

УДК 62-83: 621.313.333.072

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЧЕТНОФАЗНОМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ПРИ ФАЗО-АСИММЕТРИЧНОМ УПРАВЛЕНИИ

Бражников А.В., Гилёв А.В., Белозеров И.Р.,
Шульгин А.В., Дихтярь Д.С.

*ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет»
Красноярск, Россия*

Приведены результаты цифрового моделирования установившихся электромагнитных процессов в четнофазном электродвигателе переменного тока при фазо-асимметричном управлении.

Ключевые слова: многофазный электропривод, 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, сжато-симметричное (при опреде-

ленных числах фаз) исполнение системы электропривода и использование специальных (нетрадиционных) способов и алгоритмов управления преобразователем частоты [1-13 и др.].

В [4-6] описан один из таких нетрадиционных способов управления вентилями 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:

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

названный «фазо-асимметричным управлением», при использовании которого появляется возможность расширить диапазон регулирования частоты вращения ротора ЭД вниз от номинального значения (здесь $e, k = 0, 1, 2, 3, \dots$).

Для анализа эффективности использования фазо-асимметричного управления

авторами данной работы было проведено цифровое (компьютерное) моделирование установившихся электромагнитных процессов, происходящих в четнофазных асинхронных электродвигателях при данном управлении. При этом использовались цифровые модели, разработанные на основе соответствующих математических мо-

делей, полученных в [1], высокая точность которых была предварительно подтверждена в результате сравнения полученных с помощью их данных с данными экспериментов. Результаты этого моделирования представлены ниже.

На Рис. 1, 2, 3 и 4 представлены временные диаграммы пульсирующих составляющих электромагнитного момента, развиваемого асинхронным электродвигателем (АД), при классическом и предлагаемом (т. е. фазо-асимметричном) способах управления АИ для следующих случаев:

- когда АИ является инвертором тока (т. е. когда $\overline{X}_i = \overline{I}_i$, если использовать обозначения, которые были применены в [5]);
- в качестве алгоритма управления вентилями элементами автономного

инвертора тока (АИТ) используется 180-градусное управление;

- статорная обмотка АД расщеплена на N симметричных q_s -фазных подсистем обмоток;

– $m_s=6$ (Рис. 1), $m_s=10$ (Рис. 2), $m_s=12$ (Рис. 3), $m_s=20$ (Рис. 4);

- распределение магнитной индукции, создаваемой одной фазной обмоткой статора АД в воздушном зазоре машины, — прямоугольное (т. е. каждая фазная обмотка лежит в двух пазах статора);

– в качестве базового взят серийный 3-фазный АД типа А02-32-4 мощностью 3 кВт.

На Рис. 1-4 коэффициент сжатия системы фазных токов АИТ обозначен как κ_I .

