

Генетический алгоритм настройки ПИД-регулятора в установке управления бесколлекторным двигателем

Е. Б. Соловьева[✉], Ю. А. Балданова

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

[✉] selenab1@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрено ПИД-регулирование скоростью вращения трехфазного бесщеточного двигателя постоянного тока в физической установке управления. Описана функциональная схема исследуемой установки. Для настройки ПИД-регулятора применены генетический алгоритм, метод ручной настройки и классический метод Коэна-Куна. Представлены результаты управления трехфазным бесщеточным двигателем постоянного тока с помощью ПИД-регулятора. Проведен сравнительный анализ результатов управления на основе расчета перерегулирования, времени регулирования и нарастания, интегральной временной абсолютной погрешности. Генетический алгоритм обеспечил более качественное управление по сравнению с другими рассмотренными методами.

Ключевые слова: бесщеточный двигатель постоянного тока, управление, ПИД-регулятор, генетический алгоритм, метод Коэна-Куна

Для цитирования: Соловьева Е. Б., Балданова Ю. А. Генетический алгоритм настройки ПИД-регулятора в установке управления бесколлекторным двигателем // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2026. Т. 19, № 1. С. 69–78.
doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-69-78.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Genetic Algorithm for Tuning a Pid Controller in Adjustment Facility of Brushless Motor

Е. В. Solovyeva[✉], Iu. A. Baldanova

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

[✉] selenab1@yandex.ru

Abstract. PID-regulation of the rotational speed of a three-phase brushless DC motor in the adjustment facility is considered. The functional diagram of investigated facility is described. The genetic algorithm, the manual tuning method and the classic Cohen-Coon method are used to adjust the PID controller. The control results of the three-phase brushless DC motor with the help of the PID controller are represented. A comparative analysis of the control outcomes results in calculation of overshoot, settling and rise time, and integral time absolute error. The genetic algorithm provides the control of higher quality in comparison with other considered methods.

Keywords: brushless direct current motor, control, PID controller, genetic algorithm, Cohen-Coon method

For citation: Solovyeva E. B., Baldanova Iu. A. Genetic Algorithm for Tuning a Pid Controller in Adjustment Facility of Brushless Motor // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2026. Vol. 19, no. 1. P. 69–78. doi: 10.32603/2071-8985-2026-19-1-69-78.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Электродвигатели, преобразующие электрическую энергию в механическую, широко распространены в промышленности, строительстве, бытовой технике, транспортных средствах и других сферах человеческой деятельности. По типу питающего тока выделяют электродвигатели постоянного и переменного тока. Дополнительно, согласно принципу работы, электродвигатели переменного тока классифицируются на синхронные и асинхронные. В синхронных двигателях переменного тока ротор и магнитное поле статора вращаются с одинаковой частотой. В асинхронных двигателях переменного тока частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля статора [1]. На практике широко распространены асинхронные двигатели переменного тока благодаря простоте конструкции, надежности, долговечности, возможности короткой работы в режиме перегрузок, высокому КПД при высоких нагрузках и низкой стоимости. Однако они уступают двигателям постоянного тока по точности регулирования скорости вращения, а также по значению КПД при низких нагрузках.

Конструкция двигателей постоянного тока включает щеточно-коллекторный механизм, с помощью которого выполняется переключение (коммутация) направления постоянного тока в роторе. Постоянное обслуживание упомянутого узла для удаления нагара и загрязнений, а также механический износ щеток являются недостатками этих электродвигателей [2].

В последнее время все большее внимание уделяется бесколлекторным (бесщеточным) двигателям постоянного тока (БДПТ) (вентильный электродвигатель, BLDC – BrushLess Direct Current electric motor), которые сочетают в себе достоинства двигателей постоянного тока и асинхронных двигателей переменного тока. В этих устройствах функцию коллектора выполняет электронный контроллер, который управляет переключением тока в катушках статора в зависимости от положения ротора с постоянными магнитами, вращающегося в магнитном поле статора. По сути, БДПТ – это коллекторный двигатель с электронным коллектором, т. е. щеточно-коллекторный узел заменен полупроводниковым коммутатором, который управляет контроллером по данным от датчика положения ротора. БДПТ – это синхронный двигатель с постоянными магнитами, работающий на постоянном токе и имеющий электронный механизм коммутации, управляемый контроллером [3]. Отсутствие ще-

ток увеличивает надежность и срок службы БДПТ, уменьшает расходы на обслуживание. БДПТ работают в широком диапазоне скорости вращения, имеют компактные размеры и характеризуются высокой точностью управления, высоким КПД и низким уровнем шума. К недостаткам можно отнести большую стоимость по сравнению с щеточными двигателями постоянного тока. Достоинства БДПТ обусловливают его растущую популярность в разных сферах, например в автомобилестроении, приборостроении, аэрокосмической промышленности, промышленной автоматизации и т. д. [4]–[6].

Эффективная работа БДПТ, обусловленная низкими помехами и малым энергопотреблением, зависит от точности управления скоростью вращения электродвигателя. Несмотря на разнообразие методов управления, широко используемых на практике остается простое и универсальное ПИД-регулирование [4], [7]. Для повышения точности данного метода применяют разные способы настройки ПИД-регуляторов – современные основаны на алгоритмах оптимизации (например, генетический алгоритм (ГА), алгоритм пчелиной колонии) [7]–[11], на нейронных сетях (например, сеть прямого распространения, рекуррентная сеть) [12]–[15] и на нечеткой логике [8], [16]–[18]. Эти способы эффективны для управления простыми и сложными, линейными и нелинейными устройствами, а также при полной и недостаточной информации об объекте управления [8], [12].

