

СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМ ОБЪЕКТОМ С ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Хрипунов Ю.А.¹

Научный руководитель: Хожаев И.В.²

¹ТПУ, ИШИТР, 8Т11, e-mail: yah12@tpu.ru

²ТПУ, ИШИТР, к.т.н., доцент ОАР, e-mail: ivh1@tpu.ru

Аннотация

Доклад посвящен синтезу регулятора системы автоматического управления тепловым объектом в виде теплообменного аппарата, подогреваемого горелкой на жидком топливе. В процессе выполнения работы была получена математическая модель исследуемой системы с учетом интервальной неопределенности ее параметров, а также синтезирован модальный регулятор пониженного порядка.

Ключевые слова: тепловой объект, система управления, температура, математическая модель, синтез регулятора, параметрическая неопределенность.

Введение

Системы управления тепловым объектом используются для контроля и регулирования температуры, теплового потока или других параметров, связанных с тепловыми процессами. Использование тепловых объектов в различных отраслях промышленности и энергетики имеет широкое распространение. От эффективности управления этими объектами напрямую зависят такие ключевые показатели, как энергоэффективность, качество продукции, безопасность технологического процесса, экономическая эффективность предприятия [1].

Управление тепловыми объектами в условиях параметрической неопределенности активно исследуется. Традиционные ПИД-регуляторы часто оказываются неэффективными при значительных изменениях параметров объектов, требуя постоянной перенастройки. Существующие методы управления тепловыми объектами в условиях параметрической неопределенности либо недостаточно эффективны, либо сложны в реализации, либо не обладают достаточной универсальностью [2, 3].

Целью данной работы является синтез регулятора системы автоматического управления тепловым объектом, обеспечивающего робастность прямых и корневых показателей качества регулирования в условиях параметрической неопределенности, при этом обладает вычислительной скоростью и простотой настройки. Далее рассмотрим вывод математической модели исследуемой системы с интервальными параметрами и расчет настроек модального робастного регулятора пониженного порядка.

Основная часть

Математическая модель системы

На рис. 1 приведена структурная схема исследуемой системы, состоящей из регулятора; усилительного устройства в виде широтно-импульсного преобразователя; мазутной горелки Riello 40N10 со встроенным топливным насосом и теплообменного аппарата, подогреваемого горелкой.

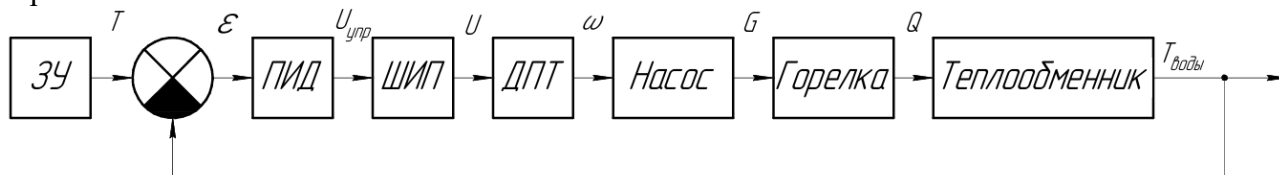


Рис. 1. Структурная схема системы

Принцип работы системы основан на нагреве горячим теплоносителем холодной рабочей жидкости, которую необходимо нагреть до определенной температуры. Теплообменник наполнен маслом-теплоносителем АМТ-300, которое может нагреваться до 300°C [4]. Принцип работы теплообменника заключается в передаче тепловой энергии от одного теплоносителя к другому. На выходе из теплообменника получают нагретую среду. Нагрев масла осуществляется за счет горения мазута. В горелке происходит смешивание топлива, подаваемого насосом с воздухом, эта топливовоздушная смесь поджигается, и теплота сгорания топлива поступает на нагрев стенок теплообменника. Топливо перекачивается с помощью топливного насоса, а насос приводится в движение при помощи двигателя постоянного тока. Широтно-импульсный преобразователь необходим для усиления сигнала и подачи его на питание двигателя.

