

## УСЛОВИЯ БЕЗОПАСНОГО ТОРМОЖЕНИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТОРМОЗНЫХ УСТРОЙСТВ

Управляемое торможение движущегося механизма является одной из функций, реализуемой регулируемым электроприводом. Аппаратные средства и способы торможения электродвигателей переменного тока известны и описаны в литературе, например, в [2]. Основой для реализации тормозных режимов электродвигателей переменного тока являются, как правило, схемы двухзвенных преобразователей частоты с неуправляемым выпрямителем и тормозным резистором в звене постоянного тока или с управляемым сетевым преобразователем для рекуперации энергии торможения в питающую сеть.

Для электропривода по системе «неуправляемый выпрямитель – инвертор напряжения – бесконтактный двигатель с постоянными магнитами (БДПМ)» [1] оказывается возможной реализация режима торможения двигателя путем создания условий для рассеяния кинетической энергии, накопленной во вращающихся частях механизма, в статорных обмотках без использования для этого дополнительных тормозных устройств. Рассеяние кинетической энергии может быть приемлемо для электроприводов малой мощности (до 1 – 2 кВт).

Определим условия безопасного торможения БДПМ, при котором напряжение в звене постоянного тока преобразователя частоты ограничивается на безопасном уровне.

В общем случае условием безопасного торможения двигателя является неравенство

$$|P_{TK}(t)| \leq P_{TP}(t), \quad (1)$$

где  $P_{TK}(t)$  – мгновенная мощность, расходуемая в процессе торможения двигателя механическим аккумулятором кинетической энергии в виде вращающихся маховых масс ротора и механизма;  $P_{TP}(t)$  – мгновенная мощность, рассеиваемая при торможении двигателя в элементах электропривода и механизма. Отметим, что в неравенстве (1) необходимо сравнивать абсолютные значения мощностей, поскольку, как будет показано ниже, величина  $P_{TK}(t)$  при торможении механизма оказывается отрицательной.

Предположим, что энергия в процессе торможения рассеивается только в статорных обмотках двигателя и трущихся частях механизма. Тогда  $P_{TP}(t) = P_{ЭЛ}(t) + P_{МХ}(t)$ , где  $P_{ЭЛ}(t)$  и  $P_{МХ}(t)$  – соответственно мгновенные мощности потерь в статорных обмотках и механизме. Предположим также, что частота вращения двигателя при торможении изменяется по линейному закону  $\omega(t) = \omega_1(1 - t/t_1)$  при  $0 \leq t \leq t_1$ , где  $\omega_1$  – максимальное значение частоты вращения двигателя;  $t_1$  – заданное время торможения механизма от максимальной частоты вращения до нулевой, причем электромагнитная постоянная времени статорной обмотки БДПМ значительно меньше времени торможения.

Определим мгновенные мощности  $P_{TK}(t)$ ,  $P_{ЭЛ}(t)$  и  $P_{МХ}(t)$ .

Первая определяется как производная кинетической энергии вращающихся ротора и частей механизма при заданном выше законе изменения частоты вращения  $\omega(t)$  вала двигателя в процессе торможения

$$P_{TK}(t) = \frac{J}{2} \cdot \frac{d\omega^2(t)}{dt} = \frac{J \cdot \omega_1^2}{t_1} \left( \frac{t}{t_1} - 1 \right), \quad \text{где } J - \text{ суммарный момент инерции двигателя и механизма, приведенный}$$

к валу двигателя.

$$P_{ЭЛ}(t) = m \cdot R \cdot I_C^2 \quad \text{или} \quad P_{ЭЛ}(t) = 0,5 \cdot m \cdot R \cdot (i_d^2 + i_q^2), \quad (2)$$

где  $m$  и  $R$  – число фаз и активное сопротивление статорной обмотки;  $I_C$  – действующее значение тока фазы статорной обмотки;  $i_d$  и  $i_q$  – компоненты статорного тока в координатах ротора  $d$  и  $q$ .

$P_{МХ}(t) = M_C(\omega) \cdot \omega(t)$ , где  $M_C(\omega)$  – величина момента сопротивления приводного механизма в зависимости от частоты вращения двигателя, причем отметим типовые варианты зависимости  $M_C(\omega) = M_C = const$  или  $M_C(\omega) = M_C \cdot (a + b \cdot (\omega/\omega_1)^2)$  при  $a + b = 1$ .

Поскольку торможение должно произойти за время  $t_1$ , необходимо на основании уравнения динамики электропривода в тормозном режиме определить величину тормозного момента двигателя  $M_T(\omega) = M_C(\omega) - J \cdot \omega_1/t_1$ , где второе слагаемое  $J \cdot \omega_1/t_1$  соответствует величине динамического момента двигателя при равноускоренном движении. В зависимости от соотношения значений слагаемых величина  $M_T(\omega)$  может оказаться как положительной, так и отрицательной.

