

such particles through space through a certain number of steps will leave a trace in the form of flow lines. We created a computer application that visualizes a two-dimensional vector field based on a modification of known texture rendering algorithms. We visualized the vector velocity field computed by the discrete vortices method. Our calculations indicate that this method allows to effectively visualize streamlines behind buildings and to simulate vortex structures and their dynamics. We can notice that this visualization technique can be applied to the velocity field calculated by any other method or obtained experimentally. It is also suitable for visualization of any vector fields. By using parallel computing, you can increase the calculation speed and get a real-time picture of the flow. The method can also be extended in the case of a three-dimensional velocity field.

Keywords: *current lines, velocity field, particle advection, discrete vortex method, texture rendering.*

Рекомендована до публікації: д-р фіз.-мат. наук, проф. Холькін О.М.

Стаття надійшла 15.11.2019 р.

УДК 004.934

Волков О.С., П'ятикоп О.Є.

ПРОБЛЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ЧАСТОТИ ЗВУКУ ПРИ РОЗРОБЦІ СИСТЕМИ НАЛАШТУВАННЯ ГІТАРИ

Дана стаття присвячена дослідженню процесу розпізнавання звуку гітари для вирішення задачі налаштування інструменту за допомогою мобільного додатку. Під налаштуванням гітари розуміється відповідність частоти кожної струни основній частоті. За міжнародним стандартом (ISO 16:1975) кожна струна має свою унікальну фундаментальну частоту. Виявлено перешкоди, які впливають на розпізнавання звуку. Так гітарна нота не перебуває в одній частоті: вона складається з ряду гармонік. Різниця в гармоніках – це те, що відрізняє звучання гітари і скрипки навіть при грі на одній і тій же ноті. Інша проблема може виникнути з чутливістю мікрофона: пригнічування гучності низькочастотної частини спектру. У зв'язку з цим проведено аналіз останніх досліджень та публікацій щодо методів розпізнавання аудіообразів та алгоритмів визначення частоти основного тону музичного звуку. Аналіз публікацій показав, що в процесі розпізнавання доцільно використовувати перетворення Фур'є для звукової хвилі та принцип вимірювання частоти за допомогою рамки (вікна). Розглянута ADSR модель звуку гітарної струни, що має чотири характерні моменти: атаку (англ. attack), спад (англ. decay), підтримку (англ. sustain) і загасання (англ. release). Визначено етапи розпізнавання частоти звуку при розробці системи для налаштування гітари. Встановлено, що необхідна додаткова попередня обробка звуку. Досліджено вплив перетворень Фур'є на точність визначення частоти основного тону. Результати дослідження показали, що повторне використання перетворення Фур'є дозволяє при частоті дискретизації 1,35 Гц підвищити точність результату розпізнавання до 0,08 Гц. Знайдений спосіб збільшення точності розпізнавання спектру дозволяє розробити програму-тюнер у вигляді мобільного додатку.

Ключові слова: *розпізнавання звуку, перетворення Фур'є, гітарний тюнер.*

Постановка проблеми. У всіх європейських струнних інструментах кожна струна налаштовується на деяку ноту, а цій ноті відповідає деяка частота. Різниця між нотою і частотою в тому, що кожна нота несе в собі деяку музичну функцію. І ця функція визначається положенням ноти щодо інших нот, так, наприклад, нота С в послідовності С-мажор відіграє роль тоніки, тобто основного і самого стійкого звуку. Якщо ця нота тріхи

зрушиться, то вона втратить свою функцію. Для того, щоб видобувні звуки відповідали нотам потрібно дотримуватися суворої відповідності між інтервалами нот і співвідношенням частот. Від точності і стабільності частоти, яку породжує струна, буде залежати відповідність витягнутого звуку тієї функції, що була закладена в ноту.

Під налаштуванням гітари розуміється відповідність частоти кожної струни основній частоті. Акустична гітара має 6 струн. Кожна струна має свою унікальну фундаментальну частоту.

