

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

НЕДЖАРИ Несрин

Казанский национальный исследовательский технологический университет
г. Казань, Россия

Выполнен анализ способов регулирования скорости и крутящего момента группы электроприводов квадрокоптера. Разработана математическая модель с операционным усилителем в пакете SCILAB/XCOS. Проведено моделирование и исследование качества работы электродвигателя с различными типами регуляторов. На основе проведенных исследований были выбраны оптимальные параметры ПИД-регулятора. Разработаны рекомендации по использованию двигателей электроприводов с различными типами регуляторов.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, регулирование скорости и момента, режимы работы, квадрокоптер.

Введение. Работа электродвигателей группы электроприводов квадрокоптера предполагает управляемое переключение обмоток статора. Для этого необходимы соответствующие устройства управления и переключатели. Современные достижения информационных технологий, силовой микроэлектроники и микропроцессорной техники создали условия для разработки и широкого применения исполнительных механизмов на основе вентильных электродвигателей. Несмотря на более высокую цену, вентильные электродвигатели по сравнению с коллекторными оказываются конкурентоспособными в таких областях, как: робототехника, электротранспорт, гибкие производственные системы, приборостроение, вычислительная техника и т. д. На первый план выходят их функциональные и эксплуатационные характеристики. Без редукторные приводы технических устройств позволяют создавать квадрокоптер [1-8], и существенно упрощают конструкцию механизмов. Они обеспечивают огромный пусковой момент и возможность изменения скорости в широком диапазоне, работу в динамических и переходных режимах, высокое качество переходных процессов. Диапазон мощностей вентильных электродвигателей достаточно широк: от 1 Вт до 1000 кВт в тяговом приводе железнодорожного транспорта.

В [9-10] рассмотрены методы управления скоростью вращения двигателей квадрокоптера: непрерывный, импульсный и дискретно-фазовый. Непрерывный метод пред-

полагает плавное изменение напряжения, подаваемого на обмотки статора. Импульсное управление обычно осуществляется импульсами разной полярности, соответствующей положительному или отрицательному, в режиме против включения, моменту двигателя. Релейный метод заключается в использовании реле, которое сравнивает значение управляющего напряжения с показаниями датчика скорости двигателя и переключает двигатель включен или выключен. Дискретно-фазовый метод оптимального управления осуществляется путем сравнения частоты двигателя с опорной частотой опорного генератора.

Помимо указанных методов, в работах [2] рассмотрены методы без датчикового управления, учитывающие скорость изменения тока, величину третьей гармоники и определяющие индуктивность обмотки статора в определенной точке вовремя. Значение третьей гармоники используется для управления. С учетом ряда факторов, влияющих на работу двигателя, а также нелинейной зависимости между током, магнитным потоком и моментом вращения используется система управления, основанная на нечеткой логике, т. е. методах искусственного интеллекта.

Приведенный анализ показывает, что релейный метод управления является одним из эффективных для решения задач регулирования и стабилизации скорости и момента. Недостатком релейных регуляторов является необходимость уменьшения интервалов дискретности для обеспечения точности регулирования, а также ограниченные возмож-

ности реализации известных принципов регулирования. На практике это приводит к использованию числовых контроллеров. Альтернативой таким регуляторам являются аналоговые регуляторы, реализованные на операционных усилителях.

Построение математической модели

Анализ способов управления скоростью двигателя квадрокоптера показал, что одним из наиболее эффективных является релейный способ управления скоростью и моментом двигателя. Результаты исследований [3] показывают, что механические характеристики вентильного и коллекторного двигателей одинаковы. С учетом этого предлагается способ управления скоростью по схеме,

представленной на рисунке 1.

Согласно схеме, ток от источника питания E через транзисторы VT поступает непосредственно в обмотки статора. Работа транзисторов контролируется включением управляющих команд, поступающих от микропроцессора. Микропроцессор обрабатывает сигналы датчика положения ротора РПС и выдает команды на переключатель. Такое управление осуществляется от пуска и разгона двигателя до установившегося или динамического режима работы. Это обеспечивает работу двигателя на любой скорости. Работа датчика положения ротора основана на фотоэлектрическом или индуктивном принципе, или использовании датчика Холла [4].

