

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

УДК 621.31

### УПРАВЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЕМ ПИТАНИЯ ДАТЧИКОВ ХОЛЛА В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**К.П. Акинин**, докт. техн. наук, **А.Е. Антонов**, докт. техн. наук, **В.Г. Киреев**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина  
e-mail: k.p.aki2017@gmail.com

*Разработаны и исследованы способы управления напряжением питания системой датчиков Холла без потери информации о положении ротора бесконтактного двигателя с постоянными магнитами путем включения напряжения питания датчиков в моменты времени, предшествующие измерениям магнитного поля, и последующего отключения напряжения. Использование таких способов позволяет на порядок и более снизить энергопотребление датчика положения ротора и тем самым повысить КПД магнитоэлектрических систем малой мощности. Библ. 7, рис. 7.*

**Ключевые слова:** магнитоэлектрическая система, бесконтактный двигатель с постоянными магнитами, датчик Холла, управление напряжением питания.

**Введение.** В настоящее время датчики Холла находят широкое распространение для определения положения ротора бесконтактных двигателей с постоянными магнитами (БДПМ). При этом в магнитоэлектрических системах (МЭС) малой мощности на основе БДПМ мощность, потребляемая датчиками Холла, может быть соизмеримой с полезной мощностью на валу двигателя [1].

В [2, 3] описан общий подход, при котором снижение уровня потребления датчиков Холла в различных практических приложениях достигается путем периодического включения и отключения напряжения питания датчиков.

В работе [4] представлен трехфазный электропривод на основе БДПМ с датчиками Холла, в котором выводы их питания подключены к общему управляющему выходу системы управления.

Практика построения МЭС малой мощности на основе БДПМ показывает актуальность энергосбережения за счет управления напряжением питания датчиков Холла. Во-первых, это позволяет повысить КПД МЭС в целом, во-вторых, упростить и минимизировать аппаратную часть источников питания системы управления. При разработке способов энергосбережения при питании датчика положения ротора БДПМ, реализуемого на основе датчиков Холла, последние следует рассматривать как  $n$ -фазную систему с учетом конструктивных особенностей их установки и задач управления двигателем. В таком случае необходимо ответить на ряд вопросов:

- доступны ли конструктивно для подключения выводы питания датчиков Холла или все они подключены электрически к одному источнику питания?
- требуется ли точное определение периодов выходных сигналов датчиков Холла или допустимо их определение с заданной погрешностью?
- какой тип установленных датчиков Холла – дискретные или аналоговые?

**Цель статьи** состоит в разработке и сравнительном исследовании способов управления напряжением питания трехфазной системы датчиков Холла магнитного поля бесконтактного двигателя с постоянными магнитами.

**Первый способ** [5]. В случае доступности для подключения всех выводов питания датчиков Холла и необходимости точного определения периодов выходных сигналов дис-

кретных датчиков предложен способ управления напряжениями питания. В общем случае количество датчиков Холла может быть не меньше двух.

На рис. 1 и 2 показаны функциональная схема трехфазной МЭС и диаграммы сигналов, иллюстрирующие предложенный способ, где ДХ1, ДХ2, ДХ3 – датчики Холла; ЛБ, СУ – логический блок и система управления; БД – БДПМ;  $u_{П1}, u_{П2}, u_{П3}, u_{ДХ1}, u_{ДХ2}, u_{ДХ3}$  – напряжения питания и выходные сигналы трех датчиков Холла;  $u_{С1}, u_{С2}, u_{С3}$  – выходные сигналы логического блока;  $T_3$  – принятая величина задержки включения напряжения питания;  $T_C$  – период сигнала датчика.