Міжнародний стандарт (ISO 16:1975) [1] налаштування музичних інструментів встановлює частоту ноти А першої октави в 440 Гц. На гітарі ця нота знаходиться на 5 ладу 1 струни (Таблиця 1). Традиційно гітара налаштовується на відкритих струнах (0 лад).

Але реальний інструмент породжує нелінійні коливальні процеси, в результаті чого з'являються додаткові гармоніки, які називають обертонами (Рисунок 1).

Ці обертони є досить складною перешкодою в процесі розпізнавання, тому що вони можуть превалювати над основним тоном і заважати визначенню частоти.

Отже, гітарна нота не перебуває в одній частоті. Вона також складається з ряду гармонік. Різниця в гармоніках - це те, що відрізняє звучання гітари і скрипки навіть при грі на одній і тій же ноті. Після того, як зразок ноти зіграли на гітарі, необхідно розрахувати його основну частоту. Людське вухо невідчутно до змін, меншим +/- 0,5 Гц. Щоб отримати дані в реальному часі, інтервал вибірки повинен бути якомога нижче. Однак, це зменшує дозвіл спектру і, отже, впливає на точність оцінки частоти [2].

Таблиця 1 – Частоти коливань струн налаштованої гітари (Гц) згідно зі стандартом [1]

Струна	0 лад	1 лад	2 лад	3 лад	4 лад	5 лад
1	329,63	349,23	369,99	391,99	415,30	440
2	246,94	261,63	277,18	293,66	311,13	329,63
3	196	207,65	220	233,08	246,94	261,63
4	146,83	155,56	164,81	174,61	185	196
5	110	116,54	123,47	130,81	138,59	146,83
6	82,41	87,31	92,5	98	103,83	110

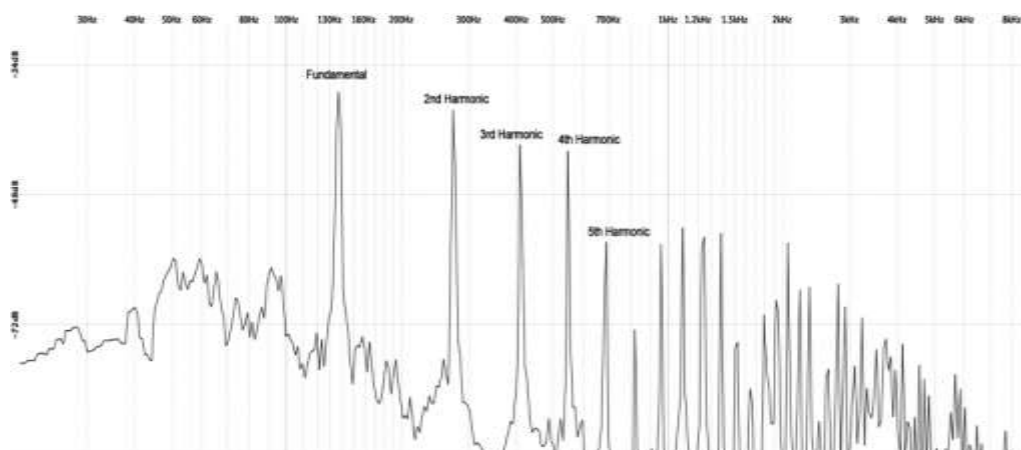


Рисунок 1 – Гітарні гармоніки

Для налаштування гітари можна використовувати тюнер. Тюнер – пристрій, який визначає частоту коливання звуку і вказує ноту, яка йому відповідає. Також він показує відхилення звуку від еталонного звучання цієї ноти. У порівнянні з налаштуванням на слух, коли потрібна певна кількість припущень при визначенні ступеня затягування / ослаблення

струни, тюнер здатний дати точні інструкції для швидкого виконання настройки інструменту.

Функції гітарного тюнера може виконувати мобільний додаток, в якому аналізується звук, що надходить в мікрофон телефону. Але мікрофон може пригнічувати гучність низькочастотної частини спектру, тому необхідна додаткова попередня обробка звуку.

