

РАСЧЕТ ТЯГОВЫХ УСИЛИЙ САМОТОРМОЗЯЩИХСЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ВСТАВКАМИ

Л. К. БУРУЛЬКО, Э. М. ГУСЕЛЬНИКОВ,
Е. В. КОНОНЕНКО, Т. В. ЧЕШЕВА

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Основным параметром самотормозящихся электродвигателей (СЭД) является тяговое усилие, развиваемое тормозной частью ротора. От него зависит не только величина тормозного момента, время пуска и останова электродвигателя, но и весовые и энергетические показатели СЭД.

Поэтому для проектирования СЭД необходимо знать, как зависит тяговое усилие от геометрических размеров тормозной части ротора и какой характер изменения усилия при пуске и торможении электродвигателя.

Учитывая конструктивные особенности тормозной части ротора электродвигателя [1], величину тягового усилия можно определить по формуле Максвелла

$$F_{\text{пр}} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \quad (1)$$

где

Φ — магнитный поток в воздушном зазоре между тормозной частью ротора и электромагнитной вставкой;

μ_0 — магнитная проницаемость воздуха;

S — поперечное сечение магнитопровода тормозной части ротора.

Из принципа работы тормозного устройства СЭД с электромагнитной вставкой [1, 5] известно, что в создании тягового усилия участвуют два магнитных потока, а именно: Φ_S — поток рассеяния короткозамкнутого кольца тормозной части ротора, Φ_T — часть основного магнитного потока статора. Поэтому магнитный поток Φ в воздушном зазоре между тормозной частью ротора и электромагнитной вставкой можно представить в виде двух составляющих:

$$\Phi = \Phi_S + \Phi_T. \quad (2)$$

Величина потока Φ_S зависит от тока, протекающего в короткозамкнутом кольце, и сопротивления магнитопровода тормозной части электродвигателя. Величина потока Φ_T определяется геометрическими размерами и сопротивлением магнитопровода тормозной части электродвигателя.

В момент пуска СЭД, когда ротор еще неподвижен, в короткозамкнутом кольце тормозной части ротора протекает большой ток, который создает магнитный поток Φ_S , обеспечивающий притяжение электромагнитной вставки к горцу ротора. По мере разгона электродвигателя уменьшаются ток в короткозамкнутом кольце и магнитный поток Φ_S .

Одновременно за счет уменьшения обратного воздействия роторных обмоток на статорные увеличивается составляющая основного потока Φ_T , который обеспечивает удержание электромагнитной вставки в притянутом к торцу ротора положении [1]. Учитывая изложенное, можно сделать вывод, что на характер изменения тягового усилия в процессе пуска существенное влияние оказывает поток рассеяния короткозамкнутого кольца Φ_S , а на величину тягового усилия в установившемся режиме работы электродвигателя поток Φ_T . Для того, чтобы установить характер изменения тягового усилия в процессе пуска СЭД, необходимо составить систему уравнений, описывающих переходные электромагнитные процессы. Наиболее удобным методом исследования переходных процессов в асинхронных двигателях является метод математического моделирования. Для того, чтобы система уравнений была приемлема для математического моделирования, необходимо расписать уравнения в координатных осях α и β , которые могут в общем случае вращаться с произвольной скоростью. Известны различные формы записи систем уравнений [2], для которых переход из одной формы в другую осуществляется с помощью уравнений потокосцеплений статора и ротора, записанных в координатных осях α и β :

$$\begin{aligned}\omega_0 \Psi_{S\alpha} &= x_S i_{S\alpha} + x_m i_{r\alpha}, \\ \omega_0 \Psi_{S\beta} &= x_S i_{S\beta} + x_m i_{r\beta}, \\ \omega_0 \Psi_{r\alpha} &= x_r i_{r\alpha} + x_m i_{S\alpha}, \\ \omega_0 \Psi_{r\beta} &= x_r i_{r\beta} + x_m i_{S\beta},\end{aligned}\quad (3)$$

где

$\Psi_{S\alpha}$ и $\Psi_{S\beta}$; $\Psi_{r\alpha}$ и $\Psi_{r\beta}$ — потокосцепления статора и ротора в осях α и β .

$x_S = x_1 + x_m$ — полное индуктивное сопротивление обмотки статора в относительных единицах;

$x_r = x_2' + x_m$ — полное индуктивное сопротивление обмотки ротора в относительных единицах;

r_1 и r_2 — активные сопротивления статорной и роторной обмоток в относительных единицах;

ω_0 — асинхронная скорость вращения (угловая частота).