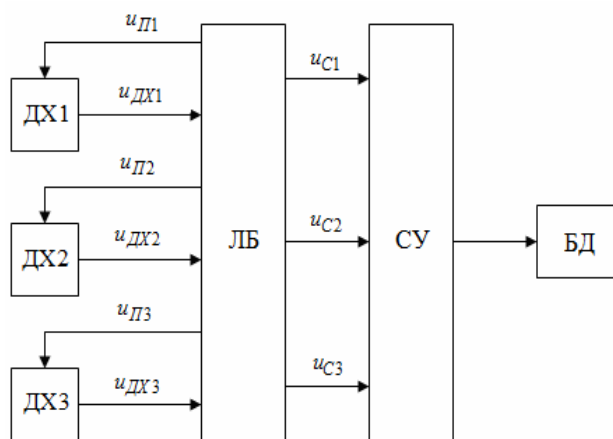


Рис. 1

В начальном состоянии при пуске двигателя на выводы питания датчиков Холла подаются все три напряжения питания, а по мере вращения двигателя и регистрации изменений выходных сигналов датчиков происходит отключение напряжения питания именно того датчика, где произошло очередное изменение. После регистрации изменения сигнала и отключения напряжения питания датчика с задержкой времени  $T_3$  происходит включение напряжения питания следующего по очереди датчика.

Для количественной оценки эффекта экономии электроэнергии определим относительную длительность  $\tau$  подключения датчика Холла к источнику питания:

$$\tau = \frac{2T_{И}}{T_C} = \frac{2(T_{3\max} - T_3)}{T_C},$$

где  $T_{И} = T_{3\max} - T_3$  – длительность импульсов напряжения питания датчиков;  $T_{3\max}$  – максимально возможная длительность задержки времени, которая в установившемся режиме работы двигателя определяется по формуле  $T_{3\max} = \frac{T_C}{2n}$ , где  $n$  – количество датчиков Холла.

Величина  $T_{3\max}$  для интервала времени, на котором формируется задержка, определяется на основании последнего измеренного интервала времени между предыдущим и последним зарегистрированными моментами изменения выходных сигналов датчиков. Таким образом, принятая величина задержки времени  $T_3$  включения напряжения питания на каждом интервале повторяемости не должна превышать последний измеренный интервал повторяемости с некоторым запасом для надежной регистрации моментов изменения выходных сигналов датчиков.

На рис. 2 пунктирными линиями по-

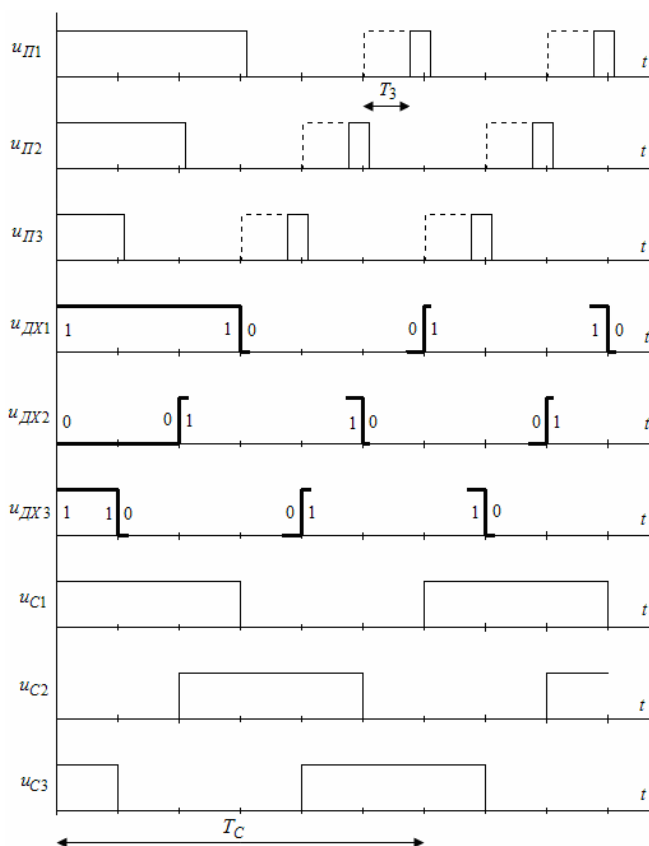


Рис. 2

казаны импульсы напряжения  $u_{П1}$ ,  $u_{П2}$  и  $u_{П3}$  без учета какой-либо задержки. При этом не требуется измерение временных интервалов между моментами регистрации изменения выходных сигналов. Однако в этом случае достигается только трехкратная экономия электроэнергии питания датчиков Холла.

