

Разработка динамической модели электропривода механизма сканирования прибора ориентации по Земле

С.А. Синютин¹, А.А. Горбунов,¹ А.Ю. Киснер²

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

²ОАО «Научно-производственное предприятие космического приборостроения “Квант”» Ростов-на-Дону

Аннотация: В статье раскрываются результаты проведенной работы по моделированию динамической модели электропривода механизма сканирования прибора ориентации по Земле, в основе которого лежит гибридный шаговый двигатель. Моделирование опирается на параметры электромотора NEMA 17HS3410. Приводятся краткое описание и особенности гибридных шаговых двигателей. Рассматривается простейшая модель электропривода, в которой существует жестко-задаваемый момент силы, момент инерции ротора электродвигателя, а также учитываются моменты сухого трения и момент жидкостного трения. Показывается, как влияет изменение величины жидкостного трения на общее поведение математической модели гибридного электродвигателя. Моделируется поведение шагового электропривода с одной парой полюсов. Рассматривается взаимосвязь значения момента силы, действующего на ротор с паспортными характеристиками исследуемого электромотора. Оценивается возможность управления механизмом сканирования на базе П- и ПИ-регуляторов.

Ключевые слова: шаговый гибридный двигатель, электропривод, математическая модель, момент инерции, сухое трение, ротор, статор, угловая скорость, момент силы, Simulink.

Введение

Основой динамической системы прибора ориентации по Земле является электромотор, который обеспечивает вращение зеркал, закрепленных на одном валу. Таким образом, динамическая система сканирования прибора ориентации по Земле (ПОЗ) может быть представлена математической моделью электромотора с некоторой нагрузкой. Согласно техническому заданию на приборе в качестве электропривода используется шаговый гибридный электромотор NEMA 17HS3410, поэтому дальнейшее моделирование будет опираться на характеристики данного изделия.

Недостатки классического электродвигателя постоянного тока (ЭДПТ)

Классический ЭДПТ базируется на базовом силовом магнитном эффекте: противоположные полюса притягиваются, а одноименные отталкиваются. Устройство ЭДПТ элементарно: кольцевой магнит, внутри

него катушка проводника, коллектор со щетками для смены полярности в течение каждого оборота.

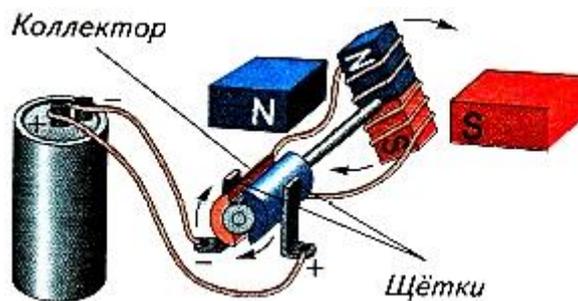


Рис.1 – Вид простейшего электродвигателя

Существуют также электроприводы для работы на переменном токе, и несмотря на то, что они спроектированы совершенно по-другому, в их основе все так же лежит принцип притяжения разноименных и отталкивания одноименных полюсов [1]. Вне зависимости от характера питающего тока, электромоторы являются неотъемлемой частью нашей жизни и встречаются как в детских игрушках, так и в системах кондиционирования зданий и приводах поездов. Во всех этих устройствах электромоторы вращаются непрерывно и точное число совершенных валом оборотов не так уж важно. Но в случае, когда необходимо заставить перемещаться робота-сварщика, для которого крайне важно выдерживать точное положение и угол, возникает проблема, связанная с тем, что нет точной оценки угла поворота вала мотора: он может зависеть от множества факторов, начиная от мощности мотора и величины тока, подаваемого на обмотки, так и веса робота-сварщика. Приходится искать другое решение для электропривода – импульсное, т.е. за одно воздействие тока электропривод поворачивается на строго определенный конструкцией угол (обычно угловой градус и менее). Такой электропривод называется шаговый электродвигатель (ШЭД) – специализированный тип ЭДПТ.

Рассмотрим отличия ШЭД от обычного ЭДПТ. Первое отличие заключается в том, что у таких двигателей отсутствуют щетки. Другими словами, шаговый мотор является примером того, что принято называть бесколлекторным мотором. Второе серьезное отличие заключается в том, что обмотки ШЭД располагают на статоре, а постоянные магниты встроены в конструкцию ротора.

Третье отличие заключается в исполнении как статора, так и ротора. Вместо одного большого магнита на внешней части, так и одной большой катушки внутри, ШЭД разделен на множество одинаковых секций, которые выглядят как зубья шестеренки рис.2. Сердечники катушек тоже имеют вид зубьев, что создает короткие, но мощные магнитные импульсы, заставляющие ротор совершать угловые перемещения небольшими шагами [1].

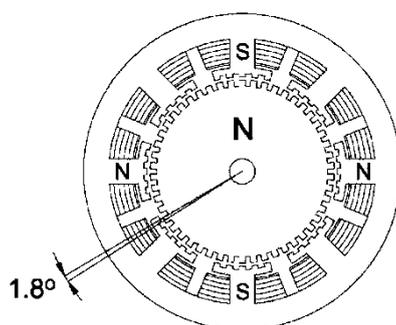


Рис. 2 – Вид шагового двигателя

Последнее отличие состоит в том, что ШЭД может остановиться и удерживать позицию, как только он повернулся на определенный угол. Это очень важно, если электропривод используется, например, в робо-руке, которой надо повернуться на определенный угол, запомнив предыдущее состояние, пока остальные части робота делают что-то другое. Эта функция называется удерживающим моментом двигателя.

Иногда в литературе можно встретить формулировку «гибридный шаговый двигатель», но если разобраться, то большинство современных шаговых электроприводов и являются гибридными, ведь это все тот же электромотор с постоянными магнитами, но с большим количеством полюсов. Их количество может варьироваться от 100 до 400, что в пересчете на угол шага будет в диапазоне от 3.6 до 0.9 градусов.

Математическая модель гибридного шагового двигателя

Рассмотрим простую модель электропривода (1), в которой существует жестко-задаваемый момент силы M_E , момент инерции ротора электродвигателя J , а так же учитываются моменты сухого трения M_c [2] и момент жидкостного трения M_t . Таким образом, получается система дифференциальных уравнений, описывающая простейший электромотор [3].

