

3. Алехин А. Е., Ляпушкин С. В. Лабораторный практикум по курсу «Системы управления электроприводами». ТПУ. — Томск: Изд-во ТПУ, 2004. — с. 98.
4. Л. С. Удут, О. П. Мальцева, Н. В. Кояин. Проектирование автоматизированных тиристорных электроприводов постоянного тока: учебное пособие по курсовому проектированию. ТПУ. — Томск: Изд-во ТПИ, 1991. — с. 104.

Научный руководитель: С.В. Ляпушкин, ст. преподаватель каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННОГО И ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев, А.Д. Брагин, Е.П. Сенькив  
Томский политехнический университет  
ЭНИН, ЭПЭО

Из теории построения технических систем следует, что свойством живучести присуще только для избыточных систем, а избыточность в технических системах реализуется через резервирование [1]. Для современного электропривода построенного на основе микропроцессорных и микроконтроллерных средств отдельные виды резервирования уже заложены в структуру электропривода и могут быть применены при активизации алгоритма восстановления работоспособности электропривода при выявленных в результате программного мониторинга отказов в реальном времени. Для трехфазного асинхронного электропривода выполненного по схеме со связанными фазами (с зависимым протеканием фазных токов) при отказе в одной из фаз реализация отказоустойчивого управления предполагает выполнение условия по восстановлению кругового вращающегося поля и переключению структуры электропривода по схеме токового питания с независимым протеканием фазных токов в двух оставшихся фазах двигателя. Круговое вращающееся магнитное поле для двухфазного режима трехфазного асинхронного электропривода с произвольно сдвинутыми в пространстве двумя обмотками возможно при условии:

$$\begin{aligned} \delta + \beta &= \pi; \\ F_{AM} &= F_{CM}, \quad (1) \end{aligned}$$

где:  $F_{AM}$ ,  $F_{CM}$  — амплитуды магнитодвижущих сил;  $\delta$  — пространственный угол сдвига обмоток,  $\delta = 2\pi/3$ ;  $\beta$  — временной угол сдвига токов в обмотках,  $\beta = \pi/3$ . Наличие регуляторов тока в системе управления электропривода обеспечивает:  $F_{AM} = F_{CM}$ . [2,4]

Выполнение условия (1) предполагает активизацию алгоритма восстановления с изменением фазового сдвига векторов токов в двух оставшихся фазах на угол  $\pi/3$  с сохранением равенства амплитудных значений токов. В этом случае поле после аварии из пульсирующего становится круговым и при увеличе-

нии амплитуды токов на 50% происходит восстановление работоспособности электропривода. Следует отметить, что выполнение условия (1) кроме самого факта формирования кругового вращающегося поля позволяет реализовать функциональный резерв, то есть сформировать необходимую избыточность для реализации отказоустойчивого управления. На рис. 1 (а, б) приведены временные диаграммы результатов моделирования аварийного отключения фазы АД при векторном и скалярном управлении, показан процесс формирования интервала времени переключения структуры электропривода –  $T_{II}$  по равенству фазовых сдвигов векторов тока на угол  $\pi/3$ .

Из сравнения диаграмм можно видеть, что после аварийного отключения фазы двигателя в интервале времени  $T_{II}$  – времени переключения структуры ЭП определяемого от  $t_1$  – момента времени выявленного отказа до  $t_2$  – момента времени восстановления кругового вращающегося поля для случаев векторного и скалярного управления различается и составляет не более 4,6 мс для случая векторного управления и 8,2 мс для скалярного управления.