Исследуемая установка управления БДПТ изображена на рис. 1, где обозначены следующие позиции:

1 – объект управления (трехфазный бесщеточный электродвигатель постоянного тока с постоянными магнитами, БДПТ типа Makerbase MKS SF2804);

2 – энкодер Makerbase MKS AS5600 – электронное устройство, расположенное под двигателем, для измерения скорости вращения ротора электродвигателя;

3 – плата управления для GRC-системы (GRC (Governance, Risk, and Compliance) Development Board) – аппаратная платформа, содержащая микроконтроллеры, интерфейсы для датчиков, компьютера и других устройств, программное обеспечение для обработки данных и управления. Плата GRC Development Board включает микроконтроллер ESP32-S3-WROOM-1;

4 – разъем, к которому подключены два устройства: блок питания (сетевой адаптер постоянного тока с выходным напряжением 12 В), включаемый в

электрическую сеть, и драйвер SimpleFOCShield v2.0.4, расположенный под объектом 3 (платой GRC Development Board). Этот драйвер (не виден на рис. 1) служит для подведения питания от сетевого адаптера к объекту 1 (БДПТ);

5 – разъем для соединения проводов от упомянутого драйвера к БДПТ;

6 – разъем USB обеспечивает связь между объектом 3, на котором он находится, и внешним компьютером, а также отвечает за питание объекта 3.



Рис. 1. Установка управления БДПТ
Fig. 1. The adjustment facility of BLDC motor

Функциональная схема системы управления. На рис. 2 изображена функциональная схема системы управления установкой, которая показана на рис. 1.

На рис. 2 обозначены следующие блоки:

1. ПИД – ПИД-регулятор, входной сигнал которого – ошибка регулирования

$$e(t) = \omega_d(t) - \omega_f(t),$$

где $\omega_d(t)$, $\omega_f(t)$ – желаемая и текущая угловые скорости электродвигателя соответственно; напряжение $u_q(t)$ – выходной сигнал блока, сигнал управления. Желаемая скорость $\omega_d(t)$ электродви-

гателя задается пользователем в управляющей программе, составленной и хранящейся на персональном компьютере. Далее эта программа через USB-порт загружается в микроконтроллер, расположенный на плате GRC Development Board (3 на рис. 1), и работает вне компьютера.

2. ВУ – векторное управление, где формируются фазные напряжения электродвигателя. На блок ВУ поступает угол поворота ротора $\theta(t)$ от энкодера (2 на рис. 1) и напряжение $u_q(t)$ от ПИД-регулятора. Выходные сигналы блока – сигналы $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_C(t)$ с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). В блоке ВУ выполняются следующие преобразования:

- обратное преобразование Парка и Кларк для перехода от ортогональной вращающейся системы координат dq к трехфазной стационарной системе координат ABC ;

- формирование модулирующих сигналов с помощью синхронного добавления последовательности треугольной формы для полного использования напряжения питания;

- преобразование модулирующих сигналов в ШИМ-сигналы $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_C(t)$ прямоугольной формы с амплитудой напряжения питания.

3. Драйвер – драйвер, разделяющий электропитание для платы управления (3 на рис. 1) и БДПТ (1 на рис. 1). Драйвер передает ШИМ-сигналы $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_C(t)$, полученные от блока ВУ, к блоку БДПТ;

4. БДПТ – трехфазный бесщеточный электродвигатель постоянного тока с постоянными магнитами (1 на рис. 1).

5. Энкодер – магнитный энкодер (2 на рис. 1), измеряющий угол поворота $\theta(t)$ ротора двигателя.

6. Д – дифференциатор. Входной сигнал блока – угол поворота $\theta(t)$ ротора двигателя, измеренный энкодером. Выходной сигнал – угловая

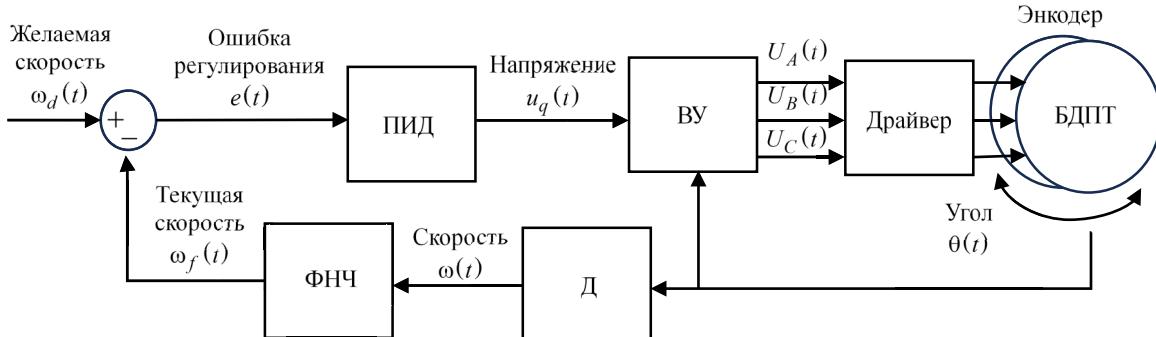


Рис. 2. Функциональная схема системы управления БДПТ
Fig. 2. The functional diagram of the BLDC motor control system

скорость $\omega(t)$ двигателя, производная входного сигнала блока. Дифференциатор усиливает высокочастотные помехи, короткие выбросы и шум. Указанные помехи можно уменьшить с помощью фильтра низких частот.

