

УДК 62-8:62-187.4:004  
DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78  
EDN: JYGOQK

А. В. БУБНОВ  
А. М. ДАЙНОВИЧ

Омский государственный  
технический университет,  
г. Омск

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ ДЛЯ ДЕМОДУЛЯЦИИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ С ФАЗОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИЕЙ

Электропривод с фазовой синхронизацией, реализованный на основе принципа фазовой автоподстройки частоты, обладает высокими показателями точности и широким диапазоном регулирования частоты вращения. Фильтр нижних частот, применяемый для демодуляции ШИМ-сигнала фазовой ошибки в контуре фазовой автоподстройки частоты, ограничивает рабочий диапазон частот вращения. Целью данной работы является анализ влияния фильтра нижних частот на динамику электропривода в области низких частот вращения. Для этого авторами в среде Matlab разработана математическая модель электропривода с фазовой синхронизацией, позволяющая исследовать влияние параметров фильтра нижних частот в пропорциональном режиме работы электропривода. В ходе исследования получена зависимость величины пульсации ошибки по частоте вращения от частоты вращения электропривода. С ее помощью сформулировано условие выбора постоянной времени демодулятора в системе управления электроприводом, работающим в различном диапазоне частот вращения. Результаты работы могут быть использованы при проектировании точного электропривода с фазовой синхронизацией.

**Ключевые слова:** точный электропривод, электропривод с фазовой синхронизацией, фильтрация ШИМ-сигнала, фильтр нижних частот, постоянная времени, имитационное моделирование.

**I. Введение.** Точность регулирования скорости вращения — одна из ключевых характеристик электропривода для узла оптико-механической развертки, определяющая качество работы сканирующей системы. Электропривод с фазовой синхронизацией (ЭПФС), реализуемый на основе принципа фазовой автоподстройки частоты, позволяет обеспечить

требуемые для таких систем высокие точностные показатели, а также хорошие динамические характеристики и широкий диапазон регулирования скорости вращения [1].

Функциональная схема ЭПФС приведена на рис. 1, где БЗЧ — блок задания частоты  $f_{on}$ , ИЧФД — импульсный частотно-фазовый дискри-

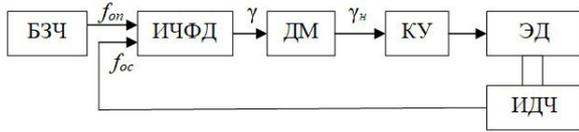


Рис. 1. Функциональная схема электропривода с фазовой синхронизацией

минатор (логическое устройство сравнения входных частотных сигналов, формирующее выходной ШИМ-сигнал фазовой ошибки сравниваемых частот), ДМ — демодулятор ШИМ-сигнала, КУ — корректирующее устройство, ЭД — электродвигатель, ИДЧ — импульсный датчик частоты вращения.

Устройство сравнения частотных сигналов функционирует в трех режимах — режимы насыщения при разгоне или торможении электропривода, режим фазового сравнения в пропорциональном режиме работы электропривода. Выходной ШИМ-сигнал ИЧФД  $\gamma$  в режиме фазового сравнения представляет собой последовательность импульсов с периодом  $T_{on}$ , длительность которых пропорциональна величине фазового рассогласования  $\Delta\varphi$  входных частотных сигналов.

Демодулятор, обычно реализуемый на основе фильтра нижних частот (ФНЧ), обеспечивает качественную фильтрацию выходного сигнала ИЧФД и подавление высокочастотных пульсаций [2, 3]. В работе [1] сформулировано условие определения постоянной времени ФНЧ в виде:

$$f_{on} \gg T_{\phi}^{-1} / 2\pi \gg \omega_{cp} / 2\pi, \quad (1)$$

где  $T_{\phi}$  — постоянная времени ФНЧ,  $\omega_{cp}$  — частота среза замкнутой линеаризованной системы автоматического регулирования. При выполнении этого условия на высоких частотах модуляции передаточную функцию ШИМ можно принять равной единице, так как частота среза фильтра лежит за частотой среза системы, а наличие ФНЧ в контуре фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) не приведет к изменению характеристик переходного процесса.

