

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ В РЕЖИМЕ КВАЗИОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ СИНХРОНИЗАЦИИ

Электропривод с фазовой синхронизацией широко используется в тепловизионных и лазерных сканирующих системах благодаря высоким точностным показателям и хорошим динамическим характеристикам в широком диапазоне регулирования угловой скорости. В статье дано описание разработанных способов квазиоптимального по быстродействию регулирования электропривода с фазовой синхронизацией и представлен сравнительный анализ предложенных алгоритмов управления.

**Ключевые слова:** электропривод с фазовой синхронизацией, многофункциональное логическое устройство сравнения, импульсный частотно-фазовый дискриминатор, оптимальное управление.

*Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 16-08-00325а «Разработка и исследование способов управления синхронно-синфазным электроприводом, реализованных на основе комплексного подхода к обеспечению высоких показателей качества регулирования в широком диапазоне угловых скоростей в режимах стабилизации и слежения».*

Перспективной основой для разработки электропривода с высокими точностными характеристиками являются системы управления, построенные на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) [1–11], которые позволяют обеспечить более высокую точность регулирования по сравнению с цифровыми и аналоговыми системами автоматического управления (САУ). В электроприводе с фазовой синхронизацией (ЭПФС) в качестве частотного задающего сигнала используется сигнал  $f_{on}$ , формируемый с помощью блока задания частоты (БЗЧ), выполненного на основе высокоточного кварцевого генератора; в качестве импульсного сигнала обратной связи — сигнал  $f_{oc}$ , формируемый на выходе импульсного датчика частоты (ИДЧ) вращения, реализованного на основе фотоэлектрического преобразователя с высокими точностными характеристиками, а в качестве сравнивающего элемента — логическое устройство сравнения (ЛУС) частот ( $\Delta\omega$ ) и фаз ( $\Delta\varphi$ ) двух импульсных последовательностей (рис. 1, где МЛУС — многофункциональное ЛУС, БУ — блок управления, С — сумматор, СП — силовой преобразователь, ЭД — электродвигатель).

В соответствии с принципом ФАПЧ алгоритм функционирования ЛУС обеспечивает три режима работы электропривода: режим разгона с максимальным ускорением ( $f_{on} > f_{oc}$ , разомкнутая САУ),

режим синхронизации ( $f_{on} \approx f_{oc}$ , режим управления с обратной связью, замкнутая САУ) и режим торможения с максимальным ускорением ( $f_{on} < f_{oc}$ , разомкнутая САУ). Реализация такого алгоритма работы электропривода обеспечивается благодаря наличию трех режимов работы ЛУС: режима насыщения при  $f_{on} > f_{oc}$  ( $\gamma = 1$ ), режима фазового сравнения при  $f_{on} \approx f_{oc}$  ( $\gamma = \Delta\varphi$ ) и режима насыщения при  $f_{on} < f_{oc}$  ( $\gamma = 0$ ).

В качестве ЛУС в ЭПФС широко используются схемы импульсного частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД) с расширенными функциональными возможностями [12]:

- индикация режимов работы ИЧФД ( $P$  — пропорциональный или режим фазового сравнения,  $R$ ,  $T$  — режимы насыщения);
- индикация моментов времени изменения режимов работы ИЧФД;
- принудительное изменение режима работы ИЧФД ( $Y_n$  — сигнал принудительной установки ИЧФД в пропорциональный режим).

На основе такого ЛУС может быть построено МЛУС, реализующее дополнительные функции косвенного измерения ошибки по углу, ошибки по угловой скорости, ускорения.

