

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
И УСТРОЙСТВ

MODELING OF PROCESSES  
AND DEVICES

УДК 62-8:62-187.4:004

## Особенности использования методов цифровых систем управления в исследованиях электропривода с фазовой синхронизацией\*

А.В. БУБНОВ<sup>1</sup>, А.М. ДАЙНОВИЧ<sup>2</sup>, А.Н. АЛПЫСОВА<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, д. т. н., профессор, e-mail: bubnov-av@bk.ru

<sup>2</sup> 644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, студент факультета элитного образования и магистратуры, e-mail: daïnovich-alex@mail.ru

<sup>3</sup> 644050, РФ, г. Омск, пр. Мира, 11, Омский государственный технический университет, старший преподаватель кафедры электрической техники, e-mail: alpysova.an@mail.ru

Статья посвящена исследованию электропривода с фазовой синхронизацией (ЭПФС), построенного на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) вращения. В работе рассмотрены особенности влияния различных способов модуляции на качество передачи сигнала в ЭПФС. Авторами проведены расчеты с применением ЭВМ на основе специального алгоритма, разработанного в программе Matlab. На основании результатов, полученных в ходе работы программы, построены сравнительные зависимости влияния ШИМ и цифровой модуляции на качество передачи сигнала электропривода с фазовой синхронизацией. Полученные результаты позволяют авторам сделать вывод о том, что погрешности исследуемых видов модуляции совпадают в определенном диапазоне частот дискретизации, что позволяет использовать методы цифровых систем управления для анализа динамических процессов в электроприводе с фазовой синхронизацией вместо методов нелинейных импульсных систем. Для подтверждения полученных результатов в работе проводится имитационное моделирование исследуемых преобразователей сигналов и с применением ЭВМ. Результаты имитационного моделирования подтверждают проведенные аналитические расчеты. Для улучшения динамических характеристик электропривода авторами предлагается модернизированный алгоритм преобразования сигнала. Для сравнительного исследования исходных и модернизированных преобразователей сигнала в работе проводится имитационное моделирование в программе Matlab. Результаты моделирования модифицированных преобразователей сигналов позволяют сделать вывод с одной стороны о повышении запаса устойчивости электропривода, а с другой стороны о сужении области применения цифровых методов исследования в ЭПФС.

**Ключевые слова:** сканирующая система, электропривод с фазовой синхронизацией, фазовая автоподстройка частоты, широтно-импульсная модуляция, цифровая модуляция, цифровые системы управления, дискретизация сигналов, алгоритм преобразования, схема выборки-хранения

### ВВЕДЕНИЕ

В оптико-механических обзорно-поисковых и сканирующих системах широко используется электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), реализуемый на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Использование в ЭПФС принципа ФАПЧ позволяет получить высокое быстродействие и точностные показатели, превышающие показатели электропривода с цифровым датчиком углового положения, обеспечить широкий диапазон регулирования угловой скорости  $\omega$  [1].

\* Статья получена 30 апреля 2014 г.

Работа выполнена в рамках гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект №14-08-31109 «Улучшение динамических показателей качества регулирования прецизионного электропривода».

Функциональная схема ЭПФС приведена на рис. 1, где ГВЧ – генератор высокой частоты, ИЧФД – импульсный частотно-фазовый дискриминатор, ДМ – демодулятор, БУ – блок управления, ЭД – электродвигатель, ИДЧ – импульсный датчик частоты вращения.

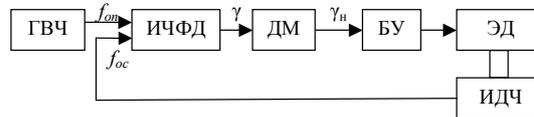


Рис. 1. Функциональная схема контура ЭПФС

В соответствии с принципом ФАПЧ, сигнал задания электропривода по частоте вращения  $f_{on}$  представляет собой импульсный сигнал, формируемый с помощью высокостабильного кварцевого генератора ГВЧ, сигнал обратной связи  $f_{oc}$  формируется с помощью ИДЧ, выполненного на основе растрового фотоэлектрического преобразователя, а сравнение фаз и частот импульсных сигналов  $f_{on}$  и  $f_{oc}$  осуществляется с помощью логического устройства сравнения (ЛУС), обычно реализуемого на основе импульсного частотно-фазового дискриминатора. Выходной сигнал ЛУС  $\gamma$  в режиме фазового сравнения представляет собой последовательность импульсов с периодом  $T_{on}$ , длительность которых пропорциональна величине фазового рассогласования  $\Delta\varphi$  входных частотных сигналов.

