

УДК. 621.313.333

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ТОРМОЗНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

В.В. СОЛЕНКОВ, В.В. БРЕЛЬ

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Асинхронные двигатели с электромеханическими тормозными устройствами (АД с ЭМТУ; тормозные электродвигатели) предназначены в основном для повторно-кратковременных режимов работы. В зависимости от предъявляемых к ним требований и условий эксплуатации частота включений таких электродвигателей изменяется в достаточно широких пределах: от нескольких десятков до двух, трех и даже пяти тысяч включений в час [1]. При этом значительную часть в общей длительности циклов работы их составляют электромеханические переходные процессы.

С учетом известных допущений и базовых величин [2] процесс электромеханического преобразования энергии в АД с ЭМТУ может быть описан следующей системой дифференциальных уравнений в относительных единицах:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} &= u_{s\alpha} - \frac{r_1}{\sigma \cdot x_s} \cdot \psi_{s\alpha} + \frac{r_1 \cdot x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot \psi_{r\alpha} - \frac{2}{3} \cdot u_{\omega}, \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} &= u_{s\beta} - \frac{r_1}{\sigma \cdot x_s} \cdot \psi_{s\beta} + \frac{r_1 \cdot x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot \psi_{r\beta}, \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} &= \frac{r_2' \cdot x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot \psi_{s\alpha} - \frac{r_2'}{\sigma \cdot x_r} \cdot \psi_{r\alpha} - \omega_p \cdot \psi_{r\beta}, \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} &= \frac{r_2' \cdot x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot \psi_{s\beta} - \frac{r_2'}{\sigma \cdot x_r} \cdot \psi_{r\beta} + \omega_p \cdot \psi_{r\alpha} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} = \frac{1}{J} \cdot [M - (Mc + MT) \cdot \text{sign}(\omega_p)], \quad (2)$$

$$M = \frac{x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot (\psi_{r\alpha} \cdot \psi_{s\beta} - \psi_{s\alpha} \cdot \psi_{r\beta}). \quad (3)$$

Здесь u_{ω} – напряжение на обмотке растормаживающего электромагнита, включенной последовательно с одной из фазных обмоток статора электродвигателя (в данном случае, с обмоткой фазы a); MT – тормозной момент, возникающий в результате трения фрикционных накладок тормозного устройства. Остальные обозначения в уравнениях (1) – (3) общепринятые и раскрыты, например, в [2].

Конструктивные и схемные особенности, присущие разным типам тормозных электродвигателей, не влияют на вид предложенной математической модели, но заставляют специально формировать переменные u_{ω} и MT в каждом конкретном слу-

чае. Покажем, как это делается для электродвигателей с тормозным устройством нормально-замкнутого типа, в которых используются схемы включения, приведенные на рис. 1.

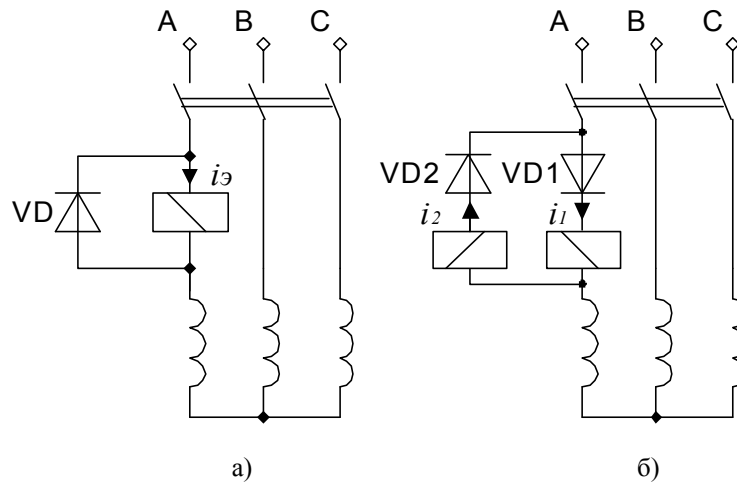


Рис. 1. Схемы включения растормаживающего электромагнита в статорную цепь базового АД: а – однополупериодная; б – двухполупериодная

Будем считать, что магнитная цепь растормаживающего электромагнита ненасыщена, время движения его якоря при срабатывании пренебрежимо мало, а полупроводниковые диоды идеальны. Кроме того, активное сопротивление r_s и индуктивность L_s обмотки электромагнита при притяннутом якоре (когда тормоз разомкнут) выразим через параметры электродвигателя:

$$r_s = k_1 \cdot r_1; \quad L_s = k_2 \cdot \omega_o^{-1} \cdot x_s, \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – безразмерные коэффициенты; ω_o – угловая частота сети.

