

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дьяконов В.П. Вейвлеты от теории к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002.
2. Воробьев В.И. Теория и практика вейвлет-преобразования/Под ред. В.Г. Грибунина.— СПб: Вус, 1999.
3. Глазырин А.С., Ланграф С.В. Идентификация скорости и момента асинхронного двигателя с применением фильтра Калмана. — Электричество, 2009, № 12.
4. Ланграф С.В., Глазырин А.С., Афанасьев К.С. Применение наблюдателя Люенбергера для синтеза векторных бездатчиковых асинхронных электроприводов. — Изв. вузов. Электромеханика, 2011, № 6.
5. Ткачук Р.Ю., Глазырин А.С., Полищук В.И. и др. Нейросетевая идентификация и диагностика электрических машин в условиях сильных импульсных помех. — Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока, 2011, № 2.

Авторы: Тимошкин Вадим Владимирович окончил магистратуру ТПУ в 2010 г. по специальности «Электроприводы и системы управления электроприводов». Аспирант кафедры «Электропривод и электрооборудование» ТПУ.

* * *

Живучесть асинхронных электроприводов вращательного и поступательного движения

ОДНОКОПЫЛОВ И.Г., ОДНОКОПЫЛОВ Г.И., ЦЕНТНЕР Й.,
ДЕМЕНТЬЕВ Ю.Н., ОБРАЗЦОВ К.В.

Дан краткий обзор известных методов обеспечения живучести. На основе анализа скрытых резервов системы привода предложен новый принцип построения электропривода со свойством живучести, представлены необходимые требования, предъявляемые к двигателю и преобразователю, разработаны алгоритмы управления асинхронным линейным приводом в аварийном режиме, предложены технические решения по реализации. Проанализированы характеристики привода и показана возможность восстановления работоспособности в аварийном режиме работы. Даны рекомендации по проектированию асинхронных двигателей с обеспечением свойства живучести, определены направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: асинхронный электропривод, способы обеспечения живучести, отказы в работе электропривода

Электропривод переменного тока на базе асинхронных двигателей является основой построения множества технических систем вращательного и поступательного принципа действия. Прекращение функционирования таких систем может привести к нарушению безопасной эксплуатации оборудования с риском для персонала (лифты, электрические краны), а также большим экономическим потерям при авариях на необслуживаемых объектах

Глазырина Татьяна Анатольевна окончила ТПУ в 2005 г. по специальности «Электрические машины». Ассистент кафедры «Электрические сети и электротехника» ТПУ.

Полищук Владимир Иосифович окончил Павлодарский индустриальный институт в 1990 г. по специальности «Электрические станции». Защитил кандидатскую диссертацию «Развитие теории построения защит ротора синхронного генератора от витковых замыканий» в 2007 г. в Омском государственном техническом университете. Заведующий кафедрой «Электрические сети и электротехника» ТПУ.

Глазырин Александр Савельевич окончил ТПУ в 2000 г. по специальности «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов». В 2004 г. в ТПУ защитил кандидатскую диссертацию «Системы питания и автоматического управления вибрационными электромагнитными активаторами». Доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование» ТПУ.

The short review of known methods of the fault-tolerant function realization is presented. Based on the analysis of available resources of the drive system a novel drive control principle implementing fault-tolerant function, is proposed. New induction drive control algorithms is developed and engineering solutions for the implementation are proposed. The drive characteristics analysis is carried out and the ability to recover the functionality in the emergency case is shown. The guidelines for design of induction drives with fault-tolerant concept as well as the directions of further studies are presented.