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = M_E + M_c + M_t \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

где ω - угловая скорость, φ - угол.

Следует учитывать, что момент сухого трения всегда направлен против скорости вращения:

$$M_c = -\text{sign}(\omega)|M_c|$$

Крайне важным параметром при математическом описании электропривода является учет жидкостного трения, который пропорционален скорости вращения и направлен против вращения ротора:

$$M_t = -K_t \omega$$

где K_t – это коэффициент жидкостного трения. Ниже представлена математическая модель (рис.3), реализованная в пакете Matlab/Simulink[3, 4].

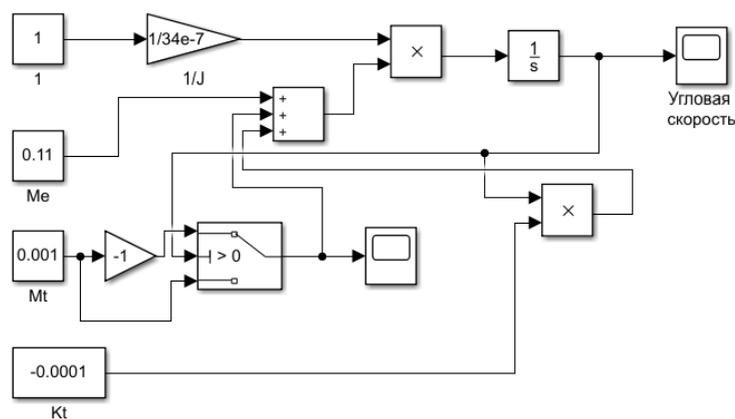


Рис. 3 – Упрощенная математическая модель электромотора

Результаты моделирования математической модели, представленной на рисунке 3, рассмотрим ниже:

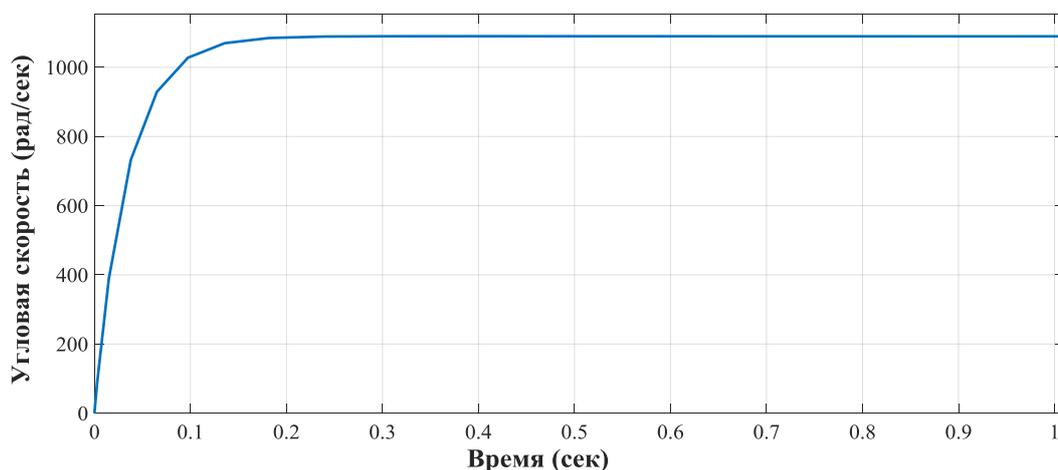


Рис. 4 – График изменения угловой скорости от времени, при постоянном моменте силы M_E

Ниже представлен график изменения момента жидкостного трения от скорости вращения ротора:

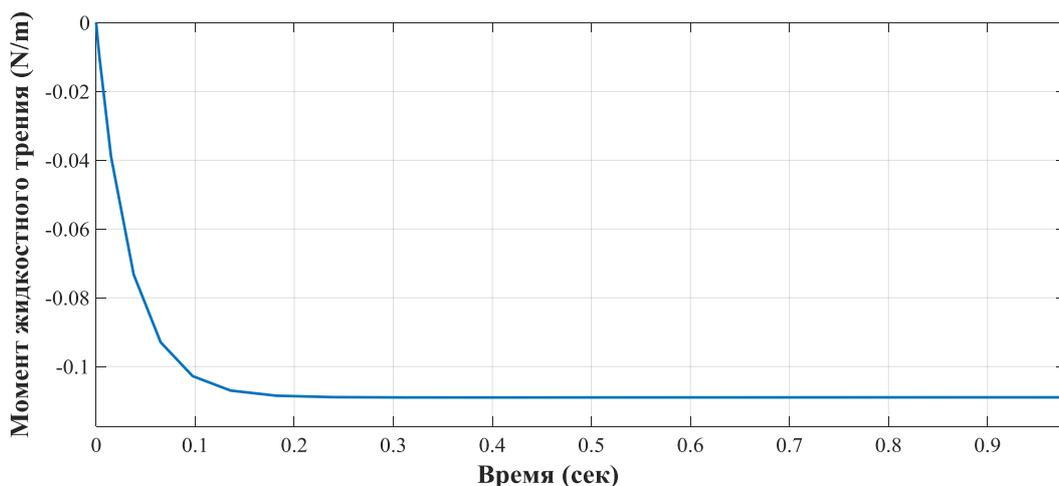


Рис. 5 – График изменения момента жидкостного трения

Так же приведена усложненная модель электропривода, которая в большей степени моделирует поведение шагового двигателя с одной парой полюсов. В отличие от математической модели, рассмотренной ранее (1)[3], момент приложенной силы не постоянен, а действует в диапазоне 0.1 оборота в точках 0 и 180 градусов.

