

УДК 62-83: 621.313.333.072

**ФАЗО-АСИММЕТРИЧНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
ЧЕТНОФАЗНЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**Бражников А.В.^{*}, Бабин В.А.^{**}, Гилев А.В.^{*}, Белозеров И.Р.^{*}^{*}*Сибирский федеральный университет, Красноярск*^{**}*Компания «Комбарко», Москва*

Приведено описание нетрадиционного способа управления четнофазным (т.е. имеющим четное число фаз) частотно-управляемым электродвигателем переменного тока. Использование предлагаемого способа управления позволяет расширить диапазон регулирования скорости вращения двигателя вниз от номинального значения.

Ключевые слова: многофазный электродвигатель, способ управления

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач в области частотно-регулируемого электропривода (ЭП) переменного тока является снижение амплитуды и (или) повышение частоты пульсаций электромагнитного момента, развиваемого двигателем, особенно в диапазоне частот выходного напряжения инвертора, близких к нулю. К числу наиболее эффективных путей решения этой проблемы относятся увеличение числа фаз и сжато-симметричное (при определенных числах фаз) исполнение системы электропривода [1-11 и др.].

В подавляющем большинстве случаев многофазные (с числом фаз $m_s > 4$) электродвигатели (ЭД) для частотно-управляемых приводов изготавливаются путем замены в стандартном 3-фазном двигателе статорной обмотки на обмотку с соответствующим числом фаз. В этом случае число фаз и вариант исполнения (симметричное или сжато-симметричное) статорной обмотки ЭД и системы ЭП в целом выбирается исходя не только из требований, предъявляемых к технико-экономическим показателям привода, но и из числа пазов статора двигателя. Очевидно, что при этом число пазов статора ЭД в большинстве случаев является ограничительным фактором при выборе числа фаз и варианта исполнения системы ЭП, поскольку каждому числу пазов статора двигателя строго соответствует определенное множество чисел фаз и вариантов исполнения статорной обмотки.

В связи с этим довольно часто встречается ситуация [4, 5], когда проектировщику приходится останавливать свой выбор на некотором четном числе $m_{s,ч}$ фаз

ЭП (как правило, $m_{s,ч}$ кратно 3) и симметричном исполнении статорной обмотки ЭД, несмотря на то, что в этом случае система привода по своим технико-экономическим показателям (и в первую очередь по диапазону регулирования скорости вращения ротора электродвигателя) будет уступать аналогичным ЭП с нечетными значениями числа фаз ($m_{s,н}$), в том числе и ближайшими к $m_{s,ч}$, т.е.

$$m_{s,н} = m_{s,ч} \pm 1.$$

В тех случаях, когда при выбранном значении $m_s = m_{s,ч}$ и симметричном исполнении статорной обмотки ЭД не обеспечивается желаемым диапазоном регулирования скорости вращения ротора двигателя, появляется необходимость разработки способов управления вентилями элементами инвертора, использование которых позволило бы при минимальных потерях мощности в преобразователе частоты и минимальной сложности системы управления вентилями инвертора понизить амплитуду и (или) увеличить частоту пульсаций электромагнитного момента, развиваемого частотно-управляемым электродвигателем переменного тока с симметричной обмоткой на статоре.

В данной работе описан один из таких способов управления вентильными элементами автономного инвертора (АИ) напряжения или тока в четнофазной (т.е.

имеющей четное число фаз) системе «АИ – ЭД переменного тока с симметричной статорной обмоткой» с числом фаз

$$m_s = 2(e + 1)[2(k + 1) + 1], \quad (1)$$

при использовании которого появляется возможность расширить диапазон регулирования частоты вращения ротора ЭД вниз от номинального значения. Здесь $e, k = 0, 1, 2, 3, \dots$. Значение числа фаз ЭП,

на которые распространяется предлагаемый способ управления инвертором, приведены в табл. 1 для $e \in [0; 6]$, $k \in [0; 10]$.

