

КОНСТРУКЦИИ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ МНОГОФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ С ФАЗНО-ПОЛЮСНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Бразнников А.В., Савельев С.В., Куприянов Ф.М., Журавская А.В., Кузьмин А.Р.
ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», Красноярск, e-mail: andrey-brazhnikov@mail.ru

Многофазные инверторные электроприводы переменного тока обладают большими регулировочными возможностями, чем их трехфазные аналоги, за счет того, что при числе фаз системы электропривода более четырех появляется возможность для реализации ряда специфических, нетрадиционных алгоритмов управления преобразователями частоты (т.е. таких алгоритмов, которые в принципе не могут быть реализованы при числе фаз, меньших пяти). Использование этих алгоритмов позволяет улучшить ряд технико-экономических показателей электроприводов переменного тока и значительно расширить область их применения. К числу таких нетрадиционных алгоритмов управления относится пропорционально-фазовое управление, разновидностью которого является фазно-полосное управление. Использование фазно-полосного управления (в сочетании с классическим способом частотного регулирования скорости электродвигателя) в системе многофазного электропривода позволяет в ряде случаев уменьшить массогабаритные показатели и себестоимость изготовления системы, а также повысить ее быстродействие и надежность. В статье приведено описание особенностей фазно-полосного управления многофазными (с числом фаз, равным шести и более) асинхронными электроприводами. Сущность пропорционально-фазового управления и его основное отличие от традиционных способов управления заключается в увеличении в целое число раз фазовых смещений между напряжениями (токами) соседних фаз статорной обмотки двигателя. При этом реализация фазно-полосного управления требует применения специфических конструкций многофазных асинхронных электродвигателей, описание которых представлено в статье.

Ключевые слова: многофазные электроприводы переменного тока, многофазные асинхронные электродвигатели, алгоритмы управления преобразователем частоты, пропорционально-фазовое управление, фазно-полосное управление

INDUCTION MOTOR DESIGNS FOR MULTI-PHASE PHASE-POLE CONTROLLED AC ELECTRIC DRIVES

Brazhnikov A.V., Savelev S.V., Kupriyanov F.M., Zhuravskaya A.V., Kuzmin A.R.
Siberian Federal University, Krasnoyarsk, e-mail: andrey-brazhnikov@mail.ru

Multi-phase AC inverter drives have greater adjustment capabilities than their three-phase counterparts, due to the fact that when the number of phases of the drive system is more than four, it becomes possible to implement a number of specific, non-traditional frequency converter control algorithms (i.e. such algorithms that in principle cannot be realized with the number of phases less than five). The use of these algorithms makes it possible to improve a number of technical and economic indicators of AC electric drives and significantly expand the scope of their application. Such non-traditional control algorithms include proportional-phase control, a variation of which is phase-pole control. The use of phase-pole control (in combination with the classical method of frequency control of the electric motor speed) in the system of a multi-phase electric drive makes it possible in some cases to reduce the weight and size indicators and the cost of manufacturing the system, as well as to increase its speed and reliability. This paper describes the features of the phase-pole control of multi-phase (with the number of phases equal to six or more) asynchronous electric drives. The essence of proportional-phase control and its main difference from traditional control methods is an increase in an integer number of times of phase displacements between voltages (currents) of adjacent phases of the motor stator winding. At the same time, the implementation of phase-pole control requires the use of specific designs of multi-phase asynchronous electric motors, the description of which is presented in this paper.

Keywords: multi-phase AC drives, multi-phase induction motors, frequency converter control algorithms, proportional-phase control, phase-pole control

Многофазные инверторные электроприводы переменного тока (ЭП) обладают большими регулировочными возможностями, чем их трехфазные аналоги, за счет того, что при числе фаз системы ЭП более четырех появляется возможность для реализации ряда нетрадиционных алгоритмов управления преобразователями частоты (т.е. алгоритмов, которые в принципе не могут быть реализованы при числе фаз, меньших пяти). Использование этих алгоритмов позволяет улучшить ряд технико-экономи-

ческих показателей ЭП и значительно расширить область их применения [1–3].

