

ковой ток многополюсного АД можно значительно уменьшить за счет компенсации реактивной составляющей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршакян И.И., Артюхов И.И. Динамические процессы в системах электроснабжения установок охлаждения газа. – Саратов: СГТУ, 2004. – 120 с.
2. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.

Научный руководитель: И.И. Артюхов, д.т.н., профессор, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ПОВЫШЕННОЙ ЖИВУЧЕСТЬЮ

К.В. Иванов

Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5ГМ51

Для электроприводов в составе опасных производственных объектов: ядерные, военные, химические, строительные, металлургические, транспортные, в том числе трубопроводный транспорт – целесообразно применение отказоустойчивого управления с обеспечением свойства «живучести» устройства. Важность решения этой проблемы отмечена в постановлении Правительства РФ № 241 «О мерах по обеспечению промышленной безопасности опасных производственных объектов на территории Российской Федерации» от 28.03.2001.

По ГОСТ 27.002 – 89 свойство объекта сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов – определяется термином «живучесть».

Известны технические решения для многосекционных трехфазных электроприводов [1], где в случае отказа в одной из секций происходит ее отключение, в случае технического решения [2] возможно

восстановление работоспособности для одного отказа в одной секции асинхронного электропривода с обеспечением свойства живучести.

Живучесть электропривода может быть обеспечена при рассмотрении трехфазного АД как мехатронной системы с ненагруженным резервом. При возникновении аварийной ситуации (в одной из 3 фаз) АД может быть переведен в двухфазный режим работы с реализацией алгоритма восстановления работоспособности.

Силовые преобразователи для асинхронных двигателей выполняются по схеме с развязанными фазами на основе трех преобразовательных ячеек, выполненных по мостовой или полумостовой схемам (рис.1.3 а, б). С целью уменьшения времени переключения структуры электропривода T_{π} необходимо обеспечивать максимальную скорость нарастания формируемых фазных токов (обеспечивать минимальное падение напряжения на ключах и широтно-импульсное регулирование тока осуществлять, используя только индуктивность обмоток двигателя).

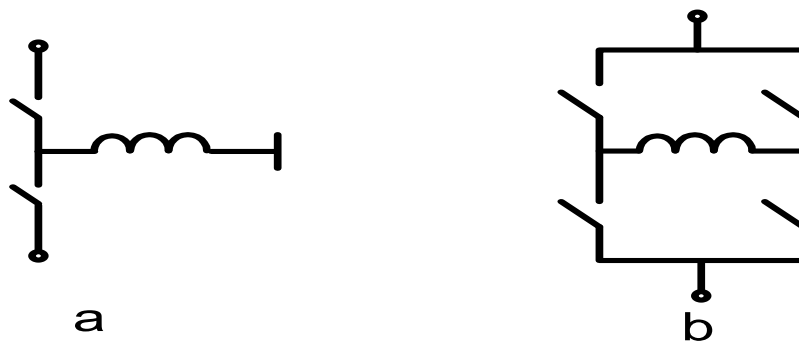


Рис. 1. Изображена преобразовательная ячейка а - полумоста, б - моста.

В работе рассмотрено обеспечение управления с повышенной живучестью n -секционного трехфазного асинхронного электропривода в случае одиночных или множественных отказов.

В предложенном асинхронном электроприводе с повышенной живучестью используется математическая модель, который позволяет выявить отказ в одном из n -преобразователей частоты, либо выявить отказ одного из фаз n -секционного двигателя. В результате по программе микроконтроллера происходит адаптация структуры электропривода из рабочего трехфазного в аварийный двухфазный режим работы. При этом вектор одного из токов в отказавшей секции смещается на угол $\pi/3$ с сохранением одинаковой амплитуды токов в фазах [3] и в результате обеспечивается сохранение кругового вращающегося поля в магнитном зазоре той секции электрического двигателя, где произошел отказ, при этом оставшиеся $n-1$ секции электропривода продолжают работать в трехфазном режиме.