Демодулятор выходного сигнала ИЧФД обеспечивает качественное преобразование сигнала фазовой ошибки с минимумом высокочастотных пульсаций. Блок управления в зависимости от величины  $\Delta\varphi$  формирует управляющее воздействие на электродвигатель. Такой подход к построению ЭПФС обеспечивает высокую точность регулирования углового положения вала электродвигателя и астатизм по угловой скорости [2].

Логическое устройство сравнения функционирует в следующих режимах.

1. Режимы насыщения, при которых на выходе ИЧФД формируется постоянный уровень напряжения: высокий при  $f_{on} > f_{oc}$  или низкий при  $f_{on} < f_{oc}$ . В этих режимах работы устройства сравнения происходит размыкание контура ФАПЧ и, соответственно, разгон или торможение ЭПФС с максимальным ускорением. В этом случае электропривод представляет собой разомкнутую систему автоматического управления (САУ) с постоянным задающим воздействием, исследование динамических процессов в которой осуществляется с применением методов линейных САУ.

2. Режим фазового сравнения, при котором на выходе ИЧФД формируется ШИМ-сигнал фазового рассогласования входных частотных сигналов  $f_{on}$  и  $f_{oc}$ . В этом случае электропривод функционирует в пропорциональном режиме и представляет собой замкнутую САУ.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследование динамических процессов в электроприводе проводится на основе полной математической модели ИЧФД (рис. 2) [3], включающей в себя нелинейный элемент типа «многозначная статическая нелинейность» (МСН), отражающий логику работы ИЧФД, и модель ШИМ на основе релейного элемента.

На основе данной модели строится структурная схема ЭПФС, для исследования которой в различных областях частот вращения используются определенные допущения и различные методы.

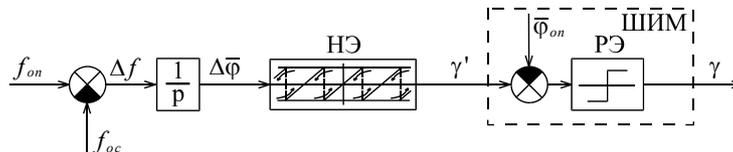


Рис. 2. Полная математическая модель ИЧФД

В области высоких частот вращения демодуляция выходного сигнала ИЧФД осуществляется с помощью фильтра низких частот (ФНЧ), что позволяет обеспечить его качественную фильтрацию. ЭПФС исследуется как САУ, в которой учитывается только элемент модели ИЧФД типа «многозначная статическая нелинейность», а широтно-импульсная модуляция

выходного сигнала ИЧФД в пропорциональном режиме работы электропривода не учитывается вследствие линеаризации передаточной функции ШИМ на высоких частотах модуляции. В этом случае исследование динамических процессов в ЭПФС проводится с помощью методов анализа нелинейных САУ (метод фазовой плоскости), а в пропорциональном режиме работы – с помощью методов линейных САУ [1].

В области низких частот вращения вследствие возрастания периода следования входных частотных сигналов ФНЧ не обеспечивает качественной фильтрации выходного ШИМ-сигнала ИЧФД в режиме фазового сравнения, и на процессы в пропорциональном режиме работы электропривода начинает оказывать влияние импульсный характер выходного сигнала ЛУС. В этом случае для исследования динамики электропривода используются методы импульсных систем автоматического регулирования [2], применение которых сильно усложняет проведение исследований и выполнение расчетов.