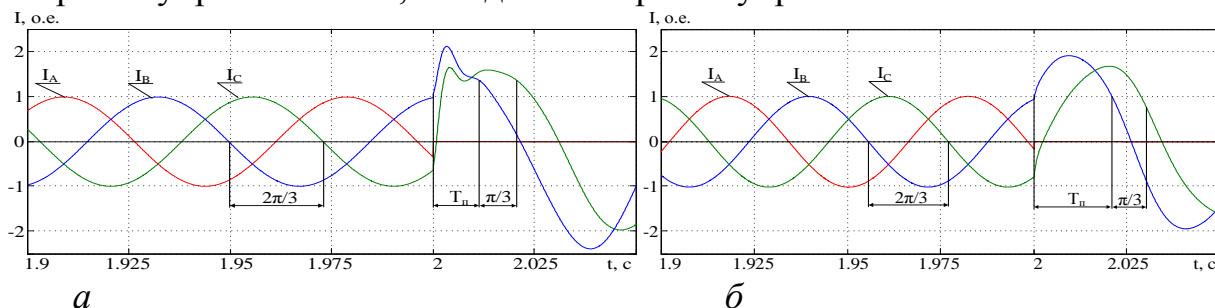


Рис. 1. Временные диаграммы переходных процессов АД при аварийном отключении фазы для векторного - а и скалярного - б управления.

Окончание процесса переключения структуры электропривода может быть определено по условию смещения векторов магнитодвижущих сил, формируемых фазными токами, с величины  $2\pi/3$  в трехфазном режиме до величины  $\pi/3$  в двухфазном режиме [2,3,5].

Вентильно-индукторный электропривод отличается от асинхронного тем, что токовое питание фаз происходит независимо и характера тока, протекающего в обмотках является униполярным в отличие от биполярного питания асинхронного электропривода. Поэтому при аварийном пропадании питания в одной из фаз двигателя происходит падение активной мощности на 1/3, но за счет организации однополярного питания фаз работа других фаз не связана. Это определяет исходную отказоустойчивость односекционного 3-фазного вентильно-индукторного двигателя в аварийном в 2-фазном режиме и позволяет обеспечить живучесть электропривода с ограничением момента на уровне 2/3 от номинального при отказах ПЧ или обрыве обмотки статора. Наличие исходной отказоустойчивости определяет односекционный вентильно-индукторный электропривод как избыточную техническую систему [6].

В асинхронном электроприводе для формирования избыточности необходимы дополнительные аппаратные затраты такие как подключение средней точки источника питания к нулевому проводу асинхронного двигателя. Кроме того, для блокирования отказа типа "невывключение ключа" преобразователя частоты необходимы защитные элементы отключающие соответствующий по-

лустность преобразователя частоты от источника питания. В вентильно-индукторном электроприводе защитные элементы не нужны, так как полумостовой элемент преобразователя частоты уже содержит два последовательно включенных ключа, и операция блокирования отказа может быть обеспечена снятием управляющих напряжений с отказавшей стойки полумоста [5,8].