Дифференциальное уравнение, описывающее работу ШИП [5]:

$$(T_{\text{шип}} \cdot s + 1) \cdot U(t) = k_{\text{шип}} \cdot U_{\text{уп}}(t), \quad (1)$$

где $T_{\text{шип}} = 0.0005\text{с}$ – постоянная времени ШИП, $k_{\text{шип}} = 9.554$ – коэффициент усиления.

Передаточная функция двигателя постоянного тока [6]:

$$W_{\text{дпт}}(s) = \frac{1}{(J_{\text{дв}} \cdot L_{\text{дв}} / c) \cdot s^2 + (J_{\text{дв}} \cdot R_{\text{дв}} / c) \cdot s + c} = \frac{1}{2.762 \cdot 10^{-4} \cdot s^2 + 0.027 \cdot s + 0.3041}, \quad (2)$$

где $L_{\text{дв}}$ – индуктивность двигателя, $J_{\text{дв}}$ – момент инерции, c – коэффициент ЭДС, $R_{\text{дв}}$ – сопротивление двигателя.

Топливный насос опишем передаточным коэффициентом равным отношению частоты вращения вала электродвигателя насоса $\omega = 314.16\text{рад/с}$ и расхода топлива $G = 0.0025\text{кг/с}$ [7]:

$$k_{\text{н}} = \Delta G / \Delta \omega = 0.00000795. \quad (3)$$

Мазутную горелку опишем передаточным коэффициентом, который определяется как отношение количества теплоты, выделяемое горелкой в секунду $Q_{\text{г}} = 102\,000\text{Вт}$, к массовому расходу топлива $G = 0.0025\text{кг/с}$:

$$k_{\text{г}} = \Delta Q_{\text{г}} / \Delta G = 40800000. \quad (4)$$

Для математической модели теплообменного агрегата необходимо воспользоваться формулами количества теплоты и законом Фурье для теплопроводности. В теплообменнике происходят процессы: нагрев стенок теплообменника от горелки, нагрев масла-теплоносителя от стенок теплообменника, нагрев холодной рабочей жидкости от количества теплоты, отдаваемое маслом [8].

Зависимость температуры стенок теплообменника от подаваемой на нее теплоты имеет вид:

$$\frac{\Delta T_{\text{т}}}{\Delta Q_{\text{г}}} = \frac{1}{C_{\text{т}} \cdot \rho_{\text{т}} \cdot S_{\text{т}} \cdot \delta_{\text{т}}} = 0.000156, \quad (5)$$

где $T_{\text{т}}$ – температура стенки теплообменника, $C_{\text{т}} = 400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ – удельная теплоёмкость меди,

$\rho_{\text{т}} = 8900\text{кг/м}^3$ – плотность меди, $S_{\text{т}} = 0.09\text{м}^2$ – площадь нагреваемой поверхности, $\delta_{\text{т}} = 0.02\text{м}$ – толщина стенки.

Зависимость температуры масла от температуры стенок теплоносителя:

$$\frac{\Delta T_{\text{м}}}{\Delta T_{\text{т}}} = \frac{\lambda_{\text{т}} \cdot S_{\text{т}}}{C_{\text{м}} \cdot m_{\text{м}} \cdot \delta_{\text{т}} + \lambda_{\text{т}} \cdot S_{\text{т}}} = 0.125, \quad (6)$$

где $\lambda_{\text{т}} = 400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ – теплопроводность меди, $S_{\text{т}} = 0.09\text{м}^2$ – площадь поверхности теплообменника, $T_{\text{м}}$ – температура масла-теплоносителя, $T_{\text{т}}$ – температура стенок

теплообменника, $m_M = 7.86 \text{ кг}$ – масса масла, $C_M = 1600 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ – удельная теплоемкость масла, $\delta_T = 0.02 \text{ м}$ – толщина стенок теплообменника.

Связь температуры воды от температуры масла-теплоносителя [9]:

$$\frac{\Delta T_B}{\Delta T_M} = \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l}{\ln(r_H / r_{BH})}}{C_B \cdot m_B + \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l}{\ln(r_H / r_{BH})}} = 0.95, \quad (7)$$

где $\lambda = 400 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ – теплопроводность медного трубопровода, $l = 2.5 \text{ м}$ – длина трубопровода, проходящего через теплообменник, $r_H = 0.011 \text{ м}$ – наружный радиус трубопровода, $r_{BH} = 0.01 \text{ м}$ – внутренний радиус трубопровода, $C_B = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ – удельная теплоёмкость воды, $m_B = 0.8 \text{ кг}$ – масса воды, проходящей, через теплообменник.

