

i — ток коммутируемой секции;
 $i_1 = i_a - i$ — ток, соответствующий набегающей части щетки;
 $i_2 = i_a + i$ — ток, соответствующий сбегающей части щетки;
 t — время от начала коммутации;
 T_k — период коммутации;
 r_1 и r_2 — сопротивления набегающей и сбегающей частей щетки;
 e_k — коммутирующая э.д.с.

Различные авторы при исследовании процесса коммутации принимали определенные допущения, на основе которых проводили расчет коммутации.

Основоположник классической теории Арнольд [1] исходит из предположения, что ток в щеточном контакте распределяется равномерно по всей поверхности щетки. При этом сопротивление $r_{щ}$, соответствующее полной ширине щетки, остается неизменным, а сопротивления набегающей и сбегающей частей щетки изменяются обратно пропорционально поверхности соприкосновения.

Исходя из такого предположения, Арнольд получил выражения для кривых тока коммутируемой секции и провел обширные исследования процесса коммутации.

Классическая теория получила наибольшее применение при расчете коммутации как в крупных, так и мелких машинах. Она позволила проводить расчет и настройку коммутации, достаточно полно объяснила роль дополнительных полюсов и частично причины искрения щеток.

Тем не менее положения классической теории начали оспариваться многими исследователями, что привело к возникновению новых взглядов на коммутацию.

Вегнер О. Г. [2,3] на основании проведенных исследований приходит к выводу, что положения классической теории не отвечают действительности и взамен предлагает новую, основанную на допущении, что переходное падение напряжения в щеточном контакте остается постоянным, т. е. $\Delta u = \text{const}$.

Исходя из такого допущения, он получает уравнение для тока коммутируемой секции и предлагает наиболее целесообразную для коммутации кривую со ступенью малого тока (рис. 2.)

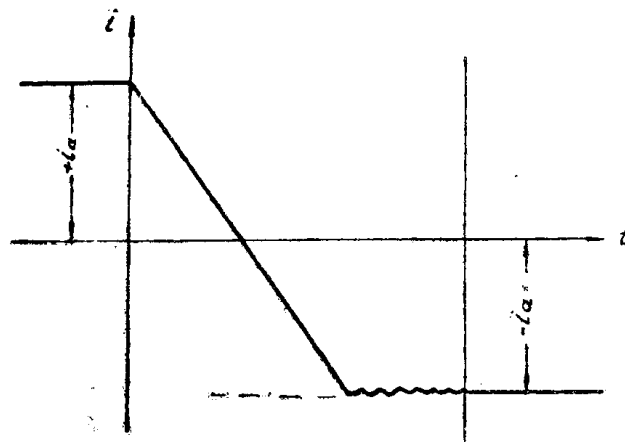


Рис. 2. Кривая тока.

Отсутствие тока разрыва при завершении процесса коммутации является положительным фактором. Условия работы сбегающего края щетки при этом значительно облегчаются.

Но основная трудность заключается в получении ступени малого тока. Для этого необходимо соответствующее распределение коммутационного поля, обмотки и требуется определенный сорт щеток.

В некоторых случаях, по-видимому, проще обеспечить некоторую степень ускорения процесса коммутации и тем самым облегчить работу сбегавшего края щетки. При этом можно исходить из положений классической теории.

Своеобразными являются исследования, проведенные Карасевым М. Ф. [4]. Исследования проводились на искусственных аппаратах, воспроизводящих процессы, имеющие место в реальной машине.

На основании исследований автор [4] приходит к выводу, что реальный процесс коммутации можно представить состоящим из замыкания секции, которому соответствует спад тока до нуля, а затем размыкания секции, связанного с установлением в секции тока противоположного направления (рис. 3).

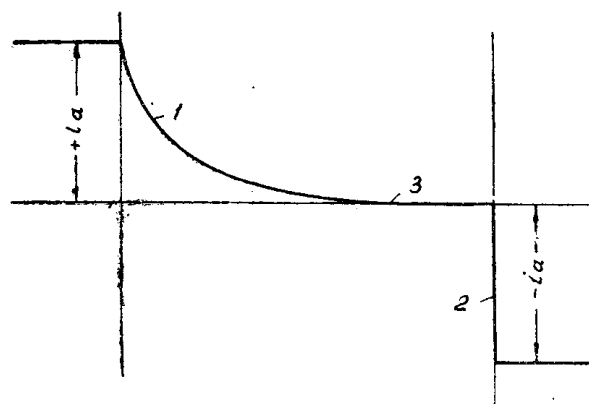


Рис. 3. Кривая тока.

Участок 1 на рисунке соответствует замыканию секции, участок 2 — размыканию.

