

## УСЛОВИЯ ПОСТРОЕНИЯ БЕЗДАТЧИКОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ БЕСКОНТАКТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

К.П.Акинин, канд.техн.наук,

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

*Рассмотрены особенности построения бездатчиковых электромеханических систем на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами. Приведен пример алгоритма широтно-импульсной модуляции для бездатчикового управления. Библ. 12, табл. 1, рис. 2.*

**Ключевые слова:** бездатчиковая электромеханическая система, бесконтактный двигатель с постоянными магнитами, широтно-импульсная модуляция.

**Введение.** Одним из условий эффективного управления бесконтактными двигателями с постоянными магнитами (ПМБД) является совпадение по фазовому сдвигу и форме кривых ЭДС и токов статора. В таком случае эффективное преобразование электрической энергии в механическую означает получение максимально возможной величины момента электродвигателя при минимальных значениях потерь в статорных обмотках. Реализация такого управления возможна при условии определения тем или иным способом текущего углового положения ротора.

Бездатчиковое управление электромеханическими системами (ЭМС) на основе ПМБД осуществляется при отсутствии датчиков механических координат – частоты вращения и углового положения ротора – и формировании соответствующих им сигналов на основании электрических измерений в цепи статора двигателя. Построение бездатчиковых ЭМС на основе ПМБД представляет значительный практический интерес вследствие возможного упрощения конструкции двигателя и снижения стоимости ЭМС.

В настоящее время можно отметить два направления построения бездатчиковых ЭМС на основе ПМБД:

1. Непрерывные бездатчиковые ЭМС, в которых на основании заданного вектора управлений  $u$  и измеренного вектора тока статора  $i$  определяют значение  $\theta_1$ , соответствующее угловому положению ротора  $\theta$  [11,12]. В данной классификации систем определение «непрерывный» означает непрерывность измеряемых исходных и формируемых выходных сигналов.

2. Дискретные бездатчиковые ЭМС, в которых измеряются только напряжения на выходе инвертора напряжения [3,5,6,10]. В этом случае сигналы управления инвертором напряжения формируются на основании вектора функций угла поворота ротора  $f_\theta = (\text{sign}[\sin \theta], \text{sign}[\sin(\theta - 2\pi/3)], \text{sign}[\sin(\theta + 2\pi/3)])$ . Здесь определение «дискретный» означает обстоятельство преобразования исходных измеряемых сигналов в дискретные логические.

На рис. 1 показаны функциональные схемы двух вариантов построения бездатчиковых ЭМС, где ИП – источник питания; ИН – инвертор напряжения; БД – бесконтактный двигатель; БЗ – блок задания; Р – регулятор; СО – система обработки сигналов.

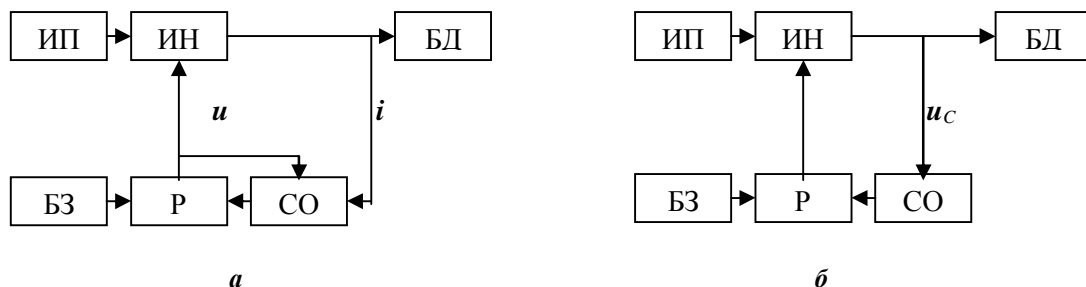


Рис. 1

**В данной статье** рассмотрим особенности и определим условия построения дискретных бездатчиковых ЭМС, поскольку в таких системах достигается упрощение электрических схем за счет отказа от измерения токов статора и уменьшение объема вычислений вследствие формирования

управлений на основании дискретных исходных сигналов. При этом реализуется управление ПМБД, удовлетворяющее требованиям многих известных практических приложений. Разработка относительно простых дискретных бездатчиковых ЭМС наиболее актуальна для систем малой мощности – до одного киловатта, при разработке которых большой вес приобретают критерии низкой стоимости и малых габаритов.