Блок управления совместно с сумматором в основном реализует функции корректирующего устройства, но дополнительно обеспечивает форми-

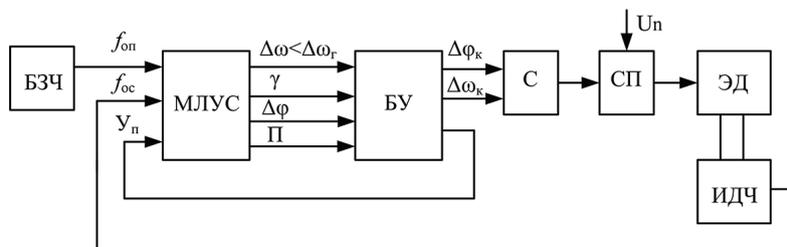


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией

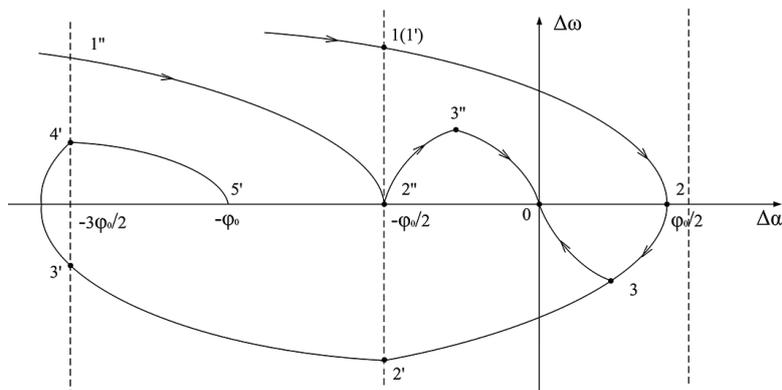


Рис. 2. Фазовый портрет работы ЭПФС с улучшенными динамическими показателями

рование сигналов, необходимых для реализации используемых алгоритмов управления ЭПФС.

Наиболее широко в ЭПФС в качестве ЛУС применяются ИЧФД, алгоритм функционирования которых основан на изменении режима их работы в моменты прихода двух импульсов одной из частот  $f_{on}$  или  $f_{oc}$  между двумя соседними импульсами другой частоты. В эти моменты времени осуществляется сравнение периодов частот  $f_{on}$  и  $f_{oc}$ , что определяет простоту реализации ИЧФД, но характеризуется некоторой задержкой в формировании информации о сравнении входных частот ИЧФД. Наличие временной задержки в определении ошибки по угловой скорости является причиной перерегулирования ЭПФС по  $\Delta\omega$  при переходе в режим синхронизации, поэтому для повышения быстродействия и уменьшения перерегулирования электропривода используются различные способы опережающей разблокировки ИЧФД и организации управления ЭПФС в области ошибок по частоте вращения  $|\Delta\omega| < \sqrt{2\varphi_0\varepsilon_m} = \Delta\omega_r$ .

Целью статьи является разработка способов квазиоптимального по быстродействию регулирования ЭПФС и проведение сравнительного анализа предложенных алгоритмов управления.

Удобным средством для исследования ЭПФС является метод фазовой плоскости, позволяющий получить наглядную информацию о работе нелинейной САУ с переменной структурой. На рис. 2 приведены три фазовые траектории:

- траектория, обозначенная цифрами 1'-2'-3'-4'-5', соответствует работе ЭПФС с обычным алгоритмом работы ИЧФД;

- траектории, обозначенные цифрами 1-2-3-0 и 1''-2''-3''-0, соответствуют работе ЭПФС с организацией квазиоптимального по быстродействию регулирования (в импульсной САУ не может быть организовано оптимальное управление), реализуе-

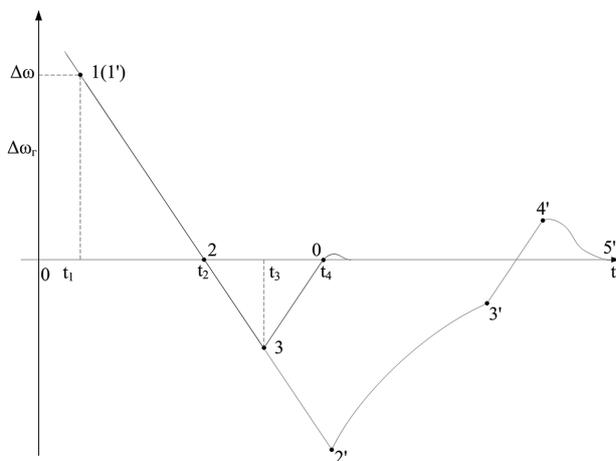


Рис. 3. Временные диаграммы изменения ошибки по угловой скорости в режиме синхронизации