К числу таких нетрадиционных алгоритмов управления относится пропорционально-фазовое управление, разновидностью которого является фазно-полосное управление (ФПУ). Использование ФПУ (в сочетании с классическим способом частотного регулирования скорости электродвигателя) в системе многофазного ЭП позволяет в ряде случаев уменьшить массогабаритные показатели и себестоимость изготовления

системы, а также повысить ее быстродействие и надежность.

Целью данного исследования является изучение характеристик многофазного асинхронного двигателя (АД) в системе электропривода при использовании ФПУ и (на основе полученных результатов) разработка оптимальных конструкций АД, использование которых позволит применять ФПУ в системе ЭП с максимальной эффективностью.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является многофазная система асинхронного ЭП с числом фаз шесть и более, в которой наряду с традиционным частотным управлением применяется ФПУ.

Методы исследования – математическое и цифровое моделирование установившихся электромагнитных процессов, происходящих в многофазном асинхронном ЭП с ФПУ. При этом результаты моделирования

сопоставляются с полученными ранее экспериментальными данными.

Результаты исследования и их обсуждение

Сущность ФПУ заключается в увеличении в некоторое целое число H_p раз фазовых смещений между напряжениями (токами) соседних фаз преобразователя частоты (ПЧ). Причем ФПУ может быть реализовано при строго определенных значениях числа m фаз ЭП. Множество значений параметра H_p , которые могут быть реализованы в системе, зависит от значения m .

Результаты проведенных исследований показали, что при переходе от традиционного управления (при котором $H_p = 1$) к ФПУ (при котором $H_p > 1$) наблюдается эффект, который можно отождествить с уменьшением в H_p раз числа фаз (m_n) и одновременным увеличением во столько же раз числа пар полюсов (p_n) в системе выходных напряжений (токов) ПЧ (рис. 1).