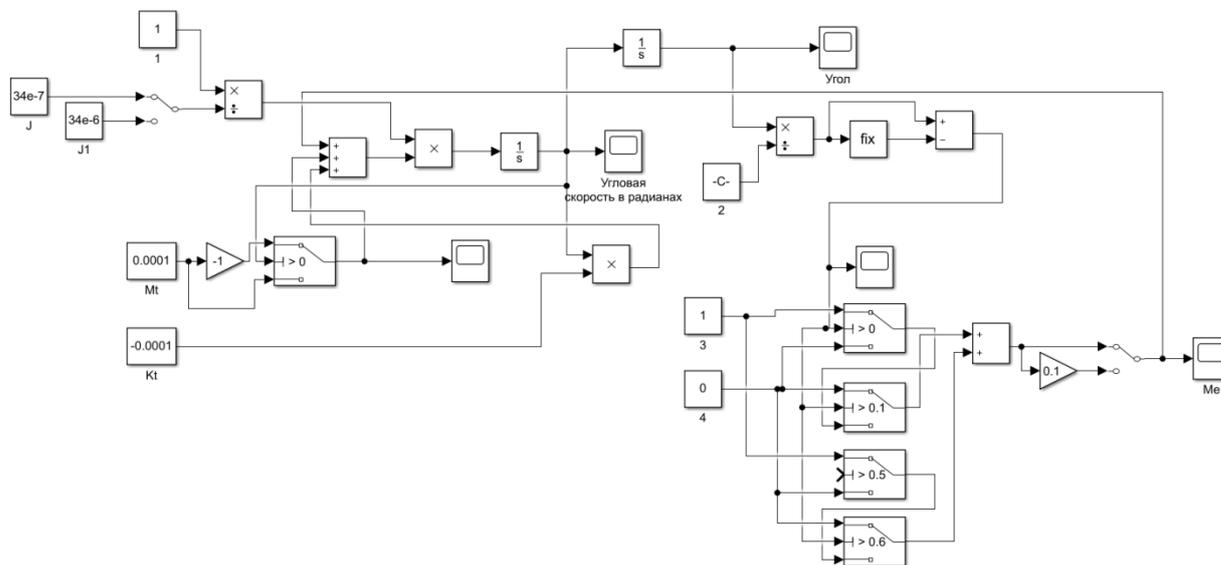


Рис.6 – Математическая модель шагового двигателя с непостоянным электромагнитным моментом

На рисунке 7 представлен график электромагнитного момента, подаваемого два раза за один оборот.

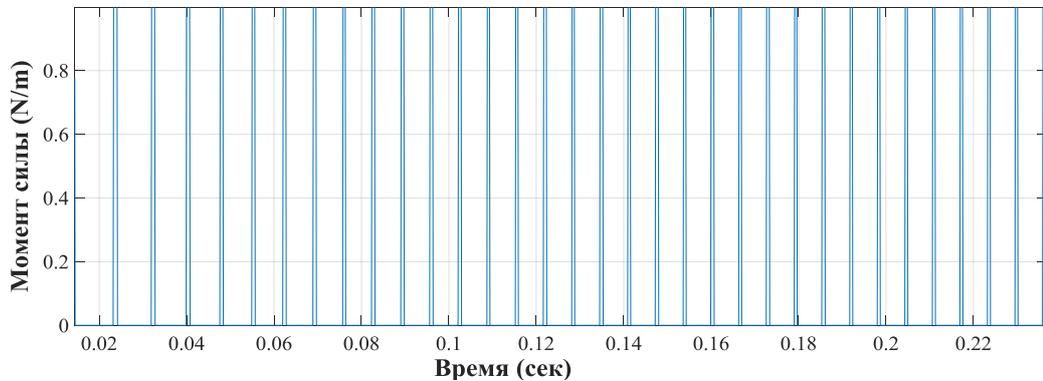


Рис. 7 – Зависимость электромагнитного момента от времени

Введение непостоянного момента силы видно по графику изменения угловой скорости от времени, как показывается на рисунке 8.

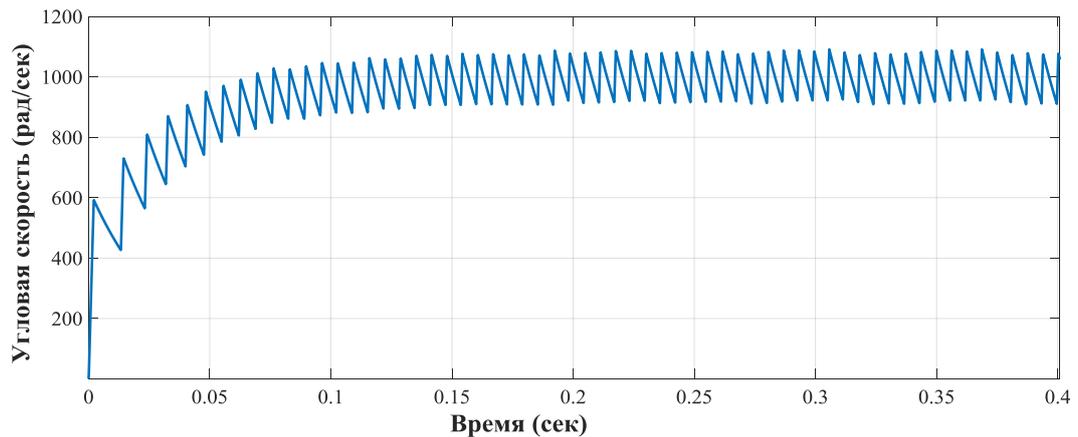


Рис. 8 - Изменение угловой скорости при непостоянном моменте силы, при коэффициенте жидкостного трения $K_t = 0.0001$

Т.к. данная математическая модель, приведенная на рис. 6, учитывает непостоянство приложения силы к ротору электродвигателя, то можно заметить, что в отличие от графика угловой скорости на рисунке 4, скорость вращения ротора из-за действующих на него сил в конце каждого шага снижается.

На рисунке 9 показывается, как изменяется скорость вращения ротора идеального шагового электродвигателя с одной парой полюсов, при снижении момента силы.

