

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ДЕМОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

А. М. Дайнович

Омский государственный технический университет, г. Омск

Статья посвящена оценке возможности расширения рабочего диапазона электропривода с фазовой синхронизацией в области низких частот вращения. В работе представлены имитационные модели аналоговой и цифровой систем управления электроприводом, выполненные в программе Matlab. Исследование предложенных моделей выполнено с помощью метода фазовой плоскости. На основании сравнительного анализа результатов моделирования определена нижняя частотная граница использования различных способов демодуляции и методов исследования контура фазовой синхронизации.

Ключевые слова: электропривод с фазовой синхронизацией, устройство демодуляции сигнала, фильтр низких частот, схема выборки-хранения, метод фазовой плоскости, имитационное моделирование, частотный диапазон.

Для цитирования: Дайнович А. М. Сравнительный анализ способов демодуляции сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией // Омский научный вестник. 2025. № 3 (195). С. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-73-78. EDN: KFUSBN.



© Дайнович А. М., 2025.
Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SIGNAL DEMODULATION METHODS IN PHASE-LOCK MOTOR DRIVE

A. M. Daynovich

Omsk State Technical University, Omsk, Russia

The article is devoted to assessing the possibility of expanding the operating range of phase-lock motor drive in the low shaft speed area. The analog and digital control system models of motor drive in Matlab software are proposed. The research of proposed models is obtained by using phase plain method. Based on a comparative analysis of the simulation results, the lower frequency limit for using different demodulator types and research methods of phase-lock loop is determined.

Keywords: phase-lock motor drive, demodulation device, low-pass filter, sample-and-hold circuit, phase plain method, simulation modeling, frequency bandwidth.

For citation: Daynovich A. M. Comparative analysis of signal demodulation methods in phase-lock motor drive. *Omsk Scientific Bulletin*. 2025. No. 3 (195). P. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2025-195-73-78. EDN: KFUSBN.



© Daynovich A. M., 2025.
The content is available under a Creative Commons Attribution 4.0 License.

Введение

Системы электропривода, применяемые в робототехнике, станках с программным управлением или системах сканирования, могут быть построены на основе принципа фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), реализованный на основе принципа ФАПЧ, обладает высокой точностью регулирования

и быстродействием [1, 2], обеспечивает простую интеграцию с различными смежными системами за счет применения цифровых устройств со стандартизированными интерфейсами и протоколами обмена в контуре синхронизации. Электропривод на основе принципа ФАПЧ применяется для управления электродвигателями постоянного тока и асинхронными машинами. Одним из перспектив-

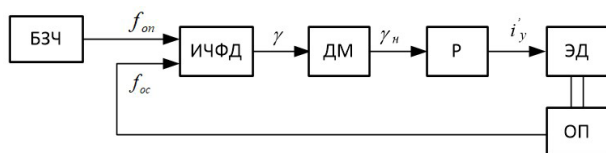


Рис. 1. Блок-схема ЭПФС
Fig. 1. Block diagram of the Phase-Lock Motor Drive

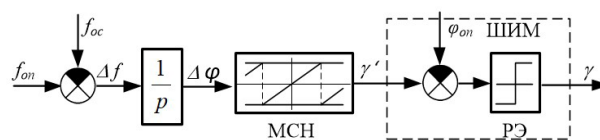


Рис. 2. Полная математическая модель ИЧФД
Fig. 2. Full mathematical model of Pulse Frequency-Phase Detector