Таблица 1

Значения числа фаз $m_s = 2(e + 1)[2(k + 1) + 1]$

e	k										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	6	10	14	18	22	26	30	34	38	42	46
1	12	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92
2	18	30	42	54	66	78	90	102	114	126	138
3	24	40	56	72	88	104	120	136	152	168	184
4	30	50	70	90	110	130	150	170	190	210	230
5	36	60	84	108	132	156	180	204	228	252	276
6	42	70	98	126	154	182	210	238	266	294	322

Упомянутый способ управления вентильными элементами АИ, подробное изложение которого представлено ниже, был назван авторами данной статьи «фазо-асимметричным управлением».

Используемые в настоящее время многофазные симметричные статорные обмотки ЭД и соответствующие способы управления вентильными элементами инвертора в четнофазных системах «АИ – ЭД переменного тока» можно охарактеризовать с помощью соответствующих векторных диаграмм. В качестве примера на рис. 1 показаны векторные диаграммы фазных обмоток статора ЭД на двойном полюсном делении (рис. 1,а) и фазных на-

пряжений (токов) АИ (рис. 1, б) в 6-фазной симметричной системе «АИ – ЭД переменного тока».

На рис. 1 использованы следующие обозначения: \bar{W}_i – вектор i -ой фазы статорной обмотки ЭД; \bar{U}_i, \bar{I}_i – соответственно, векторы напряжения и тока i -й фазы АИ. Значения угловых смещений между векторами \bar{W}_i и \bar{W}_{i+1} (угол α), а также между векторами \bar{U}_i и \bar{U}_{i+1} и векторами \bar{I}_i и \bar{I}_{i+1} (угол β) равны

$$\alpha = \beta = \left(\frac{2\pi}{m_s} \right) \Big|_{(m_s = 6)} = \frac{\pi}{3}, \quad (2)$$

где $i = \overline{1, m_s}$.

Приведенные векторные диаграммы справедливы при любых типах статорной обмотки ЭД (полношаговой, с укороченным шагом, однослойной, многослойной и

т.д.) и алгоритмах управления вентильными элементами преобразователя частоты (180-градусном управлении, 150-градусном управлении, широтно-импульсной модуляции и т.д.). При 180-градусном управлении вентилями АИ приведенной выше вектор-

ной диаграмме (рис. 1,б) соответствуют следующие временные диаграммы фазных токов (напряжений) инвертора, представ-

ленные на рис. 2: на рис. 2,а – в 1-й фазе АИ; на рис. 2,б – во 2-й фазе; на рис. 2,в – в 3-й фазе и т.д.