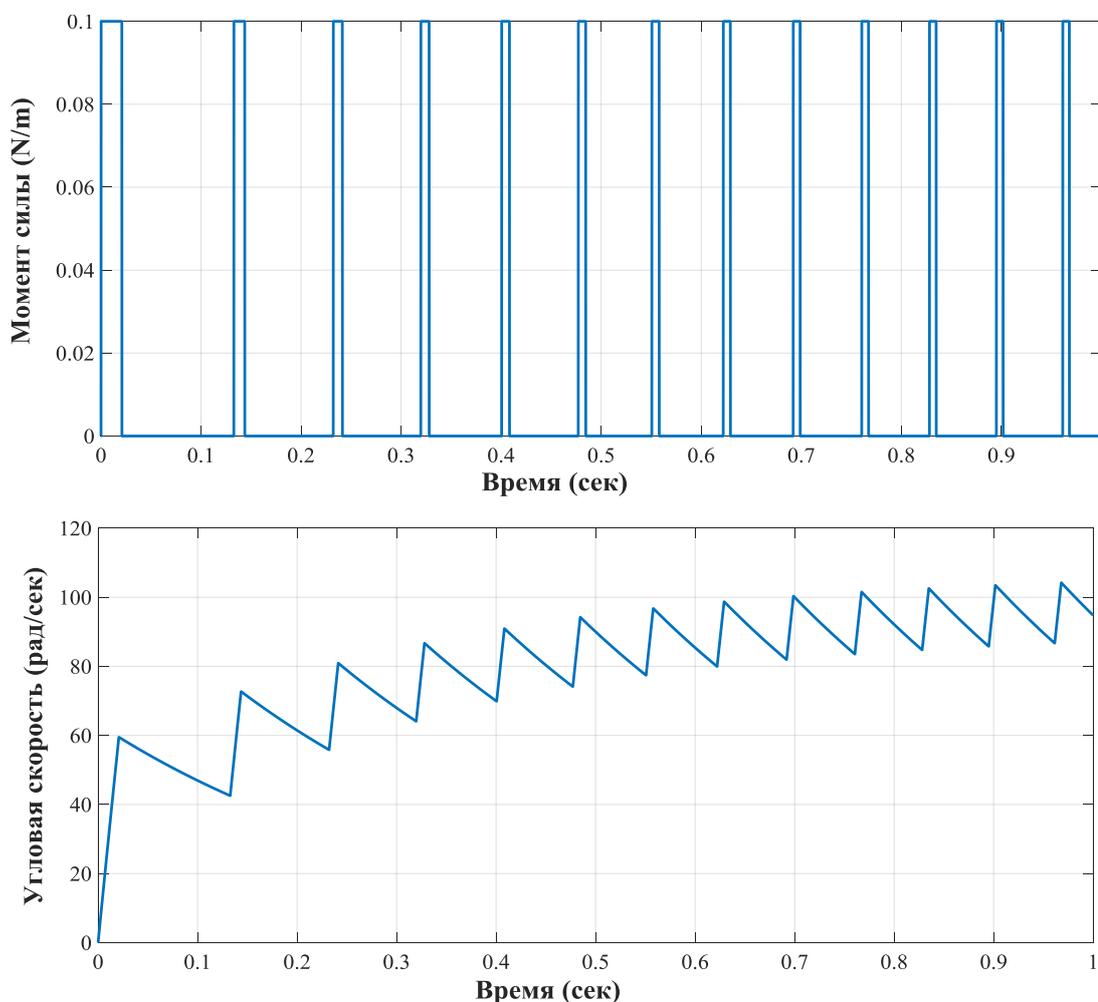


Рис.9 - Изменение угловой скорости вращения ротора при сниженной в 10 раз величине момента силы M_E и увеличении момента инерции J

Изменение величины жидкостного трения M_t так же оказывает заметное влияние на поведение математической модели, что показано на рисунке 10 [5]. За величину момента инерции примем равное $J=34e-7$, максимальное значение момента силы, действующего на ротор, будет $M_E=1$,

а величину жидкостного трения увеличим в 3,3 раза. Результат представлен ниже:

