

¹ Политехнический институт (филиал)
Северо-Восточного федерального
университета имени М. К. Аммосова,
г. Мирный

² Нижегородский государственный
технический университет
имени Р. Е. Алексеева,
г. Нижний Новгород

РЕАЛИЗАЦИЯ PI-РЕГУЛЯТОРА СКОРОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Работа посвящена математическому моделированию системы управления скоростью вращения двигателя постоянного тока, основанной на применении PI-регулятора. Двигатели постоянного тока нашли широкое применение в промышленности для приведения в движение механизмов циклического действия, где требуется высокая скорость отклика, высокий пусковой крутящий момент, линейное управление. Основные методы управления требуемыми характеристиками скорости вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением заключаются в управлении параметрами обмоток якоря и возбуждения, питаемых от разных источников. PI-регулятор находит широкое применение в программируемых логических контроллерах благодаря простоте и ясности математического аппарата. Предлагаемая математическая модель PI-регулятора основана на выборе оптимальных параметров, обеспечивающих поддержание фактической скорости, близкой к заданной. Были определены оптимальные коэффициенты PI-регулятора K_p и K_i , дающие наилучший результат для постоянной скорости. Результаты компьютерного моделирования в MatLab были сопоставлены с результатами имитационного моделирования на лабораторной установке. Полученные данные при применении PI-регулятора по установившейся ошибке и времени переходного процесса выглядят предпочтительнее имитационной модели с регулировкой напряжения. Разработанная математическая модель показала следующие основные результаты: время разгона $< 0,3$ с; время переходного процесса $< 0,5$ с; перерегулирование не превышает 0,5 %; установившаяся ошибка не превышает 0,1 %. В результате исследования была разработана математическая модель и проанализирована работа двигателя постоянного тока с PI-регулятором, позволяющим практически полностью устранить вынужденные колебания и установившуюся ошибку. Отмечено преимущество предложенного метода применения PI-регулятора как более привычного и простого в использовании элемента управления при внедрении в существующую систему управления без особых изменений.

Ключевые слова: двигатель постоянного тока, PI-регулятор, математическое моделирование, MatLab, скорость вращения, установившаяся ошибка.

Введение. Современный автоматизированный электропривод представляет собой сложную электромеханическую систему, предназначенную для приведения в движение рабочего органа машины и управления её технологическим процессом. Он состоит из трёх основных частей: электрическо-

го двигателя, осуществляющего электромеханическое преобразование энергии; механической части, передающей механическую энергию рабочему органу машины; и системы управления, обеспечивающей оптимальное по тем или иным критериям управление технологическим процес-

сом [1]. Диапазон изменения номинальных частот вращения электропривода имеет весьма широкие пределы. Использование средств дискретной техники в системах управления приводами постоянного тока расширяет диапазон регулирования скорости до 1000 ... 1500:1 и выше [2].

В технологии горного производства используется ряд горных машин, главные рабочие механизмы которых оснащены регулируемым электроприводом. Они выполняют основные функции: разрушение и перемещение горной породы, транспортировку горной массы, перемещение жидкой и воздушной среды. К ним относятся добычные и буровые машины, экскаваторы, конвейерные и подъемные установки, насосные, компрессорные и вентиляторные установки.

Шахтные подъемные установки являются очень важным звеном технологической схемы подземных горнодобывающих предприятий (рудников). На подъемных установках алмазодобывающих рудников (на примере АК «АЛРОСА») применяются электроприводы постоянного тока с управлением от тиристорного выпрямителя: система «управляемый выпрямитель — двигатель постоянного тока», и переменного тока с управлением от преобразователя частоты: системы «преобразователь частоты — асинхронный двигатель» и «преобразователь частоты — синхронный двигатель». Каждая из этих систем обладает своими преимуществами и недостатками. К главным преимуществам систем электропривода с двигателями постоянного тока можно отнести высокое быстродействие, получение необходимых характеристик и точность управления, то есть такой электропривод обладает высокой управляемостью, что упрощает систему автоматического управления движением подъемной машины [3, 4].

