УДК 62-527: 621.3.078.3

И.А. РОЗАЕВ, 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

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДЛЯ ДВУХСЕКЦИОННОГО ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В электроприводах, входящих в состав опасных производственных объектов или объектов военной промышленности, целесообразно применение отказоустойчивого управления с обеспечением свойства живучести. Из теории живучести технических систем известно, что данным свойством обладают только избыточные системы, а избыточность в технических системах реализуется через формирование резерва. Одним из решений задачи обеспечения отказоустойчивости электропривода в случае отказов отдельных фаз двигателя является применение вентильно-индукторного двигателя (ВИД) выполненного на основе многосекционной электрической машины.

В этом случае необходимая избыточность формируется при комплексном использовании структурного резерва многосекционного двигателя и функционального резерва основанного на использовании возможности работы трехфазной секции на двух оставшихся работоспособных фазах. Необходимый запас по току обеспечивается нагрузочным резервом, что позволяет работать с номинальной нагрузкой при загруженности каждой секции на половину своей максимальной мощности [1].

Решение задачи обеспечения отказоустойчивого управления предполагает мониторинг в реальном времени технического состояния электропривода с выработкой соответствующих битов в матрице отказов в случае неполнофазной работы электропривода и последующего полного или частичного восстановления работоспособности с использованием алгоритма отказоустойчивого управления. Многосекционный двигатель выполняется на основе независимых m – фазных статорных обмоток, расположенных на одном валу электродвигателя.

Для обеспечения отказоустойчивости электропривода необходимо своевременно производить диагностику системы на основе анализа фазных токов. Для обеспечения функционирования отказоустойчивого алгоритма требуется, чтобы каждая *m*-фазная обмотка двухсекционного ВИД поочередно запитывалась однополярным импульсом тока. На основании сигна-

лов с датчиков токов формируются биты отказов раздельно для каждой секции *m*-фазного двухсекционного вентильно-индукторного электропривода (ВИП): $\bar{a}_{1i}, \bar{a}_{2i}, i=(X_1=A), (X_2=B), (X_3=C),\ldots,(X_m)$, по результатам анализа мгновенных значений амплитуды фазных токов секций электродвигателя, где X – индекс фазы. Соответственно для первой секции, если $\left| I_{1зi} - I_{1oci} \right| \geq \delta$, то выявляют отказ *i*-фазы первой секции, и на основании анализа формируется бит отказа имеющий значение логического нуля или единицы: $\bar{a}_{1i}=1$, $\alpha_{1i}=0$, что позволяет сформировать матрицу битов отказов для анализируемой секции. Аналогично для второй секции электродвигателя, если $\left| I_{2зi} - I_{2oci} \right| \geq \delta$, то выявляют отказ *i*-фазы второй секции: $\bar{a}_{2i} = 1$, $\alpha_{2i} = 0$. Здесь: $I_{1зi}$ – заданные значения мгновенной амплитуды формируемых фазных токов для *i*-фазы первой секции; $I_{2зi}$– заданные значения мгновенной амплитуды формируемых фазных токов для *i* - фазы второй секции; δ – допустимая ошибка работы регулятора тока [1,2]. На основании сформированных битов отказов формируется матрица отказов электропривода.

Матрица отказов двухсекционного ВИП в работоспособном состоянии имеет вид:

$$\alpha_{ni} = \begin{bmatrix} \bar{a} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{b} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{c} \\ \bar{d} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{e} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

α_{ni} – матрица битов отказов, a,b,c – биты отказов для фаз первой секции электродвигателя, d,e,f - биты отказов для фаз второй секции электродвигателя.

Соответственно матрица фазных токов двухсекционного ВИП в работоспособном состоянии имеет вид:

$$I_{ni} = \begin{bmatrix} I_{1A} \cdot \bar{\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & I_{1B} \cdot \bar{\beta} & 0 \\ 0 & 0 & I_{1C} \cdot \bar{c} \\ I_{2A} \cdot \bar{d} & 0 & 0 \\ 0 & I_{2B} \cdot \bar{e} & 0 \\ 0 & 0 & I_{2C} \cdot \bar{f} \end{bmatrix}.$$

Здесь I_{ni} – ток *i* – й фазы *n* – секции ВИД.

