

Торайғыров университетінің  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Торайғыров университета

---

# Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2020)

---

Павлодар

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**  
**Вестник Торайгыров университета**

**Энергетическая серия**  
выходит 4 раза в год

---

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о постановке на переучет периодического печатного издания,  
информационного агентства и сетевого издания

KZ19VRY00029272

выдано

Министерство информации и общественного развития  
Республики Казахстан

**Тематическая направленность**

публикация материалов в области электроэнергетики,  
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных  
и информационных систем, электромеханики  
и теплоэнергетики

**Подписной индекс – 76136**

---

**Бас редакторы – главный редактор**

Кислов А. П.

*к.т.н., доцент*

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

**Редакция алқасы – Редакционная коллегия**

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*  
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*  
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*  
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*  
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*  
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*  
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*  
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели  
Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов  
При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

<https://doi.org/10.48081/GAOJ4008>

**С. А. Мендыбаев<sup>1</sup>, Г. Б. Садуакасова<sup>2</sup>,  
Н. Б. Байкенова<sup>3</sup>, А. Е. Анарбаев<sup>4</sup>**

<sup>1,2</sup>Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина,  
Республика Казахстан, г. Нур-Султан;

<sup>3,4</sup>Торайғыров университет,  
Республика Казахстан, г. Павлодар

## **ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

*В статье исследована устойчивость и разработанная математическая модель системы автоматизации технологического процесса выплавки ферросплавов на базе программного продукта Matlab.*

*Ключевые слова: устойчивость, математическая модель, MatLab, феррохром, система регулирования.*

### **Введение**

Основным назначением системы автоматического регулирования (САР) является поддержание заданного постоянного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону. При отклонении в данный момент времени регулируемого параметра от заданного значения, что может произойти или в результате появления возмущающих воздействий на систему, или при изменении заданного значения регулируемой величины, автоматический регулятор воздействует на систему таким образом, чтобы ликвидировать это отклонение. В системе возникает переходный процесс, определяемый динамическими ее свойствами.

### **Результаты и обсуждение**

Если после окончания переходного процесса система снова приходит в первоначальное или другое равновесное состояние, то такую систему называют устойчивой. Если при тех же условиях в системе или возникают колебания со все возрастающей амплитудой, или происходит монотонное

увеличение отклонения регулируемой величины от ее заданного равновесного значения, то систему называют неустойчивой.

Для того чтобы определить, устойчива или неустойчива система, необходимо изучить ее поведение при малых отклонениях от равновесного состояния. Если при этом система стремится вернуться к равновесному состоянию, то она устойчива. Если в системе возникают силы, которые стремятся увеличить отклонение системы от равновесного состояния, система неустойчива.

На практике используют разные критерии устойчивости, позволяющие судить об устойчивости исследуемой системы. Одним из таких критериев является критерий Найквиста. Чтобы замкнутая система автоматического управления (САУ) была устойчивой, необходимо и достаточно соблюдение следующих условий:

- амплитудно – фазовая частотная характеристика (АФЧХ) при изменении частоты  $\omega$  от 0 до  $\infty$  – не должна охватывать точку с координатами  $-1, j 0$ ;
- при неустойчивой разомкнутой САУ АФЧХ при изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $+\infty$  должна охватывать точку  $-1, j 0$  столько раз, сколько корней характеристического уравнения разомкнутой системы лежит справа от мнимой оси плоскости корней.

По найденным передаточным функциям в программе MatLab производим построение графика амплитудно-фазовой характеристики (АФХ) разомкнутой системы, изображенным на рисунке 1. Из графика видно, что амплитудно-фазовая характеристика  $W(j\omega)$  не охватывает точку с координатами  $(-1, j0)$ , значит по критерию Найквиста может считаться устойчивой.