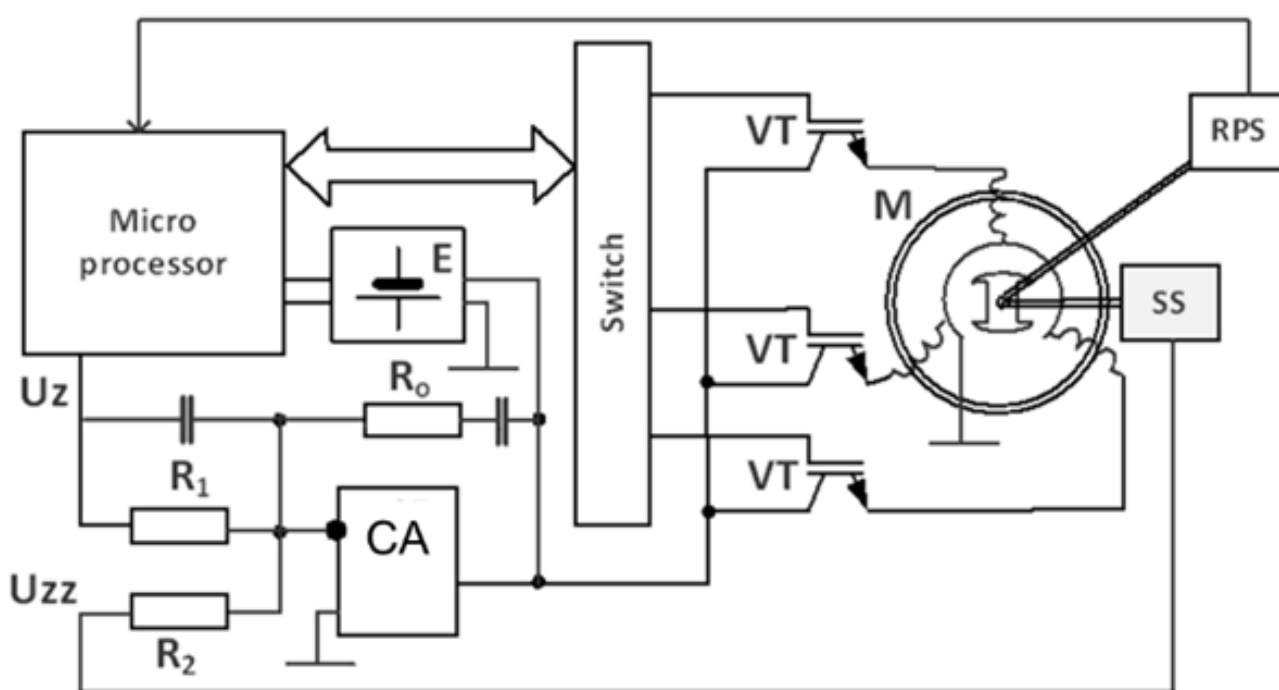


Рисунок 1. Принципиальная схема бесщеточного двигателя с операционным усилителем

В предложенном методе управление скоростью и моментом двигателя осуществляется по обратной связи от регулятора, в качестве которого используется операционный усилитель CA [5]. Коэффициент усиления регулятора задается резисторами R_0 и R_1 . Регуляторы разных типов можно построить на основе операционного усилителя, изменив схему подключения резисторов и конденсаторов. Обратная связь системы автоматического регулирования (САУ) [6] обеспе-

чивается датчиком скорости CC . Управление осуществляется путем изменения величины тока в обмотках статора. Датчик скорости может представлять собой тахогенератор, фотоэлектрический датчик или датчик другого типа [7]. Изменение скорости двигателя может осуществляться, например, изменением напряжения U_z на входе операционного усилителя, командами, передаваемыми по сети CAN [8].

По предложенной схеме управление ско-

ростью осуществляется путем изменения величины тока, подаваемого через транзисторы VT на обмотки статора двигателя М. То есть релейное управление, при котором работает только источник питания. при включении или выключении заменяется САУ, регулирующим величину тока в обмотках статора. Частота двигателя задается напряжением U_Z , подаваемым на вход операционного усилителя СЕ. Управление осуществляется по частоте вращения ротора, измеряемой датчиком скорости СС. Напряжение датчика, соответствующее скорости ротора в цепи обратной связи, поступает на вход операционного усилителя СА. Метод управления предполагает использование разных типов регуляторов. Тип регулятора можно изменить перестановкой элементов схемы операционного усилителя СА введением дополнительных конденсаторов или резисторов. В дальнейшем этот бесщеточный двигатель постоянного тока с операционным усилителем будет обозначаться сокращенно (ДПТ-ОА).

