ИССЛЕДОВАНИЕ РОБАСТНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРЯМОТОЧНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ, ПОСТРОЕННЫХ В КЛАССЕ КАТАСТРОФЫ ГИПЕРБОЛИЧЕСКАЯ ОМБИЛИКА

Даулетбаев Азиз Бахадир Ули

Нукусский государственный технический университет

E-mail: btv1979@mail.ru

Аннотация: Данное исследование посвящено анализу робастной устойчивости системы управления прямоточными парогенераторами, реализованной в рамках трёхпараметрических структурно-устойчивых отображений. В качестве закона управления применяется модель, основанная на катастрофе типа «гиперболическая омбилика». Оценка устойчивости выполняется посредством линейной аппроксимации динамики системы и использования алгебраического критерия Гурвица. Показано, что внедрение закона управления, описываемого катастрофой «гиперболическая омбилика», обеспечивает устойчивость системы прямоточного парогенератора к внешним воздействиям и помехам даже при неопределённых параметрах управляемого объекта и фиксированных параметрах регулятора. Достоверность полученных выводов подтверждена численным моделированием, выполненным в программной среде Matlab.

Ключевые слова: устойчивость системы, робастность, катастрофа, стационарное состояние, критерий Гурвица, прямоточной парогенератор

Annotatsiya: Ushbu tadqiqot to‘g‘ri oqimli bug‘generatsiya qurilmalarini boshqarish tizimining uch parametrli struktural jihatdan barqaror akslantirishlar asosida amalga oshirilgan robast barqarorligini tahlil qilishga bag‘ishlangan. Boshqaruv qonuni sifatida “giperbolik umbilik” tipidagi modeliga asoslangan algoritm qo‘llaniladi. Barqarorlikni baholash tizim dinamikasining chiziqli approksimatsiyasi va Gurvits algebraik mezoni yordamida amalga oshiriladi. Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatadiki, “giperbolik umbilik” bilan ifodalangan boshqaruv qonunini qo‘llash, boshqarilayotgan obyekt parametrlarining noaniqligiga va rostlagich parametrlarining o‘zgarmasligiga qaramay, to‘g‘ri oqimli bug‘generatorning tashqi ta’sirlar va shovqinlarga nisbatan barqarorligini ta’minlaydi. Olingan xulosalarning ishonchliligi Matlab muhitida bajarilgan sonli modellashtirish orqali tasdiqlangan.

Kalit so‘zlar: tizim barqarorligi, robastlik, katastrofa, stasionar holat, Gurvits mezoni, to‘g‘ri oqimli bug‘generator.

Annotation: This study is devoted to the analysis of the robust stability of a control system for once-through steam generators, implemented within the framework of

ISSN 3030-3907

three-parameter structurally stable mappings. As the control law, a model based on the “hyperbolic umbilic” catastrophe is employed. The stability assessment is performed using a linear approximation of the system dynamics and the Hurwitz algebraic criterion. It is shown that the application of the control law described by the “hyperbolic umbilic” catastrophe ensures the stability of a once-through steam generator under external disturbances and noise, even when the parameters of the controlled object are uncertain and the regulator parameters remain fixed. The reliability of the obtained results is confirmed by numerical simulations carried out in the Matlab environment.

Keywords: system stability, robustness, catastrophe, steady state, Hurwitz criterion, once-through steam generator.

Введение

В настоящий время проектирования надежных систем управления является ключевой задачей при создании современных автоматических комплексов. Практически любые реальные системы функционируют в условиях неопределённости, обусловленной неполной или неточной информацией о математической модели объекта, воздействием случайных внешних возмущений и др. В связи с этим возрастает необходимость разработки таких систем управления, которые сохраняют устойчивость и обеспечивают требуемые показатели качества даже при изменении параметров объекта и наличии неконтролируемых помех. Для синтеза таких систем управления предложено значительное число методов [1–3], однако проблема обеспечения робастной устойчивости по-прежнему остаётся одной из наиболее актуальных задач управления. Существенный вклад в развитие подобных методов внесли исследования зарубежных ученых, в которых анализировались динамические свойства систем управления, построенных на основе структурно-устойчивых отображений различной размерности.