С другой стороны, тормозной момент определяется параметрами двигателя и величиной компоненты тока статора  $i_q$  -  $M_T(\omega) = 0,5 \cdot m \cdot k_m \cdot i_q(\omega)$ , где  $k_m$  - коэффициент момента двигателя.

На основании полученных выражений для момента  $M_T(\omega)$  определим функциональную зависимость компоненты тока  $i_q(\omega)$ , при которой должно происходить равномерное торможение двигателя,

$$i_q(\omega) = \frac{1}{0,5 \cdot m \cdot k_m} \left( M_C(\omega) - J \frac{\omega_1}{t_1} \right). \quad (3)$$

Теперь необходимо проверить условие (1) на всем интервале  $0 \leq t \leq t_1$ , подставляя (3) в (2) и полагая вначале  $i_d(\omega) = 0$ , поскольку при соблюдении последнего равенства осуществляется экономичная работа БДПМ в двигательном режиме. Если на данном этапе условие (1) выполняется, то безопасное торможение двигателя в течение заданного времени  $t_1$  возможно при  $i_d(\omega) = 0$ .

Если неравенство (1) не выполняется по крайней мере на части интервала  $0 \leq t \leq t_1$ , то создание условий для рассеяния энергии торможения двигателя возможно путем намеренного задания в ходе торможения отличного от нуля значения компоненты тока статора  $i_d(\omega)$ . Зависимость этой переменной от частоты вращения двигателя может быть определена из условия (1)

$$i_d(\omega) = \sqrt{\frac{2}{m \cdot R} (|P_{TK}(t)| - P_{MX}(t)) - i_q^2(\omega)} = \sqrt{\frac{2}{m \cdot R} \left( \left| \frac{J \cdot \omega_1^2}{t_1} \left( \frac{t}{t_1} - 1 \right) \right| - M_C(\omega) \cdot \omega(t) \right) - \left( \frac{2}{m \cdot k_m} \left( M_C(\omega) - J \frac{\omega_1}{t_1} \right) \right)^2}.$$

Очевидно, что полученная функциональная зависимость справедлива при положительном значении подкоренного выражения. Иначе  $i_d(\omega) = 0$ .

Наконец, последнее условие безопасного торможения БДПМ касается теплового состояния статорных обмоток и двигателя в целом и должно определяться соображениями выбора допустимой величины действующего тока статора  $I_C$ , протекающего в обмотках во время торможения, а также частотой повторений пусков и торможений двигателя. В случае перегрева двигателя необходимо использование специальных тормозных устройств.

На основании математической модели БДПМ [3] в системе координат ротора  $d$  и  $q$  запишем также функциональные зависимости для напряжений статора  $u_d(\omega)$  и  $u_q(\omega)$

$$u_d(\omega) = R \cdot i_d(\omega) - p \cdot L \cdot i_q(\omega) \cdot \omega(t); \quad u_q(\omega) = R \cdot i_q(\omega) + (p \cdot L \cdot i_d(\omega) + k_m) \cdot \omega(t),$$

где  $p$  - число пар полюсов двигателя;  $L$  - индуктивность фазы статорной обмотки БДПМ.

Таким образом, описанный подход к управлению БДПМ позволяет обеспечить плавное торможение двигателя от максимального значения частоты вращения до его остановки в течение заданного времени  $t_1$  без использования специальных аппаратных средств в схеме двухзвенного преобразователя частоты. Безопасность торможения, означающая недопущение перенапряжений на элементах преобразователя частоты, обеспечивается, если это необходимо, за счет намеренного задания определенной, отличной от нуля величины компоненты статорного тока  $i_d$ , и таким образом, рассеяние в проводниках статорных обмоток кинетической энергии, накопленной во вращающихся частях приводного механизма.

Предложенный подход был с успехом применен для торможения высокоскоростных БДПМ малой мощности с повышенным моментом инерции. При известных и неизменных параметрах электромеханической системы «БДПМ – приводной механизм» торможение двигателя возможно в разомкнутой системе даже без контроля напряжения в звене постоянного тока. В противном случае, реализуется замкнутая система ограничения этого напряжения на безопасном уровне при формировании управляющего воздействия  $i_d(t)$ .

#### Список использованных источников

- [1] Акинин К.П. Проблемы построения электромеханических систем малой мощности на основе бесконтактных магнитоэлектрических двигателей // Техн. електродинаміка. Темат. Вип.: Проблеми сучасної електротехніки. – 2010. – Ч.1. – С.118-123.
- [2] Крутиков К.К., Рожков В.В. Применение многофункциональных силовых активных фильтров в составе мощного частотно-регулируемого электропривода // Электричество – 2011. - №2. – С.32-38.
- [3] Сидельников Б.В., Рогачевская Г.С. Свойства вентильного двигателя с магнитоэлектрическим возбуждением // Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика: Вестник ХГПУ. Специальный выпуск. - Харьков: ХГПУ, 1999. – С.281-282.