Показателем, определяющим функциональную пригодность электропривода, является точность соблюдения заданной скорости и обеспечение заданного значения крутящего момента. Работа двигателя в составе, например, группы электроприводов квадрокоптера или другого транспортного средства, исследовалась с помощью математической модели путем подачи на его входы различных значений напряжения и крутящего момента. Исследование электропривода выполнено на основе его математической модели. Исследование проводилось в статиче-

ском и динамическом режимах. К величине нагрузок и его эксплуатации предъявляются требования по точности [3].

Рассматривается двигатель с 12 полюсами статора и 8 полюсами ротора (12/8). Скорость вращения в пределах от 3200 об/мин до 15000 об/мин. Крутящий момент двигателя определяется количеством потребляемой энергии. Напряжение на БЛДК-ОА $U = 12$ В, ток $I = 0,52$ А, где мощность $P = 6,24$ Вт. КПД ДПТ составляет около 75-80%. Часть энергии рассеивается, а остальная часть тратится на преодоление сил сопротивления. Крутящий момент на валу двигателя порядка $P = 5$ Н·м.

Для построения математической модели двигатель представляется как апериодическое звено второго порядка с двумя постоянными времени: T_E – электрической части двигателя и T_M – механической части (рисунок 2). Довольно часто двигатель представляют, как апериодическое звено электрической части и интегрирующее механическую часть. Электропривод с ДПТ-ОА часто имеет высокую скорость, поэтому значительную роль в его работе играет вязкость. Поэтому в этой модели механическая часть представлена как апериодическое звено с постоянной времени T_M . Обратная связь обеспечивается датчиком скорости СС с коэффициентом передачи K_V . Сигнал датчика скорости U_{ZZ} поступает на дифференциальный вход регулятора напряжения. Скорость двигателя регулируется напряжением U_Z . Регулирование скорости двигателя осуществляется в зависимости от разницы между напряжением обратной связи U_{ZZ} и заданным напряжением U_Z .

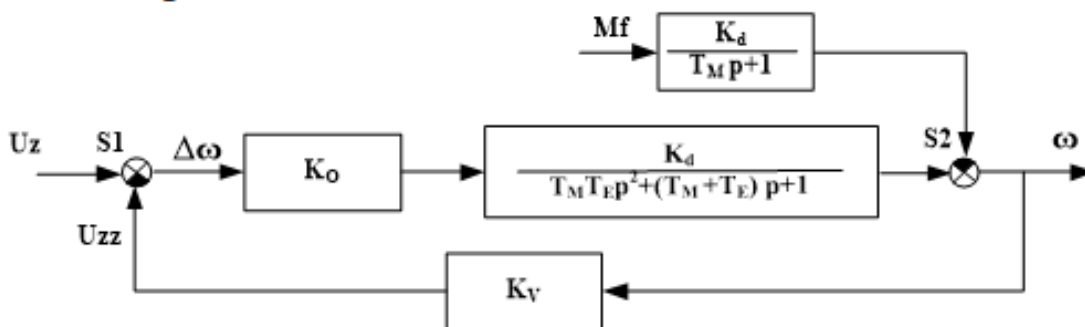


Рисунок 2. Принципиальная схема системы автоматического регулирования частоты вращения двигателя ДПТ-ОА

Численные значения параметров двигателя, следующие: сопротивление обмотки статора $R_{ст} = 2,7 \text{ Ом}$; индуктивность $L_{ст} = 1,8 \text{ мГн}$; момент инерции ротора $J = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; постоянная двигателя $K_k = 4,3 \cdot 10^{-3}$.

Для изучения работы ДПТ с различными типами регуляторов, реализованных на операционном усилителе, было проведено математическое моделирование в программной среде SCILAB/XCOS. SCILAB является программным обеспечением с открытым исходным кодом и не требует лицензирования [9]. Этот пакет успешно заменяет лицензионный пакет Matlab/Simulink [10]. Могут быть использованы и другие решения для моделирования и расчета [4].

