

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

**ВІСНИК**  
**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ**  
**«ХПІ»**

*Серія: Автоматика та приладобудування*

№ 15 ( 1187 ) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 2001 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2016

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 15 (1187). – 66 с.

### **Державне видання**

**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**

**КВ № 5256 від 2 липня 2001 року**

Мова статей – українська, російська

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого Наказом МОН України №1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року».*

### **Координаційна рада:**

Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.;

С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.;

Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.;

В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.;

В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.;

В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.;

Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

### **Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** А.М. Борисенко, д-р техн. наук, проф.

**Члени редколегії:** П.Ф. Щапов, д-р техн. наук, проф.; А.І. Гапон, канд. техн. наук, проф.;

О.Л. Резинкін, д-р техн. наук, с.н.с.; І.Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; Л.В. Дербунович, д-р техн.

наук, проф.; О.І. Рогачов, д-р техн. наук, проф.; Л.Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.; С.І. Кондрашов,

д-р техн. наук, проф.; Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; С.М. Порошин, д-р техн. наук, проф.;

М.В. Гунбин, канд. техн. наук, доц.; М.І. Корсунов, д-р техн. наук, проф.; Д.В. Сперанський, д-р

техн. наук, проф. (м. Москва); А.В. Івашко, к.т.н., проф.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Системний аналіз, управління та інформаційні технології», індексується в наукометричних базах **WorldCat** і **Google Scholar** і включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».

Протокол № 2 від 11 березня 2016 р.

**А. Б. БОГАЕВСКИЙ, А. Н. БОРИСЕНКО, Б. И. КУБРИК, С. А. ЛИТВИНЕНКО, Е.А. БОРИСЕНКО**

## **ВЛИЯНИЕ ЗАПАЗДЫВАНИЯ ПО ИЗМЕРЕНИЮ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ РЕГУЛИРОВАНИЯ МОЩНОЙ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ**

**Аннотация.** Проведено исследование влияния запаздывания по измерению частоты на показатели устойчивости и точности регулирования мощной дизель-генераторной установки с импульсным датчиком частоты в обратной связи. Используются методы теории нелинейных импульсных систем автоматического управления и моделирование переходных процессов системы регулирования. На основании критерия Найквиста определено минимально допустимое число зубьев в измерительной шестерне. Получены практические выражения по определению числа зубьев для обеспечения требуемой точности регулирования.

**Ключевые слова:** регулирование, частота, запаздывание, устойчивость, число зубьев, точность регулирования, измерительная шестерня

**Введение и постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими заданиями. Анализ последних исследований и публикаций.** Рост затрат на тепловую и электрическую энергию у промышленных предприятий привел к появлению у последних автономных когенерационных установок на основе мощных стационарных дизель-генераторов. В качестве основы когенерационной установки часто используют стационарные промышленные или вспомогательные корабельные дизель-генераторы, которые по своей мощности полностью обеспечивают потребности в тепле и электроэнергии небольшие компактно расположенные промышленные объекты. Часто дизель-генераторные установки переводят на газовое топливо. Газопоршневые когенерационные установки (мини-ТЭЦ) в настоящих условиях зачастую являются оптимальным решением энергоснабжения небольших предприятий, особенно в холодный период года.

В случае если дизель-генератор был переведен на газовое топливо, то качество регулирования при этом существенно определяется рабочими процессами дизеля с газовым топливом, рациональными схемами питания двигателя газовым топливом и для чего, очевидно, понадобится создание соответствующих элементов этих систем [1].

Стоимость дизель-генераторной установки мощностью 1,0 МВт и выше начинается от миллиона гривен и возрастает по мере увеличения мощности. Срок их эксплуатации, как правило, составляет десятки лет. Такие дорогие энергетические установки постоянно совершенствуются. Одним из эффективных направлений совершенствования является замена старых гидромеханических регуляторов частоты вращения коленчатого вала на современные микроконтроллерные регуляторы, которые позволяют снижать эксплуатационный расход топлива [3, 4], а также позволяют обеспечить жесткие требования по поддержанию частоты генерации автономной энергетической установки (50 Гц), которая в случае необходимости может работать параллельно с внешней сетью. Также необходимо учитывать особенности протекания рабочих процессов в двигателях [1].

