

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОММУТАЦИИ
КОЛЛЕКТОРНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН
С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЦВМ**

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

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Аналитические исследования коммутации, как правило, проводятся со значительными допущениями в отношении учета взаимоиндуктивных связей между коммутируемыми секциями и нелинейности щеточного контакта. Это объясняется сложностью коммутационного процесса, не позволяющей получить решение в общем виде. Численные методы решения уравнений коммутации без применения счетно-решающих машин требуют больших затрат времени для получения удовлетворительной точности.

С развитием аналоговых и цифровых вычислительных машин появилась возможность наиболее полного и глубокого аналитического исследования коммутации не только для готовых машин, но и в процессе их проектирования.

К сожалению, электронно-вычислительные машины для исследования коммутации не нашли еще достаточно широкого применения. Имеются всего лишь несколько работ [1, 2, 3], касающихся исследования коммутации с помощью вычислительных машин. Такое положение, по-видимому, объясняется отсутствием единой методики расчета, учитывающей максимальное число факторов, оказывающих влияние на коммутационный процесс.

И все-таки только аналитические исследования позволят решить коммутационную проблему коллекторных электрических машин до их выпуска, назначить необходимую точность техпроцесса, задать соответствующие электромагнитные загрузки, параметры секций и марку щеток.

Коммутационный процесс в значительной степени характеризуется законом изменения тока в коммутируемых секциях, который является следствием воздействия всего комплекса факторов. Для определения этого закона необходимо решать систему дифференциальных уравнений, учитывающих все взаимосвязи коммутируемых секций. Трудность решения этих уравнений заключается в прерывности взаимоиндуктивного влияния и, главным образом, в определении падений напряжения в щеточном контакте. Именно в щеточном контакте сосредоточены основные воздействия на коммутационный процесс (механика, температура, влажность, давление и т. д.). Поэтому в зависимости оттого, насколько правильно представлен щеточный контакт, будет определяться и точность решения.

Учесть все факторы, действующие на щеточный контакт, весьма затруднительно и, по-видимому, возможно только при применении веро-

ятностных методов. Но для конкретной машины при ее длительной работе можно считать, что переменной остается только плотность тока, а остальные факторы можно считать установившимися. И если имеется вольтамперная характеристика щеточного контакта для этих условий работы, то она достаточно полно уже учитывает все эти факторы. При этом многолетние исследования показали, что зависимость удельного сопротивления щеточного контакта от плотности тока является нелинейной и отличной от допущений как классической теории $\rho_{щ} = \text{const}$, так и О. Г. Вегнера $\Delta I = \text{const}$.

Указанные допущения являются только частными случаями и оказываются справедливыми лишь для некоторых марок щеток и в определенном диапазоне плотностей тока. Поэтому использование для расчета реальной нелинейной зависимости щеточного контакта $\Delta U = f(j)$, что вполне возможно при наличии автоматических вычислительных машин, должно дать более точное решение во всем диапазоне плотностей тока.

Составление системы дифференциальных уравнений коммутации для всех машин одинаково. Для этого необходимо иметь порядок коммутации секций под различными щетками и обмоточные данные машины.

Время решения или расчетный период определяется временем от момента начала коммутации первой секции паза до момента, когда можно получить данные для всех секций одного паза. При этом вполне естественно предположить, что условия коммутации для секций, одинаково расположенных в различных пазах, одинаковы, если коллектор выполнен достаточно точно. Расчетный период разбивается на ряд участков, начало и конец которых характеризуется либо вступлением какой-либо секции в коммутацию, либо выходом ее из коммутации, в результате чего происходит изменение энергообъема в контурах.

Расчетный период и его участки в каждом конкретном случае будут своими и зависят от числа секций в пазу и щеточного перекрытия. В общем случае, если предположить, что вольтамперная характеристика щеток обеих полярностей одинакова, и изменить направление тока и намотки секций под одной из щеток [1], для петлевой обмотки элементарной машины расчетный период будет равен при $K = \text{нечетному}$ числу $U_n \frac{T_k}{2}$, а при $K = \text{четному}$ числу — $U_n \cdot T_k$,

где U_n — число секционных сторон в пазу, а T_k — время, соответствующее перемещению якоря на одно коллекторное деление.

Число участков и их длительность определяется щеточным перекрытием.

Если при K — нечетном выразить щеточное перекрытие, как

$$\beta = 0,5n + \epsilon,$$

где n — целое число и $\epsilon < 0,5$, то расчетный цикл разбивается на участки длительностью ϵT_k и $(0,5 - \epsilon) T_k$.

Если при K — четном выразить щеточное перекрытие, как

$$\beta = n + \gamma,$$

где n — целое число и $\gamma < 1$, то расчетный цикл разбивается на участки длительностью γT_k и $(1 - \gamma) T_k$.