При последующих отказах в этой же секции она выбывает из работы, и электропривод функционирует с пониженной активной мощностью, но с обеспечением свойства живучести. В процессе плавного исчерпания рабочего ресурса электропривода – структурного (за счет формирования избыточности в виде n -секций вместо одной) и функционального (за счет обеспечения работоспособности каждой из n -секций двигателя на двух оставшихся фазах трехфазного двигателя в аварийном режиме) резервов минимальном составе электропривода обеспечивается работа на двух оставшихся фазах одной работоспособной секции при отказавших $n-1$ секциях включительно, что позволяет обеспечить работоспособность как при одиночных, так и при множественных отказах электропривода с обеспечением свойства повышенной живучести.

На основе полученной математической модели произведено построение имитационной модели электропривода в среде MatlabSimulink (рисунок 3.4). Представленная модель содержит блок матрицы отказов (1,1), имитирующий возникновение аварийной ситуации; двух секционный асинхронный двигатель (2), содержащий в своей структуре выражения для расчета полей прямой и обратной последовательности, а также механических процессов; источник сигнала задания (3); систему управления (5), которая включает в себя в зависимости от выбранного типа САУ требуемые регуляторы; два преобразователя частоты (5); блок задания момента нагрузки (6); блок измерений (7);

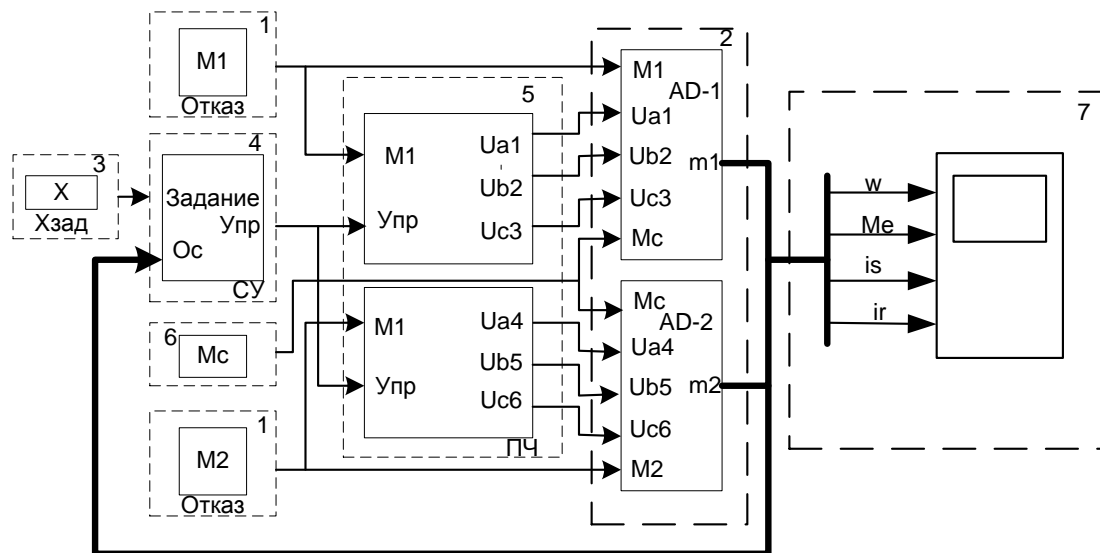


Рис. 3.4. Схема имитационной модели отказоустойчивого двух секционного асинхронного электропривода в среде MatlabSimulink

Предложенная схема была спроектирована в системе *MatLab*, и позволяет применить математическое моделирование в нормальной