Key words: induction drive, methods of fault-tolerance providing, fault of electric drive

эксплуатации с безостановочным циклом работы в течение продолжительного времени. Свойство живучести технической системы соответствует в английском языке термину fault-tolerance, которое может классифицироваться следующим образом [1]: fail-silent — свойство объекта при отказе одного или нескольких компонентов работы отключиться и оставаться пассивным, тем самым не препятствовать работе соседних систем;

fail-safe – свойство объекта при отказе одного или нескольких компонентов достичь безопасного состояния для окружающей среды путем неких действий за счет внутренних или внешних ресурсов;

fail-operational – свойство объекта при отказе одного или нескольких компонентов восстановить работу полностью или частично за счет внутренних или внешних ресурсов.

В статье рассмотрена возможность частичного или полного восстановления работоспособности асинхронного электропривода (АЭП) при отказах различных компонентов применительно к линейным (ЛАД) и вращающимся асинхронным двигателям (АД).

Противостоять отказам электропривода можно, очевидно, без дополнительных ресурсов и с их помощью (рис. 1).

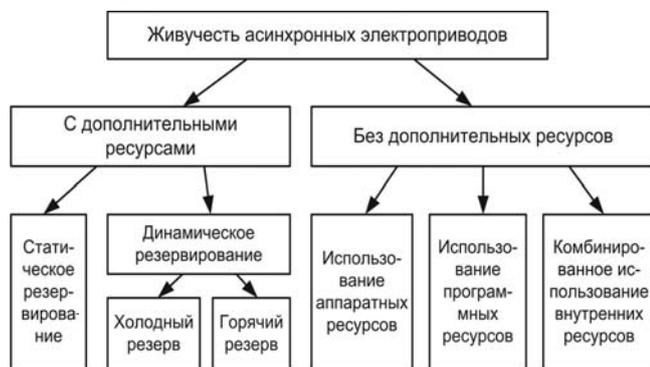


Рис. 1. Методы обеспечения живучести асинхронных электроприводов

С помощью дополнительных ресурсов может быть реализовано резервирование, которое подразделяется на статическое и динамическое [1]. При статическом резервировании используется, как правило, три и более компонентов, на входы которых поступает один и тот же сигнал. В результате на выходе принимается решение о том, какой сигнал является верным. Статический резерв особенно актуален в измерительных системах.

Динамический резерв подразделяется на холодный (cold standby) и горячий (hot standby). В первом случае резервный привод находится в готовности и при аварии основного привода полностью принимает его функции. Такое решение отличается высокой степенью надёжности, но связано как минимум с удвоением стоимости системы привода. Все чаще холодный резерв используют для резервирования некоторых компонентов, а не всего привода. Например, для трехфазных двигателей используют четвертое плечо преобразователя [2]. В случае отказа транзистора в трехфазном инверторе выводят из эксплуатации не весь инвертор, а конкретную ячейку и вводят четвертую ячейку, нахо-

дящуюся в холодном резерве. При горячем резервировании работают оба привода, но с не полной нагрузкой. При аварийном отказе одного из приводов или некоторых фаз привода другой берет часть нагрузки на себя [3].

Большой интерес вызывает класс электроприводов, которые достигают свойства живучести не за счет дополнительных, а с помощью внутренних ресурсов. Можно использовать избыточность аппаратной или программной частей электропривода либо их комбинацию для достижения живучести.

Наиболее ярким примером аппаратной избыточности являются многофазные электроприводы. В [4] показано преимущество использования 5- или 7-фазных АД в электроприводе с векторным управлением, так как при большом числе фаз обеспечивается дополнительная степень свободы. Требуемая комбинация токов для обеспечения той же вращающейся МДС после обрыва фазы не становится уникальной (т.е. возможно несколько вариантов). При обрыве одной фазы и соответствующем управлении не будет обязательным наличие нулевой последовательности токов в отличие от трехфазного АД. Поэтому можно исключить провод соединения с нейтралью и обеспечить работу АД с гладким, без пульсаций, моментом алгоритмическим путем в программе микроконтроллера. Существует множество разработок 6-фазных электроприводов [5], в которых за счет управления токами в оставшихся неповрежденных фазах уменьшают пульсации момента. Однако стоимость специальных многофазных электроприводов за счет проектирования и внедрения может превысить стоимость динамического резерва, в котором можно использовать два серийно выпускаемых электропривода.