Оценка интервальных параметров в системе

Интервальные параметры характеризуют диапазоны значений, в которых могут изменяться рабочие характеристики системы в зависимости от условий окружения или изменения режима работы.

Удельная теплоемкость масла-теплоносителя увеличивается при повышении температуры по причине того, что при повышении температуры молекулы масла начинают двигаться быстрее. Это увеличивает количество способов, которыми энергия может быть распределена между молекулами, что приводит к увеличению теплоемкости [4].

Таблица 1. Зависимость удельной теплоемкости масла от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	20	40	60	80	100	120	140
$C_M, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	1600	1680	1730	1810	1870	1940	2010

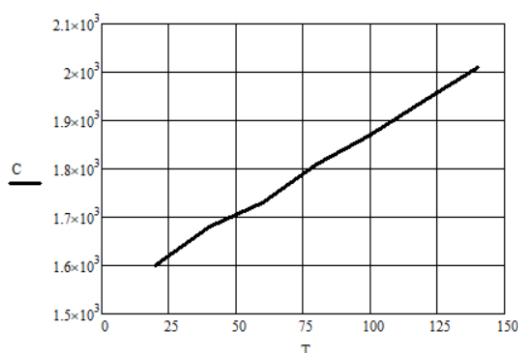


Рис. 2. График зависимости теплоемкости масла от температуры

Удельная теплоемкость масла-теплоносителя находится в интервале:

$$Z = [1600; 2010] \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Конструкция горелки устроена таким образом, что при расходе топлива менее, чем $0.83 \cdot 10^{-3} \text{ кг/с}$ горелка не будет приведена в действие и не будет вырабатывать никакую мощность. Затем при увеличении расхода будет и увеличиваться мощность. Нелинейная зависимость мощности, отдаваемой горелкой, от расхода топлива показана на рис. 3 [7].

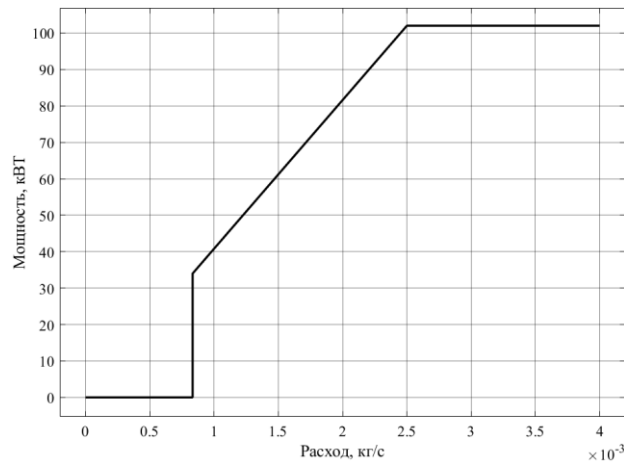


Рис. 3. График зависимости мощности горелки от расхода топлива

Чтобы линейаризовать модель системы, опишем передаточный коэффициент горелки интервальным параметром. Пределы интервала оценим по приведенной статической характеристике: $K = [102000 / 4 \cdot 10^{-3}; 102000 / 2.5 \cdot 10^{-3}]$.

Таким образом в разработанной системе будут присутствовать два интервальных параметра, которые будут влиять на работу системы.

Выбор структуры и расчет параметров регулятора

На первом этапе необходимо определить структуру регулятора, которая сможет эффективно управлять системой. Методика синтеза позволяет расположить доминирующий полюс в указанном отрезке, а все остальные полюса расположить левее этой границы для того, чтобы они оказывали меньшее влияние на систему. Синтезируемый регулятор должен иметь 3 параметра. Два параметра будут отвечать за границы отрезка расположения доминирующего полюса. Третий параметр необходим для того, чтобы построить по нему D-разбиение и убрать свободные полюса как можно дальше от мнимой оси.

