

Моделирование импульсного датчика скорости в составе регулируемого электропривода

Д.В. Волков

*Южно Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт), Новочеркасск*

Аннотация: В статье рассматриваются импульсные датчики положения (инкрементные энкодеры), их применение для определения угловой скорости и особенности их математического моделирования в составе регулируемых электроприводов с обратной связью по скорости. Описана компьютерная модель подобного датчика с системой определения угловой скорости.

Ключевые слова: инкрементный энкодер, датчик скорости, квадратурный декодер, моделирование электропривода, моделирование инкрементного энкодера, SimInTech.

Современный электропривод всё чаще включает в себя не только электродвигатель, но и полупроводниковый преобразователь электроэнергии, содержащий систему автоматического управления. Это объясняется как всё более широким применением регулируемого электропривода, так и внедрением новых типов электродвигателей, не способных работать непосредственно от электросети (реактивных, синхронных с постоянными магнитами). Проектирование подобных систем управления не обходится без их математического (имитационного) моделирования, в ходе которого отрабатываются алгоритмы управления и уточняются настройки регуляторов [1, 2].

Неотъемлемой частью многих подобных систем управления электропривода является обратная связь по угловой скорости вала двигателя, которая реализуется с использованием соответствующего датчика скорости [3]. При моделировании системы управления нередко этому датчику не уделяют должное внимание, считая его просто безынерционным (масштабным) звеном. Во многом это связано с инертностью мышления, так

как исторически в качестве подобного датчика применялся тахогенератор постоянного тока, для которого подобное упрощение допустимо [4, 5].

В то же время, основным типом датчика скорости в современных электроприводах является импульсный датчик, известный также как инкрементный энкодер. Фактически, такой датчик является датчиком изменения углового положения, путем обработки выходного сигнала которого возможно получить данные об угловой скорости. Причинами широкого использования именно импульсного датчика являются: относительная простота конструкции, простота сопряжения с цифровыми системами управления и возможность получения также сведений положении рабочего органа.

Рассмотрим конструкцию импульсного датчика подробнее. Наиболее частым способом его физической реализации является использование фотодатчиков и диска с метками. Диск закрепляется на валу, вращение которого контролируется. На периферии диска имеются метки – штрихи, которые представляют собой чередующиеся прозрачные и не прозрачные области. Диск своими метками преграждает путь светового луча оптического датчика, состоящего из излучателя света и фотоприемника того или иного типа. В результате, при вращении диска на выходе фотоприемника формируются импульсы, число которых определяется углом поворота вала с диском. Возможны и другие варианты реализации импульсного датчика. Например, вместо фотодатчиков могут применяться магнитные датчики или датчики на ином физическом принципе, узел с метками (неоднородностями) выполняться не в виде диска, а в виде, например, цилиндра. Общий же принцип остается неизменным: генерация импульса при каждом повороте вала на некоторый, как правило, малый угол [6, 7].

Таким образом, с помощью импульсного датчика можно определить приращение угла поворота вала относительно некоторого начального

положения, в связи с чем он и носит название инкрементного энкодера. Многие практические конструкции энкодеров позволяют также определять направление поворота. Для этого в его конструкции предусматривается второй датчик, расположенный около того же диска с метками со смещением относительно первого. В результате второй датчик формирует последовательность импульсов, аналогичную первому датчику, но со сдвигом по фазе, знак которого зависит от направления вращения. Кроме того, может иметься третий датчик, формирующий один импульс за оборот, используемый как начало отсчета.

Основной характеристикой импульсного датчика является число импульсов на оборот вала, которое может достигать 10000 и более.

Для использования импульсного датчика в качестве датчика скорости, его выходные сигналы должны быть преобразованы в сигнал, пропорциональный угловой скорости вала с учетом знака (направления вращения). Для такого преобразования существуют два подхода.

Первый подход - измерение частоты импульсов по принципу счетного частотомера. В этом случае производится подсчет числа импульсов, прошедших за некоторое известное время – время счета. При этом выходной сигнал угловой скорости изменяется дискретно по времени, с периодом, равным времени счета, которое приходится выбирать из компромиссных соображений. При увеличении времени счета снижается быстродействие датчика и, соответственно, возможное быстродействие контура регулирования скорости. При уменьшении времени счета возрастает ошибка дискретизации при измерении угловой скорости: число импульсов, подсчитанных за время счета, оказывается малым и ошибка счета в один импульс оказывает существенное влияние на результат [8, 9]. Таким образом, подход с измерением частоты применим в области высоких угловых

скоростей и дает высокую погрешность в области низких скоростей, которую можно снизить за счет уменьшения быстродействия.

