экспериментальные исследования. Поэтому к настоящему времени нет общепризнанных аналитических и экспериментальных решений проблемы коммутации. Да их, по всей вероятности, трудно и дать, так как отдельные виды машин и условия их работы имеют свои специфические особенности, которые нужно учитывать в каждом конкретном случае.

Следует отметить, что исследования коммутации во многих случаях проводились на моделях. Модели имитируют коммутационный процесс и вместе с тем дают возможность разделить влияние отдельных факторов, так что исследование процесса коммутации облегчается. Но дело в том, что результаты, полученные на моделях, зачастую расходятся с результатами, полученными на реальных машинах. Это вызывает дискуссии, порой не приносящие ощутимой пользы.

При аналитическом исследовании процесса коммутации основная трудность заключается в правильном определении переходного сопротивления щеточного контакта.

Получившая к настоящему времени наибольшее применение классическая теория коммутации, в основу которой положено допущение о постоянстве удельного переходного сопротивления щеточного контакта имеет существенные недостатки, что, естественно, приводит к необходимости поисков новых путей в исследовании коммутации. К числу недостатков относятся трудность и невозможность расчетов в случае  $v_{щ} > v_k$  неучет неравенства действительного и расчетного перио-

дов коммутации и др. Следствием этого является необходимость практической корректировки и отладки коммутации машин после их изготовления.

Из других аналитических закономерностей, медленно пробивающих себе дорогу, заслуживают внимания уравнения, полученные О. Г. Вегнером на основе допущения  $\Delta U_{щ} = \text{const}$ . Эти уравнения обеспечивают получение кривой со ступенью малого тока. Весьма заманчиво добиться такого изменения тока, когда на завершающем этапе ток разрыва отсутствует, и сбегаящий край щетки работает без токовой нагрузки. Но основная трудность заключается в получении ступени малого тока. Для этого необходимы соответствующее распределение коммутирующего поля, обмотки и определенный сорт щеток. И тем не менее допущение  $\Delta U_{щ} = \text{const}$  и полученные на его основе уравнения имеют физическое и логическое обоснование. Поэтому, на наш взгляд, уравнения О. Г. Вагнера, как частный случай, применимы к определенному типу машин и условиям работы, но не могут претендовать на всеобъемлющее решение проблемы коммутации.

Наиболее перспективным и позволяющим полнее отразить физическую сторону коммутационного процесса, по нашему мнению, является исследование на основе учета зависимости удельного переходного сопротивления щеточного контакта от плотности тока.

Какие зависимости  $r_{щ} = f(j)$  в осях координат  $r_{щ}, j$  имеют место?

Если провести прямую линию 1, параллельную оси абсцисс (рис. 1), можно видеть, что она соответствует классической теории, в которой

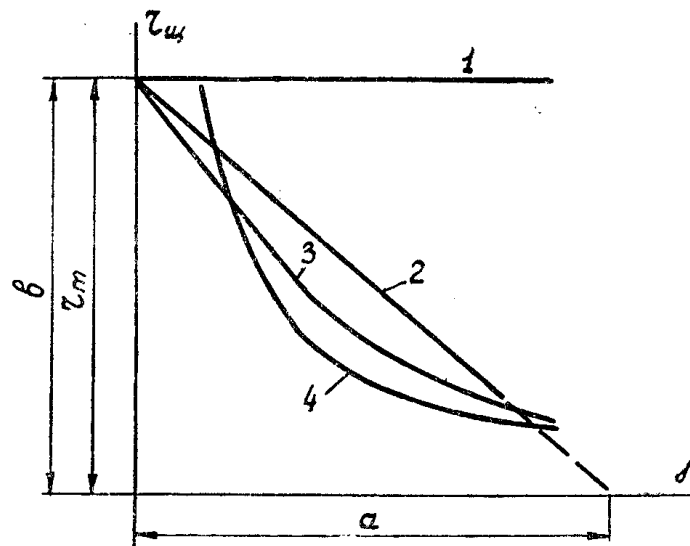


Рис. 1. Виды возможных зависимостей  $r_{щ} = f(j)$ .

принято  $r_{щ} = \text{const}$ . Далее одной из возможных является зависимость, которую можно выразить уравнением прямой линии в отрезках

$$\frac{j}{a} + \frac{r_{щ}}{b} = 1, \quad (1)$$

где  $r_{щ}, j$  — текущие значения переходного сопротивления щеточного контакта и плотности тока,

$a, b$  — постоянные величины.