мого перед началом режима синхронизации (рис. 2, точки фазовой траектории, обозначенные цифрами с двумя штрихами, соответствуют точкам фазовой траектории с другими начальными условиями по  $\Delta\alpha$  и  $\Delta\omega$  в режиме синхронизации).

Для обычного алгоритма работы ИЧФД:

- участок фазовой траектории 1'-2' соответствует режиму разгона электропривода с максимальным ускорением;
- участок 2'-3' — пропорциональному режиму работы электропривода;
- участок 3'-4' — режиму торможения электропривода с максимальным ускорением;
- участок 4'-5' — пропорциональному режиму работы электропривода (синхронизация ЭПФС в точке 5').

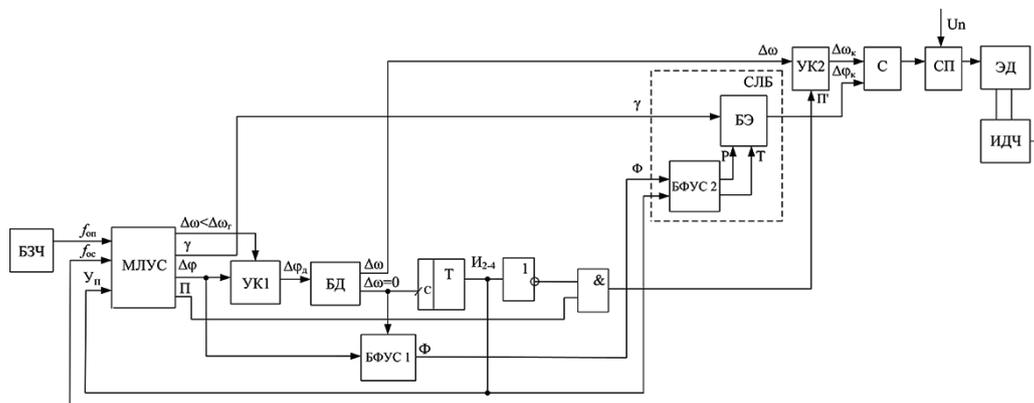


Рис. 4. Функциональная схема ЭПФС с квазиоптимальной по быстродействию синхронизацией (вариант 1)

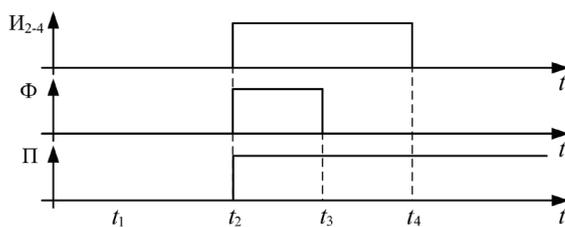


Рис. 5. Временные диаграммы управляющих сигналов в системе управления электроприводом