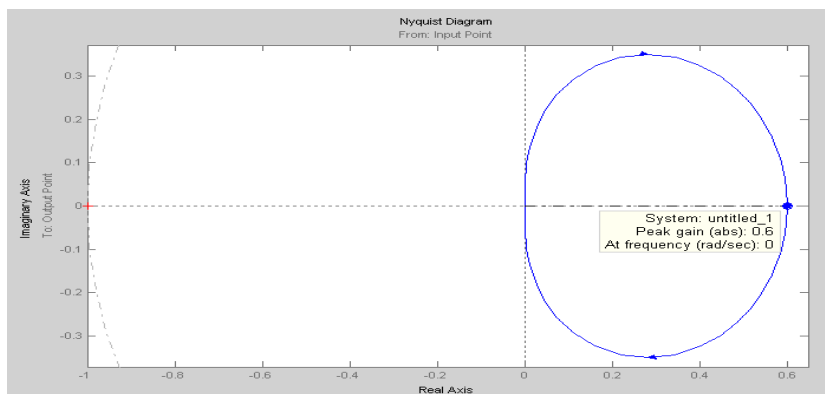


Рисунок 1 – АФХ разомкнутой системы

В итоге изменение системы на 30 % график амплитудно-фазовой характеристики АФХ разомкнутой системы изменяется так(рис 2):

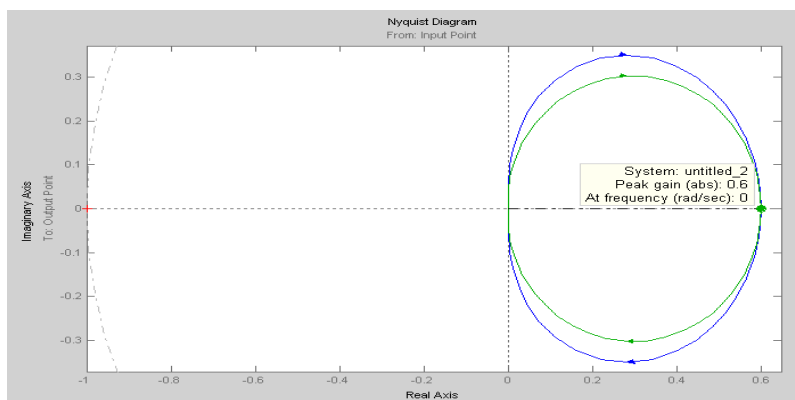


Рисунок 2 – Измененная АФХ разомкнутой системы на 30 %

К автоматическим системам регулирования предъявляют требования не только относительно ее устойчивости. Для работоспособности системы не менее необходимо, чтобы процесс автоматического регулирования осуществлялся при обеспечении определенных качественных показателей. Требования к качеству процесса регулирования в каждом случае могут быть самыми разнообразными, однако из всех качественных показателей можно выделить несколько наиболее существенных, которые с достаточной полнотой определяют качество почти всех систем автоматического регулирования.

Качество процесса регулирования системы, как правило, оценивают по переходной функции. Для этого в программе MatLab строим график переходного процесса (рис. 3). Основными показателями качества являются время регулирования, перерегулирование, колебательность. Кроме того, следует отметить, что в конкретных условиях к качеству регулирования могут предъявляться и другие требования, например максимальная скорость изменения регулируемой величины, основная частота ее колебаний и т.п.

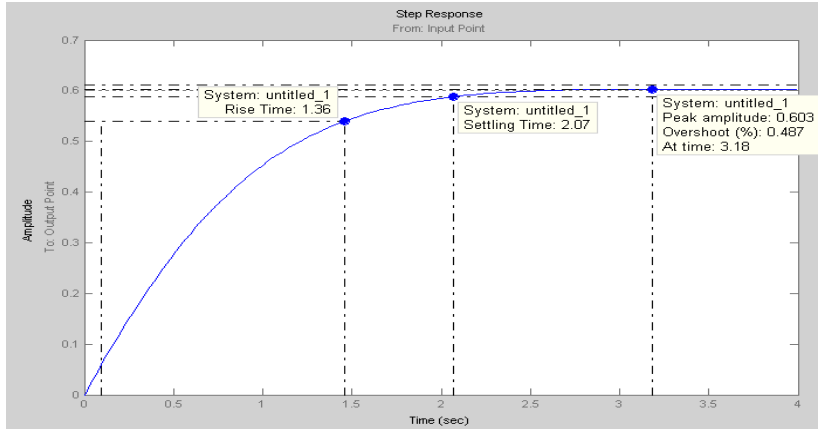


Рисунок 3 – Переходная функция системы

К основным показателям качества регулирования относятся:

- время регулирования;
- перерегулирование;
- колебательность.