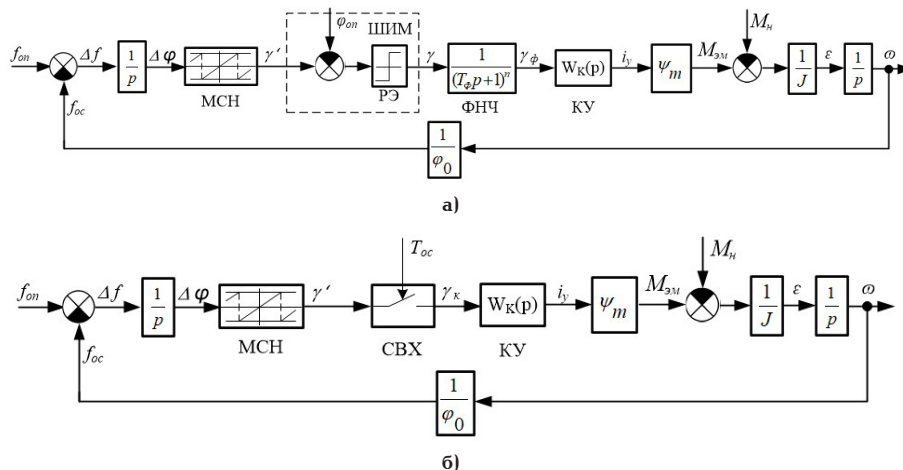


Рис. 3. Структурные схемы систем автоматического управления САУ с различными способами демодуляции сигнала ИЧФД: а — аналоговая система с фильтром низких частот; б — цифровая система со схемой выборки-хранения
Fig. 3. Control systems block diagrams with different types of PFPD demodulators: а — analog system with low-pass filter; б — digital system with sample-and-hold circuit

ных направлений развития функциональных возможностей ЭПФС является расширение диапазона регулирования в области низких частот вращения.

В электроприводе с фазовой синхронизацией, реализованном на основе принципа ФАПЧ (рис. 1), сигнал задания частоты вращения f_{on} формируется с помощью блока задания частоты (БЗЧ), а сигнал обратной связи f_{oc} — с помощью оптического преобразователя с высокой разрешающей способностью (ОП). Логическое устройство сравнения импульсных сигналов реализуется на основе частотно-фазового дискриминатора (ИЧФД). Регулятор (Р) обеспечивает заданные условиями применения показатели управления электродвигателем (ЭД). Демодулятор (ДМ) предназначен для фильтрации выходного сигнала ИЧФД и подавления высокочастотных пульсаций [3]. В рамках данной работы будет рассматриваться система управления бесколлекторным двигателем постоянного тока (БДПТ).

Синхронизация ЭПФС достигается за счет работы ИЧФД в трех режимах — режимы насыщения при разгоне или торможении электропривода, режим фазового сравнения в пропорциональном режиме работы электропривода. В режимах насыщения выходной сигнал ИЧФД γ представляет собой постоянное напряжение высокого или низкого уровня в зависимости от режима работы электропривода [3]. В режиме фазового сравнения он представляет собой последовательность импульсов, формируемую с помощью широтно-импульсной модуляции (ШИМ) с периодом T_{on} , длительность которых пропорциональна величине фазового рассогласования $\Delta\varphi$ входных частотных сигналов.

1. Теория

В связи с особенностями приведенных режимов работы ИЧФД представляет собой элемент с нели-

нейной характеристикой. Для выполнения исследований динамических процессов в электроприводе может быть использована рассмотренная в работе [4] полная математическая модель устройства сравнения (рис. 2).

В ЭПФС в основном применяют два способа демодуляции выходного сигнала ИЧФД: фильтр нижних частот (ФНЧ) в области высоких частот вращения электропривода, схему выборки-хранения (СВХ) в области низких [3, 5]. Соответственно, с учетом полной математической модели ИЧФД анализ динамических процессов в системе автоматического управления может быть осуществлен на основе двух структурных схем: с демодулятором на основе ФНЧ (рис. 3а) и с СВХ (рис. 3б). На представленных структурных схемах: $W_k(p)$ — передаточная функция регулятора, ψ_m — максимальная величина потокосцепления постоянных магнитов с обмотками двигателя, J — суммарный момент инерции ротора с учетом нагрузки на валу. Коэффициент передачи фотоэлектрического преобразователя частоты вращения обратно пропорционален величине углового расстояния между его соседними метками, определяемой соотношением $\varphi_0 = 2\pi/Z$, где Z — общее число меток преобразователя.

Возможности исследования и проектирования в ЭПФС с демодулятором на основе ФНЧ в области низких частот ограничены условиями применения в контуре ФАПЧ устройств такого типа, поэтому в работе [6] была выполнена оценка влияния постоянной времени ФНЧ на динамические характеристики электропривода в пропорциональном режиме работы. Кроме этого, в области низких частот на динамические характеристики оказывает существенное влияние ШИМ-сигнал фазового рассогласования γ , поэтому для исследования ЭПФС