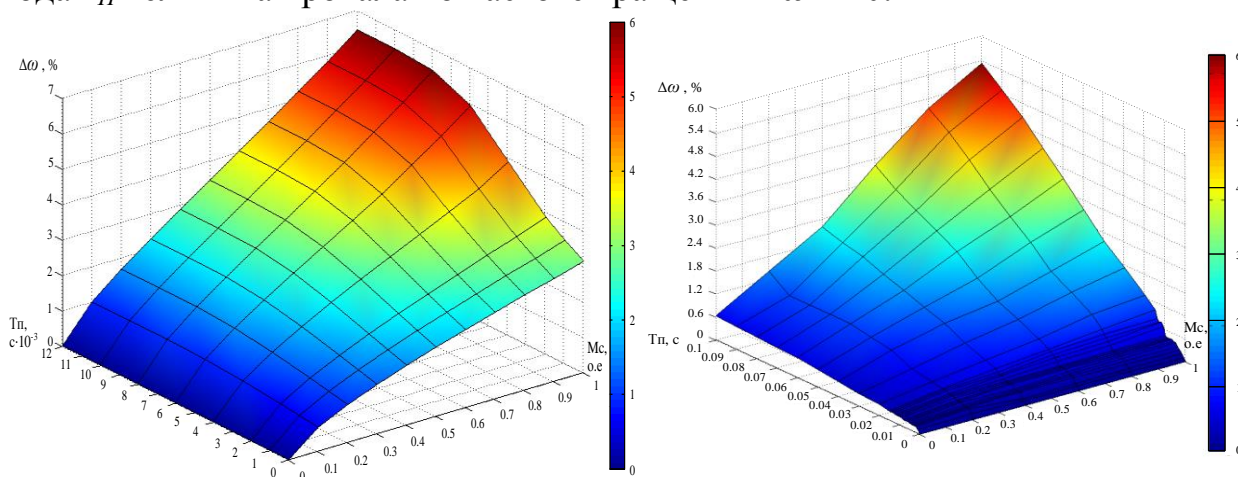
В результате различаются процессы переключения структуры вентильно-индукторного и асинхронного электроприводов за время  $T_{II}$ . Для асинхронного электропривода это время неуправляемого интервала времени протекания процессов структурной адаптации силовых цепей преобразователя частоты к последствиям отказов, который может быть частично уменьшен за счет эффективной работы алгоритма восстановления работоспособности, но не устранен полностью, так как процессы обмена энергией в системе статор-ротор не могут быть сокращены. Для вентильно-индукторного электропривода  $T_{II}$  – это интервал времени, определяемый временем реакции системы управления по перераспределению электромагнитной мощности за счет изменения угла перекрытия фаз или увеличения тока в соседней фазе - время переходного процесса практически определяемого только длительностью электромагнитной постоянной фазной обмотки двигателя [7].

Величина провала частоты вращения электропривода  $\Delta\omega$  в течении времени переключения структуры  $T_{II}$  может быть определена:

$$\Delta\omega = \frac{(\omega_{ТП} - \omega_{отк})}{\omega_{отк}}, \quad (2)$$

где:  $\omega_{отк}$  – установившиеся значения частоты вращения в момент за,  $\omega_{ТП}$  – мгновенные максимальные (минимальные) значения частоты вращения в течение времени  $T_n$  от момента отказа,

На рис. 2а (слева) приведены зависимости провала частоты вращения  $\Delta\omega(M_c, T_{II})$  от величины нагрузки  $M_c$  и времени переключения структуры электропривода  $T_{II}$  для асинхронного электропривода позволяющие оценить величину  $\Delta\omega$  при аварийном отключении одной из фаз двигателя в процессе алгоритмического восстановления работоспособности. Из рис. 2 видно, что провал по частоте вращения, при номинальной нагрузке, для асинхронного электропривода при значении  $\Delta\omega = 6,5\%$  достигается за время  $T_{II} = 0,012\text{с}$ . При снижении нагрузки или сокращении времени переключения структуры электропривода  $T_{II}$  величина провала по частоте вращения  $\Delta\omega \rightarrow 0$ .



а

б

Рис. 2. Зависимости  $\Delta\omega$  от величины нагрузки  $M_c$ , времени переключения структуры асинхронного электропривода (слева), и вентильно-индукторного электропривода (справа)

На рис. 2б (справа) приведена зависимость  $\Delta\omega$  (в %) от величины нагрузки  $M_c$  в относительных единицах относительно величины номинальной нагрузки (о.е.), времени переключения структуры электропривода  $T_{II}$  (с) для двухсекционного вентильно-индукторного электропривода. Приведенные на рис. 2 (б) зависимости провала частоты вращения  $\Delta\omega(M_c, T_{II})$  от величины нагрузки  $M_c$  и времени переключения структуры электропривода  $T_{II}$  для вентильно-индукторного электропривода, позволяют оценить величину  $\Delta\omega$  при аварийном отключении одной из фаз двигателя в процессе алгоритмического восстановления работоспособности. Как следует из рис. 3 максимальное значение провала частоты вращения  $\Delta\omega = 5.72\%$  возникнет при номинальной нагрузке с временем переключения структуры электропривода  $T_{II} = 0.1$  с, что во много раз превышает период дискретизации ШИМ. Следовательно, при обеспечении мониторинга работы для вентильно-индукторного электропривода с частотой коммутации преобразовательной ячейки провал в частоте вращения  $\Delta\omega$  составляет менее 1%