Горизонтальный участок 3 определяет собой работу набегающего и сбегавшего краев щеточного контакта. Причем перемещение его вверх улучшает работу набегающего края щетки, а перемещение вниз — сбегавшего края. Наиболее рациональное его размещение можно получить путем настройки коммутации.

В связи с этим по-новому объясняется роль дополнительных полюсов, которая сводится к распределению тока между сбегавшей и набегающей частями щеток, а не к компенсации реактивной э.д.с.

Однако следует иметь в виду, что разделение кривой тока коммутационной секции на отдельные участки не всегда представляется возможным. Такое разделение безусловно проще провести для кривых, полученных на искусственном аппарате.

Елохин И. С. [5] получает уравнение для кривой тока коммутационной секции, исходя из предположения, что сопротивления набегающего и сбегавшего краев щеточного контакта равны и остаются постоянными, т. е. $r_1 = r_2 = \text{const}$.

Уравнение [5] рекомендовано для машин небольшой мощности, где имеют место сравнительно большие индуктивности и суммарные сопротивления. Следует отметить, что это уравнение пригодно лишь в частном случае при определенном сочетании параметров.

Уравнение [5] отличается от [2] введением сопротивления щеточного контакта. Исходя из этого, автор [5] приходит к выводу, что уравнение [2] не учитывает свойств щеточного контакта.

Такой вывод является не совсем правильным.

Допущение $\Delta u = \text{const}$ соответствует гиперболической зависимости переходного сопротивления щеточного контакта от плотности тока. При такой зависимости сопротивления набегающего и сбегающего краев щеточного контакта, будучи примерно одинаковыми, взаимно компенсируют друг друга, и процесс изменения тока в секции определяется лишь ее параметрами. Поэтому в уравнение [2] не входят сопротивления набегающего и сбегающего краев щеточного контакта.

Кроме того, автор [5] на основании своих исследований приходит к выводу о нереальности классической теории.

В действительности при определенных условиях при наличии хорошего контакта (в виду имеется притирка щеток, минимальные вибрации) уравнения [1] применимы и обеспечивают большую точность, чем [2 и 5].

Обращает внимание последовательность в применении уравнений [1, 2, 5], установленная Фалеевым В. А. [6].

Следует отметить, что на нее трудно ориентироваться, так как уравнения [1, 2, 5] нельзя поставить в какой-либо последовательный ряд, ориентируясь только на повышение $r_c u L_c$. Эти уравнения получены из весьма различных допущений и каждое из них может быть действительно лишь при определенных условиях, которые определяются типом машины, режимом ее работы, скоростью вращения, параметрами и сортом щеток.

Поэтому, зная только r_c и L_c , трудно что-либо сказать о применении уравнений [2 и 5].

Не следует также рассматривать влияние температуры на характер кривой тока секции в отрыве от токовой нагрузки.

Действительно, изменением температуры можно видоизменить и характер кривой тока. Но необходимо учитывать, что температура является фактором, сопровождающим наличие определенной плотности тока и зависит также от условий охлаждения.

В этом отношении характерна работа Günter'a Hilgarth'a [7]. В ней выводятся формулы, устанавливающие связь между сопротивлением, температурой и токовой нагрузкой на контактах при различных режимах.

Величина тока, проходящего через контакт, определяет температуру контакта. В связи с чем происходит и изменение сопротивления контакта.

В качестве примера ниже приводится одна из формул, полученная автором [7], в которой находится в связи температура и токовая нагрузка. Формула записывается в следующем виде:

$$\Theta_r = \frac{1}{\alpha} \left[\exp \left(\frac{I^2 \rho_0 \alpha}{4\pi^2 r^4 C_0} t \right) - 1 \right]. \quad (1)$$

Здесь α — температурный коэффициент;

ρ_0 — удельное сопротивление контакта при окружающей температуре;

C_0 — удельная теплоемкость;

t — время;

r — расстояние до различных мест контакта;

Θ_r — температура.

Соответственно для сопротивления формула имеет вид:

$$r_k = \frac{\rho_0}{\pi} \int_b^{\infty} \frac{\exp\left(\frac{m}{r^4}\right)}{r^2} dr, \quad (2)$$

где

$$m = \frac{I^2 \rho_0 \alpha t}{4\pi^2 C_0}.$$

Формула (2) устанавливает связь между сопротивлением контакта и токовой нагрузкой.

Фалеев В. А. [6] занимался исследованием завершающего этапа коммутации. Последний является итогом изменения тока за весь предшествующий период.

Исходя из условия, что электрическая дуга в период существования образует с секцией параллельную цепь и оказывается шунтированной секцией, автор [6] составляет схему замещения для заключительного этапа коммутации и получает выражения для тока дуги разрыва, времени горения дуги и выделяемой энергии.