Временем регулирования  $t_p$  называют время, в течении которого начиная с момента приложения воздействия на систему отклонения регулируемой величины  $\Delta h(t)$  от ее установившегося значения  $h_0 = h(\infty)$  меньше наперед заданного значения  $\varepsilon$ . Таким образом, время регулирования определяет длительность (быстродействие) переходного процесса. Для нашего случая время регулирования  $t_p = 2,07$  с.

Перерегулирование. Перерегулированием  $\sigma$  называют максимальное отклонение  $\Delta h_{\max}$  регулируемой величины от установившегося значения, выраженное в процентах от  $h_0 = h(\infty)$ . Абсолютная величина  $\Delta h_{\max}$  определяется из кривой переходного процесса:  $\Delta h_{\max} = h_{\max} - h(\infty)$ .

Соответственно перерегулирование

$$\sigma = \frac{h_{\max} - h(\infty)}{h(\infty)} 100\% .$$

Для нашего случая перерегулирование  $\sigma$  равно:

$$\sigma = \frac{0,603 - 0,6}{0,6} 100\% \approx 0,5\% .$$

Колебательность. Колебательность системы характеризуется числом колебаний регулируемой величины за время регулирования  $t_p$ . Если за это время переходный процесс в системе совершает число колебаний

меньше заданного, то считается, что система имеет требуемое качество регулирования по колебательности. В итоге изменение системы на 30 % график переходной функции системы изменяется так (рис.4):

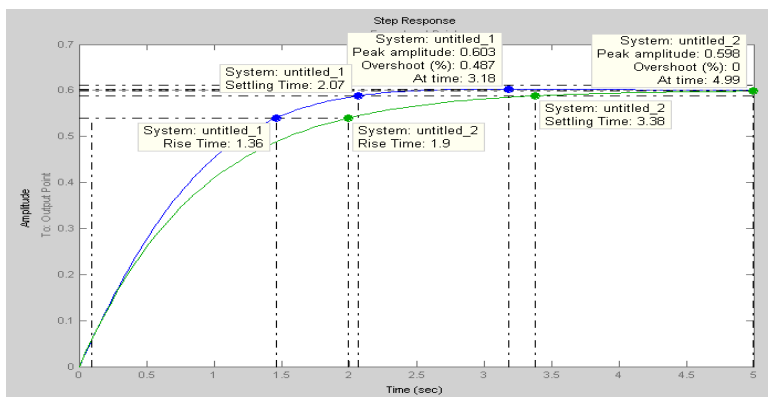


Рисунок 4 – Измененная переходная функция системы на 30 %

Задача анализа и синтеза системы автоматизации технологического процесса производства ферросплавов с заданными характеристиками является довольно сложной. В связи с этим большое внимание уделяется математическому моделированию. Анализ технологических процессов с помощью математических моделей позволяет существенно сократить объем, исследований, обеспечивает возможность просмотра большого количества вариантов, необходимых для анализа объекта регулирования.

Математическое моделирование системы автоматизации позволяет изучить свойства объекта на математической модели. Его целью является определение оптимальных условий протекания процесса, управление им на основе математической модели и перенос результатов на объект. Объектом автоматизации является печь по выплавке феррохрома является руднотермическая печь серии РКЗ-21 с заданными временными характеристиками.

По внешнему виду наиболее распространенные временные характеристики объектов регулирования можно классифицировать по двум видам: характеристики с самовыравниванием и без самовыравнивания. Оба вида рассматриваются характеристики для одноемкостных и многоемкостных объектов.

Одноемкостные объекты представляют собой одно типовое звено. Одноемкостное звено с самовыравниванием представляет собой характеристику инерционного звена, поэтому основными параметрами

характеристики являются коэффициент усиления объекта  $k_{об}$  и постоянная времени объекта  $T_{об}$ . Многоемкостные объекты представляют собой несколько типовых звеньев, включенных по последовательной, параллельной или смешанной схеме.

Для определения оптимальных значений настройки регуляторов необходимо знать для объектов с самовывравниванием коэффициент усиления объекта  $k_{об}$  и постоянную времени объекта  $T_{об}$ . Эти величины мы находим из графика, изображенного на рисунке 5.