Причем первые из этих участков характеризуются в конце выходом одной из секций из коммутации, а вторые — вступлением новой секции в коммутацию. Число участков той и другой длительности будет одинаковым и равным числу секционных сторон в пазу.

Таким образом, расчетный цикл не зависит от щеточного перекрытия. Оно только определяет число и длительность участков расчетного цикла и количество уравнений для каждого из них.

Так, при K — нечетном на участке εT_K число уравнений равно $n+1$, а на участке $(0,5-\varepsilon) T_K$ оно будет равно n . При K — четном соответственно будем иметь $2(n+1)$ и $2n$.

Уравнение для каждой секции в общем виде запишется:

$$L_x \frac{di_x}{dt} + \sum_{k=1}^n M_{xk} \frac{di_k}{dt} = \Sigma e - i_x R - \Delta U_x + \Delta U_{x+1},$$

где L_x — коэффициент самоиндукции секции;

M_{xk} — коэффициент самоиндукции секции с остальными, одновременно коммутирующими;

Σe — суммарная э.д.с., действующая в секции в момент коммутации;

R — сопротивление секции;

ΔU — падение напряжения на коллекторной пластине, к которой присоединяется начало коммутируемой секции;

ΔU_x — падение напряжения на коллекторной пластине, к которой присоединяется конец коммутируемой секции.

Члены уравнения, учитывающие взаимоиндуктивные связи, будут постоянными только на отдельных участках расчетного цикла. Поэтому расчет целесообразно проводить именно по участкам. Падение напряжения в щеточном контакте будет определяться по току через коллекторную пластину и площади щеточного контакта при помощи вольтамперной характеристики $\Delta U = f(j)$. Ток через пластину, как узел тока, определится

$$i_n = i_x - i_{x+1},$$

где i_x — ток секции, присоединенной к пластине началом;

i_{x+1} — ток секции, присоединенной к пластине концом.

Площадь соприкосновения ламели со щеткой является функцией времени и при щеточном перекрытии $\beta > 1$ будет изменяться по трапецеидальному закону, который представить одним выражением очень трудно. Но если расчет проводится по участкам и обозначения неизвестных на каждом из них производится одинаково с точки зрения момента времени коммутации, а не по принадлежности к секции, то система уравнений и закон изменения площадей соприкосновения будут одинаковыми. Несоответствие обозначений может быть легко учтено при обработке результатов расчета.

Суммарная э.д.с. Σe , действующая в коммутируемой секции, включает посторонние э.д.с., возникающие в секции в момент коммутации либо за счет вращения якоря в магнитном поле, либо трансформаторным путем.

Такая методика расчета позволяет проводить расчеты как для машин постоянного, так и переменного тока, не вводя существенных изменений.

Нами была проведена проверка методики для ЭМУ поперечного поля типа ЭМУ-12А, имеющего следующие основные данные: $P_n = 1,2$ квт; $U_n = 115$ в; $I_n = 10,4$ а; $I_{дн} = 3,4$ а; $W_\varepsilon = 4$; $U_n = 3$; $K = 87$; $2p = 2$; $\beta = 1,5$; шаг по пазам 1—15; $\eta_n = 2900$ об/мин. В этом случае исходная схема и временная диаграмма коммутации имеют вид, приведенный на рис. 1. Система уравнений запишется:

$$L \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + M_{13} \frac{di_3}{dt} = \Sigma e - i_1 R - \Delta U_1 + \Delta U_2,$$

$$L \frac{di_2}{dt} + M_{21} \frac{di_1}{dt} + M_{23} \frac{di_3}{dt} = \Sigma e - i_2 R - \Delta U_3 + \Delta U_4,$$

$$L \frac{di_3}{dt} + M_{31} \frac{di_1}{dt} + M_{32} \frac{di_2}{dt} = \Sigma e - i_3 R - \Delta U_5 + \Delta U_1,$$

Расчетный период будет равен

$$T_{ц} = U_{п} \frac{T_{к}}{2} = 1,5 T_{к}.$$

Так как щеточное перекрытие $\beta = 1 + 0,5$, то расчетный цикл разбивается на три участка длительностью $0,5 T_{к}$. Если расчет начинать с момента начала коммутации секции, первой коммутирующей в пазу, то на первом участке будем иметь:

$M_{12} = M_{21} = M_{23} = M_{32} = M_{вн}$ — взаимоиндуктивность между верхней и нижней секционными сторонами в пазу, или взаимоиндуктивность между секциями, коммутирующими под разнополярными щетками.

$M_{13} = M_{31} = M \approx 0$ — взаимоиндуктивность между секциями, коммутирующими под одной щеткой.