Второй подход заключается в измерении периода импульсов датчика. В цифровых устройствах измерение периода производится путем подсчета числа импульсов некоего опорного генератора постоянной частоты за время между соседними импульсами датчика. Такой подход позволяет обновлять данные угловой скорости в периодом, в пределе равном периоду импульсов в датчика. Недостатки подхода проявляются при больших угловых скоростях, когда период импульсов уменьшается и число импульсов опорного генератора за время одного импульса датчика оказывается достаточно малым для возникновения заметной ошибки дискретизации. Возможности по снижению этой ошибки путем повышения частоты опорного генератора ограничены быстродействием счетчиков. Несколько улучшить ситуацию можно путем измерения периода не одного, а нескольких импульсов датчика с соответствующим снижением быстродействия. Как видно, данный подход дает хорошие результаты в области малых угловых скоростей и повышенную погрешность при больших [10, 11].

Таким образом, при моделировании систем управления электроприводов следует использовать модель импульсного датчика, позволяющую смоделировать характерные особенности, как самого датчика, так и системы преобразования его сигналов в сигнал угловой скорости. Для этого следует использовать модель, устройство которой аналогично устройству реального датчика.

Такая модель была создана с использованием системы визуального моделирования среды динамического моделирования технических систем **SimInTech** (Simulation In Technic). Данная среда предоставляет возможности визуального моделирования, во многом аналогичные таким системам как MATLAB/Simulink, SciLab, VisSim. Характерной особенностью среды

SimInTech является поддержка так называемого пакетного режима моделирования. В этом режиме модель представляет собой пакет проектов, каждый из которых представляет собой отдельную модель со своими настройками и средствами обмена данными внутри пакета (рис. 1). Главное достоинство такого построения в том, что входящие в пакет модели могут обшчитываться с разным шагом интегрирования и с использованием различных методов численного решения. В частности, такое построение позволяет моделировать с малым шагом только ту часть общей модели, для которой подобный шаг требуется.

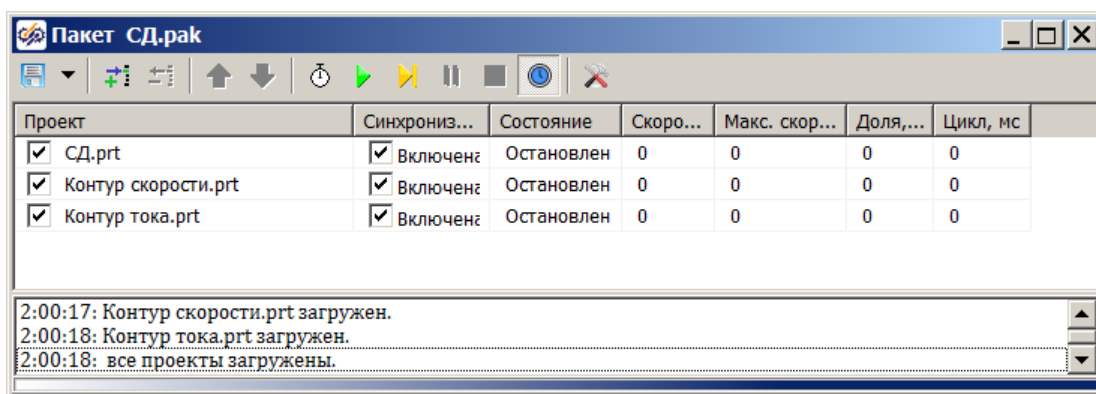


Рис. 1. – Пример пакета из трех проектов (из демонстрационного примера «Скорость СДПМ»)

Модель состоит из двух основных частей. Первая часть моделирует непосредственно импульсный датчик, а вторая – систему преобразования импульсов в сигнал угловой скорости. Такое разделение позволяет использовать и модифицировать части независимо. Например, импульсы от модели датчика могут быть также использованы для выработки сигнала положения исполнительного органа для системы регулирования положения.