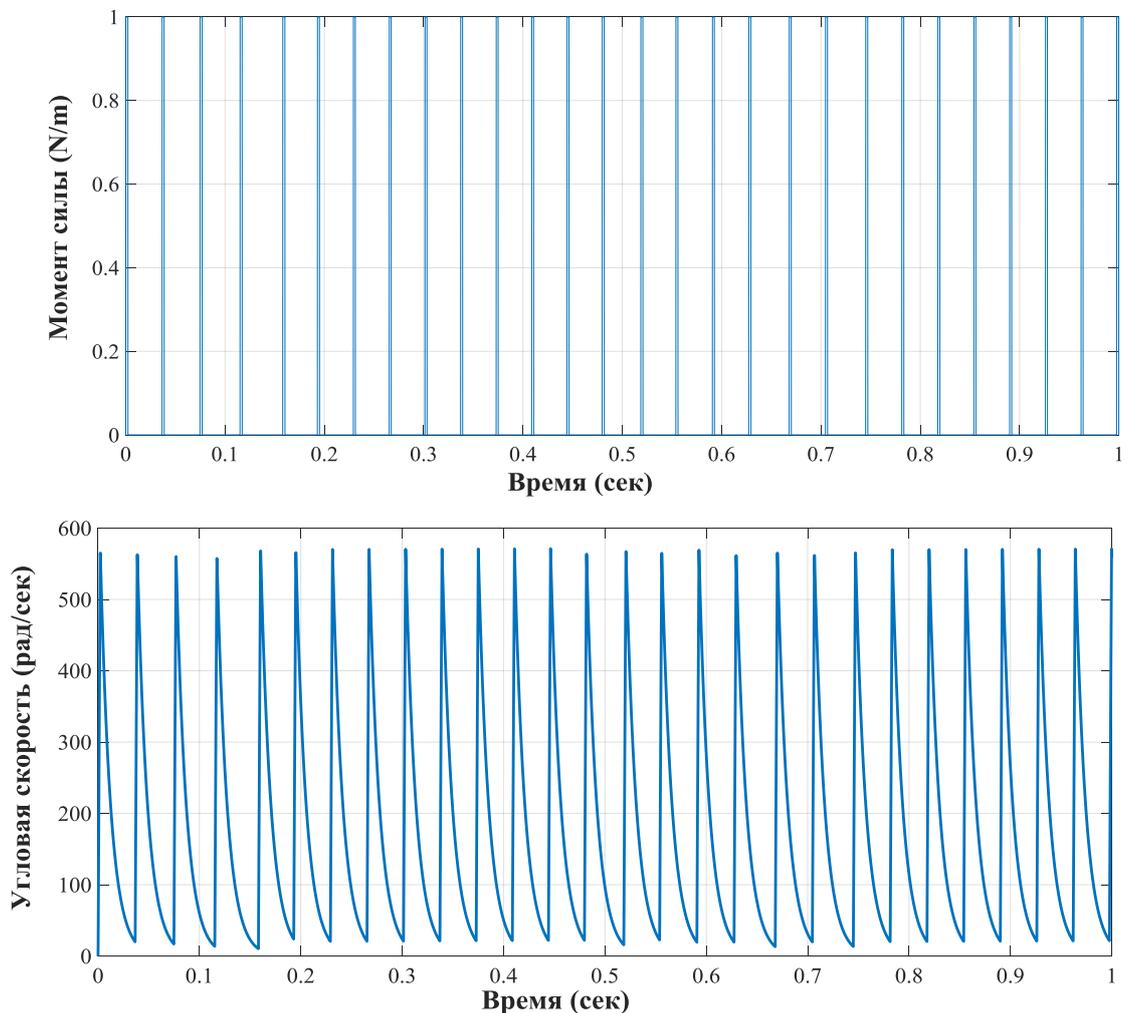


Рис. 10 – Зависимость момента силы приводящего в движение ротор и угловой скорости при увеличении в 3,3 раза значения жидкостного трения

Как видно из графиков, представленных выше, увеличение значения жидкостного трения приводит к тому, что скорость ротора после подачи момента через некоторое время практически падает до нуля. В случае дальнейшего увеличения M_t при неизменных параметрах J и M_E электромотор не сможет стронуть ротор и достигнуть требуемой скорости вращения (рис.11) [5-7].

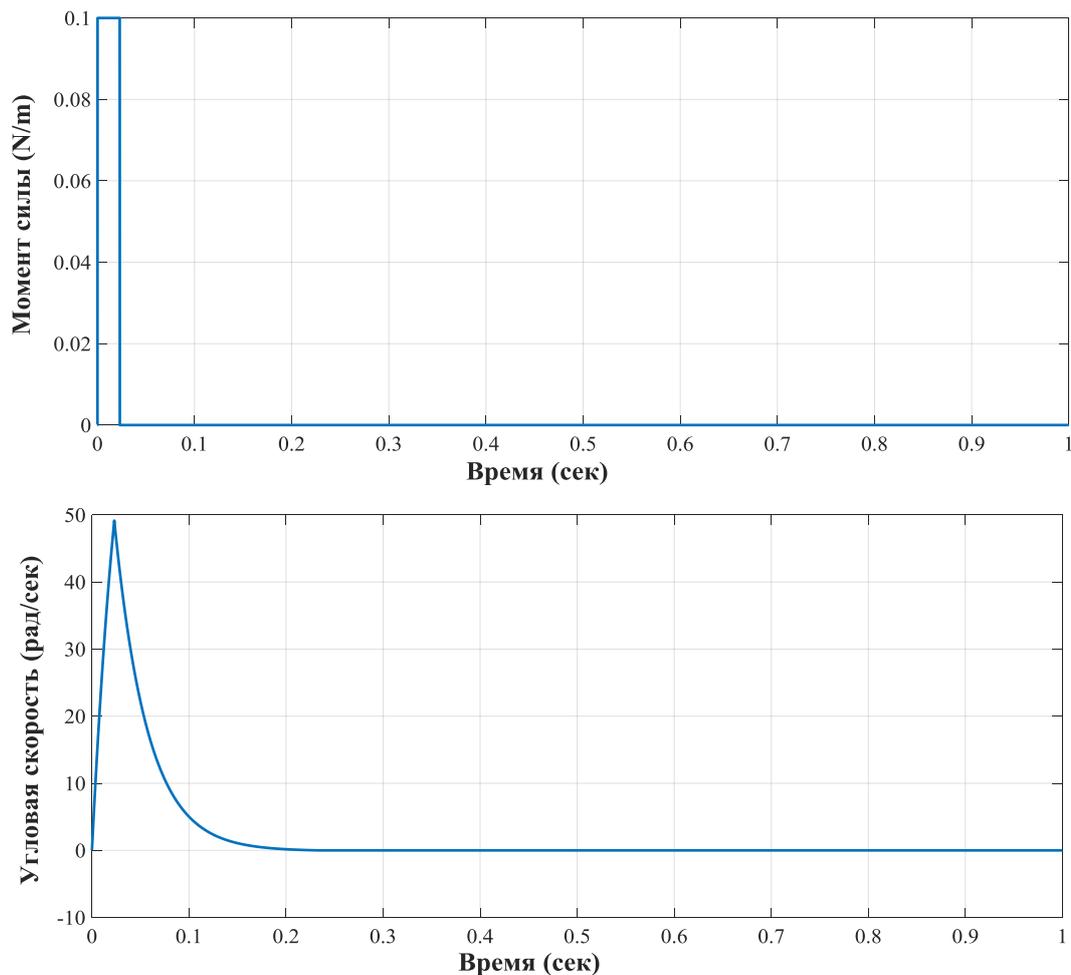


Рис.11 – Графики изменения момента силы и угловой скорости при увеличении момента жидкостного трения в 10 раз, $J = 34e-6$

В рассмотренных ранее моделях значение параметра M_E имело в некотором смысле произвольный характер. В приводимой ниже модели (2) этот параметр рассчитывается в соответствии с величинами индуктивности L , сопротивления R , напряжения U и силы тока I [5, 8].

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = iK_i + M_c - K_t\omega \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega \\ L \frac{di}{dt} = -iR - K_e\omega + U \end{cases} \quad (2)$$

где iK_i – момент приложенной силы; M_c – момент сухого трения; $K_t\omega$ – момент жидкостного трения, а также момент тормозящий момент от

магнитного поля; ω - угловая скорость; φ - угол; J – момент инерции ротора [6, 7].