Применение PI- и PID-регуляторов для двигателей постоянного тока неоднократно рассматривалось в научных работах. В работе [5] авторы рассматривают множество методов регулирования, в том числе PI-регулирование скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением. Значения характеристик переходного процесса, полученные от PI-регулятора, представляют собой пиковые значения за время моделирования (20 %), а именно время разгона 0,01 с, время максимума 0,1 с и время установления переходного процесса 1 с. Авторы в работе [6] применяют три метода управления: P-регулятор, PI-регулятор и PID-регулятор. Причем для настройки этих регуляторов применялся метод Циглера — Никольса, который является эвристическим, а не экспериментально-аналитическим. Значения характеристик переходного процесса, полученные от PI-регулятора, представляют собой пиковые значения за время моделирования (19 %), а именно время разгона 6,01 с, время максимума 1,19 с и время установления переходного процесса 34,1 с. В работах [7–9] уже применены более современные методы управления скоростью двигателей постоянного тока, такие как использование нечеткого PI-регулятора дробного порядка, использование генетического алгоритма и построение линейно-квадратичного регулятора соответственно.

Целью настоящей работы является реализация математической модели PI-регулятора скорости для двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с помощью пакета программ MatLab. Для реализации модели был разработан новый алгоритм, методика настройки которого сравнивается

с методом Циглера — Никольса. Для сопоставления смоделированных параметров используется имитационная модель, собранная на базе лабораторной установки. Результаты моделирования системы управления двигателем постоянного тока помогут в выборе систем электропривода и автоматического управления для реальных механизмов подъемных установок горных предприятий.

Краткая теоретическая часть. Система электропривода с двигателем постоянного тока имеет три основных свойства: высокую скорость, надежность и высокую производительность [10]. Актуальность использования именно PI-регулятора исходит из того факта, что этот тип регулятора приближает погрешность заданной и фактической скорости к нулю [11].

Скорость вращения двигателя постоянного тока можно определить из выражения (1):

$$n = \frac{U - I_a \cdot R_a}{k \cdot \Phi} \quad (1)$$

Из приведенного выше уравнения видно, что скорость условно связана с напряжением, магнитным потоком и сопротивлением якоря. Двигатели постоянного тока делятся на двигатели со смешанным возбуждением, с последовательной и параллельной обмоткой возбуждения, с независимым возбуждением. Последний тип нашел наиболее широкое применение в технологических установках. Управление скоростью вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением можно реализовать как с помощью обмотки якоря, так и обмотки возбуждения, которые могут подключаться к разным источникам питания. Путем управления якорем и полем обмотки возбуждения достигается широкий диапазон регулирования скорости как ниже, так и выше максимальной [12].

Принцип действия двигателя постоянного тока основан на взаимодействии тока проводников обмотки якоря с магнитным полем обмотки возбуждения, в результате чего на каждый проводник обмотки якоря действует электромеханическая сила, а совокупность сил, действующих на все активные проводники обмотки, образует электромагнитный момент машины [13].

На рис. 1 представлена схема замещения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением.

На основании второго закона Кирхгофа [14] для мгновенных значений электродвижущей силы, напряжений и токов можно записать следующее дифференциальное уравнение (2):

$$u_a = i_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + e, \quad (2)$$

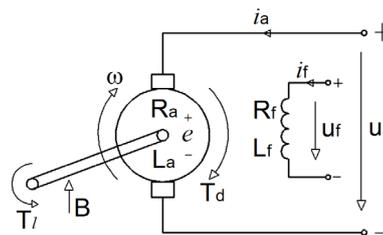


Рис. 1. Схема замещения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

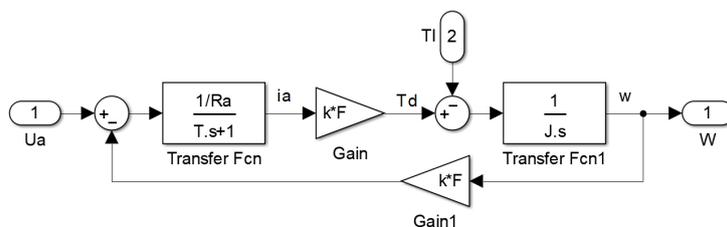


Рис. 2. Математическая модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением

где $e = K_u \cdot i_f \cdot \omega$ — электродвижущая сила. Подставив формулу электродвижущей силы в (2), получим уравнение (3):

$$u_a = i_a \cdot R_a + L_a \cdot \frac{di_a}{dt} + K_u \cdot i_f \cdot \omega. \quad (3)$$

Используя преобразования Лапласа для (3), получим (4):

$$U_a(s) = I_a(s) \cdot R_a + L_a(s) \cdot I_a(s) + K_u \cdot I_f \cdot \omega(s). \quad (4)$$

Из уравнения (4) выразим ток и получим (5):

$$I_a(s) = \frac{U_a(s) - K_u \cdot i_f \cdot \omega(s)}{R_a + L_a(s)}. \quad (5)$$

Уравнение (5) дополним уравнением движения механической части двигателя (6):

$$J \cdot \frac{d\omega}{dt} + B \cdot \omega = T_d - T_L. \quad (6)$$

На основании выведенных уравнений можно получить простую математическую модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 2) [15].

Система управления двигателя должна минимизировать четыре фактора [16]: время разгона (t_r, s) — определяется периодом времени от 10 % до 90 % заданного значения; перерегулирование ($\epsilon, \%$) — представляет собой пиковое значение кривой скорости, определенное исходя из заданного значения; время установления (t_s, s) — представляет собой время, необходимое для фактического достижения и фиксации на уровне 2–5 % от заданного значения; установившаяся ошибка ($\sigma, \%$) — представляет собой разницу между фактическим и заданным значением скорости.

Экспериментальная часть. Благодаря простоте и ясности математического аппарата, PI-регуляторы находят широкое применение в программируемых логических контроллерах [17]. В работе предлагается математический метод разработки PI-регулятора скорости двигателя постоянного тока. Математическое моделирование реализовано в среде MatLab для получения оптимального отклика двигателя постоянного тока с PI-регулятором. Наш метод настройки PI-регулятора сравнивается с методом Циглера–Никольса. Выбор оптимальных значений параметров PI-регулятора при этом обеспечивает поддержание фактической скорости, близкой к заданной. PI-регулятор имеет пропорциональную и интегральную составляющие, благодаря чему есть возможность делать установившуюся ошибку равной нулю.

Стандартная модель передаточной функции PI-регулятора с замкнутым контуром и обратной связью представлена на рис. 3.