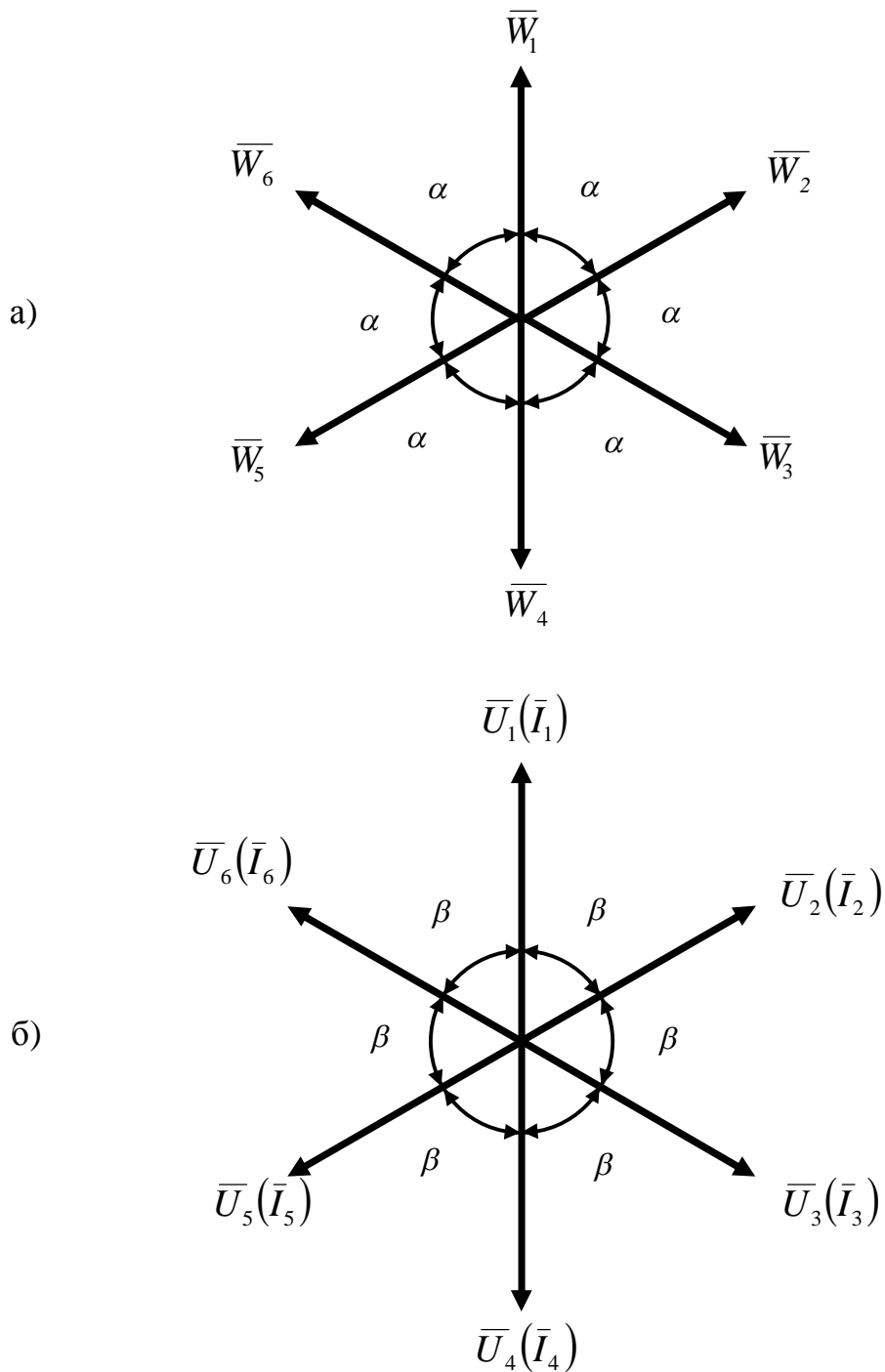


Рис. 1. Векторные диаграммы фазных обмоток статора ЭД и фазных напряжений (токов) АИ в 6-фазной симметричной системе «АИ – ЭД переменного тока» при классических способах управления инвертором: а – векторная диаграмма фазных обмоток статора ЭД на двойном полюсном делении; б – векторная диаграмма напряжений (токов) АИ; $\alpha = \beta = \pi/3$