Тогда в схеме включения рис. 1а напряжение на обмотке электромагнита в относительных единицах определяется выражением:

$$u_s = k_2 \cdot x_s \cdot \frac{di_s}{dt} + k_1 \cdot r_1 \cdot i_s. \quad (5)$$

В интервале времени, когда шунтирующий обмотку диод VD закрыт, ток электромагнита i_s равен

$$i_s = i_{s\alpha} = \frac{1}{\sigma \cdot x_s} \cdot \psi_{s\alpha} - \frac{x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot \psi_{r\alpha}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5) с учетом (1), окончательно можно получить:

$$u_s = \left(\sigma + \frac{2}{3} \cdot k_2 \right)^{-1} \cdot \left\{ k_2 \cdot u_{s\alpha} - \left[\frac{k_2 \cdot r_2'}{\sigma} \cdot \frac{x_m^2}{x_s \cdot x_r^2} + (k_2 - k_1 \cdot \sigma) \cdot \frac{r_1}{\sigma \cdot x_s} \right] \cdot \psi_{s\alpha} + \left[k_2 \cdot \frac{r_1 \cdot x_r + r_2' \cdot x_s}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} - k_1 \cdot \frac{r_1}{x_s} \right] \cdot \frac{x_m}{x_r} \cdot \psi_{r\alpha} + k_2 \cdot \frac{x_m}{x_r} \cdot \omega_p \cdot \psi_{r\beta} \right\}. \quad (7)$$

Соотношение (7) позволяет рассчитать напряжение u_s , не только тогда, когда якорь притянут к сердечнику электромагнита, но и в период трогания. Для этого в (7) вместо k_2 необходимо ввести коэффициент k_{2mp} , равный

$$k_{2mp} = k_2 \cdot \frac{\lambda_{mp}}{\lambda}, \quad (8)$$

где λ_{mp} и λ – магнитные проводимости электромагнита соответственно при начальном воздушном зазоре и после притяжения якоря к сердечнику.

В интервале времени, когда диод открыт, $u_s = 0$, а ток i_s равен току контура, образуемого обмоткой электромагнита и диодом.

Характер изменения тормозного момента в процессе пуска электродвигателя со схемой включения (рис. 1а) определяется выражением

$$M_T = M_{T0} \cdot \left(1 - \frac{i_s^2}{I_{mp}^2} \right) \cdot \left[1(t) - 1\left(t_{mp}\right) \right], \quad (9)$$

в котором M_{T0} – момент, создаваемый тормозным устройством при отсутствии напряжения на обмотке электромагнита (когда электродвигатель отключен от сети); I_{mp} – ток трогания электромагнита; $1(t)$ и $1(t_{mp})$ – единичные функции; t_{mp} – время трогания электромагнита.

Несколько иначе формируются переменные u_s и M_T в случае применения схемы включения (рис. 1б), где растормаживающий электромагнит состоит из двух одинаковых обмоток, расположенных в общем магнитопроводе, и двух одинаковых диодов VD1 и VD2. Из-за влияния ЭДС. самоиндукции и взаимоиндукции токи в каждой из обмоток протекают более чем половину периода, питающего напряжения. При этом можно выделить два чередующихся интервала работы электромагнита:

- 1) когда ток протекает по одной из обмоток, а другая закрыта своим диодом;
- 2) когда токи протекают по обеим обмоткам.

В первом из них напряжение u_s и ток i_s определяются по полученным ранее соотношениям (6) и (7).

В интервале совместного действия обмоток

$$\left. \begin{aligned} u_s &= L_s \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} + r_s \cdot i_1, \\ u_s &= -L_s \cdot \frac{di_2}{dt} - M \cdot \frac{di_1}{dt} - r_s \cdot i_2 \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

$$i_{s\alpha} = i_1 - i_2, \quad (11)$$

где i_1 и i_2 – токи в соответствующих обмотках электромагнита; M – взаимоиндуктивность между обмотками.

