

УДК 681.5

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

**ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ
ИНСТРУМЕНТОВ НАСТРОЙКИ
РЕГУЛЯТОРОВ АВТОМАТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Сафин Марат Абдулбариевич
Канд. техн. наук, доцент
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Милицкая Варвара Михайловна
Студент
*Казанский государственный энергетический
университет, Казань, Россия*

Современные автоматизированные системы регулирования, применяемые в агропромышленном комплексе, предъявляют высокие требования к точности поддержания параметров среды при одновременном снижении энергопотребления. Наиболее распространённым средством управления остаются ПИД-регуляторы, которые, несмотря на простоту реализации, характеризуются низкой адаптивностью к изменяющимся внешним условиям и параметрам объекта управления. Это приводит к возникновению колебаний, снижению устойчивости и росту энергетических потерь. В этих условиях актуальной задачей становится применение интеллектуальных методов автоматической настройки, способных адаптировать параметры регулятора в реальном времени. В работе представлен обзор современных инструментов для настройки регуляторов, включая табличные методы, адаптивные алгоритмы, нейросетевые и нечеткие логические модели. Проведено моделирование системы регулирования скорости электродвигателя с использованием ПИД-регулятора в среде MATLAB/Simulink. Установлено, что применение адаптивных методов позволяет устранить перерегулирование (с 7,5 % до 0 %), сократить время переходного процесса (с 3,4 до 1,5 с) и повысить робастность системы (с 0,6 до 0,72). Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения адаптивных регуляторов в автоматические системы агропромышленного комплекса для повышения эффективности, надежности и устойчивости управления в условиях нестабильной рабочей среды

Ключевые слова: АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ, ПИД-РЕГУЛЯТОР, АВТОМАТИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ

UDC 681.5

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences)

**STUDY OF MODERN TOOLS FOR TUNING
CONTROLLERS IN AUTOMATIC CONTROL
SYSTEMS**

Safin Marat Abdulbarievich
Cand.Tech.Sci., associate professor
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Militskaya Varvara Mikhailovna
Student
*Kazan State Power Engineering University, Kazan,
Russia*

Modern automated control systems used in the agro-industrial complex impose high requirements on the accuracy of maintaining environmental parameters while simultaneously reducing energy consumption. The most commonly used control elements remain PID controllers, which, despite their implementation simplicity, exhibit low adaptability to changing external conditions and dynamic characteristics of the controlled object. This often leads to oscillations, decreased system stability, and increased energy losses. Under such conditions, the use of intelligent auto-tuning methods capable of adjusting controller parameters in real time becomes highly relevant. This paper provides an overview of modern tools for PID controller tuning, including gain scheduling, adaptive algorithms, neural network-based approaches, and fuzzy logic models. A simulation of a DC motor speed control system using a PID controller was performed in MATLAB/Simulink. It was established that adaptive methods eliminate overshoot (from 7.5 % to 0 %), reduce the settling time (from 3.4 to 1.5 seconds), and increase system robustness (from 0.6 to 0.72). The results confirm the feasibility of implementing adaptive regulators in automated agro-industrial systems to enhance efficiency, reliability, and control stability under variable environmental and operational conditions

Keywords: ADAPTIVE CONTROL, PID CONTROLLER, AUTO-TUNING, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, MATLAB/SIMULINK,

Введение. Современные автоматические системы управления во многом определяются их энергоэффективностью и точностью поддержания заданных режимов. Во многих отраслях, включая агропромышленный комплекс, требуется стабильно поддерживать параметры окружающей среды (температуру, влажность, состав воздуха и др.) с целью обеспечения комфортных и безопасных условий, а также оптимального протекания технологических процессов. Например, системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха (HVAC) в зданиях потребляют до 40-42 % энергии, поэтому улучшение их работы способно дать экономию энергии на 20-25 %.

В сельском хозяйстве задачи микроклиматического регулирования (теплицы, зернохранилища и пр.) осложняются влиянием погодных факторов, что требует надежных автоматических средств контроля. Наиболее распространенным решением для поддержания заданных параметров в подобных системах являются пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы. ПИД-регулятор автоматически поддерживает выходную величину (например, температуру) на заданном уровне за счет вычисления управляющего воздействия на основе отклонения от заданной точки. Данная классическая архитектура управления широко применяется в локальных промышленных системах, системах автоматизации технологических процессов, робототехнике и климатических установках. ПИД-регуляторы обеспечивают быстрое восстановление заданных параметров после возмущений, удержание показателей в требуемом диапазоне и динамическую компенсацию внешних возмущающих воздействий или внутренних изменений в системе. Их ключевое преимущество – способность минимизировать отклонения за