**Основное изложение.** Разработка того или иного варианта бездатчиковой ЭМС на основе ПМБД связана с использованием определенного алгоритма управления инвертором напряжения. Например, для непрерывных бездатчиковых ЭМС может быть использован алгоритм векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения, при котором выходное напряжение инвертора на периоде модуляции формируется как последовательность двух из шести ненулевых ( $S_{31}(100)$ ,  $S_{32}(110)$ ,  $S_{33}(010)$ ,  $S_{34}(011)$ ,  $S_{35}(001)$  и  $S_{36}(101)$ ) и одного из двух нулевых ( $S_{37}(111)$  и  $S_{38}(000)$ ) состояний силовых ключей инвертора [4,8]. Здесь цифры 1 и 0 означают подключение силовых ключей инвертора верхней и нижней групп каждой из трех фаз соответственно к шинам источника питания с высоким или низким потенциалом. Первая цифра 3 в нижнем индексе приведенных обозначений состояний определяет неперемutable условие одновременного включения трех силовых ключей. Формирование таких состояний при управлении инвертором напряжения определяет неизменность структуры его силовой части, что означает непрерывность квазисинусоидальных токов в обмотках двигателя.

Для управления трехфазными ПМБД малой мощности с помощью трехфазного мостового инвертора напряжения (ТМИ) часто используется алгоритм при условии проводимости силовых ключей 120 электрических градусов – режим так называемой шеститактной коммутации тока, когда на каждом интервале повторяемости к источнику питания подключаются обмотки двух фаз двигателя. Такое управление делает систему «ТМИ – ПМБД» подобной коллекторному двигателю постоянного тока, что определило широкое распространение в технической литературе термина «бесконтактный двигатель постоянного тока». Коммутация ключей в этом случае может осуществляться в соответствии с сигналами дискретных датчиков положения ротора.

Использование такого алгоритма управления ТМИ определило возможность построения дискретных бездатчиковых систем, действие которых основывается на том обстоятельстве, что при использовании рассматриваемого алгоритма коммутации существуют интервалы, на которых одна из фазных обмоток оказывается отключенной, а ее фазное напряжение равным фазной ЭДС. В [5] сформулировано важное условие построения дискретных бездатчиковых систем: управление коммутацией по ЭДС возможно только при неполной коммутации, когда на каждом интервале повторяемости работы инвертора хотя бы одна фаза статорной обмотки оказывается отключенной от источника питания.

Исследование режимов формирования токов в трехфазной статорной обмотке двигателя при проводимости силовых ключей ТМИ 120 электрических градусов показало, что в зависимости от параметров ПМБД описанный в [4] показатель  $k_r$ , равный отношению действующих значений расчетного и синусоидального (эквивалентного по величине момента двигателя) токов статора, может принимать значения в диапазоне от 1,043 до 1,172. Таким образом, недостатками такого подхода являются несинусоидальность токов статора и обусловленные этим дополнительные потери в обмотках.

Поэтому возникла задача построения дискретной бездатчиковой ЭМС, в которой на основании исходных дискретных сигналов формируются модулирующие функции желаемого вида [2] для дальнейшей реализации алгоритма векторной ШИМ [4] и формирования квазисинусоидальных токов статора. В [2] представлены выражения экстраполяторов, позволяющих на основании исходных дискретных сигналов положения ротора сформировать искомый непрерывный сигнал  $\theta_1$ .

При рассмотрении путей решения поставленной задачи оказалось, что объяснение работоспособности разных ЭМС и обоснование выбора одного из вариантов возможно на основании принципа причинности, устанавливающего допустимые пределы влияния физических событий друг на друга [9].

Действительно, в представляемой бездатчиковой ЭМС раскрывается причинная взаимосвязь динамики процесса, когда причина определяет следствие, а последнее – воздействует на новую причину [7]. Представим непрерывную цепочку причинно-следственных связей:  $\rightarrow C \rightarrow P_i \rightarrow C \rightarrow P_{i+1} \rightarrow C \rightarrow$ , где нижние индексы обозначают последовательность целенаправленной коррекции управляющего воздействия, проявляющего себя как причина  $P$ . На основании измеренного следствия  $C$  корректируется причина  $P$  на следующем шаге.