Существует также эффективный способ восстановления работоспособности асинхронного электропривода путем его перевода в нерегулируемый режим трехфазного питания от промышленной сети [6].

Избыточность программных ресурсов может быть заложена в управляющем микроконтроллере преобразователя. Известен асинхронный электропривод, в котором неисправность, возникшая из-за обрыва фазы, устраняется алгоритмическим путем. В электроприводе [7] достигается снижение пульсаций момента за счет алгоритма введения гармоник напряжения для нейтрализации второй и высших гармоник пульсаций момента и сдвига частот в более высокий диапазон спектра. Это позволяет компенсировать пульсации за счет момента инерции асинхронного электродвигателя и обеспечить приемлемую работу с регулированием частоты.

При комбинированном способе обеспечения живучести необходимо заложить в электропривод аппаратную и программную избыточность. Например, известны способы обеспечения живучести при отказе одной из преобразовательных ячеек трехфазного электропривода [8], которые, однако, могут быть применены только в тех случаях, когда выходит из строя преобразователь, а не двигатель.

Существует множество классификаций отказов электроприводов: электрической и механической части, двигателя и преобразователя и т.д. Но большинство отказов трехфазного электропривода переменного тока можно привести к отказу типа «обрыв фазы». К нему будут относиться такие отказы, как физический обрыв фазы, межвитковое замыкание одной фазы, выход из строя силового транзистора или диода и т.д., т.е. трехфазный электропривод сводится к двухфазному и одна фаза считается отказавшей. Обеспечение живучести АД при таких типах отказов является актуальной проблемой и будет предметом рассмотрения в данной статье.

Предложен новый подход повышения живучести АЭП за счет микроконтроллерного управления с реализацией алгоритма восстановления работоспособности в аварийной ситуации (в двухфазном режиме). Известны условия существования кругового вращающегося магнитного поля в двухфазном режиме трехфазной электрической машины с двумя произвольно сдвинутыми в пространстве обмотками: $d + b = p$; $F_{BМ} = F_{СМ}$, где $F_{BМ}$, $F_{СМ}$ – амплитудные значения МДС (отказ в фазе A); d – угол пространственного сдвига обмоток, $d = 2p/3$; b – угол временного сдвига токов обмоток, $b = p/3$. При наличии регуляторов тока в системе управления АД $F_{BМ} = F_{СМ}$ [9]. Реализация предложенного алгоритма восстановления подробно рассмотрена в [10]. В данной статье предложено математическое моделирование АД поступательного и вращательного движения, а также применение для них свойства живучести на основе разработанного алгоритма восстановления.

При составлении уравнений и рассмотрении переходных процессов АД будем использовать общепринятые допущения [11], связанные с понятием «идеализированная машина»: машина не насыщена, потерями в стали пренебрегаем; фазные обмотки симметричны и сдвинуты на угол 120° ; МДС обмоток и магнитные поля распределены синусоидально по окружности воздушного зазора; воздушный зазор равномерен; ротор симметричен; питающая сеть бесконечно большой мощности. Реальная распределенная обмотка заменяется сосредоточенной, оси фаз которой сдвинуты на фазный угол, а МДС ее равна МДС реальной обмотки.

Полная система уравнений переходного процесса АД должна включать дифференциальные уравнения напряжений обмоток и уравнение движения вращающихся частей машины. При промышленной частоте 50 Гц обмотки машины рассматриваются как электрические цепи с сосредоточенными параметрами, так как при этом длина электромагнитной волны много больше линейных размеров обмоток [11].

Для моделирования АЭП воспользуемся трехфазной неподвижной (связанной с обмотками статора) системой координат a, b, c . Ее использование позволит избавиться от периодических коэффициентов – индуктивностей, которые меняются во времени при движении вторичного элемента. Трехфазная система координат позволит в отличие от двухфазной имитировать необходимый аварийный режим – обрыв фазы двигателя.