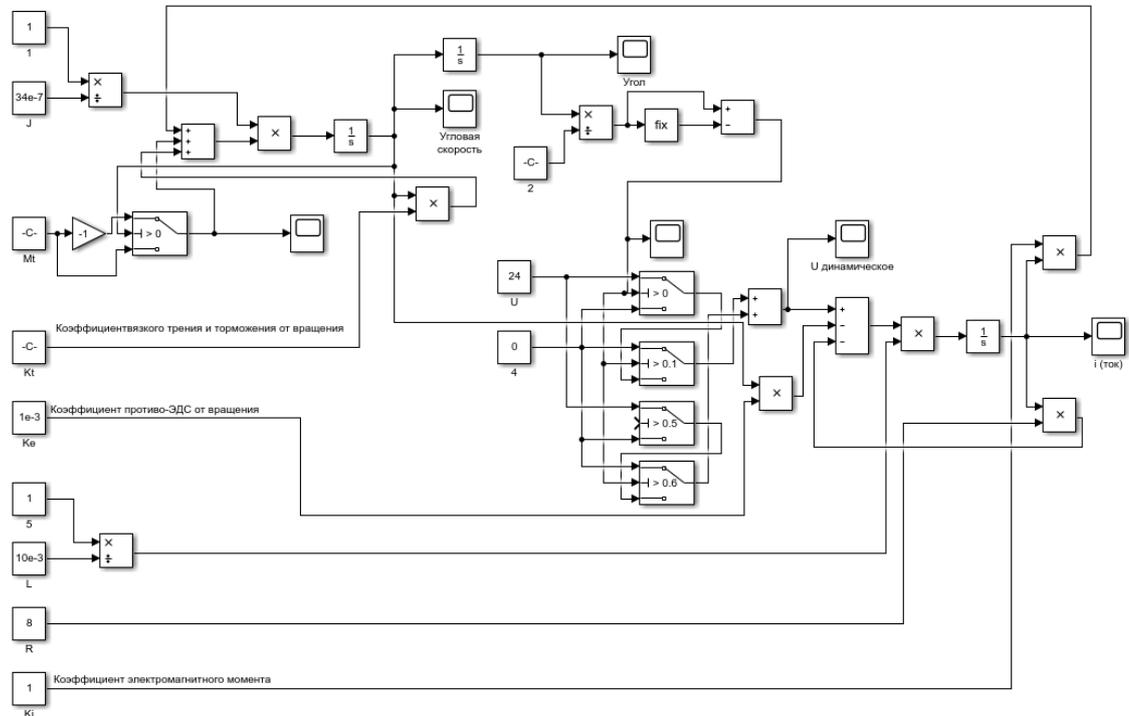


Рис.12 – Математическая модель, в которой момент силы, действующей на ротор, создается электромагнитами

Входными параметрами модели являются: $U - 24\text{В}$, $L - 10\text{e-}3$, $R - 1.2\text{ Ом}$ [5]. Получим следующие результаты:

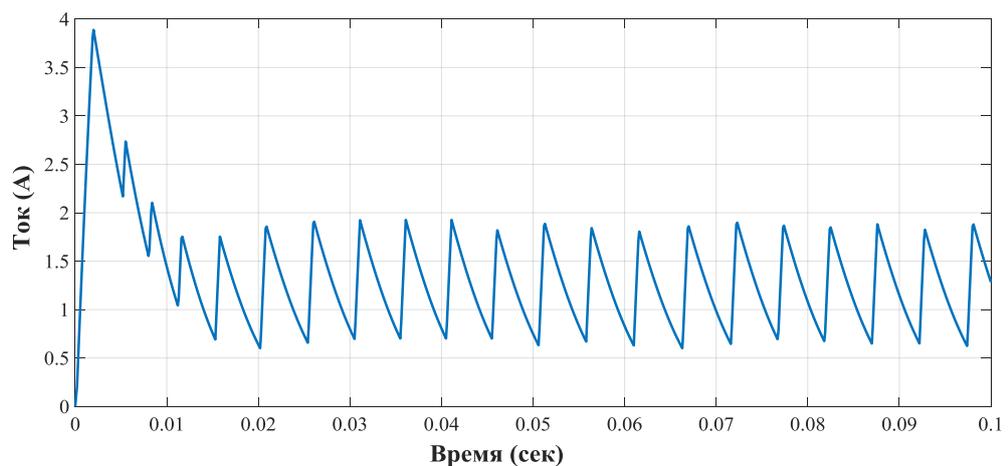


Рис.13 – График изменения тока во времени

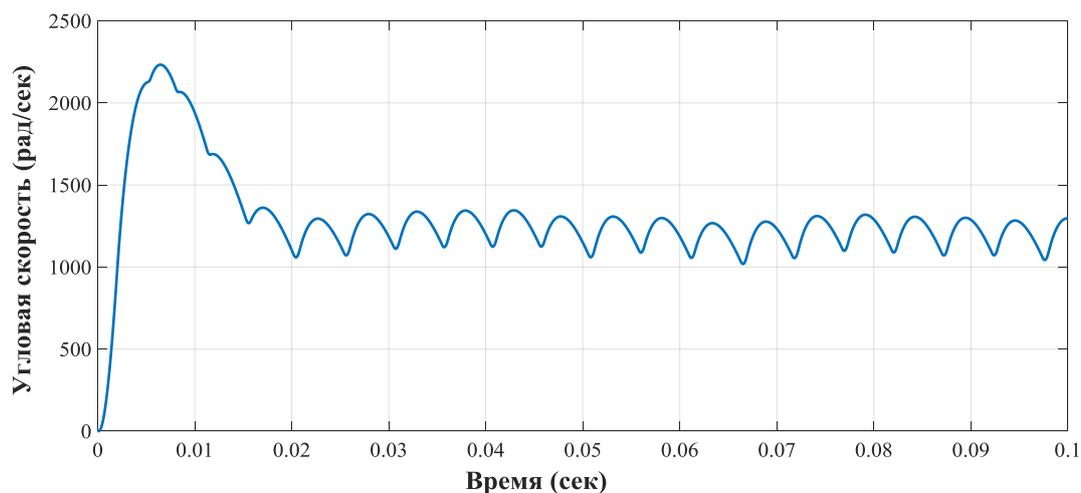


Рис.14 – График изменения угловой скорости во времени

На рисунке 13 приводится график изменения тока во времени при установившемся режиме работы, из которого видно, что ток не превышает значения в 1.7А, а скорость вращения ротора в 12400 об/мин рис.14, что соответствует паспортным данным на двигатель в NEMA 17HS3410.

