

Н. П. РЯШЕНЦЕВ, Е. М. ТИМОШЕНКО

ОБ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗОВАНИИ В ЭЛЕКТРОМАГНИТЕ

(Представлено кафедрой горных машин и рудничного транспорта)

При проектировании электромагнитных механизмов вопрос о к. п. д. электромагнита не ставится, так как механическая работа, совершаемая различными реле, контакторами, ничтожно мала по сравнению с потребляемой из сети энергией. К. п. д. механизмов типа контактора практически равен нулю. Поэтому у авторов, занимающихся разработкой теории и методов расчета электромагнитных механизмов, не возникало необходимости уделять большое внимание вопросам энергопреобразования. Преобразование энергии в электромагните рассматривалось до сих пор только с целью вывода формулы для определения тягового усилия [1—7] и в объеме, недостаточном для полного анализа рабочего процесса, выявления недостатков и разработки рекомендаций по улучшению электромагнитных машин ударного действия.

Решение проблемы использования электромагнита в качестве привода электрических машин возвратно-поступательного действия требует более полного рассмотрения вопросов энергопреобразования.

Процессы, происходящие в электромагните при включении его под постоянное напряжение, описываются уравнением электрического равновесия:

$$u = i^2R + \frac{d\Psi}{dt}.$$

Умножением правой и левой части этого уравнения на ibt и последующим интегрированием получают энергетический баланс в электромагните за промежуток времени от 0 до t

$$\int_0^t (u \cdot i - i^2R) dt = \int_0^\Psi id\Psi. \quad (1)$$

В том случае, когда внешние механические силы, препятствующие перемещению якоря, остаются равными тяговому усилию электромагнита, механическая работа не совершается, и энергия, поступающая из сети за вычетом потерь в меди, идет на увеличение магнитной энергии.

Магнитная энергия всего объема магнитного поля электромагнита равна $\int_0^\Psi id\Psi$. Графически эта энергия представлена на рис. 1 площадью oac_1 .

Энергопреобразование в электромагните при перемещающемся якоре будем рассматривать применительно к соленоидным молоткам со свободным выбегом бойка (включение катушки электромагнита по схеме однополупериодного выпрямления), полагая, как это делают в подобных случаях [1—5], что магнитопровод не насыщен и потери на гистерезис и вихревые токи отсутствуют. Уравнение электрического равновесия при перемещающемся якоре может быть представлено в виде

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{dt}. \quad (2)$$

Для того, чтобы получить энергетический баланс в электромагните при перемещающемся якоре, воспользуемся формулой, определяющей величину тягового усилия [8]

$$F_{\text{я}} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\delta}, \quad (3)$$

и выражением для определения индуктивности

$$L = \frac{\Psi}{i}, \quad (4)$$

где Ψ — потокосцепление самоиндукции;

i — ток катушки электромагнита.

Умножая (2) на idt и подставляя (3) и (4), после некоторых преобразований получаем

$$\int_{t_1}^{t_2} (u \cdot i - i^2 R) dt = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} (\Psi di + id\Psi) + \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{я}} v dt, \quad (5)$$

где $v = \frac{d\delta}{dt}$ — скорость движения якоря электромагнита;

δ — перемещение якоря.

Или можно написать

$$\int_{t_1}^{t_2} id\Psi = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} (\Psi di + id\Psi) + \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{я}} v dt. \quad (6)$$

Левая часть выражения (6) представляет собой величину электрической энергии, превратившейся в энергию магнитного поля при $u : i - i^2 R > 0$ или выделившейся из нее при $u : i - i^2 R < 0$ за рассматриваемый промежуток времени $t_2 - t_1$. Первый член правой части — приращение энергии магнитного поля и второй член — механическая работа электромагнита или величина механической энергии, превратившейся в магнитную, за этот же промежуток времени.

Перемещение якоря, а следовательно, и процесс превращения магнитной энергии в механическую работу возможен тогда, когда тяговое усилие электромагнита превышает противодействующие силы. В зависимости от величины этих сил или внешних сил, направленных согласно с тяговым усилием электромагнита, а также массы якоря и приложенного напряжения, может быть три качественно отличных случая энергопреобразования.