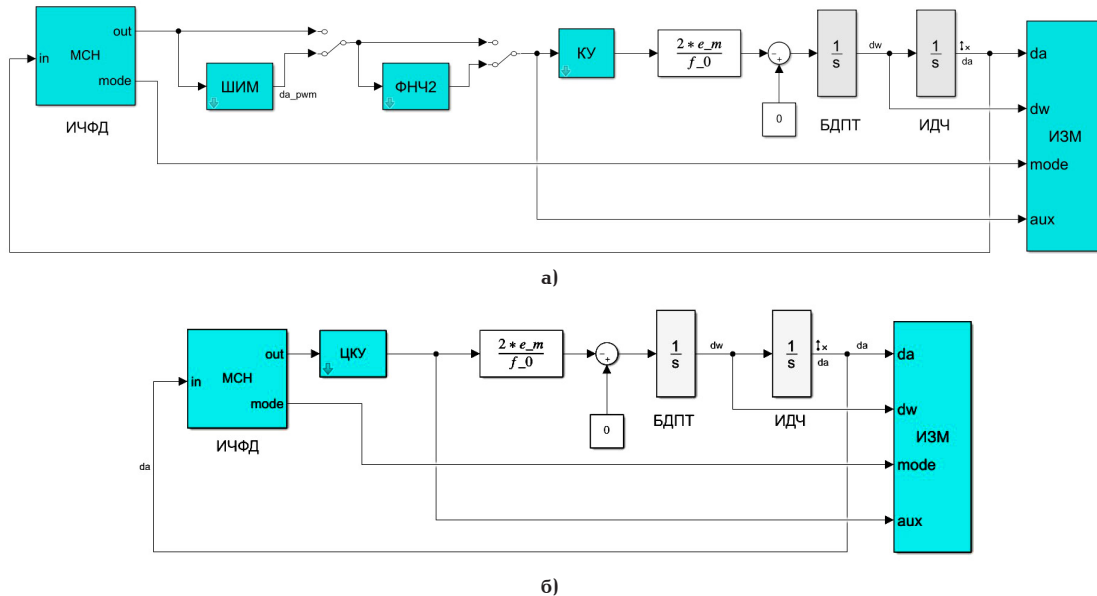


Рис. 4. Имитационные модели ЭПФС в программе Matlab: а — аналоговая система с демодулятором на основе фильтра нижних частот; б — цифровая система с демодулятором на основе схемы выборки-хранения
Fig. 4. Matlab Simulink models of PLMD:

a — analog system with low-pass filter; б — digital system with sample-and-hold circuit

применяются методы нелинейных систем автоматического управления (САУ) [7].

Исследование динамических характеристик ЭПФС с демодулятором выходного сигнала ИЧФД на основе схемы выборки-хранения может быть осуществлено с использованием методов цифровых САУ, в этом случае передаточная функция демодулятора будет соответствовать передаточной функции экстраполятора нулевого порядка. Корректирующее устройство может быть реализовано в цифровой форме, а изменяющийся в пропорциональном режиме работы период дискретизации T_{oc} может быть заменен постоянным периодом T_{on} [8].

II. Постановка задачи

Задачей данной работы является сравнительная оценка возможностей применения демодуляторов на основе ФНЧ и СВХ в области низких частот вращения.

Проведем оценку нижней границы частоты вращения электропривода, при которой не происходит искажения переходного процесса при смене режима работы ИЧФД.

Такая задача может быть решена с применением имитационного моделирования в программном комплексе Matlab. Для выполнения исследования в ходе работы созданы две компьютерные модели: аналоговой системы ЭПФС с демодулятором на основе ФНЧ (рис. 4а) и цифровой системы ЭПФС с демодулятором на основе СВХ (рис. 4б), соответствующие приведенным выше структурным схемам САУ (рис. 3). В процессе разработки имитационных моделей были выполнены преобразования исследуемых структурных схем на основе следующих допущений:

— при работе электропривода в режимах разгона или торможения максимальная величина токоограничения рассматриваемого электродвигателя может быть задана на уровне:

$$I_m = \frac{\varepsilon_m J}{\psi_m},$$

где ε_m — максимальное угловое ускорение электродвигателя;

— выходной ИЧФД нормирован величиной углового расстояния между метками фотоэлектрического преобразователя угла значением $\pm\varphi_0/2$ и ограничен значениями $\gamma = \pm 0,5$.