Согласно [3] можно принять, что $M = L_s$. Тогда, сложив уравнения (10) с учетом (4) и (11), в относительных единицах получим

$$u_s = 0,5 \cdot k_1 \cdot r_1 \cdot i_{s\alpha}. \quad (12)$$

Длительность каждого интервала можно установить по форме токов i_1 и i_2 , которая, в свою очередь, определяются путем совместного решения уравнений (10) и (11). При этом выражения, описывающие характер изменения i_1 и i_2 , имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{k_1 \cdot r_1}{k_2 \cdot x_s} \cdot i_1 + \frac{1}{2} \cdot i^* \\ \frac{di_2}{dt} &= -\frac{1}{2} \cdot \frac{k_1 \cdot r_1}{k_2 \cdot x_s} \cdot i_2 - \frac{1}{2} \cdot i^* \end{aligned} \right\}, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} i^* &= \frac{1}{\sigma \cdot x_s} \cdot u_{s\alpha} - \frac{1}{\sigma \cdot x_s} \cdot \left[\frac{r_1}{\sigma \cdot x_s} \cdot \left(1 + \frac{k_1}{3} - \frac{k_1 \cdot \sigma}{2 \cdot k_2} \right) + \frac{r_2'}{\sigma \cdot x_s} \cdot \frac{x_m^2}{x_r^2} \right] \cdot \psi_{s\alpha} + \\ &+ \frac{x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot \left[\frac{r_1}{\sigma \cdot x_s} \cdot \left(1 + \frac{k_1}{3} - \frac{k_1 \cdot \sigma}{2 \cdot k_2} \right) + \frac{r_2'}{\sigma \cdot x_r} \right] \cdot \psi_{r\alpha} + \frac{x_m}{\sigma \cdot x_s \cdot x_r} \cdot \omega_p \cdot \psi_{r\beta}. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь, как и в (7), в период трогания электромагнита k_2 следует заменить на k_{2mp} , рассчитанный по (8).

Так как в рассматриваемой схеме включения МДС. электромагнита складывается из МДС. двух действующих согласно обмоток, то, по аналогии с (9), нетрудно получить:

$$M_T = M_{TO} \cdot \left(1 - \frac{(i_1 + i_2)^2}{I_{mp}^2} \right) \cdot [1(t) - 1(t_{mp})]. \quad (15)$$

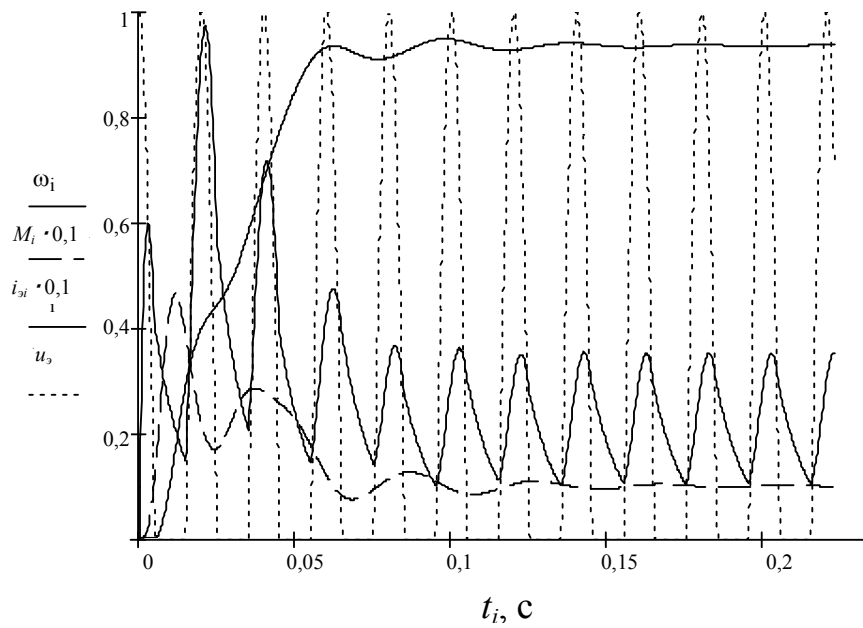
Если, наконец, управление растормаживающим электромагнитом осуществляется от автономного источника постоянного напряжения, то цепи питания базового двигателя и электромагнита будут независимы друг от друга и в первом уравнении системы (1) $u_s = 0$.