7. ФНЧ – фильтр низких частот, подавляющий высокочастотные помехи. На блок ФНЧ поступает скорость $\omega(t)$ двигателя. Выходной сигнал блока – скорость $\omega_f(t)$ двигателя без высокочастотных помех.

ПИД-регулятор и его настройка с помощью генетического алгоритма. ПИД-регулятор – это устройство управления, содержащее три части: пропорциональную, интегральную и дифференциальную. Передаточная функция $H_{\text{PID}}(s)$ ПИД-регулятора записывается как

$$H_{\text{PID}}(s) = \frac{U_q(s)}{E(s)} = K_p + K_I \frac{1}{s} + K_D s,$$

где $U_q(s)$, $E(s)$ – изображения сигналов $u_q(t)$ и $e(t)$ соответственно; K_p , K_I и K_D – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора соответственно. Нахождение параметров ПИД-регулятора (их настройка) особенно важно для эффективной и стабильной работы системы управления [7]–[9].

Параметры ПИД-регулятора определяются в результате решения задачи оптимизации

$$J(K_p, K_I, K_D) \Rightarrow \max_{K_p, K_I, K_D}, \quad (1)$$

где $J(K_p, K_I, K_D)$ – целевая функция, зависящая от параметров K_p , K_I и K_D , точность настройки желаемой скорости электродвигателя. Оценка целевой функции вычисляется как

$$\tilde{J}(K_p, K_I, K_D) = \frac{1}{\sum_{n=0}^N |\omega_f(n) - \omega_d| \tilde{t}(n)} = \frac{1}{e_{\text{ITAE}}}, \quad (2)$$

где $\omega_f(n)$ – последовательность значений скорости вращения электродвигателя на интервале нормированного дискретного времени $n \in [0, 1, 2, \dots, N]$ (рис. 2); ω_d – желаемое (заданное) значение скорости электродвигателя на интервале $n \in [0, 1, 2, \dots, N]$; $\tilde{t}(n) = nT_d$, $\tilde{t}(n) \in [0, T_d, 2T_d, \dots, T_N]$ – переменная дискретного времени, T_d – период дис-

крематизации; n – переменная нормированного дискретного времени, $n \in [0, 1, 2, \dots, N]$;

$$e_{\text{ITAE}} = \sum_{n=0}^N |\omega_f(n) - \omega_d| \tilde{t}(n) \quad (3)$$

– интегральная временная абсолютная погрешность (Integral Time Absolute Error, ITAE) [19].

Для решения задачи оптимизации (1) используем генетический алгоритм с оценкой погрешности (2). Известно, что критерий ITAE обеспечивает большую чувствительность и, следовательно, селективность оптимизации, а также меньшие колебательность и перерегулирование при настройке параметров ПИД-регулятора по сравнению с применением интегральной абсолютной погрешности (Integral Absolute Error, IAE) и интегральной квадратичной погрешности (Integral Square Error, ISE). Отметим, что критерий интегральной временной квадратичной погрешности (Integral Time Square Error, ITSE) наименее чувствителен и наиболее сложен из упомянутых критериев [19], [20].

Опишем основные термины ГА применительно к оптимизации параметров ПИД-регулятора:

- ген (описание некоторого признака). В качестве генов выступают три коэффициента (пропорциональный K_p , интегральный K_I и дифференциальный K_D) ПИД-регулятора;

- хромосома (последовательность генов) – вектор, содержащий переменные: K_p , K_I и K_D ;

- особь (набор хромосом) – набор векторов $[K_p, K_I, K_D]$ с разными значениями элементов. Таким образом, одна особь содержит одну хромосому из трех генов;

- популяция – совокупность особей. Размер популяции – число особей, содержащихся в ней;

- поколение – совокупность особей, которые присутствуют в текущей популяции до формирования новой популяции. Таким образом, появление новой популяции означает появление нового поколения;

- кроссинговер – обмен частями между двумя хромосомами. В популяции выбираются две родительские хромосомы. В родительских хромосомах (векторах $[K_p, K_I, K_D]$) случайным образом выбирается точка кроссинговера (точка деления указанного вектора на две части). Данные (элементы вектора) до этой точки точно копиру-

ются в хромосому потомка от одного родителя, а данные после этой точки – от другого;

– мутация – случайное изменение значения гена в хромосоме [21].

Для решения задачи построения системы управления БДПТ выберем параметры ГА на основе рекомендаций в [7], [21]. Параметры ГА следующие: размер популяции – 50, максимальное количество поколений – 40, количество генов – 3, $K_p \in [0.1; 10]$, $K_I \in (0; 50]$, $K_D \in (0; 1]$, вероятность кроссинговера – 0.85, вероятность мутации – 0.05.

Опишем последовательность действий ГА.

1. Формируем начальную популяцию, которая содержит 50 особей – 50 векторов $[K_p, K_I, K_D]$.

Элементы каждого вектора заданы случайным образом с помощью генератора случайных чисел с равномерной плотностью распределения вероятности в пределах ранее указанных диапазонов.