1. Процесс превращения магнитной энергии в механическую работу может протекать без превращения магнитной энергии в электрическую и электрической в магнитную, то есть при постоянном потокосцеплении. Электрическая энергия в этом случае расходуется только на по-

крытие тепловых потерь в обмотке, а механическая работа, совершенная электромагнитом за промежуток времени $t_2 - t_1$, равна уменьшению магнитной энергии электромагнита.

$$\int_{t_1}^{t_2} F_\delta d\delta = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} \Psi di.$$

2. Вторым качественно отличным случаем энергопреобразования в электромагните является превращение магнитной энергии в механическую при одновременном превращении электрической энергии, подведенной из сети, в магнитную. Этот процесс может протекать:

- а) при частичном восстановлении магнитной энергии;
- б) при постоянной величине ее;
- в) с увеличением магнитной энергии.

Величина магнитной энергии будет оставаться постоянной, когда

$$\int_{t_1}^{t_2} (\Psi di + id\Psi) = 0,$$

то есть

$$-\frac{d\Psi}{di} = \frac{\Psi}{i} = L.$$

Если процесс протекает при постоянной величине тока, то из уравнения (6) имеем

$$\int_{t_1}^{t_2} id\Psi = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} id\Psi + \int_{t_1}^{t_2} F_\delta d\delta,$$

то есть магнитная энергия увеличивается ровно на столько, сколько ее расходуется на совершение механической работы.

3. Процесс энергопреобразования в электромагните может протекать при одновременном превращении магнитной энергии и в механическую работу, и в электрическую энергию. Последняя при этом расходуется на тепловые потери и возвращается внешнему источнику энергии.

Наглядно энергопреобразование в электромагните может быть представлено графиками, построенными в координатах потокосцепление — ток.

На рис. 1 представлены все три случая преобразования энергии. Здесь прямые 1 и 2 — зависимости $\Psi = f(i)$ соответственно при зазоре δ_1 и $\delta_2 < \delta_1$; точка *a* характеризует состояние электромагнита до начала движения.

Энергия, запасенная электромагнитом к началу движения якоря, пропорциональна площади треугольника oac_1 . Прямые ab_1 , ab_2 и ab_3 характеризуют изменение потокосцепления при движении якоря, а площади треугольников ob_1c_1 , ob_2c_2 и ob_3c_3 пропорциональны энергии, запасенной электромагнитом к концу рассматриваемого времени движе-

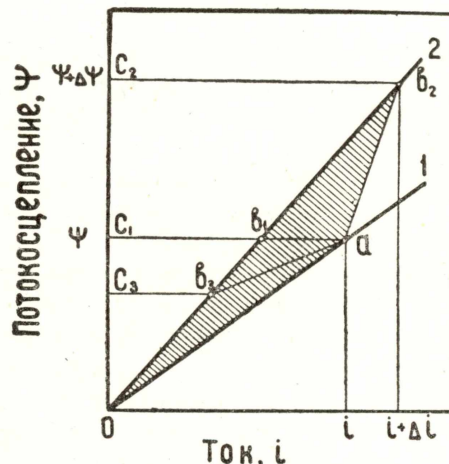


Рис. 1. Электрический баланс в электромагните.

ния, соответственно при первом, втором и третьем случаях энергопреобразования.

Увеличение магнитной энергии за счет электрической, поступающей от внешнего источника (второй случай энергопреобразования — потоко-сцепление изменяется по прямой ab_2 от точки a к точке b_2), определяется площадью трапеции $ab_2c_2c_1$.

Магнитная энергия, превращающаяся в электрическую за время движения якоря при третьем случае энергопреобразования, пропорциональна площади трапеции $ac_1c_3b_3$.

Согласно закону сохранения энергии механическая работа электромагнита в первом, втором и третьем случаях энергопреобразования соответственно пропорциональна площади треугольников oab_1 , oab_2 и oab_3 .