Рекомендации по выбору величины задержки  $T_3$  можно сделать на основании исследований характера изменений параметра  $T_{3\max}$  в случае пуска двигателя при изменении угловой скорости вращения по линейному закону  $\omega(t) = 2\beta t$  при  $0 < t$ , где  $t$  – время;  $2\beta$  – ускорение изменения угловой скорости ротора. При этом фиксированные моменты времени  $t(i)$ , в которые происходят изменения сигналов датчиков, определяются по формуле

$$t(i) = \sqrt{i} \cdot \sqrt{\frac{2\pi}{\beta N}}, \quad \text{где } i \text{ – номер отсчетов. Количество интервалов повторяемости работы}$$

МЭС за один оборот вала двигателя определяется как  $N = 2np$ , где  $p$  – количество пар полюсов ротора двигателя. Тогда определяются значения  $i$ -го интервала времени между моментами регистрации изменений выходных сигналов датчиков  $T_{3\max}(i) = t(i) - t(i-1)$ . Затем определяется отношение следующего и предыдущего значений этих интервалов времени:

$$k_1 = \frac{T_{3\max}(i+1)}{T_{3\max}(i)} = \frac{t(i+1) - t(i)}{t(i) - t(i-1)}.$$

Ряду значений номеров отсчета  $i$ , например: 1; 2; 3; 4; 5; 7; 15, соответствует ряд значений коэффициента  $k_1$ : 0,4142; 0,7674; 0,843; 0,881; 0,904; 0,931; 0,9667. Из этого примера видно, что по мере разгона двигателя величина  $k_1$  приближается к единице, а после значения  $i = 5$  отличие величин  $T_{3\max}(i)$  от  $T_{3\max}(i+1)$  не превышает 10 %. Поэтому в широком диапазоне изменения частоты вращения может быть принято соотношение  $T_3 = 0,9T_{3\max}$ .

В таком случае имеем  $\tau = \frac{0,2 \cdot T_{3\max}}{T} = \frac{0,1}{n}$ . В соответствии с величиной относительной длительности  $\tau$  определяется мощность  $P_{П}$ , потребляемая датчиками Холла при использовании предложенного способа их подключения к источнику питания:

$$P_{П} = n \tau U_{П} I_{П}, \quad (1)$$

где  $U_{П}$  – амплитуда напряжения питания датчиков Холла;  $I_{П}$  – ток потребления одного датчика.

Очевидно, что величина относительной длительности  $\tau$  определяет эффект энергосбережения. В таком случае при  $n = 3$  имеем  $\tau = 0,03333$ , а потребление электрической энергии датчиками Холла оказывается в тридцать раз меньшим по сравнению со случаем стационарного питания датчиков Холла.

**Второй способ [6].** Для случая, когда выводы питания датчиков Холла электрически объединены в одном конструктивном модуле и недоступны для подключения, а также когда необходимо точное определение периодов выходных сигналов дискретных датчиков, рассматривается еще одна модификация способа управления напряжением питания. На рис. 3 и 4 показаны функцио-

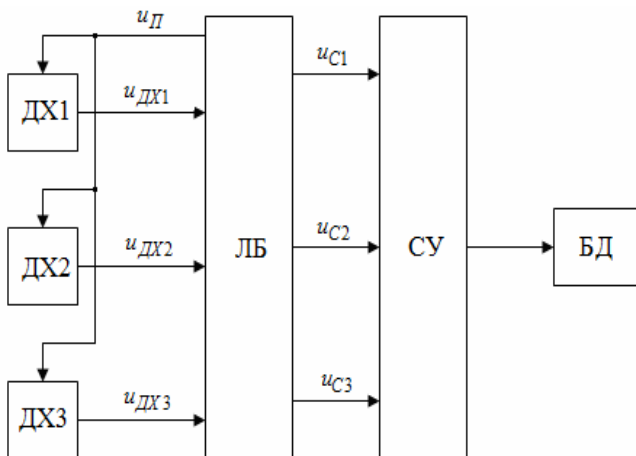


Рис. 3

нальная схема трехфазной МЭС и диаграммы сигналов, иллюстрирующих предложенный способ, где  $u_{II}$  – общее напряжение питания трех датчиков Холла.