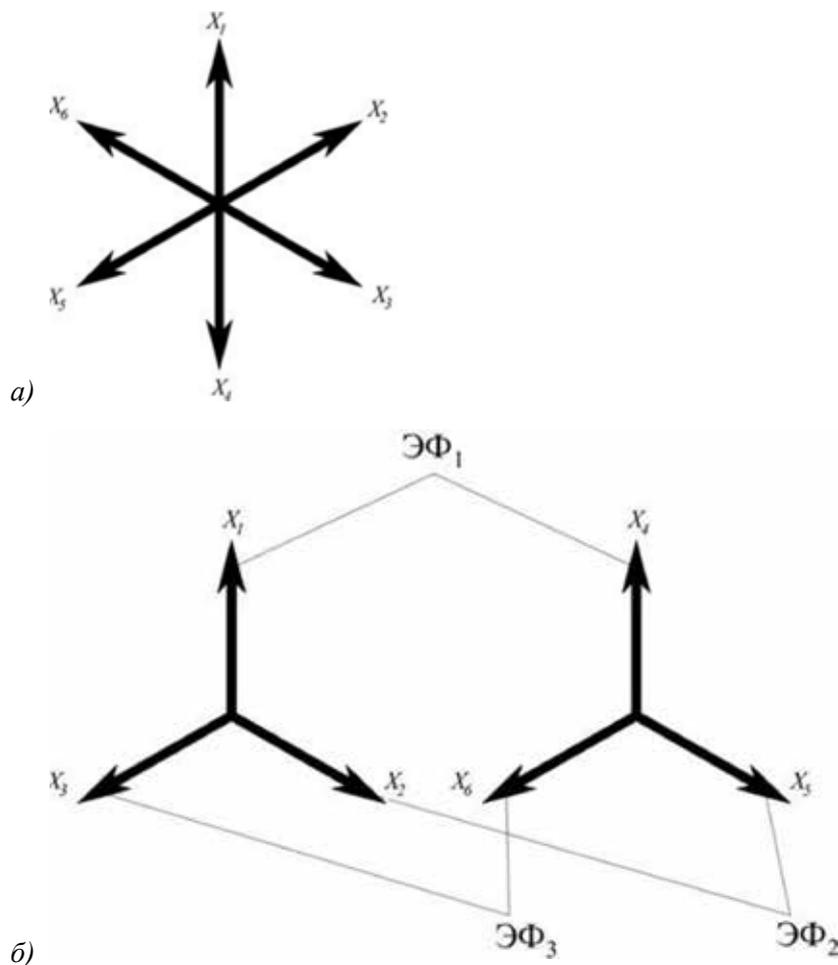


Рис. 1. Векторные диаграммы 6-фазной системы выходных напряжений (X_i) или токов ПЧ ($i \in [1; 6]$):
 а – $H_p = 1$, $m_n = 6$, $p_n = 1$; б – $H_p = 2$; $m_n = 3$, $p_n = 2$; ЭФ $_j$ – j -я эквивалентная фаза ПЧ; $j \in [1; 3]$

Здесь под числом p_n пар полюсов выходных напряжений (токов) ПЧ подразумевается количество идентичных подсистем, которые в совокупности представляют собой полную систему названных напряжений (токов) и в дальнейшем будут именоваться «полюсными подсистемами», а под числом m_n фаз указанной системы (т.е. под эквивалентным числом фаз ПЧ, рис. 1) – число фаз одной полюсной подсистемы выходных напряжений (токов) ПЧ.

Таким образом, использование ФПУ в многофазных ЭП дает потенциальную возможность для изменения эквивалентного числа пар полюсов двигателя и тем самым для варьирования параметров механической характеристики машины (таких как синхронная скорость вращения, критический и пусковой моменты и др.), а посредством этого (в конечном счете) – для обеспечения названных выше преимуществ многофазных систем с ФПУ.

Кроме того, результаты проведенных исследований показали, что реализация ФПУ во многих случаях требует специального исполнения многофазного АД. Это объясняется следующим.

Анализ уравнений математических моделей многофазных систем ПЧ-ЭД [4] показывает, что необходимым условием для обеспечения возможности применения ФПУ является следующее: спектры функций взаимных индуктивностей (т.е. функций, описывающих изменение взаимных индуктивностей между фазными обмотками двигателя при изменении угла поворота ротора машины) должны содержать гармоники, порядки n которых удовлетворяют равенству

$$n / p_k = H_p, (*)$$

где p_k – число пар полюсов обмоток ЭД; конструктивный, нерегулируемый (в отличие от H_p) параметр. Равенство (*) должно выполняться для всего множества $\{H_p\}$ значений параметра H_p , которые могут (при данном значении m) и должны быть обеспечены в данной системе ЭП.

При реализации ФПУ с нечетными значениями параметра H_p равенство (*) всегда выполняется, поскольку в спектрах функций взаимных индуктивностей ЭД всегда присутствуют гармоники, имеющие нечетные значения отношения (n / p_k) . Вследствие этого реализация вариантов ФПУ, при которых H_p принимает только нечетные значения (в определенной временной последовательности, заданной разработчиком системы ЭП или оператором), может быть осуществлена в многофазных системах ЭП при традиционном (классическом) исполнении как ЭД, так и ПЧ.

При четных значениях параметра H_p равенство (*) выполняется только в том случае, если фазные обмотки ЭД имеют укороченный шаг.

Проведенные исследования показали, что во многих случаях является целесообразной (с точки зрения регулировочных и ряда других характеристик ЭП) реализация таких вариантов ФПУ, в которых совместно используются как четные, так и нечетные значения параметра H_p (в определенной заданной временной последовательности). Реализация таких вариантов ФПУ требует исполнения ПЧ и (или) ЭД с некоторыми особенностями.

Принципиально возможные варианты исполнения ПЧ и ЭД, при которых возможна комплексная реализация как нечетных, так и четных значений параметра H_p , можно разделить на две группы (по характерным особенностям, свойственным названным вариантам, таблица).

Для первой группы вариантов характерно то, что в спектрах функций взаимных индуктивностей ЭД в этом случае присутствуют гармоники порядков, удовлетворяющих равенству (*) для всего множества значений параметра H_p , которые могут и должны быть реализованы в данной многофазной системе ЭП. В первую группу входят два варианта – варианты 1.1 и 1.2. По варианту 1.1 фазные обмотки ЭД выполняются с укороченным шагом (о возможности использования такого варианта упоминалось выше). Объединенная обмотка статора по варианту 1.2 фактически представляет собой две или более обмоток, имеющих разные значения числа пар полюсов и соединенных последовательно или параллельно. Недостатком обоих вариантов первой группы является низкий КПД системы ЭП вследствие значительных потерь мощность в ЭД.