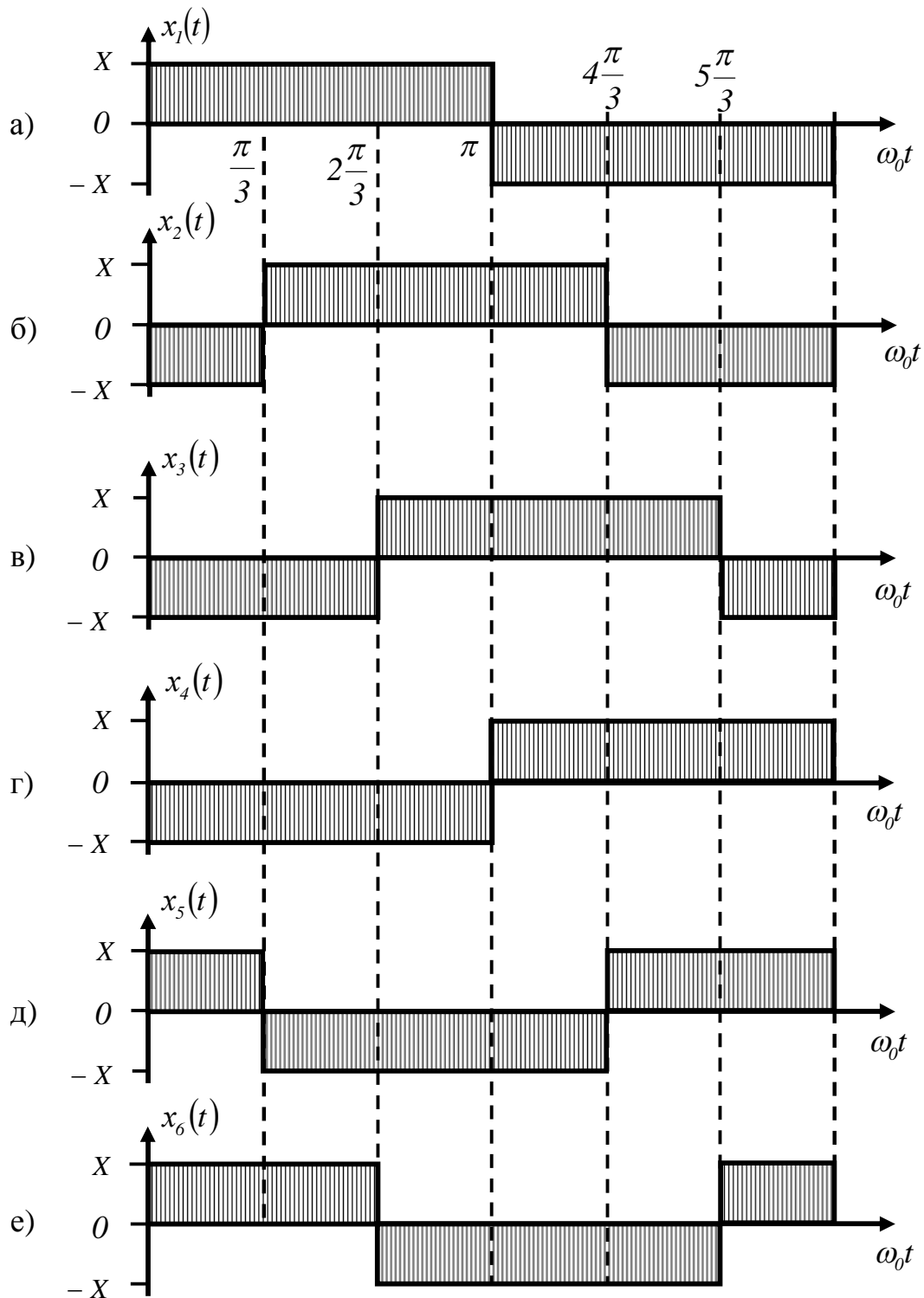


Рис. 2. Временные диаграммы фазных напряжений (токов) АИ в 6-фазной симметричной системе «АИ – ЭД переменного тока» при классических способах управления инвертором

На рис. 2 использованы следующие обозначения: $x_i(t)$ – фазный ток i -ой фазы АИ в том случае, если АИ является ин-

вертором тока (АИТ); $x_i(t)$ – фазное напряжение i -ой фазы АИ в том случае, если АИ – инвертор напряжения (АИН); X – значение тока или напряжения (в за-

висимости от типа инвертора) на входе АИ; ω_0 – угловая частота основной гармоники фазного напряжения (тока) АИ; t – время.

