

**К ВОПРОСУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ИНДУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОММУТИРУЮЩИХ СЕКЦИЙ
МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА**

В. Л. ГРОМОК, В. В. ИВАШИН, И. А. МИЛораДОВ

(Представлена научным семинаром кафедры электрических машин)

В настоящее время коммутация электрических машин рассчитывается с определенными допущениями на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений, составленных для коммутирующих секций якорной обмотки, имеющих параметры L , R , M , то есть с учетом взаимноиндуктивной связи между одновременно коммутируемыми секциями.

Точность подобных расчетов зависит в первую очередь от точности, с которой определены параметры L и M . Существующие аналитические формулы для расчета этих параметров носят весьма приближенный характер и зачастую дают результаты, отличающиеся в 2—3 раза. К тому же с их помощью рассчитываются только статические величины, и, следовательно, для крупных машин, у которых значительную роль играют вихревые токи в железе и меди, в теле проводников, эти формулы дают еще большую погрешность. Для определения эквивалентных параметров, учитывающих влияние вихревых токов, существует ряд экспериментальных методов [1—4], обладающих существенными недостатками, как-то: высокая погрешность и сложность.

Целью данной работы является поиск нового, более простого и точного экспериментального способа определения индуктивных параметров коммутирующих секций машин постоянного тока. Наличие такого способа в дальнейшем позволит не только повысить точность расчетов коммутации, но и уточнить аналитические формулы расчета этих параметров.

Электрический контур в зависимости от условий, в которых он находится, может характеризоваться статической, динамической и эквивалентной индуктивностью [5].

Статическая индуктивность может быть определена как индуктивность контура, в котором равным приращениям потокосцепления соответствуют равные приращения тока. Если, например, при линейном изменении тока потокосцепление контура изменяется нелинейно, т. е. равным приращениям одной из величин соответствуют неравные приращения другой, то такой контур определяется динамической индуктивностью, равной пределу отношения приращения потока самоиндукции и приращению тока, когда последнее стремится к нулю.

Влияние вихревых токов на индуктивность коммутирующей секции электрической машины выясняется при рассмотрении переходных процессов в отдельно взятой секции, когда к ней прикладывается постоянное

напряжение, что с определенными допущениями соответствует условиям коммутации в этой секции.

Обратимся к расчету вихревых токов, наведенных в медных проводниках секции. Известен ряд работ, посвященных подобным расчетам [6, 7, 8]. Большинство авторов приходят к выводу, что закон изменения вихревых токов может быть приближенно аппроксимирован простой

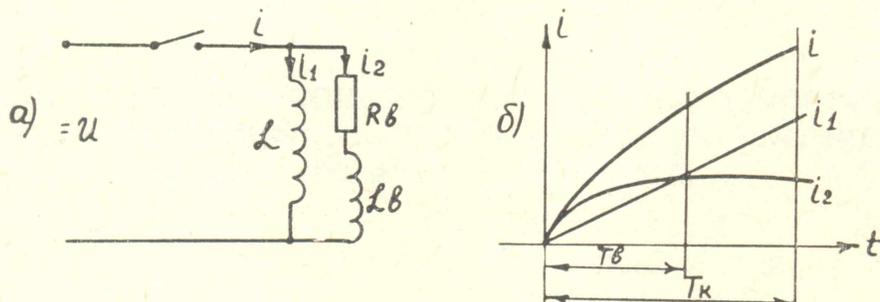


Рис. 1, а, б. Схема замещения и кривые токов секции

экспоненциальной функцией $i_B = I_{Bm} (1 - e^{-t/\tau_B})$, где I_{Bm} — максимальное значение тока, а τ_B — постоянная времени установления этих токов. Расчет этой функции осуществляется с помощью схем замещения в виде ряда контуров с параметрами R_i и L_i . Рассмотрим это на простейшей схеме замещения, приведенной на рис. 1, а, где