На сьогоднішній день проблема розпізнавання частоти звуку вивчена в достатньому для розробки повнофункціональних рішень обсязі. Існує безліч програм-тюнерів для настройки гітари [3]. Всі доступні рішення дозволяють виконувати налаштування гітари тільки на відкритих струнах (0 лад). Але настройка інструменту також виконується на 5, 7, 12 ладах. Такий підхід потрібен для більш точного налаштування і користується певною популярністю. Тому впровадження цієї функції в програму-тюнер є доцільним.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В області цифрової обробки звуку визначення частоти основного тону є досить важливим завданням. Отримані при його вирішенні результати знаходять своє застосування в задачах ідентифікації диктора, детектуванні і кодуванні мови, розпізнаванні музики, налаштуванні музичних інструментів. Важливість даного напрямку обумовлюється попитом на програмне забезпечення з розпізнавання та цифровій обробці звукових даних. Актуальність підкреслює також ряд публікацій за темою. Стаття [4] описує алгоритм визначення частоти основного тону музичного звуку, зокрема перетворенню Фур'є. Робота [6] присвячена визначенню частоти тону музичних інструментів (аналіз сигналів музичних інструментів) з використанням мікроконтролерів. У статті [7] представлено огляд поточних робіт по методам оцінки спектра, з упором на порівняння методу оцінки амплітуди і фази і методу Капоне для 1 і 2-мірних спектрів. Мета статті [8] - зрозуміти критичні параметри, які необхідно враховувати при розробці гітарного тюнера. У центрі уваги дизайну лежить розробка відповідного алгоритму для точного визначення основної частоти щипкової гітарної струни по її частотному спектру. В статті [9] розглянуто можливості використання методів розпізнавання аудіообразів для вирішення завдань пошуку. Запропоновано алгоритм розпізнавання нот за спектром сигналу. Автори роботи [10] аналізують звуковий сигнал гітари для вилучення музичних даних в режимі реального часу. Досліджується вплив розміру вікна, довжини стрибка та інших параметрів, щоб максимізувати дозвіл і точність виведення.

У статті [11] описано кореляційний метод визначення траєкторії частоти основного тону. Цей підхід зустрічається найбільш часто. У роботі розкрити: перетин нуля, функція автокореляції, функція різниці середньої величини, зважена функція автокореляції, спектр гармонійних творів, кепстра і функція оператора-Тігер.

Аналіз публікацій показав, що доцільно використовувати перетворення Фур'є звукової хвилі та принцип вимірювання за допомогою рамки (вікна).

Мета дослідження. Для розпізнавання частоти звуку при розробці програми-тюнера налаштування гітари необхідно виконати наступні етапи:

1. Передобробка звуку:
 - а) обчислення перетворення Фур'є звукової хвилі;
 - б) фільтрація спектру низькочастотним фільтром;
2. Знаходження основного тону на спектрі.
3. Обчислення частоти основного тону.
4. Визначення порядку гармонік за допомогою нейронної мережі.
5. Порівняння отриманої частоти з еталонним зразком.

У даній статті розглянуті перші три етапи.

Виклад основного матеріалу. Перед тим як почати процес знаходження основного тону на спектрі необхідно виконати передобробку звукового сигналу. Передобробка полягає в обчислення перетворення Фур'є звукової хвилі [4]. Даний процес не є науковою новизною,

але його використання при розробці мобільного додатку вимагає дослідження. Вирішено для реалізації перетворення Фур'є використовувати бібліотеку Accelerate [5].

Бібліотека Accelerate дозволяє обчислювати спектр послідовностей, що не перевищують 32768 відліків. Але така кількість відліків означає, що крок частотної сітки в спектрі приблизно дорівнює 1,35 Гц при частоті дискретизації 44.1 Гц. (Таблиця 2) З одного боку, це допустима величина, коли мова йде про, наприклад, E першої октави з частотою 440 Гц, тобто ноти яка виходить на відкритій першій струні (найтоншої). Але на шостій струні така помилка недопустима, тому що між E великої октави і, наприклад, D великої октави всього 3 Hz. Тобто помилка в 1,35 Гц це помилка в півтону. Тому оптимальною буде точність в $\pm 0,1$ Гц.