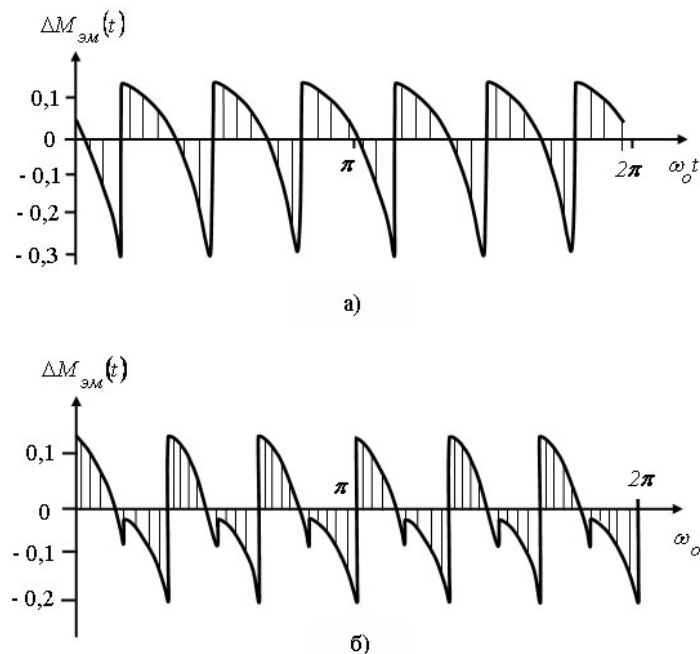


Рис. 1. Временные диаграммы пульсирующих составляющих электромагнитного момента АД: а – $m_s=6$, $\kappa_I=1$; б – $m_s=6$, $N=2$, $q_s=3$, $\kappa_I=2$

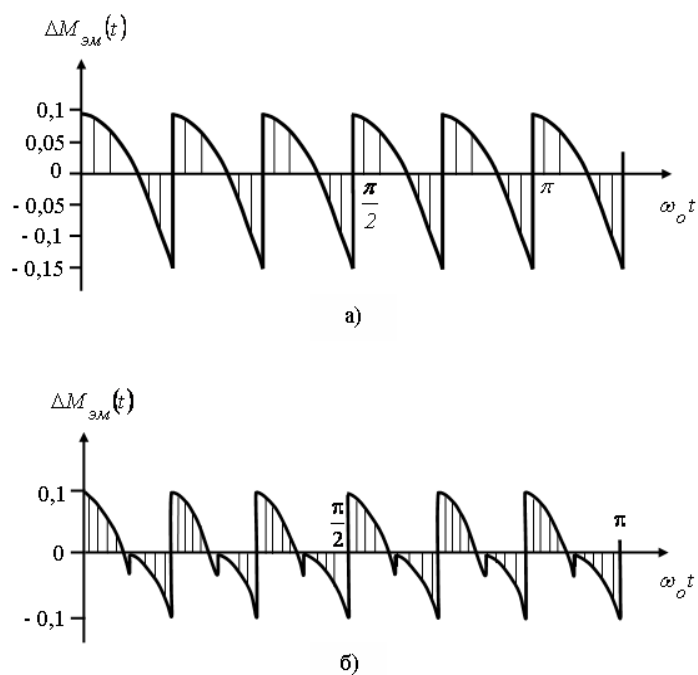


Рис. 2. Временные диаграммы пульсирующих составляющих электромагнитного момента АД: а – $m_s = 10$, $\kappa_I = 1$; б – $m_s = 10$, $N = 2$, $q_s = 5$, $\kappa_I = 2$

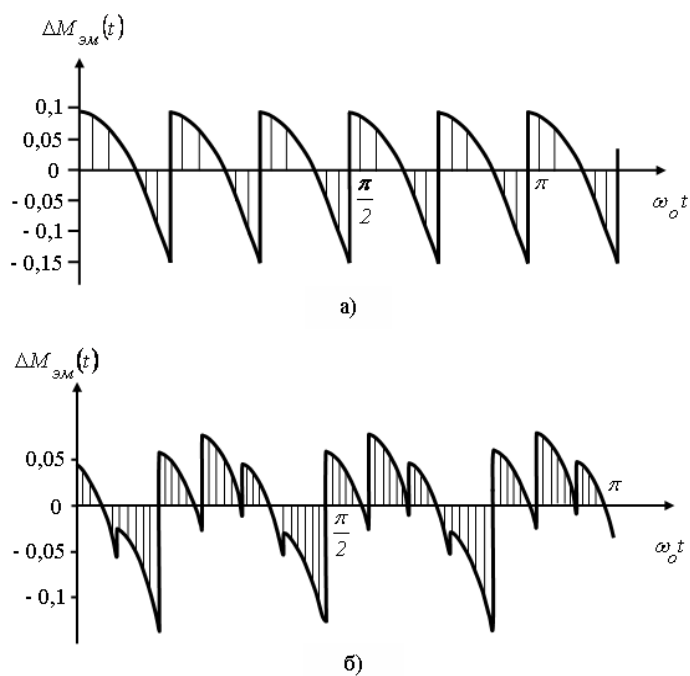


Рис. 3. Временные диаграммы пульсирующих составляющих электромагнитного момента АД: а – $m_s = 12$, $\kappa_I = 1$; б – $m_s = 12$, $N = 4$, $q_s = 3$, $\kappa_I = 2$

