

Эта часть работы выложена в ознакомительных целях. Если вы хотите получить работу полностью, то приобретите ее воспользовавшись формой заказа на странице с готовой работой:

<https://stuservis.ru/magisterskaya-rabota/338708>

Тип работы: Магистерская работа

Предмет: Робототехника (автоматизация роботов)

Введение

1. Теоретические предпосылки и алгоритмы ПИД-регулирования

1.1. ПИД регуляторы в ТАУ

1.2. Алгоритмы ПИД-регулирования с поддержкой искусственного интеллекта

1.3. ПИД-регуляторы электродвигателей

2. Метаэвристические методы настройки ПИД-регуляторов электродвигателей 36

2.1. Методы настройки ПИД-регулятора с использованием искусственных нейронных сетей и генетических алгоритмов

2.2. Метаэвристические методы оптимизации ПИД-регуляторов

2.3 Методы настройки ПИД-регулятора для управления скоростью двигателя постоянного тока

3. Модели и алгоритмы оптимизации параметров ПИД-регулятора двигателя на основе искусственной нейронной сети и генетического алгоритма

3.1. Оптимизация ПИД-регулятора нейронной сети скорости двигателя на основе генетического алгоритма

3.2. Нечеткая логика и ПИД-регуляторы для двигателя постоянного тока с использованием генетического алгоритма

3.3. Интеллектуальный алгоритм системы регулирования скорости двигателя переменного тока на основе нейронной сети

Заключение

Список использованных источников

Пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД – PID) метод управления используется во многих приложениях промышленного управления, что имеет свои ограничения для оптимизированного управления. Вычисленные вручную настройки контроллера с использованием фиксированных формул адекватно обеспечивают лишь базовое управление, но не годятся для нелинейного процесса с различными рабочими уровнями. Оптимизационный анализ с помощью метаэвристического подхода позволил получить наилучшие решения и доказал свою надежность в обеспечении лучших значений регулятора. Тем не менее, оптимизационный анализ может дать плохой результат, если во время его проведения настройки определяющих параметров не корректируются должным образом.

ПИД-регулирование предназначено для управления переменной процесса (process variable, PV) для получения новой установившейся ситуации из-за изменения заданного значения регулируемой величины (уставки) (Set point, SP) или нагрузки в регулируемых контурах. ПИД выполняет три условия управления, которые включают пропорциональный коэффициент усиления (K_c), интегральный коэффициент усиления (K_i) и дифференциальный коэффициент усиления (K_d) [1]. K_c определяет пропорцию реакции контроллера на изменения SP на основе физического поведения процесса, поддерживает перевод PV в новое установившееся состояние, устраняя кумулятивную установившуюся ошибку, возникающую в результате пропорционального действия. С другой стороны, K_d предсказывает ошибочное поведение, чтобы предупредить дополнительное управление до того, как в управляемом контуре сформируется новая ошибка процесса [2]. Ручная настройка контроллера с использованием может не дать удовлетворительного управления и во многом зависит от опыта и профессиональных навыков [3] в повторной настройке, если есть какие-либо незначительные изменения в структуре физической модели [4]. Кроме того, применяемые формулы при расчете плохо учитывают изменение как SP, так и нагрузки [5] в различных режимах работы нелинейных управляемых процессов.

Для самого контроллера одновременная настройка трех элементов управления как единого целого представляет собой сложную задачу, поскольку специалистам-практикам необходимо комбинировать соответствие между всеми тремя условиями для получения эффективных операций управления. Настройка возможна с помощью детерминированного и метаэвристического анализа оптимизации. Наиболее известный детерминированный подход или рассчитываемые вручную настройки контроллера охватываются методами Циглера-Николса (ZN). Тем не менее, ZN целесообразно использовать только в процессах с

небольшим запаздыванием и в моделях более низкого порядка [6]. С другой стороны, система управления с внутренней моделью (Internal Model Control, IMC) является еще одним распространенным вариантом, при котором степень его воздействия регулируется в соответствии с ожиданиями пользователей в отношении управления скоростью в их приложениях [7], но все же ставит под угрозу оптимальное управление как для SP, так и для изменения нагрузки [8].

Для систем управления электродвигателями, в частности, бесщеточным двигателем постоянного тока (БДПТ) PID является одной из самых классических стратегий управления. Как правило, P (пропорциональное), I (интегральное) и D (дифференциальное) могут принимать множество форм. Например, PI, PD, PID были успешно реализованы в управлении скоростью БДПТ [9, 10]. Хотя традиционная ПИД-структура может быть легко реализована в системе управления двигателем, ее недостатки, такие как недетерминированные параметры и нелинейные проблемы, приводят к тому, что система не может достичь оптимального эффекта управления. Поэтому выдвигается множество интеллектуальных алгоритмов оптимизированных ПИД-регуляторов.

Обычно ПИД-регулятор является оптимальным выбором для управления скоростью БДПТ из-за его простоты, высокой надежности и широкой применимости [11, 12]. В [13], ПИ-регулятор для БДПТ предлагается для улучшения чувствительности и уменьшения выброса скорости за счет увеличения пропорционального усиления. Однако из результатов моделирования видно, что превышение скорости отклика в условиях нагрузки все еще заметна. Из-за различных неопределенностей и нелинейности в структуре ПИД-регулятора возникают трудности с определением коэффициента усиления ПИД-регулятора, что снижает производительность системы управления [14]. Поэтому ученые предложили большое количество интеллектуальных алгоритмов, таких как алгоритм метаэвристической оптимизации, нечеткая логика, алгоритм дифференциальной эволюции и глубокая нейронная сеть, для повышения надежности системы управления [11, 12, 15-18]. Более того, методы, основанные на нечеткой логике, в большинстве случаев обеспечивают лучшие результаты, чем алгоритмы управления нейронными сетями и скользящим режимом, благодаря их автономному обучению и явлению колебаний (chattering phenomenon) [16, 19-21]. В [22] управление скоростью БДПТ сравнивается и реализуется с использованием традиционных ПИ-регуляторов и нечетких ПИ-регуляторов, а нечеткий ПИ-регулятор улучшается по сравнению с обычным ПИ-регулятором с точки зрения времени нарастания и времени установления в условиях холостого хода и нагрузки. В [23] представлен ПИ-регулятор для регулирования скорости синхронного двигателя с постоянными магнитами. Усиление ПИ-регулятора адаптивно регулируется с помощью контроллера с нечеткой логикой для обеспечения эффекта, и из результатов видно, что нечеткий ПИ-регулятор превосходит ПИ-регулятор при наличии изменений механических параметров, возмущений нагрузки и т. д. видно из [20, 21] что все параметры основаны на контроллере с нечеткой логикой.