Система дифференциальных уравнений мгновенных фазных напряжений обмоток статора и ротора для вращающегося АД [12]:

$$\begin{aligned} U_A &= R_s i_A + \frac{dY_A}{dt}; \\ U_B &= R_s i_B + \frac{dY_B}{dt}; \\ U_C &= R_s i_C + \frac{dY_C}{dt}; \\ 0 &= R_r i_a + \frac{dY_a}{dt} + (Y_b - Y_c)w/\sqrt{3}; \\ 0 &= R_r i_b + \frac{dY_b}{dt} + (Y_c - Y_a)w/\sqrt{3}; \\ 0 &= R_r i_c + \frac{dY_c}{dt} + (Y_a - Y_b)w/\sqrt{3}, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_A, U_B, U_C – напряжения фаз статора; $i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c$ – токи фаз статора и ротора; R_s, R_r – сопротивления фаз статора и ротора; w – частота вращения вала двигателя; $Y_A, Y_B, Y_C, Y_a, Y_b, Y_c$ – результирующие потокосцепления.

Электромагнитный момент M для трехфазной системы координат содержит все возможные пары произведений токов двигателя:

$$M = p \frac{\sqrt{3}}{2} L_m [i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a)], \quad (2)$$

где p – число пар полюсов АД; L_m – взаимная индуктивность.

Уравнение движения электропривода:

$$\frac{J}{p} \frac{dw}{dt} = M - M_c, \quad (3)$$

где M_c – момент нагрузки на валу двигателя; J – момент инерции.

Система дифференциальных уравнений мгновенных фазных напряжений обмоток индуктора и вторичного элемента для линейного АД:

$$\begin{aligned}
 U_A &= R_s i_A + \frac{dY_A}{dt}; \\
 U_B &= R_s i_B + \frac{dY_B}{dt}; \\
 U_C &= R_s i_C + \frac{dY_C}{dt}; \\
 0 &= R_r i_a + \frac{dY_a}{dt} + (Y_b - Y_c) \frac{V_p}{tp\sqrt{3}}; \\
 0 &= R_r i_b + \frac{dY_b}{dt} + (Y_c - Y_a) \frac{V_p}{tp\sqrt{3}}; \\
 0 &= R_r i_c + \frac{dY_c}{dt} + (Y_a - Y_b) \frac{V_p}{tp\sqrt{3}},
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

где V – линейная скорость вторичного элемента; t – полюсное деление линейного АД.

Потокоцепления аналогичны выражениям (4). Электромагнитная сила для ЛАД

$$F = \frac{\sqrt{3}pM}{2t} [i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b] - (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a).
 \tag{5}$$

Уравнение движения линейного асинхронного электропривода:

$$m \frac{dV}{dt} = F - F_c,
 \tag{6}$$

где F_c – сила нагрузки; m – масса движущейся части.

Для решения систем дифференциальных уравнений был использован численный метод Рунге–Кутты 4-го порядка. Из (1) и (4) при заданных начальных условиях найдем токи во всех фазах и с помощью (2) и (5) определим электромагнитный момент АД или электромагнитную силу ЛАД. Угловую и линейную скорости найдем из (3) и (6).

Моделирование проведем для двух АД. Параметры схемы замещения линейного АД [13]:

$U_H, В$	$f, Гц$	$R_s, Ом$	$R_r, Ом$	$L_s, Гн$		
220	50	0,0705	0,1311	0,0048		
$L_r, Гн$	$L_m, Гн$	p	$m, кг$	$t, м$	$F_H, Н$	
0,0048	0,0039	10	351,3	0,2	800	

Параметры схемы замещения вращающегося АД МТФ 311-6:

$U_H, В$	$f, Гц$	$R_s, Ом$	$R_r, Ом$	$L_s, Гн$		
220	50	0,4902	0,4991	0,05855		
$L_r, Гн$	$L_m, Гн$	p	$J, кгм^2$	$M_H, Нм$		
0,05932	0,05679	3	0,225	111		

На рис. 2 и 3 представлены механические характеристики линейного и вращающегося АД: трехфазный режим (кривая 1), двухфазный режим с алгоритмом восстановления (2) и двухфазный режим без алгоритма восстановления (3).

