АЛГОРИТМЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Шавкатов Сухроб Баходирович
Навоийский государственный горно-технологический университет
sukhrobb8886@gmail.com

Аннотация. *Предложен алгоритм параметрического синтеза робастного ПИ-регулятора контура частоты вращения паровой турбины с промежуточным перегревом пара. Параметрическая неопределённость объекта описана 16 вершинными моделями, границы неопределённости оценены по эксплуатационным данным паровой турбины парогазовой установки за август 2026 г. Синтез выполнен минимизацией критерия ITAE на наихудшей модели при заданном запасе устойчивости на всех моделях. По результатам моделирования робастная настройка снижает наихудшее значение ITAE на 36 %, а время установления — с 19,1 до 13,1 с.*

Ключевые слова: *робастное управление, параметрический синтез, ПИ-регулятор, параметрическая неопределённость, паровая турбина.*

Annotatsiya. *Maqolada elektr energiyasi ishlab chiqarish jarayonlarida qo‘llaniladigan qayta qizdirishli bug‘ turbinasi aylanish tezligini boshqarish konturi uchun robast PI-regulyatorning parametrik sintezi algoritmi taklif etilgan. Obyekt parametrlarining noaniqligi 16 ta vertex model orqali tavsiflangan, noaniqlik chegaralari bug‘-gaz qurilmasi bug‘ turbinasining 2026-yil avgust oyidagi ish ma’lumotlaridan baholangan. Sintez eng yomon modelda ITAE mezonini minimallashtirish va barcha modellarda barqarorlik zaxirasini ta’minlash sharti bilan bajarilgan. Modellashtirish natijalariga ko‘ra, nominal modelga sozlangan regulyatorga nisbatan eng yomon holatdagi ITAE qiymati 36 % ga, o‘rnatilish vaqti esa 19,1 s dan 13,1 s gacha kamaydi.*

Kalit so‘zlar: *robast boshqaruv, parametrik sintez, PI-regulyator, parametrik noaniqlik, bug‘ turbinasi.*

Abstract. *An algorithm for parametric synthesis of a robust PI controller for the speed control loop of a reheat steam turbine is proposed. Parametric uncertainty is described by 16 vertex models, and its bounds are estimated from*

August 2026 operating data of a combined-cycle plant steam turbine. The controller is synthesized by minimizing the worst-case ITAE criterion subject to a stability margin on all models. Simulation shows that robust tuning reduces the worst-case ITAE by 36 % and the settling time from 19.1 s to 13.1 s.

Keywords: *robust control, parametric synthesis, PI controller, parametric uncertainty, steam turbine.*

Введение

Паровые турбоагрегаты работают при изменяющихся параметрах свежего пара, уровне нагрузки и состоянии оборудования, поэтому параметры объекта управления известны лишь в некоторых пределах. Для таких условий применяют робастные методы, обеспечивающие устойчивость и заданное качество во всём диапазоне изменения параметров. В работах [1–3] для управления паровыми энергетическими установками использованы подходы на основе H_∞-синтеза и μ-анализа, в работе [4] рассмотрено проектирование регуляторов контура частоты вращения паровой турбины при неопределённых параметрах объекта, в работе [5] получены вершинные результаты для синтеза регуляторов низкого порядка при параметрической неопределённости. При этом ПИ-регулятор остаётся наиболее простой для реализации структурой, поэтому настройка его параметров с гарантированным качеством при неопределённости сохраняет актуальность.

Цель работы — разработать алгоритм параметрического синтеза ПИ-регулятора контура частоты вращения паровой турбины, обеспечивающего робастное качество при параметрической неопределённости объекта. Задачи: построить модель контура с интервальными параметрами; разработать алгоритм минимаксной настройки; сравнить результат с настройкой по номинальной модели.

Основная часть

Исходные данные и модель. Использованы почасовые записи оперативного учёта паровой турбины парогазовой установки за август 2026 г. (672 записи, 176 параметров). За период активная мощность генератора изменялась от 119,8 до 145,9 МВт (среднее 136,1 МВт), давление свежего пара перед ЦВД — от 106,9 до 130,6 бар (изб.) (среднее 123,1 бар), температура свежего пара — от 518,7 до 542,8 °С, частота вращения — от 2997,4 до 3002,9 об/мин. Контур частоты вращения турбины с промежуточным перегревом описывается передаточными функциями

клапана (1), паровых объёмов и промперегрева (2), ротора с нагрузкой (3) и ПИ-регулятора (4):

$$W_v(s) = 1 / (1 + T_g s) \quad (1)$$

$$W_t(s) = K(1 + F_{HP} T_{rh} s) / [(1 + T_{ch} s)(1 + T_{rh} s)] \quad (2)$$

$$W_r(s) = 1 / (2Hs + D) \quad (3)$$

$$C(s) = K_p + K_i / s \quad (4)$$

Здесь K — коэффициент усиления по пару; T_g, T_{ch}, T_{rh} — постоянные времени клапана, паровпускной части и промперегрева; F_{HP} — доля мощности ЦВД; H — постоянная инерции ротора; D — коэффициент самовыравнивания по нагрузке. Отклонение частоты вращения при изменении нагрузки ΔP_L определяется выражением $\Delta\omega(s)/\Delta P_L(s) = -W_r/(1 + W_r W_t W_v C)$.