L — индуктивность секции якорной обмотки в предположении равенства нулю ее активного сопротивления; R_B и L_B — параметры контура вихревых токов. Расчет переходных процессов в такой схеме при включении ее на постоянное напряжение дает следующие выражения:

$$i_1 = \frac{U}{L} \cdot t; \quad i_2 = \frac{U}{R_B} (1 - e^{-t/\tau_B}); \quad \tau_B = \frac{L_B}{R_B};$$

$$i = i_1 + i_2 = \frac{U}{L} \cdot t + \frac{U}{R_B} (1 - e^{-t/\tau_B}). \quad (1)$$

Кривые этих токов изображены на рис. 1, б.

Из рис. 1, б следует, что благодаря наличию вихревых токов в меди паза ток i в секции имеет наибольшую скорость в начале периода коммутации T_K . По мере установления вихревых токов эта скорость уменьшается, приближаясь к той, которая имела бы место в отсутствие вихревых токов (кривая i_1).

Теперь рассмотрим характер изменения поля в пазу (рис. 2).

Ток i , протекающий по проводнику, создает поле в пазу с напряженностью H , которая по закону полного тока определяется как $H = \frac{\Sigma I}{l} = \frac{i}{l}$. Ток i_2 индуцируется этим полем в замкнутых контурах проводника. Этот ток в свою очередь создает поле с напряженностью H_B , которая пропорциональна величине тока

$$i_2 = \frac{U}{R_B} (1 - e^{-t/\tau_B}).$$

Указанные поля действуют встречно, поэтому результирующая напряженность поля в пазу определится: $H_p = H - H_B$.

Очевидно, потокосцепление паза в отсутствие вихревых токов характеризуется функцией, пропорциональной току i_1 :

$$\Psi = \omega \Phi = \omega \mu s \cdot \frac{i_1 \omega}{l}, \quad (2)$$

где ω — число витков, в данном случае $\omega = 1$;

s — площадь, пронизываемая потоком;

l — длина участка, на котором вычисляется напряженность поля.

При наличии вихревых токов потокосцепление пропорционально разности токов:

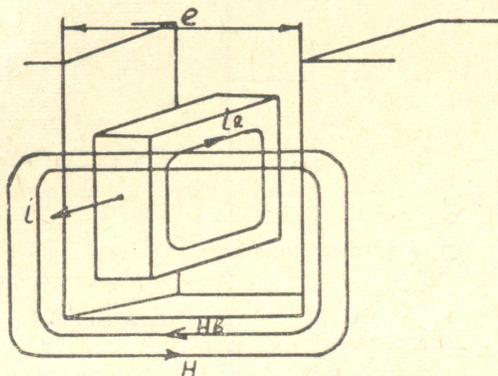


Рис. 2. Картина поля паза при наличии вихревых токов в проводниках обмотки

$$\Psi'_B = \omega \mu s \cdot H_p = \omega \mu s \cdot \frac{(i - i_2) \omega}{l} = \omega \mu s \cdot \frac{i_1 \omega}{l}. \quad (3)$$

Из определения динамической индуктивности следует, что

$$L_d = \lim_{\Delta i \rightarrow 0} \frac{\Delta \Psi'}{\Delta i} = \frac{d\Psi'}{di}. \quad (4)$$

Отсюда видно, что при отсутствии вихревых токов потокосцепление и ток выражаются линейными функциями и L_g принимает постоянное значение, соответствующее величине статической индуктивности, которая зависит только от геометрических факторов и свойств материала. В переменном магнитном поле, когда имеют место вихревые токи, одна из функций становится нелинейной, и величина L_g , очевидно, переменна и зависит от $\frac{d\Psi'}{dt}$ и $\frac{di}{dt}$.