форме Коши для описания переходных процессов в аварийном неполнофазном режиме двухсекционного трехфазного АД для схемы включения с развязанными фазами двигателя (1).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{d}{dt} [i_1] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_1] - \langle [R_{M1}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_1] \right\}; \\
 \frac{d}{dt} [i_2] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_2] - \langle [R_{M1}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_2] \right\}; \\
 \frac{d}{dt} [i_3] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_3] - \langle [R_{M2}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_3] \right\}; \\
 \frac{d}{dt} [i_4] = [L_1]^{-1} \cdot \left\{ [U_4] - \langle [R_{M2}] + [L_2] \frac{p\omega}{\sqrt{3}} \rangle \cdot [i_4] \right\}; \\
 [R_{M1}] = ([1] + k_\infty [M_{01}]) \cdot [R_1]; \\
 [R_{M2}] = ([1] + k_\infty [M_{02}]) \cdot [R_2]; \\
 T_\Pi = t_2 - t_1; \\
 \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (M_1 - M_2 + M_3 - M_4 - M_c); \\
 M_1 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A1} i_{c1} + i_{B1} i_{a1} + i_{C1} i_{b1}) - (i_{A1} i_{b1} + i_{B1} i_{c1} + i_{C1} i_{a1})]; \\
 M_2 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A2} i_{c2} + i_{B2} i_{a2} + i_{C2} i_{b2}) - (i_{A2} i_{b2} + i_{B2} i_{c2} + i_{C2} i_{a2})]; \\
 M_3 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A3} i_{c3} + i_{B3} i_{a3} + i_{C3} i_{b3}) - (i_{A3} i_{b3} + i_{B3} i_{c3} + i_{C3} i_{a3})]; \\
 M_4 = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [(i_{A4} i_{c4} + i_{B4} i_{a4} + i_{C4} i_{b4}) - (i_{A4} i_{b4} + i_{B4} i_{c4} + i_{C4} i_{a4})]
 \end{array} \right. \quad (1)$$

где $[i_1]$, $[i_2]$ – матрицы фазных токов статора и ротора первой секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[i_3]$, $[i_4]$ – матрицы фазных токов статора и ротора второй секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[U_1]$, $[U_2]$ – матрицы фазных напряжений первой секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[U_3]$, $[U_4]$ – матрицы фазных напряжений второй секции прямой и обратной последовательности соответственно; $[M_{01}]$ – фазная матрица отказов первой секции ЭП; $[M_{02}]$ – фазная матрица отказов второй секции ЭП; $[L_1]$, $[L_2]$ – фазные матрицы индуктивностей; $[L_1]^{-1}$ – обратная матрица $[L_1]$; $[R_1]$ – фазная матрицы сопротивлений до отказа и $[R_{M1}]$ – после отказа; $[R_2]$ – фазная матрицы сопротивлений до отказа и $[R_{M2}]$ – после отказа; $[1]$ – единичная матрица, размером 6 на 6, k_∞ – коэффициент, имитирующий введение высокоомного сопротивления в цепь статора, T_Π – время переключения структуры ЭП, t_1 – момент времени выявленного отказа, t_2 – момент времени восстановления кругового вращающегося поля, ω – частота вращения, M_1 , M_2 – электромагнитный момент полей прямой и обратной последовательности первой секции, M_3 , M_4 – электромаг-

нитный момент полей прямой и обратной последовательности второй секции, M_c – момент сопротивления двигателя, J – суммарный момент инерции электропривода, p – число пар полюсов, L_s, L_R – индуктивности статора и ротора, L_m – взаимная индуктивность.

$$\begin{aligned}
 & [i_1] = \begin{bmatrix} i_{1A} \\ i_{1B} \\ i_{1C} \\ i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix}; [U_1] = \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \\ U_{1a} \\ U_{1b} \\ U_{1c} \end{bmatrix}; [i_2] = \begin{bmatrix} i_{2A} \\ i_{2B} \\ i_{2C} \\ i_{2a} \\ i_{2b} \\ i_{2c} \end{bmatrix}; [U_2] = \begin{bmatrix} U_{2A} \\ U_{2B} \\ U_{2C} \\ U_{2a} \\ U_{2b} \\ U_{2c} \end{bmatrix} [M_{O1}] = \\
 & \begin{bmatrix} \overline{a1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [M_{O2}] = \begin{bmatrix} \overline{a2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \overline{b2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \overline{c2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [R_1] = \\
 & \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; [R_2] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \\
 & [L_1] = \begin{bmatrix} L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_s & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m \\ L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R & -\frac{L_m}{2} \\ -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_m & -\frac{L_m}{2} & -\frac{L_m}{2} & L_R \end{bmatrix} \\
 & [L_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ -\frac{3}{2}L_m & 0 & \frac{3}{2}L_m & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) \\ \frac{3}{2}L_m & -\frac{3}{2}L_m & 0 & (L_R + \frac{1}{2}L_m) & -(L_R + \frac{1}{2}L_m) & 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

