

Э.А. АКОПЯН, В.С. ОВСЕПЯН

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПЕРЕМЕННО-ПОСТОЯННОГО ТОКА В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Приведено математическое описание системы тягового электропривода переменного постоянного тока. Показана существенная нелинейность полученной системы дифференциальных уравнений, что обусловлено обмотками якоря и возбуждения.

Ключевые слова: модель, двигатель постоянного тока, нелинейность, автономная нагрузка, дифференциальные уравнения.

В настоящее время в тяговых электроприводах карьерных автосамосвалов с колесными формулами 4x2 и 4x4 наиболее предпочтительным является применение двух трехфазных однофазных выпрямителей [1,2]. При этом выходные зажимы их могут быть соединены как последовательно, так и параллельно. Выходные зажимы каждого выпрямителя подключаются к тяговому синхронному генератору (СГ), который имеет две независимые и сдвинутые относительно друг друга на 30° эл. трехфазные системы обмоток. Такие схемы системы "СГ-В" позволяют существенно снизить пульсации выходного напряжения энергоустановки, а также, как показано в [3], пульсации момента, развиваемого тяговыми двигателями постоянного тока (ДПТ). При этом обеспечивается также движение автосамосвала при аварийном выходе из строя одного из выпрямителей. Применением рассматриваемой схемы исключается необходимость в сглаживающих фильтрах и упрощается схема защиты вентиля.

На основании вышеуказанного для математического описания двигательного режима работы привода приняты следующие допущения:

- двигатели М1 и М2 идентичны;
- выпрямленные напряжения равны;
- фазные сопротивления коммутации со стороны переменного тока одинаковы в обеих системах обмоток синхронного генератора.

По схеме замещения, показанной на рис.1, с учетом вышеприведенных допущений математическое описание динамического процесса преобразования энергии с ДПТ с последовательным возбуждением в тяговом режиме без ослабления поля имеет следующий вид:

$$(L_{OЯ}(i_{Я}) + L_{ВМ}(i_{Я})) \frac{di_{Я}}{dt} = U_d - (R_{OЯ} + R_{ВМ})i_{Я} - k\omega L_{ВМ}(i_{Я})i_{Я}, \quad (1)$$

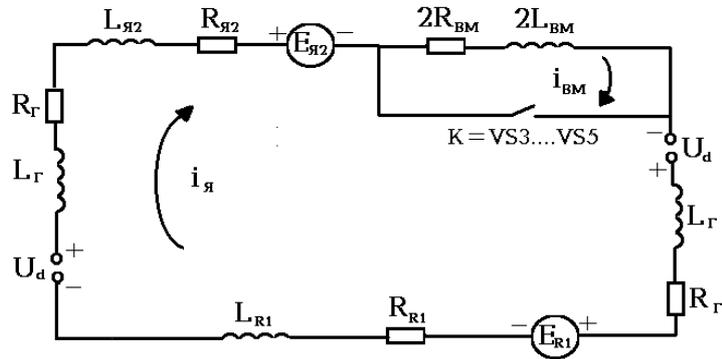


Рис.1

$$\frac{d\omega}{dt} = 2 \frac{k}{I} L_{\text{ВМ}} (i_{\text{я}})^2 - \epsilon_c, \quad (2)$$

где $L_{\text{я1}}(i_{\text{я1}}) = L_{\text{я2}}(i_{\text{я2}})$ – индуктивности рассеяния якорных обмоток двигателей М1 и М2; $L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})$ – индуктивность обмотки возбуждения двигателя; L_{Γ} – индуктивность двух фаз со стороны переменного тока; $R_{\text{я1}} = R_{\text{я2}}$ – активные сопротивления якорных обмоток двигателей; $R_{\text{ВМ}}$ – активное сопротивление обмотки возбуждения; R_{Γ} – активное сопротивление двух фаз со стороны переменного тока $L_{\text{оЯ}}(i_{\text{я}}) = L_{\text{я}}(i_{\text{я}}) + L_{\Gamma}(i_{\text{я}})$;

$$\epsilon_c = \frac{M_c}{I_{\text{пр}}}, \quad (3)$$

где M_c и $J_{\text{пр}}$ – соответственно момент сопротивления движению и момент инерции, приведенные к валу двигателя.

Индуктивность рассеяния якорной цепи двигателя может быть вычислена по приближенной формуле Уманского-Линвилля:

$$L_{\text{я}} = \gamma \frac{U_{\text{н}}}{p\omega I_{\text{М}}}. \quad (4)$$

Здесь $\gamma = 0,6$ для некомпенсированных и $\gamma = 0,25$ для компенсированных двигателей; $\omega_{\text{н}}$ – угловая скорость двигателя, c^{-1} [4].

Так как индуктивность рассеяния якорной цепи $L_{\text{я}}$ значительно меньше индуктивности обмотки возбуждения, связанной с главным потоком двигателя, то в ряде случаев ею пренебрегают. Однако такое допущение может внести принципиальное искажение в характер процессов, так как при $L_{\text{я}} = 0$ ток двигателя при скачкообразных изменениях приложенного напряжения приобретает возможность также изменяться скачкообразно.

При этом выражение $k\omega L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{я}}$ представляет собой ЭДС двигателя, которое, как известно, определяется соотношением

$$e = k\omega L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{я}} = k\Phi\omega, \quad (5)$$

где $k = pN/2\pi a$ – конструктивный коэффициент двигателя; N – число активных проводников якоря; a – число параллельных ветвей обмотки якоря.

Полученная система дифференциальных уравнений существенно нелинейна не только в связи с наличием члена “ i^2 ”, но и нелинейной зависимости индуктивности якорной цепи, обусловленной обмотками якоря и возбуждения $L_{\text{ВМ}}$, магнитного потока ($i_{\text{я}}$) и момента двигателя от тока якоря.