Нетрудно заметить, что если говорить о динамической индуктивности, как об индуктивности контура в каждый момент времени, то ее величина переменна только пока устанавливаются вихревые токи, то есть на отрезке времени T_B . В дальнейшем отношение $\frac{\Delta \Psi'}{\Delta i}$ становится постоянным и равным подобному отношению в случае линейных функций, т. е. динамическая индуктивность контура приближается по своей величине к статической. В целом же за интервал времени T_K индуктивность контура можно характеризовать эквивалентной величиной, которую и

целесообразно использовать при расчетах электромагнитных процессов в коммутирующих секциях.

Понятие об эквивалентной индуктивности секции можно также ввести на основании рассмотрения механизма работы щетки при коммутации одной секции. Пусть под действием постоянного напряжения ток в секции изменяется в соответствии с прямой 1 на рис. 3, а. При этом плотность тока во всех точках контактной дуги щетки одинакова, а следовательно, одинаковы и переходные напряжения при любом виде вольт-амперных характеристик щетки, т. е. $e'_k = \Delta U_c - \Delta U_n = 0$ (рис. 3, б).

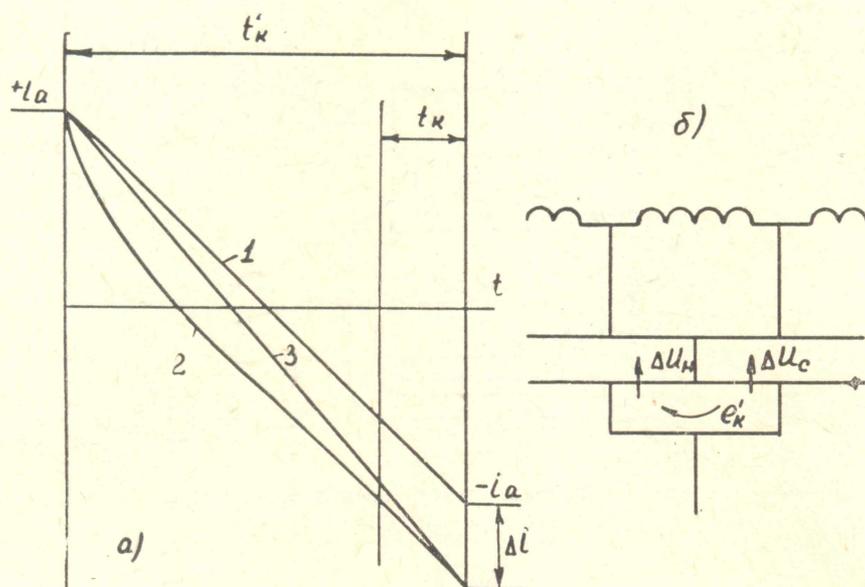


Рис. 3. К понятию об эквивалентной индуктивности секции

Под влиянием вихревых токов, возникающих при изменении магнитного потока, ток в секции примет вид кривой 2. Плотность тока в набегающем крае щетки возрастет по сравнению с плотностью тока в сбегающем крае, равенство переходных сопротивлений нарушится, появится $e_k \neq 0$, которая при помощи щетки вводится в коммутирующую секцию, замедляя коммутацию.

Теперь предположим, что вихревых токов нет, а увеличилось возбуждение добавочных полюсов настолько, что ток в секции стал изменяться по прямой 3. В этом случае щетка также должна будет ввести в коммутируемую секцию э. д. с. e'_k . И если теперь исходить из предположения, что щетка вводит эту э. д. с. не на протяжении всего периода коммутации t_k , а только на последнем небольшом интервале $t_{ш}$, то можно видеть, что работа щетки почти не будет отличаться в случае кривой 2 и в случае прямой 3, так как на этом интервале эти кривые почти сливаются. Значит, с точки зрения работы щетки по исправлению коммутационного цикла, и, следовательно, качества коммутации данной секции, эту секцию можно характеризовать индуктивностью

$$L_э = \frac{e_k}{(2i_a + \Delta i)/t_k}, \quad (5)$$

где e_k — коммутирующая э. д. с. добавочных полюсов, необходимая для создания скорости тока $\frac{2i_a}{t_k}$,

Δi — величина тока перекоммутации, который возникает благодаря наличию вихревых токов.