В качестве регулятора с тремя параметрами был выбран ПИД-регулятор, у которого интегральная составляющая отвечает за отсутствие статической ошибки, а дифференциальная составляющая отвечает за время переходного процесса и ускоряет систему.

На втором этапе необходима настройка и оптимизация параметров выбранной структуры регулятора. Система состоит из ПИД-регулятора и неизменяемой части, охваченной единичной отрицательной обратной связью. Передаточная функция регулятора имеет вид:

$$W_{\text{PID}}(s, P, I, D) = P + I / s + D \cdot s \quad (8)$$

где P, I, D – настройки пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора.

Передаточная функция исследуемой системы с регулятором и единичной обратной связью имеет вид:

$$W_C(s, P, I, D, Z, K) = \frac{D \cdot s^2 + P \cdot s + I}{s^4 \left(\frac{0.053578 \cdot Z}{K} + \frac{12.27}{K} \right) + s^3 \left(\frac{112.4 \cdot Z}{K} + \frac{25740}{K} \right) + s^2 \left(D + \frac{10540 \cdot Z}{K} + \frac{2.4137 \cdot 10^6}{K} \right) + s \left(P + \frac{117967 \cdot Z}{K} + \frac{2.7016 \cdot 10^7}{K} \right) + I}, \quad (9)$$

где $Z = [1600; 2010]$ и $K = [102000 / 4 \cdot 10^{-3}; 102000 / 2.5 \cdot 10^{-3}]$ – первичные интервальные параметры системы.

Для удобства в дальнейших расчетах приведем характеристический полином исследуемой системы к следующему виду:

$$D(s, P, I, D, A, B) = s^4 \cdot (0.053578 \cdot A + 12.27 \cdot B) + s^3 (112.4 \cdot A + 25740 \cdot B) + s^2 (D + 10540 \cdot A + 2.4137 \cdot 10^6 \cdot B) + s (P + 117967 \cdot A + 2.7016 \cdot 10^7 \cdot B) + I, \quad (10)$$

где $A = \frac{Z}{K}$ и $B = \frac{1}{K}$ – пересчитанные интервальные параметры, равные $A = [3.922 \cdot 10^{-5}; 7.882 \cdot 10^{-5}]$, $B = [2.45098 \cdot 10^{-8}; 3.92157 \cdot 10^{-8}]$.

Необходимо обеспечить в данной системе аperiодический переходный процесс длительность не более 20 секунд. Такой длительности переходного процесса соответствует минимальная степень устойчивости, равная $\eta = 0.2$. Необходимо разместить доминирующий полюс в интервале $\lambda = [-0.3; -0.2]$. Свободные полюса системы при этом разместим левее прямой $\text{Re}(x) = -2.4$.

Найдем значение остатка для левой и правой границ интервала доминирующего полюса:

$$D_1(s, a0, a1, a2, a3, a4) = a4 \cdot s^4 + a3 \cdot s^3 + a2 \cdot s^2 + a1 \cdot s + a0; \quad (11)$$

$$R_1(P, I, D) = D_1(\underline{\lambda}, a0(I), \underline{a1(P)}, \overline{a2(D)}, \underline{a3}, \overline{a4}) = 0.09 \cdot D + I - 0.3 \cdot P - 1.5035; \quad (12)$$

$$R_2(P, I, D) = D_1(\overline{\lambda}, a0(I), \overline{a1(P)}, \underline{a2(D)}, \overline{a3}, \underline{a4}) = 0.04 \cdot D + I - 0.2 \cdot P - 2.0527. \quad (13)$$

Приравняв к нулю полученные выражения и решив систему из двух уравнений, получим зависимости двух настроек регулятора от третьей: $I(P) = 0.12 \cdot P + 2.4921$; $D(P) = 2 \cdot P - 10.984$.