Так же, как и в предыдущем способе, в начальном состоянии при пуске двигателя на объединенные выводы питания датчиков Холла подается напряжение питания  $u_{II}$ , однако после первой же регистрации изменения выходного сигнала любого из датчиков отключается напряжение питания и включается с задержкой времени  $T_3$ , величина которой задается так же, как и в предыдущем случае.

Относительная длительность  $\tau$  подключения датчика Холла к источнику питания определяется с учетом количества датчиков  $n$ :

$\tau = \frac{2nT_{II}}{T_C} = \frac{2n(T_{3max} - T_3)}{T_C}$ . В случае принятия допущения

$T_3 = 0,9T_{3max}$  имеем

$$\tau = \frac{0,2nT_{3max}}{T} = 0,1. \tag{2}$$

С учетом (2) и формулы (1) для мощности, потребляемой датчиками Холла, оказывается, что потребление электрической энергии датчиками в десять раз меньше по сравнению со случаем стационарного питания датчиков Холла.

**Третий способ** [7]. Для случая, когда не требуется точное определение периодов выходных сигналов дискретных или аналоговых датчиков Холла, при любой схеме соединения выводов питания датчиков рассматривается способ управления напряжением питания, при котором не осуществляется привязка к моментам изменения выходных сигналов, а напряжение питания подается в виде периодической последовательности импульсов напряжения.

На рис. 5 и 6 показаны диаграммы сигналов, иллюстрирующие данный способ при использовании как дискретных, так и аналоговых датчиков, где  $u_{II n}$ ,  $u_{ДХ n}$ ,  $u_{С n}$  – напряжения питания, выходных сигналов датчиков Холла и входных сигналов системы управления, где  $n$  – количество датчиков Холла;  $f_n(i)$  – решетчатая функция, которая формируется на основании регистрации выходных сигналов датчиков Холла;  $T_k$  – период следования импульсов напряжения.

Из рис. 5 и 6 видно, что напряжения питания  $u_{II n}$  датчиков Холла представляют собой последовательности, а в случае объединения выводов питания датчиков в одну точку – одну последовательность импульсов напряжения, которая определяется периодом  $T_k$  следо-

