

К ДИНАМИКЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В. Н. ГУРНИЦКИЙ

(Рекомендовано научным семинаром электромеханического факультета)

Расчету динамических режимов электромагнитов постоянного тока посвящено большое число работ [Л. 1—8 и др.]. Динамические характеристики электромагнита дают реальную картину всех протекающих в нем сложных электромагнитных, электромеханических и, в конечном итоге, тепловых процессов.

Однако до настоящего времени не существует достаточно простого и наглядного метода, позволяющего с помощью небольшого числа вычислительных и графических операций, при простоте математического аппарата произвести расчет динамических переходных процессов электромагнита. В данной работе ставится цель в какой-то мере восполнить этот пробел.

Главными динамическими характеристиками электромагнита считаются зависимости пути якоря и тока в обмотке от времени. Для Ш-образного электромагнита с поперечно движущимся якорем, являющегося элементом линейного электромагнитного двигателя (рис. 1), главными динамическими характеристиками следует считать кривые скорости якоря и тока в обмотке.

Переходные процессы в электромагните, как известно, полностью описываются следующими уравнениями

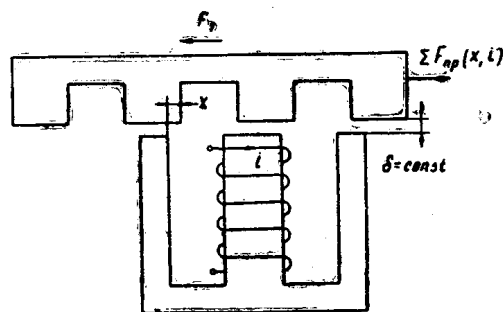


Рис. 1. Ш-образный электромагнит с поперечно движущимся зубчатым якорем.

$$U = ir + \frac{d\psi}{dt}, \quad (1)$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dV}{dt} = F_{\tau} - \Sigma F_{\text{пр}}, \quad (2)$$

где U — приложенное напряжение к обмотке;

i — мгновенное значение тока;

r — активное сопротивление цепи обмотки;

$\frac{d\psi}{dt}$ — скорость изменения потокосцепления обмотки во времени;

m — приведенная к якорю масса движущихся частей;
 x — путь якоря;
 V — мгновенная скорость якоря;
 F_T — электромагнитная сила тяги, развиваемая якорем;
 $\Sigma F_{пр}$ — суммарная противодействующая сила.

Выразим из уравнений (1) и (2) $V = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ в конечных разностях. Опуская промежуточные преобразования, получим из уравнения (1)

$$V' = \frac{\left[U - \left(i_n + \frac{\Delta i}{2} \right) r \right] \Delta x}{\Delta \psi}, \quad (3)$$

из уравнения (2)

$$V'' = \frac{V_n}{2} + \sqrt{\frac{V_n^2}{4} + \frac{\Delta x}{m} (F_T - \Sigma F_{пр})}, \quad (4)$$

где $\frac{\Delta i}{2}$ и $\frac{\Delta \psi}{2}$ — средние значения приращений тока и потокосцепления на участке пути Δx ;

i_n — величина тока в конце интервала, предыдущего рассматриваемому;

V_n — скорость якоря в конце каждого предыдущего интервала.

Электромагнитная сила тяги F_T на каждом интервале приближенно определяется

$$F_T = \frac{i_n + \frac{\Delta i}{2}}{2} \cdot \frac{\Delta \psi}{\Delta x}. \quad (5)$$

Для построения динамических характеристик электромагнита необходимо знать зависимости изменения потокосцепления его обмотки по пути перемещения якоря. Построим эти характеристики (рис. 2) для различных токов, отличающихся на $\Delta i = \text{const}$.

До начала уравнивания якоря магнитная цепь большинства электромагнитов не насыщена, поэтому ток и время трогания определяются по обычным формулам

$$i_T = \sqrt{\frac{2(\Sigma F_{пр})_n}{\left(\frac{dL}{dx} \right)_n}}, \quad (6)$$

$$t_c = \frac{L_n}{r} \cdot \ln \frac{1}{1 - \frac{r}{U} \cdot i_T}, \quad (7)$$

где $(\Sigma F_{пр})_n$ — суммарная противодействующая сила в момент начала движения якоря;

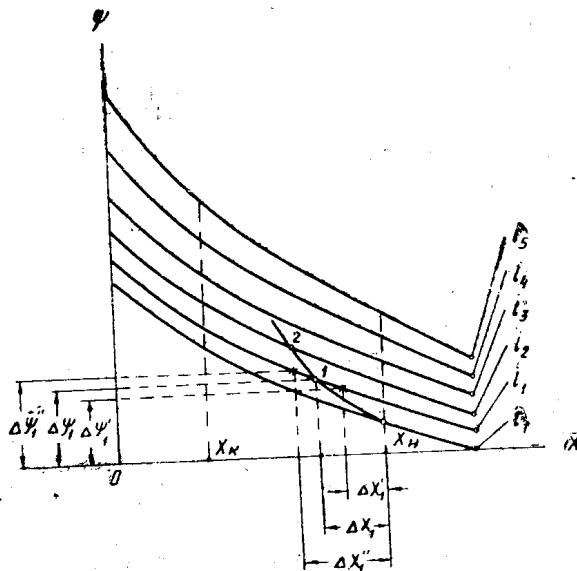


Рис. 2. Построение переходной кривой потокосцепления.