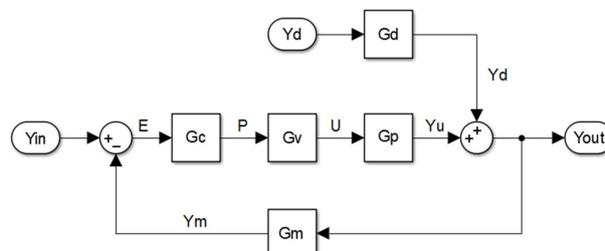


Рис. 3. Модель передаточной функции PI-регулятора

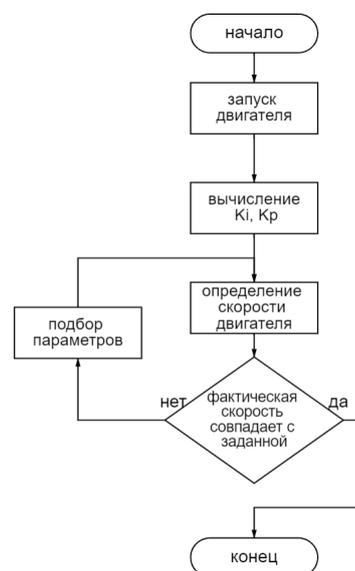


Рис. 4. Блок-схема работы алгоритма

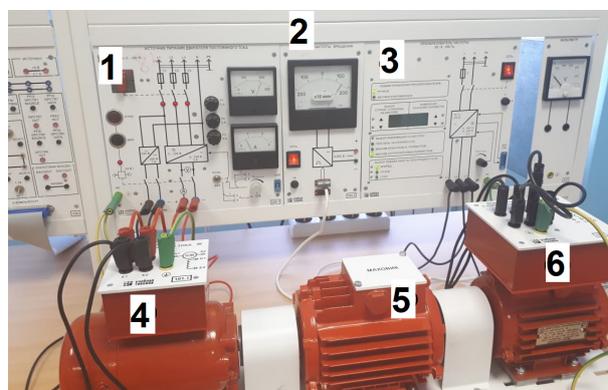


Рис. 5. Лабораторная установка для имитационного моделирования, где позициями обозначены: 1 — источник питания; 2 — указатель частоты вращения; 3 — преобразователь частоты; 4 — двигатель постоянного тока; 5 — маховик; 6 — двигатель переменного тока

Анализ времени отклика данной системы может быть основан на преобразовании передаточной функции во времени с учетом обратных преобразований Лапласа. Передаточная функция нашей системы будет определяться по формуле (7):

$$\frac{Y_{out}}{Y_{in}} = \frac{G_C \cdot G_V \cdot G_P}{1 + G_C \cdot G_V \cdot G_P \cdot G_M} \quad (7)$$

Используя разложение в ряд Тейлора, получим (8) [18]:

$$G_C = \frac{1}{G} \cdot \frac{e^{\theta}(s)}{(\tau_c + \theta)(s)} \quad (8)$$

Из уравнения (8) могут быть рассчитаны различные параметры временной области, такие как время пика, время нарастания, время задержки и время установления сигнала.

На рис. 4 представлен алгоритм управления скоростью двигателя постоянного тока на основе PI-регулятора. Предлагаемый PI-регулятор, встроенный в двигатель постоянного тока, позволяет поддерживать фактическую скорость максимально близкой к заданной.

Для сравнения результатов моделирования будем использовать имитационную модель на базе лабораторной установки, внешний вид которой приведен на рис. 5.

Технические характеристики двигателя постоянного тока, которые потребуются для разработки модели, приведены в табл. 1. Значения второго столбца взяты из паспортных данных двигателя, а четвертого столбца — рассчитаны согласно методике в [19].

На рис. 6 представлена модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения с PI-регулятором в пакете программ MatLab, а именно реализованная в приложении Simulink/SimPowerSystems [20, 21].

Для создания модели использовались следующие блоки: DC Machine — блок двигателя постоянного тока; DC Voltage Source — источник постоянного напряжения; GTO — блок тиристорного полупроводникового устройства, которое можно включать/выключать с помощью сигнала; Ground — заземлитель; PID Controller — контроллер с непрерывным или дискретным временем, позволяющий реализовать PID, PI, PD, P или I-регулятор в модели; Saturation — блок для ограничения диапазона сигнала; Relational Operator — сравнивает сигналы с двух входов, используя указанный параметр; Constant — источник постоянного значения сигнала; Bus selector — обеспечивает выбор необходимых параметров для измерения; Mux — мультиплексор, объединяющий несколько сигналов в один; Scope — используется для графического отображения результатов моделирования в функции времени; Display — используется для численного отображения результатов; Powergui — блок графического интерфейса, обеспечивающий хранение эквивалентной Simulink-модели в пространстве состояний.