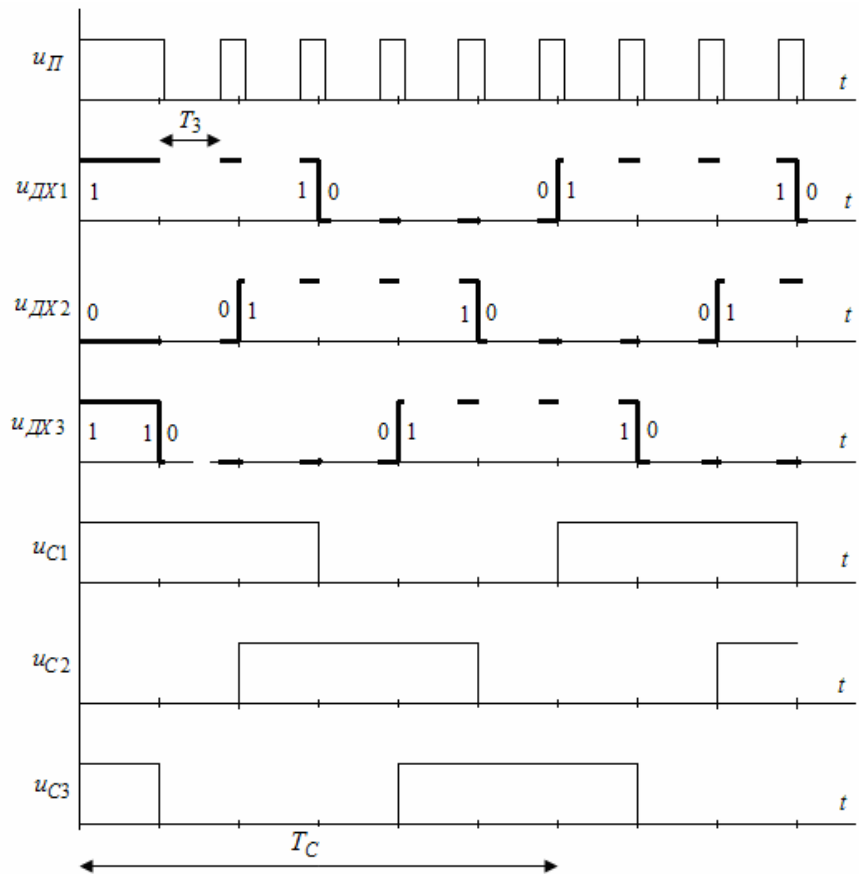


Рис. 4

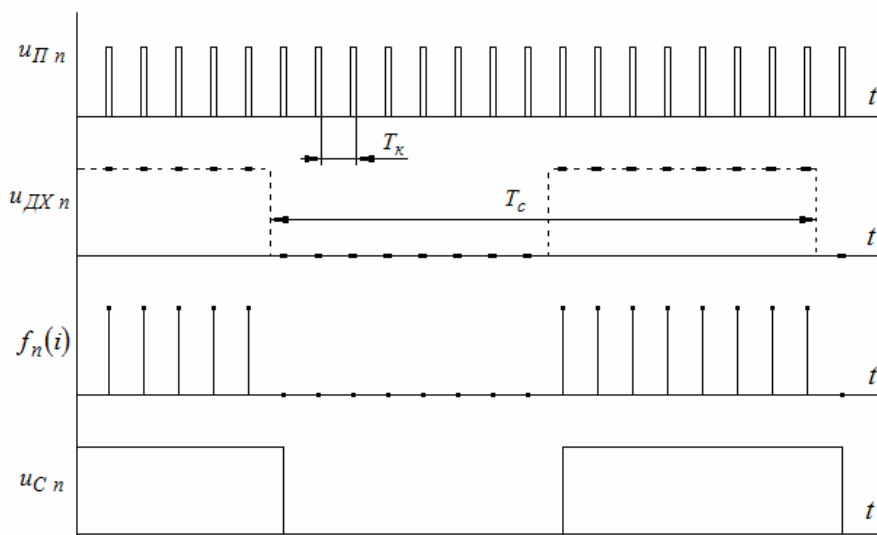


Рис. 5

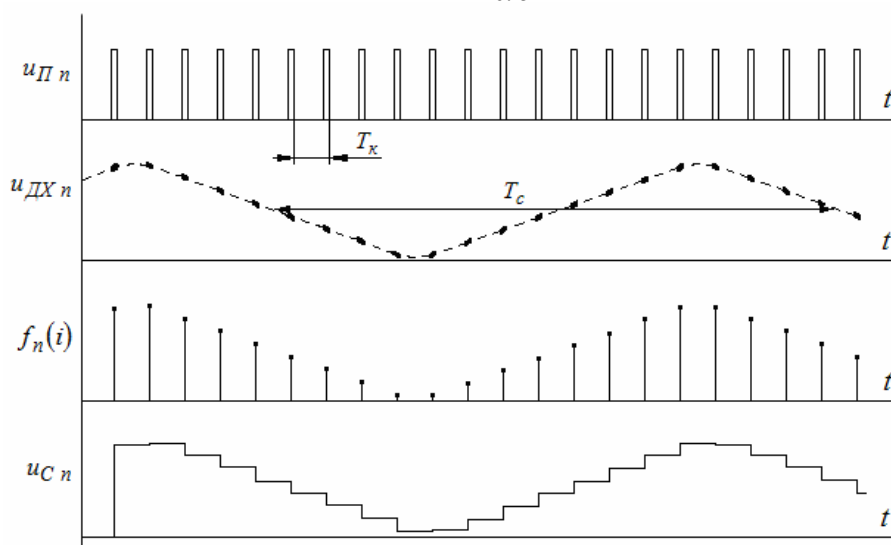


Рис. 6

вания импульсов и их длительностью  $T_{II}$ . На интервалах присутствия напряжения питания на выходах датчиков Холла поддерживаются сигналы  $u_{ДХn}$ , обозначенные на рисунках жирными линиями, которые в логическом блоке запоминаются в виде последовательностей значений решетчатых функций  $f_n(i)$ . На основании полученных данных формируются входные сигналы  $u_{Сn}$  системы управления, соответствующие положению ротора.

Длительность  $T_m$  импульсов напряжения питания  $u_{Пn}$  определяется временем, необходимым для установления на выходе датчиков Холла информативного сигнала и регистрации его значения в блоке регистрации и управления.

Период  $T_k$  следования импульсов напряжения питания  $u_{Пn}$  определяется в соответствии со значением допустимой ошибки  $\varepsilon$  определения периода  $T_c$  сигнала датчика  $T_k = \varepsilon T_c$ .

Управление бесконтактным двигателем может осуществляться как с рассчитанной заранее номинальной величиной периода  $T_c$  (если двигатель должен вращаться с заданной наперед угловой скоростью), так и с величиной периода  $T_c$ , которая периодически измеряется (если угловая скорость изменяется в процессе работы двигателя).

Эффект экономии электроэнергии, потребляемой датчиками Холла, определяется рядом факторов: временем, необходимым для установления на выходе датчика Холла информативного сигнала и его регистрации, погрешностью  $\varepsilon$  определения периода  $T_c$  выходного сигнала датчика, величина которого может изменяться в широких пределах, обратно пропорционально значению частоты вращения двигателя  $T_c = \frac{2\pi}{\omega}$ .