2. Оцениваем целевую функцию оптимизации (2) для каждой особи в популяции. В ГА эта оценка называется «функция приспособленности» (fitness function). Чем выше оценка, тем особь считается более приспособленной (ее приспособленность более высока).

3. Выбираем родительские хромосомы для скрещивания. Две особи (родители) выбираются из популяции в соответствии с их приспособленностью методом рулетки. Каждой особи назначается сектор рулетки, размер сектора пропорционален приспособленности особи. Большой оценке целевой функции будет соответствовать больший размер сектора. Таким образом, шанс быть выбранным родителем выше у особей с большей приспособленностью (с более высокой оценкой целевой функции). Далее с хромосомами этих особей выполняются операции кроссинговера и мутации с заданной вероятностью.

4. Выполняем кроссинговер (скрещивание). Кроссинговер позволяет получить от двух родителей двух перспективных потомков. Вероятность выполнения операции кроссинговера составляет 85 %. Если кроссинговер не происходит, то родительские хромосомы в точности переносятся в дочерние.

5. Выполняем мутацию. Мутации не позволяют ГА попадать в локальные минимумы или максимумы, а также предотвращают преждевременную сходимость. Мутации непредсказуемы, поэтому они происходят редко. Вероятность мутации устанавливается весьма малой, поэтому мутации подвергается лишь небольшое число

особей. Если мутация не происходит, то полученные после кроссинговера хромосомы потомков без изменений попадают в новую популяцию.

6. Отбор особей в новую популяцию. После кроссинговера и мутации хромосомы потомков образуют 50 особей, составляющих новую популяцию.

7. На выходе ГА оцениваем критерии останова алгоритма:

– достижение максимального количества поколений. Если «да», переход к п. 8 (блоку 8 на рис. 3). Если «нет», переход к п. 2 (блоку 2 на рис. 3);

– сходимость к оптимуму целевой функции (оценка целевой функции (функции приспособленности) для разных особей в популяции практически не меняется). Если «да», переход к п. 8, если «нет», переход к п. 2.

При переходе к п. 2 (блоку 2 на рис. 3) формируется новое поколение.

8. Выбираем особь с максимальной приспособленностью (с наибольшей оценкой целевой функции (2)) из особей в последнем поколении. Выход из ГА.



Рис. 3. Блок-схема генетического алгоритма

Fig. 3. The block diagram of genetic algorithm

Результаты управления скоростью электродвигателя. Применим ГА для настройки ПИД-регулятора в системе управления скоростью вращения электродвигателя (рис. 2). Качество

управления будем оценивать, используя следующие показатели [19], [22]:

– перерегулирование σ – максимальное отклонение рассчитанной скорости $\omega_f(\tilde{t})$ вращения электродвигателя от желаемой скорости ω_d , выраженное в процентах,

$$\sigma = \frac{(\omega_{f \max} - \omega_d)}{\omega_d} \cdot 100 \%,$$

где $\omega_{f \ max}$ – максимальное значение рассчитанной угловой скорости $\omega_f(\tilde{t})$ электродвигателя на интервале $\tilde{t}(n) \in [0, T_d, 2T_d, \dots, T_N]$; ω_d – желаемая угловая скорость вращения электродвигателя;

– время регулирования \tilde{t}_s – минимальная длительность рассчитанной скорости $\omega_f(\tilde{t})$ электродвигателя, после которой эта скорость близка к желаемой ω_d в пределах заданного отклонения Δ , т. е. справедливо неравенство

$$|\omega_f(\tilde{t}) - \omega_d| \leq \Delta, \tilde{t} > \tilde{t}_s,$$

где Δ – отклонение от ω_d (часто $\Delta = 5\%$);

– время нарастания \tilde{t}_r – период времени, в течение которого рассчитанная скорость $\omega_f(\tilde{t})$ электродвигателя нарастает от 10 до 90 % желаемой скорости ω_d ;

– интегральная времененная абсолютная погрешность ITAE, вычисляемая из выражения (3).

Качество управления скоростью электродвигателя тем выше, чем меньше значения описанных показателей. Показатели качества, полученные при достижении угловой скорости, например $\omega_d = 40$ рад/с, электродвигателя с помощью ПИД-регулятора при его настройке ГА, представлены в табл. 1 (столбец ПИД-ГА). Для сравнительного анализа приведены аналогичные показатели, полученные при настройке ПИД-регулятора ручным способом (столбец ПИД) [13] и методом Коэна–Куна (столбец ПИД-КК) [23]. Показатели качества получены при следующих переменных в формулах их определения: $\omega_{f \ max} = 40.399$ рад/с, 45.964 рад/с и 50.487 рад/с для ГА, ручной настройки и метода Коэна–Куна соответственно; отклонение $\Delta = 5\%$ от ω_d ; $N = 14\ 999$; $T_d = 8.4 \cdot 10^{-4}$ с; $\tilde{t}(n) \in [0; 12.6]$ с. Угловая скорость

управления будем оценивать, используя следующие показатели [19], [22]:

ω_d связана с частотой вращения n_d (числом оборотов в минуту, об/мин) выражением: $\omega_d 60 = 2\pi n_d$ [24]. Тогда при $\omega_d = 40$ рад/с получим

$$n_d = \frac{\omega_d 60}{2\pi} = \frac{40 \cdot 60}{2\pi} = 381.97 \text{ об/мин}$$

или

$$n_d = \frac{381.97}{60} = 6.37 \text{ об/с.}$$

Параметры настроенных ПИД-регуляторов указаны в табл. 2.