Результаты исследования. В наших моделях скорость вращения двигателя n , переведенная в угловую скорость вращения ω , будет являться главной координатой электромеханической системы для дальнейшего исследования и сравнения. Угловую скорость вращения можно определить по выражению:

Таблица 1

Технические характеристики двигателя ПЛ-062

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Мощность (P_n)	90 Вт	Сопротивление якоря (R_a)	61,5 Ом
Напряжение (U_n)	220 В	Индуктивность якоря (L_a)	1,8 Гн
Ток якоря ($I_{ан}$)	0,76 А	Сопротивление обмотки возбуждения (R_f)	1375 Ом
Ток обмотки возбуждения (I_m)	0,16 А	Индуктивность обмотки возбуждения (L_f)	201 Гн
Момент (M_n)	0,573 Н·м	Взаимоиндукция (L_{af})	4,7 Гн
КПД (η)	0,575	Момент инерции (J_m)	0,0014 кг·м ²
Скорость вращения (n_n)	1500 об/мин	Сила трения (B_m)	0,004205 Н·м·с

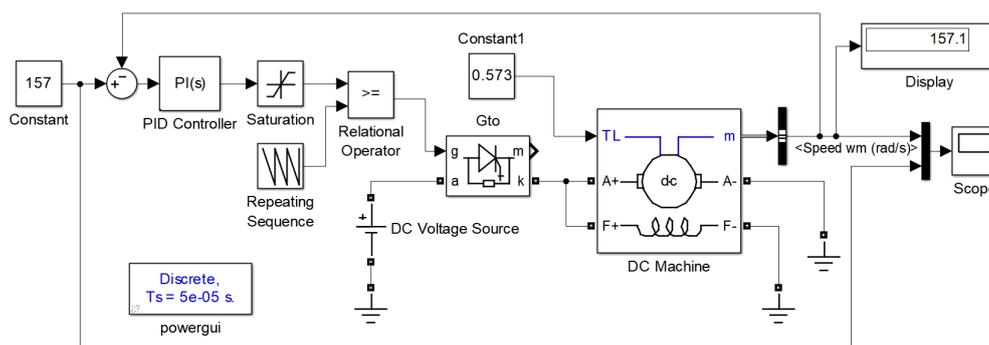


Рис. 6. Модель двигателя постоянного тока с PI-регулятором в MatLab

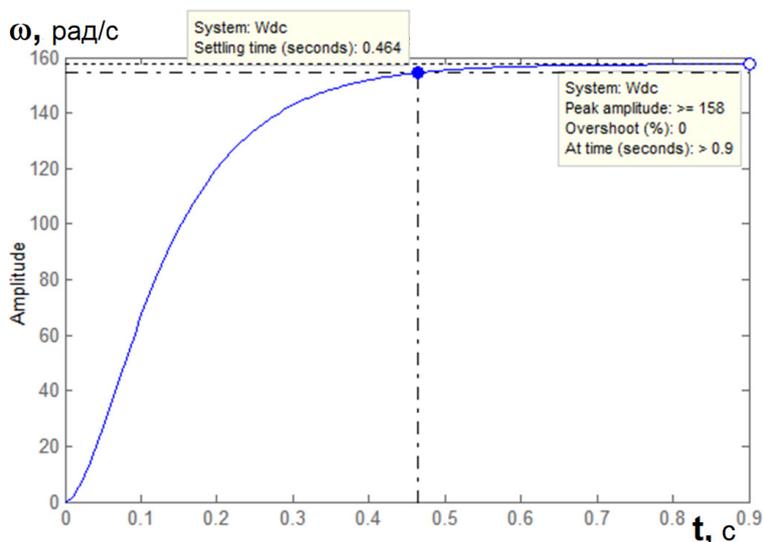


Рис. 7. Характеристика переходного процесса при имитационном моделировании

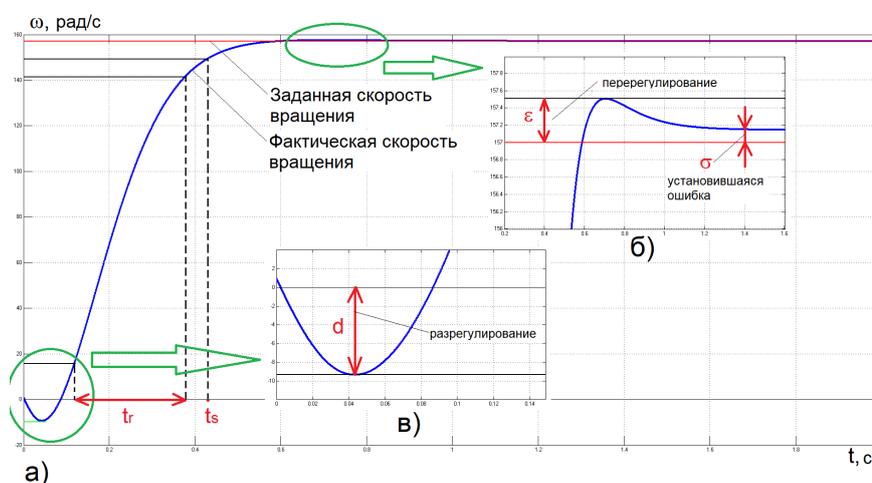


Рис. 8. Результаты моделирования двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при использовании PI-регулятора

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} \quad (9)$$

В результате имитационного и компьютерного моделирования в MatLab были получены характеристики переходного процесса, для которых присущи некоторые показатели качества линейных непрерывных систем, обуславливающие динамику переходного процесса и точность системы. Рассмотрим ряд таких показателей, а именно время разгона (t_r), разрегулирование (d) и перерегулирование (ϵ), время установления переходного процесса (t_s), установившуюся ошибку (σ).

Характеристика угловой скорости вращения, снятая с блока 2 (рис. 5) и обработанная на компьютере в MatLab, показана на рис. 7.

На рис. 7 видим, что время установления переходного процесса составляет 0,464 с, а выход скорости на свое номинальное значение осуществляется за 0,9 с. Разрегулирование и перерегулирование отсутствуют. Установившаяся ошибка превышает 0,5 % и составляет 1 рад/с.