Реализация управления скоростью вращения гибридного шагового двигателя

Рассмотрим модель шагового гибридного электродвигателя с подключенным к нему ПИД-регулятором рис.15, необходимым для поддержания требуемой скорости вращения [9, 10].

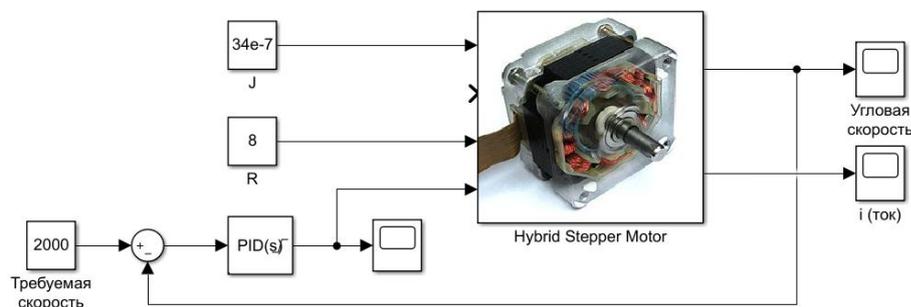


Рис. 15 – ПИД-регулятор подключен к математической модели электропривода

На рисунках 16 и 17, представленных далее, показывается влияние параметров ПИД-регулятора на изменение угловой скорости, при условии приведения управляющего воздействия к диапазону от 0 до 1.

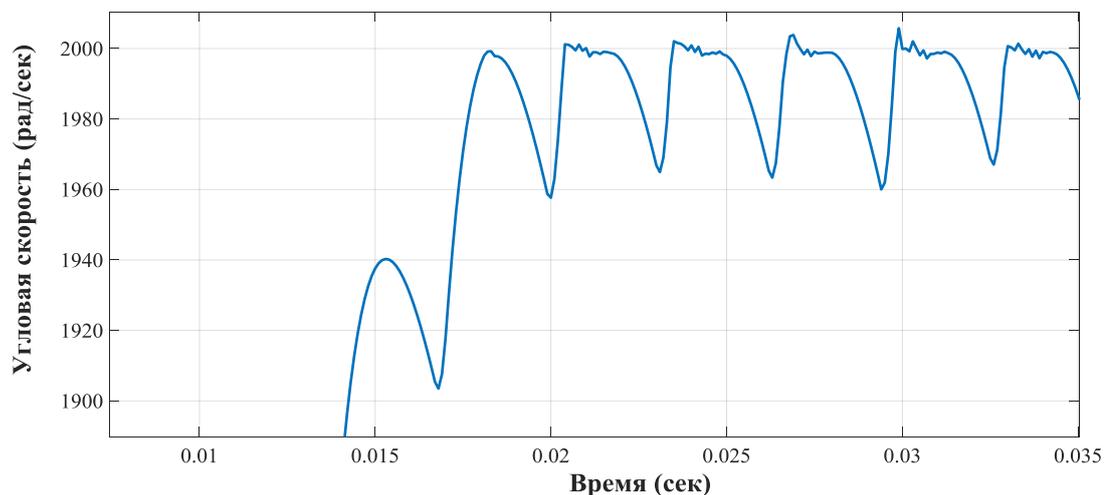


Рис.16 - График изменения угловой скорости при значениях ПИД-регулятора
 $P = 1, I = 0, D = 0$

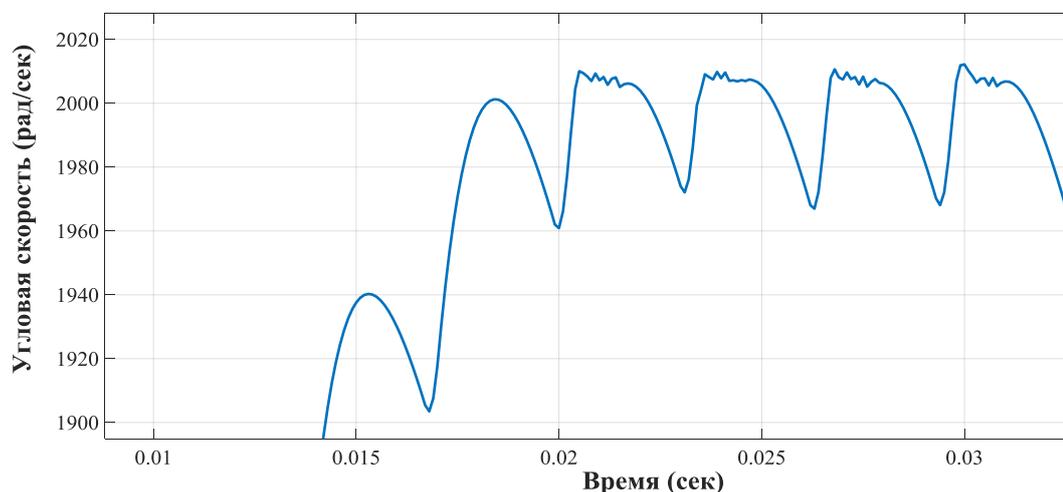


Рис.17 - График изменения угловой скорости при значениях ПИД-регулятора
 $P = 1, I = 1, D = 0$