Табл. 1. Показатели качества управления скоростью электродвигателя

Tab. 1. The quality indicators of electric motor control

Показатель качества	ПИД-ГА	ПИД	ПИД-КК
$\sigma, \%$	1.0	14.9	26.2
$\tilde{t}_s, \text{с}$	0.51	1.51	1.46
$\tilde{t}_r, \text{с}$	0.39	0.27	0.15
$e_{\text{ITAЕ}}$	11 398.569	13 648.290	100 119.987

Табл. 2. Параметры ПИД-регуляторов
Tab. 2. The PID controllers parameters

Параметр	ПИД-ГА	ПИД	ПИД-КК
K_P	0.724	1.0	1.326
K_I	0.151	1.0	5.414
K_D	0.007	0	0.032

Ручная настройка ПИД-регулятора (метод «проб и ошибок») заключается в подборе значений параметров с учетом закономерностей их влияния на переходную характеристику системы управления [25].

Параметры ПИД-регулятора находятся методом Коэна–Куна с помощью реакции на ступенчатое воздействие (переходной характеристики) неотрегулированного объекта управления. На основе графика такой переходной характеристики вычисляются: τ_{DEL} – время задержки – промежуток между моментом начала ступенчатого воздействия и моментом, когда система начинает реагировать на воздействие; K – коэффициент усиления – отношение установившегося значения выходного сигнала к амплитуде воздействия; τ – постоянная времени из выражения [25]

$$\tau = t_3 - \frac{t_2 - \ln 2 \cdot t_3}{1 - \ln 2},$$

где t_2 и t_3 – времена, при которых выходной сигнал достигает 50 и 63.2 % соответственно от

установившегося значения выходного сигнала. Полученные переменные подставляются в эмпирические выражения из табл. 3 [23] для расчета коэффициентов ПИД-регулятора.

Табл. 3. Правила Коэна–Куна для настройки ПИД-регулятора
Tab. 3. The Cohen-Coon rules for tuning PID controller

Тип регулятора	K_P	K_I	K_D
PID	$\frac{\tau}{K \tau_{DEL}} \left(\frac{4}{3} + \frac{\tau_{DEL}}{4\tau} \right)$	$\frac{13\tau + 8\tau_{DEL}}{32\tau + 6\tau_{DEL}}$	$\frac{4\tau_{DEL}\tau}{11\tau + 2\tau_{DEL}}$

На рис. 4 показаны временные зависимости скорости вращения электродвигателя при синтезе ПИД-регулятора с помощью генетического алгоритма (ПИД-ГА), ручной настройки (ПИД) и метода Коэна–Куна (ПИД-КК).

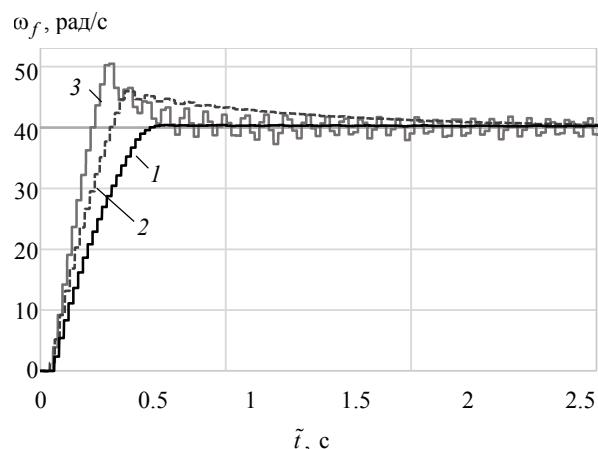


Рис. 4. Временные зависимости скорости вращения электродвигателя при синтезе ПИД-регулятора с помощью: 1 – генетического алгоритма; 2 – ручной настройки; 3 – метода Коэна–Куна
Fig. 4. The time dependences of the electric motor speed when synthesizing the PID controller based on: 1 – genetic algorithm; 2 – manual tuning; 3 – Cohen-Coon method

Из анализа табл. 1 и рис. 4 следует, что генетический алгоритм настройки ПИД-регулятора обеспечивает существенно меньшее перерегулирование, время и интегральную временную абсолютную погрешность регулирования по сравнению с ручной настройкой и эвристическим методом Коэна–Куна.

Заключение. Установка управления скоростью вращения трехфазного бесколлекторного двигателя постоянного тока работает на основе алгоритма ПИД-регулирования, который является простым и эффективным на практике. Настройка параметров регулятора выполняется с помощью генетического алгоритма, метода ручной настройки и классического метода Коэна–Куна. Генетический алгоритм решает оптимизационную задачу с целью минимизации интегральной временной абсолютной погрешности настройки скорости вращения электродвигателя. ГА работает на принципах естественного отбора Дарвина, он характеризуется высокой скоростью сходимости и широкой областью устойчивости [4]. Ручная настройка – интуитивно понятный подход. Результат ее применения существенно зависит от квалификации инженера и не гарантирует нахождения глобально оптимальных параметров. Метод Коэна–Куна обеспечивает предсказуемые результаты для объектов, близких к линейным, его эффективность снижается в нелинейных системах. Можно предложить использовать метод Коэна–Куна получения стартовых настроек.