Хотя эффективность контроллера с нечеткой логикой зависит от коэффициента пропорциональности его входа и выхода, он также влияет на системы управления. Чтобы преодолеть эти проблемы, некоторые интеллектуальные алгоритмы, такие как генетические алгоритмы, оптимизация роя частиц и другие алгоритмы, используются для настройки коэффициента пропорциональности и оптимизации постоянных параметров ПИД-регулятора и контроллера с нечеткой логикой [24-28].

В [24], коэффициент масштаба ПИД-регулятора на основе нечеткой логики регулируется генетическим алгоритмом и применяется для управления скоростью БДПТ. Экспериментальные результаты показывают, что реакция скорости является неопределенной из-за изменения нагрузки. В [25] коэффициент PI регулятора скорости БДПТ также оптимизирован с использованием генетического алгоритма. Однако отклик скорости имеет большой выброс в переходной фазе и большие колебания в установившейся фазе. В [26] генетический алгоритм используется для оптимизации базы правил и функции принадлежности нечеткого ПИД-регулятора, и его превосходство проверяется в условиях холостого хода и переменной скорости, но его установившаяся ошибка немного больше и нуждается в дальнейшем улучшении. В [27], алгоритм роя частиц применяется к ПИД-регулятору системы привода постоянного тока.

Моделирование и экспериментальные результаты показывают, что отклик скорости имеет большие гармонические колебания в установившемся режиме. Кроме того, существуют неопределенности из-за изменения нагрузки. В [29] авторы используют новую нейронную сеть глубокого перцептрона с нечеткой регулировкой ПИД-регулятора для управления скоростью БДПТ. Экспериментальные результаты показывают, что предложенный контроллер обладает хорошей надежностью и стабильностью для обеспечения точной работы двигателя.

Однако итерация его обучающей сети действительно является трудоемким процессом, и ее все еще необходимо улучшить. В [30], представлен нечеткий контроллер класса II, основанный на нейронном

обучении вейвлетов, для реализации эффективного управления БДПТ на заданной скорости. Этот режим управления может хорошо реализовывать отслеживание скорости на холостом ходу, при полной нагрузке и в условиях переменной нагрузки, но его установившуюся ошибку и скорость отклика все еще необходимо улучшить.

Gobinath с соавтор. [31, 32] использовал нейронные сети для оптимизации ПИД-контроллеров. Несмотря на то, что производительность управления улучшена, процесс обучения нейронной сети осуществляется онлайн или офлайн, с высокой вычислительной сложностью и низкой скоростью отклика. Dat с соавтор. [33, 34] используют алгоритм оптимизации роя частиц для определения параметров регуляторов ПИД-структуры, и эффективность управления значительно улучшается. Тем не менее, алгоритму роя частиц трудно найти оптимальное решение с помощью частиц или отдельных итераций. Demirtas [35] предложил генетический алгоритм для оптимизации усиления ПИ-регулятора, но его начальную популяцию сложно определить. Однако нечеткое логическое управление не требует точной модели системы, а только расчеты, основанные на экспертных базах знаний. Таким образом, методы оптимизации, основанные на нечетком логическом управлении, в большинстве случаев имеют лучший контрольный эффект, чем другие алгоритмы [36, 37].

В настоящее время существует литература по применению метаэвристических подходов к решению инженерных задач, но большинство источников просто сосредоточена на контроле, чтобы соответствовать либо SP, либо изменениям нагрузки. Кроме того, не хватает литературы, чтобы объяснить, как правильно установить параметры в анализе оптимизации. Все вышеупомянутые проблемы определили актуальность, цель и задачи исследований нейросетевого моделирования ПИД регулятора электродвигателя.

Цель – исследовать возможности использования метаэвристических алгоритмов и, в частности, генетического алгоритма в разработках ПИД-регуляторов.

Задачи:

- идентифицировать теоретические предпосылки и алгоритмы ПИД-регулирования;
- проанализировать метаэвристические методы настройки ПИД-регуляторов;
- оптимизировать параметры ПИД-регулятора двигателя на основе искусственной нейронной сети и генетического алгоритма.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И АЛГОРИТМЫ ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЯ

1.1 ПИД регуляторы в ТАУ

Пропорционально-интегрально-дифференциальное (ПИД) (Proportional-Integral-Derivative, PID) управление является наиболее распространенным алгоритмом управления техническими системами, используемым в промышленности. Популярность ПИД-регуляторов можно частично объяснить их надежной работой в широком диапазоне условий эксплуатации, а частично их функциональной простотой, которая позволяет инженерам управлять ими простым и понятным способом.

В настоящее время около 90–95 % типовых регуляторов используют ПИД-алгоритм формирования управляющих воздействий, при этом среди ПИД-регуляторов 64% используется в одноконтурных системах. Большинство отраслей промышленности, в том числе энергетика, содержат сотни систем автоматического управления, качество работы которых является основой экономической эффективности технических процессов, обеспечивая безопасность, надежность, долговечность и экологичность работы как технологического оборудования, так и самих технических средств автоматизации. Существуют разные модификации реализации структуры ПИД-регуляторов. На практике чаще всего применяют идеальные ПИД-регуляторы с фильтром, а также классические ПИД-регуляторы как последовательное соединение идеального и реального ПД-регуляторов в виде звеньев быстрого реагирования.

Система контроля

Основная идея ПИД-регулятора состоит в том, чтобы считывать показания датчика, затем вычислять требуемый выходной сигнал исполнительного механизма путем вычисления пропорциональных, интегральных и производных характеристик и суммирования этих трех компонентов для вычисления выходного сигнала [38, 39].

В типичной системе управления регулируемая переменная процесса – это системный параметр, которым необходимо управлять, например, температура, давление или скорость потока (литры/мин). Датчик используется для измерения переменной процесса и обеспечения обратной связи с системой управления. Заданное значение (set point) – это желаемое или заданное значение переменной процесса, например 100 градусов Цельсия в случае системы контроля температуры. В любой момент разница между переменной процесса и заданным значением используется алгоритмом управления (компенсатором) для определения

требуемой выходной мощности исполнительного механизма для управления установкой. Например, если измеренная переменная процесса температуры составляет 100°C , а желаемая установка температуры равна 120°C , то выходной сигнал привода, заданный алгоритмом управления, может включать нагреватель. Приведение в действие исполнительного механизма для включения нагревателя приводит к тому, что система нагревается, что приводит к увеличению технологической переменной температуры. Это называется системой управления с замкнутым контуром, потому что процесс считывания показаний датчиков для обеспечения постоянной обратной связи и расчета желаемого выходного сигнала исполнительного механизма повторяется непрерывно и с фиксированной скоростью цикла. Во многих случаях выход исполнительного механизма – не единственный сигнал, влияющий на систему. Например, в температурной камере может быть источник холодного воздуха, который иногда дует в камеру и нарушает температуру. Такой термин называется возмущением (disturbance). Обычно разработчики пытаются спроектировать систему управления так, чтобы свести к минимуму влияние возмущений на переменную процесса.

