УДК 62-527:621.3.078.3

А.Д. БРАГИН, студент гр. 5ГМ31 (НИ ТПУ)
Научный руководитель: Г.И. ОДНОКОПЫЛОВ, к.т.н., доцент (НИ ТПУ)
Соруководитель, научный консультант: Н.А. ВОРОНИНА, к.т.н.,
старший преподаватель (НИ ТПУ)
г. Томск

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Обеспечение отказоустойчивого управления со свойством живучести асинхронного электропривода переменного тока (ЭПТ) предполагает разработку алгоритмов восстановления работоспособности с полным или частичным восстановлением и круговым вращающимся полем. Задача разработки алгоритмов отказоустойчивого управления для асинхронного ЭПТ со скалярным и векторным управлением на основе моделирования системы управления является целью данной статьи.

Обеспечение формирования кругового вращающегося поля для трехфазной электрической машины может быть сформулировано следующим образом[1]: сдвиг векторов тока на угол $\beta=\pi/3$ с равенством магнитодвижущих сил, что обеспечивается работой регуляторов тока.

Выполнение данного условия предполагает технические решения с различными алгоритмами для асинхронных двигателей (АД). Возможна работа с опережающей или отстающей фазой и для рабочих углов сдвига токов на π [3], π/3[4] радиан и несинусоидальными токами [5,] для скалярного управления электроприводом. В случае векторного управления электроприводом необходимо применение координатного преобразования [6]. Такой подход позволяет сформировать дополнительную избыточность на основе функционального резерва трехфазного ЭПТ и обеспечить работоспособность в аварийном двухфазном режиме работы.

Алгоритм восстановления работоспособности АД с поворотом векторов тока на π/3 радиан.

Формируются мгновенные значения токов в двух оставшихся фазах асинхронного двигателя по выражениям для опережающей фазы вектора тока:

$$I_A = I_\omega \bar{a} k_o k_d sin(\alpha + c\xi - b(\pi/3 - \xi));$$
$$I_B = I_\omega \bar{b} k_o k_d sin(\alpha + a\xi - c(\pi/3 - \xi) + 2\pi/3);$$
$$I_C = I_\omega \bar{c} k_o k_d sin(\alpha + b\xi - a(\pi/3 - \xi) + 4\pi/3);$$

или для отстающей фазы вектора тока:

$$I_A = I_\omega\, \bar{a} k_o k_d sin(\alpha - b\xi + c(\pi/3 - \xi));$$
$$I_B = I_\omega \bar{b} k_o k_d sin(\alpha - c\xi + a(\pi/3 - \xi) + 2\pi/3);$$
$$I_C = I_\omega \bar{c} k_o k_d sin(\alpha - a\xi + b(\pi/3 - \xi) + 4\pi/3),$$

где I_ω – значение амплитуды формируемых фазных токов I_A, I_B, I_C, А; a, b, c – значение битов слова состояния электропривода по отказам, $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$– инверсные значения битов a, b, c; k_o– коэффициент отключения двигателя в аварийном режиме, $k_o = 0$, если $\bar{a} + \bar{b} + \bar{c} \geq 2$, иначе $k_o = 1$; k_d– коэффициент увеличения амплитуды фазных токов в аварийном режиме, $k_d = (d + \bar{d} \cdot 3/2)$; α – значение текущего двоичного кода цифрового сигнала с выхода датчика положения ротора или двоичный код цифрового сигнала, полученного в результате интегрирования сигнала с датчика скорости асинхронного двигателя; ξ– значение угла поворота первого вектора тока, рад; $(\pi/3 - \xi)$– значение угла поворота второго вектора тока, рад.

Алгоритм восстановления работоспособности АД с поворотом векторов тока на π радиан.