Для второй группы, охватывающей варианты 2.1 и 2.2, характерно следующее. В обмотках классического типа каждый виток укладывается в два паза, в результате чего направления токов, протекающих по этим пазам, жестко связаны между собой. В вариантах 2.1 и 2.2 эти связи отсутствуют (для варианта 2.1 это становится очевидным, если рассматривать не реальные, а эквивалентные фазы обмотки ЭД). При этом, изменяя направление токов в проводниках, расположенных в разных пазах статора (или ротора) ЭД, можно добиться такого изменения конфигурации магнитного поля в воздушном зазоре машины, которое возможно в ЭД классической конструкции лишь при изменении числа пар полюсов, числа фаз или шага обмотки (без изменения числа фаз и числа пар полюсов ЭД).

Варианты исполнения ПЧ и ЭД для систем ЭП с ФПУ

Группы вариантов	Варианты	Краткая характеристика основных отличительных особенностей вариантов
1	1.1	Фазные обмотки ЭД выполняются с укороченным шагом
	1.2	Обмотка статора представляет собой две или более обмоток, имеющих разные значения числа пар полюсов и соединенных последовательно или параллельно
2	2.1	Обмотка статора ЭД – тороидальная. Ротор охватывает статор как снаружи, так и изнутри
	2.2	Обмотка статора ЭД – стержневая

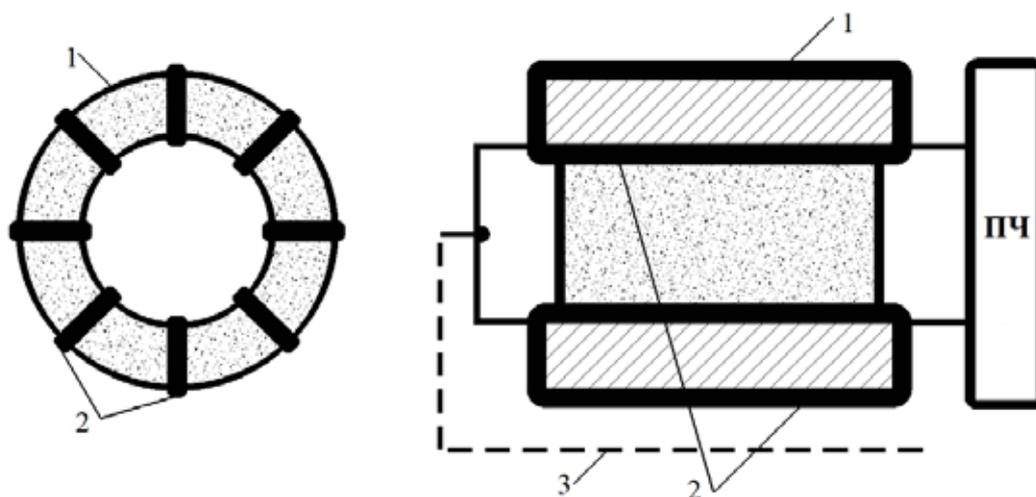


Рис. 2. 8-фазная статорная обмотка и схема ее подключения к ПЧ для ЭД, выполненного по варианту 2.1: 1 – магнитопровод статора; 2 – фазные обмотки статора; 3 – нулевой провод

Таким образом, в ЭД, выполненным по вариантам 2.1 и 2.2, имеется возможность для изменения числа эквивалентных фаз, числа эквивалентных пар полюсов, а также эквивалентного шага фазных обмоток, т.е. такие ЭД (как объекты регулирования) обладают большим количеством степеней свободы, чем машины классического типа. Причем с ростом числа реальных фаз ЭД (и, соответственно, ПЧ) число этих степеней свободы увеличивается.