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Данное исследование направлено на разработку системы управления для прямоточных парогенераторов, где закон управления формулируется на основе катастрофы «гиперболическая омбилика» [4], что позволяет обеспечить устойчивое функционирование объекта в условиях неопределённости. Прямоточный парогенератор напоминает змеевик, в котором питательная вода под давлением, создаваемым насосом, последовательно проходит поверхности нагрева, где постепенно нагревается, закипает, превращается в пар и далее перегревается до требуемых параметров, покидая тракт уже в виде перегретого пара. Для прямоточных парогенераторов докритического давления условно выделяют три характерные зоны водопарового тракта. Экономайзерную, где

ISSN 3030-3907

осуществляется предварительный подогрев воды, парообразующую, в которой происходит фазовый переход и пароперегревательную, обеспечивающую получение перегретого пара. Особенностью прямоточных парогенераторов является высокая чувствительность параметров пара к изменению расхода питательной воды. Снижение расхода воды при неизменном теплоподводе приводит к уменьшению паропроизводительности. При этом экономайзерная и парообразующая зоны сужаются, а зона пароперегрева, напротив, увеличивается. Поскольку для нагрева меньшего количества воды требуется меньшее количество тепла, растёт доля тепловой энергии, направляемой на перегрев пара. В результате повышается температура пара в тракте. Существенное влияние на температурный режим оказывают также возмущения по расходу топлива. Они могут возникать из-за неустойчивой работы пылепитателей, изменения характеристик топлива или числа действующих горелок. Увеличение подачи топлива приводит к росту тепловыделения в топке и, как следствие, повышению температуры перегретого пара. Таким образом, вариации расходов воды и топлива оказывают значительное воздействие на параметры пара по тракту. Для стабилизации температурного режима необходимо поддерживать определённое соотношение между расходом питательной воды и количеством тепла, выделяемого в топке. Исходя из динамических свойств объекта управления и взаимосвязи его параметров, в качестве основных регулируемых величин системы автоматического управления принимаются давление перегретого пара и тепловая нагрузка.

ОБСУЖДЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Предполагается, что параметры прямоточного парогенератора являются априорно неопределёнными, но принадлежат заданной области допустимых значений. Подобная ситуация характерна для систем автоматического регулирования давления пара и тепловой нагрузки на различных режимах, когда расходы воды, пара и топлива изменяются значительно медленнее, чем давление перегретого пара.

Для описания динамики скорость изменение давление перегретого пара парогенераторов используем следующие линеаризованные уравнения [9]:

$$\begin{cases} \dot{\alpha}(t) = \omega_z(t) + a_y^{\alpha}\alpha(t) + a_y^{\delta_s}\delta_s(t) \\ \dot{\omega}_z(t) = -a_{m_z}^{\alpha}\alpha(t) - a_{m_z}^{\omega_z}\omega_z(t) - a_{m_z}^{\delta_s}\delta_s(t) \\ \dot{\vartheta}(t) = \omega_z(t) \end{cases} \quad (1)$$

Где $\dot{v}(t)$, $\omega(t)$- расход и скорость давление перегретого пара, $\alpha(t)$-

ISSN 3030-3907

расход питания, $\delta_e(t)-$ изменения расхода топлива; $a_y^{\alpha}, a_y^{\delta_\varepsilon}, a_{m_z}^{\alpha}, a_{m_z}^{\omega_z}, a_{m_z}^{\delta_\varepsilon}$ - параметры прямоточного парогенератора.

Их значения зависят от указанных выше факторов и могут изменяться в широких пределах в зависимости от расхода питательной воды и пара. Точные значения параметров априорно не определены. Предполагаем также, что динамикой исполнительного органа можно пренебречь и считать, что управлением является изменения расхода топлива $\delta_e(t)$.В данном случае предполагается, что используется очень быстрый и практически безынерционный изменения расхода топлива.