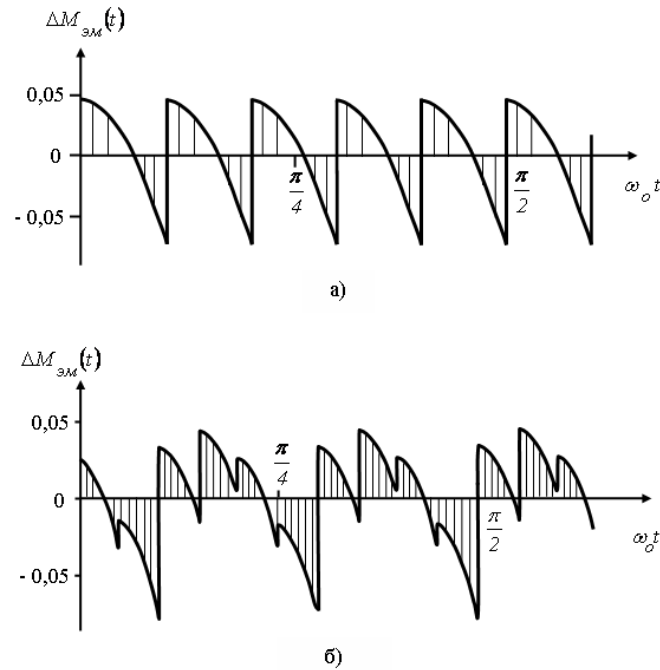


Рис. 4. Временные диаграммы пульсирующих составляющих электромагнитного момента АД: а – $m_s = 20$, $\kappa_I = 1$; б – $m_s = 20$, $N = 4$, $q_s = 5$, $\kappa_I = 2$

На Рис. 1-4 пульсации электромагнитного момента АД приведены в относительных единицах, где за значение, равное единице, принята величина постоянной составляющей момента при соответствующих числе фаз и способе управления вентилями АИТ.

Анализ представленных временных диаграмм пульсирующих составляющих $\Delta M_{эм}(t)$ электромагнитного момента АД показывает, что при классическом управлении АИ спектральные составляющие имеют угловые частоты $\omega_{м,0} = b m_s \omega_0$, где $b = 1, 2, 3, \dots$. При предлагаемом способе управления АИ в спектре пульсаций момен-

та АД наблюдается значительное повышение амплитуд гармонических составляющих с угловыми частотами $\omega_{м,q} = 2b m_s \omega_0$, что является причиной возникновения дополнительных (промежуточных) импульсов момента, т. е. происходит дробление названных выше пульсаций. Причём в последнем случае импульсы $\Delta M_{эм}(t)$ не одинаковы по максимальному значению, а размах $D_{М,эм}$ пульсаций электромагнитного момента АД, определяемый в процентах по отношению к соответствующей постоянной составляющей, меньше, чем при классическом управлении АИ (Рис. 5).