Реализованные компьютерные модели состоят из следующих функциональных блоков:

1. «МСН» — звено с нелинейной характеристикой [4], соответствующей особенностям работы частотно-фазового дискриминатора. Блок выполнен на основе М-функции [9] и дополнительно снабжен выходным сигналом индикации смены режима работы ИЧФД «mode».

2. «ШИМ» — выполняет преобразование выходного сигнала ИЧФД с помощью широтно-импульсной модуляции с частотой f_{on} . Выходной сигнал блока ограничен по уровню значениями, нормированными величиной углового расстояния между метками импульсного датчика.

3. «ФНЧ2» — фильтр нижних частот 2-го порядка, выполненный на основе апериодического звена с единичным коэффициентом усиления и возможностью настройки постоянной времени T_ϕ .

4. «КУ» — аналоговое корректирующее устройство (ПД-регулятор) с передаточной функцией $W(p) = K(Tp + 1)$.

5. «ЦКУ» — цифровое корректирующее устройство, содержащее дискретную передаточную функцию, экстраполятор нулевого порядка и элемент формирования начальных условий выходного сигнала регулятора.

6. Модели бесколлекторного электродвигателя постоянного тока и оптического преобразователя на основе элементов «Integrator».

7. «ИЗМ» — функциональные блоки для анализа переходных процессов методом фазовой плоскости.

Для выполнения анализа переходных процессов в контуре ЭПФС разработанная модель (рис. 4а) снабжена управляемыми ключами, позволяющими включать или исключать блоки ШИМ и ФНЧ из схемы в процессе моделирования. Такой подход позволил получить на начальном этапе иссле-

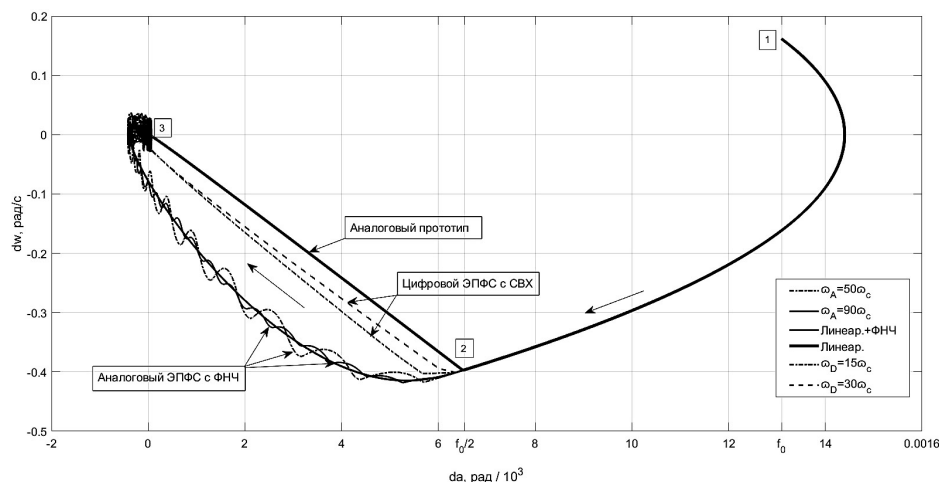


Рис. 5. Фазовые портреты исследуемых моделей ЭПФС
Fig. 5. Phase-plane portraits of proposed PLMD models

дования фазовые портреты аналогового прототипа — линейризованной системы без учета влияния ШИМ-сигнала, относительно которых в ходе работы в дальнейшем выполнялся сравнительный анализ.

Дискретная передаточная функция цифрового регулятора в составе блока ЦКУ (рис. 4б) получена путем аппроксимации линейной передаточной функции аналогового ПД-регулятора с помощью метода Эйлера [10, 11]. Примем дискретную передаточную функцию в виде:

$$W_{цр}(Z) = \frac{\frac{k(T_k + T_0)}{T_0} Z - \frac{kT_k}{T_0}}{Z} = \frac{q_1 Z - q_2}{Z},$$

где T_k — постоянная времени аналогового регулятора, настроенного на критический переходный процесс; K — коэффициент усиления ПД-регулятора; T_0 — период дискретизации в цифровой системе автоматического управления (ЦСАУ).