Исходя из конструктивных особенностей ВИП и учитывая, что с учетом приятых допущений принимаем момент на валу двигателя равным электромагнитному моменту [3]:

$$M_{ni} = \frac{\Delta M_{ni}}{\Delta \theta_r} = \frac{\partial L_{ni}(i_{ni},\theta_r)}{\partial \theta_r} \cdot \frac{\mathrm{i}^2 \mathrm{ni}}{2}, \quad (1)$$

где: M_{ni} – момент формируемый i-й фазой n-секции ВИД,

θ_r – угол поворота вала электродвигателя,

L_{ni} – индуктивность I – й фазы n–секции ВИД;

Тогда матрица моментов двухсекционного ВИП в работоспособном состоянии имеет вид:

$$M_{ni} = \begin{bmatrix} M_{1A} \cdot (I_{1A} \cdot \bar{\alpha}, \theta_r) & 0 & 0 \\ 0 & M_{1B} \cdot (I_{1B} \cdot \bar{\beta}, \theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & M_{1C} \cdot (I_{1C} \cdot \bar{c}, \theta_r) \\ M_{2A} \cdot (I_{2A} \cdot \bar{d}, \theta_r) & 0 & 0 \\ 0 & M_{2B} \cdot (I_{2B} \cdot \bar{e}, \theta_r) & 0 \\ 0 & 0 & M_{2C} \cdot (I_{2C} \cdot \bar{f}, \theta_r) \end{bmatrix}.$$

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

$$M_{\text{дв}} = \sum_{j=1}^{m} M_{nj}\left(i_{nj}, \theta_r\right). \quad (2)$$

Для двухсекционного ВИП в работоспособном состоянии момент двигателя будет определятся следующим выражением:

$$M_{\text{дв}} = M_{1A} \cdot (I_{1A} \cdot \bar{\alpha}, \theta_r) + M_{1B} \cdot (I_{1B} \cdot \bar{\beta}, \theta_r) + M_{1C} \cdot (I_{1C} \cdot \bar{c}, \theta_r) + \\ + M_{2A} \cdot (I_{2A} \cdot \bar{d}, \theta_r) + M_{2B} \cdot (I_{2B} \cdot \bar{e}, \theta_r) + M_{2C} \cdot (I_{2C} \cdot \bar{f}, \theta_r).$$

Тогда момент двигателя при отказе фазы А в 1-й секции примет вид:

$$M_{\text{дв}} = 0 + M_{1B} \cdot (I_{1B} \cdot \bar{\beta}, \theta_r) + M_{1C} \cdot (I_{1C} \cdot \bar{c}, \theta_r) + \\ + M_{2A} \cdot (I_{2A} \cdot \bar{d}, \theta_r) + M_{2B} \cdot (I_{2B} \cdot \bar{e}, \theta_r) + M_{2C} \cdot (I_{2C} \cdot \bar{f}, \theta_r).$$

Соответственно при отказах в других фазах и секциях матрица отказов будет меняться в соответствии с текущим состоянием ВИП. Двухсекционный трехфазный ВИП имеет 64 рабочих и аварийных состояний. Поэтому система управления электроприводом уже содержит в памяти управляющего контроллера все рабочие и аварийные состояния ВИП, что позволяет во время диагностики системы определить текущий номер состояния из таблицы и организовать запуск необходимого алгоритма отказоустойчивого управления для данного состояния ВИП, а также оценить текущий уровень избыточности ВИП и коэффициент его работоспособности. Работа

алгоритма отказоустойчивого управления основана на формировании задания на фазные токи секций в соответствии с данными полученными после мониторинга ВИП.