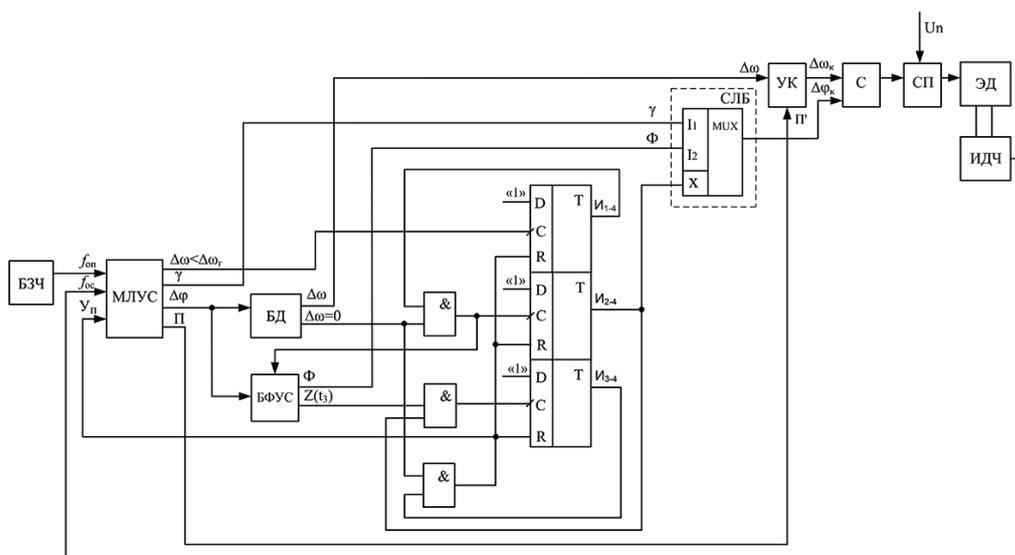


Рис. 6. Функциональная схема ЭПФС с квазиоптимальной по быстродействию синхронизацией (вариант 2)

Для квазиоптимального по быстродействию режима синхронизации:

— участок фазовой траектории 1-2-3 соответствует режиму разгона электропривода с максимальным ускорением;

— участок фазовой траектории 3-0 соответствует режиму торможения электропривода с максимальным ускорением с последующей синхронизацией в точке 0.

Работа ЭПФС поясняется временными диаграммами, приведенными на рис. 3:

— для обычного алгоритма работы ИЧФД — временная диаграмма, участки которой обозначены на графике точками 1'-2'-3'-4'-5');

— для квазиоптимального по быстродействию регулирования временная диаграмма, участки которой обозначены на графике точками 1-2-3-0).

Для практической реализации квазиоптимального по быстродействию режима синхронизации предлагается функциональная схема ЭПФС [13] (рис. 4, где БФУС — блок формирования управляющих сигналов, УК — управляемый ключ, БД — блок дифференцирования, БЭ — блокирующий элемент, СЛБ — схема логической блокировки) с реализацией блока управления на основе счетного триггера Т.

На временном интервале  $t_1 - t_2$  значение ошибки по угловой скорости  $\Delta\omega$  становится меньше величины  $\Delta\omega_r$ , в результате открывается УК1, разрешая

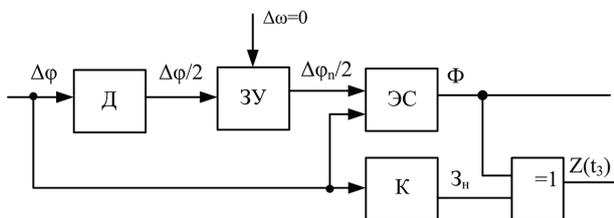


Рис. 7. Функциональная схема БФУС

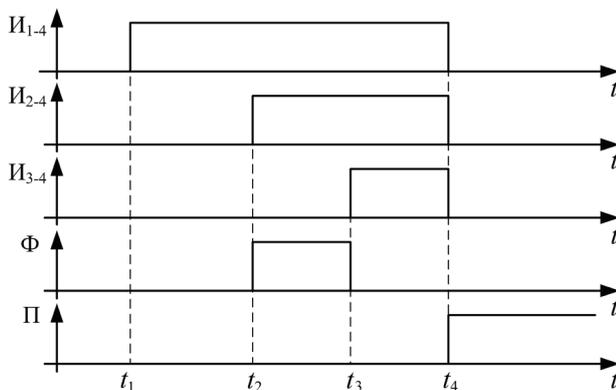


Рис. 8. Временные диаграммы управляющих сигналов в системе управления электроприводом