Таким образом, при применяющихся сейчас способах управления вентильными элементами АИ в четнофазных системах «АИ – ЭД переменного тока с симметричной обмоткой статора» фазовые смещения между фазными напряжениями соседних фаз инвертора равны углам сдвига (на двойном полюсном делении) между фазными обмотками ЭД, т.е. $\alpha = \beta$, а коэффициент сжатия [1] статорной обмотки ЭД (κ_W) и системы выходных напряжений (токов) АИ (κ_I) равны единице

($\kappa_W = \kappa_I = 1$). Ниже в данной работе эти способы управления в дальнейшем будут именоваться «классическими».

В отличие от классических способов при предлагаемом способе управления равенство $\alpha = \beta$ нарушается, т.е. $\alpha \neq \beta$. В этом случае $\alpha = 2\pi/m_s$, а система фазных напряжений АИ деформируется следующим образом. В ней выделяется четное число $N = 2(e + 1)$ симметричных q_s – фазных подсистем, где q_s – нечетные числа, $q_s = 2(k + 1) + 1$. Отсюда $m_s = N \cdot q_s = 2(e + 1)[2(k + 1) + 1]$. При чем

$$q_s \Big|_{(v=l)} = q_s \Big|_{(v=n)}, \quad (3)$$

где v – номер симметричной подсистемы, $v, l, n = \overline{1, N}$.

Между напряжениями (в случае АИН) или токами (в случае АИТ) первых фаз всех подсистем устанавливается фазовое смещение $\gamma = \pi/m_s$.

Для иллюстрации этого способа на рис. 3 приведены векторные диаграммы фазных обмоток статора ЭД на двойном полюсном делении (рис. 3,а) и фазных напряжений (токов) АИ (рис. 3, б) в 6-фазной системе «АИ – ЭД переменного тока». Здесь \overline{X}_i – вектор напряжения i -ой фазы АИ, если АИ является инвертором напряжения; \overline{X}_i – вектор тока i -ой фазы АИ, если АИ – инвертор тока.

Как видно из диаграмм, представленных на рис. 3, при данном способе управления инвертором коэффициент сжатия статорной обмотки ЭД $\kappa_W = 1$, а система фазных напряжений (токов) АИ является сжато-симметричной с коэффициентом сжатия $\kappa_I = 2$. Именно поэтому предлагаемый способ управления вентильными элементами автономного инвертора (АИ) напряжения или тока в четно-

фазной системе «АИ – ЭД переменного тока с симметричной статорной обмоткой» получил название «фазо-асимметричного управления».

При 180-градусном управлении вентильными элементами АИ и расщеплении статорной обмотки ЭД на две симметричные 3-фазные подсистемы обмоток [1] векторной диаграмме, приведенной на рис. 3,б, соответствуют временные диаграммы фазных напряжений (токов) АИ, представленные на рис. 4,а – 4,е. При этом на рис. 4,а показана временная диаграмма фазного напряжения (тока) АИ в 1-й фазе инвертора, на рис. 4,б – во 2-й фазе, на рис. 4,в – в 3-й фазе и т.д.

При переходе от классического способа управления инвертором к описанному выше не требуется вносить какие-либо изменения в силовую часть АИ или варьировать частоту работы вентильных элементов преобразователя частоты. Необходимо лишь соответствующим образом изменить алгоритм переключения вентиля АИ, т.е. моменты отпирания и запираания названных элементов. Очевидно, что при этом не произойдет увеличения потерь мощности в инверторе.