Модель импульсного датчика реализована в виде субмодели (рис. 2). Субмодель принимает входной сигнал углового положения вала в радианах и вырабатывает три импульсных сигнала датчика: двух фаз А и В и импульса начала оборота Z. Параметрами модели являются: число импульсов фаз на один полный оборот вала, коэффициент заполнения импульсных сигналов

(по умолчанию 0,5) и фазовый сдвиг между сигналами фаз (по умолчанию 0,25 периода). Последние два параметра позволяют смоделировать неидеальность сигнала в реальном датчике. Задание параметров выполняется через пользовательские поля свойств блока субмодели (рис. 3), которые могут быть заполнены аналогично свойствам остальных блоков. Возможность создания пользовательских полей свойств также является одной из приятных особенностей SimInTech.

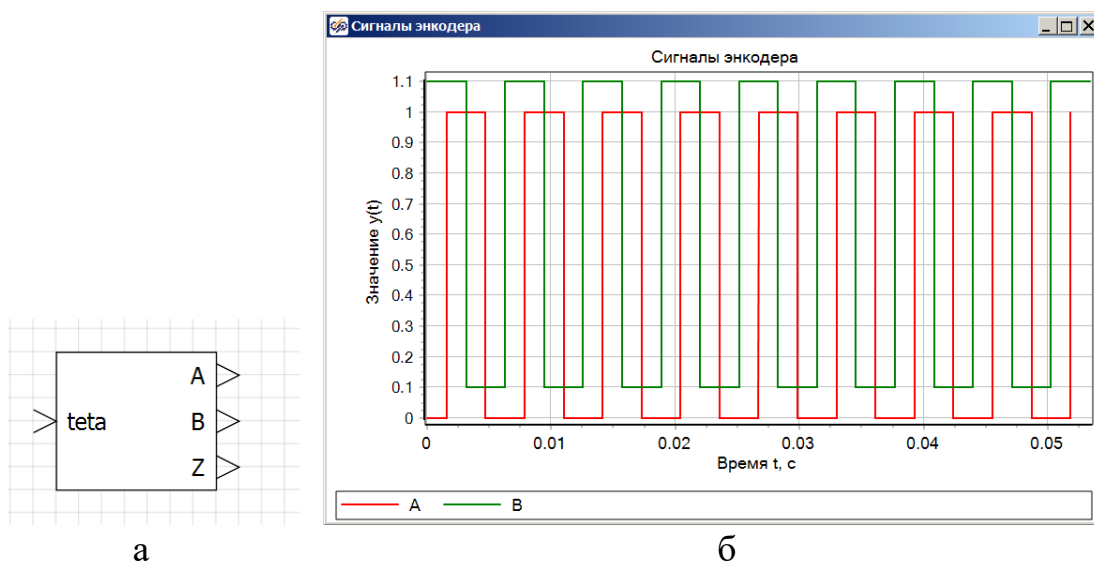


Рис. 2. а – подсистема модели энкодера; б – сигналы фаз энкодера (сигнал фазы В преднамеренно смещен вверх)

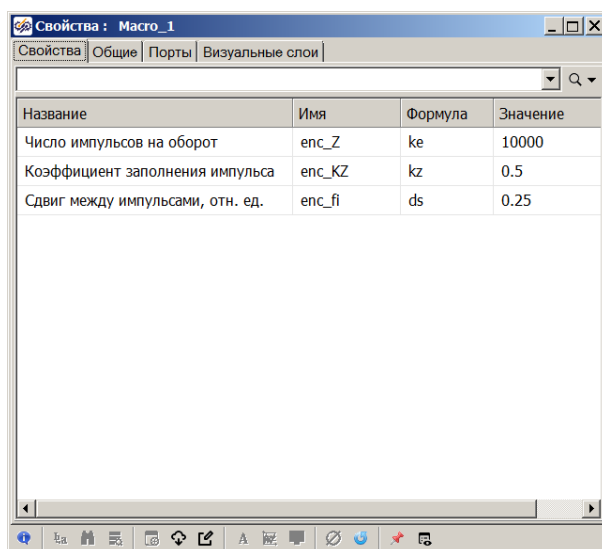


Figure 3 shows a window titled 'Свойства : Macro_1' (Properties : Macro_1). It has tabs for 'Свойства' (Properties), 'Общие' (General), 'Порты' (Ports), and 'Визуальные слои' (Visual layers). The 'Свойства' tab is active, showing a table with user-defined properties.

Название	Имя	Формула	Значение
Число импульсов на оборот	enc_Z	ke	10000
Коэффициент заполнения импульса	enc_KZ	kz	0.5
Сдвиг между импульсами, отн. ед.	enc_fi	ds	0.25

Рис. 3. – Окно параметров блока «Субмодель» с пользовательскими полями свойств

Если в модели отсутствует сигнал углового положения вала, он должен быть сформирован путем интегрирования сигнала угловой скорости по времени с помощью интегратора. Данный интегратор, как и сама модель импульсного датчика должен моделироваться шагом интегрирования, меньшим периода получаемого импульсного сигнала хотя-бы в 4 раза.

