

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «IGBT-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ – ТЯГОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ» В РЕЖИМЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯ

**Введение.** На предприятиях горнометаллургического комплекса Украины эксплуатируется более 3,5 тысяч различных видов и типов промышленных электровозов. Практически 100% эксплуатируемых образцов оснащены контактно-резисторной электроэнергонеэффективной системой управления тяговым электромеханическим комплексом (ТЭМК) [1]. В последние годы созданы экспериментальные образцы эффективных систем ТЭМК на базе IGBT-преобразователей [1]. Однако ряд неразрешенных проблем не позволяют внедрить прогрессивные и ожидаемые службами эксплуатаций предприятий, новые образцы в практику отечественного электровозостроения.

**Актуальность темы исследования.** Тормозные режимы являются одной из главных проблем двуединой задачи «тяга – торможение» высокоэффективных структур и систем управления тяговыми электромеханическими комплексами. Последние, являясь слагаемыми общего многогранного комплекса, называемого тяговый электрический привод, имея отличающуюся от других аналогов специфику в режимах функционирования, требуют новых, основывающихся на исследованиях, структурных решений.

Одной из специфик тормозных режимов тяговых электроприводов отдельных электрифицированных видов транспорта (например промышленных электровозов) является отсутствие целесообразности в таком энергоэффективном виде торможения как рекуперативное [1]. Объясняется это, прежде всего, низкими скоростями движения подвижных единиц, когда количество энергии, которую можно было бы рекуперировать в тяговую сеть, составляет 1,5-2,0 %, при одновременном почти 2-х кратном усложнении схемы управления ТЭП.

Таким образом, реальным видом электрического торможения в данном случае выступает резисторное (динамическое).

**Цель исследований.** Получение аналитических выражений для определения параметров подсистемы резисторного торможения тяговым приводом в режиме ослабления возбуждения двигателя.

**Материалы исследований.** Схема замещения системы в режиме ослабления возбуждения тягового двигателя представлена на рис. 1, диаграммы токов, иллюстрирующие ее работу приведены на рис. 2.

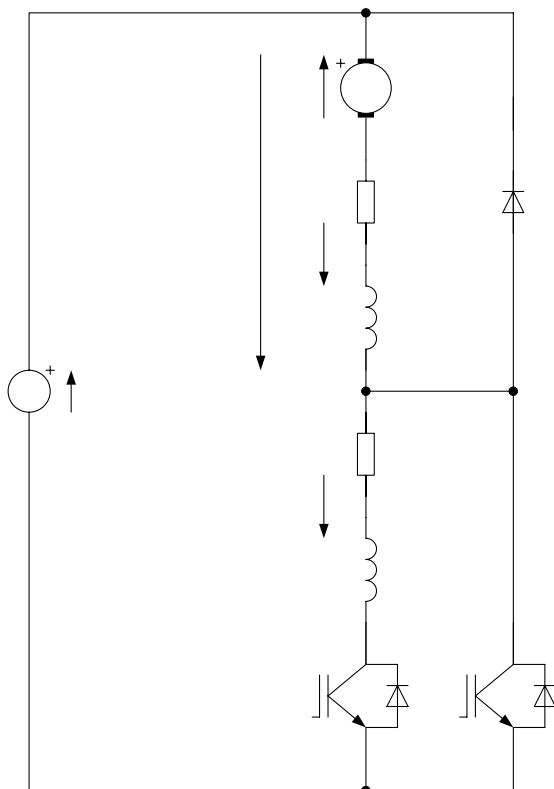


Рис. 1. Схема замещения тягового электропривода в режиме ослабления возбуждения

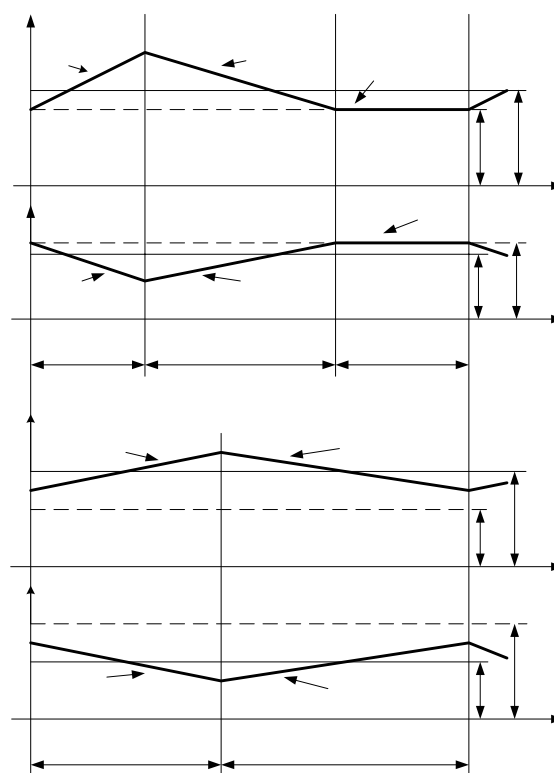


Рис. 2. Диаграммы токов двигателя при  
а) «легком» ослаблении возбуждения,  $t_M \neq 0$  ;  
б) «глубоком» ослаблении возбуждения,  $t_M = 0$  .