счет быстрого реагирования и корректировки режима работы практически без запаздываний, что важно для процессов с жесткими требованиями к стабильности. Основным ограничением классических ПИД-регуляторов является низкая адаптивность к изменениям внешних условий и рабочих нагрузок. При существенном отклонении характеристик объекта регулирования или внешней среды настроенные однажды коэффициенты регулятора могут приводить к появлению нежелательных колебаний контролируемых величин (температуры, давления и т.д.), что недопустимо в системах с высокими требованиями к точности и стабильности. Колебания параметров среды (температурные скачки, перепады давления) или постепенный износ оборудования способны нарушать баланс системы, снижая качество управления. Традиционные алгоритмы ПИД требуют регулярной ручной перенастройки при изменении параметров объекта, что увеличивает эксплуатационные затраты и вносит риск человеческой ошибки. Неверно выбранные коэффициенты усиливают нестабильность работы, ухудшая энергоэффективность и надежность технологических процессов.

Таким образом, актуальной проблемой является разработка методов настройки регуляторов, способных автоматически адаптироваться к изменяющимся условиям без потери качества управления.

Состояние исследований и актуальность проблемы. Для преодоления ограничений классических систем и повышения энергоэффективности ключевым направлением развития стало внедрение адаптивных интеллектуальных алгоритмов управления. Гибридные подходы, включающие нечеткую логику, нейронные сети и прогнозирующие модели, позволяют регулятору автоматически подстраивать свои коэффициенты под текущие условия в реальном времени.

Такие алгоритмы анализируют данные датчиков в режиме онлайн, прогнозируют возможные изменения и мгновенно корректируют параметры управления. В результате минимизируется инерционность системы, снижаются энергопотери и повышается устойчивость работы оборудования в нестационарных условиях (например, при резких перепадах температуры наружного воздуха или скачкообразной смене нагрузки). Кроме того, интеллектуальные системы автоналащтровки уменьшают необходимость участия человека в диагностике и настройке контуров, что упрощает эксплуатацию сложных объектов. Существует два основных подхода к автоматической калибровке (настройке) ПИД-контроллеров:

1. Условно-инициируемая настройка: алгоритм автотюннга активируется при обнаружении внештатных условий – значительных колебаний нагрузки, внезапных внешних возмущений или устойчивой ошибки регулирования. Как правило, система выдает сигнал о необходимости перенастройки, и процесс запускается с подтверждения оператора. Такой подход обеспечивает коррекцию только при существенном ухудшении работы, а требование участия человека ограничивает оперативность реагирования.

2. Непрерывная адаптация: параметры регулятора корректируются в автоматическом режиме на протяжении всего времени работы системы без участия оператора. Например, контроллер автономно компенсирует постепенные флуктуации температуры среды или динамические изменения нагрузки на двигатель. Данный метод обычно закладывается на этапе проектирования системы, чтобы регулятор с самого начала был синхронизирован с объектом управления и мог адаптироваться к его поведению.

Следует отметить, что на сегодняшний день полностью автоматические алгоритмы настройки не гарантируют превосходство над

опытным инженером-наладчиком. Машинные методы пока не всегда справляются со сложными нелинейными объектами столь же эффективно, как человек, особенно при наличии неучтенных факторов. Кроме того, отсутствует универсальный и общепринятый метод автокалибровки, подходящий для любых систем – каждый подход имеет ограничения. Как правило, процесс автоматической настройки включает три этапа: идентификацию модели объекта, расчет оптимальных параметров регулятора по выбранному критерию качества и внедрение этих параметров в систему. Табличный метод настройки коэффициентов ПИД-регулятора считается эффективным для объектов с существенно меняющимися параметрами. Он особенно полезен в нелинейных системах, где требуется быстро корректировать настройки под текущие условия работы (нагрузку, внешние возмущения, требуемую производительность). Алгоритм такого подхода включает: (1) классификацию режимов работы – определение типовых сценариев функционирования (например, режим вентиляции помещения при разных уровнях влажности); (2) идентификацию параметров – априорное вычисление и сохранение оптимальных настроек регулятора для каждого сценария в виде справочной таблицы; (3) автоматический выбор коэффициентов – распознавание текущего режима по измеряемым параметрам и применение соответствующих табличных значений настроек. Преимущество данного метода – возможность очень быстро восстановить параметры управления при переключении режима без затрат времени на онлайн-вычисления. Однако очевидным недостатком является необходимость заранее промоделировать все возможные состояния системы и возмущения, что практически невозможно при большой вариативности условий. Это ограничивает применение табличного подхода в условиях непредсказуемых изменений внешней среды. В целях повышения оперативности адаптации разработаны усовершенствованные схемы на