На основании изложенных положений была разработана методика измерения статических, динамических и эквивалентных индуктивностей коммутационных секций машин постоянного тока.

Для измерения статической индуктивности секция подключается к зажимам 1 и 2 схемы на рис. 4, а. Последовательно с ней включена из-

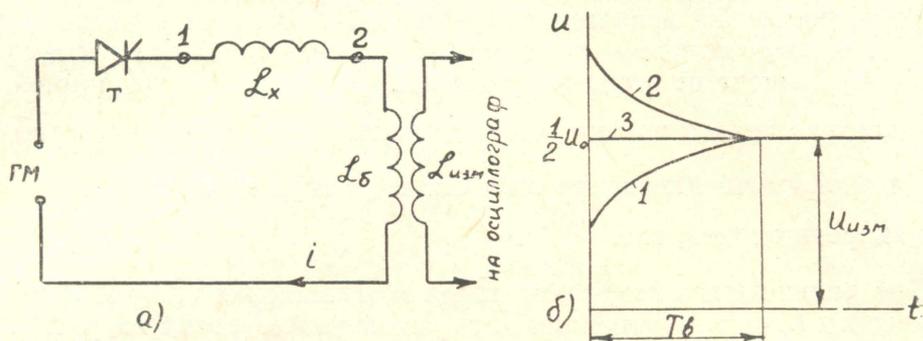


Рис. 4. Схема для измерения статической индуктивности. Кривые индуктивных напряжений на $L_x L_б$

вестная регулируемая статическая индуктивность $L_б$. При открывании тиристора Т постоянное напряжение от специального генератора мощности ГМ, обеспечивающего компенсацию активного сопротивления цепи, подается на последовательно включенные L_x и $L_б$. Ток в этой цепи изменяется в соответствии с выражением

$$i = \frac{U_0}{L_{\text{хст}} + L_б} \cdot t + \frac{U_0}{R_в} (1 - e^{-t/\tau_в}), \quad (6)$$

где

U_0 — постоянное напряжение на выходе ГМ;

$L_{\text{хст}}$ — значение статической индуктивности секции, соответствующее индуктивности L на рис. 1, а,

$r_в$ и $L_в$ — параметры вихревых контуров в меди проводников паза.

Поскольку поле вихревых токов оказывает влияние только на потокосцепление паза и не оказывает влияния на потокосцепление катушки $L_б$, а общее напряжение, приложенное к ним, постоянно, то, очевидно, индуктивные напряжения на L_x и $L_б$ изобразятся кривыми 1 и 2 соответственно на рис. 4, б, при условии, что $L_{\text{хст}} = L_б$, что можно добиться регулировкой $L_б$. Прямая 3 соответствует напряжению на каждой из индуктивностей при отсутствии вихревых токов. После того, как вихревые токи установятся, напряжение U_0 будет делиться между L_x и $L_б$ и поддерживаться постоянным.

Так как исследуемая секция находится в пазу и недоступна для измерения индуктивного падения напряжения на ней, то, пользуясь измерительной катушкой $L_{\text{изм}}$, можно на экране осциллографа наблюдать кривую 2. Если U_0 — напряжение на выходе ГМ, $U_{\text{изм}}$ — амплитуда горизонтального участка кривой 2, k_w — коэффициент трансформации между $L_б$ и $L_{\text{изм}}$, то, регулируя $L_б$, можно добиться того, что $U_{\text{изм}} \cdot k_w = \frac{1}{2} U_0$. Тогда статическая индуктивность секции $L_{\text{хст}}$ рав-

на величине известной индуктивности $L_б$, которая может быть заранее отградуирована. Для этих измерений величина напряжения U_0 не имеет значения, так как измерения делаются в установившемся режиме.