В тороидальной обмотке по варианту 2.1 (рис. 2) каждая ее фаза укладывается в два паза: один – на внутренней, а другой – на внешней стороне статора (который может иметь или не иметь посередине, внутри своего массива кольцевой воздушный зазор в аксиальном направлении). Ротор охватывает статор как снаружи, так и изнутри. При такой конструкции суммарная длина лобовых частей обмоток ЭД может быть значительно уменьшена по сравнению с машинами классического типа, что является еще одним преимуществом данного вариан-

та помимо отмеченного выше. Недостатком такого варианта ЭД является повышенный момент инерции ротора.

Стержневая обмотка статора ЭД по варианту 2.2 (рис. 3) выполняется так же, как и обмотка ротора асинхронного двигателя типа «беличья клетка», но в отличие от последней в стержневых статорных обмотках отсутствуют короткозамыкающие кольца (по крайней мере на одном торце статора), и каждый стержень такой обмотки подключается к отдельной фазе ПЧ (т.е. число стержней обмотки определяет число фаз ПЧ). Дополнительным преимуществом ЭД, изготовленных по варианту 2.2, является их высокая технологичность. Особенностью машин, выполненных в соответствии с этим вариантом, являются большие фазные токи ЭД при малых значениях фазных напряжений (по сравнению с ЭД той же мощности, имеющими обмотки классических типов).

При этом преобразователь частоты может быть построен следующим образом.

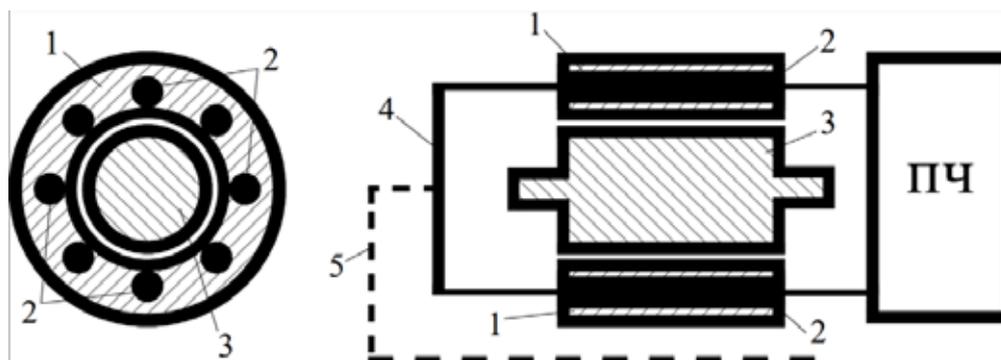


Рис. 3. 8-фазная статорная обмотка и схема ее подключения к ПЧ для ЭД, выполненного по варианту 2.2; 1 – магнитопровод статора; 2 – стержни статорной обмотки; 3 – ротор; 4 – короткозамыкающее кольцо; 5 – нулевой провод

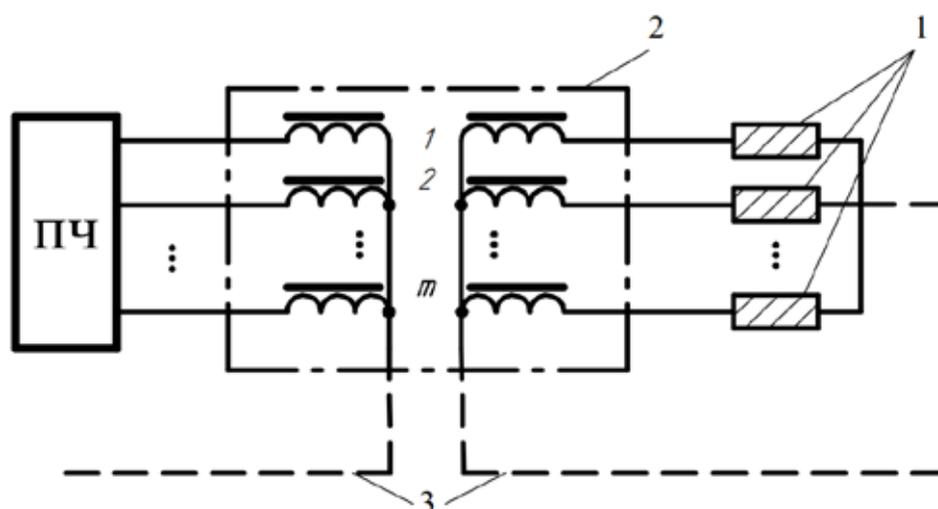


Рис. 4. Подключение статорной обмотки ЭД, выполненного по варианту 2.2.2, к ПЧ: 1 – стержни статорной обмотки; 2 – m -фазный понижающий трансформатор; 3 – нулевой провод