При изучении точности работы двигателя следует различать статические и динамические погрешности регулирования. Статическая ошибка – это ошибка в статическом режиме работы. Динамическая ошибка возникает в динамическом режиме при изменении значения сил сопротивления. Ошибка управления имеет две составляющие: по входу, управляющему значению и по значению нагрузки на вал. Величины этих ошибок были определены путем экспериментального исследования модели. Теоретически значения относительных ошибок регулирования рассчитываются по формулам [3]:

– ошибка по управляющему сигналу:

$$\delta_x = \frac{1}{1+K} = S \quad (1)$$

– по тревожному действию:

$$\delta_f = \frac{K_f}{1+K} \quad (1)$$

Результаты эксперимента показывают, что работа электропривода с такими ДПТ крайне неудовлетворительна. Ускорение превышает

5 с. Когда магнитная головка движется к поверхности дисков, происходит переходный процесс такой же длительности, и скорость двигателя уменьшается на $\delta f = 34\%$. Мотор без САУ к использованию не пригоден: во-первых, время разгона довольно велико, и магнитная головка из парковочного положения выходит на поверхность диска и скорость двигателя падает до $V_f = 6153 \text{ об/мин}$.

Работа двигателя при прямом подключении к источнику питания без операционного усилителя.

Модель двигателя при прямом подключении к электросети без применения САУ с операционными усилителями представлена на рисунке 3. Значения параметров модели, следующие: напряжение питания $U_Z = 12 \text{ В}$, значение момента силы сопротивления. $M_f = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$, время перемещения магнитной головки из парковочного положения по рабочей поверхности диска $t_f = 5 \text{ с}$. Результаты моделирования в виде графика изменения скорости двигателя представлены на рисунок 4, числовые значения скорости и погрешности управления приведены в таблице 1 (раздел – прямой пуск двигателя).

Коэффициенты модели рассчитываются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} K_0 = \frac{R_0}{R_1} \\ K_d = \frac{1}{K_k} \\ T_E = \frac{L_{st}}{R_{st}} \\ T_m = \frac{R_{st} \cdot J}{K_k^2} \end{array} \right.$$