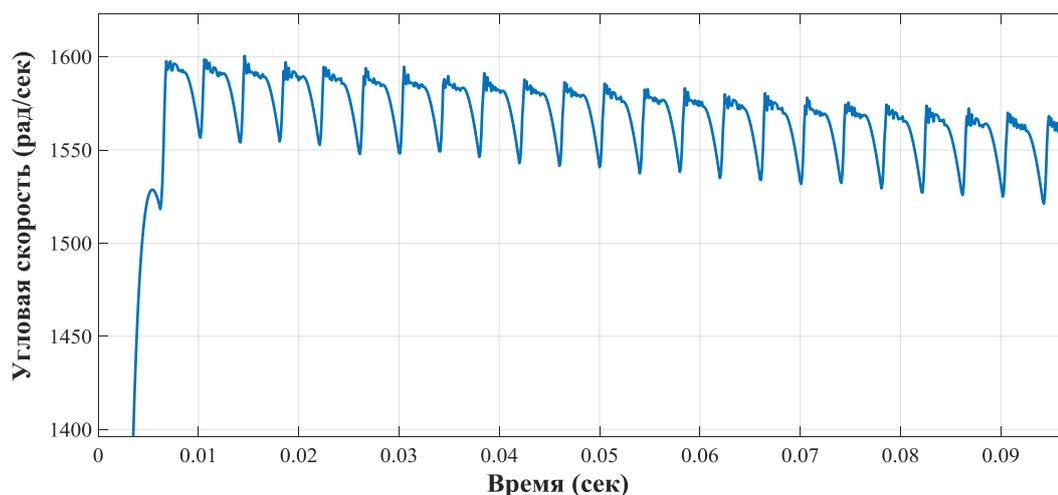


Рис.18 - График изменения угловой скорости при значениях ПИД-регулятора
 $P = 1, I = 1, D = 1$

На рисунках 16-18 показаны предельные варианты настройки ПИД регулятора: П-регулятор на рис.16, ПИ и ПИД на 17 и 18 соответственно.

Результаты

В работе по моделированию динамической модели электропривода механизма сканирования прибора ориентации по Земле рассмотрена простейшая модель электропривода, в которой существует жестко задаваемый момент силы, момент инерции ротора электродвигателя, а также учитываются моменты сухого трения и момент жидкостного трения. Определено, что изменение величины жидкостного трения оказывает существенное влияние на общее поведение математической модели гибридного электродвигателя. Далее, базовая упрощенная модель шагового двигателя была уточнена путем изменения величины момента силы, действующего на ротор M_E на расчетную величину, полученную из паспортных данных на двигатель NEMA 17HS3410. Оценка потребляемого тока при скорости в 12400 об/мин показала совпадение с техническими характеристиками. Для моделирования управления механизмом

сканирования ПОЗ были применены ПИ-регуляторы. Из графика, представленного на рис.18, видно, что при наличии дифференциальной составляющей заданное значение скорости не было достигнуто.

Работы, результаты которых представлены в данной статье, проводились на базе ФГАОУ ВО ЮФУ совместно с ОАО НПП КП «Квант» в рамках проекта: «Разработка и создание инновационного стендового оборудования и высокотехнологичного производства радиационностойкого малогабаритного прибора ориентации космических аппаратов на Землю секущего типа на базе электронных компонентов отечественного производства» по Постановлению Правительства РФ №218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства" от 9 апреля 2010 г.

Литература

1. Гибридные двигатели // Электропривод. URL: electroprivod.ru/hybrid.htm (дата обращения: 26.04.2020).
2. Шамберов В.Н. Влияние сухого трения в исполнительных механизмах автоматических систем с приводным электродвигателем на их устойчивость // Научное Приборостроение. - 2004. – т.14, №4. С. 24 - 28.
3. Степочкин А.О. Моделирование работы шагового электрического двигателя гибридного типа в пакете Simulink // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2018. - №8. С. 308 – 315.
4. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. - М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер: 2008. - 288 с.
5. Денисов В.В., Жуков А.В. Математическое моделирование работы шагового двигателя в составе мехатронного модуля компенсации износа

режущего инструмента // Известия Самарского Научного Центра Российской Академии Наук. - 2012. – т.14, №6. С. 54-58.

6. Маршаков Д.В., Цветкова О.Л., Айдинян А.Р. Нейросетевая идентификация динамики манипулятора - Инженерный вестник Дона, 2011, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/504.

7. Емельянов А.А., Бесклеткин В.В., Авдеев А.С. [и др.] Математическое моделирование электропривода на базе гибридного шагового двигателя в пакете Sim Power Systems // Молодой ученый. - 2016. - №15(119). С. 5 – 10.

8. Данилова М.Г., Серов М.Ю., Богадевич Д.И., Черемных И.С., Князев И.С. Моделирование системы прямого управления моментом асинхронного двигателя с регулятором на основе нечеткой логики в Simulink - Инженерный вестник Дона, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4260.

9. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления. Перевод с английского. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 200 с.

10. Клавдиев А.А. Теория Автоматического Управления в примерах и задачах. - Ч.1. Учебное пособие. изд. - СПб.: СЗТУ, 2005. - 74 с.

References

1. Gibridnye dvigateli. [Hybrid engines]. Elektroprivod. URL: electroprivod.ru/hybrid.htm (data obrashcheniya: 26.04.2020).

2. SHamberov V.N. Nauchnoe Priborostroenie. 2004. T.14, №4. pp. 24 - 28.

3. Stepochkin A.O. Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. 2018. №8. pp. 308 – 315.

4. CHernyh I.V. Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB, SimPowerSystems and Simulink]. М.: DMK Press; SPb.: Piter: 2008. 288 p.

5. Denisov V.V., ZHukov A.V. Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossijskoj Akademii Nauk. 2012. T.14, №6. pp. 54-58.



6. Marshakov D.V., Cvetkova O.L., Ajdinyan A.R. Inzenernyj vestnik Dona, 2011, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2011/504.
7. Emel'yanov A.A., Beskletkin V.V., Avdeev A.S. [i dr.]. Molodoj uchenyj. 2016. №15 (119). pp. 5–10.
8. Danilova M.G., Serov M.YU., Bogadevich D.I., CHeremnyh I.S., Knyazev I.S. Inzenernyj vestnik Dona, 2017, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2017/4260.
9. Kenio T. SHagovye dvigateli i ih mikroprocessornye sistemy upravleniya [Stepper motors and their microprocessor control systems]. Perevod s anglijskogo. M.: Energoatomizdat, 1987. 200 p.
10. Klavdiev A.A. Teoriya Avtomaticheskogo Upravleniya v primerah i zadachah [Automatic Control Theory in Examples and Problems]. SPb.: SZTU, 2005. 74 p.