Пользуясь кривой 2, динамическую индуктивность секции $L_{хд}$ можно выразить следующей функцией времени на отрезке T_B :

$$L_{хд} = L_6 \cdot \frac{U_0 - U_6(t)}{U_6(t)}, \quad (7)$$

где $U_6(t)$ — текущие значения индуктивного напряжения на L_6 .

Для вычисления $L_{хд}$ величина напряжения U_0 играет существенную роль, поскольку величина вихревой составляющей тока цепи (формула 6), а следовательно, величины потокосцепления паза и напряжения $U_6(t)$ зависят от этого напряжения. Очевидно, его величиной нужно задаваться исходя из того, что отношение $\frac{U_0}{L_{хст} + L_6}$ должно быть равно той скорости изменения тока секции, какую она имела бы в отсутствие вихревых токов, т. е. $\frac{2i_a}{T_k}$.

Для дальнейшего измерения токов и вычисления эквивалентной индуктивности L_x и L_6 включаются параллельно по схеме на рис. 5.

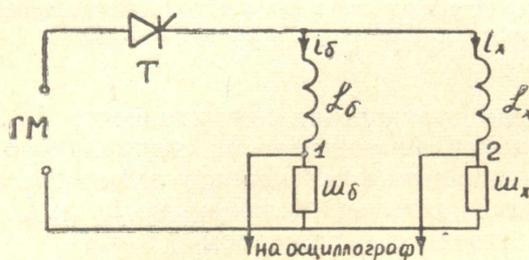


Рис. 5. Схема для измерения токов секции

Для сохранения прежней скорости роста тока U_0 уменьшаем в два раза. Если шунты $Ш_x$ и $Ш_6$ откалиброваны и активные сопротивления L_6 и L_x равны, то с учетом равенства статических индуктивностей, с точек 1—2 можно снимать кривую изменения вихревой составляющей тока секции, которая будет равна разности $i_x - i_6$ (кривая i_2 на рис. 2). С шунта $Ш_6$ снимается кривая тока, аналогичная i_1 , на рис. 2, с шунта $Ш_x$ — кривая тока, аналогичная i , на рис. 2. Имея такие кривые, по формуле (5) можно вычислить эквивалентную индуктивность и ее процентное уменьшение относительно статического значения, вызванное вихревыми токами.

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Разработанная методика позволяет:

1. Измерять статическую индуктивность обмоток, например, коммутирующей секции м. п. т. даже в тех случаях, когда влияние вихревых токов значительно.
2. Измерять динамическую индуктивность секции в любой нужный момент времени.
3. Измерять экспоненциальную составляющую тока секции, появляющуюся благодаря наличию вихревых токов в меди паза.
4. Рассчитать эквивалентную индуктивность секции, необходимую для расчета электромагнитных процессов в секции.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Прусс-Жуковский, М. К. Знесина и др. Опытное определение параметров коммутируемых секций машин постоянного тока. Отчет № 12—62. 2 института электромеханики, Л., 1962.

2. А. Ф. Гриценко. Измерение индуктивности коммутируемых секций, Труды ОМИИТа, т. 40, 1963.
 3. А. В. Иванов-Смоленский, А. И. Дулькин. Исследование магнитных проводимостей и индуктивностей обмоток электрических машин и аппаратов методом моделирования на электропроводной бумаге. Известия вузов, «Электромеханика», 1963, № 10.
 4. В. В. Магидсон. Измерение и расчет индуктивных параметров секций якоря машин постоянного тока. Известия вузов, «Электромеханика», 1963, № 6.
 5. Л. Р. Нейман и К. С. Демирчян. Теоретические основы электротехники, «Энергия», 1967.
 6. Ю. А. Бахвалов, И. Б. Битюцкий. Синтез цепи, моделирующей коммутационные вихревые токи в пазу якоря. «Электромеханика», 1967, № 10.
 7. В. Т. Фролкин. Импульсные устройства, М., 1966.
 8. Р. Рюденберг. Переходные процессы в электроэнергетических системах. ИЛ, М., 1955.
-