Вариант 2.2.1. ПЧ рассчитан на получение больших токов при малых напряжениях (по сравнению со случаем, когда ЭД имеет обмотку классического типа) без трансформации выходного напряжения преобразователя. Недостатками этого варианта (на сегодняшний день) являются большие массогабаритные показатели ПЧ и пониженный КПД системы ЭП вследствие больших потерь мощности на вентилях элементах ПЧ.

Вариант 2.2.2. (рис. 4). ПЧ выполняется по обычному принципу (т.е. рассчитан на «нормальные» выходные токи и напряжения), а на выходе ПЧ устанавливается понижающий трансформатор, число фаз которого равно числу фаз ПЧ, т.е. числу стержней обмотки статора. Недостатком этого варианта является необходимость ис-

пользования выходного трансформатора, что может привести к ухудшению некоторых технико-экономических показателей системы ЭП (в частности, ее массогабаритных показателей).

Заключение

По результатам данной работы можно сделать следующие выводы. Проведенный сравнительный анализ всех перечисленных выше вариантов изготовления ПЧ и ЭД, предназначенных для использования в системах ЭП с ФПУ (когда параметр H_p может принимать четные значения), показывает, что варианты второй группы обладают наибольшими перспективами применения в данной области [5–7]. На сегодняшний день наибольшими преимуществами среди вариантов этой группы обладают вариан-

ты 2.1 и 2.2.2. Но непрерывное совершенствование преобразовательной техники (и в частности – силовой) в течение последних десятилетий позволяет обоснованно предположить, что с течением времени на первое место по перспективности применения может выйти вариант 2.2.1 (или по крайней мере вытеснить вариант 2.2.2).

Список литературы

1. Бражников А.В., Кочетков В.П. Многофазный частотно-управляемый электропривод по системе АИН-АД // Регулируемые электрически машины «ЕЛМА'90»: материалы 6-й Международной научно-технической конференции (Варна, Болгария, 5–6 октября 1990 г.). Рукопись депонирована в ЦИНТИ, г. София, Болгария. № ЕЛ-22-164/20.12.1990 ФНТД, рукопись № 12. 1990. 10 с.
2. Berardi G., Bianchi N. Design Guideline of an AC Hairpin Winding, Proceedings of the 13th International Conference on Electrical Machines "ICEM '2018". Alexandroupoli, Greece, September 03–06, 2018. P. 2444-2450. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8506785.
3. Bianchi N., Berardi G. Analytical Approach to Design Hairpin Windings in High Performance Electric Vehicle Motors. Proceedings of the 10th Annual IEEE Energy Conversion Congress and Exposition "ECCE '2018", Portland, OR, U.S.A., 2018. P. 4398–4405. DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558383.
4. Бражников А.В. Многофазный инверторный электропривод с различным исполнением ротора асинхронного двигателя: дис... канд. техн. наук. № ГР 01830052658. Красноярск: Красноярский политехнический институт, 1985. 210 с.
5. Tenconi A., Vaschetto S., Vighiani A. Electrical Machines for Highspeed Applications: Design Considerations and Tradeoffs. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2014. Vol. 61. No. 6. P. 3022–3029. DOI: 10.1109/TIE.2013.2276769.
6. Duran M.J., Barrero F. Recent Advances in the Design Modeling and Control of Multi-phase Machines – Part II. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2016. Vol. 63. No. 1. P. 459–468. DOI: 10.1109/TIE.2015.2448211.
7. Neapolitan R.E., Nam K.H. AC Motor Control and Electrical Vehicle Applications, 2nd Edition. CRC Press, Boca Raton, FL, U.S.A. 2018. 574 p. DOI: 10.1201/9781315200149.