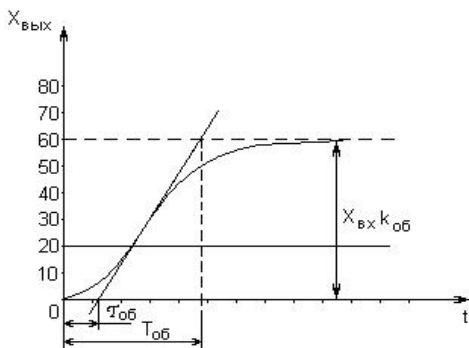


Рисунок 5 – Временная характеристика многоемкостного объекта с самовывравнием  $\tau_{об} = 1,2$ ;  $T_{об} = 4,8$ ;  $k_{об} = 60/20 = 3$

Тип регулятора и закон регулирования выбирают в зависимости от технологических показателей, свойств объекта управления, а также требований к качеству процесса регулирования.

Свойства объекта управления в первом приближении могут быть оценены по отношению времени запаздывания  $\tau_{об}$  к постоянной времени объекта  $T_{об}$ :  $\tau_{об}/T_{об}$ . Чем это отношение больше, тем задача автоматизации сложнее, и потому рекомендуют:

- при  $\tau_{об}/T_{об} < 0,2$  позиционный регулятор;
- при  $0,2 \leq \tau_{об}/T_{об} \leq 1$  регулятор непрерывного действия;
- при  $\tau_{об}/T_{об} > 1$  импульсный или цифровой регулятор.

$$\frac{\tau_{об}}{T_{об}} = \frac{1,2}{4,8} = 0,25 \quad (1)$$

Согласно формуле (1)  $0,2 \leq 0,25 \leq 1$  в данной работе будет использован ПИ-регулятор непрерывного действия.



По величинам найденным по графику и сведений об объекте управления и регуляторе запишем их передаточные функции

$$W_{об} = \frac{\kappa_{об}}{T_{об} \cdot p + 1} e^{-\tau_{об} p} = \frac{3}{4,8p + 1} e^{-1,2p}. \quad (2)$$

$$\kappa_{p.онт} = \frac{T_{об}}{\tau_{об} \cdot \kappa_{об}} = \frac{4,8}{1,2 \cdot 3} = 1,333. \quad (3)$$

$$T_{уз.онт} = 0,475 \cdot \frac{\kappa_{об} \cdot \kappa_{p.онт}}{(1 + \kappa_{об} \cdot \kappa_{p.онт})^2} T_{об} = 0,475 \cdot \frac{3 \cdot 1,333}{(1 + 3 \cdot 1,333)^2} 4,8 = 0,36сч. \quad (4)$$

$$W_p = \frac{\kappa_p}{T_u \cdot p + 1} = \frac{1,333}{0,36p + 1}. \quad (5)$$

### Выводы

На основании расчетных данных структурная схема системы автоматического регулирования имеет вид (рис.5):

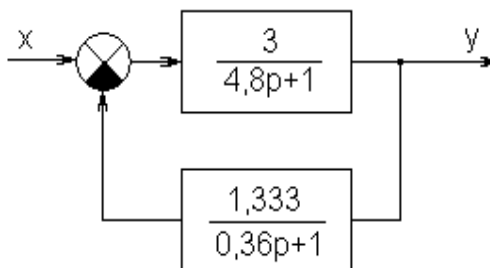


Рисунок 5 – Структурная схема САР

Имея передаточную характеристику объекта регулирования и регулятора построим контур регулирования в программе «Matlab» (рис.6).

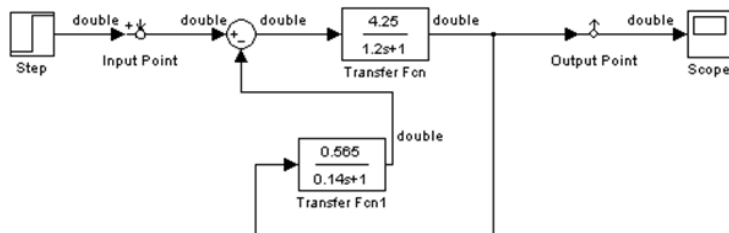


Рисунок 6 – Контур регулирования в программе «Matlab»

Изменяя  $T_{из.онт}$  передаточной характеристики объекта регулирования на 30 %, исследуем переменчивость системы (рис.7).