Формируются мгновенные значения фазных токов асинхронного двигателя для опережающей фазы вектора тока:

$$I_A = I_\omega \bar{a} k_o k_d sin((2^\sigma - 1 - \alpha)\bar{d} + \alpha d \pm \pi b);$$
$$I_B = I_\omega \bar{b} k_o k_d sin\big((2^\sigma - 1 - \alpha)\bar{d} + \alpha d \pm \pi c + 2\pi/3\big);$$
$$I_C = I_\omega \bar{c} k_o k_d sin\big((2^\sigma - 1 - \alpha)\bar{d} + \alpha d \pm \pi a + 4\pi/3\big);$$

или для отстающей фазы вектора тока:

$$I_A = I_\omega \bar{a} k_o k_d sin((2^\sigma - 1 - \alpha)\bar{d} + \alpha d \pm \pi c);$$
$$I_B = I_\omega \bar{b} k_o k_d sin\big((2^\sigma - 1 - \alpha)\bar{d} + \alpha d \pm \pi a + 2\pi/3\big);$$
$$I_C = I_\omega \bar{c} k_o k_d sin\big((2^\sigma - 1 - \alpha)\bar{d} + \alpha d \pm \pi b + 4\pi/3\big),$$

где d – значение бита, вычисляемого по логическому выражению: d = aUbUc (U- логическая операция "ИЛИ"), и если d = 1, то делают вывод об отказе в одной из фаз двигателя.

Алгоритм восстановления работоспособности АД с формированием несинусоидальных токов.

Восстановление работоспособности трехфазного АД возможно при выполнении условия равенства активной мощности P_3до и P_2 после появления n отказов в случае соответствующего увеличения токов в оставшихся фазах в k раз: $k=P_3/P_2$ для выполнения условия: $P_3=kP_2$, поэтому отказе в фазе «А», выражение (1) для коэффициента *k*:

$$k = \frac{P_2}{P_3} = \frac{I_{2\Sigma}}{I_{3\Sigma}} = \frac{\frac{3}{2}}{\bar{b}\sin\left(\alpha+\frac{2\pi}{3}\right)+\bar{c}\sin\left(\alpha+\frac{4\pi}{3}\right)}.$$

Несинусоидальные фазные токи в системе управления электроприводом формируются по выражениям:

$$I_b = \frac{\frac{3}{2}I_m\sin\left(\alpha+\frac{2\pi}{3}\right)}{\bar{b}\sin\left(\alpha+\frac{2\pi}{3}\right)+\bar{c}\sin\left(\alpha+\frac{4\pi}{3}\right)}; \quad I_c = \frac{\frac{3}{2}I_m\sin\left(\alpha+\frac{4\pi}{3}\right)}{\bar{b}\sin\left(\alpha+\frac{2\pi}{3}\right)+\bar{c}\sin\left(\alpha+\frac{4\pi}{3}\right)},$$

где I_m – значение амплитуды формируемых фазных токов I_A, I_B, I_C, А;

Алгоритм отказоустойчивого управления ЭПТ с АД и векторным управлением.

Вышеприведенные алгоритмы восстановления работоспособности применимы для систем управления со скалярным управлением и не могут быть применены непосредственно для систем ЭП с векторным управлением. Система векторного управления ЭПТ в неполнофазном режиме АД выполненного по схеме с развязанными фазами неработоспособна. Восстановление работоспособности может быть обеспечено путем добавления в систему векторного управления у координатного преобразователя тока, реализующего алгоритм восстановления в соответствии с битами отказов из матрицы отказов. Координатное преобразование для сдвига векторов тока на угол π/3 имеет вид для опережающей фазы вектора тока:

$$\begin{bmatrix} \bar{a}\cdot k_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b}\cdot k_d & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c}\cdot k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_c \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} cos(\pi/3\cdot c) & sin(\pi/3\cdot c) & 1 \\ cos(-2\pi/3-\pi/3\cdot a) & sin(-2\pi/3+\pi/3\cdot a) & 1 \\ cos(2\pi/3-\pi/3\cdot b) & sin(2\pi/3+\pi/3\cdot b) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_0 \end{bmatrix}$$

,

или для отстающей фазы вектора тока:

$$\begin{bmatrix} \bar{a}\cdot k_d & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b}\cdot k_d & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c}\cdot k_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_c \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} cos(-\pi/3\cdot c) & sin(-\pi/3\cdot c) & 1 \\ cos(-2\pi/3-\pi/3\cdot a) & sin(-2\pi/3-\pi/3\cdot a) & 1 \\ cos(2\pi/3-\pi/3\cdot b) & sin(2\pi/3-\pi/3\cdot b) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_0 \end{bmatrix}$$

Моделирование электропривода в неполнофазных аварийных режимах работы с использованием алгоритмов восстановления работоспособности.