Для демодуляции выходного ШИМ-сигнала ИЧФД в области низких частот вращения вместо ФНЧ может быть использован демодулятор на основе схемы выборки-хранения (СВХ) [1], входной сигнал которого квантуется с периодом

$$T_{oc} = 1 / f_{oc} \approx T_{on}.$$

В пропорциональном режиме работы ЭПФС период дискретизации  $T_{oc}$  изменяется в небольших пределах [1], и выходной сигнал СВХ имеет форму сходную с цифровым сигналом с постоянным периодом дискретизации  $T_{on}$ . Поэтому целесообразно рассмотреть возможность использования методов цифровых САУ для анализа динамических процессов в ЭПФС в области низких частот вращения.

Целью данной работы является исследование различных способов демодуляции выходного сигнала ЛУС в ЭПФС, оценка диапазона рабочих частот вращения электропривода, в котором для исследования динамических процессов в ЭПФС можно использовать методы цифровых САУ, разработка алгоритма демодуляции, позволяющего повысить качество преобразования выходного сигнала ИЧФД.



Рис. 3. Алгоритм исследования различных видов дискретизации синусоидального сигнала

## 2. МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для реализации поставленных задач разработан алгоритм исследования различных способов дискретизации сигналов (рис. 3) [4, 5], реализованный в программе *Matlab*, и на его основе проведен сравнительный анализ влияния ШИМ и цифровой модуляции на качество преобразования синусоидального сигнала.

В ходе выполнения программы проводится преобразование входного синусоидального сигнала с заданными параметрами периода  $T$ , амплитуды и начальной фазы, с помощью ШИМ (без демодулятора и с демодулятором на основе СВХ) и цифровой модуляции с заданным периодом дискретизации. Затем определяется гармонический состав исследуемых сигналов путем их разложения в ряд Фурье. Моделирование выполняется с различным количеством интервалов дискретизации  $N = T/T_{on}$  на периоде входного синусоидального сигнала, и на экран монитора выводятся временные диаграммы исследуемых сигналов, а также результат вычисления амплитуды и фазы первой гармоники выходных сигналов для каждого значения  $N$ .

Результаты моделирования после обработки в программе *MS Excel* используются для построения графической зависимости (рис. 4) погрешности амплитуды

$$dA = A_{ВХ} - A_{ВЫХ}$$

и фазы

$$dFi = Fi_{ВХ} - Fi_{ВЫХ}$$

основной гармоники выходных сигналов относительно входного сигнала.

Результаты исследований, проведенных с помощью рассмотренного алгоритма, были подтверждены результатами расчетов в программном продукте *MatCad*.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что при  $T_{on} \geq T/15$  преобразование сигнала с помощью ШИМ с демодулятором на основе СВХ вносит погрешность, при преобразовании сигнала практически не отличающуюся от погрешности, вносимой цифровой модуляцией. Следовательно, минимальную частоту квантования в системах с ШИМ можно определить из условия  $f_{on\_min} \geq 15f$ , где  $f$  – частота преобразуемого сигнала [4].

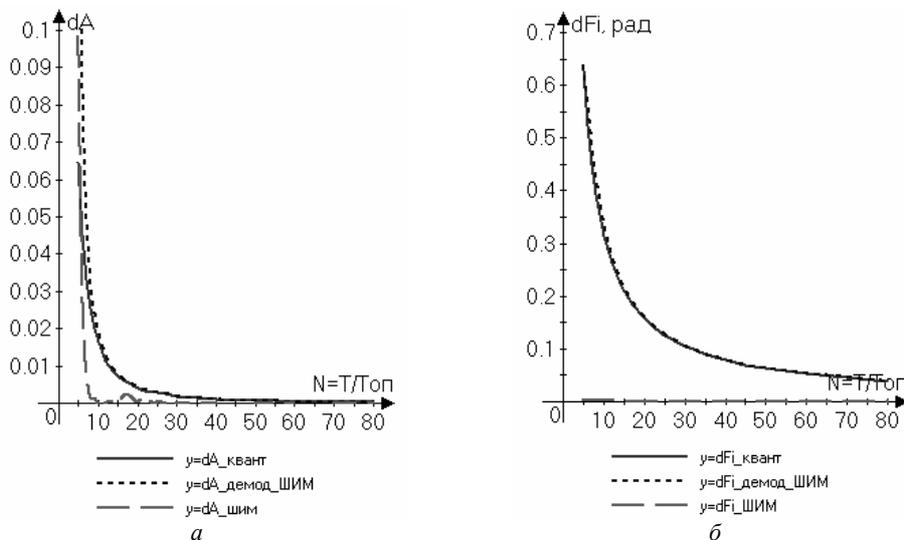


Рис. 4. Графики зависимости погрешности амплитуды (а) и фазы (б) основной гармоники цифрового и ШИМ-сигналов от периода дискретизации