Внедрение микроконтроллерных регуляторов

предполагает применение датчиков частоты вращения импульсного типа, которые устанавливаются напротив зубьев вращающейся шестерни [2], которая должна максимально жестко соединяться с коленчатым валом двигателя. Такая установка датчика позволяет в процессе регулирования частоты не учитывать механические люфты, которые негативно сказываются на качестве самого процесса регулирования.

Использование в цепи измерения частоты импульсных датчиков, снимающих дискретно во времени информацию с зубьев вращающейся шестерни, приводит для систем регулирования частоты вращения дизель-генераторов к образованию звена запаздывания.

**Цель работы.** Корректный выбор количества зубьев на измерительной шестерне представляет собой важную техническую задачу в процессе внедрения современных систем регулирования на энергетических установках. Особенно это важно для энергетических установок, созданных на базе корабельных стационарных дизель-генераторов, у которых на маховике (общепринятом месте расположения импульсных датчиков частоты для подобных систем) отсутствует зубчатый венец, так как запуск морских дизелей осуществляется сжатым воздухом, а не стартером, как в дизелях промышленного и железнодорожного применения. Подобную венцу конструкцию для уверенной работы датчиков необходимо создавать в процессе ремонта дизеля или при установке системы непосредственно на дизельном агрегате перед пусконаладочными работами. Процесс этот достаточно затратный во времени и требует высокой квалификации исполнителей. Поэтому путем уменьшения числа зубьев (отметок) для считывания информации о частоте можно снизить трудозатраты на этом ответственном этапе работы. Эта техническая задача также актуальна при внедрении современных электронных систем регулирования частоты на некоторых типах дизель-генераторов резервного (аварийного) электропитания энергоблоков атомных электростанций, у которых имеет место пуск дизеля сжатым воздухом.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния числа зубьев  $z$  на

устойчивость процесса регулирования частоты.

**Основная часть исследования.** Наличие звеньев с запаздыванием часто встречается в различных технологических процессах. Но в случае использования измерения частоты с помощью импульсных датчиков для микроконтроллерных регуляторов частоты образование звена запаздывания – технологическая неизбежность. Характеристики этого звена запаздывания и степень его влияния на показатели процесса регулирования определяются частотой вращения коленчатого вала двигателя и количеством зубьев измерительной шестерни  $z$ . Очевидно, что при фиксированном числе зубьев измерительной шестерни  $z$  с уменьшением частоты вращения величина времени запаздывания  $\tau_{\text{зап}}$  будет увеличиваться, а это приведет к ухудшению показателей регулирования. И, соответственно, увеличение частоты вращения приведет к уменьшению времени запаздывания и улучшению показателей.

Для достижения поставленных целей при выполнении настоящей работы использованы методы теории нелинейных импульсных систем автоматического управления и моделирование переходных процессов системы регулирования.

Передаточная функция звена с запаздыванием имеет вид

$$W_{\text{зап}}(p) = e^{-p\tau_{\text{зап}}} \quad (1)$$

Как показал Цыпкин Я. З., для исследования устойчивости систем с запаздыванием удобно применять критерий устойчивости Найквиста [5]. Формулировка критерия устойчивости Найквиста для систем с чистым запаздыванием аналогична формулировке для систем без запаздывания, имеющих дробно-рациональные передаточные функции.

Структурная схема одноконтурной САУ со звеном запаздывания в цепи измерения частоты вращения может быть представлена в виде, как показано на рис. 1

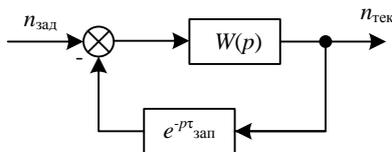


Рис.1 – Структурная схема одноконтурной САУ со звеном чистого запаздывания

Выражение для АФЧХ разомкнутой системы в этом случае:

$$\begin{aligned} W(j\omega) \cdot e^{-j\omega\tau_{\text{зап}}} &= A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} \cdot e^{-j\omega\tau_{\text{зап}}} = \\ &= A(\omega) \cdot e^{j(\varphi(\omega) - \omega\tau_{\text{зап}})} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $A(\omega)$  – амплитудная составляющая АФЧХ,  
 $\varphi(\omega) - \omega\tau_{\text{зап}}$  – фазовая составляющая АФЧХ.

