

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, Е. М. ТИМОШЕНКО

**К ВОПРОСУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКОГО ТЯГОВОГО УСИЛИЯ И ПРОВОДИМОСТИ
РАБОЧЕГО ЗАЗОРА ЭЛЕКТРОМАГНИТА**

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

Анализ методов расчета динамических характеристик электромагнитных механизмов, проведенный А. К. Тер-Акоповым [1], показывает, что из всех существующих методов наиболее строгим и общим является графоаналитический метод Н. Е. Лысова [2]. Однако он не учитывает влияния вихревых токов на динамические характеристики электромагнитов и предполагает известными силы, препятствующие перемещению якоря, и зависимости потокосцепления от тока при различных положениях якоря. Поэтому неточность расчета может определяться как отсутствием учета влияния вихревых токов, так и неточностями определения зависимости потокосцепления от тока и неполным учетом сил, препятствующих перемещению якоря. Для того, чтобы разработать методику более точного расчета динамических характеристик электромагнита, необходимо экспериментальным путем установить причины неточностей существующих расчетов.

Одной из важнейших динамических характеристик электромагнита, по которой можно судить о причинах ошибок расчета, является тяговое усилие. Изменение тягового усилия в процессе движения якоря может быть сравнительно легко определено при известных силах сопротивления движению и снятой экспериментально кривой хода якоря. Динамическое тяговое усилие в этом случае определяется суммой сил сопротивления движению и результирующей силы, действующей на якорь в процессе движения. Результирующую силу получают двойным дифференцированием кривой хода якоря.

Задача экспериментального определения динамического тягового усилия становится неразрешимой при неизвестном влиянии вихревых токов и неизвестных силах сопротивления движению якоря. В литературе имеется только общее указание на то, что динамическое тяговое усилие, ввиду наличия в реальных условиях вихревых токов, не равно статическому. Прежде чем говорить о влиянии вихревых токов на тяговое усилие и возможностях их учета, остановимся на понятии индуктивности электромагнита.

В книге А. Я. Буйлова [3, стр. 280] говорится, что индуктивность (коэффициент самоиндукции) «не есть величина вполне определенная, а условная, зависящая от принятого ее определения» (имеется в виду, что в зависимости от определения индуктивность может быть статической, динамической или энергетической), и «поэтому не может

считаться физическим параметром, вполне определяющим процесс».

Однако из работы [4] вытекает, что статическая индуктивность может быть использована для определения тягового усилия электромагнита.

В работах [3, стр. 279, 5, стр. 250] показывается различие между статической и динамической индуктивностью катушки со сталью, но нигде не указывается связь между ними, которую можно установить, если воспользоваться уравнениями электрического равновесия для цепи, содержащей индуктивно-активное сопротивление. Уравнение электрического равновесия для таких цепей может быть представлено в виде

$$u = iR + \frac{d\Psi}{dt}, \quad (1)$$

или при известной динамической индуктивности L_d

$$u = iR + L_d \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

или для случая перемещающегося якоря при линейных магнитных характеристиках магнитной системы

$$u = iR + L_{ст} \frac{di}{dt} + i \frac{dL_{ст}}{dt}. \quad (3)$$

Последнее выражение справедливо при неподвижном якоре и нелинейной зависимости потокосцепления от тока электромагнита, если под $L_{ст}$ понимать статическую индуктивность.

Действительно, если задана зависимость потокосцепления от тока электромагнита $\Psi = f(i)$, то статическая индуктивность, как функция тока определится выражением

$$L_{ст} = \frac{f(i)}{i}$$

и производная статической индуктивности по времени

$$\frac{dL_{ст}}{dt} = \frac{1}{i^2} \left[\frac{df(i)}{dt} i - \frac{di}{dt} \cdot f(i) \right].$$

Подставляя $L_{ст}$ и $\frac{dL_{ст}}{dt}$ в уравнение (3), получим

$$u = iR + \frac{df(i)}{dt},$$

т. е. получаем уравнение (1). Следовательно, статическая индуктивность может быть использована и для расчета переходных процессов в цепях, содержащих индуктивное сопротивление.