Распишем систему уравнений (3) с учетом допущений, принятых в [5]:

$$\begin{aligned}\omega_0 \Psi_{S\alpha} &= (x_1 + x_{m0} + x_{mg}) i_{S\alpha} + (x_{m0} + x_{mg}) i_{r\alpha}, \\ \omega_0 \Psi_{S\beta} &= (x_1 + x_{m0} + x_{mg}) i_{S\beta} + (x_{m0} + x_{mg}) i_{r\beta}, \\ \omega_0 \Psi_{r\alpha} &= (x_2' + x_2'g + x_{m0} + x_{mg}) i_{r\alpha} + (x_{m0} + x_{mg}) i_{S\alpha}, \\ \omega_0 \Psi_{r\beta} &= (x_2' + x_2'g + x_{m0} + x_{mg}) i_{r\beta} + (x_{m0} + x_{mg}) i_{S\beta},\end{aligned}\quad (4)$$

где

x_{m0} и x_2' — индуктивные сопротивления взаимоиндукции и рассеяния основной части ротора;

x_{mg} и $x_2'g$ — индуктивные сопротивления взаимоиндукции и рассеяния тормозной части ротора.

Проводя преобразования системы уравнений, получаем потокосцепления, приходящиеся на тормозную часть ротора, которые соответствуют потокам Φ_S и Φ_T :

$$\begin{aligned}\Psi_{r\alpha g} &= \left(x_{mg} + x_2'g - \frac{x_r x_{mg}}{x_m} \right) i_{r\alpha} + \frac{x_{mg}}{x_m} \Psi_{r\alpha}, \\ \Psi_{r\beta g} &= \left(x_{mg} + x_2'g - \frac{x_r x_{mg}}{x_m} \right) i_{r\beta} + \frac{x_{mg}}{x_m} \Psi_{r\beta}.\end{aligned}\quad (5)$$

Так как в относительных единицах поток равен потокосцеплению, то составляющие потоков Φ_T и Φ_S по осям α и β запишем в виде

$$\Phi_{r\alpha} = \frac{x_{m\sigma}}{x_m} \Psi_{r\alpha};$$

$$\Phi_{r\beta} = \frac{x_{m\sigma}}{x_m} \Psi_{r\beta}; \quad (6)$$

$$\Phi_{s\alpha} = \left(x_{mg} + x'_{2g} + \frac{x_r x_{m\sigma}}{x_m} \right) i_{r\alpha};$$

$$\Phi_{s\beta} = \left(x_{mg} + x'_{2g} - \frac{x_r x_{m\sigma}}{x_m} \right) i_{r\beta}.$$

Используя уравнения (1), (2), (6), получаем выражение для тягового усилия

$$F_{пр} = \frac{\left[\left(x_{mg} + x'_{2g} - \frac{x_r x_{m\sigma}}{x_m} \right) i_{r\alpha} + \frac{x_{m\sigma}}{x_m} \Psi_{r\alpha} \right]^2 + \left[\left(x_{mg} + x'_{2g} - \frac{x_r x_{m\sigma}}{x_m} \right) i_{r\beta} + \frac{x_{m\sigma}}{x_m} \Psi_{r\beta} \right]^2}{2 \mu_0 S} \quad (7)$$

Структурная схема модели, позволяющая смоделировать уравнение (7), представлена на рис. 1.

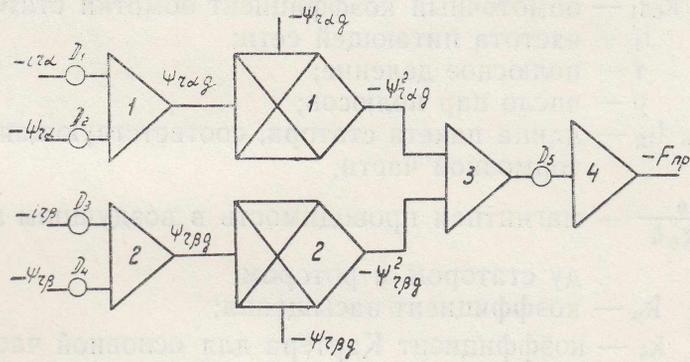


Рис. 1. Структурная схема модели тормозной части ротора

Осциллограммы тягового усилия в момент пуска самотормозящего электродвигателя АО2-21-2Э с электромагнитной вставкой приведена на рис. 2. Где F_m — ударное значение тягового усилия в процессе пуска, а $F_{уд}$ — величина силы удержания электромагнитной вставки в установленном режиме работы электродвигателя.

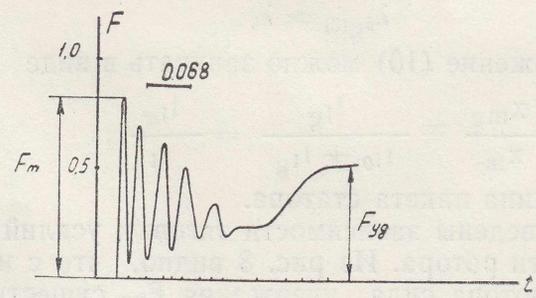


Рис. 2. Осциллограмма тягового усилия тормозной части ротора в момент пуска электродвигателя АО2-21-2Э

Рассмотрим для электродвигателя А02-21-2Э как изменятся усилия F_m и $F_{уд}$ в зависимости от длины тормозной части ротора. Из выражений (1, 7) видно, что тяговое усилие определяется поперечным сечением магнитопровода тормозной части ротора и магнитным потоком, величина которого зависит от индуктивных сопротивлений взаимной индукции x_{mg} и x_m и рассеяния x'_{2g} и x_r .