В нашем случае причина есть определенным образом сформированное напряжение на выходе инвертора, измеряемое следствие – ЭДС статора вращающегося двигателя. Цель управления ПМБД

– формирование напряжения управления, то есть ориентирование вектора управлений  $\mathbf{u}$  относительно вектора ЭДС статора  $\mathbf{e}$  таким образом, чтобы достигалось совпадение по форме и фазовому сдвигу ЭДС и токов статора [1].

Выше упоминалось, что при использовании алгоритма шеститактной коммутации тока ЭДС статора доступна для измерения и, следовательно, в этом случае причинно-следственные связи процесса бездатчикового управления не нарушаются.

При использовании упомянутого выше алгоритма векторной ШИМ  $S_3$  для формирования квазисинусоидальных токов статора все три фазы статорной обмотки всегда оказываются подключенными к шинам источника питания. В таком случае измерению доступно сформированное на выходе инвертора напряжение, то есть причина. Тогда разрывается причинно-следственная связь, определяющая логику процесса работы бездатчиковой ЭМС – без информации о состоянии ПМБД невозможно управление инвертором напряжения в зависимом режиме. Таким образом, при использовании алгоритма векторной ШИМ  $S_3$  невозможна реализация бездатчиковой ЭМС.

Тем не менее, формирование квазисинусоидальных токов статора в дискретной бездатчиковой ЭМС (при отказе от измерения токов статора) возможно при выполнении условия одновременного подключения двух фаз статорной обмотки к шинам источника питания. Такое управление инвертором реализуется с помощью алгоритма ШИМ, при котором используются шесть ненулевых ( $S_{21}(10z)$ ,  $S_{22}(1z0)$ ,  $S_{23}(z10)$ ,  $S_{24}(01z)$ ,  $S_{25}(0z1)$  и  $S_{26}(z01)$ ) и шесть нулевых ( $S_{221}(1zz)$ ,  $S_{232}(zz0)$ ,  $S_{243}(z1z)$ ,  $S_{254}(0zz)$ ,  $S_{265}(zz1)$  и  $S_{216}(z0z)$ ) состояний силовых ключей инвертора. Здесь буква «z» означает, что фаза статорной обмотки отключена от шин источника питания. В таком случае на интервалах нулевых состояний неизменность структуры силовой части инвертора сохраняется до тех пор, пока во всех фазах статорной обмотки протекают токи. Условия возникновения прерывистых токов определяются частотой модуляции силовых ключей инвертора напряжения, параметрами и режимом работы двигателя.

При условиях идеальности силовых ключей и непрерывности токов ТМИ с трехфазной обмоткой двигателя [4] могут быть описаны уравнениями

$$T_E \frac{du_{RA}}{dt} - T_E \frac{du_{RB}}{dt} = U_1(n) - e_A + e_B - u_{RA} + u_{RB}; \quad 2T_E \frac{du_{RA}}{dt} + T_E \frac{du_{RB}}{dt} = U_2(n) - e_A + e_C - 2u_{RA} - u_{RB};$$

$$T_E \frac{du_{RA}}{dt} + 2T_E \frac{du_{RB}}{dt} = U_3(n) - e_B + e_C - u_{RA} - 2u_{RB}; \quad u_{RC} = -u_{RA} - u_{RB}.$$

При прекращении протекания тока в одной из фаз статорной обмотки двигатель с ТМИ может описываться одним из трех уравнений

$$2T_E du_{RA}/dt = U_4(n) - e_A + e_B - 2u_{RA}, \text{ при } u_{RA} = u_{RB} \text{ и } u_{RC} = 0;$$

$$2T_E du_{RA}/dt = U_5(n) - e_A + e_C - 2u_{RA}, \text{ при } u_{RA} = u_{RC} \text{ и } u_{RB} = 0;$$

$$2T_E du_{RB}/dt = U_6(n) - e_B + e_C - 2u_{RB}, \text{ при } u_{RB} = u_{RC} \text{ и } u_{RA} = 0,$$