Из выражения (2) видно, что звено запаздывания не меняет модуль  $A(\omega)$  АФЧХ разомкнутой системы, а вносит дополнительный отрицательный фазовый сдвиг  $\omega\tau_{\text{зап}}$ , пропорциональный частоте  $\omega$  с

коэффициентом пропорциональности, равным времени запаздывания  $\tau_{\text{зап}}$ .

Критические условия устойчивости для фаз имеют вид

$$\varphi(\omega_{\text{кр}}) - \omega_{\text{кр}}\tau_{\text{зап}} = -\pi, \quad (3)$$

т.е. общий угол сдвига не должен превышать величину  $-\pi$ .

Представим величины, входящие в выражения (2) и (3), через значения числа зубьев  $z$  и частоту вращения вала двигателя  $n_{\text{тек}}$  (см. рис.1), обычно измеряемую в оборотах за мин.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{тек}} = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_{\text{тек}}}{60}, \quad (4)$$

$$\tau_{\text{зап}} = \frac{T_{\text{тек}}}{z} = \frac{60}{n_{\text{тек}} \cdot z}, \quad (5)$$

$$\varphi_{\text{зап}}(\omega) = \omega \cdot \tau_{\text{зап}} = \frac{2 \cdot \pi}{z}. \quad (6)$$

Преобразования (4)–(6) показывают, что фазовый сдвиг, вносимый звеном запаздывания, зависит от числа зубьев  $z$ . Из (6) следует, что существует риск не обеспечить устойчивое управление при количестве зубьев 1 или 2 на шестерне, так как в этом случае звено запаздывания сразу же вносит сдвиг, равный согласно (3) критическому значению  $-\pi$  или больше.

Необходимо при этом отметить, что измерять частоту вращения можно по любому количеству зубьев в шестерне (начиная с 1-го), а для устойчивого управления замкнутой системой (рис. 1) в шестерне должно быть не менее 3-х зубьев.

Для иллюстрации полученных утверждений было проведено моделирование процессов регулирования частоты в системе на созданной в среде Simulinc модели [6]. Моделировались случаи переходных процессов в замкнутой системе для различного количества зубьев в измерительной шестерне. Моделирование показало, что устойчивое управление может быть обеспечено и при числе зубьев равном 2. Однако при этом необходимо перестроить (изменить) исходную передаточную функцию системы  $W(p)$ . Результаты моделирования при  $z = 2$  рис. 2 и 3.

Подтвердился в процессе моделирования факт улучшения показателей регулирования как при увеличении частоты вращения, так и при увеличении числа зубьев в измерительной шестерне.

Количество зубьев  $z$  в измерительной шестерне влияет также на частоту дискретизации по времени такого параметра как частота вращения вала дизель-генераторной установки, а, следовательно, от выбора числа зубьев зависит точность измерения текущего значения частоты  $n_{\text{тек}}$ . Частота следования импульсов с датчика определяется из выражения