Таблица 1

Вариант № 1	Вариант № 2
1. В момент времени $t_1$ : $\Delta\omega < \Delta\omega_r$ (интервал $t_1 - t_2$ )	
$\Delta\omega_x = 0$ , $\Delta\varphi_x = \gamma = 1$ , разгон ЭПФС	
Формируется сигнал $I_{1-4}$ .	Разрешение операции дифференцирования $\Delta\varphi$ .
2. В момент времени $t_2$ : $\Delta\omega = 0$ (формируется интервал $t_2 - t_3$ )	
В БФУС запоминается половина начального значения фазовой ошибки $\Delta\varphi_n(t_2)$ , $\Delta\omega_x = 0$ , $\Delta\varphi_x = \Phi$ , $\Phi = 1$ при $(\Delta\varphi - \Delta\varphi_n/2) > 0$ (разгон), $\Phi = 0$ при $(\Delta\varphi - \Delta\varphi_n/2) < 0$ (торможение)	
Интервал $t_2 - t_4$ (сигнал $I_{2-4}$ ) формируется с помощью D-триггера. ИЧФД находится в режиме насыщения при разгоне.	Интервал $t_2 - t_4$ (сигнал $I_{2-4}$ ) формируется с помощью T-триггера. ИЧФД переводится в режим фазового сравнения.
3. В момент времени $t_3$ , $\Delta\varphi = \Delta\varphi_n/2$ (интервал $t_3 - t_4$ )	
Значение $\Phi$ изменяется на противоположное (и соответственно $\Delta\varphi_x$ )	
Формируется сигнал $I_{3-4}$ .	
4. В момент времени $t_4$ , повторно $\Delta\omega = 0$ (интервал $t_4 - t_0$ )	
$\Delta\omega_x = \Delta\omega$ , $\Delta\varphi_x = \gamma = \Delta\varphi$	
D-триггеры устанавливаются в состояние логического «0» ( $I_{1-4} = 0$ , $I_{2-4} = 0$ , $I_{3-4} = 0$ ). ИЧФД переводится в режим фазового сравнения.	T-триггер изменяет состояние на противоположное ( $I_{2-4} = 0$ ).

операцию дифференцирования сигнала фазовой ошибки  $\Delta\varphi$  в блоке дифференцирования. Управляемый ключ УК2 закрыт сигналом  $\Pi$ , поэтому сигнал ошибки по угловой скорости не проходит на первый вход сумматора. На второй вход сумматора через СЛБ проходит сигнал  $\gamma = 1$ , соответствующий разгону электропривода.

На временном интервале  $t_2 - t_3$  в БД формируется сигнал  $\Delta\omega = 0$ , по которому счетный триггер устанавливается в состояние логической «1» ( $I_{2-4} = 1$ ). При поступлении данного сигнала на вход  $Y_n$  МЛУС осуществляется принудительный перевод его в режим фазового сравнения. Этот же сигнал, поступая на вход СЛБ, разрешает прохождение на его выход сигнала  $\Phi$ , логическое значение которого на интервале  $t_2 - t_3$  определяется знаком начальной фазовой ошибки, определяемым в момент времени  $t_2$ , соответствующий значению  $\Delta\omega = 0$ . На первый вход сумматора сигнал  $\Delta\varphi$  не проходит (ключ УК2 закрыт), на второй вход сумматора проходит сигнал  $\Phi$ , при положительном значении фазовой ошибки обеспечивая продолжение режима разгона электропривода.

На временном интервале  $t_3 - t_4$  значение сигнала  $\Phi$  меняется на противоположное, в результате электропривод переводится в режим торможения.

В момент времени  $t_4$  значение  $\Delta\omega$  становится равным 0, счетный триггер устанавливается в состояние логического 0, обеспечивая прохождение на второй вход сумматора сигнала  $\gamma = \Delta\varphi$ . При этом на первый вход сумматора через открытый УК2 проходит сигнал  $\Delta\omega$ . В результате электропривод переводится в режим замкнутого управления, в котором осуществляется окончательная синхронизация ЭПФС.

На временных диаграммах (рис. 5) представлены управляющие сигналы в системе управления ЭПФС.