Процесс разработки системы управления начинается с определения требований к производительности. Эффективность системы управления часто измеряется путем применения ступенчатой функции в качестве командной переменной заданного значения, а затем измерения отклика переменной процесса. Обычно ответ определяется количественно путем измерения определенных характеристик сигнала. Время нарастания – это количество времени, которое требуется системе для перехода от 10% к 90% установившегося или конечного значения. Процент превышения – это величина превышения переменной процесса конечного значения, выраженная в процентах от конечного значения. Время установления – это время, необходимое для того, чтобы переменная процесса установилась в пределах определенного процента (обычно 5 %) от конечного значения. Систематическая (установившаяся) ошибка – это окончательная разница между переменной процесса и заданным значением.

После использования одной или всех этих величин для определения требований к характеристикам системы управления следует определить наихудшие условия, при которых ожидается, что система управления будет соответствовать этим проектным требованиям. Часто в системе возникает возмущение, которое влияет на переменную процесса или измерение переменной процесса. Важно разработать систему управления, которая удовлетворительно работает в наихудших условиях. Мера того, насколько хорошо система управления способна преодолевать последствия возмущений, называется подавлением помех системы управления.

В некоторых случаях реакция системы на заданный управляющий сигнал может меняться со временем или в зависимости от какой-либо переменной. Нелинейная система – это система, в которой параметры управления, дающие желаемый отклик в одной рабочей точке, могут не дать удовлетворительного отклика в другой рабочей точке. Например, камера, частично заполненная жидкостью, будет демонстрировать гораздо более быструю реакцию на мощность нагревателя, когда она почти пуста, чем когда она почти заполнена жидкостью. Мера того, насколько хорошо система управления будет выдерживать помехи и нелинейности, называется надежностью системы управления.

Некоторые системы демонстрируют нежелательное поведение, называемое запаздыванием (dead time). Запаздывание – это задержка между изменением переменной процесса и моментом, когда это изменение можно наблюдать. Например, если датчик температуры расположен далеко от впускного клапана для холодной воды, он не будет измерять изменение температуры немедленно, если клапан открыт или закрыт. Время запаздывания также может быть вызвано системой или выходным приводом, который медленно реагирует на управляющую команду, например, клапан, который медленно открывается или закрывается. Тело цикла также является важным параметром замкнутой системы. Интервал времени между вызовами алгоритма управления является временем тела цикла. Системы, которые быстро изменяются или имеют сложное поведение, требуют более высоких скоростей контура управления.

PID-теория

Пропорциональная составляющая ПИД

Пропорциональная составляющая зависит только от разницы между установленным значением и переменной процесса. Эта разница называется рассогласованием. Пропорциональное усиление K_c определяет отношение выходного отклика к сигналу ошибки. Например, если рассогласование имеет величину 10, пропорциональный коэффициент усиления, равный 5, будет давать пропорциональный отклик, равный 50. В целом, увеличение пропорционального коэффициента увеличивает скорость отклика системы управления. Однако, если пропорциональный коэффициент слишком велик, переменная процесса начнет колебаться. Если K_c увеличить еще больше, колебания станут больше, и система станет

неустойчивой и может даже выйти из-под контроля.

В общем случае, система управления с обратной связью с участием ПИД-регулятора выглядит следующим образом (рисунок 1.1). Система управляет величиной $y(t)$, то есть выводит величину $y(t)$ на заданное значение $r(t)$. На вход ПИД-регулятора подается ошибка $e(t)$, выход ПИД-регулятора является управляющим воздействием $u(t)$ для некоторого процесса (для объекта управления), управляющего величиной $y(t)$.

Интегральная составляющая ПИД

Интегральная составляющая суммирует рассогласование во времени. В результате даже небольшая погрешность вызовет увеличение интегральной составляющей. Интегральная характеристика будет постоянно увеличиваться с течением времени, пока ошибка не будет равна нулю, поэтому в результате стационарная ошибка будет равна нулю. Стационарная ошибка – это окончательная разница между переменной процесса и заданным значением. Явление, называемое интегральным завершением, возникает, когда интегральное действие насыщает контроллер, а контроллер не приближает сигнал ошибки к нулю.

Производная составляющая ПИД

Производная составляющая вызывает уменьшение выходного сигнала, если переменная процесса быстро увеличивается. Отклик производной пропорционален скорости изменения переменной процесса. Увеличение параметра производной по времени T_d приведет к тому, что система управления будет сильнее реагировать на изменения члена ошибки и увеличит скорость общей реакции системы управления. В большинстве практических систем управления используется очень малое время производной (T_d), потому что производная характеристика очень чувствительна к шуму в сигнале переменной процесса. Если сигнал обратной связи датчика зашумлен или если скорость контура управления слишком низкая, производная реакция может сделать систему управления нестабильной.

Настройка

Процесс установки оптимальных коэффициентов усиления для P , I и D для получения идеального отклика от системы управления называется настройкой. Существуют различные методы настройки, из которых будут рассмотрены метод “угадай и проверь” и метод Циглера-Николса.

Коэффициенты усиления ПИД-регулятора можно получить методом проб и ошибок. Как только инженер понимает значение каждого параметра усиления, этот метод становится относительно простым. В этом методе члены I и D сначала устанавливаются равными нулю, а пропорциональное усиление увеличивается до тех пор, пока выходной сигнал контура не начнет колебаться. По мере увеличения пропорционального усиления система ускоряется, но необходимо соблюдать осторожность, чтобы не сделать систему нестабильной. Как только P установлено для получения желаемого быстрого отклика, интегральный член увеличивается, чтобы остановить колебания. Интегральный член уменьшает установившуюся ошибку, но увеличивает перерегулирование. Некоторое превышение всегда необходимо для быстрой системы, чтобы она могла немедленно реагировать на изменения.

Интегральный член настраивается для достижения минимальной установившейся ошибки. Как только P и I установлены для получения желаемой быстрой системы управления с минимальной установившейся ошибкой, член производной увеличивается до тех пор, пока контур не станет приемлемо быстрым до своего заданного значения. Увеличение члена производной уменьшает перерегулирование и дает более высокий коэффициент усиления со стабильностью, но делает систему очень чувствительной к шуму. Часто инженерам приходится менять одну характеристику системы управления на другую, чтобы лучше соответствовать их требованиям.