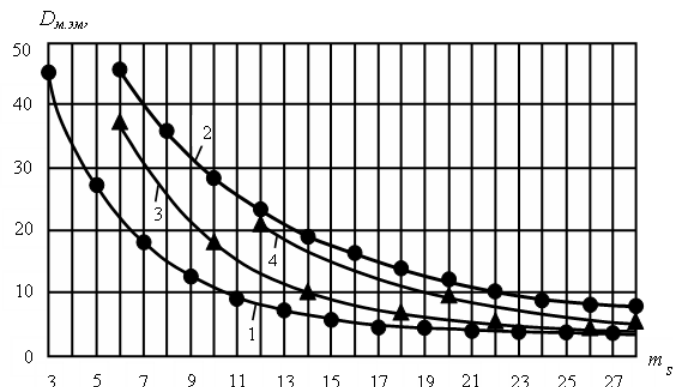


Рис. 5. Зависимость $D_{M.ЭМ}$ от m_s : 1 – при классическом управлении АИ и нечетных m_s ; 2 – при классическом управлении АИ и четных m_s ; 3 – при предлагаемом способе управления АИ (т. е. при фазо-асимметричном управлении) и $N=2$; 4 – при предлагаемом способе управления АИ и $N=4$

Из зависимостей, приведенных на Рис. 5, видно, что при использовании предлагаемого способа управления инвертором четно-фазные системы «АИТ-АД» со значением m_s , удовлетворяющими равенству (1), по уровню пульсаций момента АД приближа-

ются к аналогичным нечетнофазным системам при классическом управлении АИТ. При получении этих зависимостей выделение симметричных подсистем в системах выходных токов инвертора производилось так, как показано в таблице.

Выделение симметричных подсистем

m_s	6	10	12	14	18	20	22	26	28
$\frac{N}{q_s}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{5}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{2}{7}$	$\frac{2}{9}$	$\frac{4}{5}$	$\frac{2}{11}$	$\frac{2}{13}$	$\frac{4}{7}$

На Рис. 6 представлена зависимость от числа фаз величины

$$\delta_M = \frac{\left(D_{M.ЭМ} \middle| \kappa_I = 2 \right)}{\left(D_{M.ЭМ} \middle| \kappa_I = 1 \right)}, \quad (2)$$

являющейся одной из характеристик эффективности предлагаемого способа. Как видно из Рис. 6, значение δ_M при увеличении m_s уменьшается.

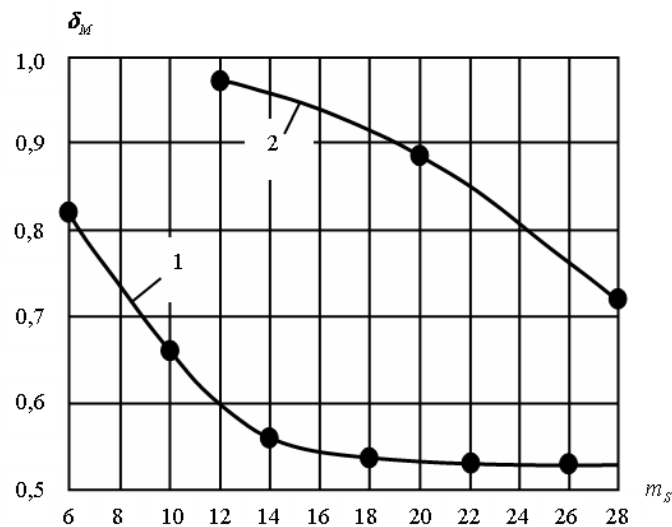


Рис. 6. Зависимость δ_M от m_s : 1 – при $N=2$; 2 – при $N=4$

Уменьшение значения величины δ_M и дробление пульсаций электромагнитного момента АД при использовании описанного способа управления АИ приводит к повышению равномерности вращения ротора двигателя, а тем самым — к расширению диапазона регулирования частоты вращения вниз от номинального значения. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшей эффективностью предлагаемый способ обладает при $N=2$ и эта эффективность возрастает при увеличении числа фаз системы электропривода (Рис. 3-6).

Изучение эффективности описанного способа управления АИ проводилось в первую очередь на расщепленных системах «АИ-ЭД» (т. е. на системах, в которых электродвигатель имеет m_s -фазную обмотку статора, расщепленную на N -симметричных q_s -фазных подсистем обмоток и $m_s=Nq_s$), потому что они имеют явные пре-

имущества перед аналогичными не расщепленными системами как по КПД ЭП [1], так и с точки зрения простоты реализации системы (особенно при $q_s=3$).