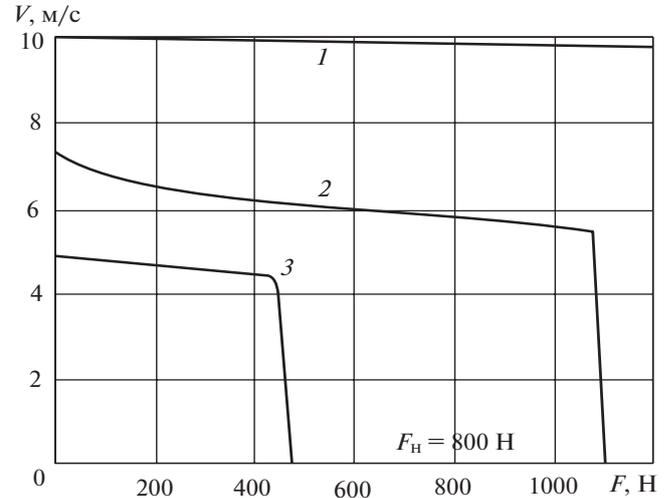


Рис. 2. Механические характеристики вращающегося АД

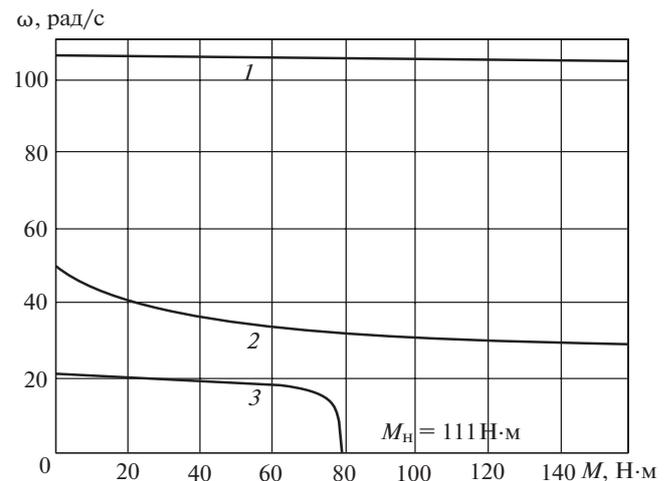


Рис. 3. Механические характеристики линейного АД

Проанализировав полученные характеристики, можно сделать вывод, что АД в аварийной ситуации при обрыве фазы способен работать при тех же номинальных токах, но в области малых нагрузок и при скорости от 20 до 50% номинальной. При номинальной нагрузке двигатель «опрокидывается». Использование предложенного алгоритма позволяет продолжить работу в области номинальной нагрузки на пониженной скорости.

На рис. 4–6 представлены динамические характеристики АД при переходе из трехфазного режима работы в аварийный двухфазный. Моделирование проводилось при реактивной номинальной нагрузке на двигатель, поэтому при обрыве фазы без активизации алгоритма восстановления скорость падает до нуля (рис. 4).