$$f_{\text{датч}} = \frac{n_{\text{тек}} \cdot z}{60}. \quad (7)$$

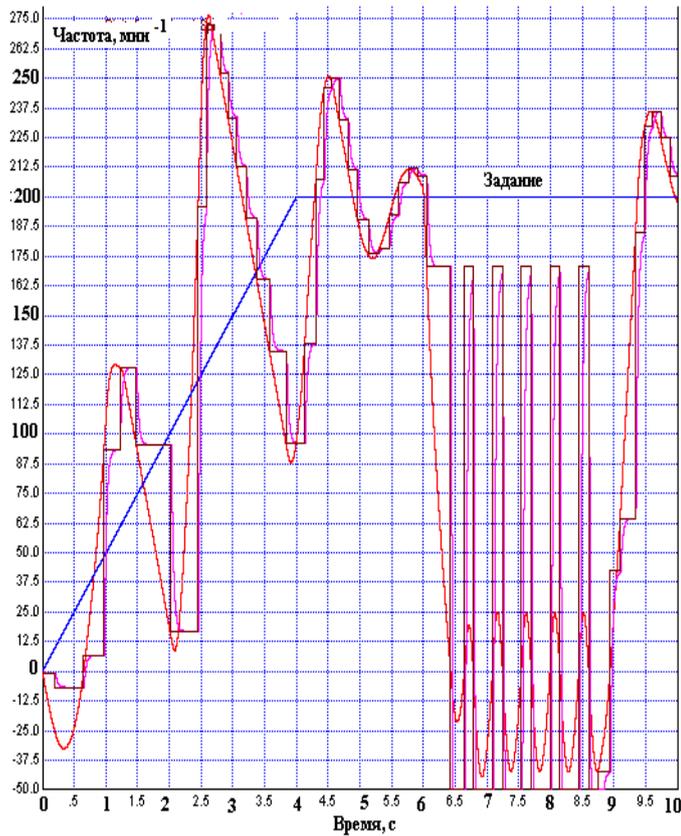


Рис.2 – Процессы в системе с  $z = 2$  без перестройки параметров

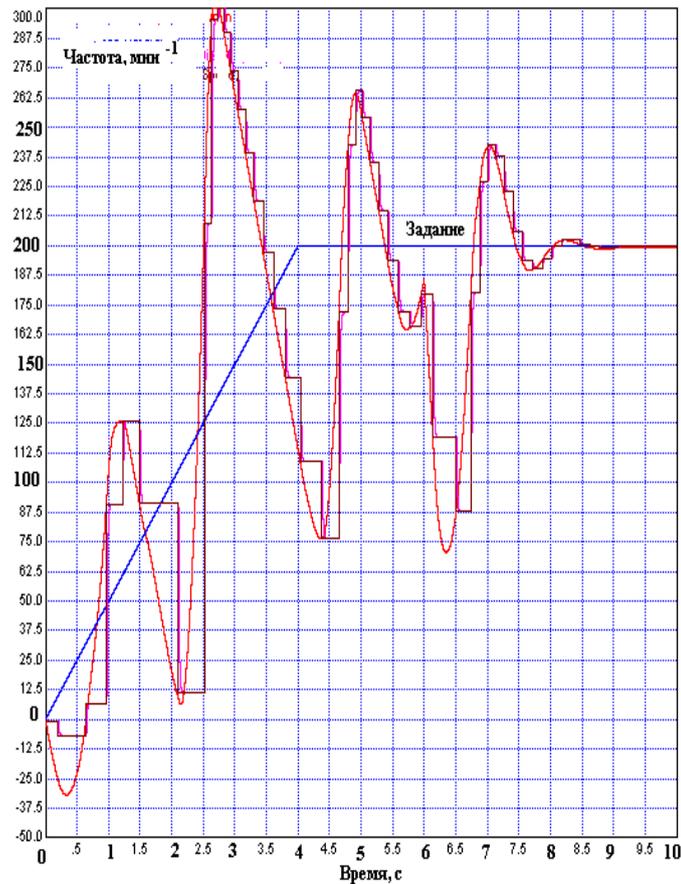


Рис.3 – Процессы в системе с  $z = 2$  с перестройкой параметров

Если диапазон регулирования частоты широк (что характерно для транспортных дизель-генераторных установок), то выбирать количество

зубьев необходимо для минимальной частоты вращения  $n_{мин}$ . С увеличением частоты вращения вала частота следования импульсов с датчика возрастает и

погрешность измерения из-за дискретизации по времени снижается.

Согласно теореме А. В. Котельникова частота вращения вала дизель-генератора, на котором установлены импульсный датчик с шестерней, должна быть минимум в 2 раза ниже, чем по выражению (7). На практике же для того, чтобы обеспечить достаточную точность измерения с помощью шестерни с числом зубьев  $z$ , частота согласно выражению (7) должна быть еще меньше. Для дальнейшей оценки примем это значение следующим

$$f_{\text{валаДГ}} = \frac{n_{\text{тек}} \cdot z}{2 \cdot 60 \cdot 10} = \frac{n_{\text{мин}} \cdot z}{1200}, \quad (8)$$

где  $n_{\text{мин}}$  - минимальная частота вращения вала дизель-генератора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$f_{\text{валаДГ}}$  - частота вала дизель-генератора, Гц.