При замыкании ключа К (рис.1), представляющего собой три параллельно включенных тиристора VS3...VS5, в якорной цепи образуются два контура с токами якоря $i_{\text{я}}$ и возбуждения $i_{\text{ВМ}}$. Записав уравнения по методу контурных токов, путем несложных преобразований окончательно получим

$$L_{\text{оя}}(i_{\text{я}}) \frac{di_{\text{я}}}{dt} = U_{\text{д}} - R_{\text{оя}} - k\omega L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{ВМ}}, \quad (6)$$

$$L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}}) \frac{di_{\text{ВМ}}}{dt} = -R_{\text{ВМ}}i_{\text{ВМ}} + \Delta U_{\text{T}}, \quad (7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = 2 \frac{k}{I} L_{\text{ВМ}}(i_{\text{я}})i_{\text{я}} - \varepsilon_{\text{с}}, \quad (8)$$

где ΔU_{T} – падение напряжения в проводящем направлении, $\Delta U_{\text{T}}=1,5...2B$.

Таким образом, в режиме ослабления поля якорная цепь описывается уравнениями (1), (2) при разомкнутом ключе. При включении ключа К якорная цепь описывается уравнениями (6)-(8). При переходе ключа из одного состояния в другое системы дифференциальных уравнений (1), (2) и (6)-(8) “сшиваются”. Очевидно, что если в интервале времени (t_1, t_2) ключ К разомкнут, то состояние якорной цепи определяется из (1), (4). В момент коммутации ключа t_2 якорная цепь будет описываться уравнениями (6)-(8). Но начальные условия определяются из решения уравнений (1), (2) в момент времени t_2 . Аналогично происходит “сшивка” решений при переходе ключа из замкнутого состояния в разомкнутое. На рис.2 хорошо прослеживается колебательный характер процесса изменения якорного тока $i_{\text{я}}(t)$. Такое изменение тока $i_{\text{я}}(t)$ объясняется нелинейностью магнитной системы двигателя, когда его параметры являются функцией координат состояния. При этом изменение якорного тока вызывает изменение индуктивности якорной цепи, обусловленное обмотками якоря и возбуждения, а следовательно, и изменение собственной частоты и степени демпфирования системы. На рис.3 показана осциллограмма изменения угловой скорости тягового электродвигателя (ТЭД), характеризующая пуск порожнего автосамосвала на бетонном участке дороги с ограничением скорости движения до 38,4 км/ч или 10,69 м/с. Как видно из рис.2 и 3, при изменении якорного тока и угловой скорости ТЭД наблюдается приемлемая сходимость экспериментальной и полученной на модели осциллограмм токов и скорости движения.

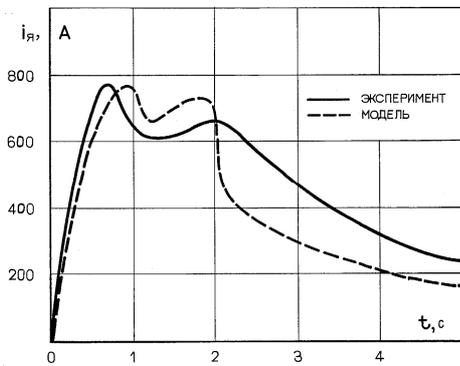


Рис.2

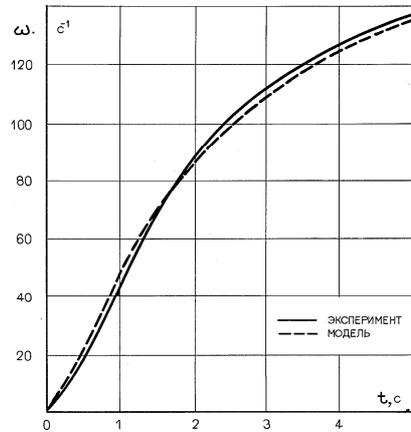


Рис.3

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Погарский Н.А., Степанов А.Д.** Универсальные трансмиссии пневмоколесных машин повышенной единичной мощности. –М.: Машиностроение, 1976.–234с.
2. Математическое моделирование: Процессы в нелинейных средах / Под ред. **А.А. Самарского.**–М.:Наука, 1986. – 310с.
3. **Иоффе А.Б.** Тяговые электрические машины. –М.–Л.: Энергия, 1965. –232с.
4. **Чиликин М.Г., Ключев В.И., Сандлер А.С.** Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов. –М.: Энергия, 1979.– 616с.

ГИУА. Материал поступил в редакцию 12.03.2003.

Է.Ա. ՀԱՎՈՐՅԱՆ, Վ.Ս. ՀՈՎՍԵՓՅԱՆ

ՓՈՓՈԽԱԿԱՆ - ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՔԱՐՇԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԶԱՂՈՐԴԱԿԻ ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՍՈՂԵԼԸ ՇԱՐԺԻԶԱՅԻՆ ՌԵԺԻՍՈՒՄ

Տրված է քարշային էլեկտրաբանեցման մաթեմատիկական նկարագրությունը: Ցույց է տրված դիֆերենցիալ հավասարումների համակարգի շոշափելի ապագծայնությունը՝ պայմանավորված մագնիսական հոսքի, խարսխի և գրգռման փաթույթներով:

**E.A. HAKOBYAN, V.S. HOVSEPYAN
A MATHEMATICAL MODEL OF ALTERNATING-DIRECT CURRENT
ELECTRIC TRACTION DRIVE IN MOTION**

A mathematical model of a.c and d.c. electric traction drive system is described. The differential equation system obtained is nonlinear conditioned by armature and excitation windings.