В результате область рабочих частот вращения электропривода, в которой для анализа динамических процессов могут быть использованы методы цифровых систем, а реализация регулятора может быть осуществлена в цифровой форме, определяется из выражения

$$\omega_3 \geq 15\omega_c/Z,$$

где  $\omega_3$  – заданная частота вращения электродвигателя;  $\omega_c$  – частота среза замкнутой линеаризованной системы регулирования;  $Z$  – количество меток ИДЧ.

С помощью компьютерного моделирования были проведены дополнительные исследования в программном пакете *Simulink* программы *Matlab*, реализованные на основе имитационных моделей рассматриваемых преобразователей синусоидального сигнала (рис. 5).

В ходе моделирования входной синусоидальный сигнал преобразовывался с помощью ШИМ (без ДМ и с ДМ на основе СВХ) и цифровой модуляции при различных частотах дис-

кретизации. Для определения погрешностей исследуемых преобразователей сигнала, вносимых по основной гармонике, входной и выходные сигналы преобразователей фильтровались с помощью ФНЧ второго порядка. Пример временных диаграмм, полученных в ходе моделирования для  $N = 10$  и  $N = 15$ , приведен на рис. 6.

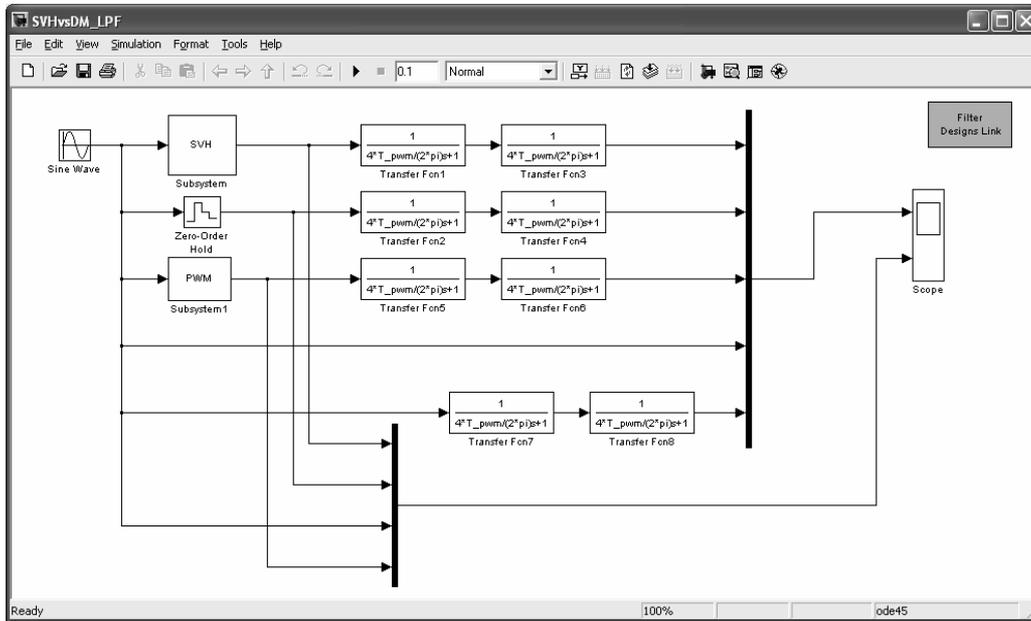


Рис. 5. Имитационные модели ШИМ (без ДМ и с ДМ на основе СВХ) и ЦМ, реализованные в программе *MatLab*