На втором и третьем участках:

$$M_{12} = M_{21} = M_{23} = M_{32} = M_{вн}, \quad M_{13} = M_{31} = M \neq 0.$$

На первом участке $M \approx 0$, так как секции, коммутирующие под одной щеткой, расположены в соседних пазах и индуктивная связь между ними очень слабая, а на втором и третьем участках они расположены в одном пазу и коэффициент взаимоиндуктивности будет близок к значению коэффициента самоиндукции для одной секции при условии равновитковых секций.

Таким образом, мы можем переписать систему в виде:

$$L \frac{di_1}{dt} + M_{вн} \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_3}{dt} = \Sigma e - i_1 R - \Delta U_1 + \Delta U_2.$$

$$L \frac{di_2}{dt} + M_{вн} \frac{di_1}{dt} + M_{вн} \frac{di_3}{dt} = \Sigma e - i_1 R - \Delta U_3 + \Delta U_4,$$

$$L \frac{di_3}{dt} + M \frac{di_1}{dt} + M_{вн} \frac{di_2}{dt} = \Sigma e - i_3 R - \Delta U_5 + \Delta U_1,$$

причем, M — переменное по участкам.

Суммарная э.д.с. за расчетный цикл может быть принята постоянной и одинаковой для всех секций, так как поле в зоне коммутации практически постоянное, а в случае наличия трансформаторной э.д.с. изменением последней за период коммутации тоже можно пренебречь.

Для рассматриваемого примера при аппроксимации вольтамперной характеристики выражением вида

$$J = \frac{a}{S} \Delta U^k$$

падения напряжения определяется как:

$$\Delta U_1 = [C(i_1 - i_3)]^{\frac{1}{k}}; \quad \Delta U_2 = \left[C \frac{i_{ан} - i_1}{t/T_k} \right]^{\frac{1}{k}};$$

$$\Delta U_3 = \left[C \frac{i_2 - i_{ак}}{1 - t/T_k} \right]^{\frac{1}{k}}; \quad \Delta U_4 = \left[C \frac{i_{ан} - i_2}{0,5 + t/T_k} \right]^{\frac{1}{k}},$$

$$\Delta U_5 = \left[C \frac{i_3 - i_{ак}}{0,5 - t/T_k} \right]^{\frac{1}{k}},$$

где

$$C = \frac{\beta}{a}$$

$i_{ан}$ — ток параллельной ветви или секции до начала коммутации,
 $i_{ак}$ — ток параллельной ветви или секции после коммутации.

Система дифференциальных уравнений коммутации легко преобразуется к нормальному виду

$$\frac{di_k}{dt} = F(i_1; i_2 \dots; i_k; t),$$

удобному для решения системы на электронной вычислительной машине. Начальные условия вводятся на первом участке для секции, вступающей в коммутацию точно, а для остальных приближенно. Для других участков начальными условиями служат конечные условия предыдущего участка. Решение проводится несколько раз до уточнения входных данных, заданных приближенно. Решение проводится достаточно быстро и позволяет легко получить необходимые данные: ток, падение напряжения между щеткой и ламелью и производную тока (в определенном масштабе реактивную э.д.с.). Для этого необходимо только ввести в программу команду о выводе соответствующей величины на печать.

Взятый в качестве примера усилитель имел следующие исходные данные для расчетов:

$S_{щ} = 1,5 \text{ см}^2$; $R = 0,032 \text{ ом}$; $T_K = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ сек}$. Параметры коммутируемых секций, полученные расчетным путем:

для поперечной цепи:

$$\begin{aligned} L &= 18,4 \cdot 10^{-6} \text{ гн}, \\ M_{вн} &= 6,9 \cdot 10^{-6} \text{ гн}, \\ M &= 15,64 \cdot 10^{-6} \text{ гн}, \end{aligned}$$

для продольной цепи:

$$\begin{aligned} L &= 27 \cdot 10^{-6} \text{ гн}, \\ M_{вн} &= 11,2 \cdot 10^{-6} \text{ гн}, \\ M &= 23 \cdot 10^{-6} \text{ гн}. \end{aligned}$$

Различия в параметрах секции для продольной и поперечной цепей возникает за счет того, что дополнительные полюсы имеются только по продольной оси.

Усилитель снабжен щетками марки ЭГ-8, вольтамперная характеристика которых, снятых на закороченном коллекторе, аппроксимируется выражением

$$J = 2\Delta U^2$$

Многочисленные расчеты и опыты для ЭМУ-12А, проведенные как для постоянного, так и переменного тока, подтвердили, что предложенная методика расчета дает удовлетворительную точность. На переменном токе, в отличие от постоянного, определялись мгновенные значения токов параллельных ветвей и суммарной э.д.с. секции с учетом фазового сдвига.

На рис. 2 и 3 приведен ряд кривых тока коммутации для секций одного паза, полученных расчетным и опытным путем. На рис. 2 приведены кривые тока секций, коммутируемых в поперечной цепи, которая питается от независимого источника постоянного (2) и переменного (3) тока. Кривая 1 получена расчетом.