Угловая частота вращения вала дизель-генератора  $\omega_{\text{валаДГ}}$  с учетом (8) определится из выражения

$$\omega_{\text{валаДГ}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{\text{мин}} \cdot z}{1200} \approx \frac{n_{\text{мин}} \cdot z}{200}. \quad (9)$$

Полученное выражение (9) фактически для электромеханической системы представляет собой частоту полосы пропускания. В этом случае через выражение частоты полосы пропускания, согласно [7], можно представить выражение для времени  $t_{\text{пп}}$  переходного процесса исполнительного механизма системы регулирования в следующем виде

$$t_{\text{пп}} = \frac{4,5}{\omega_{\text{валаДГ}}} = \frac{900}{n_{\text{мин}} \cdot z}. \quad (10)$$

Для известных исполнительных механизмов (актуаторов) дизель-генераторных установок различного назначения время  $t_{\text{пп}}$  переходного процесса составляет величину в пределах от 0,05 до 0,2 с в зависимости от конструкции. Приняв значение  $t_{\text{пп}}$  равным, например, 0,1 с при реальной минимальной частоте вращения вала дизель-генераторной установки  $n_{\text{мин}} 200 \text{ мин}^{-1}$  из выражения (10) определим число зубьев  $z = 45$ , при котором обеспечится необходимая точность измерения текущей частоты вращения.

На рис. 4 приведены результаты моделирования переходных процессов в системе с количеством зубьев  $z=45$ .

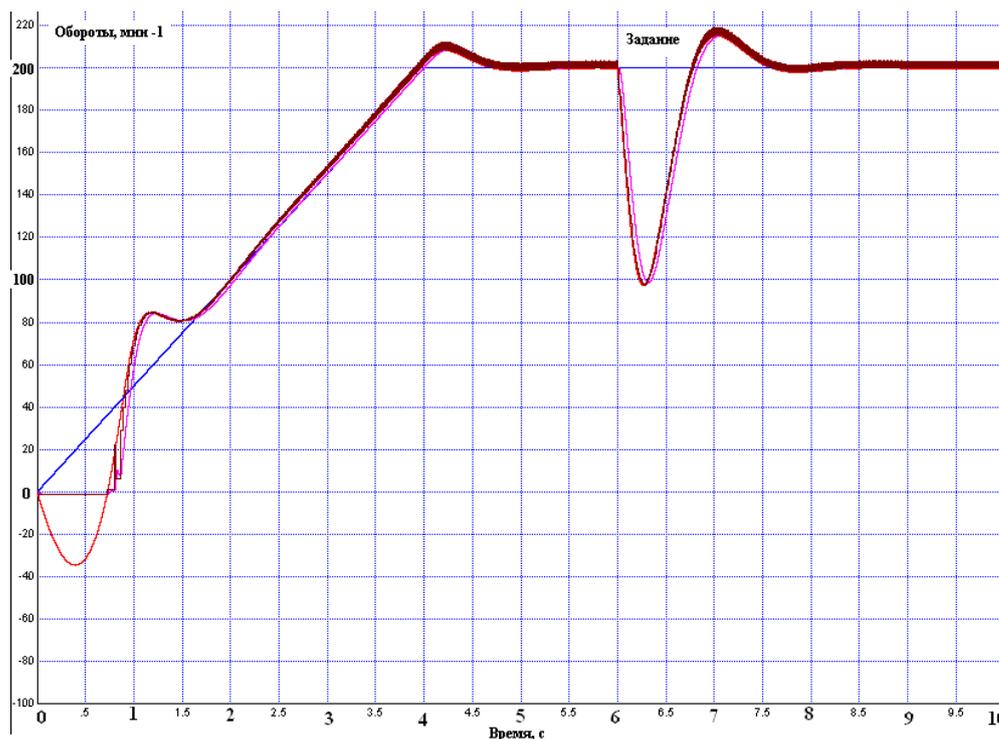


Рис.4 – Переходные процессы в системе с  $z = 45$

Многочисленные экспериментальные исследования на стендах и в эксплуатационных условиях, проведенные непосредственно при участии авторов, показали хорошее совпадение с теоретическими выкладками настоящей работы относительно практического выбора числа зубьев в измерительной шестерне.