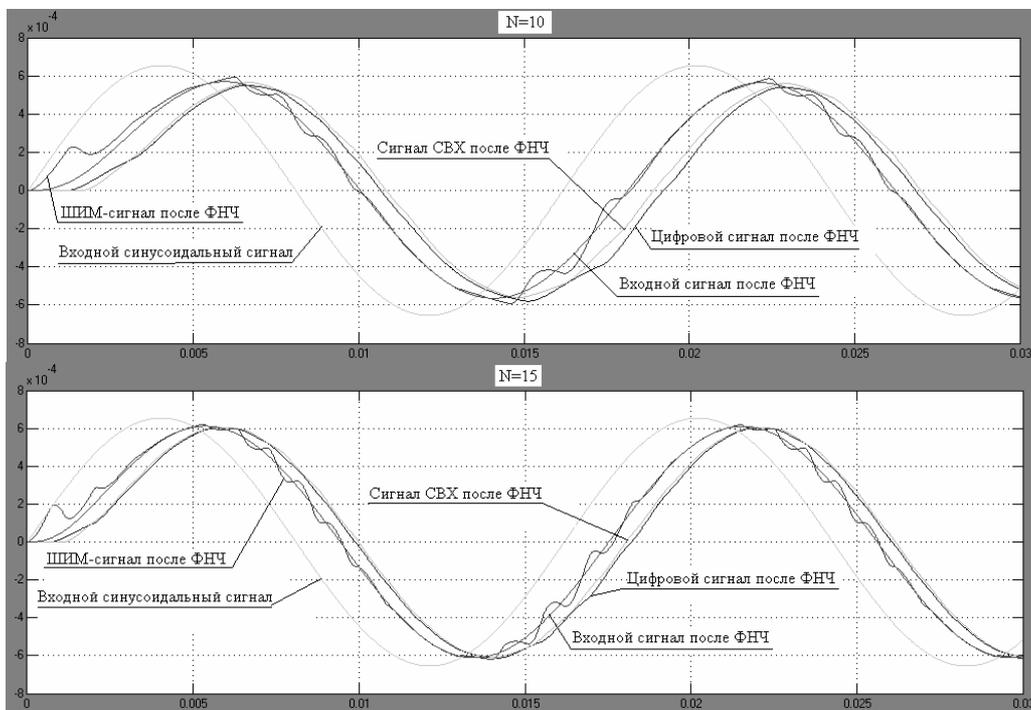


Рис. 6. Временные диаграммы исследуемых сигналов, полученные в ходе имитационного моделирования

Результаты, полученные в ходе имитационного моделирования, с одной стороны подтверждают выводы, сделанные на основании аналитических расчетов, а с другой стороны, анализ полученных данных выявил наличие дополнительной фазовой ошибки в выходных сигналах демодуляторов, прямо пропорциональной периоду дискретизации, которая отрицательно сказывается на динамических характеристиках электропривода.

Для снижения величины фазовой ошибки был разработан алгоритм [6, 7] модификации преобразования на основе соотношения

$$x_i = x_i + \frac{x_i - x_{i-1}}{2},$$

где  $x_i$  – величина выходного сигнала преобразователя в момент квантования,  $x_{i-1}$  – величина выходного сигнала преобразователя в предыдущий момент квантования.

В программном пакете *Simulink* программы *Matlab* было проведено компьютерное моделирование ШИМ с демодулятором на основе СВХ, цифрового дискретизатора на основе экстраполятора нулевого порядка и их модернизированных аналогов (рис. 7).