Под статической индуктивностью в данном случае мы понимаем не отношение потокосцепления самоиндукции, определенного при постоянном токе к току в цепи, как это принято [4], а отношение мгновенного значения потокосцепления самоиндукции к мгновенному значению переменного тока, определенных для одного и того же момента времени. Связь между динамической и статической индуктивностями из уравнений (2) и (3) определится выражением

$$L_d = L_{ст} + i \frac{dL_{ст}}{di}. \quad (4)$$

Все это говорит о том, что индуктивность, будь она статической, динамической или энергетической, является не условной, а вполне опре-

деленной величиной. Для определения величины магнитной энергии электромагнита при заданной величине тока удобнее пользоваться энергетической индуктивностью. При определении величины э. д. с., индуктируемой в цепи, удобнее пользоваться динамической индуктивностью. Статическая же индуктивность наиболее полно отражает процессы, происходящие в электромагните, и может быть использована для расчета переходных процессов, для определения величины магнитной энергии, э. д. с., индуктируемой в цепи, потокосцепления и тягового усилия электромагнита.

Из принятого определения статической индуктивности вытекает, что если результирующий поток, обусловленный наличием короткозамкнутых контуров, в которых возникают вихревые токи, формально рассматривать как поток самоиндукции, то в реальных условиях наличие вихревых токов сказывается не только на величине динамической индуктивности, как об этом говорится в работе [5, стр. 249], но и на величине статической индуктивности.

Если можно было бы учитывать изменение статической индуктивности магнитопровода электромагнита вследствие наличия явлений гистерезиса и вихревых токов, то ее можно было бы использовать для определения тягового усилия и расчета реального электромагнита. Иначе говоря, наличие вихревых токов можно было бы учитывать изменением зависимости потокосцепления от тока для тех или иных участков магнитопровода. Для электромагнитов со сложными цепями этот вопрос требует специальности проработки.

Остановимся на более простых случаях и на практически полезных выводах, вытекающих из их рассмотрения. Предположим, мы имеем электромагнит с последовательной магнитной цепью, общая статическая индуктивность которого при каком-то потокосцеплении Ψ равна

$$L_{об} = \frac{L_c \cdot L_b}{L_c + L_b},$$

где $L_c = f(\Psi)$ — статическая индуктивность магнитопровода, учитывающая вихревые токи;

$L_b = f(\delta)$ — индуктивность рабочего воздушного зазора.

Переходя к определению тягового усилия электромагнита и используя общую формулу (12), приведенную в работе [4], запишем

$$i = \frac{\Psi [f(\Psi) + f(\delta)]}{f(\Psi) + f(\delta)},$$

$$\left(\frac{\partial i}{\partial \delta} \right)_{\Psi = \text{const}} = - \frac{\Psi}{f^2(\delta)} \cdot \frac{df(\delta)}{d\delta},$$

$$F_s = \int_0^{\Psi} \frac{\Psi}{f^2(\delta)} \cdot \frac{df(\delta)}{d\delta} d\Psi = \frac{1}{2} \frac{\Psi^2}{L_b^2} \cdot \frac{dL_b}{d\delta}. \quad (5)$$

Полученный результат позволяет сделать вывод, что независимо от того, протекает ли в катушке постоянный ток или меняется по какому-либо закону, возникают ли вихревые токи в магнитопроводе или нет, тяговое усилие при одинаковых положениях якоря электромагнита с последовательной магнитной цепью и одним и тем же потокосцеплении имеет одинаковую величину. Изменяется только величина тока, обеспечивающая одинаковое потокосцепление.

Этот вывод может быть распространен и на электромагниты с более сложной магнитной цепью, у которых по участку магнитной цепи,

в котором могут возникнуть вихревые токи, проходит полный магнитный поток и этот участок соединяется последовательно со всеми остальными участками магнитной цепи. Действительно, в этом случае можно рассматривать L_c как индуктивность такого участка, а L_b — как суммарную индуктивность всех остальных участков магнитной цепи.