При работе электропривода в области низких частот вращения это условие не выполняется, и постоянная времени фильтра начинает оказывать влияние на качество демодуляции выходного сигнала ИЧФД и, соответственно, на переходный процесс в пропорциональном режиме, внося дополнитель-

ные временные задержки [4, 5]. В этом случае необходимо корректировать параметры ФНЧ, руководствуясь следующими критериями:

1. Частота среза фильтра должна быть меньше минимальной частоты ШИМ-сигнала (частоты вращения электропривода), что обеспечит качественную фильтрацию и отсутствие гармоник высокого порядка.

2. Особенностью выходного сигнала ИЧФД в пропорциональном режиме работы ЭПФС является скважность импульсов, изменяющаяся в диапазоне от 0 до 100 %, независимо от заданной частоты вращения ЭП.

3. Порядок фильтра определяет требуемое качество фильтрации [6, 7]. Использование фильтра более высоких порядков, с одной стороны, обеспечивает лучшее подавление высокочастотных пульсаций, но, с другой стороны, снижает запас устойчивости системы, вносит дополнительные задержки в работу САУ, тем самым ограничивая диапазон рабочих частот вращения электропривода.

В работе [8] были проведены исследования системы управления электроприводом на основе контура ФАПЧ. Авторы применили фильтр Баттерворта 2-го порядка для фильтрации выходного сигнала логического компаратора.

Результаты экспериментов показали, что демодулятор такого типа обеспечивает требуемое качество фильтрации и запас устойчивости САУ. В работах [9, 10] были проведены исследования переходных процессов в контуре ФАПЧ, содержащем ФНЧ 2-го и более высоких порядков. Применение ФНЧ высокого порядка позволило осуществить качественную фильтрацию высокочастотных спектральных пульсаций, но потребовалось применение дополнительных мер для обеспечения устойчивости контура. Поэтому при проведении исследования контура ФАПЧ для управления ЭПФС в данной работе был применен ФНЧ 2-го порядка, который, с одной стороны, должен обеспечить требуемое качество фильтрации выходного сигнала ИЧФД, а с другой — сохранить устойчивость САУ в области низких частот вращения.

**II. Постановка задачи.** Учитывая неоднозначность влияния приведенных критериев, подбор параметров ФНЧ целесообразно выполнять с помощью имитационного моделирования с применением ЭВМ, что позволит обеспечить требуемые динамические характеристики ЭПФС и сохранить запас

