

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ДВИГАТЕЛЯ В АВАРИЙНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

Л.Я. Насибова,<sup>1</sup> И.А. Розаев<sup>2</sup>, Г.И. Однокопылов<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup>Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭПЭО, <sup>1</sup>группа 5Г2А

Для формирования отказоустойчивого управления существует необходимость разработки алгоритмов отказоустойчивого управления отладку которых целесообразно проводить на основе математического моделирования аварийных процессов ЭПТ. Однако стандартными программными средствами эта задача не решается - обрыв фазы двигателя является недопустимой операцией. Поэтому ставится задача разработки математической модели ВИП допускающей возможность моделирования аварийных процессов вплоть до работы двух (одной) фазе двигателя.

В этом случае необходимая избыточность формируется при комплексном использовании функционального резерва основанного на использовании возможности работы трехфазной секции на двух фазах оставшихся работоспособных фазах [1].

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].

Исходя из законов Кирхгофа имея схему замещения, запишем уравнения электрического равновесия трех фаз ВИД:

$$\begin{aligned}U_{1A} &= R_s \cdot i_{1A} + \frac{d\Psi_A}{dt}; \\U_{1B} &= R_s \cdot i_{1B} + \frac{d\Psi_B}{dt}; \\U_{1C} &= R_s \cdot i_{1C} + \frac{d\Psi_C}{dt},\end{aligned}\tag{1}$$

где:  $U_{1A}, U_{1B}, U_{1C}$  – напряжения приложенное к обмоткам фаз;  $i_{1A}, i_{1B}, i_{1C}$  – фазные токи;  $R_s$  – электрическое сопротивление фазы;  $\Psi_A = \Psi(i_{1A}, \alpha_{1A}), \Psi_B = \Psi(i_{1B}, \alpha_{1B}), \Psi_C = \Psi(i_{1C}, \alpha_{1C})$  – потокосцепления фаз.

Уравнение электрического равновесия трех фаз (1) в матричной форме имеет вид:

$$\begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_{1A} \\ \Psi_{1B} \\ \Psi_{1C} \end{bmatrix}.$$

Уравнения равновесия напряжений в трех фазах в матричной форме с учетом потокосцеплений:

$$\begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & L_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & L_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \end{bmatrix} + \omega \cdot \begin{bmatrix} K_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & K_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & K_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix}.$$

Матричное уравнение равновесия напряжений в фазах трехфазного работоспособного ВИД в нормальной форме Коши имеет вид (2):

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1} \{ [U_1] - [R_1][i_1] - \omega [K_{\omega 1}] \}, \quad (2)$$

Где:  $[i_1]$  – матрица неизвестных (токи статора);  $[U_1]$  – матрица напряжений;  $[R_1]$  – матрица сопротивлений;  $[L_{d1}]$  – прямая матрица дифференциальных индуктивностей в функции фазных токов и текущего положения ротора;  $[K_{\omega 1}]$  – матрицы коэффициентов противо-ЭДС в функции фазных токов и текущего положения ротора;  $\omega$  – частота вращения ротора:

$$\begin{aligned} [i_1] &= \begin{bmatrix} i_{A1} \\ i_{B1} \\ i_{C1} \end{bmatrix}; [U_1] = \begin{bmatrix} U_{A1} \\ U_{B1} \\ U_{C1} \end{bmatrix}; [R_1] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \\ [L_{d1}] &= \begin{bmatrix} L_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & L_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & L_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix}; \\ [K_{\omega 1}] &= \begin{bmatrix} K_{1A}(i_{1A}, \alpha) & 0 & 0 \\ 0 & K_{1B}(i_{1B}, \alpha) & 0 \\ 0 & 0 & K_{1C}(i_{1C}, \alpha) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Для имитации обрыва фазы статора необходимо в уравнения равновесия напряжения в фазах (2) ввести матрицу отказов  $[M_{O1}]$  ВИД, позволяющую имитировать неполнофазные аварийные режимы работы:

$$[M_{O1}] = \begin{bmatrix} \overline{a1} & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b1} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c1} \end{bmatrix}.$$

При этом единичному состоянию битов отказов  $a, b, c$  будет соответствовать номинальный трехфазный режим работы, а нулевому – обрыв соответствующей фазы обмотки статора. Тогда выражение для матрицы активных сопротивлений примет следующий вид:

$$[R_{M1}] = ([1] + k_{\infty}[M_{01}]) \cdot [R_1],$$

где  $k_{\infty}$  – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора, тогда матричное уравнение равновесия напряжений в фазах трехфазного ВИД с учетом матрицы зов  $[R_{M1}]$  в нормальной форме Коши имеет вид:

$$\frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1}\{[U_1] - [R_{M1}][i_1] - \omega[K_{\omega 1}]\}, \quad (3)$$

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

$$\Delta W_{1A} = M_{1A} \cdot \Delta \alpha,$$

Где:  $M_{1A}$  – электромеханический момент двигателя формируемый фазой "А";  $W_{1A}$  – механическая энергия, формируемая фазой "А" на интервале  $\Delta \alpha$  угла поворота ротора, где:  $\alpha$  – угол положения ротора в радианах.