При реализации цифрового корректирующего устройства в модели была учтена необходимость задания начального значения выходного сигнала регулятора. Она обусловлена особенностями работы дискретных систем управления, когда величина коррекции может быть определена только после первого интервала квантования. Данная особенность может значительно повлиять на величину перерегулирования в системе, а в случаях значительного фазорассогласования привести к ошибочному переключению режима работы ИЧФД, поэтому значение выходного сигнала ЦКУ в начальный момент времени было установлено на основе соотношения:

$$i_y(0) = k\varphi_0/2.$$

Моделирование было проведено с различной частотой ШИМ и частотой квантования в схеме выборки-хранения. Учитывая, что выбор величины постоянной времени ФНЧ зависит от частоты среза замкнутой линейризованной системы регулирования ω_{cp} ЭПФС [6], задание частоты дискретизации выполнялось на основе соотношения:

$$\omega = N\omega_{cp} = N \frac{2}{T_k},$$

где T_k — постоянная времени критического переходного процесса, $N = 1,2..100$ — множитель частоты. Верхняя граница множителя частоты выбрана на декаду большей частоты среза ФНЧ [6], что обеспечит качественную фильтрацию ШИМ-сигнала и форму фазового портрета, соответствующую линейризованному аналоговому прототипу. Отметим, что выбранный диапазон частоты дискретизации в схеме выборки-хранения соответствует критериям точности воспроизведения динамических характеристик аналогового прототипа, определенный в [12].

III. Результаты моделирования

В процессе моделирования использовались следующие данные для расчетов: число меток оптического преобразователя частоты $Z = 4800$, максимальное угловое ускорение $\varepsilon_m = 10 \text{ рад/с}^2$, коэффициент усиления регулятора $K = 10$. Учитывая рекомендации по выбору величины постоянной времени ФНЧ для работы ЭПФС в области низких частот вращения [6], имитационное моделирование было проведено для пограничных значений постоянной времени фильтра $T_\phi = 2,56 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ($T_\phi = 0,1 T_k$) и $T_\phi = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ ($T_\phi = 0,125 T_k$).

Фазовые портреты процесса синхронизации электропривода, полученные на каждом этапе исследования обеих имитационных моделей, были объединены в одну координатную плоскость с помощью встроенных механизмов программного комплекса Matlab. На графике (рис. 5) изображены фазовые портреты модели аналогового ЭПФС (рис. 4а) при значении множителя частоты дискретизации $N = 50$, $N = 90$, фазовые портреты линейризованной системы с ФНЧ и без демодулятора, а также фазовые портреты модели цифрового ЭПФС (рис. 4б) при $N = 15$ и $N = 30$. Стрелками на графиках обозначено направление перемещения рабочей точки от начала моделирования (1) до завершения процесса синхронизации ЭПФС (3). Точка «2», расположенная на линии переключения ИЧФД, соответствует переходу электропривода в пропорциональный режим.

Обобщенный анализ сгруппированных графических зависимостей позволил сделать следующие выводы:

1. Кривые на этапе разгона или торможения электропривода (выходной сигнал ИЧФД постоянен) при исследовании аналоговой и цифровой

модели совпадают до достижения линии переключения ИЧФД в режим фазового сравнения ($da = \varphi_0/2$), независимо от частоты дискретизации. Соответственно, в этих режимах работы ЭПФС применение рассматриваемых устройств демодуляции не вносит дополнительных искажений в передачу сигнала.

2. При работе цифровой системы управления ЭПФС переход из режима разгона или торможения в пропорциональный происходит с задержкой на один такт квантования. Но за счет того, что величина периода дискретизации в ЦСАУ обычно меньше постоянной времени ФНЧ в аналоговой системе, вносимые задержки в процесс синхронизации электропривода значительно ниже, а форма фазовой траектории ближе к исходному аналоговому прототипу. Кроме того, величина запаздывания на один такт квантования может быть скомпенсирована за счет анализа выходного состояния режима работы ИЧФД и введения дополнительной логики в алгоритм управления.

3. Для аналоговой системы управления ЭПФС существует пороговое значение частоты дискретизации ШИМ, ниже которого происходит значительное искажение формы фазового портрета, и возрастание величины пульсации угловой ошибки в пропорциональном режиме работы, которое может быть определено соотношением (диапазон соответствует выбранным граничным значениям постоянной времени ФНЧ):

$$\omega_a \approx (45...50)\omega_{cp}.$$

4. Для цифровой системы управления ЭПФС с демодулятором на основе СВХ ниже граничное значение частоты дискретизации в системе может быть определено на основе соотношения:

$$\omega_d \approx 15\omega_{cp}.$$

5. Сопоставив выражения для ω_a и ω_d , можно сделать вывод, что применение цифровой системы управления позволяет расширить диапазон работы ЭПФС в области низких частот по сравнению с аналоговой системой приблизительно в 3 раза относительно частоты среза замкнутой линеаризованной системы.