Другая возможная зависимость  $r_{щ} = f(j)$  может быть определена экспонентой

$$r_{щ} = r_m \cdot e^{-k \cdot j}, \quad (2)$$

где  $r_m$  — максимальное значение переходного сопротивления,  
 $k$  — коэффициент, определяемый характером экспоненты.  
 Еще одной зависимостью является гиперболическая

$$r_{ш} = \frac{a' \cdot b'}{j}. \quad (3)$$

Здесь  $a', b'$  — постоянные величины.

Дифференциальное уравнение для коммутируемого контура (рис. 2) записывается в следующем виде:

$$L_c \frac{di}{dt} + i \cdot r_c + i_2 \cdot r_2(j_2) - i_1 \cdot r_1(j_1) = \pm e_k. \quad (4)$$

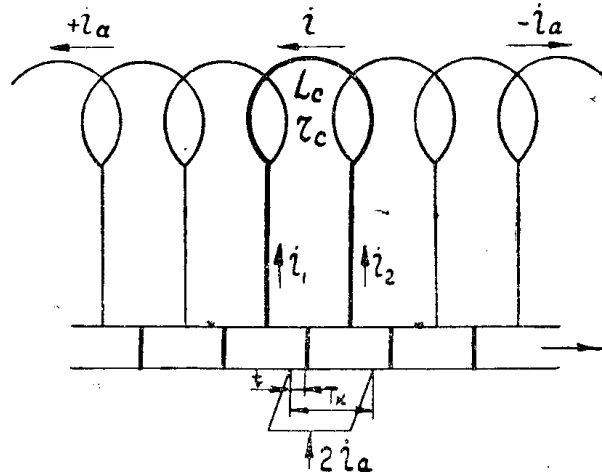


Рис. 2. Схема коммутируемого контура.

Обозначения в (4) и на рис. 2:

- $L_c, r_c$  — индуктивное и активное сопротивления секции;
- $i_a$  — ток параллельной ветви обмотки якоря;
- $i$  — ток коммутируемой секции;
- $i_1 = i_a - i$  — ток, соответствующий набегающей части щетки;
- $i_2 = i_a + i$  — ток, соответствующий сбегаящей части щетки;
- $t$  — время от начала коммутации;
- $T_k$  — период коммутации;
- $e_k$  — коммутирующая э. д. с.;
- $r_1(j_1), r_2(j_2)$  — сопротивления набегающей и сбегаящей частей щетки в функции плотности тока.

Если глубже вникнуть в существо вопроса, то можно прийти к заключению, что связь  $r_{ш} = f(j)$  является наиболее общей, а все остальные уравнения являются лишь частными случаями. Далее, с учетом зависимости  $r_{ш} = f(j)$  представляется возможным правильно решить энергетическую сторону вопроса коммутации.

Следует отметить, что с учетом такой зависимости получаются нелинейные дифференциальные уравнения, решение которых требует длительного времени и навыков. Но с применением вычислительных машин этот недостаток устраняется. Примеры такого применения уже имеются (кафедра электрических машин Новочеркасского политехнического института).

Возникает вопрос, какие зависимости  $r_{ш} = f(j)$  можно использовать для аналитических исследований коммутации: статические или

динамические. Ответ на этот вопрос может быть дан в результате детальных исследований.

Следует обратить внимание и на следующее обстоятельство. Все исследования процесса коммутации (аналитические и экспериментальные) ставят своей задачей найти пути улучшения условий коммутации, улучшить характеристики машины, повысить коммутационную надежность машины. Решение этой проблемы, на наш взгляд, может быть проведено лишь с применением теории вероятности и методов математической статистики. К этому приводит сама природа коммутационного процесса со всей своей сложностью, многогранностью и переплетением различных факторов.

Не сказано определяющего слова по вопросу выбора сорта щеток и определению их коммутирующей способности. Это объясняется весьма сложной зависимостью работы щеток от различных факторов: материала, технологии изготовления, условий работы и др.