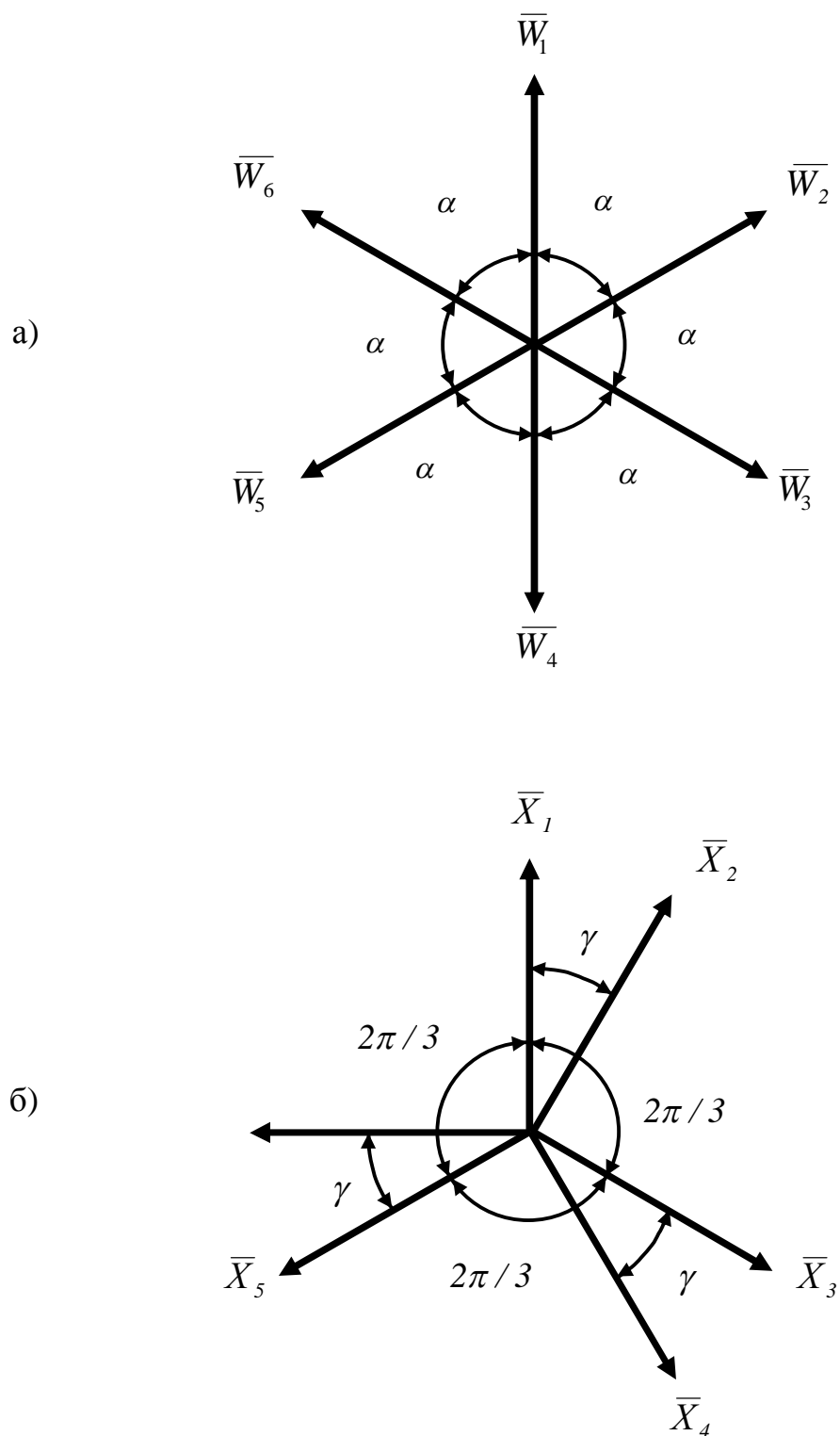


Рис. 3. Векторные диаграммы фазных обмоток статора ЭД и фазных напряжений (токов) АИ в 6-фазной системе «АИ-ЭД переменного тока» при предлагаемом способе управления инвертором: а – векторная диаграмма фазных обмоток статора ЭД на двойном полюсном делении; б – векторная диаграмма фазных напряжений (токов) АИ; $\alpha = \pi/3$; $\gamma = \pi/6$.