Система преобразования импульсных сигналов в сигнал угловой скорости выполнена отдельным блоком (рис. 4).

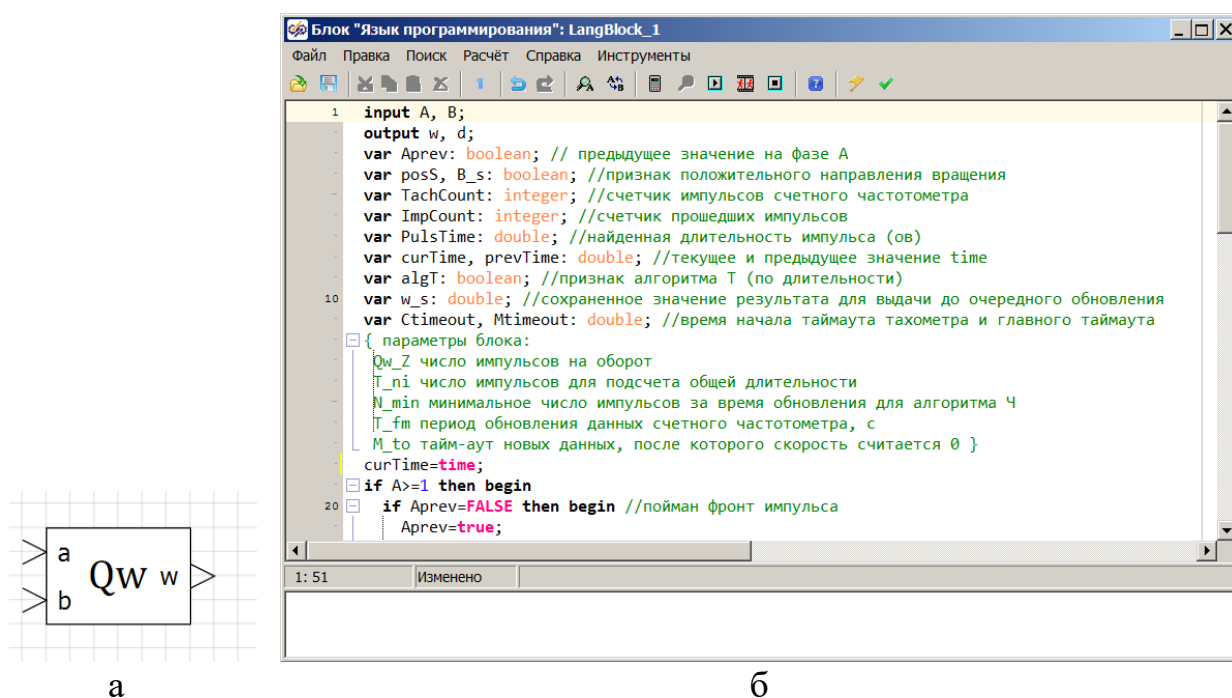


Рис. 4. а – подсистема преобразования импульсных сигналов; б – внутреннее представление системы преобразования импульсных сигналов

На вход блока подаются сигналы фаз А и В импульсного датчика, а выходным сигналом является сигнал угловой скорости в рад/с. В блоке реализованы сразу оба упомянутых выше подхода к преобразованию импульсных сигналов: по частоте и по периоду импульсов с автоматическим переключением в зависимости от текущего значения угловой скорости. Блок также настраивается с помощью пользовательских полей свойств. Доступны следующие свойства: число импульсов датчика на оборот; число импульсов для подсчета общей длительности – позволяет осуществлять измерение

периода не одного, а нескольких последовательных импульсов; минимальное число импульсов за время обновления для алгоритма Ч – минимальное число импульсов за время счета для использования счетного алгоритма измерения частоты, при меньшем используется измерение периода; период обновления данных счетного частотомера, s – время счета; тайм-аут новых данных, после которого скорость считается 0 – время ожидания очередного импульса с датчика, при превышении которого считается, что вал остановился.