где  $T_E$  – электромагнитная постоянная времени статорной обмотки;  $u_{RA}$ ,  $u_{RB}$ ,  $u_{RC}$  – падения напряжения на активных сопротивлениях трех фаз статорных обмоток;  $e_A = k_\omega E_{1N} \sin(\omega t)$ ;  $e_B = k_\omega E_{1N} \sin(\omega t - 2\pi/3)$ ;  $e_C = k_\omega E_{1N} \sin(\omega t - 4\pi/3)$  – ЭДС статорных обмоток;  $\omega$  – электрическая частота вращения двигателя;  $E_{1N}$  – амплитуда ЭДС статора при номинальном значении электрической частоты вращения  $\omega_N$ ;  $k_\omega = \omega/\omega_N$  – коэффициент регулирования частоты вращения;  $U_1(n)$ ,  $U_2(n)$ ,  $U_3(n)$ ,  $U_4(n)$ ,  $U_5(n)$ ,  $U_6(n)$  – напряжения, соответствующие состояниям силовых ключей инвертора;  $n$  – номера состояний силовых ключей. Значения напряжений приведены в таблице, где  $U_d$  – напряжение источника питания;  $N$  – номера интервалов повторяемости; прочерки в таблице означают, что уравнения, в которые входят отмеченные напряжения, в структуре модели для данного состояния инвертора напряжения не используются.

Относительные длительности двух ненулевых и одного нулевого состояний инвертора на периоде модуляции определяются в соответствии с выбранной модулирующей функцией  $\tau_i^* = k_U y(\pi/3 - \alpha_1)$ ;  $\tau_{i+1}^* = k_U y(\alpha_1)$ ;  $\tau_0^* = 1 - \tau_i^* - \tau_{i+1}^*$ , где  $i$  – номер стационарного вектора напряжения;  $k_U$  – коэффициент задания напряжения на выходе инвертора;  $\alpha_1$  – угол поворота заданного век-

тора напряжения в пределах каждого из шести секторов, ограниченных стационарными векторами напряжения, причем  $0 < \alpha_1 < \pi/3$ ;  $y(\alpha_1)$  – модулирующая функция, где ее вариант синусоидальной формы  $y(\alpha_1) = (2 \sin \alpha_1) / \sqrt{3}$ .

$N$	$n$	$S_2$	$U_1(n)$	$U_2(n)$	$U_3(n)$	$U_4(n)$	$U_5(n)$	$U_6(n)$
21	1	$S_{221}(1zz)$	0	0	–	0	0	–
	2	$S_{22}(1z0)$	0	$U_d$	–	–	$U_d$	–
	3	$S_{21}(10z)$	$U_d$	0	–	$U_d$	–	–
32	4	$S_{232}(zz0)$	–	0	0	–	0	0
	5	$S_{23}(z10)$	–	0	$U_d$	–	–	$U_d$
	6	$S_{22}(1z0)$	–	$U_d$	0	–	$U_d$	–
43	7	$S_{243}(z1z)$	0	–	0	0	–	0
	8	$S_{24}(01z)$	$-U_d$	–	0	$-U_d$	–	–
	9	$S_{23}(z10)$	0	–	$U_d$	–	–	$U_d$
54	10	$S_{254}(0zz)$	0	0	–	0	0	–
	11	$S_{25}(0z1)$	0	$-U_d$	–	–	$-U_d$	–
	12	$S_{24}(01z)$	$-U_d$	0	–	$-U_d$	–	–
65	13	$S_{265}(zz1)$	–	0	0	–	0	0
	14	$S_{26}(z01)$	–	0	$-U_d$	–	–	$-U_d$
	15	$S_{25}(0z1)$	–	$-U_d$	0	–	$-U_d$	–
16	16	$S_{216}(z0z)$	0	–	0	0	–	0
	17	$S_{21}(10z)$	$U_d$	–	0	$U_d$	–	–
	18	$S_{26}(z01)$	0	–	$-U_d$	–	–	$-U_d$

Для ПМБД с номинальными значениями мощности двигателя и частоты вращения  $P_N = 20$  Вт и  $\omega_{\max} = 418,9 \text{ с}^{-1}$  выполним пример расчета тока статора при использовании рассмотренного алгоритма ШИМ. При этом относительные и безразмерные параметры модели принимают значения:  $T_E = 0,045$ ;  $E_{1N} = 1$ ;  $\omega = 2\pi$ ;  $k_\omega = 1$ ;  $U_d = 4,1$ ;  $u_{RN} = 0,24$  – номинальная величина амплитуды падения напряжения на активном сопротивлении статорной обмотки;  $N_M = 144$  – принятое количество периодов модуляции ШИМ на периоде первой гармоники выходного напряжения.