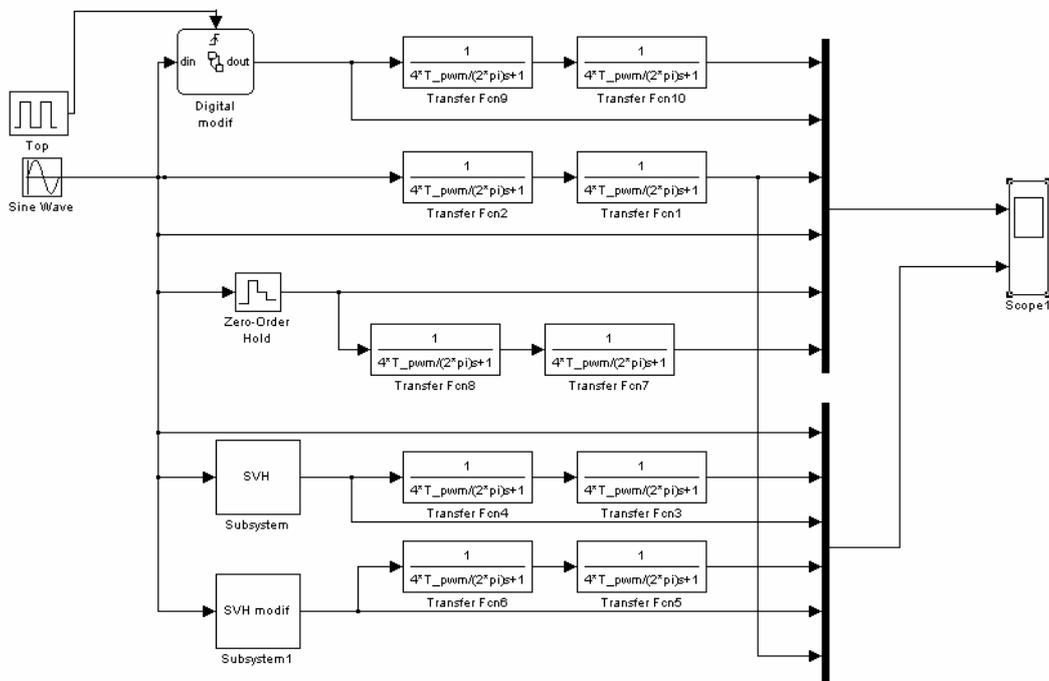


Рис. 7. Математическая модель исследуемых видов модуляции в программе *MatLab Simulink*

Входной синусоидальный сигнал преобразовывался с помощью исследуемых видов модуляции при различных частотах дискретизации. Для обеспечения качественного сравнения вносимых погрешностей по основной гармонике входной и выходные сигналы модуляторов фильтровались с помощью ФНЧ второго порядка.

На рис. 8 представлены результаты моделирования различных способов цифровой модуляции (без коррекции и с коррекцией) и ШИМ с демодулятором на основе СВХ (без коррекции и с коррекцией) при частоте модуляции  $f_{\text{мод}} = 15f_{\text{вх}}$ , где  $f_{\text{мод}}$  – частота модуляции,  $f_{\text{вх}}$  – частота входного синусоидального сигнала.

Для анализа результатов моделирования алгоритм исследования различных видов модуляции был доработан для построения зависимостей погрешности амплитуды и фазы модифицированных преобразователей ШИМ-сигнала с ДМ на основе СВХ и цифрового квантователя. В ходе анализа результатов расчетов был определен характер влияния модифицированных



Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что, с одной стороны, при использовании модифицированных преобразователей сигналов значительно снижается фазовая ошибка первой гармоники выходного сигнала по сравнению с немодифицированными видами. При  $T_{on} \geq T/15$  величина фазовой ошибки модифицированного преобразователя на основе СВХ снижается приблизительно в полтора раза по сравнению с его исходным аналогом, а при использовании модифицированного цифрового дискретизатора приблизительно в десять раз. С другой стороны, оба вида модифицированных преобразователей несколько увеличивают ошибку по амплитуде, характер взаимного изменения которой отличается от исходных видов модуляции.