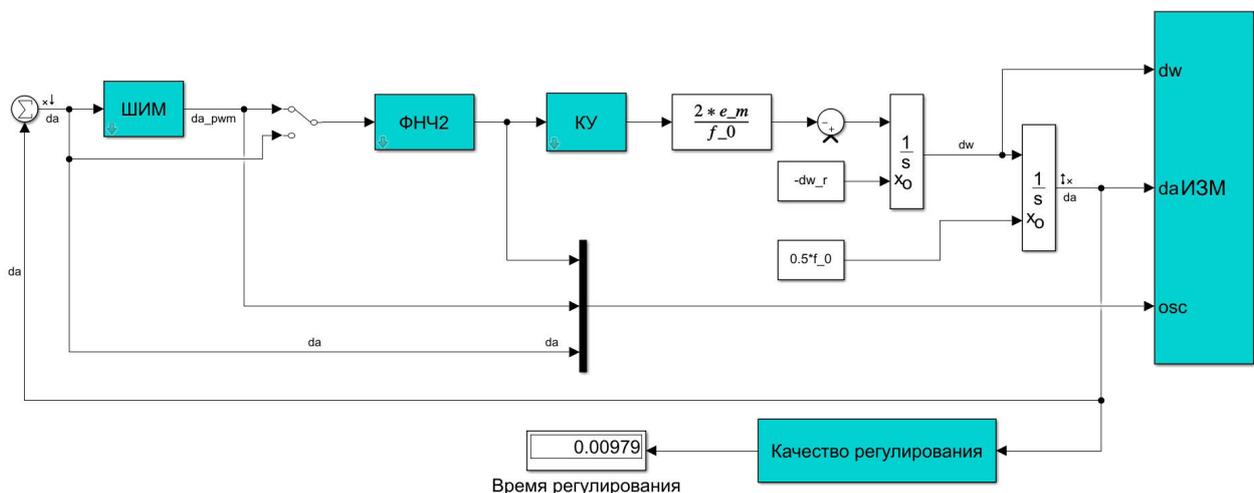


Рис. 2. Математическая модель ЭПФС для исследования параметров ФНЧ

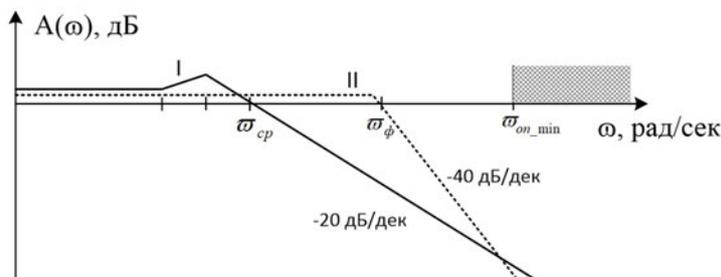


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ЭПФС без учета фильтра (I) и ФНЧ 2-го порядка (II)

устойчивости системы автоматического управления в необходимом диапазоне частот вращения.

Целью данной работы является анализ влияния демодулятора выходного сигнала ИЧФД на основе фильтра нижних частот на работу ЭПФС в области низких частот вращения.

**III. Моделирование и результаты.** Проведем анализ влияния параметров ФНЧ на динамику электропривода с помощью математического моделирования в программном комплексе Matlab на основе имитационной модели ЭПФС в пропорциональном режиме работы (рис. 2). Имитационная модель состоит из следующих функциональных блоков:

- блок ШИМ, выполняющий преобразование сигнала фазового рассогласования  $\Delta\varphi$ . Он реализован на основе логического устройства сравнения и генератора пилообразного сигнала с периодом  $T_{on}$ . Амплитуда выходного сигнала блока, в соответствии с [11], составляет  $\pm 0,5\varphi_0$ , где  $\varphi_0 = 2\pi/z$  — угловое расстояние между двумя соседними метками ИДЧ;
- блок ФНЧ 2-го порядка с передаточной

функцией  $W_{фнч}(p) = \frac{1}{(T_\phi p + 1)^2}$ , где  $T_\phi$  — постоянная

времени. Для его построения использован компонент «Transfer Function with Initial Output» из раздела «Additional Linear» библиотеки Simulink [12]. Его особенностью является возможность инициализации выходного сигнала, позволяющая задавать стартовое положение рабочей точки в момент запуска процедуры моделирования;

- блок КУ, представляющий собой ПД-регулятор с передаточной функцией  $W_{ку}(p) = k(T_k p + 1)$ , где  $k$  — коэффициент усиления корректирующего устройства,  $T_k$  — постоянная времени;
- математические модели бесколлекторного двигателя постоянного тока и импульсного датчика частоты вращения на основе интегрирующих звеньев;
- измерительный блок, предназначенный для анализа осциллограмм исследуемых сигналов;
- функциональный блок для определения времени регулирования.