Процесс ослабления возбуждения двигателя начинается по достижении номинальных параметров в системе, когда заканчивается режим пуска и разгона электровоза путем ШИМ напряжения питающего двигатель IGB-транзистором ТМ. В номинальном режиме и далее при ослаблении возбуждения двигателя IGB транзистор ТМ постоянно включен. Для ослабления возбуждения на периоде модуляции Т<sub>М</sub> включают IGB-транзистор ТЕ на время t<sub>Е</sub>. Глубина регулирования ослабления возбуждения задается коэффициентом заполнения периода модуляции q<sub>Е</sub> = t<sub>Е</sub> / T<sub>М</sub>.

При малых значениях q<sub>Е</sub> имеет место «легкое» ослабление возбуждения, рис. 2,а, для которого характерно наличие интервала t<sub>М</sub>, когда токи якоря и возбуждения равны номинальному току двигателя

$$i_{MM} = i_{EM} = I_{MH} = \frac{U_d - E_{MH} - \Delta U}{R_M + R_E}. \quad (1)$$

При «глубоком» ослаблении возбуждения интервал t<sub>М</sub> отсутствует (рис. 2,б). При «легком» ослаблении возбуждения при включенном IGB транзисторе ТЕ в течении t<sub>Е</sub> изменения токов якоря и возбуждения описываются уравнениями:

$$i_{ME} = \frac{U_d - E_{ME} - \Delta U}{R_M} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_M}\right) \right] + i_{ME}(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_M}\right), \quad (2)$$

$$i_{EE} = i_{EE}(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_E}\right). \quad (3)$$

Начальные значения токов i<sub>MM</sub>(0) = i<sub>EE</sub>(0) = I<sub>MH</sub>.

Постоянные времени  $\tau_M = \frac{L_M}{R_M}$ ;  $\tau_E = \frac{L_E}{R_E}$ .

$\Delta U$  – падение напряжения на IGB транзисторах ТМ, ТЕ и диоде D, принято равным для всех приборов,  $\Delta U \approx V$ .

Конечные значения токов по истечении заданного времени t<sub>Е</sub>:

$$i_{ME}(\kappa) = \frac{U_d - E_{ME} - \Delta U}{R_M} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t_E}{\tau_M}\right) \right] + I_{MH} \cdot \exp\left(-\frac{t_E}{\tau_M}\right), \quad (4)$$

$$i_{EE}(\kappa) = I_{MH} \cdot \exp\left(-\frac{t_E}{\tau_E}\right). \quad (5)$$

Конечные значения токов по истечении заданного времени t<sub>Е</sub> являются начальными для интервала t<sub>D</sub>, когда IGB транзистор ТЕ отключается и избыточный ток обмотки якоря замыкается через диод D, включающийся под действием э.д.с. самоиндукции обмотки L<sub>М</sub>.

$$i_{ME}(\kappa) = i_{MD}(0); \quad i_{EE}(\kappa) = i_{ED}(0). \quad (6)$$

Токи на интервале t<sub>D</sub> описываются уравнениями:

$$i_{MD} = -\frac{E_{MD} + \Delta U}{R_M} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_M}\right) \right] + i_{MD}(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_M}\right), \quad (7)$$

$$i_{ED} = \frac{u_d}{R_E} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_E}\right) \right] + i_{ED}(0) \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_E}\right). \quad (8)$$

При решении уравнений допускаем  $E_{ME} = E_{MD} = f(I_{EE}, \omega)$ , принимаем обозначения

$$E_{ME} + \Delta U = E_{MD} + \Delta U = E_M; \quad -\frac{t_E}{\tau_M} = E; \quad -\frac{t_D}{\tau_M} = D.$$