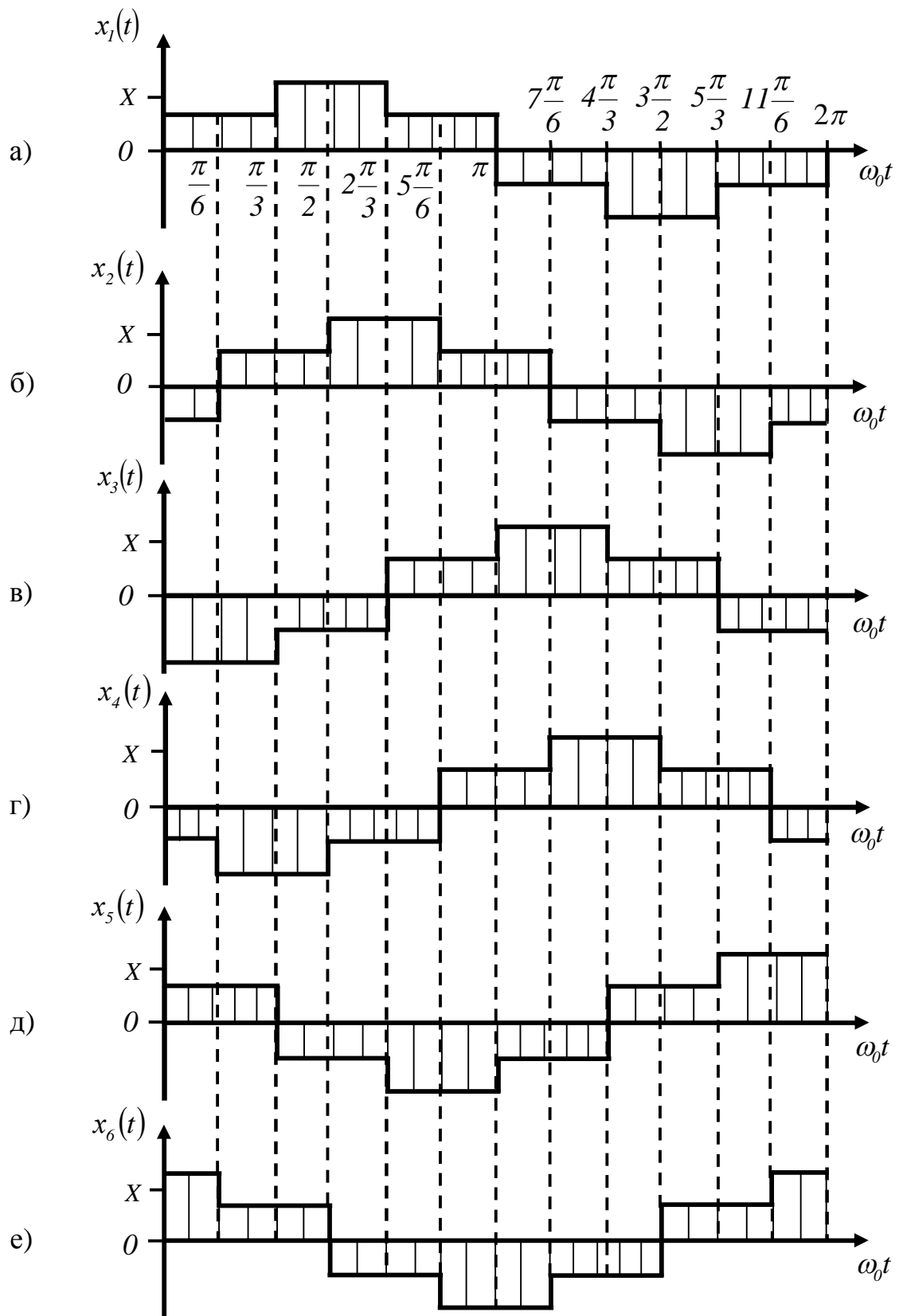


Рис. 4. Временные диаграммы фазных напряжений (токов) АИ в 6-фазной симметричной системе «АИ – ЭД переменного тока» при предлагаемом способе управления инвертором.