Если к якорю электромагнита приложена внешняя сила, например, обусловленная пружиной, направление которой совпадает с тяговым усилием электромагнита, то потенциальная энергия пружин расходуется на увеличение кинетической энергии якоря, приводит к изменению тягового усилия, но на графике соответствующей площадкой изображена быть не может, так как уравнение (6) непосредственно не отражает работу внешних сил. Уравнение энергетического баланса при наличии внешних сил можно записать, воспользовавшись уравнением движения якоря

$$F_э = m \frac{dv}{dt} + F_c - F_н, \quad (7)$$

где m — масса якоря;

F_c — силы сопротивления движению;

$F_н$ — внешние силы, направленные согласно с тяговым усилием электромагнита.

Подставляя (7) в уравнение (6), получаем

$$\int_{t_1}^{t_2} id\Psi = \frac{1}{2} \int_{t_1}^{t_2} (\Psi di + id\Psi) + \frac{m}{2} (v_2^2 - v_1^2) - \int_{t_1}^{t_2} F_н d\delta + \int_{t_1}^{t_2} F_c d\delta.$$

При наличии внешних сил, направленных согласно с тяговым усилием электромагнита, процесс энергопреобразования сопровождается уменьшением потребления или более интенсивным выделением электрической энергии.

До сих пор рассматривался двигательный режим работы электромагнита, то есть такой режим, при котором магнитная энергия превращалась в механическую.

Процесс энергопреобразования в электромагните изменится на обратный, если внешние механические силы, приложенные к якорю, будут больше тягового усилия электромагнита и якорь будет перемещаться в сторону увеличения воздушного зазора. При этом, как видно из уравнения (6), механическая энергия, потраченная на преодоление тягового усилия электромагнита при перемещении якоря, будет превращаться в магнитную энергию. Возможны три качественно отличных случая преобразования механической энергии в магнитную.

1. Преобразование механической энергии в магнитную без превращения магнитной энергии в электрическую и электрической в магнитную. Этот процесс может протекать только при постоянном потоко-сцеплении и увеличении тока электромагнита. Электрическая энергия, поступающая от внешнего источника, в этом случае расходуется только на покрытие тепловых потерь в обмотке.

2. Преобразование механической энергии в магнитную с одновременным превращением электрической энергии в магнитную. Этот процесс может быть представлен рис. 1, если считать, что изменение потокосцепления идет по прямой b_3a от точки b_3 к точке a .

3. Преобразование механической энергии в магнитную с одновременным преобразованием магнитной энергии в электрическую. Этот процесс может протекать:

- а) с увеличением магнитной энергии;
- б) при неизменной величине магнитной энергии;
- в) с уменьшением магнитной энергии.

Процесс преобразования механической энергии в магнитную с уменьшением последней означает, что магнитная энергия быстрее превращается в электрическую, чем пополняется за счет механической энергии.

Тот или иной процесс энергопреобразования зависит от того, как благодаря внешним условиям будут изменяться во времени потокосцепление и ток катушки электромагнита, то есть каковы будут производная $\frac{d\psi}{di}$ и знаки приращений тока и потокосцепления.

Проиллюстрируем перечисленные выше случаи энергопреобразования на одном рисунке. Пусть точка O (рис. 2), лежащая на прямой O_1-O , представляющей зависимость $\Psi=f(i)$ для какого-то зазора δ , характеризует состояние электромагнита в рассматриваемый момент времени. Из точки O , как из центра, построена окружность, любым из радиусов которой можно характеризовать вполне определенную величину

производной $\frac{d\psi}{di}$ и знаки приращений тока и потокосцепления,

а, следовательно, тот или иной процесс энергопреобразования в электромагните. Так, при заторможенном якоре процесс будет протекать по радиусу $0-4$ (рис. 2) или $0-8$, то есть с превращением электрической энергии в магнитную или магнитной только в электрическую. При постоянном потокосцеплении будет или превращение магнитной энергии в механическую ($0-1$), или механической в магнитную ($0-5$) без потребления и выделения электрической энергии. При постоянной величине тока будет протекать процесс превращения магнитной энергии в механическую и электрической в магнитную ($0-3$) с увеличением магнитной энергии настолько, сколько расходуется ее на создание механической работы; или процесс превращения механической энергии в магнитную и магнитной в электрическую ($0-7$) с уменьшением магнитной энергии ровно настолько, сколько было получено ее за счет механической энергии, затраченной на перемещение якоря.