Что касается тормозного момента M_T , то здесь он будет равен

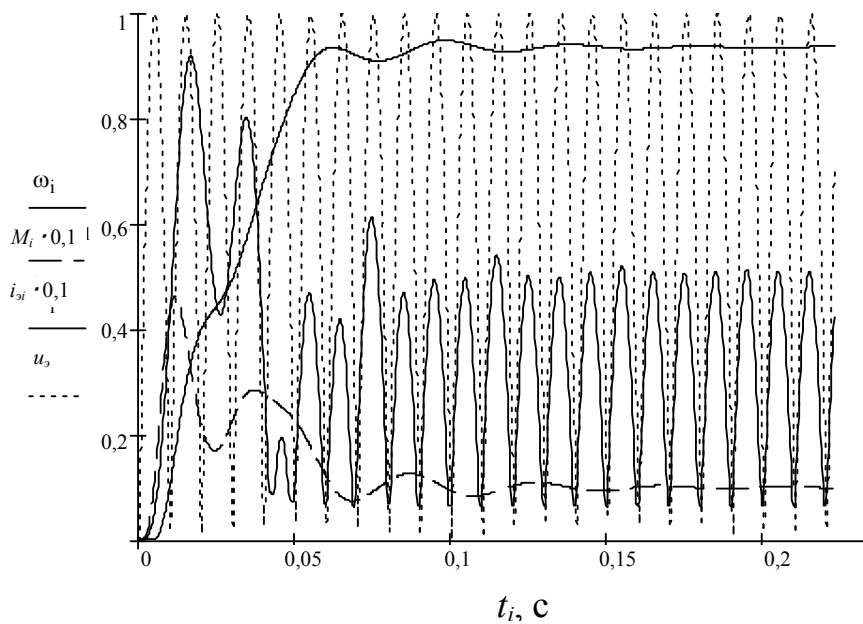
$$M_T = M_{TO} \cdot \left[1 - k_s^2 \cdot \left(1 - e^{-t/T_{mp}} \right)^2 \right] \cdot [1(t) - 1(t_{mp})], \quad (16)$$

где k_s – коэффициент запаса электромагнита; T_{mp} – постоянная времени электромагнита в период трогания.

На рис. 2 представлены переходные характеристики для рассмотренных схем включения.



а)



б)

Рис. 2. Зависимости $\omega(t)$, $M(t)$, $i_z(t)$ и $u_s(t)$ в схемах с однообмоточным (а) и двухобмоточным (б) электромагнитом

Ограниченный объем данной работы не позволяет привести результаты исследований других типов АД с ЭМТУ. Поэтому в заключение без доказательств сообщим теоретически полученные и экспериментально подтвержденные выводы и рекомендации, которые следует принимать во внимание при проектировании тормозных электродвигателей на базе единой серии 4А.

1. Наличие дополнительного тормозного момента на валу при пуске, характерное для АД с ЭМТУ нормально-замкнутого типа, приводит к увеличению макси-

мального (ударного) значения электромагнитного момента не более, чем на $0,5 \cdot M_{\text{баз}}$, а времени разгона до установившейся скорости – в 1,6 – 2,5 раза по сравнению с соответствующими характеристиками обычных асинхронных двигателей.

2. Чем меньше затухание электромеханических переходных процессов в базовых асинхронных двигателях, тем больше влияние на эти процессы электромагнита тормозного устройства в рассмотренных схемах включения АД с ЭМТУ.

3. Время трогания растормаживающих электромагнитов постоянного тока с форсировкой, применяемых в АД с ЭМТУ, не должно превышать 0,03 – 0,04 с.

4. Максимальное (ударное) значение электромагнитного момента $M_{y\delta}$ и время разгона до установившейся скорости t_p тормозных электродвигателей с рассмотренными схемами включения (рис. 1а,б) неинвариантны относительно момента включения сетевого напряжения, причем наибольшее и наименьшее значения $M_{y\delta}$ могут отличаться между собой в 1,3 – 1,5 раза, а наибольшее и наименьшее значения t_p – в 1,1 – 2,3 раза.

Экспериментальная проверка результатов, полученных численным анализом, показала адекватность матмоделей и реальных физических процессов.

Список литературы

1. Молчанов Ю.М. Электродвигатели со встроенным электромагнитным тормозом. – М.: Энергия, 1970. – 64 с.
2. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.
3. Сливинская А.Г., Гордон А.В. Электромагниты со встроенными выпрямителями. – М.: Энергия, 1970. – 65 с.

Получено 26.11.2002 г.