Основные параметры исследуемой математической модели: максимальное угловое ускорение  $\varepsilon_m = 10$ , коэффициент усиления корректирующего устройства  $k = 10$ , число меток ИДЧ  $z = 4800$ . Значение постоянной времени корректирующего устройства  $T_k$  определено из соотношений, описанных в [1], и соответствует настройке регулятора на критический переходный процесс в пропорциональном режиме работы электропривода. Асимптотические ЛАХ (рис. 3) разомкнутой САУ электропривода без ФНЧ (I) и ФНЧ (II) поясняют особенности выбора постоянной времени  $T_\phi$ , задаваемой при моделировании, а также исследуемый диапазон частот

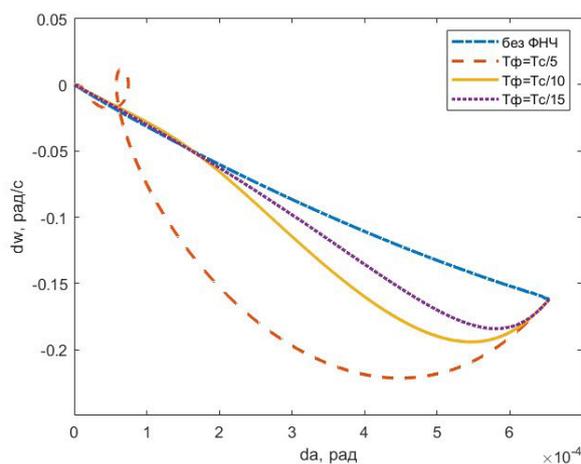


Рис. 4. Фазовые портреты ЭПФС в пропорциональном режиме с учетом влияния ФНЧ с различной постоянной времени

вращения ЭПФС. Анализ режима синхронизации ЭПФС, с точки зрения характера переходного процесса, величины пульсации  $\Delta\omega$  на заданной частоте вращения, был выполнен в области низких частот вращения ( $n \geq 30$  об/мин).

Диапазон изменения значения постоянной времени демодулятора был определен на основе предварительного исследования математической модели, приведенной на рис. 2, в которой было исключено влияние ШИМ-сигнала. На основе преобразованной модели были построены фазовые портреты ЭПФС в пропорциональном режиме работы (рис. 4) при различных значениях  $T_\phi$ . Результаты моделирования показали, что частота среза ФНЧ должна быть не менее чем на октаву больше частоты среза системы, чтобы обеспечить требуемый характер переходного процесса и точность по частоте вращения. Выбор меньшей постоянной времени приведет к колебаниям в системе, потере синхронизации. Поэтому для исследования математической модели (рис. 2) были выбраны значения  $T_\phi$  из диапазона:

$$\frac{1}{20\omega_{cp}} \leq T_\phi \leq \frac{1}{8\omega_{cp}}, \quad (2)$$

где  $\omega_{cp}$  — частота среза замкнутой линеаризованной системы регулирования ЭПФС без учета влияния ФНЧ.

Исследование модели электропривода было выполнено в диапазоне частот вращения от 30 до 600 об/мин для каждого выбранного значения постоянной времени демодулятора. Для наглядности изучения влияния ФНЧ на характер пере-