базе табличного метода. В частности, применяется двухконтурная структура управления с открытой архитектурой: внешний адаптивный контур быстрого реагирования дополняет основной регулятор. Для снижения вычислительной нагрузки таблица настроек формируется по дискретным опорным точкам рабочего диапазона с последующей сплайн-интерполяцией между ними. Такая схема снижает объем хранимых данных и ускоряет их обработку. Недостатком является высокая трудоемкость этапа первичной идентификации модели и заполнения таблицы. Современные программные комплексы позволяют частично автоматизировать этот процесс, выполняя многовариантное моделирование объекта и заноса полученные оптимальные настройки в базу данных. В целом табличный подход целесообразен в системах, где перечень дестабилизирующих факторов ограничен и поддается количественной оценке – это позволяет заранее спрогнозировать и компенсировать опасные отклонения, повышая устойчивость управления. Другая модификация адаптивных алгоритмов реализует архитектуру управления с автоматической калибровкой регулятора. Система сохраняет базовые принципы традиционных подходов (наличие контура обратной связи, использование ПИД-закона регулирования), но исключает необходимость ручной настройки за счет встроенного интеллектуального функционала [1].

Цель исследований. Целью работы является анализ и обобщение современных методов автоматической настройки регуляторов в автоматических системах регулирования и демонстрация эффективности этих методов на примере имитационной модели.

Материалы и методы исследований. В рамках настоящего исследования применены методы аналитического обзора и компьютерного моделирования. Выполнен анализ современных зарубежных публикаций по теме адаптивной настройки ПИД-регуляторов и повышения

эффективности систем управления. Для иллюстрации полученных выводов разработана имитационная модель замкнутой системы регулирования скорости вращения двигателя постоянного тока с ПИД-регулятором в среде MATLAB/Simulink. В моделировании исследовано влияние выбора параметров регулятора на качество переходных процессов (перерегулирование, время установления, устойчивость). Сравнивались два случая: исходная (классическая) настройка PID-контроллера по типовым практическим рекомендациям и адаптивная настройка, при которой коэффициенты регулятора скорректированы с целью минимизации перерегулирования и времени регулирования. Оценка результатов проводилась по стандартным показателям качества: процент перерегулирования, время переходного процесса, а также по динамическим характеристикам (наличие колебаний, запас устойчивости системы).

Результаты исследований. Анализ показал, что внедрение адаптивных алгоритмов значительно улучшает качество регулирования по сравнению с фиксированной настройкой. Интеллектуальные регуляторы с самонастройкой способны поддерживать стабильные значения контролируемых параметров даже при изменении характеристик объекта или воздействии внешних возмущений. Отслеживается эффективная компенсация возмущений без заметных отклонений от заданного режима. По сравнению с традиционным ПИД-регулятором с постоянными коэффициентами, адаптивные системы устраняют или резко уменьшают амплитуду колебаний и предотвращают возникновение автоколебательного режима. Тем самым повышаются точность и устойчивость управления при одновременном снижении избыточного расхода энергии на регулирование. На экспериментальной модели системы регулирования скорости двигателя подтверждена эффективность подбора оптимальных параметров ПИД. При исходных (неоптимальных)

коэффициентах регулятора переходной процесс сопровождался заметным перерегулированием порядка 7,5 %. В результате адаптивной перенастройки параметров величина перерегулирования устранена полностью (снижена до 0%), а время установления заданной скорости сокращено приблизительно с 3,4 с до 1,5 с. Кроме того, расчетные оценки показали увеличение запаса устойчивости: условный коэффициент робастности системы вырос с 0,6 до 0,72. Иными словами, оптимизированная настройка позволила одновременно ускорить реакцию системы и ликвидировать броски выхода без потери устойчивости. Полученные данные согласуются с результатами, представленными в литературе. В частности, в системе HVAC было показано, что современный модельно-ориентированный алгоритм управления способен обеспечить до 20–25% экономии энергии по сравнению с традиционным методом on/off и статической PID-настройкой

Выводы. 1. Автоматизированные системы регулирования технологических процессов и микроклимата (в зданиях и агротехнических объектах) требуют высокой точности и энергоэффективности поддержания параметров, что предъявляет повышенные требования к оптимальной настройке используемых регуляторов. 2. Классические ПИД-регуляторы просты и надежны, однако их эффективность существенно снижается при изменении внешних условий и параметров объекта. Фиксированные коэффициенты без адаптации не обеспечивают должного качества в динамике, а ручная перенастройка регуляторов трудоемка и не всегда может быть выполнена достаточно оперативно.

Библиографический список

1. Sawant P., Ho E., Pfafferoth J. Application and analysis of a model based controller for cooling towers in compression chiller plants. Heliyon, 6(2): e03249, 2020.

References

1. Sawant P., Ho E., Pfafferoth J. Application and analysis of a model based controller for cooling towers in compression chiller plants. Heliyon, 6(2): e03249, 2020.