Для моделирования был выбран двигатель АИР63А2.Оптимизация контуров производилась согласно методике, представленной в [2]. Расчет модели проводился в среде Matlab Simulink.

Наиболее неблагоприятным алгоритмом является алгоритм сдвига отстающей фазы со сдвигом векторов тока на угол π, при его использовании провал по частоте вращения является максимальным и составляет 78,91 % от номинального значения. Далее следуют алгоритмы с отстающей фазой тока π/3 с провалом по частоте вращения 21,71 %, с опережающей фазой на угол π – 19,65 %. Анализ рассмотренных алгоритмов восстановления позволяет сделать вывод, что к снижению провала по частоте вращения в момент аварии способствует уменьшение углового пути вращения вектора тока с π до π/3 радиан и выбор направления движения вектора тока навстречу движению ротора двигателя.

Алгоритмы отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном режиме трехфазного АД со скалярным управлением с несинусоидальными токами позволяет получить провал по частоте вращения 16,57 %.

Анализируя приведенные данные можно выделить алгоритмы, предпочтительные для использования. Так при использовании векторного управления и сдвига опережающей фазы на угол π/3 провал по частоте вращения и моменту отсутствует. Среди алгоритмов скалярного управления можно выделить алгоритм сдвига опережающей фазы на угол π/3, при использовании которого провал по частоте вращения отсутствует, а броски момента и тока минимальны.

Выводы:

1. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном режиме трехфазного асинхронного ЭПТ с частотно-токовым управлением с несинусоидальными токами и сдвигом векторов тока на углы π/3 и π радиан для опережающей и отстающей фаз векторов тока. Для алгоритмов отказоустойчивого частотно-токового управления наилучшие результаты получены для сдвига опережающей фазы π/3, провал частоты вращения в момент аварии составил5,69 %.

2. Разработаны алгоритмы отказоустойчивого управления в аварийном двухфазном режиме трехфазного асинхронного ЭПТ с векторным управлением и сдвигом векторов тока на углы π/3 радиан для опережающей и отстающей фазы векторов тока. Для алгоритма отказоустойчивого векторного управления получены наилучшие результаты для сдвига опережающей фазы π/3 – провал по частоте вращение в момент аварии отсутствует.

Список литературы:

1. Юферов, Ф.М. Электрические машины автоматических устройств / Ф.М. Юферов. – М.: Высшая школа, 1988. – 479 с.

2. Чернышев, А.Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие / А.Ю. Чернышев, Ю.Н. Дементьев, И.А. Чернышев; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 213 с.

3. Мальцева, О.П. Системы управления электроприводов: учебное пособие / О.П. Мальцева, Л.С. Удут, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского Политехнического университета, 2007. – 152 с.

4. Патент на изобретение №2326480 (RU), H02H 7/09, H02H 7/12. Способ управления и обеспечения живучести трёхфазного асинхронного двигателя / Г.И. Однокопылов, И.Г. Однокопылов, - № 2007112527; заявл. 04.04.2007 г.; опубл. 10.06.2008 г. Бюл. №16.

5. Патент РФ на изобретение № 2460190(RU), H02H 7/09, HO2H 7/12, H02H 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.

6. Однокопылов, Г.И. Отказоустойчивый многофазный асинхронный электропривод с несинусоидальными токами / Г.И. Однокопылов // Известия ТПУ. – Т. 322. – №4. – 2013. – С.151–154.

7. Однокопылов, Г.И. Векторное управление отказоустойчивым асинхронным электроприводом / Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2013. – № 2. – С. 327–330.