Использование рассмотренного алгоритма коррекции выходного сигнала преобразователей на основе ШИМ и ЦМ позволяет искусственным путем вводить в их выходные сигналы дифференциальную составляющую, что позволяет повысить устойчивость работы электропривода. Однако использование данного алгоритма приводит к тому, что графики зависимости погрешности преобразования амплитуды и фазы основной гармоники от периода дискретизации  $T_{on}$  при различных видах модуляции значительно расходятся, что сужает область использования методов цифровых систем управления для исследования процессов в системах с ШИМ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в ходе работы результаты исследований могут быть использованы при проектировании цифровых регуляторов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бубнов А.В., Бубнова Т.А., Федоров В.Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: монография. – Омск: ОмГТУ, 2010. – 104 с.
2. Трахтенберг Р.М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. – М.: Энергоиздат, 1982. – 168 с.
3. Стребков В.И. Импульсный частотно-фазовый дискриминатор на интегральных микросхемах // Электронная техника в автоматике: сб. статей / под ред. Ю.И. Конева. – М.: Сов. радио, 1982. – Вып. 9. – С. 223–230.
4. Бубнов А.В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией // Электричество. – 2005. – № 5. – С. 27–31.
5. Цылкин Я.З. Теория линейных импульсных систем. – М.: Физматгиз, 1963. – 968 с.
6. Изерман Р. Цифровые системы управления: пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
7. Программа для исследования и сравнительного анализа влияния цифровой и ШИМ модуляции на качество преобразования аналогового сигнала в электроприводе с фазовой синхронизацией: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / А.В. Бубнов, А.М. Дайнович, Д.Ю. Сторожев; правообладатель ГОУ ВПО «Омский гос. техн. ун-т». – М.: ВНТИЦ, 2010. – № 50201000417; зарег. 23.03.2010.
8. Определение области применения цифровых методов исследования электроприводов с фазовой синхронизацией / А.Н. Алпысова, А.В. Бубнов, А.М. Дайнович, О.П. Дайнович // Омский научный вестник. – 2013. – № 3 (123). – С. 231–234.
9. Алгоритм демодуляции выходного сигнала импульсно-фазового дискриминатора: свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ / А.В. Бубнов, А.Н. Алпысова, А.М. Дайнович; правообладатель ГОУ ВПО «Омский гос. техн. ун-т». – М.: ВНТИЦ, 2013. – № 502013551218.
10. Патент на полезную модель 140482 Российская Федерация, МПК Н 03 D. Импульсно-фазовый дискриминатор / А.Н. Алпысова, А.В. Бубнов, М.В. Гокова, А.Н. Чудинов, А.М. Дайнович; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Омский гос. техн. ун-т». – № 2013157620/08; заявл. 24.12.2013; опубл. 10.05.2014, Бюл. № 13. – 2 с.: ил.
11. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании. – М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 576 с.: ил. – (Серия «Библиотека профессионала»).
12. Бубнов А.В., Катрич П.А. Моделирование электропривода с фазовой синхронизацией в MATLAB-SIMULINK // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309, № 3. – С. 166–169.

*Бубнов Алексей Владимирович*, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электрической техники Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – прецизионный электропривод для сканирующих и обзорно-поисковых систем. Имеет более 170 публикаций, в том числе 5 монографий. E-mail: bubnov-av@bk.ru

*Дайнович Александр Михайлович*, студент факультета элитного образования и магистратуры Омского государственного технического университета, инженер 1 категории ООО «НПО «Мир». Основное направление научных исследований – точный электропривод, синхронно-синфазный электропривод. Имеет более 15 публикаций. E-mail: dainovich-alex@mail.ru

*Алпысова Алина Наилевна*, старший преподаватель кафедры электрической техники Омского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – прецизионный электропривод для сканирующих и обзорно-поисковых систем. Имеет более 20 публикаций. E-mail: alpysova.an@mail.ru

### **Features of application digital control systems methods in researching phase locking motor drive\***

A.V. BUBNOV<sup>1</sup>, A.M. DAINOVICH<sup>2</sup>, A.N. ALPYSOVA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Omsk state technical University, 11, Mira str., Omsk, 644050, Russian Federation, doctor of technical Sciences, professor, e-mail: bubnov-av@bk.ru

<sup>2</sup> Omsk state technical University, 11, Mira str., Omsk, 644050, Russian Federation, student, e-mail: dainovich-alex@mail.ru

<sup>3</sup> Omsk state technical University, 11, Mira str., Omsk, 644050, Russian Federation, senior lecturer, e-mail: alpysova.an@mail.ru

This article is about research of phase locking motor drive based on phase lock loop circuit. Features of influence different kinds of modulation were reported in this paper. Computations based on special Matlab algorithm were made by authors. Comparative dependences of influence pulse-width modulation and digital modulation on signal transfer quality in phase locking motor drive were received after computations. Obtained results show, that errors of signal transfer of researching modulation types are similar in determined area of rotation frequency. That gives an opportunity to use digital control systems methods instead of nonlinear pulse systems methods to research phase locking motor drive. Simulation modeling of PWM and digital modulation was made to prove analysis of computations. Modified transformations of signals based on sample and hold circuit and digital modulation were offered by authors to improve dynamic characteristics of motor drive. Simulation modeling in Matlab of initial and Modified transformations of signals was made to compare errors of modulation. Modeling results of modified transformations of signals shows that stability factor is rises but area of usage digital control systems methods is lows. The results have obtained can be used for designing and research phase locking motor drive.