Положим,

$$x_1 = \vartheta(t)\,, x_2 = \omega_z(t)\,,\ x_3 = \alpha(t)$$

$$a_1 = a_{m_z}^{\alpha}\,,\ a_2 = a_{m_z}^{\omega_z}\,,\ a_3 = a_{m_z}^{\delta_в}\,,\ a_4 = a_y^{\alpha}\,,\ a_5 = a_y^{\delta_\text{В}}$$

$$u = \delta_\text{В}(t)\,.$$

Тогда уравнения динамики скорости изменение давление перегретого пара парогенераторов примут вид:

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2(t) \\ \dfrac{dx_2}{dt} = -a_1 x_3(t) - a_2 x_2(t) - a_3 u \\ \dfrac{dx_3}{dt} = x_2(t) + a_4 x_3(t) + a_5 u \end{cases} \qquad (2)$$

Задача состоит в выборе такого управления $u(t)$, при котором выполняется равенство:

$$\lim_{t\to\infty}(|x_1(t)|+|x_2(t)|+|x_3(t)|) = 0 \qquad (3)$$

для любых начальных значений переменных $x(t)$ В качестве закона управления выберем:

$$u = -x_1^3 - x_2^3 - k_1 x_1 x_2 + k_2 x_2 + k_3 x_1 \qquad (4)$$

Выбранная управляющая функция содержит две активные переменные x_1 и x_2. Несмотря на то, что вектор состояний содержит три компоненты, из которых в законе управления могут быть учтены только две, выбор закона управления в данном виде достаточно целесообразен, так как управление учитывается только в двух переменных, и на третью компоненту вектор управления никакого влияния не оказывает.

Таким образом, система (2) с законом управления (4) примет вид:

ISSN 3030-3907

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \dfrac{dx_2}{dt} = -a_1 x_3(t) - a_2 x_2(t) - a_3(-x_1^3 - x_2^3 - k_1 x_1 x_2 + k_2 x_2 + k_3 x_1) \\ \dfrac{dx_3}{dt} = x_2(t) + a_4 x_3(t) + a_5(-x_1^3 - x_2^3 - k_1 x_1 x_2 + k_2 x_2 + k_3 x_1) \end{cases} \quad (5)$$

Структурная схема, реализованная с помощью программного комплекса Matlab R2022a, представлена на рисунке 1.

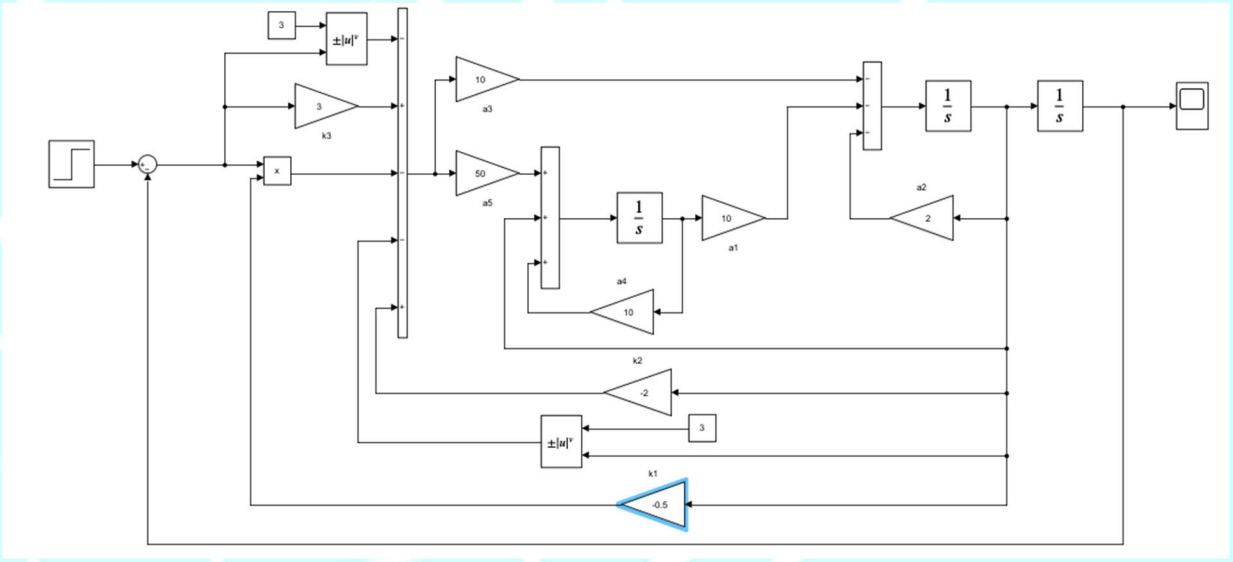


Рисунок 1

Из уравнений (5) определяем установившиеся состояния

$$x_{2S} = 0$$

$$a_3 x_{1S}^3 + a_3 x_{2S}^3 + a_3 k_1 x_{1S} x_{2S} - a_3 k_3 x_{1S} - (a_3 k_2 + a_2) x_{2S} - a_1 x_{3S} = 0 \quad (6)$$