В этом отношении заслуживает серьезного внимания определенное коммутирующей способности щеток, выдвинутое проф. М. Ф. Карасевым, исходя из условий оптимальной коммутации. Автором дается своеобразная трактовка работы щетки, особенно на завершающем этапе. Смысл видится в том, что если на завершающем этапе сбегаящий край щетки не нагружен током, то от щетки не требуется никаких коммутирующих свойств. Щетка покидает коллекторную пластину без искрения. Это может быть в случае нормально ускоренной коммутации. Характер изменения тока на предыдущем этапе здесь не рассматривается. Важно, чтобы сбегаящий край работал без нагрузки. Но в силу неидентичности условий коммутации отдельных секций, некоторые из них заканчивают процесс коммутации либо с замедлением, либо с ускорением, отличающимся от нормального. Вот для этих условий должны проявиться коммутирующие свойства щетки. Щетка должна и для этих секций обеспечить безыскровое завершение коммутации. В такой трактовке вопроса коммутирующей способности щетки, по нашему мнению, имеется логический смысл.

Но естественна постановка вопроса: «Почему же коммутирующие свойства щетки должны проявляться только на сбегаящем крае? А как быть с набегающим краем щетки? Почему не учитывается изменение тока до завершающего этапа коммутации?» Имеют место случаи, когда искрит набегающий край. К тому же завершающий этап готовится изменением тока чуть ли не в течение всего периода коммутации.

Далее приборы и методы по анализу искрения и настройке коммутации несовершенны. Необходимо проведение работ по их усовершенствованию и разработке новых приборов и методов. Особое место следует отвести разработке приборов, позволяющих измерять неровности коллектора. Известно, что неровности коллектора являются одной из причин искрения щеток. С увеличением скорости вращения от нескольких тысяч до десятков тысяч проблема изготовления коллектора, который сохранял бы строго цилиндрическую форму, является самой злободневной в настоящее время. Чтобы дать практические рекомендации по изготовлению коллекторов, необходимо достаточно точное измерение их неровностей. Имеются некоторые методы и приборы с использованием различных датчиков и УКВ, но они не нашли применения в силу несовершенства и громоздкости.

Необходимы серьезные работы, по результатам которых можно было бы иметь достаточно четкое представление о влиянии различных факторов, в частности, электромагнитных и механических. К такой мысли приводит исследование изготовленного нами электромашинного усилителя с гладким якорем. Влияние электромагнитных факторов поч-

ти полностью устраняется, остаются только механические (вибрации, имеющиеся неровности коллектора и др.). Однако коммутация при значительных нагрузках протекает совершенно без искрения. Поэтому напрашивается заключение, что поскольку в большинстве коллекторных машин невозможно полное исключение влияния механических и электромагнитных факторов, то в результате исследований должен быть установлен оптимум их сочетания, при котором коммутация будет удовлетворительной.

### Выводы

1. Наиболее перспективным направлением в решении проблемы коммутации являются исследования с учетом зависимости удельного переходного сопротивления щеточного контакта от плотности тока.

2. Уравнения О. Г. Вегнера, полученные на основе допущения  $\Delta U_{щ} = \text{const}$ , приемлемы, как частный случай, для определенных условий и типов машин.

3. Использование теории вероятности и методов математической статистики позволит проводить разносторонние и более глубокие исследования коммутации.

4. Идея оптимальной коммутации и соответствующее определение коммутирующей способности щеток, выдвинутые проф. М. Ф. Карасевым, и проведенные в этом направлении работы имеют важное значение для теоретических и практических решений вопросов коммутации.

5. Крайне необходимо дальнейшее проведение работ по усовершенствованию имеющихся приборов и методов анализа и настройки коммутации, а также разработка новых методов и приборов, в частности, по определению профилограммы коллектора.

6. Необходимо проведение исследований по установлению оптимального сочетания электромагнитных и механических факторов, при котором коммутация коллекторных машин удовлетворительна.

### ЛИТЕРАТУРА

1. М. Ф. Карасев. Коммутация коллекторных машин постоянного тока. ГЭИ, 1961.
2. Вопросы коммутации коллекторных электрических машин. Научные труды ОМИИТ'а, том XLIV, 1964.
3. О. Г. Вегнер. Теория и практика коммутации машин постоянного тока. ГЭИ, 1961.
4. А. И. Скороспешкин. Коммутация ЭМУ поперечного поля. 1960, Томск.
5. Е. М. Синельников, А. Г. Назикян, А. В. Клейменов, Ф. И. Чернявский. Применение счетных машин непрерывного действия для исследования коммутации машин постоянного тока. ИВУЗ, Электромеханика, № 10, 1960.