Оскільки немає можливості накопичувати кілька секунд сигналу, можна накопичувати значення спектра на частоті основного тону з повторним перетворенням Фур'є.

З наведеної таблиці видно що маючи 16 комплексних відліків частоті дискретизації 1,35 Гц, можна підвищити точність результату в 16 разів, тобто, приблизно до 0,08 Гц, що трохи точніше $\pm 0,1$ Гц.

Таблиця 2 – Результати перетворень Фур'є

	Частота дискретизації	Комплексних відліків	Точність
1 перетворення Фур'є	44.1 Гц	32768	1,35 Гц
2 перетворення Фур'є	1.35 Гц	16	0,08 Гц

Проблема чутливості мікрофона була вирішена наданням можливості користувачеві пригнічувати обертони низькочастотним фільтром, який відсікає частоти більші, ніж тон струни.

Обрізка частот праворуч від частоти зрізу забезпечує придушення обертонів, так що основний тон знову стає переважаючим. Але виникає загальне зниження відносини сигнал-шум і, як наслідок, невелике зниження точності, однак, в межах допустимого.

Для подальшого етапу необхідно розглянути модель звуку, що породжувано струною.

Якщо скористатися ADSR моделлю [6] (рисунок 2), яка запропонована американським дослідником і композитором Володимиром Усачевским для перших синтезаторів, то звук струни являє собою модульоване деякої обвідної гармонійне коливання. Ця обвідна отримала назву ADSR, тому що вона має чотири характерні моменти: атаку (англ. attack), спад (англ. decay), підтримку (англ. sustain) і загасання (англ. release).

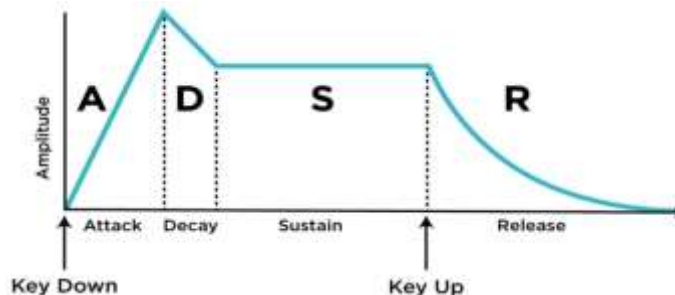


Рисунок 2 – ADSR модель

Інтервал підтримки найбільш чітко передає частоту, тому що коливання відбуваються практично без зміни амплітуди. Якби гітара породжувала ідеальний моногармонічний звук, то з урахуванням ADSR-обвідної, спектр такого коливання мав би вигляд вузької смужки.

Зазвичай звук на графіку представляють у вигляді розгортки за часом. У точці нуль по осі абсцис розташовується значення в початковий момент спостереження, далі відповідні значення, які будуть спостерігатися через 1 с, 2 с і т.д. Процес вимірювання в такому випадку можна представити уявної рамкою, яка рівномірно рухається зліва на право (рисунок 3).