В результате исследований установлено, что ГА обеспечивает более высокую точность управления при наименьшем перерегулировании и времени регулирования по сравнению с методом ручной настройки и методом Коэна–Куна.

Список литературы

1. Dung N. T. N. An overview on electric motors: Classification, control and applications // Intern. J. of Research and Scientific Innovation. 2024. Vol. XI, no. XI. P. 318–333. doi: 10.51244/ijrsi.2024.11110025.
2. Sharma S. K., Manna M. S. Performance analysis of universal motor based on MatLab simulation // Intern. Conf. for Advancement in Technol. (ICONAT). Goa, India: IEEE, 2022. P. 1–4. doi: 10.1109/ICONAT53423.2022.9726017.
3. Control techniques for BLDC Motor: A review / D. D. D. Kumar, M. Rambabu, B. Yogesh, G. Likhitha // Intern. J. of Research Publication and Rev. 2022. Vol. 3, no. 11. P. 294–302.
4. Speed control of BLDC motor using PID controller / T. B. Ramu, S. Cheerla, R. K. Kallakuta, K. K. Mohan,
- S. Inthiyaz, N. N. Prakash, B. V. Rajanna, C. A. Kumar // Intern. J. of Appl. Power Engin. (IJAPE). 2025. Vol. 14, no. 2. P. 401–411. doi: 10.11591/ijape.v14.i2.pp401-411.
5. Вельченко А. А., Павлюковец С. А., Радкевич А. А. Математическая модель бесколлекторного двигателя постоянного тока на основе уравнения напряжения трехфазной обмотки // Системный анализ и прикладная информатика. 2024. № 1. С. 19–25. doi: 10.21122/2309-4923-2024-1-19-25.
6. Van Dung Do, Van The Tran. Cooling fan uses the BLDC Motor // J. of Techn. Education Sci. 2025. Vol. 20, no. 1. P. 84–90. doi: 10.54644/jte.2025.1456.
7. Ortatepe Z. Genetic algorithm based PID tuning software design and implementation for a DC motor control system // Gazi University J. of Sci. Part A: Engin.

Электротехника

Electrical Engineering

and Innovation. 2023. Vol. 10, no. 3. P. 286–300. doi: 10.54287/gujsa.1342905.

8. Effect of PI, PID, fuzzy logic, and genetic algorithm methods in DC motor speed control / O. Tosun, B. Gecer, N. F. Serteller, Ayca Ak // Proc. Book of 3rd Intern. Conf. on Engin., Natural and Soc. Sci. ICENSOS 2024. Konya, Turkey: All Sciences Academy 2024. P. 842–849.

9. Optimization of PID parameters based on genetic algorithm optimization for ball and beam system / A. N. Aldeeb, A. Albagul, A. Ali Ahmed, R. Algheetah // African J. of Advanced Pure and Appl. Sci. (AJAPAS). 2023. Vol. 2, no. 2. P. 191–199.

10. Ahmed A., Roy N. K., Mahmud K. Achieving robust and optimal speed control of DC motor through sliding mode control tuned by genetic and particle swarm optimization algorithms // Smart Grids and Energy. 2024. Vol. 9, no. 2. doi: 10.1007/s40866-024-00223-3.

11. Ali H., Albagul A., Algitta A. Optimization of PID parameters based on particle swarm optimization for ball and beam system // Intern. J. of Engin. Technol. and Management Research. 2020. Vol. 5, no. 9. P. 59–69. doi: 10.29121/ijetmr.v5.i9.2018.289.

12. Jawad A. H., Kammel Sh. D., Dawood A. H. A review of intelligent techniques based speed control of brushless DC motor (BLDC) // Basrah J. for Eng. Sci. 2024. Vol. 24, no. 1. P. 109–119. doi: 10.33971/bjes.24.1.12.

13. Varshney A., Bhushan B., Singh R. Position tracking and balancing control of ball balancer system using intelligent controllers // Intern. J. of Modelling, Identification and Control. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 69–79. doi: 10.1504/ijmic.2021.119037.

14. Research on intelligent PID control algorithm based on neural network / Y. Lei, J. Ma, M. Liu, P. Liu // 2021 Intern. Conf. on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). Xi'an, China: IEEE, 2021. P. 325–328. doi: 10.1109/icitbs53129.2021.00087.

15. Solovyeva E. Recurrent neural networks as approximators of nonlinear filters operators// J. of Phys.: Conf. Series 7th Intern. Conf. on Math. Modeling in Phys. Sci., IC-MSQUARE 2018. Moscow, Russia: IEEE, 2018. Vol. 1141, no. 1. Art. 012115. P. 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1141/1/012115.

16. Almawla A. M., Hussein M. J., Abdullah A. T. A comparative study of DC motor speed control techniques using fuzzy, SMC and PID // J. Européen des Sys-

tèmes Automatisés. 2024. Vol. 57, no. 2. P. 397–406. doi: 10.18280/jesa.570209.

17. The study of numerical simulation based on fuzzy PID controller / Z. Tu, J. Wu, X. Huang, R. Y. Wang, H. S. Chen // Intern. J. of Advanced Engin. Research and Sci. (IJAERS). 2023. Vol. 10, no. 10. P. 108–113. doi: 10.22161/ijaers.1010.10.