Таким образом, эффект экономии электроэнергии определяется относительной длительностью  $\tau$  подключения датчика Холла к источнику питания:

$$\tau = \frac{T_m}{T_k} = \frac{T_m \omega}{2\pi\varepsilon}.$$

По формуле (1) в соответствии с величиной относительной длительности  $\tau$  определя-

ется мощность  $P_{II}$ , потребляемая датчиками Холла при использовании данного способа их подключения к источнику питания. Например, при  $T_m = 0,000004 \text{ с}$ ,  $\varepsilon = 0,01$  и трех значениях частоты вращения  $\omega_1 = 314 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_1 = 31,4 \text{ с}^{-1}$  и  $\omega_1 = 3,14 \text{ с}^{-1}$  достигаются значения относительной длительности  $\tau$ : 0,02; 0,002 и 0,0002. То есть при таких условиях потребления электрической энергии датчиками Холла оказывается в 50, 500 и 5000 раз меньше, чем в случае непрерывного питания датчиков Холла.

**Четвертый способ как комбинация предыдущих.** В случае конструктивной доступности всех выводов питания дискретных датчиков Холла возможна реализация комбинированного способа управления напряжением питания путем сочетания первого и третьего способов управления. Диаграммы сигналов, иллюстрирующие комбинированный способ управления, обозначены на рис. 7, где условно показаны импульсы напряжения питания и соответствующие им выходные сигналы датчиков.

Пачки импульсов напряжения питания подаются заблаговременно в течение одного интервала повторяемости, при этом не предполагается измерение временных интервалов между соседними импульсами. Использование такого способа обеспечивает дополнительно трехкратную экономию электроэнергии по сравнению с третьим способом управления.

**Выводы.** Предложенные способы управления напряжением питания датчиков Холла в разной мере позволяют экономить электроэнергию питания датчиков. Отметим некоторые их особенности.