На рис. 8а показан переходной процесс, на котором красной линией обозначена заданная (номинальная) скорость вращения двигателя, а синей — фактическая. Время разгона двигателя составляет

0,223 с, время установления переходного процесса — 0,418 с. На рис. 8б, в соответственно показаны процессы перерегулирования и разрегулирования. Величина перерегулирования равна 0,5 %, а разрегулирование не превышает 6 %. Также на рис. 8б показана установившаяся ошибка, которая при использовании PI-регулятора не превышает 0,1 %. При скоростях двигателя более 1000 об/мин такой ошибкой можно пренебречь.

Сопоставим данные, полученные при моделировании в среде MatLab, с результатами имитационной модели. Сопоставлению будет подлежать угловая скорость вращения и параметры переходного процесса. Во время сопоставления вычислим абсолютную и относительную погрешности результатов произведенного моделирования. Абсолютной погрешностью числа называют разницу между этим числом и его точным значением. В нашем случае для определения абсолютной погрешности угловой скорости вращения воспользуемся формулой:

$$\Delta\omega = \omega - \omega_n \quad (10)$$

Относительной погрешностью называют отношение абсолютной погрешности числа к самому этому числу. В нашем случае относительной по-

Сопоставление результатов имитационного и компьютерного моделирования

Параметр	ИМ	КМ
Номинальная угловая скорость вращения двигателя, ω_n (rad/s)	157	157
Фактическая угловая скорость вращения, ω (rad/s)	158	157,1
Время разгона двигателя, t_r (s)	0,315	0,223
Время переходного процесса, t_s (s)	0,464	0,418
Разрегулирование, d (%)	–	5,95
Перерегулирование, ε (%)	–	0,32
Абсолютная погрешность, $\Delta\omega$ (rad/s)	1	0,1
Относительная погрешность (установившаяся ошибка), σ (%)	0,64	0,06

грешностью будет являться величина установившейся ошибки, которая будет определяться по формуле:

$$\sigma = \left| \frac{\Delta\omega}{\omega} \right| \cdot 100\% \quad (11)$$

Результаты сопоставления и определения погрешностей представлены в табл. 2.

Из результатов можно сделать вывод, что разработанная модель двигателя постоянного тока независимого возбуждения с PI-регулятором по установившейся ошибке и времени переходного процесса выглядит предпочтительнее имитационной модели с регулировкой напряжения.