Параметры номинальной модели приняты по справочным данным для турбоагрегатов с промежуточным перегревом пара: $T_g = 0{,}2$ с, $F_{HP} = 0{,}30$, $H = 4{,}0$ с, $K = D = 1{,}0$. Интервалы изменения параметров: $K \in [0{,}869;\ 1{,}061]$ и $D \in [0{,}880;\ 1{,}072]$ (отношение минимальных и максимальных значений давления пара и мощности к их средним за период наблюдения), $T_{ch} \in [0{,}2;\ 0{,}5]$ с и $T_{rh} \in [6;\ 10]$ с (по справочным данным).

Алгоритм синтеза. 1) Формируется множество из $2^4 = 16$ вершинных моделей и номинальной модели (всего 17). 2) Для текущей пары (K_p, K_i) вычисляются полюса замкнутого контура и переходная характеристика $\Delta\omega$ при ступенчатом изменении нагрузки на 5 %. 3) Проверяется условие $Re\ p \le -\alpha$, $\alpha = 0{,}05$ с$^{-1}$, на всех моделях. 4) Вычисляется критерий $J = max_i \int t|\Delta\omega_i(t)|dt$ (наихудшее значение ITAE). 5) Критерий J минимизируется методом Нелдера — Мида из нескольких начальных точек.

Результаты. Для сравнения тем же методом выполнена настройка по одной номинальной модели (табл. 1, рис. 1). В обоих случаях контур устойчив на всех 17 моделях. Робастная настройка уменьшает наихудшее значение ITAE на 36 % и наибольшее время установления (по уровню 2 % от максимального отклонения) с 19,1 до 13,1 с, но увеличивает наибольшее отклонение частоты вращения с 11,8 до 13,5 об/мин, а на номинальной модели ITAE возрастает с 0,0087 до 0,0138. Выигрыш в наихудшем случае достигается ценой некоторого ухудшения качества в номинальном режиме.

Таблица 1 — Результаты настройки регулятора

Показатель	По номинальной модели	Робастная настройка
K_p / K_i	76,0 / 10,89	56,6 / 7,67
Наихудшее ITAE	0,0512	0,0330

Наибольшее время установления, с	19,1	13,1
Наибольшее отклонение, об/мин	11,8	13,5
ITAE на номинальной модели	0,0087	0,0138

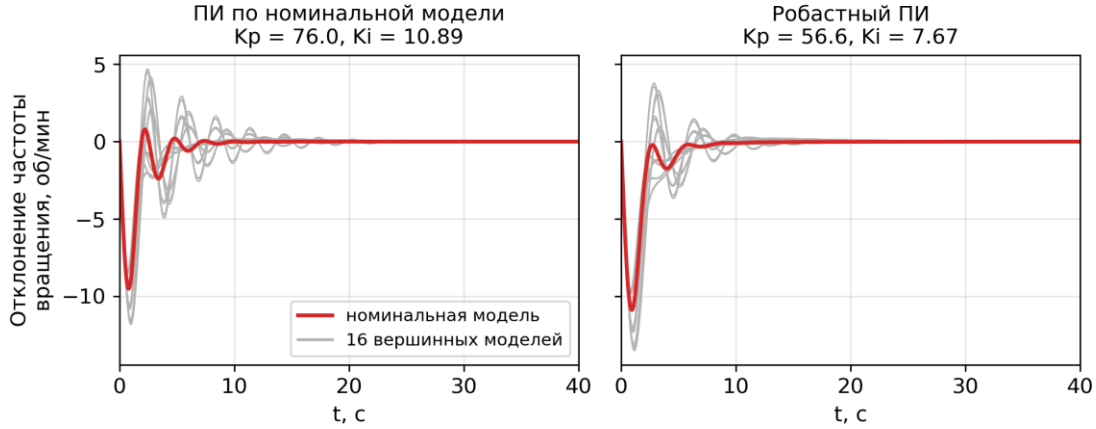


Рисунок 1 — Реакция частоты вращения на ступенчатое изменение нагрузки на 5 % (серые линии — 16 вершинных моделей)

Заключение

Предложен алгоритм параметрического синтеза ПИ-регулятора контура частоты вращения паровой турбины по минимаксному критерию на множестве вершинных моделей. Границы неопределённости коэффициентов K и D оценены по эксплуатационным данным турбины за август 2026 г. По результатам моделирования робастная настройка (K_p = 56,6; K_i = 7,67) снижает наихудшее значение ITAE на 36 % и время установления до 13,1 с при некотором росте максимального отклонения. Дальнейшая работа связана с уточнением параметров модели по данным динамических испытаний турбоагрегата.

Использованная литература

1. Weng C.-K., Ray A. Robust wide-range control of steam-electric power plants // IEEE Transactions on Control Systems Technology. 1997. Vol. 5, № 1. P. 74–88.

2. Design of a H∞ Robust Controller with μ-Analysis for Steam Turbine Power Generation Applications / V. Iannino, V. Colla, M. Innocenti, A. Signorini // Energies. 2017. Vol. 10, № 7. Art. 1026.

3. Le Mauff F., Duc G. Design of a controller for a steam generator of a power plant using robust control and genetic algorithm // Proceedings of the 2002 International Conference on Control Applications. 2002. Vol. 2. P. 1050. DOI: 10.1109/CCA.2002.1038749.

4. Simulation and robust control of power plants / H. Unbehauen, J. Dastych, H. Werthes, M. Bennauer // Control Conference (ECC), 1999 European. Karlsruhe, 1999. P. 1352–1356.

5. Firouzbahrami M. [и др.]. Robust performance in parametric control system design with application to power systems // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2021. Vol. 68, № 3. P. 2400–2407. DOI: 10.1109/TIE.2020.2975467.