В первом и втором способах управления напряжением возможно точное измерение периода или временных интервалов изменения выходных сигналов датчиков Холла, однако если в этом нет необходимости, измерение этих интервалов усложняет алгоритм управления напряжением питания. Кроме того, заблаговременное подключение напряжения питания с целью надежной регистрации предстоящего изменения сигнала не позволяет в полной мере минимизировать потребление датчиков Холла.

В третьем способе исключается привязка формирования импульсов напряжения к моментам изменения выходных сигналов, поэтому не требуется измерение на каждом интервале повторяемости временных интервалов, а способ управления оказывается значительно проще и сводится к формированию равномерной последовательности импульсов напряжения питания датчиков Холла. При этом энергосбережение обеспечивается уже с самого начала пуска двигателя. Задание периода следования импульсов напряжения питания может осуще-

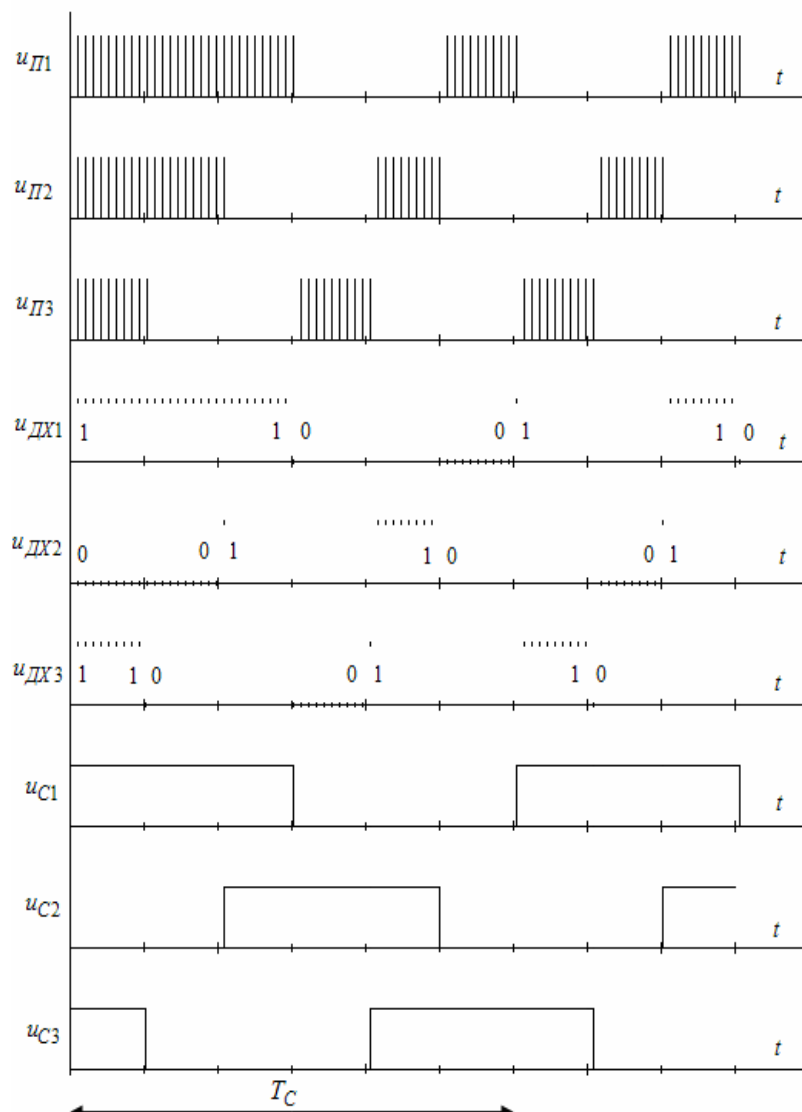


Рис. 7

ствляться на основани заданной точности определения периода и приближенно измеренной величины периода выходных сигналов датчиков.

В четвертом способе достигается дополнительная экономия электроэнергии по сравнению с третьим вариантом.