Для сравнения с рассматриваемым алгоритмом  $S_2$  на рис. 2, а показана кривая тока при реализации алгоритма векторной ШИМ  $S_3$  [4]. На рис. 2 оси абсцисс и ординат соответствуют относительным значениям времени и переменной  $u_{RA}$ .

На рис. 2, б приведена кривая статорного тока при реализации алгоритма векторной ШИМ  $S_2$  с синусоидальной формой модулирующей функции, где заметны искажения тока вследствие возникновения режима прерывистого тока.

Форма тока может быть несколько улучшена путем использования специальных модулирующих функций, например:  $y(\alpha_1) = (k_1\alpha_1 + k_2\alpha_1^2) / (1 + k_3\alpha_1)$ , где:  $k_1, k_2, k_3$  – постоянные коэффициенты. На рис. 2, в представлена кривая тока при реализации алгоритма векторной ШИМ  $S_2$  и использовании описанной модулирующей функции при  $k_1 = 11,6277$ ,  $k_2 = 8,368$ ,  $k_3 = 19,4356$ . Степень искажения кривых токов из-за возникновения режима прерывистых токов определяется параметрами ПМБД, в

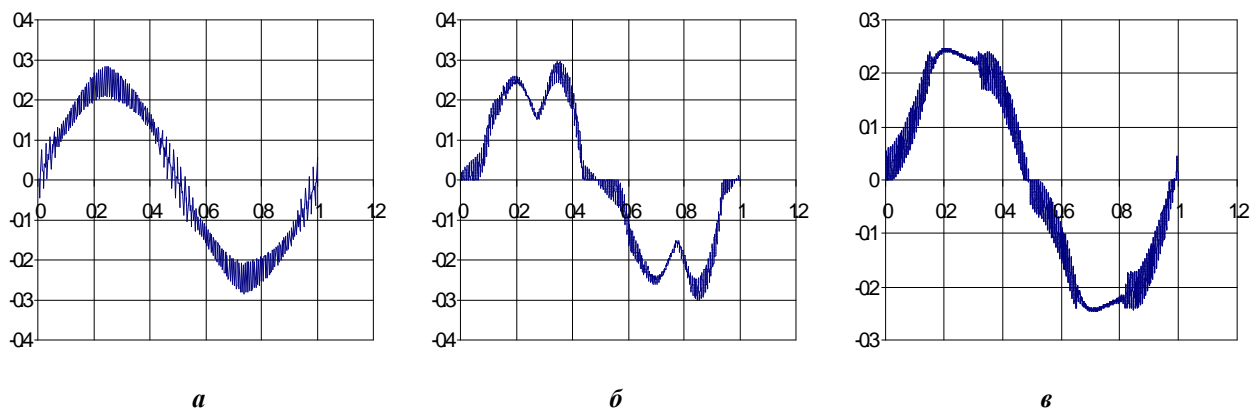


Рис. 2

нашем случае имеющих беспазовую конструкцию статора при поверхностной установке постоянных магнитов на роторе. Двигатели с такой конструкцией характеризуются относительно малыми значениями электромагнитных постоянных времени  $T_E$  [4]. Используемый для сравнения разных способов формирования токов статора показатель  $k_I$  [4], равный отношению действующих значений расчетного и синусоидального (эквивалентного по величине момента двигателя) токов статора, для трех кривых токов, приведенных на рис. 2, принимает значения 1,007, 1,037 и 1,009. Последнее значение показателя оказалось меньше значения параметра  $k_I$  при шеститактной коммутации тока статора.