Подставим найденные зависимости в характеристический полином для нахождения свободного полинома:

$$B(s, b0, b1, b2, b3) = [b0(P)] + [b1(P)] \cdot s + [b2] \cdot s^2 + [b3] \cdot s^3 \quad (14)$$

$$[b3] = [2.402 \cdot 10^{-6}; 4.704 \cdot 10^{-6}]; \quad (15)$$

$$[b2] = [0.0050378; 0.0098683]; \quad (16)$$

$$[b1(P)] = [2 \cdot P - 10.514; 2 \cdot P - 10.06]; \quad (17)$$

$$[b0(P)] = [0.4 \cdot P + 8.30682; 0.6 \cdot P + 12.46041]. \quad (18)$$

Построим кривые D-разбиения во всех вершинах параметрического многогранника. Характеристический полином исследуемой системы имеет четвертый порядок, из этого следует, что система будет иметь 4 полюса, один из которых является доминирующим. Следовательно, свободный полином будет иметь уравнение третьего порядка. Полином третьего порядка имеет 4 интервальных коэффициента: $b0, b1, b2, b3$, у каждого коэффициента есть минимальная и максимальная границы. Соответственно всевозможных комбинаций может быть: $2^4 = 16$.

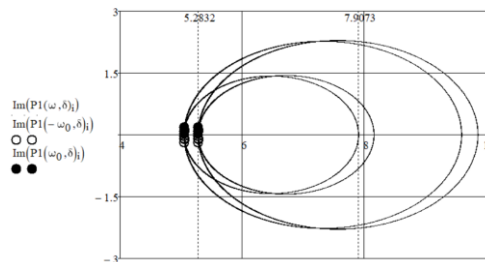


Рис. 4. D-разбиение для свободного полинома по P для обеспечения заданной степени доминирования

Следовательно система будет обеспечивать заданные параметры при значении пропорционального коэффициента $P = [5.2832; 7.9073]$. Также воспользуемся зависимостями коэффициентов регулятора I и D от пропорционального коэффициента и найдем их значение при $P = 5.5$:

$$I(P) = 3.152;$$

$$D(P) = 0.016.$$

Для оценки полученного расположения полюсов системы с синтезированным регулятором на рис. 5 построен ее интервальный корневой годограф. Из рис. 5 показано, что доминирующий полюс расположился в заданном интервале $\lambda = [-0.3; -0.2]$, свободные полюса при этом расположены так, что обеспечивают заданную степень доминирования.

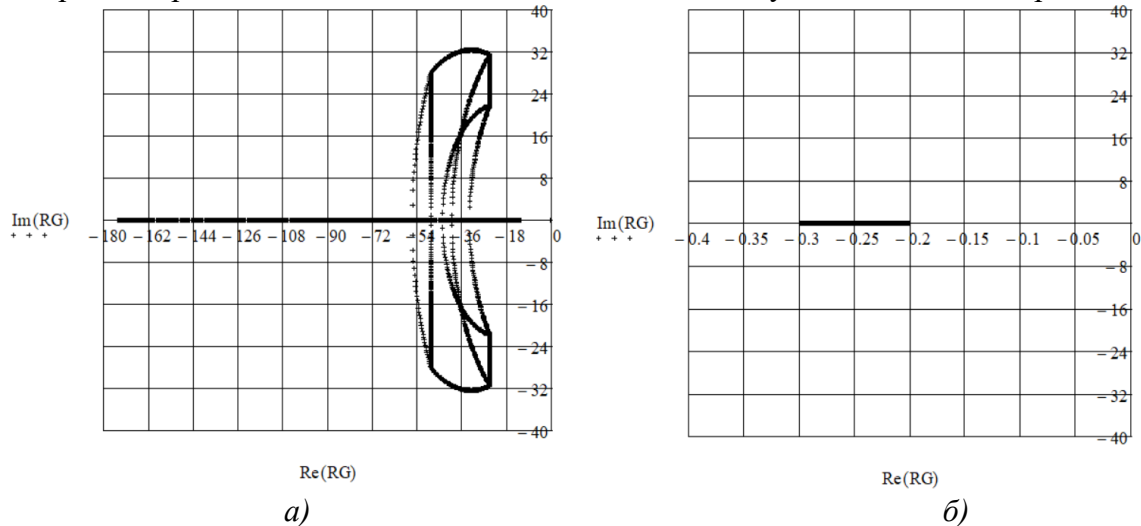


Рис. 5. Расположение корней системы:

а) расположение свободных полюсов, б) расположение доминирующего полюса

Из рис. 5 видно, что расположение полюсов соответствует заданным условиям. В итоге степень робастной устойчивости равна 0.2, а степень робастной колебательности равна $31.453 / 24.652 = 1.276$.