Предлагается второй вариант функциональной схемы ЭПФС с квазиоптимальным по быстродействию режимом синхронизации с реализацией блока управления на основе D-триггеров [14, 15], представленный на рис. 6.

На временном интервале  $t_1 - t_2$  значение ошибки по угловой скорости  $\Delta\omega$  становится меньше величины  $\Delta\omega_r$ , в результате первый D-триггер устанавливается в состояние логической «1» (сигнал  $I_{1-4}$ ), подготавливая второй D-триггер к установке в состояние логической «1» в момент появления сигнала на выходе БД  $\Delta\omega = 0$ . Управляемый ключ УК закрыт сигналом  $\Pi$ , поэтому сигнал ошибки по угловой скорости не проходит на первый вход сумматора. На второй вход сумматора через СЛБ проходит сигнал  $\gamma = 1$ , соответствующий разгону электропривода.

На временном интервале  $t_2 - t_3$  в момент времени  $t_2$  в БД формируется сигнал  $\Delta\omega = 0$ , по которому второй D-триггер устанавливается в состояние логической «1» (сигнал  $I_{2-4}$ ), подготавливая третий D-триггер к установке в состояние логической «1» в момент появления сигнала  $z(t_3)$  на выходе БФУС (рис. 7, где Д — делитель частоты на 2, ЗУ — запоминающее устройство, ЭС — элемент сравнения, К — компаратор). Сигнал  $I_{2-4}$ , поступая на адресный вход мультиплексора в СЛБ, разрешает прохождение сигнала  $\Phi$  через СЛБ на второй вход сумматора. Сигнал  $\Phi$  формируется в БФУС аналогично функциональной схеме, приведенной на рис. 4. Управляемый ключ УК закрыт сигналом  $\Pi$ , поэтому сигнал ошибки по угловой скорости не проходит

на первый вход сумматора, и при положительной значении начальной фазовой ошибки продолжается разгон электропривода.

На временном интервале  $t_3 - t_4$  значение сигнала  $\Phi$  на выходе БФУС меняется на противоположное, обеспечивая перевод электропривода в режим торможения, формируется сигнал  $z(t_3)$ , по которому третий D-триггер устанавливается в состояние логической «1», подготавливая все D-триггеры к одновременной установке в состояние логического «0» в момент повторного появления сигнала  $\Delta\omega = 0$ .

В момент времени  $t_4$  значение  $\Delta\omega$  становится равным 0, все D-триггеры устанавливаются в состояние логического «0», и МЛУС принудительно переводится в режим фазового сравнения. На выходе МЛУС формируется сигнал П, по которому открывается УК для прохождения сигнала  $\Delta\omega$  на первый вход сумматора. На второй вход сумматора через СЛБ проходит сигнал  $\gamma = \Delta\phi$ , и ЭПФС переводится в режим замкнутого управления, в котором осуществляется окончательная синхронизация электропривода.

На временных диаграммах (рис. 8) представлены управляющие сигналы в системе управления ЭПФС.

В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа предложенных способов квазиоптимальной по быстродействию синхронизации.

Из приведенного сравнительного анализа следует, что к основному недостатку первого варианта способа квазиоптимальной по быстродействию синхронизации можно отнести возможные ложные срабатывания Т-триггера при наличии помех в области значений ошибки по угловой скорости, близких к 0. Для исключения ложных срабатываний необходима доработка функциональной схемы (рис. 4) путем дополнительного использования на входе Т-триггера компаратора, охваченного положительной обратной связью. Кроме того, целесообразно выполнение СЛБ в виде мультиплексора, аналогично функциональной схеме (рис. 6), что позволит упростить реализацию электропривода.

Рассмотренные способы квазиоптимальной по быстродействию синхронизации могут эффективно применяться при построении ЭПФС с улучшенными динамическими характеристиками.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании высокоточных электроприводов для сканирующих и обзорно-поисковых систем.

### Благодарности

Автор выражает благодарность своему научному руководителю — доктору технических наук, профессору Бубнову Алексею Владимировичу за ценные советы и рекомендации при работе над материалом статьи.