При составлении уравнений для схемы замещения не учитываются емкость между коллекторными пластинами и взаимоиндуктивная связь между отдельными секциями и секции с параллельной ветвью обмотки якоря, которые в действительности имеют место.

В работе Holm'a [8], который также занимался исследованием завершающего этапа коммутации, учитывается взаимоиндуктивность между секцией, параллельной ветвью обмотки и обмоткой дополнительных полюсов.

На рис. 4 представлена принятая в [8] схема.

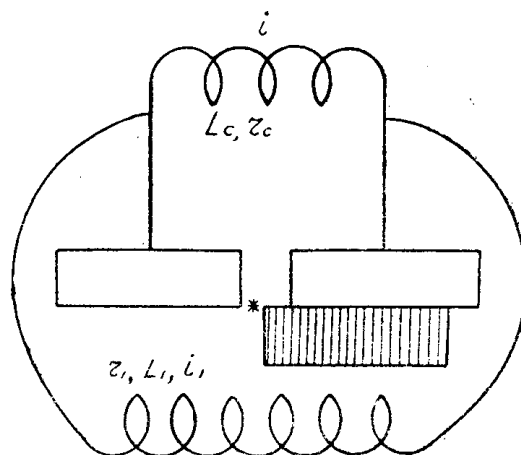


Рис. 4. Схема замещения для завершающего этапа коммутации.

Из рис. 4 видно, что по отношению к току дуги, возникающей между коллекторной пластиной и щеткой, покинувшей ее, как секция, так и оставшая часть обмотки находятся в одинаковом отношении. В них будут наводиться э.д.с., связанные с изменением тока, определяемые параметрами этих частей обмоток.

Автор [8] определяет так же, как и в [6], ток дуги разрыва, время горения дуги и энергию, выделяемую при этом. Но результа-

ты [8], очевидно, будут более точными, так как учитывают большее количество параметров.

Таким образом, имея выражения для тока дуги разрыва на завершающем этапе коммутации, можно более полно представить ток коммутируемой секции в виде двух составляющих $i_c = i_{np} + i_d$, где i_{np} — ток в секции до завершающего этапа коммутации, i_d — ток дуги.

При этом для более правильного определения тока дуги разрыва, безусловно, необходимо довольно точное определение тока на предшествующем этапе коммутации.

Проведенный анализ уравнений [1, 2, 5] для тока коммутируемой секции выявляет их существенные недостатки.

Следовательно, существует необходимость в поисках новых методов аналитического исследования процесса коммутации, которые с достаточной точностью и полнее могли бы учесть физическую сторону процесса коммутации.

Одним из таких возможных методов является исследование с учетом зависимости переходного сопротивления щеточного контакта от плотности тока.

Действительно, если имеется установившийся режим работы машины, который определяется наличием постоянной скорости вращения, установившейся температурой коллектора, постоянным давлением на щетку, предполагая хороший контакт, то изменение сопротивления контакта в зависимости от плотности тока является почти единственным фактором, существенно влияющим на характер кривой тока коммутируемой секции.

По этому поводу в работе Фалеева В. А. [6] отмечается, что „использование в уравнениях вольтамперных характеристик и экспериментально снятых зависимостей $r_{щ} = f(j)$ есть наиболее верный путь для получения уравнений коммутации, свободных от всяких предположений и допущений. Это направление нужно развивать дальше“.

Первой попыткой провести исследование процесса коммутации на основе статических вольтамперных характеристик является работа Б. К. Тура [9].

В дифференциальном уравнении, составленном для принятой им схемы, учитывается зависимость переходного падения напряжения от плотности тока и емкость между коллекторными пластинами.

В расчете влияние переходного падения напряжения определяется через ток емкости. Следовательно, и на характер изменения тока в коммутируемой секции определяющее влияние будет оказывать не переходное падение напряжения, а величина принятой в расчете емкости. Это и вносит погрешность в расчеты и выводы, сделанные Б. К. Туром.

Известно, что переходное сопротивление щеточного контакта (соответственно переходное падение напряжения) оказывает более существенное влияние на характер изменения тока в секции, чем емкость, тем более для принятой Б. К. Туром вольтамперной характеристики.

Кроме того, аппроксимация вольтамперной характеристики в виде прямой линии, начиная от 8 до 8080 а см², является нереальной [10].

Далее экспериментальное подтверждение расчета отсутствует.

Все эти недостатки, несмотря на положительный факт учета зависимости $\Delta u = f(j)$, поставили под сомнение результаты, полученные автором [9].

Необходимо иметь в виду, что при использовании зависимостей $\Delta u = f(j)$ или $r_{щ} = f(j)$ следует знать условия, при которых эти зависимости получены. Основным из этих условий является температура. Чем ближе действительным условиям соответствует зависимость $r_{щ} = f(j)$, тем точнее и правильнее будет результат решения дифференциального уравнения, составленного для коммутируемого контура.