$\left(\frac{dL}{dx}\right)_n$ — производная индуктивности обмотки в начальной точке пути (определяется методом касательной);

L_n — начальная индуктивность.

Среднее значение тока i_1 на первом участке движения Δx_1 равно

$$i_1 = i_r + \frac{V}{2}.$$

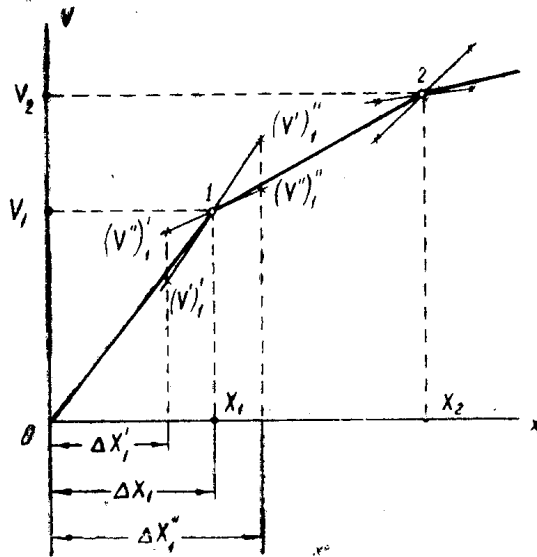


Рис. 3. Построение характеристики скорости якоря электромагнита от пути.

Предположим, что якорь переместился из начального положения x_n на малое расстояние $\Delta x_1'$; по кривым $\psi(x)$ (рис. 2) найдем соответствующее приращение $\Delta \phi_1'$. Используя формулы (3), (4), (5), определим $(V')_1$ и $(V'')_1$.

Для другого приращения $\Delta x_1''$ аналогичным образом найдем $(V')_1''$ и $(V'')_1''$.

Соединим точки $(V')_1'$ и $(V'')_1''$, а также $(V')_1''$ и $(V'')_1''$ прямолинейными отрезками (рис. 3). Их пересечение даст графическое решение уравнений (3) и (4) на первом интервале: скорость V_1 и путь x_1 .

Изменение всех остальных величин на участке Δx_1 далее легко определяется. На всех следующих участках построения производятся таким же образом. Некоторые величины в ходе динамического процесса (ток, потокосцепление) могут уменьшаться. Тогда их приращения нужно брать со знаком «минус». При этом сами величины проходят через экстремум, что видно в ходе построения.

Рассмотренная методика построения динамических характеристик электромагнитов постоянного тока была проведена при расчете динамических характеристик электромагнита, изображенного на рис. 1. Погрешности вычислений по сравнению с соответствующими осциллограммами не превышали 10—15%, что объясняется, в первую очередь, неточностями представления зависимостей $\psi(x)$ при $t = var$.

Выводы

1. Не имеющая никаких ограничений, кроме пренебрежения вихревыми токами, предлагаемая методика, очевидно, может быть применена также для расчета динамических переходных процессов и других электромагнитных механизмов постоянного тока.

2. Накопление ошибки в ходе построений не происходит, так как на каждом интервале она корректируется совместным графическим решением рабочих уравнений (3) и (4).

3. В случае ненулевой начальной скорости якоря, динамические характеристики электромагнита могут быть построены с использованием тех же формул.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. Яссе. Электромагниты, ГЭИ, 1934.
2. Н. А. Лившиц. К вопросу об анализе времени движения якоря электромагнитных механизмов, Автоматика и телемеханика № 2, 1939; Определение времени движения подвижных органов электромагнитного механизма при его срабатывании, Известия электропромышленности слабого тока № 11, 1940.
3. А. И. Москвитин. Основные проблемы электрических машин прямолинейного движения, Электричество № 2, 1941; Уравнения процессов в электромагните с движущимся якорем, Известия АН СССР ОТН № 4, 1948; Электрические машины возвратно-поступательного движения, АН СССР, 1950.
4. Б. С. Сотсков. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры, ГЭИ, 1950; К вопросу о приближенном решении уравнений движения для подвижной системы реле, Автоматика и телемеханика № 1, 1950; Сотсков Б. С. и др. Зависимость времени движения подвижной системы реле от параметров реле, Автоматика и телемеханика № 4, 1951.
5. Н. Е. Лысов. Расчет электромагнитных механизмов, Оборонгиз, 1949.
6. И. И. Пеккер. Применение методов численного интегрирования для расчета динамических характеристик электромагнитов постоянного тока, Труды МЭИ вып. VII, ГЭИ, 1951; Графоаналитический расчет динамических характеристик электромагнитов, ИВУЗ Электромеханика № 8, 1958; О представлении динамических характеристик электромагнитов с помощью степенных рядов, ИВУЗ Электромеханика № 9, 1958.
7. Р. А. Агаронянц. Переходные процессы электромагнитных механизмов постоянного тока в динамическом режиме, Вестник электропромышленности № 3, 1958.
8. Тер-Акопов А. К. Аналитический метод расчета динамики электромагнитов постоянного тока, Электричество № 5, 1960.