$$-a_5 x_{1S}^3 - a_5 x_{2S}^3 - a_5 k_1 x_{1S} x_{2S} + a_5 k_3 x_{1S} + (a_5 k_2 + 1) x_{2S} + a_4 x_{3S} = 0$$

Система (6) имеет следующие стационарные состояния

$$x_{1S}^1 = 0\,,\ \chi_{2S}^1 = 0\,,\ x_{3S}^1 = 0 \quad (7)$$

$$x_{1S}^2 = \sqrt{k_3}\,,\ x_{2S}^2 = 0\,,\ x_{3S}^2 = 0 \quad (8)$$

$$x_{1S}^3 = -\sqrt{k_3}\,,\ \chi_{2S}^3 = 0\,,\ x_{3S}^3 = 0 \quad (9)$$

Исследование устойчивости стационарных состояний проводим на основе линейной аппроксимации. Для этого нелинейные члены в системе уравнений (5) разложим вокруг стационарных состояний (7)-(9) и, ограничиваясь членами первого приближения, получим

ISSN 3030-3907

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -a_1x_3 - a_2x_2 - a_3[(-3x_{1S}^2 - k_1x_{2S} + k_3)x_1 + (-3x_{2S}^2 - k_1x_{1S} + k_2)x_2] \quad (10)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = x_2 + a_4x_3 + a_5[(-3x_{1S}^2 - k_1x_{2S} + k_3)x_1 + (-3x_{2S}^2 - k_1x_{1S} + k_2)x_2]$$

Исследуем устойчивость стационарного состояния (7) с помощью алгебраического критерия Гурвица [10,11]. Для этого случая система (10) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \frac{dx_1}{dt} = -a_3k_3x_1 + (k_2 - a_2)x_2 - a_1x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = a_5k_3x_1 + (k_2 - 1)x_2 + a_4x_3 \end{cases} \quad (11)$$

Находим характеристическое уравнение системы (11).

$$det(A - \lambda I) = \begin{pmatrix} -\lambda & 1 & 0 \\ -a_3k_3 & k_2 - a_2 - \lambda & -a_1 \\ a_5k_3 & k_2 - 1 & a_4 - \lambda \end{pmatrix} =$$

$$= -\lambda^3 + (k_2 - a_2 + a_4)\lambda^2 - (k_2a_4 - a_2a_4 + a_1k_2 - a_1 - a_3k_3)\lambda + k_3(a_3a_4 - a_1a_5 = 0$$

Соответствующая характеристическому уравнению матрица Гурвица имеет вид

$$\Delta = \begin{pmatrix} k_2 - a_2 + a_4 & k_3(a_3a_4 - a_1a_5) & 0 \\ 1 & -k_2(a_4 + a_1) + a_3k_3 + a_2a_4 + a_1 & 0 \\ 0 & k_2 - a_2 + a_4 & k_3(a_3a_4 - a_1a_5) \end{pmatrix} \quad (12)$$

Таким образом, можно сказать система (5) будет устойчиво если выполняется следующая условия:

$$\begin{cases} \Delta_1 > 0 \\ \Delta_2 > 0 \\ \Delta_3 > 0 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} \Delta_1 = k_2 - a_2 + a_4 > 0 \\ \Delta_2 = [(-k_2(a_4 + a_1) + a_3k_3 + a_2a_4 + a_1)\Delta_1 - k_3(a_3a_4 - a_1a_5)] > 0 \\ \Delta_3 = k_3(a_3a_4 - a_1a_5)\Delta_2 > 0 \end{cases} \quad (13)$$

Ясно, что при положительных a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 для выполнения системы неравенств достаточно, чтобы выполнялись условия