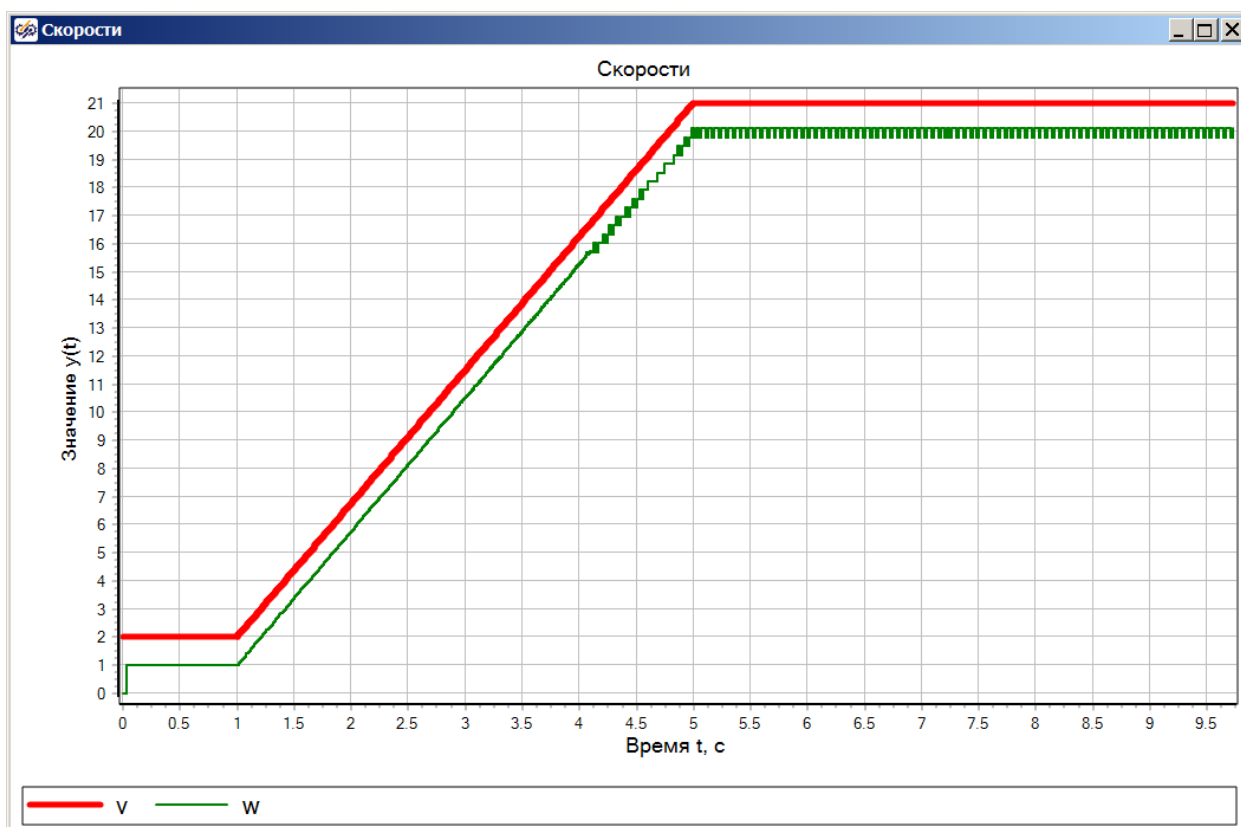


Рис. 5. – Результаты моделирования процесса линейного разгона привода.

Утолщенная линия – измеряемая угловая скорость, рад/с, график преднамеренно поднят вверх на 1 рад/с, тонкая линия – выходной сигнал подсистемы преобразования импульсов.

Блок реализован с использованием внутреннего языка программирования SimInTech. Для этого в системе предусмотрен специальный блок «Язык программирования». Этот блок содержит программу на языке, вызываемую на каждом шаге моделирования. Язык

программирования SimInTech во многом напоминает паскаль и позволяет реализовывать алгоритмы, создание которых в виде структурной схемы затруднительно. Кроме того, такая реализация блока приближает его к реальной реализации системы управления электропривода, где преобразование импульсных сигналов выполняется, как правило, программно.

Разработанные блоки были испытаны на постоянном и меняющемся сигнале угловой скорости (рис. 5). При моделировании были преднамеренно завышены допускаемые ошибки дискретизации. В момент 4,1 с происходит переключение алгоритма преобразования импульсных сигналов с измерения периода импульса на подсчет числа импульсов за заданное время.