Законы ПИД-регулирования

Таким образом, в исследованиях ПИД регуляторов в теории автоматического управления, актуальной становится задача выбора рациональной структуры и метода параметрической оптимизации ПИД-регуляторов, которые обеспечивают лучшие прямые показатели качества при отработке основных воздействий в одноконтурных системах автоматического управления. Вместе с тем только для классических ПИД-регуляторов, широко используемых в настоящее время, существует более трехсот методов настройки трех параметров оптимальной динамической настройки, а также балластной постоянной времени. Из-за этого возникает проблема обоснования лучшей структуры и метода параметрической оптимизации классических ПИД-регуляторов.

1.2 Алгоритмы ПИД-регулирования с поддержкой искусственного интеллекта

С развитием промышленности объекты становились все сложнее. В частности, для систем с большой временной задержкой, переменных во времени и нелинейных систем некоторые параметры неизвестны, или изменяются медленно, или имеют временную задержку, или имеют случайные помехи, или невозможно получить относительно точные цифровые модели. Между тем, по мере того как предъявляются все более

строгие требования к контролю качества, постепенно выявляются недостатки рутинного ПИД-контроля. Обычное ПИД-управление редко бывает эффективным для изменяющихся во времени объектов и нелинейных систем. Поэтому рутинное ПИД-регулирование значительно ограничено. В связи с этим оно было улучшено в различных аспектах, которые в основном представлены следующим образом. С одной стороны, рутинный ПИД конструктивно улучшен; с другой стороны, нечеткое управление, нейросетевое управление, и экспертный контроль являются наиболее активными среди существующих интеллектуальных элементов управления. Как только они используются в сочетании с обычным ПИД-регулированием, они могут учиться друг у друга, раскрывать свои сильные стороны и представлять собой интеллектуальное ПИД-регулирование.

Существует множество алгоритмов ПИД-управления и улучшенных алгоритмов ПИД-управления. Функционирование наиболее распространенных алгоритмов может быть представлено следующим образом.

Прогностический ПИД-регулятор

Прогностический компенсатор Смита был одним из первых чистых планов компенсации запаздывания. Его основная мысль заключалась в том, чтобы вывести чистую временную задержку из контура управления [40].

В его алгоритме предполагается, что прошлые входные вариации одинаковы на каждом шаге и равны текущим входным вариациям. На практике эти соотношения всегда несостоятельны при динамических реакциях систем. Влиянием такого приближения можно пренебречь, если системы не подвергаются задержке или короткой задержке, но с увеличением запаздывающих шагов несомненно, что влияние на устойчивость системы будет постепенно усугубляться. Поэтому компенсатор Смита интегрируется в систему для компенсации временной задержки, чтобы регулируемые переменные с задержкой сообщались регулирующему органу заранее. Затем регулятор будет опережать время, чтобы устранить влияние системной задержки, уменьшить перерегулирование, улучшить стабильность системы, ускорить регулирование и повысить эффективность систем с большой выдержкой времени [41, 42].

В принципе, выходные сигналы ПИД-регулятора возвращаются на вход ПИД-регулятора для компенсации, чтобы уменьшить отставание управляемых объектов. В инженерной практике компенсатор Смита возвращается обратно в ПИД-регулятор для преодоления чистой временной задержки управляемых объектов.

Адаптивный ПИД-регулятор

В реальном процессе промышленного управления многие механизмы сильно нелинейны и меняются во времени с чистой временной задержкой. Под влиянием некоторых факторов параметры процесса могут измениться, поэтому адаптивное ПИД-регулирование эффективно для решения этих проблем. Адаптивные ПИД-регуляторы имеют сильные стороны как адаптивного управления, так и обычных ПИД-регуляторов. Помимо того, что они полезны для автоматической идентификации исследуемых параметров процесса, автоматической настройки параметров контроллера и адаптации к изменениям контролируемых параметров процесса, они также структурно просты, очень надежны, как и обычные ПИД-регуляторы. Благодаря этим преимуществам адаптивные ПИД-регуляторы превратились в относительно идеальные автоматические устройства для управления технологическими процессами [43].

Они подразделяются на две основные категории. ПИД-регуляторы, основанные на идентификации контролируемых параметров процесса, известны под общим названием адаптивные ПИД-регуляторы. Дизайн их параметров зависит от оценки параметров для моделей контролируемых процессов. Другой тип адаптивных ПИД-регуляторов основан на некоторых характерных параметрах управляемого процесса, таких как коэффициент усиления критических колебаний и критическая частота колебаний. Они называются непараметрическими адаптивными ПИД-регуляторами. Параметры непараметрических адаптивных ПИД-регуляторов настраиваются непосредственно в соответствии с характерными параметрами процессов [43].

Нечеткое ПИД-управление

В 1965 году Zadeh [44], специалист по кибернетике, разработал теорию нечетких множеств как новый инструмент для описания, изучения и работы с нечеткими явлениями. Что касается нечеткого управления, то принимаются теории нечетких множеств. В частности, невозможно получить систематические и точные математические модели в некоторых сложных нестационарных и нелинейных системах с большим временным запаздыванием. Для нечеткого управления не нужны точные математические модели управляемых объектов. Подобно ПИД-регуляторам, точность управления этими регуляторами высока. Кроме того, контроллеры являются гибкими и адаптивными, что позволяет эффективно управлять сложными

системами управления и высокоточными сервосистемами. В последние годы они были достаточно активны в области управления [44-47].