На рис. 3 приведены кривые тока секций, коммутируемых в продольной цепи при работе усилителя на переменном токе частоты 50 гц для момента времени, соответствующего максимальному значению тока продольной цепи и незначительной трансформаторной э.д.с.

Полученные кривые показывают, что предлагаемая методика дает удовлетворительную точность. Некоторые отклонения опытных кривых от расчетных, выражающиеся в резких пиках, можно объяснить за счет

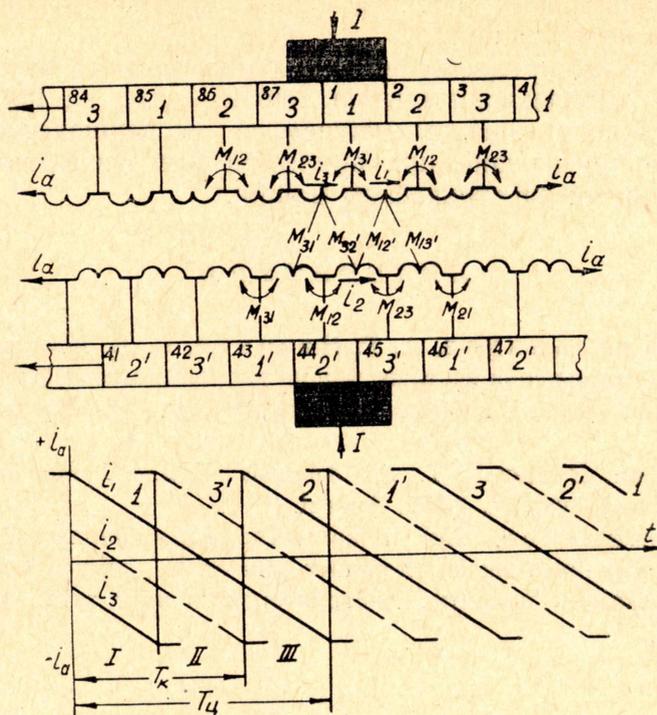


Рис. 1. Исходная схема и временная диаграмма коммутации ЭМУ.

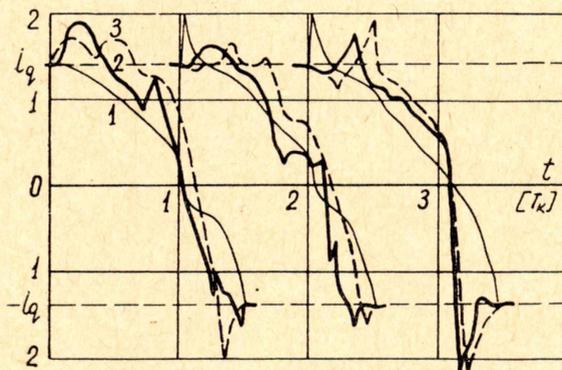


Рис. 2. Кривые тока коммутируемых секций поперечной цепи ЭМУ.

1 — расчет,

2,3 — опыт для переменного и постоянного тока.

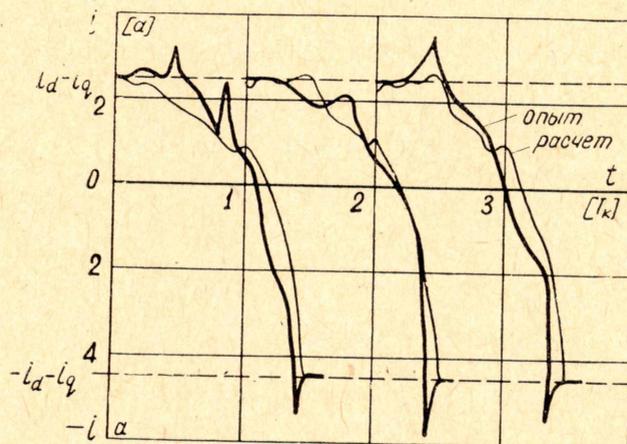


Рис. 3. Кривые тока коммутируемых секций продольной цепи ЭМУ.

механических нарушений контакта и неучета емкости контура в завершающем этапе коммутации.

Таким образом, предложенная методика расчета коммутационного процесса дает удовлетворительную точность как на постоянном, так и переменном токе и при дальнейшем ее усовершенствовании может найти широкое применение при аналитических исследованиях коммутации коллекторных электрических машин.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Alger R. M., Bewley D. T. An Analysis of D.—C. Machine Commutation. Power Apparatus and Systems. 1957, August.

3. В. В. Клейменов. Анализ коммутации в машинах постоянного тока с применением электронных вычислительных машин, Сб. трудов Всесоюзного научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения, № 4, 1964.