Оценим качество переходных процессов в полученной системе. Для этого построим переходные характеристики системы во всех вершинах ее параметрического многогранника.

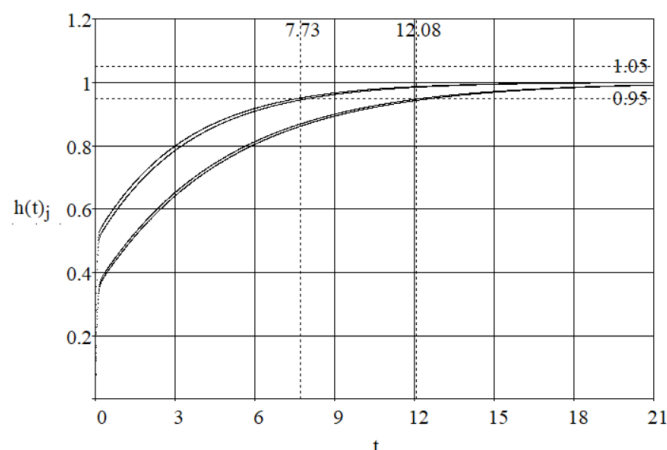


Рис. 6. Переходные характеристики с синтезированным ПИД-регулятором

Из рис. 6 видно, что переходный процесс аperiodический, время переходных процессов составляет 7.73 и 12.08 секунд, перерегулирование отсутствует. Следовательно, синтез ПИД-регулятора прошел успешно и соответствует всем заданным требованиям.

Заключение

Синтезированная система для теплового объекта с интервальными параметрами имеет следующие показатели качества: монотонный и апериодический переходный процесс без перерегулирования при степени устойчивости равной 0.2, время переходного процесса в интервале от 7.73 до 12.08 секунд. Данная система обладает свойством робастности относительно неопределенных параметров.

Список использованной литературы

1. Голдобин Ю.М., Павлюк Е.Ю. Автоматизация теплоэнергетических установок : Учебное пособие. – Екатеринбург : УрФУ, 2017.
2. Дилигенская А.Н., Самокин А.В. Параметрическая идентификация в обратных задачах теплопроводности в условиях интервальной неопределенности на основе нейронных сетей. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2020.
3. Рапопорт Э.Я., Левин И.С. Структурно-параметрический синтез оптимальных по быстродействию систем управления с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта. – Самара : Самарский государственный технический университет, 2015.
4. Бакластов А.М., Бродянский В.М., Голубев Б.П. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника : Справочник. – Москва, 1983.
5. Глазырин А.С. Математическое моделирование электромеханических систем : Учебное пособие. – Томск : Томский политехнический университет, 2011.
6. Удут Л.С., Кояин Н.В., Мальцева О.П. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов : Учебное пособие. – Томск : Томский политехнический университет, 2007.
7. Инструкции по монтажу, эксплуатации и техническому обслуживанию горелки на мазуте Riello 40 N10.
8. Липин А.Г. Тепловые процессы : Учебное пособие / А.Г. Липин, А.А. Липин, Ю.Е. Романенко, А.В. Шибашов. – Иваново : Ивановский гос. хим.-технол. ун-т, 2018. – 79 с.
9. Бухмиров В.В. Тепломассообмен : Учебное пособие. – Иваново : Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина, 2014.
10. Хожаев И.В. Синтез адаптивного и робастного регуляторов для модального двухрежимного управления движением необитаемого подводного аппарата: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 2.3.1: дис. – 2023.
11. Хожаев И.В. Размещение вещественного интервального доминирующего полюса САУ с интервальными параметрами методом деления полиномов // Молодежь и современные информационные технологии: сборник трудов XIII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, г. Томск, 9-13 ноября 2015 г. Т. 1.– Томск: Изд-во ТПУ, 2016. – Т. 1. – С. 229-230.