1. Bu Q, Cai J, Liu Y, et al (2021) The Effect of Fuzzy PID Temperature Control on Thermal Behavior Analysis and Kinetics Study of Biomass Microwave Pyrolysis. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 158:1-8.
2. Bhagwan S, Soni JS, Kumar A (2016) A Review on: PID Controller. *Int. J. on Recent Technologies in Mech. and Elec. Eng.* 3(2):17-22.
3. Harrag A, Messalti S (2015) Variable Step Size Modified P&O MPPT Algorithm Using GA-based Hybrid Offline/online PID Controller. *Renew. Sust. Energ.* 49:1247-1260.
4. Chew IM, Juwono FH, Wong WK (2022) GA-Based Optimization for Multi-variable Level Control System: A Case Study of Multi-Tank System. *Eng. J.* 26(5): 25-41.
5. Singh A, Kaur A (2017) Tuning Techniques of PID controller: A Review. *Int. J. Eng. Res. Appl.* 8(1):481-485.
6. Liu T, Gao F, Zhao C (2009) Identification of Low-order Process Model with Time Delay from Closed-loop Step Test: IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, December 16-18, 2009. *IFAC Proceedings* 42: 447-451.
7. Castellanos-Cardenas D, Castrillon F, Vasques RE, Smith C (2020) PID Tuning Method Based on IMC for Inverse-response Second Order plus Dead Time Processes. *Processes* 8(9):1183.
8. Chew IM, Wong F, Bono A, et al (2019) Optimized Computational Analysis of Feedforward and Feedback Control Scheme Using Genetic Algorithm Techniques. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 495:1-14.
9. Elkholy, M. M. & El-Hay, E. A. Efficient dynamic performance of brushless DC motor using soft computing approaches. *Neural Comput. Appl.* 32(2), 1-14. (2020).
10. Premkumar, K. & Manikandan, B. V. Bat algorithm optimized fuzzy PD based speed controller for brushless direct current motor. *Eng. Sci. Technol.* 19(2), 818-840. (2016).
11. Jigang H, Hui F, Jie W (2019) A PI controller optimized with modified differential evolution algorithm for speed control of BLDC motor. *Automatika J Control Meas Electron Comput Commun* 60(2):135-148.
12. Wei X., Jiasheng W., Haibo W. (2019) PI controller of speed regulation of brushless DC motor based on particle swarm optimization algorithm with improved inertia weights. *Math Probl Eng* 2:1-12.
13. Joice CS, Paranjothi SR, Kumar VJS (2013) Digital control strategy for four quadrant operation of three phase BLDC motor with load variations. *IEEE Trans Ind Inform* 9(2):974-982.
14. Gundogdu T, Komurgoz G (2014) Self-tuning PID control of a brushless DC motor by adaptive interaction. *IEEJ Trans Electr Electron Eng* 9(4):384-390.
15. Elkholy MM, El-Hay EA (2020) Efficient dynamic performance of brushless DC motor using soft computing approaches. *Neural Comput Appl* 32(2):1-14.
16. Cakar O, Tanyildizi AK (2018) Application of moving sliding mode control for a DC motor driven four-bar mechanism. *Adv Mech Eng* 10(3):1-13.
17. Dutta P, Nayak SK (2021) Grey Wolf optimizer based PID controller for speed control of BLDC motor. *J Electr Eng Technol* 16(2):955-961.
18. Gundogdu T, Komurgoz G (2014) Self-tuning PID control of a brushless DC motor by adaptive interaction. *IEEJ Trans Electr Electron*.
19. Quynh NV (2020) The fuzzy PI controller for PMSM's speed to track the standard model. *Math Probl Eng* 1698213:1-20.
20. Patil A, Palnitkar G (2020) Comparative study and implementation of speed control of BLDC motor using traditional PI and fuzzy-PI controller. *Int J Eng Tech Res* 9(4):568-573.
21. Fadil H, Elhafyani ML (2020) Fuzzy-PI controller applied to PMSM speed controller: design and experimental evaluation. *Int J Power Electron* 11(1):102.
22. Patil A, Palnitkar G (2020) Comparative study and implementation of speed control of BLDC motor using traditional PI and fuzzy-PI controller. *Int J Eng Tech Res* 9(4):568-573.
23. Fadil H, Elhafyani ML (2020) Fuzzy-PI controller applied to PMSM speed controller: design and experimental evaluation. *Int J Power Electron* 11(1):102
24. Rubaai A, Castro-Sitiriche M.J., Ofoli A.R. (2008) DSP-based laboratory implementation of hybrid fuzzy-PID controller using genetic optimization for high-performance motor drives. In: Industry applications conference, 2007. 42nd IAS annual meeting. Conference record of the 2007 IEEE, vol 44, no 6, pp 1977- 1986.
25. Demirtas M. (2011) Off-line tuning of a PI speed controller for a permanent magnet brushless DC motor using DSP. *Energy Convers Manag* 52(1):264-273.
26. Hu H., et al. (2019) Speed control of brushless direct current motor using a genetic algorithm-optimized fuzzy

- proportional integral differential controller. *Adv Mech Eng* 11(11):1-13.
27. Bouallegue S., et al. (2012) PID-type fuzzy logic controller tuning based on particle swarm optimization. *Eng Appl Artif Intel* 25(3):484-493.
 28. Ramya A., et al. Adaptive MF tuned fuzzy logic speed controller for BLDC motor drive using ANN and PSO technique // *J. Eng.* – 2019. – 17:3947-3950.
 29. Gobinath S., Madheswaran M. (2020) Deep perceptron neural network with fuzzy PID controller for speed control and stability analysis of BLDC motor. *Soft Comput* 24(13):10161-10180.
 30. Karuppa N.A, Muthusamy M. (2021) Wavelet neural learningbased type-2 fuzzy PID controller for speed regulation in BLDC motor. *Neural Comput Appl* 33(20):13481-13503.
 31. Gobinath S., Madheswaran M. Deep perceptron neural network with fuzzy PID controller for speed control and stability analysis of BLDC motor. *Soft Comput.* 24(13), 10161-10180. (2020).
 32. Mu S., et al. Speed control of ultrasonic motor using a variable gain type PID control based on neural networks. – In: *The 7th International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2019*, (1), 103-108, 2019.
 33. Dat N. et al. Optimal FOC-PID parameters of BLDC motor system control using parallel PM-PSO optimization technique. *Int. J. Comput. Int. Syst.* 14(1), 1142-1154. (2021).
 34. Xie W., et al. PI controller of speed regulation of brushless DC motor based on particle swarm optimization algorithm with improved inertia weights. *Math. Probl. Eng.* (2671792), 1-12, 2019.
 35. Demirtas, M. Off-line tuning of a PI speed controller for a permanent magnet brushless DC motor using DSP. *Energ. Convers. Manage* 52(1), 264-273. (2011).
 36. Haber R.E., et al. Embedded fuzzy-control system for machining processes: Results of a case study. *Comput. Ind.* 50(3), 353-366. (2003).
 37. Ramírez M., et al. Fuzzy control of a multiple hearth furnace. *Comput. Ind.* 54(1), 105-113.
 38. Goodwin G.C., et al. *Control System Design.* – Prentice Hall PTR, 2000.
 39. Никулин Е. А. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем / Учеб. пособие для вузов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004.
 40. Y. Hu, T. Guo, P. Han, "Research on Smith's predictive control algorithms and their applications in DCS," *Computer Simulation*, vol. 33, no. 5. – P. 409-412, 2016.
 41. Liang D., et al. "Variable-pitch controllers for wind turbine generators based on an improved Smith prediction algorithm," *Electric Drive Automation*, vol. 38, no. 6. – P. 25-29, 2016.
 42. P. Lu, H. Zhang, R. Mao, "Comparative research on Smith predictive compensation control and PID control," *Journal of China University of Metrology*, vol. 20, no. 2. – P. 171-179, 2009.
 43. Y. Tao, Y. Yin, *New PID Control and Applications*, China Machine Press, Beijing, China, 1998.
 44. Xue L., et al. "Design of intelligent fuzzy- PID temperature control systems," *Information Recording Material*, vol. 19, no. 11. – P. 118-120, 2018.
 45. Z. Guo, H. Yu, L. Chen, "High-speed galvanometer motor control based on fuzzy PID," *Small & Special Electrical Machines*, vol. 47, no. 4. – P. 1-5, 2019.
 46. X. Bai, *Research on Fuzzy Controllers and their Applications in Host Steam Temperature Controllers*, North China Electric Power University (Hebei), Beijing, China, 2006.
 47. B. Widrow, R. Winter, "Neural nets for adaptive filtering and adaptive computer, pattern recognition," *An Introduction To Neural And Electronic Networks*, vol. 21, 1990.
 48. T. Liu, Y. Zhang, "Research on neural network PID control in speed control systems for motors of hydraulic pumps," *Telecom Power Technology*, vol. 35, no. 5. – P. 4-7, 2018.
 49. X. You, C. Su, Y. Wang, "An overview of improvement of algorithms for BP neural networks," *Minying Keji*, vol. 34, no. 4. – P. 146-147, 2018.
 50. C. Peng, Y. Zheng, Z. Hu, "Adaptive single neuron control over time-varying time delay systems," *Computing Technology and Automation*, no. 1. – P. 17-19, 2005.
 51. Maillard E.P., Gueriot D. RBF neural network, basis functions and genetic algorithm. – In: *Proceedings of the International Conference on Neural Networks (ICNN'97)*, vol. 4. – P. 2187-2192, IEEE, Houston, TX, USA, July 1997.
 52. Goldberg D.E., Holland J.H., "Genetic algorithms and machine learning," *Machine Learning*, vol. 3, no. 2-3. – P. 95-99, 1988.
 53. Liu H., et al. "PID parameter tuning and optimization based on genetic algorithms," *Journal of North China Electric Power University*, vol. 3. – P. 31-33, 2001.
 54. Chen C., et al. "PID temperature control for reactors based on genetic algorithms," *Scientific and Technological Innovation*, vol. 28, no. 6. – P. 72-73, 2019.
 55. Wang H., Meng J., Xu R., "Design of ATO speed controllers based on PID control over genetic algorithms,"