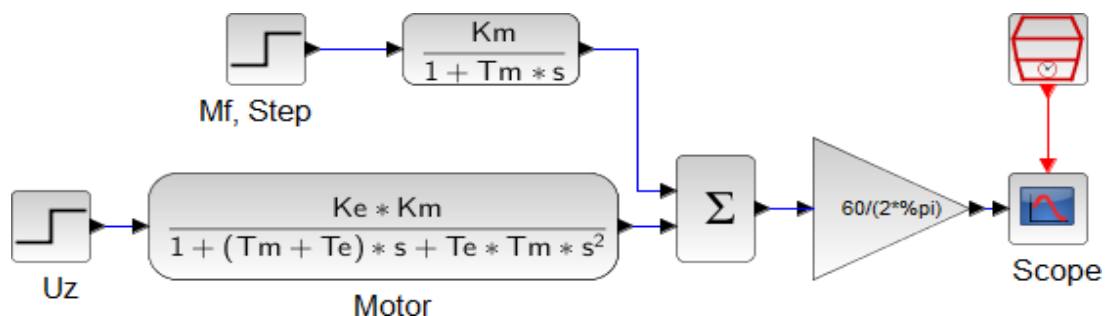


Рисунок 3. Модель электропривода БДЦ-ОА при прямом пуске двигателя

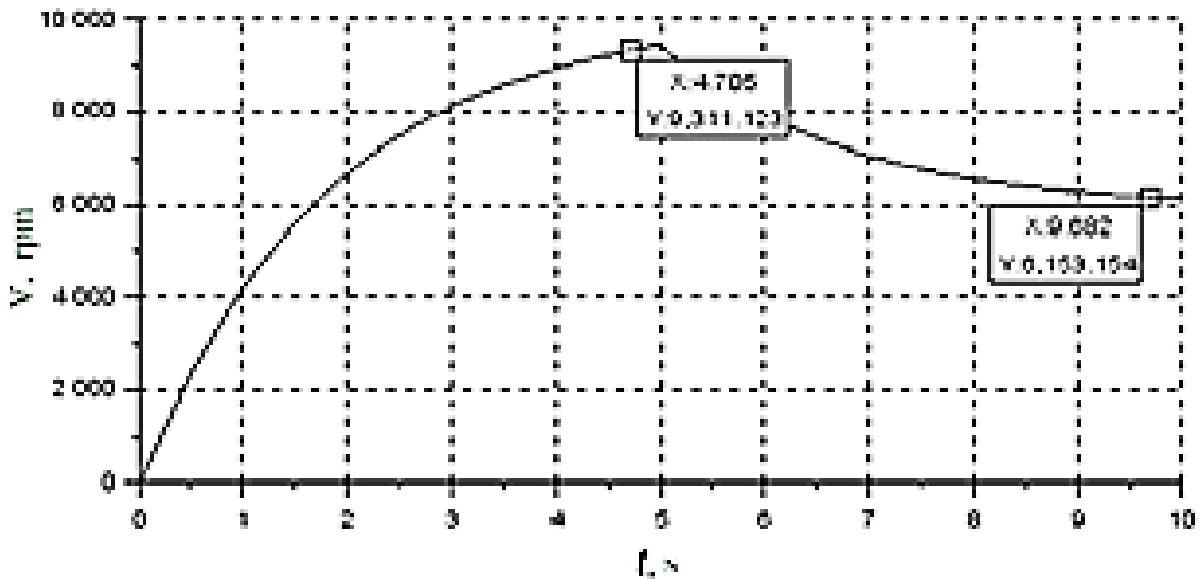


Рисунок 4. График изменения скорости двигателя, подключенного напрямую к источнику питания

Математическая модель, соответствующая такой САУ, представлена на рисунке $u_b; t$. Модель сведена к одной обратной связи, а выходная скорость рассчитывается в оборотах в минуту. В качестве стабилизатора

используется операционный усилитель СЕ. Модель имеет два входа: первый – по сигналу U_z , второй – по силе сопротивления M_f , возникающей при перемещении коромысла с магнитной головкой.

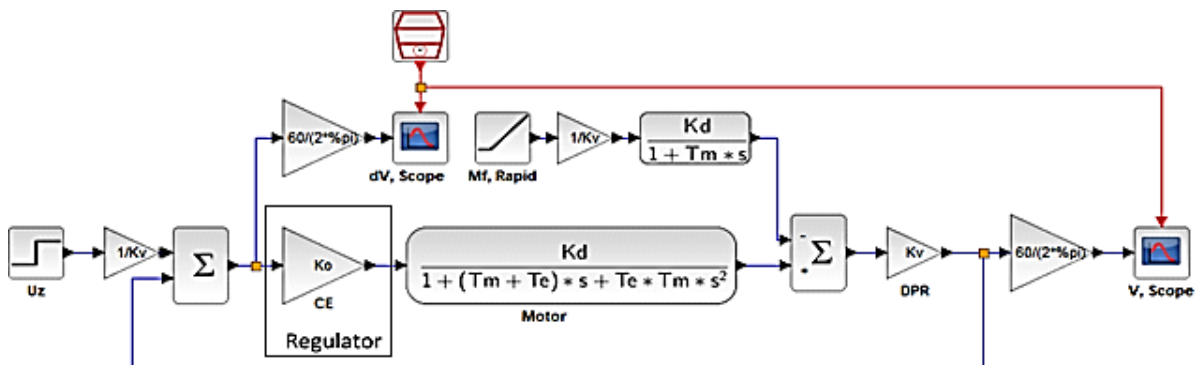


Рисунок 5. Модель САУ электропривода с П-регулятором, приведенной к одинарной обратной связи

По результатам моделирования на компьютерной модели скорость двигателя при разгоне изменяется в течение 5 с и достигает $V = 9311$ об/мин. Далее получаем дискретность интегрирования 0,1 мс, напряжение питания $U_Z = 12$ В, сигнал возмущения сту-

пенчатый, момент силы возмущения $M_f = 5$ Н·м, заданная частота вращения шпинделя двигателя 7200 об/мин. Интегрирование уравнений движения производится по методу Рунге-Кутты 4-го порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОЧНОСТИ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

К	С	Ускорение двигателя			Ускорение двигателя Вращения			Переходный процесс	
		В, об/мин	ΔV , об/мин	δV , %	Вф, об/мин	ΔV_f , об/мин	δf , %	Тип	Продолжительность t_{PP} , с
Прямое подключение двигателя (без ACS)									
–	–	9311			6153	–	34	М	5
Система статического контроля (П-регулятор)									
16,5	0,315	5725	411	5,69	62295	977	13,6	М	1,6
29,8	0,033	6972	234	3.25	66490	557	7,74	А	0,35
87,5	0,011	7125	81	1.12	7013	193	2,68	О	0,3
Астатический интегрирующий (I-регулятор)									
0,33	0,75	7206	0	0	7206	0,04	0	М	35
1,65	0,48	7207	0,03	0	7207	0,02	0	О	20
Пропорционально-интегрирующий (ПИ-регулятор)									
3.31	–	7206	0		7207	0	0	М	2,5
46	–	7206	0		7203	4.4	0	О	0,5
Пропорционально-интегро-дифференциальный (ПИД-регулятор)									
Статический, 5 Н·м		7208	1,5	0	7206	1,7	0	А	0,03
Динамический, 5 Н·м/с		7205	1,5	0	7194	11,0	0,15	А	0,03

Переходный процесс: М – монотонный, А – аperiodический; О – колебательный

Результаты исследования показывают, что в случае реализации с использованием операционного усилителя САУ с ПИД-регулятором, параметры которого можно определить с помощью предложенной математической модели, позволяют обеспечить высокие характеристики электропривода. Клапанные электродвигатели с такой системой управления подходят для использования в системах различного назначения.