18. Arafat Y. B., Weiwei H. The Development of a MatLab-based fuzzy PID controller and the simulation // Intern. J. of Engin. Continuity. 2023. Vol. 2, no. 1. P. 14–26. doi: 10.58291/ijec.v2i1.85.

19. Jayachitra A., Vinodha R. Genetic algorithm based PID controller tuning approach for continuous stirred Tank Reactor // Advances in Artificial Intelligence. 2014. Vol. 2014. P. 1–8. doi: 10.1155/2014/791230.

20. Tuning PID and PI/AD δ controllers using the integral time absolute error criterion / D. Maiti, A. Acharya, M. Chakraborty, A. Konar, R. Janarthanan // 2008 4th Intern. Conf. on Information and Automation for Sustainability. Colombo, Sri Lanka: IEEE, 2008. P. 457–462. doi: 10.1109/ICIAFS.2008.4783932.

21. Malhotra R., Singh N., Singh Y. Genetic algorithms: Concepts, design for optimization of process controllers // Comp. and Inform. Sci. 2011. Vol. 4, no. 2. P. 39–54. doi: 10.5539/cis.v4n2p39.

22. Putra A. M., Maradona H., Rohmah R. A. Comparison of proportional integral derivative and Fuzzy logic controllers: A literature review on the best method for controlling direct current motor speed // Intern. J. of Robotics and Control Syst. 2025. Vol. 5, no. 1. P. 240–265. doi: 10.31763/ijrcs.v5i1.1701.

23. Comparative of Ziegler-Nichols and Cohen-Coo tuning method for first order plus dead time system (FOPDT) / M. A. C. Salamanca, A. A. L. Hernandez, R. F. M. Gonzalez, J. A. H. Reyes, C. R. G. Escarpeta // Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital. 2024. Vol. 16, no. 4. P. 1918–1927.

24. Rustamaji R., Sawitri K. Static magnetic field meter using rotating search coil method // Emitor: J. Teknik Elektro. 2024. Vol. 24, no. 3. P. 298–308. doi: /10.23917/emitör.v24i3.6678.

25. Sami J. L., Sukhdeep S. B., Sharma R. K. Approaches for tuning of PID controller // Intern. J. of Enhanced Research in Sci. Technol. & Engin. 2013. Vol. 2, no. 3. P. 1–7.

Информация об авторах

Соловьева Елена Борисовна – д-р техн. наук, почетный работник сферы образования РФ, заведующая кафедрой теоретических основ электротехники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: selenab1@yandex.ru

<https://orcid.org/0000-0001-8204-6632>

Балданова Юлия Алексеевна – аспирант, ассистент кафедры теоретических основ электротехники СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: uliyagoroshko@gmail.com