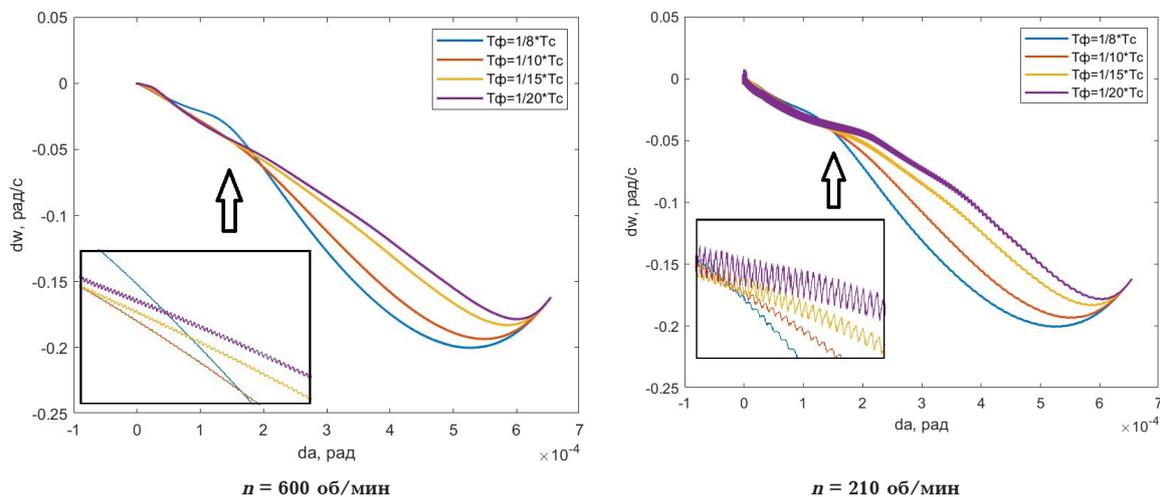


Рис. 5. Фазовые портреты ЭПФС в пропорциональном режиме работы с учетом влияния ФНЧ

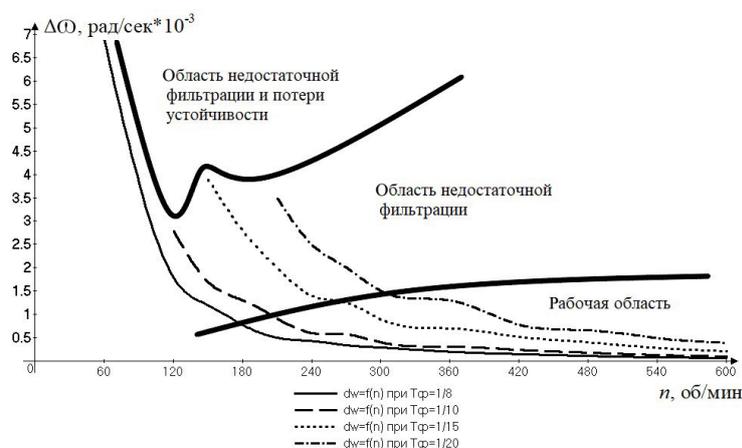


Рис. 6. Зависимость величины пульсаций  $\Delta\omega$  от частоты вращения ЭПФС в пропорциональном режиме работы

ходного процесса в среде Matlab были построены семейства фазовых портретов ЭПФС в пропорциональном режиме (рис. 5) для заданной частоты  $f_{on}$ . Анализ фазовых портретов показал, что с увеличением частоты  $f_{on}$  наличие ШИМ в контуре ФАПЧ не приводит к изменению фазовых траекторий ЭПФС в пропорциональном режиме работы.

С помощью измерительного блока, использованного в предложенной модели, на каждом этапе исследования была выполнена оценка величины пульсации ошибки по частоте вращения в установившемся режиме работы электропривода, вызванной импульсным характером выходного сигнала ИЧФД. На основании обобщенных результатов построена графическая зависимость величины пульсаций  $\Delta\omega$  от частоты вращения ЭПФС (рис. 6) при различных значениях постоянной времени  $T_\phi$ .

**IV. Выводы.** Полученная зависимость позволяет сделать следующие выводы:

1. Вследствие нелинейного характера величины пульсации ошибки по частоте вращения на графике можно выделить области, в которых возникает потеря устойчивости системы, область недостаточной фильтрации выходного сигнала ИЧФД и рабочую область. Выбор значения постоянной времени демодулятора позволит обеспечить необходимое качество фильтрации выходного сигнала ИЧФД и требуемый характер переходного процесса.

2. Результаты моделирования позволяют следующим образом уточнить условие (1) для значения постоянной времени ФНЧ:

— при работе электропривода в области высоких частот вращения ( $n > 500$  об/мин) величины пульсаций  $\Delta\omega$  снижаются для всех заданных при моделировании значений  $T_\phi$ , и, с точки зрения инженерной практики, их можно считать одинаковыми. При этом задержки в работе САУ, вызванные наличием ФНЧ, будут меньше при более низких значениях постоянной времени. В такой ситуации частота среза ФНЧ должна быть более чем на декаду больше частоты среза системы;

— для работы ЭПФС в области низких частот вращения следует выбирать значение постоянной времени фильтра  $T_\phi$  из верхней границы диапазо-

на (2), т.е.  $\frac{1}{10\omega_{cp}} \leq T_\phi \leq \frac{1}{8\omega_{cp}}$ . В этом случае будет

обеспечено необходимое качество фильтрации выходного сигнала ИЧФД. Временные задержки, вносимые ФНЧ, не окажут заметного влияния на характер переходного процесса в пропорциональном режиме работы.