Результаты проведенных исследований также показали, что описанный выше способ управления АИ может быть применен не только при рассмотренных выше условиях (т. е. когда электродвигатель является асинхронным, АИ — инвертором тока, а алгоритмом управления вентилями АИ — 180-градуонов управление), но и в следующих случаях:

- когда ЭД является асинхронным двигателем, питание которого осуществляется от АИН;
- ЭД является синхронным двигателем, питающимся от АИН или от АИТ;
- используется любой алгоритм управления вентилями АИ (например, широтно-импульсная модуляция выходного напряжения инвертора и т. д.).

В перечисленных случаях эффект от использования предлагаемого способа управления АИ аналогичен описанному выше.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы. Использование описанного способа управления АИ при всех значениях числа фаз системы «АИ–ЭД», удовлетворяющих равенству (1), приводит к повышению частоты и к снижению размаха пульсаций электромагнитного момента, развиваемого ЭД. Тем самым повышается равномерность скорости вращения ротора ЭД и появляется возможность расширения диапазона регулирования названной скорости вниз от номинального значения. Степень эффективности предлагаемого способа управления практически не зависит от типов ЭД переменного тока (асинхронный, синхронный) и АИ (инвертор тока, инвертор напряжения), максимальна при $N=2$ и повышается с ростом числа фаз системы «АИ–ЭД». При использовании этого способа не возникает увеличение потерь мощности в инверторе и не требуется усложнение системы управления АИ по сравнению со случаем классического управления инвертором.

Следует также отметить, что четнофазные системы «АИ–ЭД» со значениями m_s , удовлетворяющими равенству (1), при описанном выше способе управления инвертором по уровню пульсаций электромагнитного момента, развиваемого ЭД, приближаются к аналогичным не-

четнофазным системам при классическом управлении АИ. Кроме того, когда при проектировании ЭП задан диапазон регулирования скорости вращения ротора ЭД, использование данного способа управления АИ позволяет выбрать меньшее число фаз системы привода, чем при классическом управлении инвертором.

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): ЦИНТИ 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. Бражников А.В., Бабин В.А., Гилев А.В., Белозеров И.Р. Фазо-асимметричное управление четнофазным электродвигателем переменного тока // Современные наукоемкие технологии. – № 10, 2009. – С. 9-16.

6. Кочетков В.П., Бражников А.В., Дубровский И.Л. Теория электропривода. – Красноярск: Издательство КрПИ, 1991. – 140 с.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Edelson J.S. Mesh Connected Brake Array for Electrical Rotating Machines // U.S.A. Patent № US 7,375,483 B2. – Date of Patent: May 20, 2008.
11. Klingshirn E.A. High Phase Order Induction Motors // IEEE Trans. Power Appar. and Syst., 1983, vol. 102, № 1, pp. 47-59.
12. Toliyat H.A., Shi R., and Xu H. Multi-phase Induction Motor Drive System and Method // U.S.A. Patent № US 6,426,605 B1. – Date of Patent: Jul. 30, 2002.
13. Ward E.E., and Hären H. Preliminary Investigation of Inverter-fed 5-phase Induction Motor // Proc. Inst. Elec. Eng., Jun. 1969, vol. 116, № 6, pp. 980-984.

SIMULATION OF STEADY-STATE ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN EVEN PHASE NUMBER AC ELECTRIC MOTOR CONTROLLED BY PHASE-ASYMMETRICAL CONTROL MODE

**Brazhnikov A.V., Gilyov A.V., Belozyorov I.R.,
Shulgin A.V., Dikhtyar D.S.**

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

The results of simulation of steady-state electromagnetic processes in even phase number AC electric motor controlled by phase-asymmetrical control mode are presented.

Keywords: multiphase AC electric drive, control mode.