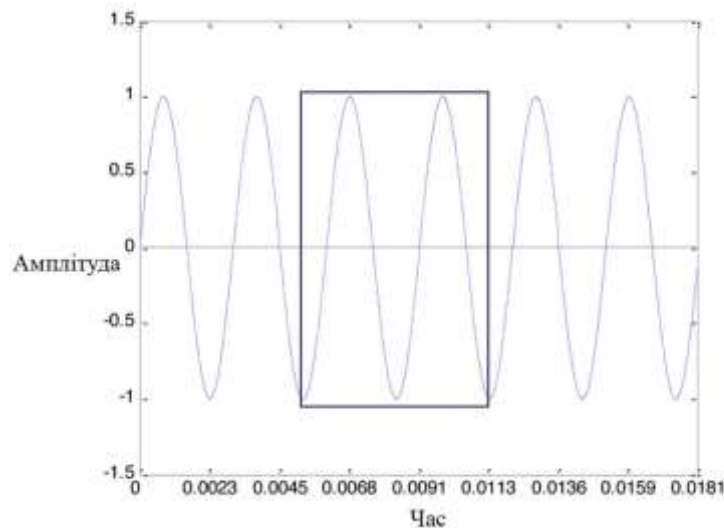


Рисунок 3 – Процес вимірювання звуку

Отже, рамка дає зрозуміти, як відбувається процес вимірювання і які моменти виявляються на початку рамки, а які в кінці. На основі цього можна уявити, що буде, якщо зіставити систему координат з рамкою - виникне відчуття, що звукова хвиля з'являється в правій частині графіка і зникає в лівій. Але таке уявлення звукової хвилі не інформативно, тому що хвиля може рухатися дуже швидко. Завданням є якимось чином зупинити хвилю. Для того, щоб хвиля зупинилася потрібно, щоб її швидкість дорівнювала 0. Так як у хвилі є дві швидкості: фазова і групова, то можна отримати два види зупинених хвиль.

Зупинена хвиля, у якій групова швидкість дорівнює нулю, характеризується тим, що її огинає залишається завжди на одному місці. Але при цьому коливання не зупиняються - нулі і височини продовжують рухатися уздовж осі абсцис. Очевидно, що така хвиля не підходить для розпізнавання, тому що інтерес становить те що відбувається всередині ADSR-обвідної, а саме в момент коли спостерігається коливання в режимі сустейна. [7]

Для цього є інший тип зупинених хвиль, у яких фазова швидкість дорівнює нулю. Нульова фазова швидкість гарантує що звукова хвиля завжди залишається на одному місці, тому можна легко розгледіти форму гармонійного коливання і оцінити наскільки вона близька до ідеальної синусоїдальної форми. Отже, алгоритм отримання такої хвилі наступний:

1. Знайти фазу основного тону
2. Зсув відображає хвилю на величину фази

У цифровій обробці сигналів завжди спливає завдання вибору розміру вікна спостереження. Велике вікно спостереження дозволяє збирати більше інформації, робити точну і стабільну оцінку параметрів сигналу. З іншого боку, це створює ряд проблем, через те, що потрібно зберігати і обробляти за раз більшу кількість відліків, плюс призводить до виникнення пропорційної затримки в обробці сигналу.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Процес розробки системи розпізнавання частоти звуку для настройки гітари є досить складним. В статті визначено етапи розпізнавання частоти звуку при розробці системи для налаштування гітари. При досягненні поставлених завдань виникають певні проблеми пов'язані з чутливістю мікрофона

пристрою і досягненням потрібної точності розпізнавання частоти. Досліджено вплив перетворень Фур'є на точність визначення частоти основного тону. Результати дослідження показали, що вирішити проблему можна шляхом використання комплексного перетворення Фур'є. Розглянуто ADSR модель звуку гітарної струни та процес вимірювання звуку на основі рамки. Визначено алгоритм для подальшого дослідження.