Результаты, представленные в работе, могут быть использованы при проектировании точного электропривода с фазовой синхронизацией, работающего в области низких частот вращения.

## Библиографический список

1. Бубнов А. В. Вопросы теории и проектирования прецизионных синхронно-синфазных электроприводов постоянно-го тока. Омск: Омский научный вестник, 2005. 190 с.
2. 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.
3. Zhu C., Li X., Shi L. [et al.]. A new nonlinear Type3-PLL with noise rejection and fast locking performance in tracking telemetry and command systems // Acta Astronaut. 2019. Vol. 157. P. 397–403. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.006.
4. Seifi S., Karimi H. Stability analysis of a single-phase phase-locked loop for power systems applications // 2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA). Montreal, QC, Canada. 2012. P. 1383–1387. DOI: 10.1109/ISSPA.2012.6310510.
5. Wang D., Lu K., Rasmussen P. O. [et al.]. Comparative study of low-pass filter and phase-locked loop type speed filters for sensorless control of AC drives // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2017. Vol. 1, no. 2. P. 207–215. DOI: 10.23919/TEMS.2017.7961343.
6. Гутников В. С. Фильтрация измерительных сигналов. Ленинград: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1990. 192 с.
7. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам / пер. с англ. Москва: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
8. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-locked loop in constant speed control system for the flywheel motor // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 129. P. 323–330 DOI: 10.1007/978-3-642-25778-0\_45.
9. Геложе Ю. А., Клименко П. П. Системы фазовой автоподстройки частоты с ФНЧ высоких порядков // Радиосистемы. 2004. № 78. С. 74–82. EDN: YKNSGD.

10. Зайцев А. А. Исследование и минимизация фазового шума в ФАПЧ синтезаторах частот // Научно-исследовательские публикации. 2017. № 1 (39). С. 5–29. EDN: YKMWRT.

11. Бубнов А. В. Математическая модель логического устройства сравнения для электропривода с фазовой синхронизацией // Электричество. 2005. № 5. С. 27–31.

12. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7. Самоучитель. Москва: ДМК-Пресс, 2008. 784 с. ISBN 978-5-94074-423-8.

---

**БУБНОВ Алексей Владимирович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электрическая техника» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 5358-0661

ORCID: 0000-0002-0604-3795

AuthorID (SCOPUS): 7004195241

ResearcherID: A-6669-2015

**ДАЙНОВИЧ Александр Михайлович**, аспирант кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3076-2474

AuthorID (РИНЦ): 897061

Адрес переписки: dainovich-alex@mail.ru

## Для цитирования

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.

Статья поступила в редакцию 21.11.2023 г.

© А. В. Бубнов, А. М. Дайнович

## FEATURES OF USING LOW-PASS FILTER FOR SMALL SIGNAL DEMODULATION IN PHASE-LOCKING MOTOR DRIVE

Phase-locking motor drive based on phase-lock principal provides high accuracy and wide shaft speed range. A low-pass filter is used for PWM-signal demodulation in phase-lock loop. This type of demodulator limits loop bandwidth and working range of motor drive. The main purpose of this article is to analyze low-pass filter influence on motor drive dynamic characteristics in low shaft speed area. The authors developed Matlab Simulink model to researcher phase-locking motor drive working in synchronous mode. As a result the dependence of angular velocity ripple versus rotational speed is obtained. The choosing condition of low-pass filter time constant is defined for different shaft speed area by using the obtained dependence. The received results can be applicable for design precision phase-lock motor drive.

**Keywords:** precision motor drive, phase-locking motor drive, PWM filtering, low-pass filter, time constant, simulation modeling.