1. Антонов А.Е., Акинин К.П., Киреев В.Г. Особенности построения электромеханической системы ориентации наноспутника на основе бесконтактного магнитоэлектрического двигателя. *Технічна електродинаміка*. 2017. № 4. С. 36–40.
2. Пазюк А. Теперь и Холловские: Новые датчики магнитного поля от Texas Instruments. *Новости электроники*. 2015. № 10. С. 26–30.
3. Айзенбис Рос. Системы управлением питанием на базе магнитных датчиков. *Новости электроники*. 2017. № 6. С. 33–35.
4. Takamori Yasuyuki Motor Drive Device: Patent WO 2016/084294 A1; 02.06.2016.
5. Акинін К.П., Антонов О.Є., Кіреєв В.Г. Спосіб підключення дискретних датчиків Холла до системи керування безконтактним двигуном з постійними магнітами. Пат. України № 117512. 2016.
6. Акинін К.П., Антонов О.Є., Кіреєв В.Г. Спосіб підключення дискретних датчиків Холла до системи керування безконтактним двигуном з постійними магнітами. Пат. України № а 2016 07830. 2016.
7. Акинін К.П., Антонов О.Є., Кіреєв В.Г. Спосіб підключення датчиків Холла до системи керування безконтактним двигуном з постійними магнітами. Пат. України № а 2016 09268.2016.

УДК 621.31

**К.П. Акинін**, докт. техн. наук, **О.С. Антонов**, докт. техн. наук, **В.Г. Кіреєв**, канд. техн. наук

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна

#### **КЕРУВАННЯ НАПРУГОЮ ЖИВЛЕННЯ ДАТЧИКІВ ХОЛЛА У МАГНІТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ**

*Розроблено та досліджено способи керування напругою живлення системи датчиків Холла без втрати інформації про положення ротора безконтактного двигуна з постійними магнітами шляхом вмикання напруги живлення у моменти часу, що передують змінам магнітного поля, та наступного вимикання напруги. Використання таких способів дає змогу на порядок та більше зменшити енергоспоживання датчика положення ротора та підвищити ККД магнітоелектричних систем малої потужності. Бібл. 7, рис. 7.*

**Ключові слова:** магнітоелектрична система, безконтактний двигун з постійними магнітами, датчик Холла, керування напругою живлення.

**K. Akynin, O. Antonov V. Kireiev**

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

#### **SUPPLY VOLTAGE CONTROL OF HALL SENSORS FOR LOW POWER MAGNETO-ELECTRIC SYSTEMS**

*The methods of control of the supply voltage of the Hall sensor system are developed and investigated when reducing the time of sensors operation without information losing about the rotor position of a permanent magnet brushless motor. Using of such approaches allow increase the efficiency of low power magneto-electric systems and minimize hardware part of their supply sources. References 7, figures 7.*

**Key words:** magneto-electric brushless system, permanent magnet brushless motor, Hall sensor, supply voltage control.

1. Antonov A., Akynin K., Kireiev V. Creation features of electromechanical system for nanosatellite orientation on the basis of brushless magneto-electric motor. *Tekhnichna Electrodynamika*. 2017. No 4. Pp. 36–40. (Rus)
2. Pazyuk A. Now Hall's: New magnetic field sensors from Texas Instruments. *Novosti electronici*. 2015. No 10. Pp. 26–30. (Rus)
3. Eisenbis Ros. Power control systems based on magnetic sensors. *Novosti electronici*. 2017. No 6. Pp. 33–35. (Rus)
4. Takamori Yasuyuki Motor Drive Device: Patent WO 2016/084294 A1; 06/02/2016.
5. Akynin K., Antonov O., Kireiev V. Connecting method of discrete Hall sensors to control system of brushless motor with permanent magnets: Patent of Ukraine № 117512. 2016. (Ukr)
6. Akynin K., Antonov O., Kireiev V. Connecting method of discrete Hall sensors to control system of brushless motor with permanent magnets. Patent of Ukraine № а 07830. 2016. (Ukr)
7. Akynin K., Antonov O., Kireiev V. Connecting method of Hall sensors to control system of brushless motor with permanent magnets. Patent of Ukraine № а 09268. 2016. (Ukr)

Надійшла 18.02.2019

Received 18.022019