Следует отметить, что предложенная методика учета влияния инерционности канала измерения

частоты вращения на показатели качества регулирования была использована авторами на практике при модернизации электронного регулятора угловой скорости дизель-генератора чешского производства ЧМЭ-3. Описанная методика может быть применена и во многих других случаях, когда шестерня для измерения частоты вращения вала дизель-генератора имеет всего лишь несколько зубьев.

**Выводы.** Полученные в исследованиях статьи выражения и результаты могут быть использованы

при обосновании характеристик и алгоритмов функционирования микроконтроллерных систем

управления в процессе их внедрения на стационарных дизель-генераторах

**Список литературы:** 1. *Абрамчук Ф. И.* Опыт конвертации дизелей в газовые двигатели с искровым зажиганием. / *Ф. И. Абрамчук, А. М. Левтеров* // Журнал «Автомобильный транспорт». – 2007. – №21. – С.15–23. 2. *Щеглов А. А.* Регулирование частоты вращения судового двигателя внутреннего сгорания. / *А. А. Щеглов* // Вестник МГТУ. – 2006. – Т. 9 – №2. – С. 312–317 3. *Косов Е. Е.* Совершенствование режимов работы силовых энергетических систем тепловозов / *Е. Е. Косов, Е. М. Шапран, В. В. Фурман* // Издавна. СНУ ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ. – 2006. – С. 278. 4. *Пойда А. М.* Моделирование переходных процессов тепловозного дизеля в эксплуатационном цикле с метою встановлення шляхів зниження витрат палива. / *А. М. Пойда, Д. Г. Сівих, Р. М. Карсекин*, // Н.-тех. звіт. №0199U003102. – Харків. – ХарДАЗТ. – 2001. – 96 С. 5. *Цыткин Я. З.* Теория нелинейных импульсных систем. / *Я. З. Цыткин, Ю. С. Попков* // Москва, Гл. ред. физ.-мат. литературы издательства «Наука». – 1973. – 416 С. 6. *Богачевский А. Б.* Компьютерная модель мощного транспортного дизель-генератора с электронной системой управления. / *А. Б. Богачевский* // Открытые информационные и компьютерные интегральные технологии. – Харьков. – Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ». – 2008. – вып. 38. – С. 150–169. 7. *Воронов А. А.* Теория автоматического управления. Ч. 2 / *А. А. Воронов* // М. Высшая школа. – 1986. – 504 С.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Abramchuk, F. I., A. M. Levterov* *Opyt konvertatsii dizelej v gazovye dvigateli s iskrovym zazhiganiem.* [Experience of converting of diesels in gas engines with the spark lighting]. Zhurnal «Avtomobil'nyj transport», vyp. no 21/2007. Print.

**Богачевский Александр Борисович** – доктор технических наук, Харьковский Национальный автомобильный университет, профессор кафедры «Автомобильная электроника», тел. (057)7161466.

**Bogachevskij Aleksandr Borisovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Kharkov National Automobile and Highway University, professor at the department of Automobile Electronics, tel.: (057) 7161466.

**Борисенко Анатолий Николаевич** – доктор технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры «Теоретические основы электротехники», тел.: (057)7076961.

**Borisenko Anatolij Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", professor at the department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, tel.: (057)7076961.

**Кубрик Борис Иванович** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Теоретические основы электротехники», тел.: (057)7076961.

**Kubrik Boris Ivanovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, tel.: (057)7076961.

**Литвиненко Светлана Анатольевна** – кафедра «Теоретические основы электротехники», старший преподаватель, (057) 7076961, e-mail: [svetlitvinenkoua@gmail.com](mailto:svetlitvinenkoua@gmail.com).

**Litvinenko Svetlana Anatol'evna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", head lecturer at the department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, tel.: (057)7076961, e-mail: [svetlitvinenkoua@gmail.com](mailto:svetlitvinenkoua@gmail.com).