Принимая момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту, изменение механической энергии равно изменению магнитной коэнергии. Известно выражение для мгновенного электромагнитного момента через производную потокосцепления по углу поворота ротора которое для одной фазы может быть записано как [3,4]:

$$M_{1A} = i_{1A} \frac{\partial \Psi_{1A}(i_{1A}, \alpha)}{\partial \alpha}.$$

Учитывая, что:  $K_{\omega 1A} = \frac{\partial \Psi(i_{1A}, \alpha_{1A})}{\partial \alpha}$ , можно записать:

$$M_{1A} = i_{1A} \cdot K_{\omega 1A},$$

коэффициенты противо-ЭДС и момента численно равны в системе единиц СИ:

$$K_{\omega 1A} (\text{В} \cdot \text{с/рад}) = K_{M1A} (\text{Н} \cdot \text{м/А}),$$

тогда моменты фаз А, В, С могут быть определены как:

$$M_{1A} = i_{1A} \cdot K_{M1A}; M_{1B} = i_{1B} \cdot K_{M1B}; M_{1C} = i_{1C} \cdot K_{M1C};$$

Момент двигателя представляет собой сумму моментов, формируемых фазами, учитывая, что фазы не зависимы и не связаны электрическими и магнитными взаимодействиями. Поэтому суммарный момент  $M_1$  трехфазного ВИД:

$$M_1 = M_{1A}(i_{1A}, \alpha) + M_{1B}(i_{1B}, \alpha) + M_{1C}(i_{1C}, \alpha),$$

где:  $M_{1A}(i_{1A}, \alpha)$ ,  $M_{1B}(i_{1B}, \alpha)$ ,  $M_{1C}(i_{1C}, \alpha)$  – моменты, развиваемые фазами А, В, С.

Уравнение движения электропривода:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M_1 - M_c), \quad (4)$$

где:  $J$  – момент инерции электропривода;  $p$  - число пар полюсов;  $\omega$  – частота вращения;  $M_c$  – момент сопротивления двигателя;  $M_l$  – электромагнитные моменты ВИД.

Система уравнений математической модели для описания переходных процессов в неполнофазном аварийном режиме трехфазного ВИП (5) может быть записана на основе выражений (1), (2), (3), и (4):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d[i_1]}{dt} = [L_{d1}]^{-1}\{[U_1] - [i_1][R_{M1}] - \omega[K_{\omega 1}]\}; \\ [R_{M1}] = ([1] + k_{\infty}[M_{01}])[R_1]; \\ T_{\Pi} = t_2 - t_1; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J}(M_1 - M_c); \\ M_1 = M_{A_1}(i_{A_1}, \alpha_m) + M_{B_1}(i_{B_1}, \alpha_m) + M_{C_1}(i_{C_1}, \alpha_m) \\ \alpha_m = p \int_0^t \omega dt = p\alpha, \end{array} \right. \quad (5)$$

где:  $[i_l]$ , – матрицы фазных токов статора;  $[U_l]$  – матрицы фазных напряжений;  $[M_{01}]$  – матрицы отказов;  $[L_{d1}]$ ,  $[L_{d1}]^{-1}$  прямая и обратная матрица дифференциальных индуктивностей в функции фазных токов и текущего положения ротора;  $[K_{\omega 1}]$  – матрицы коэффициентов противо-ЭДС в функции фазных токов и текущего положения ротора;  $[R_1]$  – матрица сопротивлений до отказа и  $[R_{M1}]$  – после отказа;  $[1]$  – единичная матрица, размером 3 на 3;  $k_{\infty}$  - коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора;  $T_{\Pi}$  – время переключения структуры ЭП,  $t_1$  – момент времени выявленного отказа,  $t_2$  – момент времени восстановления значения частоты вращения (момента) до уровня предшествующего отказу;  $M_l$  – электромагнитный момент;  $M_{A_1}(i_{A_1}, \alpha)$ ,  $M_{B_1}(i_{B_1}, \alpha)$ ,  $M_{C_1}(i_{C_1}, \alpha)$  - моменты фаз А, В, С первой соответственно в функции фазных токов и текущего положения ротора (определенные по (2.5) или (2.6));  $M_c$  – момент сопротивления двигателя;  $J$ - момент инерции ЭП;  $\omega$  – частота вращения ротора;  $\alpha_m$ ,  $\alpha$  – механический и электрический углы ДПР;  $p$  - число пар полюсов.

Исходя из проведенных исследований, можно сделать вывод, что разработана математическая модель трехфазного вентильно-индукторного электропривода, позволяющая исследовать рабочие и аварийные режимы электропривода и разрабатывать алгоритмы восстановления работоспособности в аварийных и неполнофазных режимах работы.

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Odnokopylov G. I., Rozaev I. A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive (Article number 012035) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. - p. 1-7
2. Любарский Б. Г., Рябов Е.С. «Моделирование электроприводов на основе реактивных индукторных двигателей в среде MatLab Simulink». Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.–С. 411-414.
3. K.I. Hwu. Applying POWERSYS and SIMULINK to modeling Switched reluctance motor/ Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 12, No. 4, pp. 429-438 (2009).
4. R. Krishnan. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2001. Т 1, pp. 143-169.

Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» проект №3852.

Научный руководитель: Г.И. Однокопылов, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИИ ТПУ.

## **ПУСКО-РЕГУЛИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА.**

Я.К. Старостина

Ульяновский государственный технический университет

Основным рабочим режимом асинхронного электропривода турбомеханизмов (вентиляторов, компрессоров, насосов и др.) служит режим длительной продолжительности включения ( $PВ \geq 60\%$ ), причём значительную долю времени работа может происходить вхолостую при низких значениях коэффициента мощности. Данный режим не всегда обусловлен технологической необходимостью и часто объясняется стремлением избежать неблагоприятного влияния пусковых токов асинхронных двигателей (АД) на качество напряжения в распределительных сетях. Переход на повторно-кратковременную работу лишь во время нагрузений увеличивает количество запусков привода в течение суток, требуя применения устройств плавного пуска в ста-