**Key words:** scan system, phase locking motor drive, phase lock, pulse-width modulation, digital modulation, digital control systems, signal conditioning, sampling signal, sample and hold circuit

#### REFERENCES

1. Bubnov A.V., Bubnova T.A., Fedorov V.L. *Sovremennoe sostoianie i perspektivy razvitiia teorii sinkhronno-sinfaznogo elektroprivoda* [Actual state and perspective of development phase locking motor drive theory]. Omsk, OmSTU Publ., 2010. 104 p.
2. Trakhtenberg R.M. *Impul'snye astaticheskie sistemy elektroprivoda s diskretnym upravleniem* [Pulse astatic motor drive systems with discrete control]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 168 p.
3. Strebkov V.I. *Impul'snyi chastotno-fazovyi diskriminator na integral'nykh mikroskhemakh* [Pulse frequency-phase discriminator based on ntegrated circuits]. *Elektronnaya tekhnika v avtomatike* [Electronic equipment in automatic equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1982, iss. 9, pp. 223-230.
4. Bubnov A.V. *Matematicheskaiia model' logicheskogo ustroistva sravneniia dlia elektroprivoda s fazovoi sinkhronizatsiei* [The mathematic model of phase locking motor drive logical comparator]. *Elektrichestvo – Electricity*, 2005, no. 5, pp. 27-31.
5. Tsyppkin Ya.Z. *Teoriya lineinykh impul'snykh sistem* [Theory of pulse nonlinear systems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 968 p.
6. Izerman R. *Tsifrovye sistemy upravleniya* [Digital control systems], Moscow, Mir Publ., 1984. 541 p.
7. Bubnov A.V., Dainovich A.M., Storozhev D.Iu. The research computer program for analysis digital modulation and PWM based on transfer signal quality in phase locking motor drive. The Certificate on official registration of the computer program. No. 50201000417, 2010. (In Russian, unpublished).
8. Alpysova A.N., Bubnov A.V., Dainovich A.M., Dainovich O.P. *Opreделение oblasti primeneniya tsifrovyykh metodov issledovaniya elektroprivodov s fazovoi sinkhronizatsiei* [The definition area of application digital methods in phase locking motor drive] *Omskii nauchnyi vestnik – Omsk scientific bulletin*, 2013, no. 3 (123), pp. 231-234.
9. Bubnov A.V., Alpysova A.N., Dainovich A.M. Algorithm of demodulation of an output signal of the pulse and phase discriminator The Certificate on official registration of the computer program. No. 502013551218, 2013. (In Russian, unpublished).
10. Alpysova A.N., Bubnov A.V., Gokova M.V., Chudinov A.N., Dainovich A.M. *Impul'sno-fazovyi discriminator* [Pulse-phase discriminator]. Patent RF, no. 140482, 2014.
11. D'yakonov V.P. *MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 v matematike i modelirovanii*. Seriya "Biblioteka professionala" [MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 in mathematics and modeling. Series "Professional's library"]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2005. 576 p.
12. Bubnov A.V., Katrich P.A. *Modelirovanie elektroprivoda s fazovoi sinkhronizatsiei v MATLAB-SIMULINK* [Simulation of an electric drive with phase synchronization in Matlab-Simulink] *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2006, vol. 309, no. 3, pp. 165-170.

ISSN 1814-1196, <http://journals.nstu.ru/vestnik>  
 Scientific Bulletin of NSTU  
 Vol. 56, No. 3, 2014, pp. 123–131

\* Received 30 April 2014.

Work is performed within a grant of the Russian fund of basic researches, the project № 14-08-31109 "Improvement of dynamic indicators of quality of regulation of the precision electric drive".