Полученные осциллограммы показывают, что:

1. Модель корректно формирует импульсы датчика и сигнал угловой скорости – полученные сигналы соответствуют теоретическим представлениям о работе датчика.
2. Модель воспроизводит характерные особенности измерения угловой скорости с помощью импульсного датчика, а именно дискретность получаемых данных по величине и во времени.

Литература

1. Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН. – 2000. – 654 с.
2. Онищенко Г. Б., Калачев Ю. Н. SimInTech: Системы управления и моделирования электропривода. М.: ДМК Пресс, 2022. – 154 с.
3. Герман-Галкин С. Г., Карташов Б. А., Литвинов С. Н. Модельное проектирование электромеханических мехатронных модулей движения в среде SimInTech. М.: ДМК Пресс, 2021. – 494 с.

4. Башарин А. В., Новиков В. А., Соколовский Г. Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат, Ленингр. отделение, 1982. – 392 с.
5. Артамонов В. Ю., Дубов Н. В., Зубков П. С., Кулаев Н. А. Моделирование преобразователя частоты для синхронного электродвигателя с постоянными магнитами при скачкообразном изменении нагрузки на валу привода // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6472/.
6. Тараненко М. Е. Автоматизированная система контроля нижнего положения конуса дробилки ККД-1500/180-ГВП обогатительной фабрики АО «Лебединский ГОК» на основе бесконтактного индуктивного датчика положения // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 4. – URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328/.
7. Калачев Ю. Н., Самохвалов Д. В. Основы регулируемого электропривода (Антиучебник). – М.: ДМК Пресс, 2023. – 236 с.
8. Pop A. A. Incremental Encoder Speed Acquisition Using an STM32 Microcontroller and NI ELVIS // Sensors. – 2022. – Vol. 22, No. 14. – P. 5127. – DOI 10.3390/s22145127
9. Туричин А. М. Электрические измерения неэлектрических величин. М.-Л., Энергия, 1966. – 690 с.
10. Анучин А. С. Системы управления электроприводов: учебник для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
11. Vazquez-Gutierrez Y., Kavanagh R. C., O'sullivan D. L. Small-Signal Modeling of the Incremental Optical Encoder for Motor Control // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2020. – Vol. 67, No. 5. – P. 3452-3461. – DOI 10.1109/TIE.2019.2916307.

References

1. Shrejner R. T. Matematicheskoe modelirovanie jelektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovateljami chastoty [The mathematiccal modeling of AC electro drives with semiconductor based frequency convertors]. Ekaterinburg: URO RAN. 2000. 654 p.
2. Onishhenko G. B., Kalachev Ju. N. SimInTech: Sistemy upravlenija i modelirovanija jelektroprivoda [SimInTech: control systems and modeling of electro drives] Moskva: DMK Press, 2022. 154 p.
3. German-Galkin S. G., Kartashov B. A., Litvinov S. N. Model'noe proektirovanie elektromehaničeskikh mehatronnyh modulej dvizhenija v srede SimInTech [Model based development of electromechanical mechatronic modules of movement using SimInTech system] Moskva: DMK Press, 2021. 494 p.
4. Basharin A. V., Novikov V. A., Sokolovskij G. G. Upravlenie jelektroprivodami: Uchebnoe posobie dlja vuzov [The controlling of electrodrives]. Leningrad: Jenergoizdat, Leningr. otd-nie, 1982. 392 p.
5. Artamonov V. Ju., Dubov N. V., Zubkov P. S., Kulaev N. A.. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N5y2020/6472/.
6. Taranenko M. E. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2023/8328/.
7. Kalachev Ju. N., Samohvalov D. V. Osnovy reguliruemogo jelektroprivoda (Antiuchebnik) [The basics of controlled elecro drive]. Moskva: DMK Press, 2023. 236 p.
8. Pop A. A. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 14. P. 5127. DOI 10.3390/s22145127
9. Turichin A. M. Jelektricheskie izmerenija nejelektricheskih velichin [The electric bases measuring of nonelectrical quantities] Moskva-Leningrad, Jenergija, 1966. 690 p.



10. Anuchin A. S. Sistemy upravlenija jelektroprivodov: uchebnik dlja vuzov. [The control systems of electro drives] Moskva: Izdatel'skij dom MJeI, 2015. 373 p.
11. Vazquez-Gutierrez Y., Kavanagh R. C., O'sullivan D. L. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2020. Vol. 67, No. 5. pp. 3452-3461. DOI 10.1109/TIE.2019.2916307.

Дата поступления: 29.04.2025

Дата публикации: 25.06.2025