Алгоритм отказоустойчивого управления двухсекционным ВИП имеет вид:

$$\begin{cases} I_{1A} = I_\omega \cdot \bar{\alpha} \cdot (1+\bar{d}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{d}}} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right]; \\ I_{1B} = I_\omega \cdot \bar{\beta} \cdot (1+\bar{e}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{e}}} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right]; \\ I_{1C} = I_\omega \cdot \bar{c} \cdot (1+\bar{f}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{f}}} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right]; \\ I_{2A} = I_\omega \cdot \bar{d} \cdot (1+\bar{\alpha}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{\alpha}}} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right]; \\ I_{2B} = I_\omega \cdot \bar{e} \cdot (1+\bar{\beta}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{\beta}}} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right]; \\ I_{1C} = I_\omega \cdot \bar{f} \cdot (1+\bar{c}) \cdot \frac{2}{4^{\bar{c}}} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right]; \end{cases}$$

где – значение амплитуды формируемых фазных токов; $\theta_e = N_r \cdot \theta_r$- электрический угол ротора в радианах, N_r - число полюсов ротора, θ_r - механический угол положения ротора, $\phi(\theta_e,I)$ – значения формируемого угла, $\phi(t)$ – мгновенное значение угла с датчика положения ротора.

При аварийном состоянии ВИП формируются нулевые биты отказов соответствующих фаз секций электропривода, например, рассмотрим отказ фазы А в 1 секции, тогда $\alpha_{1i} = 0$, данная фаза блокируется и дальнейшего задания на фазный ток для нее не формируется, при этом для одноименной фазы второй секции задание на ток формируется удвоенным, тем самым исходя из (1 и 2) результирующий момент двигателя и частота вращения сохраняется на прежнем уровне. Это возможно при условии, что многосекционная машина изначально имеет запас по нагрузочному резерву при номинальной нагрузке.

При отказе фазы А первой секции, задание на фазные токи в соответствии с алгоритмом примут вид:

$$I_{1A} = I_\omega \cdot 0 \cdot (1+1) \cdot \frac{2}{4^1} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right] = 0;$$

$$I_{2A} = I_\omega \cdot 1 \cdot (1+0) \cdot \frac{2}{4^0} \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right] = I_\omega \cdot 2 \cdot \left[1 + sign\left(\varphi(\theta_e, I) - \varphi(t)\right)\right].$$

На основании предложенного алгоритма обеспечивается управление электроприводом при одиночных и множественных отказах без провалов

по моменту и частоте вращения. Из уравнения (2) следует, что выходной момент двигателя будет изменяться прямо пропорционально числу остающихся в работе фаз. Так для нормального рабочего состояния $M_{\text{дв}} = M_{\text{дв.ном}}$, а для состояния с отказом одной фазы одной секции:

$$M_{\text{дв}} = \left(1 - \frac{1}{6}\right) \cdot M_{\text{дв.ном}} \,. \tag{3}$$

При этом возможен расчёт коэффициента работоспособности, позволяющего оценивать для ВИП остаточный рабочий ресурс вплоть до полной потери работоспособности. Оценивается ущерб от одиночных или множественных отказов с помощью коэффициента работоспособности *k:*

$$k = \frac{s \cdot p}{2 \cdot m}, \tag{4}$$

,где *s* – коэффициент избыточности ЭПТ:

$$s = 2 \cdot m - w, \tag{5}$$

m – число фаз секции, *w* – число отказов ЭПТ, *p* – коэффициент уровня остаточного момента ЭПТ (в относительных единицах):

В случае неполного исчерпания остаточного ресурса преобразователя частоты и двигателя при выполнении условия $k \geq 2$ запускается процесс полного или частичного восстановления работоспособности ЭПТ, для структурной адаптации электропривода к воздействию электрических повреждений на основе сформованной необходимой избыточности электропривода с структурным и функциональным резервированием преобразователя частоты и дополнительной избыточностью нагрузочного резерва по мощности силовых цепей преобразователя частоты, информационного (процессорного) резерва управления и временного резерва в виде учета инерции маховых масс двигателя во время переключения структуры ЭПТ при вводе в работу резерва ЭПТ.

Коэффициент работоспособности системы электропривода позволяет оценить текущее состояние ВИП и рассчитать остаточный ресурс ВИП работы после одного или нескольких отказов.

Список литературы:

1. Розаев И.А. Моделирование вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах работы / И.А Розаев, Г.И. Однокопылов // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – №. 4. – С. 138–143.

2. Rozayev, I.A. Formation of failure matrix and failure-free control algorithm for multi-sectioned Switched-reluctance drive / I.A. Rozayev, G.I. Odnokopylov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 66 012035. – 2014.

3. Krishnan, R. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications / R. Krishnan. – BocaRaton: CRCPress, 2001.