Перелік використаних джерел

1. ISO 16:1975 «Acoustics — Standard tuning frequency (Standard musical pitch)». – Чинний від 1975-01-01, підтверджено 2017 р. – [Electronic resource]. – Regime of access: <https://www.iso.org/standard/3601.html>.
2. Harmonic Spectrum [Electronic resource]. – Regime of access: <http://sv.mazurka.org.uk/MzHarmonicSpectrum>.
3. Смартфон как тюнер: выбираем приложение для настройки гитары [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ichip.ru/sovety/smartfon-kak-tyuner-vybiraem-prilozhenie-dlya-nastroyki-gitary-230582>
4. Жук, А.В. Распознавание последовательности звуков одноголосной мелодии по высоте./А. В. Жук // Искусственный интеллект, – 2006 – No 2.
5. Accelerate – Apple Developer Documentation [Electronic resource]. – Regime of access: <https://developer.apple.com/documentation/accelerate>
6. Music Synthesizer [Electronic resource]. – Regime of access: <https://developer.apple.com/documentation/accelerate>
7. Gorrell Oppenheim, A. V. The Importance of Phase in Signals./ A. V. Gorrell Oppenheim, J. S. Lim. – IEEE, Proceedings, vol. 69, May 1981. – p. 529-541.
8. Battenberg, E. Improvements to percussive component extraction using non-negative matrix factorization and support vector machines. PhD thesis, Masters Thesis, University of California, Berkeley, Berkeley, CA, 12, 2008.
9. Benetos, E. Polyphonic music transcription using note onset and offset detection. / E. Benetos, S. Dixon – In Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2011 IEEE International Conference on, 2011, p. 37–40.
10. Abeber, J. Automatic string detection for bass guitar and electric guitar./ J. Abeber – In: International Symposium on Computer Music Modeling and Retrieval. Springer, London, U. K., 2012. –p. 333–352.
11. Cheveigne, A. YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music/ A. Cheveigne, H. Kawahara. – The Journal of the Acoustical Society of America, 2002, Volume 111, Issue 4, p. 1917-1930.

Волков А.С., Пятикоп Е. Е.

ПРОБЛЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ЧАСТОТЫ ЗВУКА ПРИ РАЗРАБОТКЕ СИСТЕМЫ НАСТРОЙКИ ГИТАРЫ

Данная статья посвящена исследованию процесса распознавания звука гитары для решения задачи настройки инструмента с помощью мобильного приложения. Под настройкой гитары понимается соответствие частоты каждой струны основной частоте. По международному стандарту (ISO 16: 1975) каждая струна имеет свою уникальную фундаментальную частоту. Выявлены проблемы, которые влияют на распознавание звука. Так гитарный звук не находится на одной частоте: он состоит из ряда гармоник. Разница в гармониках - это то, что отличает звучание гитары и скрипки

даже при игре на одной и той же ноте. Другая проблема может возникнуть с чувствительностью микрофона: подавление чувствительности низкочастотной части спектра. В связи с этим проведен анализ последних исследований и публикаций по методам распознавания аудиообразов и алгоритмов определения частоты основного тона музыкального звука. Анализ публикаций показал, что в процессе распознавания целесообразно использовать преобразование Фурье для звуковой волны и принцип измерения частоты с помощью рамки (окна). Рассмотрена ADSR модель звука гитарной струны, которая имеет четыре характерных момента: атаку (англ. Attack), спад (англ. Decay), поддержку (англ. Sustain) и затухание (англ. Release). Определены этапы распознавания частоты звука при разработке системы для настройки гитары. Установлено, что необходима дополнительная предварительная обработка звука. Исследовано влияние преобразований Фурье на точность определения частоты основного тона. Результаты исследования показали, что повторное использование преобразования Фурье позволяет при частоте дискретизации 1,35 Гц повысить точность результата распознавания до 0,08 Гц. Найденный способ увеличения точности распознавания спектра позволяет разработать программу-тюнер в виде мобильного приложения.

Ключевые слова: распознавание звука, преобразование Фурье, гитарный тюнер.

Volkov O.S., Piatykor O. Ye.