Industrial Control Computer, vol. 31, no. 7. – P. 27–29+31, 2018.

56. Zheng X. "Application of principles of genetic algorithms in mechanical engineering," China High-Tech Enterprises, vol. 34. – P. 62–63, 2014.

57. Zhao Y., Meng L., Peng C., "A summary about principles of genetic algorithms and development orientations," Heilongjiang Science and Technology Information, vol. 13. – P. 79–80, 2010.

58. Yang Z., Zhu H., Huang Y., "An overview of PID controller design and parameter tuning Methods," Control and Instruments In Chemical Industry, no. 5. – P. 1–7, 2005.

59. Aström K.E., T. Hägglund, "The future of PID control," Control Engineering Practice, vol. 9, no. 11. – P. 1163–1175, 2001.

60. Tang Y. "Research on PID control methods," Electronics World, vol. 7. – P. 65–66, 2019.

61. Zhu M., Zhan Y., Zhang S. "Application of PID algorithms in constant pressure water supply," Computer Knowledge and Technology, vol. 14, no. 22, p. 290, 2018.

62. Yangwei Yu Y. "Brushless DC motor fundamentals application note "MPS, Futur. Analog IC Technol. – P. 7–8, 2011.

63. Senthil V., et al. Green Energy Based Coupled Inductor Interleaved Converter with MPPT Technique for BLDC Application //International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 9, No. 4. – P. 1725–1732, December 2018.

64. Kumar S., Bhatt R. "BF-PSO optimized PID controller design using ISE, IAE, IATE and MSE error criteria", International Journal of Advanced Research in Computer Engineering and Technology. Vol. 2. No. 7. – P. 2333–2336, 2013.

65. Akram H., et al. Comparison between Fuzzy Logic and PI Control for the Speed of BLDC Motor //International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 9, No. 3. – P. 1116~1123, September 2018.

66. Baharudin N.N., Ayob S.M., "Brushless DC Motor Speed Control Using Single Input Fuzzy PI Controller". International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 9, No. 4. – P. 1952~1966, December 2018.

67. Khubalkar S.W., et al. "Design and tuning of fractional order PID controller for speed control of permanent magnet brushless DC motor", Control, Measurement and Instrumentation (CMI), 2016 IEEE First International Conference on. IEEE, 2016.

68. Sekhar G.G., et al. "Performance of Brushless DC Drive with Single Current Sensor Fed from PV with High Voltage-Gain DC-DC Converter". International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS), Vol. 9, No. 1. – P. 33~45, March 2018.

69. Mehdi N., et al. "A PSO-based optimum design of PID controller for a linear brushless DC motor" World Academy of Science, Engineering and Technology, vol. 26, no.40. – P. 211– 215, 2007.

70. Satishrao P., Daniyal H. "PID bidirectional speed controller for BLDC with seamless speed reversal using Direct Commutation Switching Scheme." Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), 2017 IEEE 8th. IEEE, 2017.

71. Настройка ПИД-регуляторов. – URL:https://habr.com/ru/companies/etmc_exponenta/articles/514846/ .

72. Dawood S., et al. Comparison of PID, GA and Fuzzy Logic Controllers for Cruise Control System //International Journal of Computing and Digital Systems, vol 7, no 05. – P. 311–319.; 2018.

73. Dawood S., et al. Comparison of PID, GA and Fuzzy Logic Controllers for Cruise Control System //International Journal of Computing and Digital Systems, vol 7, no 05. – P. 311–319.; 2018.

74. Кондратьев Т.Н. Эволюционные вычисления: нейронные сети и генетические алгоритмы. – Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям, Т. 1, 2019. – С. 418–421.

75. Кулаков Г.Т., Артёминко К.И. Сравнение качества переходных процессов систем автоматического управления с классическим ПИД-алгоритмом и оптимальным регулятором //Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. Т. 62, № 2 (2019), с. 192–200.

76. Josepha S.B., et al. Metaheuristic algorithms for PID controller parameters tuning: review, approaches and open problems //Heliyon 8(2022) e09399.

77. Nasir M., et al. Review of Various Metaheuristics Techniques for Tuning Parameters of PID/FOPID Controllers //ITM Web of Conferences 43, 01002 (2022).

78. Gholap V., et al. PID controller tuning using metaheuristic optimization algorithms for benchmark problems //IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 263 (2017) 052021

79. Goud H., et al. Metaheuristics Algorithm for Tuning of PID Controller of Mobile Robot System //Computers, Materials & Continua. – 2022. – Vol.72, no.2

80. Sule A.H. Studies of PID Controller Tuning using Metaheuristic Techniques: A Review // //International Journal of Innovative Scientific & Engineering Technologies Research 10(4):44–63, Oct.–Dec., 2022.