ISSN 3030-3907

$$\begin{cases} a_2 - a_4 < k_2 < \infty \\ -\infty < k_3 < \infty \end{cases} \quad (14)$$

При стационарном состоянии (8) система (10) примет вид

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \dfrac{dx_2}{dt} = 2a_3k_3x_1 - [a_2 + a_3(k_2 - k_1\sqrt{k_3})]x_2 - a_1x_3 \\ \dfrac{dx_3}{dt} = -2a_5k_3x_1 + [1 + a_5(k_2 - k_1\sqrt{k_3})]x_2 + a_4x_3 \end{cases} \quad (15)$$

Характеристическое уравнение системы (15) выглядит следующим образом:

$$det(A - \lambda I) = \begin{pmatrix} -\lambda & 1 & 0 \\ 2a_3k_3 & -[a_2 + a_3(k_2 - k_1\sqrt{k_3}) + \lambda] & -a_1 \\ -2a_5k_3 & 1 + a_5(k_2 - k_1\sqrt{k_3}) & a_4 - \lambda \end{pmatrix} =$$

$$= -\lambda^3 + \left(a_4 - a_2 - a_3(k_2 - k_1\sqrt{k_3})\right)\lambda^2 +$$

$$\Big[(a_2a_4 + 2a_3k_3 - a_1 + (k_2 - k_1\sqrt{k_3})$$

$$(a_3a_4 - a_1a_5)\ \Big]\lambda + 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4) = 0$$

Составив соответствующую характеристическому уравнению матрицу Гурвица,определим условия устойчивости стационарного состояния (8).

$$\begin{cases} \Delta_1 = a_4 - a_2 - a_3(k_2 - k_1\sqrt{k_3}) > 0 \\ \Delta_2 = \Delta_1[2a_3k_3 + a_2a_4 - a_1 + (a_3a_4 - a_1a_5)(k_2 - k_1\sqrt{k_3})] + 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4) > 0 \\ \Delta_3 = 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4)\Delta_2 > 0 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} k_2 - k_1\sqrt{k_3} < 0 \\ k_3 > 0 \end{cases} \quad (16)$$

Исследуем устойчивость стационарного состояния (9). В этом случае система (10)примет вид

ISSN 3030-3907

$$\begin{cases} \dfrac{dx_1}{dt} = x_2 \\ \dfrac{dx_2}{dt} = 2a_3k_3x_1 - [a_2 + a_3(k_2 + k_1\sqrt{k_3})]x_2 - a_1x_3 \\ \dfrac{dx_3}{dt} = -2a_5k_3x_1 + [1 + a_5(k_2 + k_1\sqrt{k_3})]x_2 + a_4x_3 \end{cases} \quad (17)$$

Характеристическое уравнение системы (17) выглядит следующим образом:

$$det(A - \lambda I) = \begin{pmatrix} -\lambda & 1 & 0 \\ 2a_3k_3 & -\left(a_2 + a_3\left(k_2 + k_1\sqrt{k_3}\right) + \lambda\right) & -a_1 \\ -2a_5k_3 & a_5\left(k_2 + k_1\sqrt{k_3}\right) + 1 & a_4 - \lambda \end{pmatrix} =$$

$$= -\lambda^3 + \left(a_4 - a_2 - a_3\left(k_2 + k_1\sqrt{k_3}\right)\right)\lambda^2 +$$

$$\left[(2a_3k_3 + a_2a_4 - a_1 + \left(k_2 + k_1\sqrt{k_3}\right)\right.$$

$$\left.(a_3a_4 - a_1a_5)\lambda \right] + 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4) = 0$$

Соответствующая характеристическому уравнению матрица Гурвица имеет вид

$$\Delta = \begin{pmatrix} a_4 - a_2 - a_3(k_2 + k_1\sqrt{k_3}) & 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4) & 0 \\ -1 & 2a_3k_3 + a_2a_4 - a_1 + (k_2 + k_1\sqrt{k_3})(a_3a_4 - a_1a_5) & 0 \\ 0 & a_4 - a_2 - a_3(k_2 + k_1\sqrt{k_3}) & 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4) \end{pmatrix}$$