6. Учитывая, что величина сигнала задания электропривода f_{on} обратно пропорциональна числу меток оптического преобразователя частоты Z , выражения для нижней границы частоты вращения при использовании для демодуляции аналогового и цифрового устройства в ЭПФС могут быть представлены в виде:

$$f_{on(аналог)} = \frac{(90...100)\pi\omega_{cp}}{Z},$$

$$f_{on(цифров)} = \frac{30\pi\omega_{cp}}{Z}.$$

Заключение

Систематизация и анализ полученных результатов исследования разработанных имитационных моделей позволили сформулировать частотные критерии применения основных способов демодуляции выходного сигнала ИЧФД в электроприводе с фазовой синхронизацией. При этом применение цифровых устройств и соответствующих им методов ис-

следования и проектирования позволяют создавать прецизионные электроприводы с фазовой синхронизацией с расширенным диапазоном регулирования в области низких частот вращения.

Благодарности / Acknowledgments

Автор выражает огромную благодарность своему научному руководителю — доктору технических наук, профессору Омского государственного технического университета Бубнову Алексею Владимировичу — за помощь в работе над материалами статьи.

The author expresses his deep gratitude to his scientific supervisor — Doctor of Technical Sciences, Professor of Omsk State Technical University A. V. Bubnov — for his assistance with the article materials.

Список источников / References

1. Фалеев М. В., Киселев А. А., Самок С. Г. Импульсно-фазовые электроприводы мехатронных устройств // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2007. № 3. С. 27—30. EDN: PJJZND.
2. Faleyev M. V., Kiselev A. A., Samok S. G. Impul'sno-fazovyye elektroprirody mekhatronnykh ustroystv [Pulse-phase electric drives of mechanotronic appliances]. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University. 2007. No. 3. P. 27—30. EDN: PJJZND. (In Russ.).
3. Hsieh G. C., Hung J. C. Phase-locked loop techniques. A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1996. Vol. 43, no. 6. P. 609—615. DOI: 10.1109/41.544547.
4. Бубнов А. В., Бубнова Т. А., Федоров В. Л. Современное состояние и перспективы развития теории синхронно-синфазного электропривода: моногр. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2010. 101 с. ISBN 978-5-8149-0988-6. EDN: QMLEQP.
5. Bubnov A. V., Bubnova T. A., Fedorov V. L. Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya teorii sinkhronno-sinfaznogo elektropriroda [Current state and perspectives of the synchronous-common-mode electric drive theory]. Omsk, 2010. 101 p. ISBN 978-5-8149-0988-6. EDN: QMLEQP. (In Russ.).
6. Бубнов А. В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией // Электричество. 2005. № 5. С. 27—31. EDN: KUZWBW.
7. Bubnov A. V. Matematicheskaya model' logicheskogo ustroystva sravneniya dlya elektropriroda s fazovoy sinkhronizatsiyey [The mathematical model of a logic comparator for an electric drive with phase synchronization]. Elektrichestvo. Electricity. 2005. No. 5. P. 27—31. EDN: KUZWBW. (In Russ.).
8. Laopoulos T. L., Karybakas C. A phase locked motor speed control system with sample-and-hold phase detector. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 1988. Vol. 35 (2). P. 245—252. DOI: 10.1109/41.192656.
9. Бубнов А. В., Дайнович А. М. Особенности применения фильтра нижних частот для демодуляции информационных сигналов в электроприводе с фазовой синхронизацией // Омский научный вестник. 2024. № 1 (189). С. 73—78. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78. EDN: JYGOQK.
10. Bubnov A. V., Daynovich A. M. Osobennosti primeneniya fil'tra nizhnikh chastot dlya demodulyatsii informatsionnykh signalov v elektroprirode s fazovoy sinkhronizatsiyey [Features of using low-pass filter for small signal demodulation in phase-locking motor drive]. Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 73—78. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78. EDN: JYGOQK. (In Russ.).
11. Трахтенберг Р. М. Импульсные астатические системы электропривода с дискретным управлением. Москва: Энергоиздат, 1982. 169 с.