81. Oladipo S., et al. Optimization of PID controller with Metaheuristic Algorithms for DC motor drives: Review. – October 2020 *International Review of Electrical Engineering (IREE)* 15(5):352.
82. Nguyen T.T. The neural network-based control system of direct current motor driver // *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol. 9, No. 2, April 2019. – P. 1445–1452.
83. Danh N.C. Neural Networks Application for the Data of PID Controller for Acrobot // *Hindawi Scientific World Journal* Volume 2022, Article ID 9162352, 13 p,
84. Gao H., Xiong L. Research on a hybrid controller combining RBF neural network supervisory control and expert PID in motor load system control // *Advances in Mechanical Engineering* Volume 14, Issue 7, July 2022. – P. 1–12.
85. Perišić N., Jovanović R. Control of Direct Current Motor by Using Artificial Neural Networks in Internal Model Control Scheme // *FME Transactions* (2023) 51. – P. 109–116.
86. Mavrinac M., et al. Genetic Algorithm–Based Parametrization of a PI Controller for DC Motor Control // *Technical Journal* 16, 1(2022). – P. 16–22.
87. Rodríguez-Abreo O., et al. Self-Tuning Neural Network PID With Dynamic Response Control // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 65206–65215.
88. Lee Y.-S., Jang D.-W. Optimization of Neural Network–Based Self-Tuning PID Controllers for Second Order Mechanical Systems. // *Appl. Sci.* 2021, 11, 8002.
89. Figueiredo R., et al. Auto-Tuning PID Controller Based on Genetic Algorithm. – In book: *Disturbance Rejection Control* Publisher: IntechOpen. – February 2023.
90. Sall M., et al. Comparative Study between the PID Regulator and the Fuzzy Regulator Applied to the Operation of a Brushless DC Motor // *Energy and Power Engineering*, 2021, 13, 365–376.
91. Yi Zhou. A Summary of PID Control Algorithms Based on AI-Enabled Embedded Systems // *Hindawi. Security and Communication Networks* Volume 2022, Article ID 7156713, 7 p.
92. Islam Md.T., et al. Fuzzy Logic and PID Controllers for DC Motor Using Genetic Algorithm // *International Journal of Control Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 10(2). – P. 37–41.
93. Abushawish A., Hamadeh M., Ali Bou Nassif. PID Controller Gains Tuning Using Metaheuristic Optimization Methods: A survey // *International Journal of Computer* Volume 14, 2020.
94. Chew I-M., et al. Metaheuristic-based PID Control: Evaluating the Effect of Parameter Settings // *Springer Nature* 2021 LATEX template.
95. Saleeb, H., et al. Artificial neural networks applied on induction motor drive for an electric vehicle propulsion system // *Electr. Eng.* 104, 1769–1780 (2022).
96. Debes R.S., Kara R. Design and Simulation of a PID Neural Network Controller for PMDC Motor Speed and Position Control // *European Journal of Science and Technology Special Issue* 44. – P. 46–50, December 2022.
97. Dakheel H.S., et al. Simulation model of ANN and PID controller for direct current servo motor by using Matlab/Simulink // *TELKOMNIKA Telecommunication Computing Electronics and Control* Vol. 20, No. 4, August 2022. – P. 922–932.
98. Abdullah Z.B., et al. Simulation Model of PID Controller for DC Servo Motor at Variable and Constant Speed by Using MATLAB // *Journal of Robotics and Control (JRC)* Volume 4, Issue 1, January 2023.
99. Ye N., et al. Speed Control of DC Motor by Using Neural Network Parameter Tuner for PI-controller. – 2019 *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)* – P. 2152–2156.
100. Astrom K.J., Hagglund T. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. – Instruments Society of America, 1995.
101. Salami M., Cain G. “An Adaptive PID Controller Based on Genetic Algorithm Processor”, *IEE Genetic Algorithms in Engineering Systems, Innovations and Applications Conference*, Publication No. 414, 12–14 September, (1995).
102. Kumar S., et al. Genetic Algorithm Based PID Controller Tuning for a Model Bioreactor”, *Indian Chemical Engineer*, vol. 50, no. 3, (2008). – P. 214–226..
103. Skogestad S. “Simple Analytic Rules for Model Reduction and PID Controller tuning”, *Journal of Process Control*, vol. 13, (2003). – P. 291–309.
104. Bequette W. *Process Control, Modeling, Design, and Simulation*. – Prentice Hall, Inc., New Jersey, 2003.
105. Jones K.O., Hengue W., “Limitations of multivariable controller tuning using genetic algorithms”, *International Conference on Computer Systems and Technologies – CompSysTech 2009*, IIIA.20-1 – IIIa.20.5.
106. Thomas N., Poongodi P. “Position Control of DC Motor Using Genetic Algorithm Based PID Controller”, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, U. K., vol. 2, (2009). – P. 1618–1622.
107. Sharifian M., et al. Velocity Control of DC Motor Based Intelligent methods and Optimal Integral State Feedback Controller // *International Journal of Computer Theory and Engineering*, vol. 1, no. 1, (2009). – P. 1793– 1801.
108. Calistru C.N. “PID Robust Control via Symbolic Calculus and Global Optimization Techniques”, *7th International Conference on Development and Application Systems*, (2004). – P. 313–318.