В результате мы можем наблюдать увеличение токов в обмотки двигателя при отказе одной или нескольких фаз.

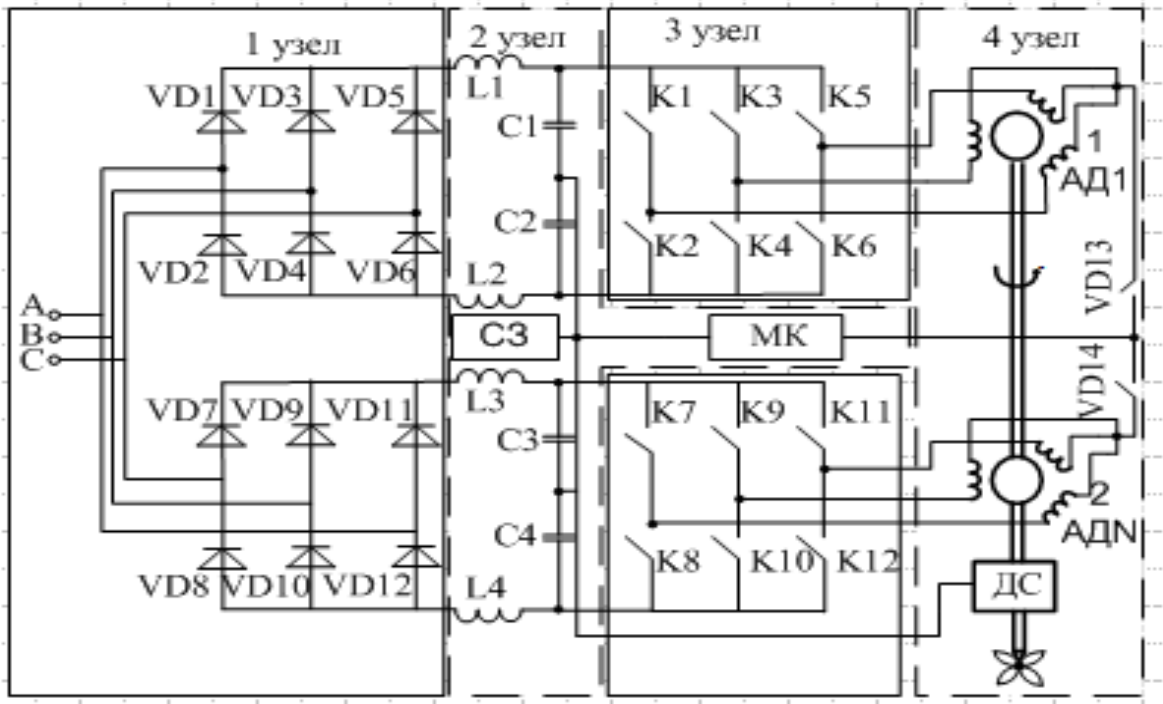


Рис. 1. Функциональная схема модели отказоустойчивого асинхронного электропривода