**Выводы.** ЭМС на основе ПМБД, в которой инвертор напряжения работает в зависимом режиме, является замкнутой динамической системой, действие которой представляется как цепочка причинно-следственных связей, где сформированное напряжение на выходе инвертора проявляет себя как причина, а определяемое этим напряжением управления состояние двигателя – как следствие. На основании оценки состояния двигателя формируется напряжение инвертора на следующем шаге управления. Рассмотрение ЭМС на основе ПМБД с позиций принципа причинности и представлений о причинно-следственных связях позволяет объяснить возможность или невозможность реализации того или иного варианта бездатчиковой ЭМС.

Алгоритм ШИМ  $S_3$  с одновременным включением трех ключей инвертора может быть использован при построении ЭМС на основе ПМБД с датчиком углового положения ротора, а также непрерывных бездатчиковых ЭМС при условии измерения токов статора.

Реализация бездатчиковой ЭМС при использовании алгоритма ШИМ  $S_3$  и условии измерения только сформированного напряжения на выходе инвертора невозможна, так как без информации о состоянии ПМБД как о следствии отработки управляющего воздействия невозможно управление инвертором напряжения в зависимом режиме из-за разрыва причинно-следственной связи, определяющей логику процесса работы бездатчиковой ЭМС.

На основе алгоритма ШИМ  $S_2$  с одновременным включением не более двух ключей инвертора возможна реализация дискретной бездатчиковой ЭМС (без измерения токов статора). В этом случае причинно-следственные связи процесса бездатчикового управления не нарушаются.

Реализация бездатчиковой ЭМС на основе ПМБД при использовании рассмотренного алгоритма ШИМ  $S_2$  позволяет получить некоторые положительные эффекты: во-первых, по сравнению с непрерывной бездатчиковой ЭМС определение положения ротора возможно без измерений токов статора, что существенно упрощает аппаратную часть схемы ЭМС; во-вторых, по сравнению с дискретными бездатчиковыми ЭМС с традиционной шестикратной коммутацией инвертора и трапецидальными токами снижаются дополнительные потери в статорных обмотках и пульсации момента двигателя из-за улучшения формы статорных токов. Дискретные бездатчиковые ЭМС на основе ПМБД удовлетворяют требованиям многих известных практических приложений.

1. Акинин К.П. Ограничения вектора измеряемых координат в электромеханических системах на основе бесконтактных двигателей с постоянными магнитами // Техн. електродинаміка. – 2011. – №4. – С. 38–45.
2. Акинин К.П. Управление бесконтактными магнитоэлектрическими двигателями на основании дискретных сигналов датчика положения // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2008. – №21. – С. 46–49.
3. Акинин К.П. Формирование дискретных сигналов положения ротора бесконтактного магнитоэлектрического двигателя // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – №24. – С. 38–42.
4. Акинин К.П. Формирование токов бесконтактных магнитоэлектрических двигателей // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2011. – №28. – С. 36–42.
5. Воронин С.Г. Управление коммутацией вентильного двигателя по сигналам ЭДС вращения // Электричество. – 2000. – №9. – С. 53–59.
6. Макаручук О.В. Особливості роботи вентильного двигуна з постійними магнітами без давача положення ротора // Техн. електродинаміка. – 2006. – №3. – С. 30–34.
7. Милых А.Н., Шидловский А.К. Принцип взаимности и обратимость явлений в электротехнике. – К.: Наукова думка, 1967. – 316 с.
8. Михальський В.М. Перетворювачі частоти і напруги з широтно-імпульсною модуляцією: Аналіз та наукове обґрунтування шляхів підвищення якості електроенергії. – Автореферат дис. докт.техн.наук. – Київ:Інт електродинаміки НАН України. – 2010. – 41 с.
9. Физический энциклопедический словарь. – М.: Советская энциклопедия. Гл. ред. А.М.Прохоров. – 1983.
10. Cheng-Hu Chen, Ming-Yang Cheng. A new cost effective sensorless commutation method for brushless DC motor without phase shift circuit and neutral voltage // IEEE Transactions on Power Electronics. March. 2007. – Vol.22. – P. 644–653.