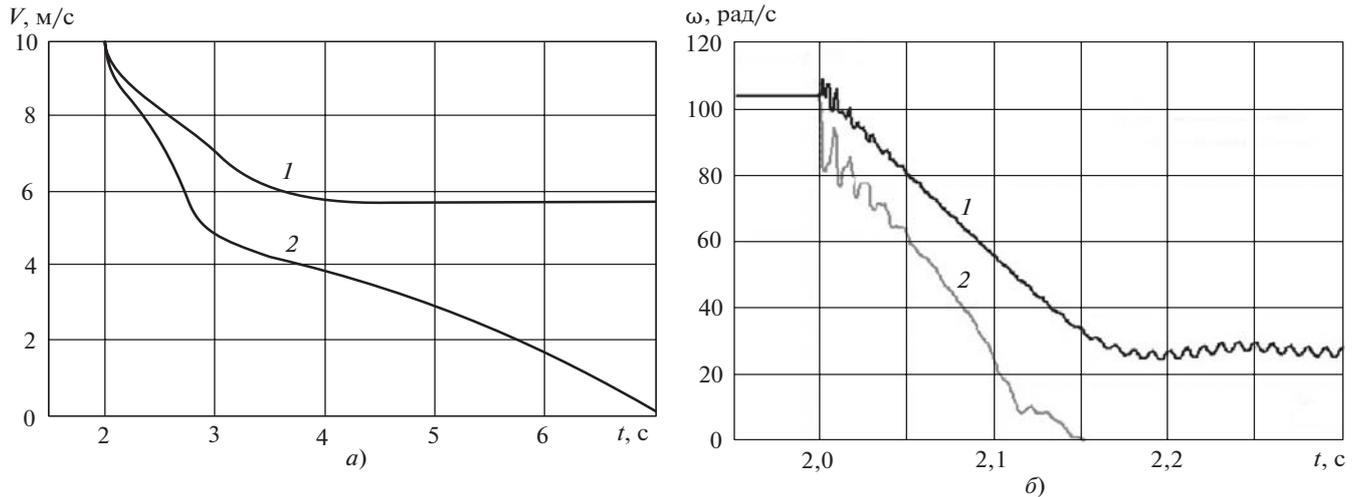


Рис. 4. Зависимость скорости АД от времени при переходе из трехфазного режима работы в аварийный двухфазный: *a* – линейная скорость V для ЛАД; *б* – скорость вращения ω АД; 1 – с алгоритмом; 2 – без алгоритма