Равенство статического и динамического тяговых усилий при одинаковых положениях якоря и одинаковом потокосцеплении катушки дает возможность экспериментальным путем определить величину тягового усилия, действующего на якорь при его движении, и тогда, когда не известны силы, противодействующие движению якоря. Соблюдение этого равенства позволяет при определении динамического тягового усилия избежать неточности методики, приведенной в [6], где вихревые токи учитывают при снятии зависимости потокосцепления от тока электромагнита и при расчете тягового усилия пренебрегают тепловыми потерями в стали.

Чтобы установить, можно ли для того или иного электромагнита считать равным статическое усилие динамическому при одинаковом зазоре и потокосцеплении, необходимо при фиксированных значениях зазора, что значительно проще, чем при движении якоря и неизвестных силах сопротивления движению, экспериментальным путем определять отношения тягового усилия к квадрату потокосцепления при различной скорости изменения тока. Это равенство соблюдается, если для всех используемых величин воздушных зазоров при протекании тока в катушке, по величине и скорости изменения, соответствующего рабочему току электромагнита, выполняется вытекающее из выражения (5) условие

$$\frac{2F_s}{\Psi^2} = \text{const}$$

при фиксированном положении якоря и одинаковом потокосцеплении независимо от скорости изменения и потокосцепления.

Исследования, проведенные с участием инженера А. П. Тронова на кафедре горных машин ТПИ, показали, что для электромагнита броневых типа, используемого в качестве привода молотка МС-15, это условие соблюдается. Отклонения отношения тягового усилия к квадрату потокосцепления от постоянной величины были в пределах погрешности опыта (5—10%). Это дает возможность при известных зависимостях статического тягового усилия от потокосцепления катушки и статических зависимостях потокосцепления от тока электромагнита для различных фиксированных значений рабочего зазора по осциллограммам тока, напряжения и перемещения бойка определить работу, совершаемую электромагнитом, влияние вихревых токов на рабочий процесс молотка и работу сил трения в динамике.

Из выражения (5) вытекает еще один полезный вывод. Поскольку тяговое усилие зависит только от магнитной энергии рабочего воздушного зазора и соблюдается условие

$$\frac{2F_s}{\Psi^2} = \text{const при } \delta = \text{const}$$

независимо от величины и скорости изменения потокосцепления, то есть возможность использовать выражение (5) для экспериментального определения проводимости рабочего зазора электромагнита с последовательной магнитной цепью. Для этого определяется зависимость $F_s = f(\Psi^2)$ при различных фиксированных значениях воздушного зазора. Зависимость $F_s = f(\Psi^2)$ может быть определена включением катушки под постоянное напряжение при осциллографировании тока, величины

тягового усилия электромагнита и напряжения, приложенного к катушке. Изменение величины тягового усилия может быть записано при помощи тензодатчика или определено более простым методом (напри-

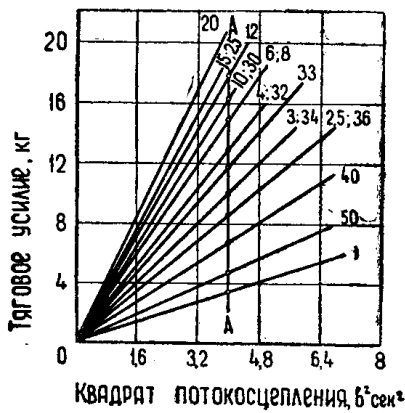


Рис. 1. Зависимости тягового усилия от потокосцепления при различных величинах воздушного зазора.