Trakhtenberg R. M. Impul'snyye astaticheskiye sistemy elektroprivoda s diskretnym upravleniyem [Pulse astatic electric drive systems with discrete control]. Moscow, 1982. 169 p. (In Russ.).

8. Bubnov A. V., Daynovich A. M. Digital automatic control system of phase-lock motor drive. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference "Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines"*, Dynamics 2017: Proceedings. Omsk, 2017. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2017.8239439. EDN: XXMJZB.

9. Бубнов А. В., Чудинов А. Н., Емашов В. А. Алгоритм работы компьютерной модели импульсного частотно-фазового дискриминатора и его реализация в приложении Simulink пакета программ Matlab // Омский научный вестник. 2010. № 3 (93). С. 122–126. EDN: OFSNQD.

Bubnov A. V., Chudinov A. N., Emashov V. A. Algoritmy raboty komp'yuternoy modeli impul'nogo chastotno-fazovogo diskriminatora i ego realizatsiya v prilozhenii Simulink paketa programm Matlab [The algorithm of work of computer model of pulse frequency-phase discriminator and its development in Simulink application from Matlab software]. *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2010. No. 3 (93). P. 122–126. EDN: OFSNQD. (In Russ.).

10. Изерман Р. Цифровые системы управления / пер. с англ. С. П. Забродина, А. И. Титкова, А. В. Шалашова; под ред. И. М. Макарова. Москва: Мир, 1984. 541 с.

Izerman R. Tsifrovyye sistemy upravleniya [Digital control systems] / trans. from Engl. S. P. Zabrodina, A. I. Titkova, A. V. Shalashova; ed. by I. M. Makarov. Moscow, 1984. 541 p. (In Russ.).

11. Филиповский В. М., Полюга Н. Л., Мухамбедьяров Б. Б. Синтез дискретного регулятора переоборудованием с учётом задержки в вычислительном устройстве // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2019. Т. 12, № 4. С. 136–144. DOI: 10.18721/JCSTCS.12411. EDN: LRRWMY.

Filipovskiy V. M., Polyuga N. L., Mukhamed'yarov B. B. Sintez diskretnogo regul'yatora pereoborudovaniyem s uchatom zaderzhki v vychislitel'nom ustroystve [Synthesis of the discrete regulator by re-equipment method taking into account the delay in a computer device]. *Nauchno-tehnicheskiye vedomosti SPbGPU. Informatika. Telekommunikatsii. Upravleniye. St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computing, Telecommunications and Control System*. 2019. Vol. 12, no. 4. P. 136–144. DOI: 10.18721/JCSTCS.12411. EDN: LRRWMY. (In Russ.).

12. Лысов В. Е., Поляков В. А. Анализ влияния периода дискретности экстраполятора нулевого порядка цифровой

системы автоматического управления на динамические показатели качества управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31, № 1 (77). С. 34–46. DOI: 10.14498/tech.2023.1.3. EDN: ARIDRW.

Lysov V. E., Polyakov V. A. Analiz vliyaniya perioda diskretnosti ekstrapolyatora nulevogo por'yadka tsifrovoy sistemy avtomaticheskogo upravleniya na dinamicheskiye pokazateli kachestva upravleniya [Analysis of the influence of the discrete period of the zero-order hold of the digital automatic control system on dynamic indicators of control quality] *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series*. 2023. Vol. 12, no. 31 (1). P. 34–46. DOI: 10.14498/tech.2023.1.3. (In Russ.).

ДАЙНОВИЧ Александр Михайлович, аспирант кафедры «Электрическая техника» Омского государственного технического университета, г. Омск.

SPIN-код: 3076-2474

AuthorID (РИНЦ): 897061

Адрес для переписки: dainovich-alex@mail.ru

Прозрачность финансовой деятельности: автор не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила в редакцию 11.06.2025; одобрена после рецензирования 14.07.2025; принята к публикации 15.07.2025.

DAYNOVICH Aleksandr Mikhaylovich, Postgraduate at the Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University, Omsk.

SPIN-code: 3076-2474

AuthorID (RSCI): 897061

Correspondence address: daiRSCInovich-alex@mail.ru

Financial transparency: the author has no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

The article was submitted 11.06.2025; approved after reviewing 14.07.2025; accepted for publication 15.07.2025.