SOUND FREQUENCY RECOGNITION PROBLEMS DURING THE DEVELOPMENT OF GUITAR TUNING SYSTEM

This article is devoted to the study of the guitar sound recognition process for solving the task of tuning the instrument using a mobile application. Guitar tuning refers to the correspondence of the each string frequency to the fundamental frequency. According to the international standard (ISO 16: 1975), each string has its own unique fundamental frequency. Problems that affect sound recognition are identified. So the guitar sound does not consist of one frequency: it consists of many harmonics. The difference in harmonics is what distinguishes the guitar and violin sound even when playing on the same note. Another problem may arise with microphone sensitivity: suppressing the sensitivity of the low-frequency part of the spectrum. In this regard, the analysis of recent studies and publications on the methods of audio images recognition and algorithms for determining the fundamental tone frequency of musical sound is carried out. Analysis of publications showed that in the process of recognition it is advisable to use the Fourier transform for a sound wave and the principle of measuring frequency using a frame (window). An ADSR model of the guitar string sound is considered, which has four characteristic points: Attack, Decay, Sustain and Release. The stages of recognizing the sound frequency during the development of a guitar tuning system are determined. It is established that additional preliminary sound processing is necessary. The influence of the Fourier transforms on the accuracy of determining the frequency of the fundamental tone is investigated. The results of the study showed that the reuse of the Fourier transform at a 1.35 Hz sample rate allows to increase the accuracy of the recognition result to 0.08 Hz. The found way of increasing the accuracy of spectrum recognition allows us to develop a tuner program in the form of a mobile application.

Keywords: sound recognition, Fourier transform, guitar tuner.

Рецензент:

Стаття надійшла 2019.10.10

УДК 669.162.23:681.52

Койфман А.А., Демкив В.Н., Симкин А.И.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ НАСАДКИ ДОМЕННОГО ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЯ

Выполнен анализ существующих методов оценки состояния воздухонагревателя, в частности его насадки. На основании существующих методов, была поставлена задача создания автоматической системы контроля состояния насадки воздухонагревателя. Выбраны основные режимные параметры воздухонагревателя, влияющие на эффективность его работы. Разработана структура автоматической системы непрерывного контроля состояния воздухонагревателя, в которую включен непрерывный контроль перепада давления в насадке, температура кожуха на различных уровнях, состава отходящих газов. Выбраны современные технические средства автоматизации. С использованием базы данных значений основных технологических параметров работы реального блока воздухонагревателей построена регрессионная зависимость, которая позволяет рассчитать коэффициент полезного действия работы каждого из воздухонагревателей. Выяснено, что регрессионная зависимость так же показывает «направление» и степень влияния каждого режимного параметра на теплотехническую эффективность работы воздухонагревателя. Выполнен расчет коэффициента полезного действия по каждому воздухонагревателю. Проведен сравнительный анализ расчетного КПД с технологическим. Показано, что расчетное значение практически совпадает с технологическим. С возможностью получения регрессионных зависимостей КПД и сопротивления насадки от основных параметров, характеризующих нагрева насадки и дутья, в режиме реального времени можно прогнозировать динамику изменения состояния воздухонагревателя или моделировать различные режимы работы блока. По результатам исследования можно утверждать, что разработанная система контроля может быть успешно внедрена и использована в доменном производстве.

Ключевые слова: *воздухонагреватель, насадка, температура купола, газодинамическое сопротивление, эффективность*

Постановка проблемы: Вследствие длительной эксплуатации воздухонагревателей без капитального ремонта температура купола на каждом из них снижена до 1300 против 1350 -1400 °С на момент пуска. Старение аппаратов приводит к росту газодинамического сопротивления насадки, крипу внутреннего оката камеры горения, частичному обрушению футеровки в зоне сочленения штуцера горячего дутья и шахты, а также к развитию эффекта «короткого замыкания». Чтобы снизить тепловые потери, поддержать максимально допустимые температуры нагрева дутья и КПД воздухонагревателей, а также определить очередность постановки аппаратов на ремонт необходимо тщательно изучить тепловой баланс аппаратов, их газодинамические характеристики, величины перетоков СО через разделительную стену, распределение температуры кожуха по высоте и периметру воздухонагревателей.

Для решения проблемы эффективной работы воздухонагревателей необходима разработка и внедрение автоматической системы непрерывной оценки состояния насадки. Это позволит в режиме реального времени оценивать тепловую эффективность аппаратов и своевременно определять целесообразность постановки теплообменника на ремонт того или иного разряда.