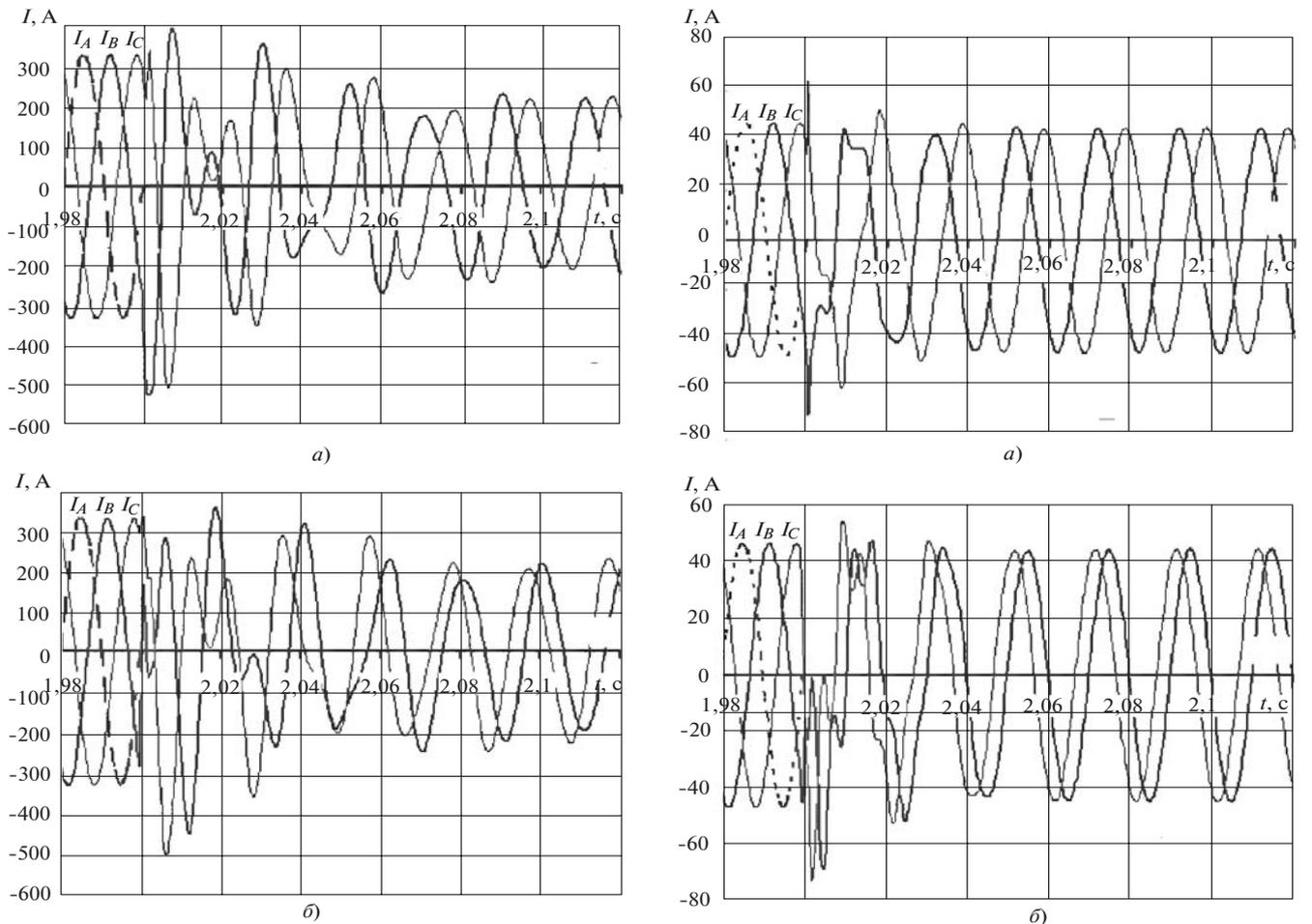


Рис. 5. Зависимости трехфазного тока индуктора ЛАД от времени при переходе из трехфазного режима работы в аварийный двухфазный: *a* – неконтролируемый; *б* – с активизированным алгоритмом восстановления

Рис. 6. Зависимости трехфазного тока статора вращающегося АД от времени при переходе из трехфазного режима работы в аварийный двухфазный: *a* – неконтролируемый; *б* – с активизированным алгоритмом восстановления

При активизации алгоритма восстановления скорость падает до установившегося значения и двигатель продолжает работу. При этом активизация алгоритма восстановления обеспечивает скорость у ЛАД до уровня около 50 % номинального

значения (рис. 4,*a*), в то время как у вращающегося АД – около 30 % (рис. 4,*б*). Это объясняется влиянием числа пар полюсов на скорость асинхронного двигателя в двухфазном режиме.

На рис. 5,а и 6,а представлены токи статора АД при обрыве фазы. Происходит неконтролируемая аварийная ситуация. При активизации алгоритма восстановления (рис. 5,б и 6,б) происходит перестроение токов статора согласно алгоритму. Большое влияние на перестроение будет оказывать время диагностики — с момента возникновения аварийной ситуации до момента активизации алгоритма восстановления. Это время должно быть минимизировано.

Выводы. 1. В случае отказа одной из фаз разработанный алгоритм позволяет обеспечить скорость двигателя до 50% номинального значения без дополнительных аппаратных затрат.

2. Время диагностики аварийной ситуации и время переключения системы управления на новый алгоритм не должно превышать периода широтно-импульсной модуляции и электромагнитной постоянной времени.

3. Полный диапазон скоростей может быть получен, если электрический привод эксплуатировать в трехфазном режиме на скорости ниже номинальной или проектировать новый привод с возможностью повышения напряжения и частоты выше номинальных значений.