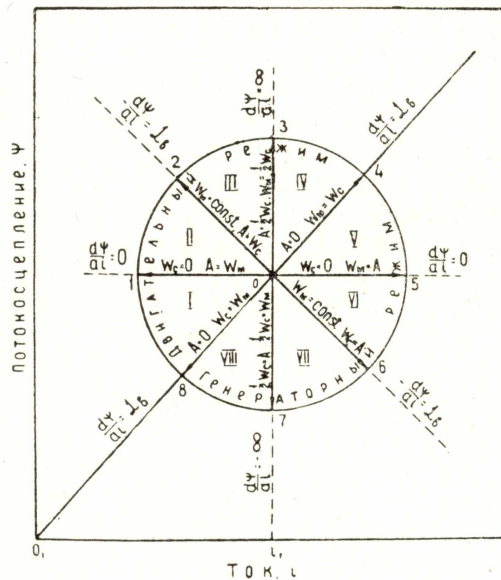


Рис. 2. Диаграмма режимов работы электромагнита.

Если в процессе перемещения якоря $\Psi = f(i)$ будет изменяться так, что производная $\frac{d\Psi}{di}$ будет отрицательна и всегда равна индуктивности электромагнита, то энергопреобразование в электромагните будет происходить при постоянной величине магнитной энергии или в случае превращения магнитной энергии в механическую и электрической в магнитную (0—2), или при превращении механической в магнитную и магнитной в электрическую (0—6).

Из рис. 2 видно, что если изменение $\Psi = f(i)$ при перемещении якоря электромагнита характеризуется радиусом окружности, расположенным в секторах I, II, III и IV, то происходит процесс преобразования магнитной энергии в механическую — двигательный режим работы электромагнита. Причем для сектора I характерно превращение магнитной энергии в электрическую, что стирает резкую границу между двигательным и генераторным режимом. Процессы, протекающие при расположении радиуса в секторах II, III и IV, отличаются степенью восстановления магнитной энергии за счет электрической.

При расположении радиуса, характеризующего изменение $\Psi = f(i)$ в секторах V, VI, VII и VIII, протекает процесс превращения механической энергии в магнитную — генераторный режим работы электромагнита. Для сектора V характерно то, что процесс энергопреобразования сопровождается увеличением магнитной энергии и за счет электрической. Процессы, протекающие при расположении радиуса в секторах VI, VII и VIII, отличаются интенсивностью превращений магнитной энергии в электрическую.

Процесс энергопреобразования в электромагните определяется: подведенным напряжением, внешними силами, приложенными к якорю; его массой и кинетической энергией, которую может иметь якорь к рассматриваемому моменту.

Электромагнит может работать в двигательном и генераторном режиме, каждый из которых имеет по три качественно отличающихся случая энергопреобразования. Однако резкой границы между двигательным и генераторным режимами нет.

В случае движения якоря электромагнита в сторону увеличения воздушного зазора в магнитную энергию превращается только та часть механической энергии, которая идет на преодоление тягового усилия электромагнита.

Правильное представление о всех возможных случаях энергопреобразования в электромагните позволит судить о вредности или полезности явлений и процессов, происходящих в электромагнитных машинах возвратно-поступательного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Буйлов. Основы электроаппаратостроения. Госэнергоиздат, 1946.
2. А. И. Москвитин. Электрические машины возвратно-поступательного движения. Изд. АН СССР, 1950.
3. М. И. Виттенберг. Расчет электромагнитных реле для аппаратуры автоматики и связи. Госэнергоиздат, 1961.
4. Ф. А. Ступель. Расчет и конструкция электромагнитных реле. Госэнергоиздат, 1950.
5. М. А. Бабиков. Электрические аппараты. Госэнергоиздат, 1951.
6. Э. Яссе. Расчет электромагнитов. Госэнергоиздат, 1934.
7. Хэг. Электромагнитные расчеты. Энергоиздат, 1934.
8. Л. Р. Нейман, П. Л. Калантаров. Теоретические основы электротехники. Ч. I, Госэнергоиздат, 1959.