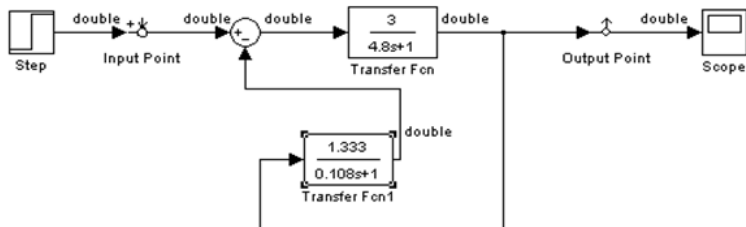


Рисунок 7 – Изменение контура регулирования системы на 30 %

## Список использованных источников

- 1 Проектирование систем автоматизации технологических процессов. – М., 2005.
- 2 Теория и технология производства ферросплавов / Гасик М. И. и др. – М., 2003.
- 3 **Васманов, В. В.** Автоматизированные системы оперативного управления. – М., 2007.
- 4 **Михалев, С. Б.** АСУ на промышленном предприятии. – Минск, 2009.
- 5 **Модин, А. А.** Справочник разработчика АСУ. – М., 2001.

## References

- 1 Proektirovanie sistem avtomatizatsii tehnologicheskikh protsessov. [The design of automation systems of technological processes]. – Moscow, 2005.
- 2 Teoriya i tehnologiya proizvodstva ferrosplavov [Theory and technology of Ferroalloy production]. In Gasik M. I. et al. – Moscow, 2003.

3 **Vasmanov, V. V.** Avtomatizirovannyye sistemy operativnogo upravleniya. [Automated system of operational management]. – Moscow, 2007.

4 **Mihalev, S. B.** ASÝ na promyshlennom predpriyatii [Automated control system at an industrial enterprise] Minsk, 2009.

5 **Modin, A. A.** Spravochnik razrabotchika ASÝ [Handbook of the automated control system developer]. – Moscow, 2001.

Материал поступил в редакцию 30.09.20.

*C. A. Мендыбаев<sup>1</sup>, Г. Б. Садуакасова<sup>2</sup>, Н. Б. Байкенова<sup>3</sup>, А. Е. Анарбаев<sup>4</sup>*

**Ферроқорытпа өндірісін автоматтандыру жүйесінің орнықтылығын және математикалық моделін зерттеу**

<sup>1,2</sup>С. Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық университеті, Қазақстан Республикасы, Нұр-Сұлтан қ.;

<sup>3,4</sup>Торайғыров университеті, Қазақстан Республикасы, Павлодар қ. Материал 30.09.20 баспаға түсті.

*S. A. Mendybaev<sup>1</sup>, G. B. Saduakasova<sup>2</sup>, N. B. Baykenova<sup>3</sup>, A. E. Anarbaev<sup>4</sup>*

**Research of stability and mathematical model of the ferroalloy production automation system**

<sup>1,2</sup>S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Republic of Kazakhstan, Nur-Sultan;

<sup>3,4</sup>Toraighyrov University, Republic of Kazakhstan, Pavlodar. Material received on 30.09.20.

*Мақалада Matlab бағдарламалық өнімі негізінде ферроқорытпаларды балқытудың технологиялық процесін автоматтандыру жүйесінің орнықтылығы мен әзірленген математикалық моделі зерттелген.*

*Кілтті сөздер: тұрақтылық, математикалық модель, MatLab, феррохром, реттеу жүйесі.*

*The article examines the stability and developed a mathematical model of the system for automating the technological process of Ferroalloy smelting based on the Matlab software product.*

*Keywords: stability, mathematical model, MatLab, ferrochrome, control system.*

Теруге 30.09.2020 ж. жіберілді. Басуға 14.10.2020 ж. қол қойылды.  
Электронды баспа  
2,99 Мб RAM  
Шартты баспа табағы 23,30. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.  
Компьютерде беттеген: А. Елемесқызы  
Корректор: А. Р. Омарова  
Тапсырыс № 3707

Сдано в набор 30.09.2020 г. Подписано в печать 14.10.2020 г.  
Электронное издание  
2,99 Мб RAM  
Усл. печ. л. 23,30. Тираж 300 экз. Цена договорная.  
Компьютерная верстка: А. Елемесқызы  
Корректор: А. Р. Омарова  
Заказ № 3707

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған  
«Торайғыров университет»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы  
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы  
«Торайғыров университет»  
коммерциялық емес акционерлік қоғамы  
140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.  
8 (7182) 67-36-69  
e-mail: kereku@tou.edu.kz  
www.vestnik.tou.edu.kz