109. Sadasivarao M.V., Chidambaram M. "PID Controller tuning of cascade control systems using genetic algorithm //Journal of Indian Inst. Sci., vol. 86, (2006). – P. 343-354.
110. Kim J.-S., et al. Auto Tuning PID Controller based on Improved Genetic Algorithm for Reverse Osmosis Plant //International Journal of Computer Systems Science and Engineering, vol. 3, no. 4, (2008). – P. 232 – 237.
111. Gao F., Tong H. "Differential Evolution, An Efficient Method in Optimal PID Tuning and Online Tuning. – Proc. of the International Conference on Complex Systems and Applications, (2006). – P. 785-789.
112. Storn R., Price K. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces // Journal Global Optimization. – 1997. – Vol. 11(4). – P. 341-359.
113. Y.J. Cao, "Eigenvalue Optimisation Problems via Evolutionary Programming", Electronics Letters, vol. 33, no.7, (1997). – P. 642-643.
114. Chang W.-D., Yan J.-J. Optimum setting of PID controllers based on using evolutionary programming algorithm //Journal of the Chinese Institute of Engineers, vol. 27, no. 3, (2004). – P. 439-442.
115. Doležel P., Self-tuning PID Control using Genetic Algorithm and Artificial Neural Networks //ASR 2009 Instruments and Control, (2009). – P. 33- 39.
116. Zulfatman P.O., Rahmat M.F. Application of self-tuning Fuzzy PID controller on industrial hydraulic actuator using system identification approach //International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems, vol. 2, no. 2, (2009). – P. 246-261.
117. Eberhart R.C., Kennedy J.. A new optimizer using particle swarm theory. – In: Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, volume 43. New York, NY, USA: IEEE, 1995.
118. M. El-Said El-Telbany Employing Particle Swarm Optimizer and Genetic Algorithms for Optimal Tuning of PID Controllers, A Comparative Study //ICGST-ACSE Journal, vol. 7, no. 2, (2007). – P. 49-54.
119. Abdulameer A., et al. Tuning Methods of PID Controller for DC Motor Speed Control //Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science Vol. 3, No. 2, August 2016. – P. 343 – 349.
120. Meshram P.M., Kanojiya R.G. Tuning of PID Controller using Ziegler-Nichols Method for Speed Control of DC Motor. – 2013 IEEE Int. Conf. Control Appl. 2012. –P. 117-122.
121. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems. Eleventh E. Prentice-Hall, Inc. 2008.
122. Franklin G.F., Powell J.D. A Emami-Naeini. FEEDBACK CONTROL OF Dynamic Systems. Fourth Edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2002.
123. Dubey S., Srivastava S.K. A PID Controlled Real Time Analysis of DC Motor //Int. J. Innov. Res.Comput. Commun. Eng. 2013; 1(8): 1965-1973.
124. Salim J.O. FUZZY Based PID Controller for Speed Control of D.C. Motor Using LabVIEW 2 DC Motor Mathematical Model //WSEAS Trans. Syst. Control. 2015; 10: 154-159
125. Visioli A. Advances in Industrial Control-Practical PID Control. London: Springer-Verlag London Limited. 2006.
126. Owen F. Designing and tuning PID controllers. – In: Control Systems Engineering A Practical Approach. California, Frank Owen. 2012: 1-41.
127. Phillips C.L., Harbor R.D. FEEDBACK CONTROL SYSTEMS. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2000.
128. Ogata K. Modern Control Engineering. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. 2010.
129. Astrom K.J., Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. – USA: Instrument Society of America. 1995.
130. DPA Dingyu Xue, Yang Quan Chen. Linear Feedback Control. – In: Linear Feedback Control, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics. 2007: 183-235.
131. Raunt K.H., Vaishnay S.R. A Study on Performance of Different PID Tuning Techniques. NJIEEEICE. – P. 1-4.
132. Wang Q.G., et al. PID Tuning for Improved Performance[J], IEEE Trans Control System Tech,1999,7(4). – P. 457-465.
133. Xiang-jie Niu, Optimization of PID controller parameters based on genetic algorithm [J] Computer Simulation, 2010,27 (11) :180-182.
134. Ping Yin. The developed engine control system based on virtual instrument. – Nanjing: Nanjing University of Science and Technology degree thesis, 2010.
135. Chunli Zhang, Structural damage detection method based on GA-BP neural network [D]. Jiangsu University, a master's degree thesis, 2006
136. MATLAB Chinese Forum, MATLAB neural network analysis of 30 cases, [M]. Beijing: Beijing Aerospace University Press, 2010. – P. 54-64.
137. Hang Y. Diesel engine control model and control algorithm design and simulation. – PhD thesis, Jiangsu Polytechnic University, 2002
138. Shao J. Petrol engine speed variable gain robust control studies. – Nanjing: Nanjing University of Aeronautics

and Astronautics, Ph.D. thesis,

139. Sagüés C., et al. Automatic control of biomass gasifiers using fuzzy inference systems //Bioresource Technology. – 2007. – Vol. 98(4). – P. 845-855.
140. Veselov O., et al. The Use of Fuzzy Logic in Automatic Control Systems, Proceedings of the 30th DAAAM International Symposium. – P.0897-0903, B. Katalinic (Ed.), Published by DAAAM International, Vienna, Austria 2019
141. Rashidi F., et al. Speed regulation of DC motors using intelligent controllers. – In: Proc. IEEE Conference on Control Applications, 2003, pp. 925 – 930.
142. Bhatt R., et al. Application of stochastic fractal search in approximation and control of LTI systems. – Microsystem technologies, May 2018.
143. Ahn K.K., Truong D.Q. Online tuning fuzzy PID controller using robust extended Kalman filter //Journal of Process Control, vol. 19, no.6, pp. 1011-1023, 2009.
144. Tiwari S., et al. Control of DC Motor Using Genetic Algorithm Based PID Controller. – 2018 International Conference and Utility Exhibition on Green Energy for Sustainable Development (ICUE), Phuket, Thailand, 2018. – P. 1-6.
145. Thomas N. Position control of DC motor using genetic algorithm based PID controller – In: Proceeding of the World Congress on Engineering, WCE 2009, July 1-3, vol II. London, UK, pp 1618-1622, 200.
146. Siwei L. The Teoretical Basis of Large-Scale Artificial Neural Networks. – Tsinghua University Press, Beijing, China, 2004.
147. Jin Z., Huajun Z. Bayesian method of self-learning neural network weight initialization //Computer Applications, vol. 18, no. S1. – P. 1-4, 2008.
148. Qunyan D. The emergence and development of intelligent control //Equipment Manufacturing Technology, vol. 11, no. 11. – P. 125-126, 2008.
149. Juan B., Fenglong S. AC motor PID control system based on neural network //Instrument Technology and Sensors, vol. 56, no. 2. – P. 98-99, 2010.
150. Chulin H., Deshi W. Using PID neural network to realize torpedo asynchronous AC motor speed identification //Torpedo Technology, vol. 13, no. 4. – P. 44-46, 2005.
151. Reddy R.V., et al. Speed control of induction motor drive using artificial neural networks-levenberg-marquardt backpropogation algorithm //International Journal of Applied Engineering Research ISSN, vol. 13. – P. 80-85, 2018.
152. Weide Q. Application research of improved genetic algorithm and fuzzy neural network in AC servo system //Electric Drive Automation, vol. 30, no. 2. – P. 27-30, 2008.
153. Jinhui Z., Xiwen L., Muhoua L. Application of BP neural network to sugarcane leaf disease classification //IEEE, vol. 3. – P. 422-425, 2008.
154. Jiang Y., Bingjun G. Application of PID controller based on neural network in AC speed regulation system //Journal of East China University of Science and Technology, vol. 44, no. 6. – P. 735-741, 2012.
155. Hussain T., et al. Intent based recognition of walking and ramp activities for amputee using sEMG based lower limb prostheses //Biocybernetics and Biomedical Engineering, vol. 40, no. 3. – P. 1110-1123, 2020.
156. Kunpeng M., Ganwei C., Yun D. Planar two-degree-of-freedom five-bar mechanism BP neural network tuning PID control //Equipment Manufacturing Technology. – 2010. – Vol. 32, no. 5. – P. 44-46.

Эта часть работы выложена в ознакомительных целях. Если вы хотите получить работу полностью, то приобретите ее воспользовавшись формой заказа на странице с готовой работой:

<https://stuservis.ru/magisterskaya-rabota/338708>