Вопрос о том, какие из зависимостей $r_{щ} = f(j)$ следует использовать—статические или динамические—является задачей исследований.

Одной из неудачных попыток использовать динамические вольт-амперные характеристики для получения кривой тока коммутируемой секции является работа З. Б. Вартанова [11].

Сам факт учета динамических вольтамперных характеристик для определения кривой тока секции является положительным. Но подход к решению этого вопроса и результаты не могут не вызвать возражений.

Во-первых, если в статических вольтамперных характеристиках наблюдается некоторая нестабильность в связи с влиянием различных факторов, то для динамических характеристик эта нестабильность не имеет границ.

Поэтому принимать какую-либо математическую аппроксимацию для самых разнообразных динамических вольтамперных характеристик почти не представляется возможным.

Прежде всего, необходимо найти способы получения стабильных динамических характеристик, соответствующих реальному физическому процессу, имеющему место при коммутации.

Во-вторых, метод получения этих характеристик автором [11] слишком далек от реальных условий машины.

Имитация работы сбегającego края щетки и набегающего на кольцо, выбор треугольного импульса, определяющего динамическую характеристику, мало соответствуют реальным условиям.

Наконец, метод получения уравнения для тока коммутируемой секции содержит довольно грубые приближения.

Таким образом, результаты работы [11] не могут быть применимы при расчете коммутации.

В настоящих условиях представляется возможным проводить исследование коммутации с учетом статических зависимостей переходного сопротивления щеточного контакта от плотности тока.

Основанием для этого можно считать, что

1) они наиболее полно учитывают свойства щеточного контакта; 2) имеют явно выраженный закономерный характер, который можно математически аппроксимировать; 3) статические характеристики стабильны при определенных условиях (давлении, температуре).

Такие исследования, применительно к электромашинным усилителям с поперечным полем, проведены в работах [12 и 13]. При этом выясняется, что зависимость переходного сопротивления щеточного контакта от плотности тока оказывает существенное влияние на характер кривой тока коммутируемой секции.

Эту зависимость следует учитывать при исследовании процесса коммутации и в других машинах постоянного тока.

Сравнение кривых тока, полученных по [1, 2, 5] и с учетом $r_{щ} = f(j)$ [12, 13], с экспериментальными показывает, что кривые [12, 13] имеют наибольшее сходство с экспериментальными кривыми.

На основании изложенного можно сделать выводы.

1. Одним из возможных путей исследования процесса коммутации в машинах постоянного тока является исследование с учетом зависимости переходного сопротивления щеточного контакта от плот-

ности тока, так как эта зависимость наиболее полно учитывает свойства щеточного контакта.

Использование зависимости $r_{щ}=f(j)$ позволяет проводить более глубокие исследования коммутации (например, с учетом взаимной индуктивности). При этом необходимо, чтобы зависимость $r_{щ}=f(j)$ ближе соответствовала реальным условиям.

2. Уравнения [1, 2, 5] применимы лишь при определенных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. А р и о л ь д и Л а К у р. Машины постоянного тока, т. I, 1931.
2. О. Г. В е г н е р. О некоторых вопросах коммутации тока при помощи коллектора и щеток. Труды ЛИИ, № 7, 1938.
3. О. Г. В е г н е р. Вопросы современной теории коммутации тока в коллекторных машинах. Электричество, № 7, 1956.
4. М. Ф. К а р а с е в. Коммутация машин постоянного тока. ГЭИ, 1955.
5. И. С. Е л о х и н. Исследование кривых тока и э.д.с. самондукции при коммутации. Диссертация, Томск, 1953.
6. В. А. Ф а л е е в. Исследование процесса искрообразования при коммутации в электрических машинах. Диссертация, Томск, 1957.
7. Günter Hilgarth. Связь между контактным напряжением и температурой на контактах при кратковременно нагруженных контактах сильного тока. ETZ, №13, 1958.
8. К теории коммутации машин постоянного тока. Экспрессинформация, выпуск 25 (№143—147), 1959.
9. Б. К. Т у р. К вопросу коммутации в машинах постоянного тока. Электричество, № 11, 1956.
10. М. Ф. К а р а с е в. Уравнения кривых тока и э.д.с. при коммутации в коллекторных машинах. Электричество, № 12, 1957.
11. З. Б. В а р т а н о в. Импульсные вольтамперные характеристики щеточного контакта. ВЭП, № 2, 1957.
12. А. И. С к о р о с п е ш к и н. О коммутации машин постоянного тока малой мощности. ИВУЗ Электромеханика, № 2, 1959.
13. А. И. С к о р о с п е ш к и н. О коммутации электромашинных усилителей с поперечным полем. ИВУЗ Электромеханика, № 6, 1959.