Заключение. Был разработан алгоритм управления скоростью двигателя постоянного тока на основе PI-регулятора, который позволяет поддерживать фактическую скорость, близкую к заданной. Благодаря разработанной математической модели были получены характеристики скорости двигателя постоянного тока с независимым возбуждением с PI-регулятором. Для сравнения результатов была использована имитационная модель. Были определены коэффициенты PI-регулятора $K_p=7,2$ и $K_i=100$, дающие наилучший результат для постоянной скорости. Время разгона составляет менее 0,3 с. Выход скорости на свое номинальное значение происходит менее чем за 0,5 с. Перерегулирование не превышает 0,5 %. Установившаяся ошибка не превышает 0,1 %. Таким образом, разработана математическая модель и проанализирована работа двигателя постоянного тока с PI-регулятором, позволяющим практически полностью устранить вынужденные колебания и установившуюся ошибку. Другим преимуществом предложенного метода является то, что PI-регулятор более привычен и прост в использовании, поэтому его легко внедрить в существующую систему управления без особых изменений.

Библиографический список

1. Решетняк С. Н., Фащенко В. Н., Федоров О. В. Особенности применения преобразовательной техники на горнодобывающих предприятиях России // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 6. С. 331–334.
2. Фащенко В. Н., Решетняк С. Н. Энергоэффективный резонансный режим электромеханических систем органов резания горных машин на базе современных структур управления // Горное оборудование и электромеханика. 2016. № 4 (122). С. 41–45.
3. Cosmatov V., Petushkov M., Sarvarov A. Analysis of existing methods of diagnosis of electric motors and their development prospects // Proceedings-2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM 2020). 2020. No. 9112030. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112030.
4. Татевосян А. А. Оптимизация параметров тихоходного синхронного двигателя с постоянными магнитами для линейного привода длинноходового одноступенчатого поршневого компрессора // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 6. С. 148–156. DOI: 10.30724/1998-9903-2021-23-6-148-156.
5. Munje R. K., Shinde P. P., Kale S. S. Performance comparison of PI/PID controllers for DC motor // 2014 Annual IEEE India Conference (INDICON). 2014. P. 1–3. DOI: 10.1109/INDICON.2014.7030359.
6. Koondhar M. A., Channa I. A., Bukhari S. A. [et al.]. PI and Fuzzy Logic Controller based Comparative Analysis of Separately Excited DC Motor // Journal of Applied and Emerging Sciences. 2021. Vol. 11, Issue 1. P. 52–56. DOI: 10.36785/2021111414.
7. Labbaf Khaniki M. A., Esfandiari S., Manthouri M. Speed Control of Brushless DC motor using Fractional Order Fuzzy PI Controller Optimized via WOA // 10th International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE 2020). 2020. P. 431–436. DOI: 10.1109/ICCKE50421.2020.9303634.
8. Amiri M. S., Ibrahim M. F., Ramli R. Optimal parameter estimation for a DC motor using genetic algorithm // International Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2020. Vol. 11, Issue 2. P. 1047–1054. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i2.pp1047-1054.
9. Maghfiroh H., Nizam M., Praptodiyono S. PID optimal control to reduce energy consumption in DC-drive system. International // Journal of Power Electronics and Drive Systems. 2020. Vol. 11, Issue. 4. P. 2164–2172. DOI: 10.11591/ijpeds.v11.i4.pp2164-2172.
10. Бельх Д. В., Печерин Д. А., Лицин К. В. Анализ структурной схемы тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока // Наука и производство Урала. 2015. № 11. С. 89–91.
11. Капалин В. И., Ведяшкина Н. Е. Синтез P и PI-регуляторов для нелинейных систем с использованием окружностей Холла и диаграмм Никольса // Промышленные АСУ и контроллеры. 2015. № 6. С. 41–47.
12. Мазнев А. С., Бороненко Ю. П., Воробьев А. А. Структура и принципы управления многорежимным полупроводниковым преобразователем электропоезда постоянного тока // Электротехника. 2020. № 2. С. 25–30.
13. Fonov D. A., Meshchikhin I. A., Korzhov E. G. Mathematical Modeling of DC Motors for the Construction of Prostheses // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 1127. P. 16–27. DOI: 10.1007/978-3-030-39216-1_2.
14. Majdoubi R., Masmoudi L., Bakhti M. [et al.]. Parameters estimation of BLDC motor based on physical approach and