### Библиографический список

1. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. М.: Энергоиздат, 1982. 169 с.
2. Hsieh G. C., Hung J. C. Phase-Locked Loop Techniques. A Survey // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, Issue 6. P. 609–615. DOI 10.1109/41.544547.

3. Best R. E. Phase-Locked Loops: Design, Simulation, and Applications. NY: McGraw-Hill, 2003. 421 p.

4. Wu Y., Zhao H., Zhao N. PLL Control System Based on FPGA for Brushless DC Motor // Proc. of the 33rd Chinese Control Conf. Nanjing, China. 2014. P. 7897–7902. DOI: 10.1109/CHIC.2014.6896319.

5. Pan C.-T., Fang E. A Phase-Locked-Loop-Assisted Internal Model Adjustable-Speed Controller for BLDC Motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, Issue 9. P. 3415–3425. DOI: 10.1109/TIE.2008.922600.

6. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-Locked Loop in Constant Speed Control for the Flywheel Motor // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 6. P. 323–330. DOI: 10.1007/978-3-642-25778-0\_45.

7. Lanza P. T., Shtessel Y. B., Stensby J. L. Improved Acquisition in a Phase-Locked Loop Using Sliding Mode Control Techniques // Journal of the Franklin Institute. 2015. Vol. 352 (10). P. 4188–4204. DOI: 10.1016/j.jfranklin.2015.06.001.

8. Nondahl T., Liu J., Schmidt P. [et al.]. Transition Scheme for Position Sensorless Control of AC Motor Drives. US Patent 2016/0056740; filed Decembe 10nd, 2014; published February 25nd, 2016.

9. Xue F. [et al.]. Passivity-Based Control for PhaseLocked Loop Induction Motor Drive // IEEE Int. Symp. on Ind. Electron. Proc. Pusan, Korea, 2001. P. 1130–1134. DOI: 101109/ISIE.2001.931636.

10. Yu W., Luo Y., Chen Y.-Q., Pi Y.-G. Frequency Domain Modelling and Control of Fractional-Order System for Permanent Magnet Synchronous Motor Velocity Servosystem // IET Control Theory & Applicat. 2016. Vol. 10, issue 2. P. 136–143. DOI: 10.1049/iet-cta.2014.1296.

11. Аристов А. В., Аристова Л. И. Предельные характеристики оптико-механических систем со сканированием // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2015. Т. 15, № 1. С. 41–46.

12. Бубнов А. В., Бирюков С. В., Четверик А. Н. Особенности построения синхронно-синфазного электропривода на основе многофункционального логического устройства сравнения с косвенным определением ошибки по угловой скорости // Омский научный вестник. 2017. № 4 (154). С. 31–36.

13. Пат. 2585241 РФ, МПК H02P 7/292. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Четверик А. Н. № 2015117067/07; заявл. 05.05.2015; опубл. 27.05.2016. Бюл. № 15. 2 с.

14. Бубнов А. В., Четверик А. Н. Разработка способов управления электроприводом с фазовой синхронизацией с улучшенными динамическими показателями // Омский научный вестник. 2016. № 5 (149). С. 62–67.

15. Пат. 2621288 Российская Федерация, МПК H03K 19/00, H02P 7/00. Стабилизированный электропривод / Бубнов А. В., Четверик А. Н. № 2016123677; заявл. 14.06.2016; опубл. 01.06.2017, Бюл. № 16. 13 с.

**ЧЕТВЕРИК Алина Наилевна**, старший преподаватель кафедры «Электрическая техника».

Адрес для переписки: [alina.an@mail.ru](mailto:alina.an@mail.ru)

### Для цитирования

Четверик А. Н. Сравнительный анализ способов управления стабилизированным электроприводом в режиме квазиоптимальной по быстродействию синхронизации // Омский научный вестник. 2018. № 1 (157). С. 45–49. DOI: 10.25206/1813-8225-2018-157-45-49.

Статья поступила в редакцию 25.12.2017 г.

© А. Н. Четверик