Изменение соотношения $\frac{x_{mg}}{x_m}$ определяется изменением длины тормозной части ротора, поэтому выражения для индуктивных сопротивлений основной и тормозной частей ротора при нулевом воздушном зазоре между торцом ротора и электромагнитной вставкой можно записать в следующем виде [4]:

$$x_{m0} = \frac{4mf_1}{\pi} \cdot \frac{\tau \cdot w_1^2 k_{об1}^2}{p} \cdot \lambda_\delta l_{10}; \quad (8)$$

$$a \quad x_{mg} = \frac{4mf_1}{\pi} \cdot \frac{\tau \cdot w_1^2 k_{об1}^2}{p} \lambda_{\delta g(0)} l_{1g}, \quad (9)$$

$$\frac{x_{mg}}{x_m} = \frac{x_{mg}}{x_{m0} + x_{mg}} = \frac{\lambda_{\delta g(0)} l_{1g}}{\lambda_\delta l_{10} + \lambda_{\delta g(0)} l_{1g}}, \quad (10)$$

где

w_1 — число проводников на фазу обмотки статора;

$k_{об1}$ — обмоточный коэффициент обмотки статора;

f_1 — частота питающей сети;

τ — полюсное деление;

p — число пар полюсов;

l_{10}, l_{1g} — длина пакета статора, соответствующая основной и тормозной части;

$\lambda_\delta = \frac{\mu_0}{k_\mu k_\delta \delta}$ — магнитная проводимость в воздушном зазоре между статором и ротором;

k_μ — коэффициент насыщения;

k_δ — коэффициент Картера для основной части;

δ — воздушный зазор между ротором и статором;

$\lambda_{\delta g(0)} = \frac{\mu_0}{k_\mu k_{\delta g} \delta}$ — магнитная проводимость в воздушном зазоре между статором и тормозной частью ротора при нулевом воздушном зазоре между тормозной частью ротора и электромагнитной вставкой.

Для исследуемого электродвигателя А02-21-2Э при нулевом воздушном зазоре между тормозной частью ротора и электромагнитной вставкой

$$\lambda_{\delta g(0)} \approx \lambda_\delta. \quad (11)$$

Поэтому выражение (10) можно записать в виде

$$\frac{x_{mg}}{x_m} = \frac{l_{1g}}{l_{10} + l_{1g}} = \frac{l_{1g}}{l_1}, \quad (12)$$

где l_1 — общая длина пакета статора.

На рис. 3 приведены зависимости тяговых усилий F_m и $F_{уд}$ от длины тормозной части ротора. Из рис. 3 видно, что с изменением длины тормозной части ротора сила удержания $F_{уд}$ существенно меняется, а ударное значение силы притяжения F_m меняется незначительно. То есть в момент пуска электродвигателя за счет потоков рассеяния короткозамкнутого кольца ротора Φ_s электромагнитная вставка будет притя-

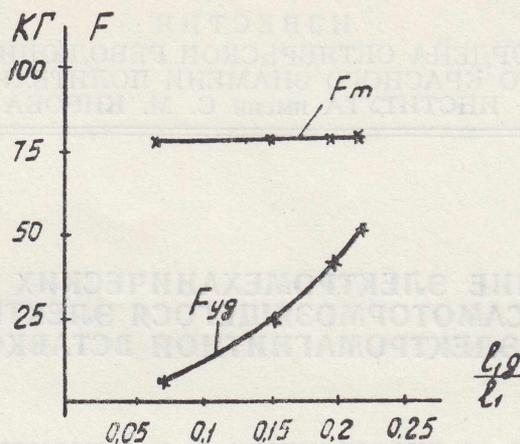


Рис. 3. Зависимости тяговых усилий от длины тормозной части ротора

гиваться, если даже длина тормозной части ротора невелика. В установленном же режиме величина потока Φ_s мала, и сила удержания вставки $F_{уд}$ определяется в основном потоком Φ_t , величина которого зависит от длины тормозной части ротора.

Предложенная методика расчета тягового усилия позволяет устанавливать характер изменения тягового усилия в процессе пуска электродвигателя и определять оптимальные размеры тормозной части ротора самотормозящихся электродвигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. М. Гусельников, Б. С. Цукерман. Самотормозящиеся электродвигатели. «Энергия», 1971.
2. А. Д. Гильдебранд, М. Г. Жук, В. М. Кирпичников. Решение инженерных задач на электронных вычислительных машинах. Ч. I, УПИ, 1970.
3. М. М. Соколов, Л. П. Петров, Л. Б. Масандилов, В. А. Ладензон. Электромагнитные переходные процессы в электроприводе. «Энергия», 1967.
4. П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов. Проектирование электрических машин. «Энергия», 1969.
5. Л. К. Бурулько, Э. М. Гусельников, Е. В. Кононенко, Т. В. Чешева. Исследование электромеханических переходных процессов в самотормозящемся электродвигателе с электромагнитной вставкой. Изв. ТПИ. Настоящий сборник.