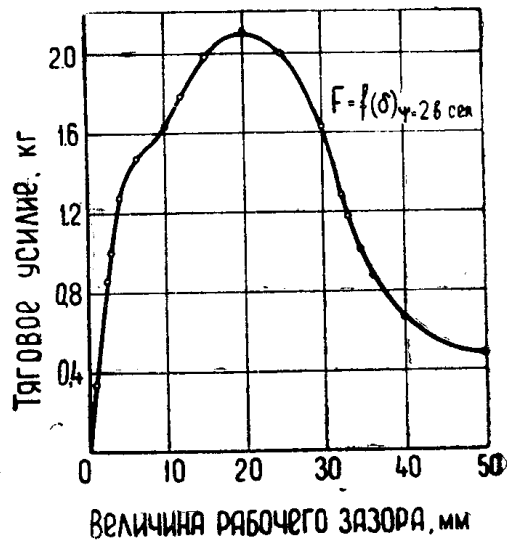


Рис. 2. Зависимость тягового усилия от величины воздушного зазора при постоянном потокосцеплении.

мер, подвеской груза) при установившемся токе катушки. На основании полученных осциллограмм при известном омическом сопротивлении катушки строится кривая

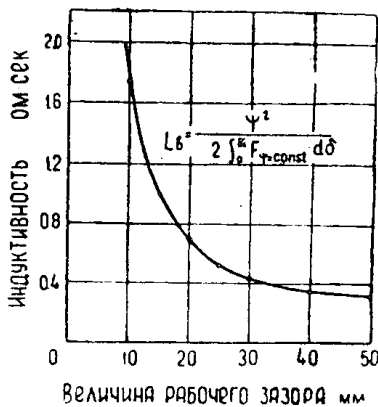


Рис. 3. Зависимость индуктивности рабочего зазора от величины воздушного зазора.

$$\frac{d\Psi}{dt} = u - iR.$$

Графическим интегрированием этой кривой определяется

$$\Psi = \int_0^t (u - iR) dt + c_1.$$

Если перед каждым осциллографированием магнитопровод электромагнита будет размагничен, то постоянная $c_1 = 0$. По найденным усилию и потокосцеплению строятся прямые $F = f(\Psi^2)$ (рис. 1).

Для того, чтобы получить выражение для определения индук-

тивности рабочего зазора, умножим правую и левую части выражения (5) на $d\delta$,

$$F_s d\delta = \frac{1}{2} \Psi^2 \frac{1}{L_B^2} dL_B.$$

Если потокосцепление при перемещении якоря остается величиной постоянной, то

$$\int_0^{\delta_i} F_{\Psi=\text{const}} d\delta = \frac{1}{2} \Psi^2 \frac{1}{L_{B_i}} + c_2.$$

Так как при $\delta = 0$ $L_b = 0$, постоянная интегрирования $c_2 = 0$ и индуктивность рабочего зазора при каком-то зазоре δ_i определится выражением

$$L_{b_i} = \frac{\Psi^2}{2 \int_0^{\delta_i} F_{\Psi=\text{const}} d\delta}.$$

Точки кривой $F_s = f(\delta)_{\Psi=\text{const}}$ (рис. 2) определяются точками пересечения прямой А—А (рис. 1), проведенной параллельно оси ординат, с соответствующими прямыми $F_s = f(\Psi^2)_{\delta_i}$. Определение индуктивности рабочего зазора L_{b_i} при каком-то зазоре δ_i , таким образом, сводится к определению площади, заключенной между кривой $F_s = f(\delta)_{\Psi=\text{const}}$ и осью абсцисс в интервале от $\delta = 0$ до δ_i . По результатам вычислений строится кривая $L_b = f(\delta)$ (рис. 3) и при известном числе витков катушки строится кривая проводимости $G_b = f(\delta)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. К. Тер-Акопов. Анализ методов расчета динамических характеристик электромагнитных механизмов. Труды МАИ, вып. 85, Оборонгиз, 1957.
2. Н. Е. Лысов. Расчет электромагнитных механизмов. Оборонгиз, 1949.
3. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
4. Н. П. Ряшенцев, Е. М. Тимошенко. О расчете тягового усилия электромагнита. Статья опубликована в настоящем сборнике.
5. Л. Р. Нейман и П. А. Калантаров. Теоретические основы электротехники. Ч. I, Госэнергоиздат, 1959.
6. А. Г. Сливинская, А. А. Чунихин. К расчету динамической тяговой характеристики электромагнита постоянного тока. Труды МЭИ, вып. XV, Госэнергоиздат, 1955.