4. Дальнейшие исследования будут направлены на улучшение аппаратного и программного обеспечения (системы управления), а также на разработку планарного АД со свойством живучести.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Isermann R.** Fault-Diagnosis Systems. — Springer-Verlag, 2005.
2. **Bolognani S., Zordan M., Zigliotto M.** Experimental Fault-Tolerant Control of a PMSM Drive. — IEEE Transactions on Industrial Electronics, October 2000, vol. 47, No. 5.
3. **Jingwei Zhu.** Nesimi Ertugrul and Wen Liang Soong, Performance Investigation of a Fault-Tolerant Brushless Permanent Magnet AC Motor Drive. — Power Electronics and Motion Control Conf. (PEMC 2006), CES/IEEE 5th International.
4. **Fu Jen-Ren, Lipo T.A.** Disturbance-free operation of a multiphase current-regulated motor drive with an opened phase. — IEEE Trans. Ind. Appl., 1994, vol. 30, № 5.

5. **Wenxiang Zhao, Ming Cheng, Wei Hua and Hongyun Jia.** A Redundant Flux-Switching Permanent Magnet Motor Drive for Fault-Tolerant Applications. — IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), Harbin (China), 3–5 September 2008.

6. **Chia-Chou Yeh, Nabeel A.O. Demerdash.** Fault Tolerant Operations in Adjustable-Speed Drives and Soft Starters for Induction Motors. — Power Electronics Specialists Conf. IEEE (PESC 2007).

7. **Kastha Debaprasad, Bose Bimal K.** Fault mode single-phase operation of a variable frequency induction motor drive and improvement of pulsating torque characteristics. — IEEE Trans. Ind. Electron, 1994, vol. 41, № 5.

8. **André M.S. Mendes, A.J. Marques Cardoso.** Fault-Tolerant Operating Strategies Applied to Three-Phase Induction-Motor Drives. — IEEE Transactions on Industrial Electronics, December 2006, vol. 53, No. 6.

9. **Юферов Ф.М.** Электрические машины автоматических устройств. — М.: Высшая школа, 1988.

10. **Иванов-Смоленский А.В.** Электрические машины: Учебник для вузов. — М.: Энергия, 1980.

11. **Дементьев Ю.Н., Однокопылов Г.И., Однокопылов И.Г.** Исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода со свойством живучести. — Изв. вузов. Проблемы энергетики, 2008, № 9–10/1.

12. **Копылов И.П.** Математическое моделирование электрических машин: Учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Высшая школа, 2001.

13. **Wang Liqiang, Lei Meizhen, Lu Qinfen, Ye Yunyue.** Modeling and Simulation of Field Oriented Controlled Large Air-gap Linear Induction Motor. — Proc. of the 26th Chinese Control Conf., Zhangjiajie, Hunan (China), 26–31 July 2007.

Авторы: Однокопылов Иван Георгиевич — канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования ТПУ.

Однокопылов Георгий Иванович — канд. техн. наук, зав. лабораторией автоматизации экспериментов Томского государственного архитектурно-строительного университета.

Центнер Йоханес — профессор кафедры электрических машин, приводов и поездов Технического университета в г. Брауншвайг, Германия.

Дементьев Юрий Николаевич — канд. техн. наук, зав. кафедрой электропривода и электрооборудования ТПУ.

Образцов Константин Валентинович — ассистент кафедры электропривода и электрооборудования ТПУ.

* * *

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ И ЧИТАТЕЛЕЙ!

Каждый автор имеет право бесплатно получить 1 экз. журнала с его статьей.

Экземпляры номеров журнала «Электричество» за последние годы можно приобрести в редакции журнала:

111250 Москва, Красноказарменная ул., 14

(МЭИ, каф. ТОЭ, первый этаж, ком. 3-111, тел./факс 362-7485).