References

1. Dung N. T. N. An overview on electric motors: Classification, control and applications // Intern. J. of Research and Scientific Innovation. 2024. Vol. XI, no. XI. P. 318–333. doi: 10.51244/ijrsi.2024.11110025.
2. Sharma S. K., Manna M. S. Performance analysis of universal motor based on MatLab simulation // Intern. Conf. for Advancement in Technol. (ICONAT). Goa, India: IEEE, 2022. P. 1–4. doi: 10.1109/ICONAT53423.2022.9726017.
3. Control techniques for BLDC Motor: A review / D. D. D. Kumar, M. Rambabu, B. Yogesh, G. Likhitha // Intern. J. of Research Publication and Rev. 2022. Vol. 3, no. 11. P. 294–302.
4. Speed control of BLDC motor using PID controller / T. B. Ramu, S. Cheerla, R. K. Kallakuta, K. K. Mohan, S. Inthiyaz, N. N. Prakash, B. V. Rajanna, C. A. Kumar // Intern. J. of Appl. Power Engin. (IJAPE). 2025. Vol. 14, no. 2. P. 401–411. doi: 10.11591/ijape.v14.i2.pp401-411.
5. Vel'chenko A. A., Pavljukovic S. A., Radkevich A. A. Matematicheskaja model' beskollektornogo dvigatelja postojannogo toka na osnove uravnenija naprijazhenija trefaznoj obmotki // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. 2024. № 1. S. 19–25. doi: 10.21122/2309-4923-2024-1-19-25. (In Russ.).
6. Van Dung Do, Van The Tran. Cooling fan uses the BLDC Motor // J. of Techn. Education Sci. 2025. Vol. 20, no. 1. P. 84–90. doi: 10.54644/jte.2025.1456.
7. Ortatepe Z. Genetic algorithm based PID tuning software design and implementation for a DC motor control system // Gazi University J. of Sci. Part A: Engin. and Innovation. 2023. Vol. 10, no. 3. P. 286–300. doi: 10.54287/gujsa.1342905.
8. Effect of PI, PID, fuzzy logic, and genetic algorithm methods in DC motor speed control / O. Tosun, B. Gecer, N. F. Serteller, Ayca Ak // Proc. Book of 3rd Intern. Conf. on Engin., Natural and Soc. Sci. ICENSOS 2024. Konya, Turkey: All Sciences Academy 2024. P. 842–849.
9. Optimization of PID parameters based on genetic algorithm optimization for ball and beam system / A. N. Aldeeb, A. Albagul, A. Ali Ahmed, R. Algheetah // African J. of Advanced Pure and Appl. Sci. (AJAPAS). 2023. Vol. 2, no. 2. P. 191–199.
10. Ahmed A., Roy N. K., Mahmud K. Achieving robust and optimal speed control of DC motor through sliding mode control tuned by genetic and particle swarm optimization algorithms // Smart Grids and Energy. 2024. Vol. 9, no. 2. doi: 10.1007/s40866-024-00223-3.
11. Ali H., Albagul A., Algitta A. Optimization of PID parameters based on particle swarm optimization for ball and beam system // Intern. J. of Engin. Technol. and Management Research. 2020. Vol. 5, no. 9. P. 59–69. doi: 10.29121/ijetmr.v5.i9.2018.289.
12. Jawad A. H., Kammel Sh. D., Dawood A. H. A review of intelligent techniques based speed control of brushless DC motor (BLDC) // Basrah J. for Eng. Sci. 2024. Vol. 24, no. 1. P. 109–119. doi: 10.33971/bjes.24.1.12.
13. Varshney A., Bhushan B., Singh R. Position tracking and balancing control of ball balancer system using intelligent controllers // Intern. J. of Modelling, Identification and Control. 2021. Vol. 37, no. 1. P. 69–79. doi: 10.1504/ijmic.2021.119037.
14. Research on intelligent PID control algorithm based on neural network / Y. Lei, J. Ma, M. Liu, P. Liu // 2021 Intern. Conf. on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS). Xi'an, China: IEEE, 2021. P. 325–328. doi: 10.1109/icitbs53129.2021.00087.
15. Solovyeva E. Recurrent neural networks as approximators of nonlinear filters operators// J. of Phys.: Conf. Series 7th Intern. Conf. on Math. Modeling in Phys. Sci., IC-MSQUARE 2018. Moscow, Russia: IEEE, 2018. Vol. 1141, no. 1. Art. 012115. P. 1–10. doi: 10.1088/1742-6596/1141/1/012115.
16. Almwala A. M., Hussein M. J., Abdullah A. T. A comparative study of DC motor speed control techniques using fuzzy, SMC and PID // J. Européen des Systèmes Automatisés. 2024. Vol. 57, no. 2. P. 397–406. doi: 10.18280/jesa.570209.
17. The study of numerical simulation based on fuzzy PID controller / Z. Tu, J. Wu, X. Huang, R. Y. Wang, H. S. Chen // Intern. J. of Advanced Engin. Research and Sci. (IJAERS). 2023. Vol. 10, no. 10. P. 108–113. doi: 10.22161/ijakers.1010.10.
18. Arafat Y. B., Weiwei H. The Development of a MatLab-based fuzzy PID controller and the simulation // Intern. J. of Engin. Continuity. 2023. Vol. 2, no. 1. P. 14–26. doi: 10.58291/ijec.v2i1.85.
19. Jayachitra A., Vinodha R. Genetic algorithm based PID controller tuning approach for continuous stirred Tank Reactor // Advances in Artificial Intelligence. 2014. Vol. 2014. P. 1–8. doi: 10.1155/2014/791230.
20. Tuning PID and PI/AD δ controllers using the integral time absolute error criterion / D. Maiti, A. Acharya, M. Chakraborty, A. Konar, R. Janarthanan // 2008 4th Intern. Conf. on Information and Automation for Sustainability. Colombo, Sri Lanka: IEEE, 2008. P. 457–462. doi: 10.1109/ICIAFS.2008.4783932.
21. Malhotra R., Singh N., Singh Y. Genetic algorithms: Concepts, design for optimization of process controllers // Comp. and Inform. Sci. 2011. Vol. 4, no. 2. P. 39–54. doi: 10.5539/cis.v4n2p39.
22. Putra A. M., Maradona H., Rohmah R. A. Comparison of proportional integral derivative and Fuzzy logic controllers: A literature review on the best method for controlling direct current motor speed // Intern. J. of Robotics and Control Syst. 2025. Vol. 5, no. 1. P. 240–265. doi: 10.31763/ijrcs.v5i1.1701.
23. Comparative of Ziegler-Nichols and Cohen-Coo tuning method for first order plus dead time system (FOPDT) / M. A. C. Salamanca, A. A. L. Hernandez, R. F. M. Gonzalez, J. A. H. Reyes, C. R. G. Escarpeta // Innovación y Desarrollo Tecnológico Revista Digital. 2024. Vol. 16, no. 4. P. 1918–1927.

24. Rustamaji R., Sawitri K. Static magnetic field meter using rotating search coil method // Emitor: J. Teknik Elektro. 2024. Vol. 24, no. 3. P. 298–308. doi: /10.23917/emitor.v24i3.6678.
25. Sami J. L., Sukhdeep S. B., Sharma R. K. Approaches for tuning of PID controller // Intern. J. of Enhanced Research in Sci. Technol. & Engin. 2013. Vol. 2, no. 3. P. 1–7.

Information about the authors

Elena B. Solovyeva – Dr Sci. (Eng.), Honorary Worker of the Education Sphere of the Russian Federation, head of Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: selenab1@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-8204-6632>

Iuliia A. Baldanova – postgraduate student, assistant of Department of Theoretical Fundamentals of Electrical Engineering of Saint Petersburg Electrotechnical University
E-mail: uliyagoroshko@gmail.com

Статья поступила в редакцию 29.09.2025; принята к публикации после рецензирования 24.11.2025; опубликована онлайн 29.01.2026.

Submitted 29.09.2025; accepted 24.11.2025; published online 29.01.2026.