weighted recursive least square algorithm // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2021. Vol. 11, Issue 1. P. 133–145. DOI: 10.11591/ijece.v11i1.pp133-145.

15. Qin L., Yang K., Du J. [et al.]. DC motor system identification based on improved bat algorithm for decreasing environmental pollution during oil and gas drilling // Fresenius Environmental Bulletin. 2020. Vol. 29, Issue. 6. P. 4703–4711.

16. Pedapenki K. K., Kumar J., Anumeha Fuzzy Logic Controller-Based BLDC Motor Drive // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2021. Vol. 707. P. 379–388. DOI: 10.1007/978-981-15-8586-9_34.

17. Semenov A., Bebikhov Y., Yakushev I. On the Characteristic Features of Implementing the NET Linx Open Network Architecture in the Control Logix System // Lecture Notes in Electrical Engineering. 2021. Vol. 729. P. 32–41. DOI: 10.1007/978-3-030-71119-1_4.

18. Ketthong T., Tunyasirut S., Puangdownreong D. Design and implementation of I-PD controller for dc motor speed control system by adaptive TABU search // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2017. Vol. 9, Issue 9. P. 69–78. DOI: 10.5815/ijisa.2017.09.08.

19. Бебихов Ю. В., Семёнов А. С., Семёнова М. Н., Якушев И. А. Анализ методов моделирования технических систем в среде MatLab // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2019. Т. 7, № 3. С. 12. DOI: 10.26102/2310-6018/2019.26.3.037.

20. Semenov A. S., Khubieva V. M., Kharitonov Y. S. Mathematical modeling of static and dynamic modes DC motors in software package MATLAB // International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2018). 2018. No. 8501666. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501666.

21. Zagolilo S. A., Semenov A. S., Semenova M. N. Computer Modeling of a Multimotor Electric Drive System in the MatLab Suite // Proceedings-2020. International Russian Automation Conference (RusAutoCon 2020). 2020. P. 225–231. DOI: 10.1109/RusAutoCon49822.2020.9208078.

СЕМЁНОВ Александр Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент (Россия), директор

Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, Политехнический институт (филиал), г. Мирный.

ORCID: 0000-0001-9940-3915

Адрес для переписки: sash-alex@yandex.ru

БЕБИХОВ Юрий Владимирович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры электроэнергетики и автоматизации промышленного производства Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, Политехнический институт (филиал), г. Мирный.

ORCID: 0000-0002-8366-4819

Адрес для переписки: bebikhov.yura@mail.ru

ЯКУШЕВ Илья Анатольевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры фундаментальной и прикладной математики Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, Политехнический институт (филиал), г. Мирный.

ORCID: 0000-0003-2539-7334

Адрес для переписки: yakushevilya@mail.ru

ФЕДОРОВ Олег Васильевич, доктор технических наук, профессор (Россия), профессор кафедры управления инновационной деятельностью Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева, г. Нижний Новгород.

ORCID: 0000-0001-5268-6399

Адрес для переписки: fov52@mail.ru

Для цитирования

Семёнов А. С., Бебихов Ю. В., Якушев И. А., Федоров О. В. Реализация PI-регулятора скорости двигателя постоянного тока методом математического моделирования // Омский научный вестник. 2022. № 4 (184). С. 75–81. DOI: 10.25206/1813-8225-2022-184-75-81.

Статья поступила в редакцию 15.08.2022 г.

© А. С. Семёнов, Ю. В. Бебихов, И. А. Якушев,

О. В. Федоров