Стационарное состояние (9) будет устойчиво при выполнении условий

$$\begin{cases} \Delta_1 = a_4 - a_2 - a_3(k_2 + k_1\sqrt{k_3}) > 0 \\ \Delta_2 = \Delta_1[2a_3k_3 - a_1 + a_2a_4 + (k_1\sqrt{k_3} + k_2)(a_3a_4 - a_1a_5)] + 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4) > 0 \\ \Delta_3 = 2k_3(a_1a_5 - a_3a_4)\Delta_2 > 0 \end{cases}$$

или

$$\begin{cases} k_2 + k_1\sqrt{k_3} < 0 \\ k_3 > 0 \end{cases}$$

Из полученных условий (14), (16) и (17) следует, что при фиксированных положительных значениях a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 система (5) является устойчивой при любых значениях, как положительных, так и отрицательных, параметров k_1, k_2, k_3. Система, неустойчивая в одном стационарном состоянии (7)-(9), становится устойчивой в другом, и наоборот, что подтверждается результатами численного эксперимента,

ISSN 3030-3907

проведенного с помощью программного комплекса Matlab R2022a. (рисунки 2-5).

На рисунках 2-3 приведены результаты численного эксперимента, проведенного с помощью Matlab R2022a. по схеме из рисунка 1 при значении параметров $k_2 = -2, k_3 = 3, a_1 = 10, a_2 = 2, a_3 = 10, a_4 = 5, a_5 = 50$ (фиксируем), меняем $k_1 = 0.5$ и $k_1 = -0.5$.

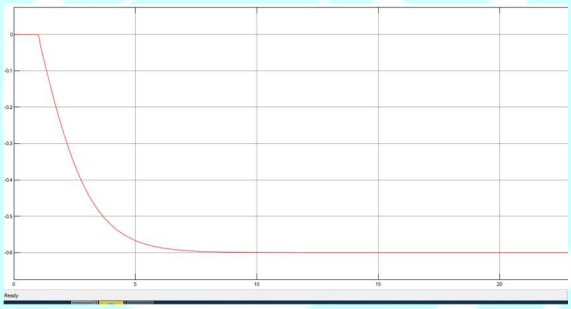


Рисунок 2

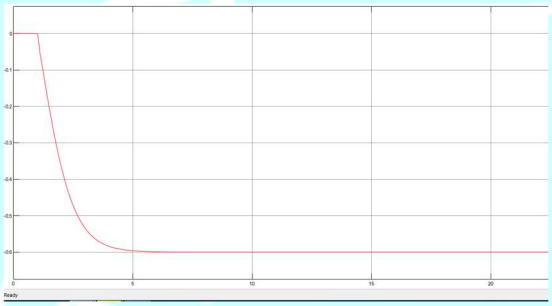


Рисунок 3

На рисунках 4-5 показаны результаты численного эксперимента, проведенного при значении параметров $k_1 = 1.5, k_3 = 7, a_1 = 10, a_2 = 2, a_3 = 10, a_4 = 5, a_5 = 50$ (фиксируем); меняем $k_2 = 2$ и $k_2 = -2$.

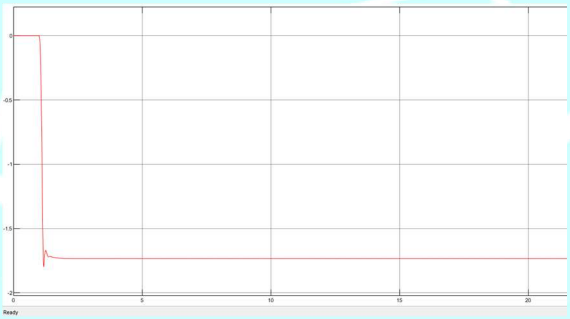


Рисунок 4

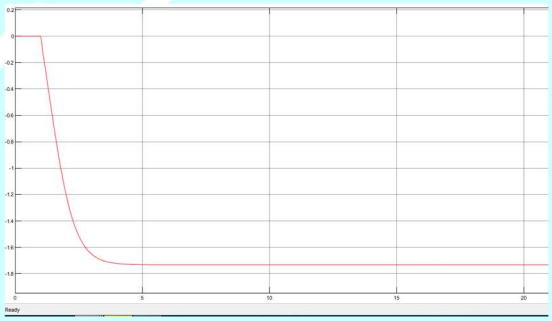


Рисунок 5

На рисунках 6-7 показаны результаты численного эксперимента, проведенного при значении параметров $k_1 = 1.5, k_2 = -2, a_1 = 10, a_2 = 2$, $a_3 = 10, a_4 = 5, a_5 = 50$ (фиксируем); меняем $k_3 = 7$ и $k_3 = -7$.