Из сравнения зависимости  $\Delta\omega(M_c, T_{II})$  от величины нагрузки  $M_c$  и времени переключения структуры электропривода  $T_{II}$  для асинхронного электропривода рис. 2 и зависимости  $\Delta\omega(M_c, T_{II})$  для вентильно-индукторного электропривода видно, что провал по частоте вращения, при номинальной нагрузке, для вентильно-индукторного электропривода при значении  $\Delta\omega = 5...6\%$  достигается за время  $T_{II} = 0,1$ с. т.е за время на порядок большее чем для асинхронного электропривода ( $T_{II} = 0,01$ с), или практически на порядок меньший провал  $\Delta\omega$  за одинаковое время переключения структуры ЭП  $T_{II}$  при номинальной нагрузке.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Стекольников Ю.И. Живучесть систем. -СПб.:Политехника, 2002. - 155с.
2. Г.И. Однокопылов, К.В/ Образцов, И.Г. Однокопылов Принципы обеспечения «живучести» электроприводов переменного тока. /Электричество. – 2009, №12, с. 51-57.
3. И.Г. Однокопылов, Г.И. Однокопылов, Ю.Н. Дементьев, К.В. Образцов, Й. Центнер. Живучесть асинхронных электроприводов вращательного и поступательного движения// Электричество, 2012, №6, с. 46-51.
4. Г.И. Однокопылов, В.Г. Букреев. Восстановление работоспособности трехфазных электроприводов переменного тока при аварии в одной из фаз.// Ползуновский Вестник, 2012, № 3/2, с.121-130.
5. Г.И. Однокопылов, А.Д. Брагин. Алгоритмы отказоустойчивого управления асинхронным электроприводом в неполнофазных режимах работы// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2014, №4, С.188-191.

6. Г.И. Однокопылов, И.А. Розаев. Восстановление работоспособности
7. вентильно-индукторного электропривода в аварийных режимах// Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2014, №4, С.181-184.
8. 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
9. Odnokopylov G.I., Bragin A.D. Fault tolerant vector control of induction motor drive (Article number 012015) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2014 - Vol. 66 - №. 1. - p. 1-6

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

## **ПРИМЕНЕНИЕ КОЛЕБАТЕЛЬНО-ВРАЩАТЕЛЬНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ В ВИБРОПРИВОДЕ**

И.А. Розаев, Л.А. Паюк, Н.А. Воронина  
Томский политехнический университет  
ЭНИН ЭПЭО

В современной промышленности многие процессы изготовления, как готовой продукции, так и отдельных узлов электротехнического оборудования сопровождается промежуточным контролем качества изделий.

Самым распространенным методом контроля различного оборудования является вибродиагностика [6]. При использовании различных методов контроля можно выявить и оценить наличие дефектов контролируемых изделий [2]. Области применения вибрационного метода: контроль и мониторинг вращающегося оборудования; тестовая диагностика и центровка машин; балансировка машин на месте эксплуатации; диагностика подшипников качения, механических передач.

К вибрационной технике предъявляется ряд требований, которые необходимо выполнять неукоснительно, а именно: амплитуда колебаний, их частота, точность и т.д. [3,4]. При формировании колебаний вибродиагностической платформы можно воспользоваться генератором колебаний на базе МДП, который работает в колебательно-вращательном режиме. Особенностью реализации данного режима является то, что обмотки статора запитываются токами одной частоты, а обмотки ротора – токами разных частот [3].

В данной работе предложен способ формирования колебательно-вращательного режима работы на примере МДП (рис. 1) при различных включениях магнитных полей и проведен анализ влияния параметров нагрузки на динамические показатели исполнительного двигателя. Как известно, МДП универсальна и имеет высокие энергетические характеристики [1, 5].