11. *Md. Enamul Haque, Limin Zhong, Muhammed Fazlur Rahmani.* A sensorless initial rotor position estimation scheme for a direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive // IEEE Transactions on Power Electronics. Nov. 2003. – Vol.18. – P. 1376–1383.

12. *Obana Hiruoki, Ota Yuji, Miki Ichiro* A position sensorless control method of interior permanent magnet synchronous motor// Electrical Machines and Systems, ICEMS, Proceeding of the Eighth International Conference. Sept. 2005. – Vol.1. – P. 215–220.

УДК 621.313.17

**Умови побудови бездавачевих електромеханічних систем на основі безконтактних двигунів з постійними магнітами**

**К.П.Акінін**, канд.техн.наук,

**Інститут електродинаміки НАН України,**

**пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.**

*Розглянуто особливості побудови бездавачевих електромеханічних систем на основі безконтактних двигунів з постійними магнітами. Наведено приклад алгоритму широтно-імпульсної модуляції для бездавачевого управління. Бібл. 12, табл. 1, рис. 2.*

**Ключові слова:** бездавачева електромеханічна система, безконтактний двигун з постійними магнітами, широтно-імпульсна модуляція.

**Conditions of development of sensorless electromechanical systems on the basis of permanent magnet brushless motors**

**К.П.Акінін,**

**Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,**

**Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.**

*Development features of sensorless electromechanical systems on the basis of permanent magnet brushless motors are considered. Example of pulse-width modulation algorithm for sensorless control are given. References 12, table 1, figures 2.*

**Key words:** sensorless electromechanical system, permanent magnet brushless motor, pulse-width modulation.

1. *Akinin K.P.* Limitations of vector of measured coordinates in the electromechanical systems on the basis of permanent magnet brushless motors // *Tekhnichna elektrodynamika.* – 2011. – №4. – P. 38–45. (Rus)

2. *Akinin K.P.* Control by permanent magnet brushless motors on the basis of discrete signals of a position sensor // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* – 2008. – №21. – P. 46–49. (Rus)

3. *Akinin K.P.* Formation of rotor position discrete signals of permanent magnet brushless motor // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* – 2009. – №24. – P. 38–42. (Rus)

4. *Akinin K.P.* Formation of currents of permanent magnet brushless motors // *Pratsi Instytutu elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* – 2011. – №28. – P. 36–42. (Rus)

5. *Voronin S.G.* Brushless motor commutation control by signals of rotational EFM // *Elektrichestvo.* – 2000. – №9. – P. 53–59. (Rus)

6. *Makarchuk O.V.* Operation features of permanent magnet brushless motor without a rotor position sensor // *Tekhnichna elektrodynamika.* – 2006. – №3. – P. 30–34. (Ukr)

7. *Miliakh A.N., Shidlovskii A.K.* Principle of reciprocity and reversibility of phenomena in electrical engineering. – Kyiv: Naukova dumka, 1967. – 316 p. (Rus)

8. *Mykhalskyi V.M.* Frequency and voltage converters with pulse-width modulation: Analysis, scientific substantiation of means to improve quality of electrical energy. – Abstract of thesis for a Science Doctor's degree 05.09.12. – Kyiv: Instytut elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2010. – 41 p. (Ukr)

9. *Physical encyclopaedia.* – Moskva: Sovetskaia entsiklopedia. Editor-in-chief A.M. Prokhorov. – 1983. (Rus)

10. *Cheng-Hu Chen, Ming-Yang Cheng.* A new cost effective sensorless commutation method for brushless DC motor without phase shift circuit and neutral voltage // *IEEE Transactions on Power Electronics.* March. 2007. – Vol.22. – P. 644–653.

11. *Md. Enamul Haque, Limin Zhong, Muhammed Fazlur Rahmani.* A sensorless initial rotor position estimation scheme for a direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive // *IEEE Transactions on Power Electronics.* Nov. 2003. – Vol.18. – P. 1376–1383.

12. *Obana Hiruoki, Ota Yuji, Miki Ichiro* A position sensorless control method of interior permanent magnet synchronous motor// *Electrical Machines and Systems, ICEMS, Proceeding of the Eighth International Conference.* Sept. 2005. – Vol.1. – P. 215–220.

Надійшла 01.06.2011

Received 01.06.2011