Интервал t<sub>D</sub> продолжается до тех пор пока токи в обмотках якоря и возбуждения двигателя не уравниваются между собой. В общем случае они в этот момент не равны току I<sub>MH</sub>, но, так как мало отличаются от него при заданном ограничении пульсации тока якоря менее 5%, принимаем по истечении t<sub>D</sub>:

$$i_{MD}(\kappa) = i_{ED}(\kappa) = I_{MH}. \quad (9)$$

При «глубоком» ослаблении возбуждения на интервале t<sub>Е</sub> справедливы соотношения (2), (3), а на интервале t<sub>D</sub> соотношения (7), (8), только при других начальных и конечных условиях, а именно:

$$i_{ME}(0) = i_{MD}(\kappa); \quad i_{ME}(\kappa) = i_{MD}(0), \quad (2.26)$$

$$i_{EE}(0) = i_{ED}(\kappa); \quad i_{EE}(\kappa) = i_{ED}(0). \quad (2.27)$$

Решая совместно (2), (7), (10) находим:

$$i_{ME}(0) = i_{MD}(\kappa) = \frac{U_d}{R_M} \cdot \frac{1 - \exp E}{1 - \exp E \cdot \exp D} \cdot \exp D - \frac{E_M}{R_M}, \quad (10)$$

$$i_{ME}(\kappa) = i_{MD}(0) = \frac{U_d}{R_M} \cdot \frac{1 - \exp E}{1 - \exp E \cdot \exp D} - \frac{E_M}{R_M}, \quad (11)$$

Абсолютный размах колебаний тока якоря

$$\Delta i_M = i_{ME}(\kappa) - i_{ME}(0) = \frac{U_d}{R_M} \cdot \frac{(1 - \exp E)(1 - \exp D)}{1 - \exp E \cdot \exp D}. \quad (12)$$

Максимальный размах колебаний тока якоря имеет место практически при  $t_E = t_D = \frac{T_M}{2}$ , ( $q_E = 0,5$ ). Тогда

$$\exp E_{0,5} = \exp D_{0,5} = \exp M = \exp\left(-\frac{T_M}{2\tau_M}\right), \quad (15)$$

$$\Delta i_{M0,5} = \frac{U_d}{R_M} \cdot \frac{1 - \exp M}{1 + \exp M}. \quad (16)$$

При этом среднее значение тока якоря:

$$I_M = \frac{i_{ME}(\kappa) + i_{ME}(0)}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_d}{R_M} \cdot \frac{(1 - \exp E)(1 + \exp D)}{1 - \exp E \cdot \exp D} - \frac{E_M}{R_M}. \quad (17)$$

При  $q_E = 0,5$ :

$$I_{M0,5} = \frac{U_d / 2 - E_M}{R_M}. \quad (18)$$

Относительный размах колебаний тока якоря (пульсация), максимальное значение:

$$\Delta i_{M0,5}^* = \frac{\Delta i_{M0,5}}{2I_{M0,5}} \cdot 100\% = \frac{U_d}{U_d - 2E_M} \cdot \frac{1 - \exp M}{1 + \exp M} \cdot 100\%. \quad (19)$$

Здесь  $E_M$  определяется током возбуждения  $I_E$ , который находится из совместного решения (3), (8) и (11) с учетом того, что обычно  $\tau_E \approx \tau_M$ :

$$i_{EE}(0) = \frac{U_d}{R_E} \cdot \frac{1 - \exp D}{1 - \exp E \cdot \exp D}, \quad (20)$$

$$i_{EE}(\kappa) = \frac{U_d}{R_E} \cdot \frac{1 - \exp D}{1 - \exp E \cdot \exp D} \cdot \exp E, \quad (21)$$

$$I_E = \frac{i_{EE}(\kappa) + i_{EE}(0)}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_d}{R_E} \cdot \frac{(1 + \exp E)(1 - \exp D)}{1 - \exp E \cdot \exp D}. \quad (22)$$

При  $q_E = 0,5$ :

$$I_{E0,5} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_d}{R_E}. \quad (23)$$

### Выводы.

1. В результате исследования электромагнитных процессов в системе плавного ослабления возбуждения тягового двигателя получены соотношения, описывающие изменения токов якоря и возбуждения на периоде модуляции импульсного преобразователя позволяют определить параметры элементов системы ТЭМК.

2. Установлено, что пульсации тока якоря тягового двигателя в тормозном режиме при параллельном и при последовательном самовозбуждении практически одинаковы и меньше, чем в тяговом режиме.

3. Полученные выражения, позволяют оценить пульсации тока якоря при плавном ослаблении возбуждения двигателя.

### ЛИТЕРАТУРА

[1] Синчук О.Н., Юрченко Н.Н., Чернышов А.А., Синчук И.О. и др. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов / Под ред. О.Н. Синчука. К.: Национальная академия наук Украины. Институт электродинамики, 2006. – 250 с.