Результаты проведенных исследований [2-5 и др.] показали, что использование описанного способа управления АИ при всех значениях числа фаз системы «АИ – ЭД переменного тока», удовлетворяющих равенству (1), приводит к повышению частоты и к снижению размаха пульсаций электромагнитного момента, развиваемого ЭД. В результате повышается равномерность скорости вращения ротора ЭД и появляется возможность для расширения диапазона регулирования названной скорости вниз от ее номинального значения. Подробное изложение результатов этих исследований будет опубликовано в последующих работах авторов данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Бражников А.В. Многофазный инверторный электропривод с различным исполнением ротора асинхронного двигателя // Диссертация канд. техн. наук, защищена 26.06.1985 г., № ГР 01830052658. – Красноярск, 1985. – 210 с.
2. Бражников А.В., Кочетков В.П. Многофазный частотно-регулируемый электропривод по системе АИН-АД // Сборник материалов VI Международной научно-технической конференции «ЕЛМА '90». – Варна (Болгария), 1990. – С. 44.
3. Бражников А.В., Кочетков В.П. Многофазный частотно-регулируемый электропривод по системе АИН-АД // Депонированная рукопись. – София (Болгария): ЦИТИ Болгарии. – № ЕЛ-22-164/20.12.1990 ФНТД, рукопись № 12, 1990. – 10 с.
4. Бражников А.В. Повышение равномерности вращения ротора четнофазного частотно-управляемого электродвигателя // Сборник научных трудов «Повышение эффективности работы горного оборудования при освоении месторождений полезных ископаемых». – Красноярск: Издательство ГАЦМиЗ, 1995. – С. 39-56.
5. Кочетков В.П., Бражников А.В., Дубровский И.Л. Теория электропривода. – Красноярск: Издательство КрПИ, 1991. – 140 с.
6. Brazhnikov A.V., Dovzhenko N.N., and Izmaylov. Prospects for Use of Multiphase Electric Drives in Field of Mining Machines // Proceedings of 3rd International Symposium on Mine Mechanization and Automation "MMA' 95". – Golden, CO, U.S.A., 1995, vol. 1, pp. 13-13 – 13-23.
7. Brazhnikov A.V., and others. Improvement of Technical-and-Economic Characteristics of Drilling Rigs Owing to the Use of Multiphase Electric Drives // Proceedings of ISDT 16th Annual Technical Conference. – Las Vegas, NV, U.S.A., 1996. – 8 p.
8. Brazhnikov A.V., and Dovzhenko N.N. Advantages of Multiphase Electric Drives – Application in Drilling Rigs // Proceedings of 4th International Symposium on Mine Mechanization and Automation "MMA' 97". – Brisbane, Queensland, Australia, 1997, vol. 1, pp. B4-37 – B4-42.
9. Klingshirn E. A. High Phase Order Induction Motors // IEEE Trans. Power Appar. and Syst., 1983, vol. 102, № 1, pp. 47-59.
10. Toliyat H. A., Shi R., and Xu H. Multiphase Induction Motor Drive System and Method // U.S.A. Patent № US 6,426,605 B1. – Date of Patent: Jul. 30, 2002.
11. Ward E.E., and Hären H. Preliminary Investigation of Inventor-fed 5-phase Induction Motor // Proc. Inst. Elec. Eng., Jun. 1969, vol. 116, № 6, pp. 980-984.

PHASE-ASYMMETRICAL CONTROL OVER AC ELECTRIC MOTOR HAVING EVEN PHASE NUMBER

Brazhnikov A.V. *, Babin V.A. **, Gilyov A.V. *, Belozyorov I.R. *

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

**Combarco Corporation, Moscow, Russia

The description of a non-traditional control over AC electric motor having even phase number more than five is presented. The use of this control mode allows increasing the motor speed changes range down from its nominal value.

Keywords: multiphase electric motor, control mode