

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА В АВАРИЙНЫХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ**

И.А. Розаев

Научный руководитель: к.т.н., доцент Г.И. Однокопылов
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: RozayevIA@gmail.com

**MATHEMATICAL MODELING OF SWITCHED RELUCTANCE DRIVE
IN EMERGENCY MODES**

I.A. Rozayev

Scientific Supervisor: Assoc. Prof., Candidate of Engineering Sciences, G.I. Odnokopylov
National Research Tomsk Polytechnic University, Russia, Tomsk, Lenin str., 30, 634050
E-mail: RozayevIA@gmail.com

Under review mathematical model of Switched reluctance motor allows investigating the work of switched-reluctance drive in usual, emergency and low-phases modes.

В условиях развития промышленных систем и систем с повышенными требованиями к надежности и отказоустойчивости исполнительных механизмов появляется необходимость разработки математической модели вентильно-индукторного электродвигателя в аварийных неполнофазных режимах работы.

В основу математической модели вентильно-индукторного двигателя положены уравнения электрических контуров составленные для каждой из фаз. Приняты допущения, что магнитные системы каждой фазы идентичны друг другу, гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе не учитываются, а активные сопротивления фаз равны [1, 2]. В этом случае каждая фаза ВИД описывается уравнением электромагнитного равновесия, согласно второму закону Кирхгофа. Уравнение электрического равновесия двигателя: $U_x = R_s i_x + \frac{d\psi(\theta_{ex}, i_{ex})}{dt}$,

где U_x – напряжение приложенное к обмотке фазы с индексом x ; i_x – фазный ток; R_s – электрическое сопротивление фазы; $\psi(i_x, \theta_{ex}) = L_x(i_x, \theta_{ex}) \cdot i_x$ – потокосцепление фазы.

Известно, что индуктивность обмоток в вентильно-индукторном электродвигателе представляется нелинейной зависимостью текущего положения ротора и значения фазного тока, которая может быть представлена как:

$$L(i, \theta_e) = L_0(i) + L_1(i) \cdot \cos \theta_e + L_2(i) \cdot \cos 2\theta_e,$$

где $\theta_e = N_r \theta_r$ – электрический угол ротора в радианах; N_r – число полюсов ротора; θ_r – механический угол положения ротора в радианах; $L_0(i)$, $L_1(i)$, $L_2(i)$ – функции зависимостей индуктивности от тока основанные на трех основных положениях ротора в пространстве магнитного поля (по закону Фарадея об ориентации ферромагнитных материалов в пространстве магнитного поля) [3, 4].

Преобразуем уравнения электрического равновесия двигателя:

$$U_x = R_s i_x + \frac{d \{ L_x(i_x, \theta_e) i_x \}}{dt} =$$

$$R_s i_x + L_x(i_x, \theta_e) \frac{di_x}{dt} + i_x \frac{d\theta_{ex} \cdot dL_x(i_x, \theta_e)}{dt \cdot d\theta_e} =$$

$$R_s i_x + L_x(i_x, \theta_e) \frac{di_x}{dt} + \frac{dL_x(i_x, \theta_e)}{d\theta_e} \cdot \omega \cdot i_x, \text{ где}$$

ω – угловая частота вращения ротора.

В данном уравнении в правой части представлены слагаемые показывающие потери напряжения на активном и реактивном сопротивлении и возникающая в системе противо-ЭДС, которая может быть выражена как:

$$e = \frac{dL_x(i_x, \theta_e)}{d\theta_e} \cdot \omega \cdot i_x = K_{bx} \cdot \omega \cdot i_x, \text{ где}$$

$L_{dx} = \frac{di_x}{dt}$ – дифференциальная индуктивность; $K_{ex} = \frac{d\Psi_x}{d\theta_e}$ – коэффициент противо-эдс.

Для случая вращающейся электрической машины, зависимость механической энергии от электромеханического момента при изменении положения ротора записывается как [3]:

$$\Delta W_x = M_x \cdot \Delta \theta_r,$$

где M_x – электромагнитный момент двигателя формируемый одной фазой; W_x – механическая энергия.

Отсюда: $M_x = \frac{\Delta W_x}{\Delta \theta_r}$, с учетом принятых допущений принимаем момент на валу двигателя равным

электромагнитному моменту, тогда изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии $\Delta W'_f$ [5].

$$W'_f = \frac{1}{2} L_x(i_x, \theta_r).$$

Отсюда: $M_x = \frac{\Delta M_x}{\Delta \theta_r} = \frac{\Delta W'_{fx}}{\Delta \theta_r} = \frac{\partial L_x(i_x, \theta_r)}{\partial \theta_r} \cdot \frac{i_x^2}{2}.$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов формируемых фазами, учитывая, что фазы не зависимы и не связаны электрическими и магнитными взаимодействиями.

Поэтому: $M_{os} = \sum_{x=1}^m M_x(i_x, \theta_r)$, где $M_x(i_x, \theta_r)$ – момент, развиваемый фазой с индексом x ; m – число

фаз двигателя.

Для описания вращательного движения ротора представим механическую часть в виде одномассовой системы [2]. Тогда уравнения движения будут иметь вид:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = M_{os} - M_c; \\ \omega = \frac{d\theta_r}{dt}, \end{cases}, \text{ где } J - \text{приведенный момент инерции ротора; } \omega - \text{угловая частота вращения ротора.}$$

Таким образом, математическая модель одной секции трехфазного вентильно-индукторного двигателя имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_A}{dt} = \frac{1}{L_{dA}} \cdot (U_A - R_s i_A - K_{bA} \cdot \omega \cdot i_A); \\ L_{dA} = L_{dA}(i_A, \theta_e); \\ K_{bA} = K_{bA}(i_A, \theta_e); \\ \frac{di_B}{dt} = \frac{1}{L_{dB}} \cdot (U_B - R_s i_B - K_{bB} \cdot \omega \cdot i_B); \\ L_{dB} = L_{dB}(i_B, \theta_e); \\ K_{bB} = K_{bB}(i_B, \theta_e); \\ \frac{di_C}{dt} = \frac{1}{L_{dC}} \cdot (U_C - R_s i_C - K_{bC} \cdot \omega \cdot i_C); \\ L_{dC} = L_{dC}(i_C, \theta_e); \\ K_{bC} = K_{bC}(i_C, \theta_e); \\ \omega = \frac{d\theta_r}{dt}; \\ J \frac{d\omega}{dt} = M_{\partial s} - M_c, \end{array} \right.$$

Данная модель позволяет исследовать вентильно-индукторный электропривод как в нормальных, так и в аварийных, неполнофазных режимах работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Розаев И.А., Однокопылов Г.И. Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – №. 4. – С. 138–143.
2. Любарский Б.Г., Рябов Е.С. Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLabSimulink // Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, 2011. – С. 404–424.
3. K.I. Hwu. Applying POWERSYS and SIMULINK to modeling Switched reluctance motor/ Tamkang Journal of Science and Engineering, V. 12. – 2009. – №. 4. – P. 429–438.
4. Jin-Woo Ahn. Switched Reluctance Motor, Torque Control, Prof. Moulay Tahar Lamchich (Ed.). – Kyungshung University, Korea, 2011. – 292 p.
5. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. – Boca Raton: CRC Press, 2001. – 416 p.