### References

1. Bubnov A. V. Voprosy teorii i proyektirovaniya pretsizionnykh sinkhronno-sinfaznykh elektroprivodov postoyannogo toka [Theoretical and design aspects of DC synchronous phase-locking motor drives]. Omsk. 2005. 190 p. ISBN 5-8149-0206-X. (In Russ.).
2. 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. (In Engl.).
3. Zhu C., Li X., Shi L. [et al.]. A new nonlinear Type3-PLL with noise rejection and fast locking performance in tracking telemetry and command systems // Acta Astronaut. 2019. Vol. 157. P. 397–403. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.01.006. (In Engl.).
4. Seifi S., Karimi H. Stability analysis of a single-phase phase-locked loop for power systems applications // 2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA). Montreal, QC, Canada. 2012. P. 1383–1387. DOI: 10.1109/ISSPA.2012.6310510. (In Engl.).
5. Wang D., Lu K., Rasmussen P. O. [et al.]. Comparative study of low-pass filter and phase-locked loop type speed filters for sensorless control of AC drives // CES Transactions on Electrical Machines and Systems. 2017. Vol. 1, no. 2. P. 207–215. DOI: 10.23919/TEMS.2017.7961343. (In Engl.).
6. Gutnikov V. S. Fil'tratsiya izmeritel'nykh signalov [Filtering of measurement signals]. Leningrad, 1990. 192 p. ISBN 5-283-04482-5. (In Russ.).
7. Dzhonson D., Dzhonson Dzh., Mur G. Spravochnik po aktivnym fil'tram [A handbook of active filters] / trans. from Engl. Moscow, 1983. 128 p. (In Russ.).
8. Zhang J., Zhao H., Ma K. Phase-locked loop in constant speed control system for the flywheel motor // Recent Advances in Computer Science and Information Engineering. 2012. Vol. 129. P. 323–330 DOI: 10.1007/978-3-642-25778-0\_45. (In Engl.).
9. Gelozhe Yu. A., Klimenko P. P. Sistemy fazovoy avtopodstroyki chastoty s FNCh vysokikh poryadkov [Phase-lock systems with high order LPF] // Radiosistemy. Radio Systems. 2004. No. 78. P. 74–82. EDN: YKNSGD. (In Russ.).
10. Zaytsev A. A. Issledovaniye i minimizatsiya fazovogo shuma v FAPCH sintezatorakh chastot [Research and minimization of phase noise in PLL frequency synthesizer] // Nauchno-issledovatel'skiye publikatsii. Journal of Scientific Research Publications. 2017. No. 5 (39). P. 5–29. EDN: YKMWRT. (In Russ.).
11. Bubnov A. V. Matematicheskaya model' logicheskogo ustroystva sravneniya dlya elektroprivoda s fazovoy sinkhronizatsiyey [The mathematical model logical comparator for phase-locking motor drive] // Elektrichestvo. Electricity. 2005. No. 5. P. 27–31. (In Russ.).
12. D'yakonov V. P. Simulink 5/6/7. Samouchitel' [Simulink 5/6/7: Tutorial]. Moscow, 2008. 784 p. ISBN 978-5-94074-423-8. (In Russ.).

**BUBNOV Aleksey Vladimirovich**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Electrical Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.  
SPIN-code: 5358-0661  
ORCID: 0000-0002-0604-3795  
AuthorID (SCOPUS): 7004195241  
ResearcherID: A-6669-2015  
**DAYNOVICH Aleksandr Mikhaylovich**, Graduate Student of Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.  
SPIN-code: 3076-2474  
AuthorID (RSCI): 897061  
Correspondence address: dainovich-alex@mail.ru

### For citations

Bubnov A. V., Daynovich A. M. Features of using low-pass filter for small signal demodulation in phase-locking motor drive // Omsk Scientific Bulletin. 2024. No. 1 (189). P. 73–78. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-189-73-78.

Received November 21, 2023.  
© A. V. Bubnov, A. M. Daynovich