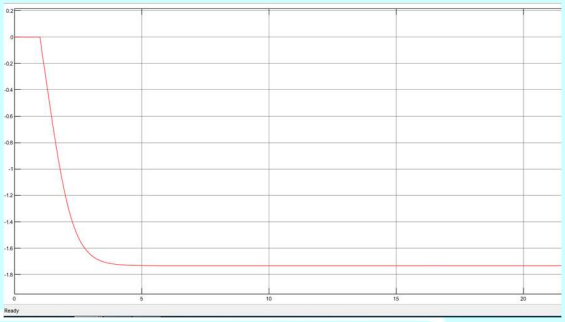


Рисунок 6

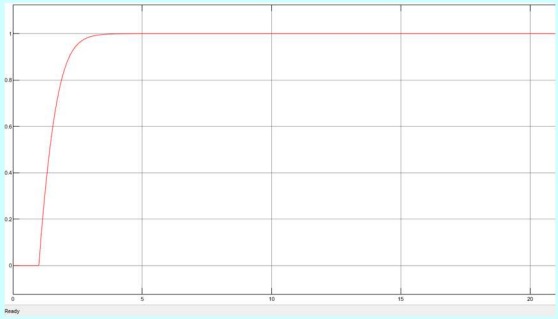


Рисунок 7

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, убеждаемся, что линеаризованная модель системы управления давления пара и тепловой нагрузки парогенератора за счет

ISSN 3030-3907

введения в контур управления закона управления в форме катастрофы «гиперболическая омбилика» становится робастно устойчивой в неограниченно широких пределах изменения параметров объекта управления a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 и устанавливаемых параметров регулятора k_1, k_2 и k_3. Приведенные результаты численного эксперимента, полученные с использованием программного пакета Matlab R2022a., подтверждают полученные результаты. Отсюда следует, что при некотором, достаточно небольшом уклонении от опорных значений, основываясь на результатах анализа линеаризованной модели, можно сделать предположение о робастной устойчивости системы управления прямоточных парогенераторов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУР

1. Бесекерский В.А., Небылов А.В. Робастные системы автоматического управления – М.: Наука, Москва, 1983. – 239 с.
2. Поляк Б.Т., Щербаков П.С. Робастная устойчивость и управление – М.: Наука, Москва, 2002. – 303 с.
3. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: Учебник / Под ред. Н.Д. Егупова; издание 2-е, стереотипное. – М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, 2002. – 744 с., ил.
4. Томпсон Дж. М. Т. Неустойчивости и катастрофы в науке и технике: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 254 с., ил.
5. Botirov, T., Latipov, S., Baqoyev, H., Xashimova, F., & Botirov, U. (2024). Algorithms for adaptive control with limited disturbance compensation. In E3S Web of Conferences (Vol. 525, p. 05023). EDP Sciences.
6. Ботиров, Т. В., & Салохиддинов, А. Ж. (2025). АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОИЗВОДСТВЕ ФОРМАЛИНА. Journal of Advances in Engineering Technology, (2), 5-10.
7. Botirov, T. V., & Dauletbaev, A. B. (2024). АЛГОРИТМЫ СИНТЕЗА РОБАСТНЫХ УПРАВЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ. International Journal of Advanced Technology and Natural Sciences, 5(3), 86-91.
8. Vafoqulovich, B. T. L., & O‘G‘Li, S. B. Q. (2025). KASR TARTIBLI NOANIQ MANTIQQA ASOSLANGAN PID ROSTLAGICHNI STM32 MIKROKONTROLLERIDA ISHLAB CHIQISH TAHLILI. Илм-фан ва инновацион ривожланиш/Наука и инновационное развитие, 8(4), 19-28.

ISSN 3030-3907