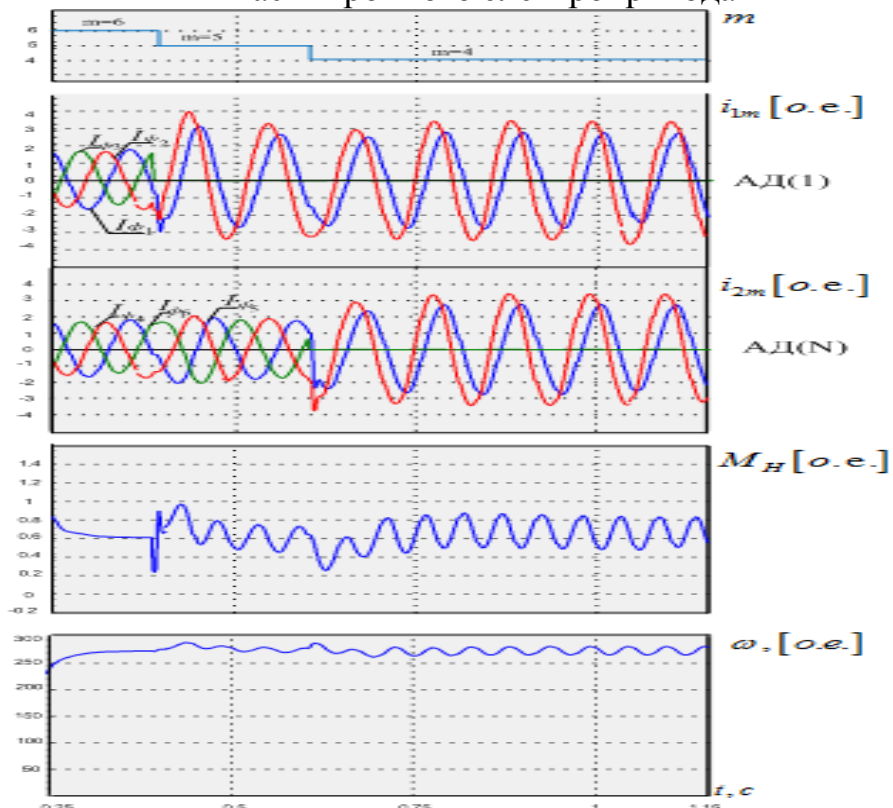


Рис. 2. Диаграмма токов при однократном или множественном отказе фаз

На участки времени от (0.25-0,65) АД(N) переходит в номинальный режим, на диаграмме видно что все 3 фаз имеют синусоидальную форму, АД(1) участок (0.25-0.40) происходит обрыв фазы $I_{\phi 3}$ начинается переходный процесс, при котором мощность двигателя уменьшается на 20% ,а ток в оставшихся фазах увеличивается за счет векторного управления, и сдвига фаз на $\frac{\pi}{3}$, при этом на рис. В на участке (0.40-0,65) увеличивается ток на 5%, компенсирую нагрузку на валу. При обрыве фазы $I_{\phi 6}$ в АД(N) участок (0.65-1.15) ток увеличивается в 3.60 раз. Двигатель теряет мощность, но сохраняет живучесть и позволяет довести технологический процесс до конца процесс до конца.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Глухов Д.М. Моделирование многофазных асинхронных двигателей в аварийных режимах: автореферат Изд-во ТПУ, 2005. – 18 с.
2. Патент РФ на изобретение № 2460190(RU), Н02Н 7/09, Н02Н 7/12, Н02Н 7/122. Способ управления и обеспечения живучести трехфазного асинхронного двигателя вращательного или поступательного движения/ Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, Й. Центнер – № 2011113290; Заявл. 06.04.2011; Опубл.27.08.2012 Бюл. № 24.
3. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. –Высшая школа, 1988. – с. 479.

Научный руководитель: Г.И. Однокопылов, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ; С.Н. Кладиев, к.т.н., доцент каф. ЭНИН ТПУ.

ДВУХКОНТУРНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ С ВОДЯНЫМ КАЛОРИФЕРОМ

П.Ю. Колесов
Томский политехнический университет
ЭНИН, ЭПЭО, группа 5ГМ4Б

Автоматические системы вентиляции широко распространены в современных зданиях и сооружениях, где основным показателем качества работы является температура приточного воздуха. Однако для систем, где применен водяной калорифер, существуют ограничение на