Выводы. Одним из эффективных способов управления скоростью и крутящим моментом группы электроприводов в квадрокоптере является использование PWM (Pulse Width Modulation – ШИМ – широтно-импульсная модуляция), который использует систему автоматического управления вместо

реле, что позволяет расширить функциональные возможности регулятора и перейти от ступенчатого к плавному регулированию.

Разработана компьютерная модель системы управления электродвигателем клапана с использованием операционного усилителя, позволяющая реализовать различные принципы управления.

Показано, что ПИД-регулятор на основе операционного усилителя позволяет создать электропривод, отвечающий требованиям точности и качества. Создана математическая модель, с помощью которой подобраны параметры ПИД-регулятора, обеспечивающие соблюдение заданной скорости с точностью 0,15% в динамических режимах работы и длительности переходных процессов 30 мс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ивлиев Е.А.* Математическая модель электрогидравлического актуатора / Е.А. Ивлиев, В.И. Грищенко, Д.Д. Медведев // Актуальные проблемы науки и техники. 2023: Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 15-17 марта 2023 г. / отв. редактор Н.А. Шевченко. – Ростов-на-Дону: Донской государственный технический университет, 2023. – С. 1202-1203. – EDN NFQMNZ.
2. *Кононов М.Н.* Математическая каскадная модель квадрокоптера / М.Н. Кононов, Ю.В. Парыгина, М.К. Новикова // Тезисы XXIII Всероссийской конференции молодых учёных по математическому моделированию и информационным технологиям: Тезисы докладов, Новосибирск, 24-28 октября 2022 г. – Новосибирск: Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 2022. – С. 55. – EDN NARHNX
3. Математическая модель системы управления квадрокоптером / А.И. Годунов, С.А. Куканов, П.С. Суздальцев, А.М. Мухамбетов // Надежность и качество сложных систем. – 2024. – № 2(46). – С. 25-31. – DOI 10.21685/2307-4205-2024-2-3. – EDN EMRSIA.
4. *Федотов В.В.* Моделирование позиционной системы электропривода по схеме «Широтно-импульсный преобразователь – двигатель постоянного тока» / В.В. Федотов, В.В. Рожков // Энергетика, информатика, инновации – 2022 (электроэнергетика, электротехника и теплоэнергетика, математическое моделирование и информационные технологии в производстве): сборник трудов XII международной научно-технической конференции, Смоленск, 23 ноября 2022 г. / филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске. Том 1. – Смоленск: Б. и., 2022. – С. 139-142. – EDN BTJSIZ.
5. *Федотов В.В.* Решение характеристического уравнения замкнутой системы электропривода средствами компьютерной математики // Информационные технологии, энергетика и экономика: Труды XX Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов, Смоленск, 26-27 апреля 2023 г. – Смоленск: Универсум, 2023. – С. 224-228. – EDN TGEVDC.
6. *Хакимов И.С.* Математическая модель гидропривода квадрокоптера большой мощности // Мавлютовские чтения: материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции: в 6 томах, Уфа, 25-27 октября 2022 г. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 351-357. – EDN ZDQCAV.
7. *Dimova A.S., Kotov K.Yu., Maltsev A.S.* Trajectory control of a quadrotor carrying a cable-suspended load // 2020 24th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) / IEEE. 2020. P. 501–505.
8. *Kusznir Tom, Smoczek Jaros law* Quadrotor UAV control for transportation of cable suspended payload // Journal of KONES. 2019. Vol. 26.
9. Modeling, control and design of a quadrotor platform for indoor environments: Rep. / Arizona State University ; Executor: Shi Lu: 2018.
10. Using UAVs for map creation and updating. A case study in Rwanda / M Koeva, M Muneza, C Gevaert et al. // Survey Review. 2018. Vol. 50, no. 361. P. 312-325.