**Борисенко Евгений Анатольевич** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Информационно-измерительные технологии и системы», тел.: (057) 7076180, e-mail: [4borisea@gmail.com](mailto:4borisea@gmail.com)

**Borisenko Evgenij Anatol'evich** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the department of Information-measuring system, tel. (057) 7076180, e-mail: [4borisea@gmail.com](mailto:4borisea@gmail.com).

Поступила (received) 23.02.2016

УДК 620.179.14

**Б. М. ГОРКУНОВ, А. А. ТИЩЕНКО, ШИБАН ТАМЕР****ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

В работе рассмотрены вопросы построения многопараметровых электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями. Приведены конструкции электромагнитных преобразователей с одним и двумя возбуждающими полюсами для выделения определенных преобладающих пространственных гармоник. Представлены принципиальные схемы включения преобразователей, реализующих трехпараметровый метод контроля параметров изделий. Сделан вывод о возможности использования электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями для многопараметровых измерений.

**Ключевые слова:** многопараметровые измерения, электромагнитный преобразователь, пространственно-периодическое поле.

**Введение.** Современные информационно-измерительные системы (ИИС) повсеместно внедряются в различных отраслях промышленности и энергетики [1]. Основными элементами ИИС являются первичные преобразователи (датчики) и устройства обработки информации. Если рассматривать устройства обработки информации, то все они сейчас строятся с применением микроконтроллеров и в этом плане достигли значительных успехов в достаточно точной обработке информации с последующим ее отображением, хранением и документированием. Что касается датчиков, то на современном этапе актуальным является вопрос разработки многопараметровых, многофункциональных первичных преобразователях физических величин.

В этом плане перспективными являются электромагнитные первичные преобразователи (ЭМП), выходными сигналами которых являются амплитуда и фаза или активное сопротивление и индуктивность. Такие датчики получили название двухпараметровые [2, 3].

Дальнейшее увеличение информационных параметров ЭМП может осуществляться несколькими путями. Возможно питание ЭМП напряжениями с различными частотами с последующей фильтрацией и выделением амплитуды и фазы на каждой частоте. Такая реализация многопараметровых датчиков достаточно сложная и не всегда отображает истинную картину происходящих процессов в объекте контроля из-за различной глубины проникновения поля (скин эффект). Разновидностью данного метода является возможность подачи импульсного напряжения на возбуждающую обмотку ЭМП, но дальнейшая обработка выходного сигнала громоздка и аналогична предыдущему методу.

**Цель статьи.** Цель данной работы заключается в рассмотрении нового перспективного метода и устройства многопараметрового ЭМП с пространственно-периодическим полем.

**Основная часть.** Сочетание различных возбуждающих полюсов и проводящего изделия образует дроссельный (параметрический) преобразователь [4]. Однако использование его в практике измерений затруднено в связи с тем, что сигналы, снимаемые с единственной обмотки преобразователя, включают в себя большое число

слабозатухающих пространственных гармоник поля. Кроме того, параметрические электромагнитные преобразователи имеют достаточно большие погрешности измерения из-за влияния температуры на величину активного сопротивления обмотки, которое является информативным параметром и участвует в определении информационных характеристик объекта контроля. Поэтому, при создании устройств с пространственно-периодическими полями целесообразно использовать трансформаторные преобразователи, которые дают возможность выделить несколько первых преобладающих гармоник, поскольку остальные затухают. При этом наличие трансляционной симметрии поля дает возможность использовать достаточно узкие петлевые измерительные обмотки, расположенные вдоль изделия параллельно возбуждающим проводникам.

С целью проведения многопараметровых измерений удобно пользоваться нормированной вносимой  $r$ -й составляющей магнитного потока (или вносимой составляющей ЭДС)  $n$ -й пространственной гармоники. В работе [5] приведены выражения для модуля и фазы такой компоненты потока.

Как описывалось ранее, для определения трех параметров изделия: радиуса, относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости ( $a$ ,  $\mu$  и  $\sigma$ ) нужно использовать две какие-либо пространственные гармоники поля. С точки зрения достижения высокой чувствительности и точности измерений в намагничивающей системе с одним возбуждающим полюсом лучше выделять 1-ю и 2-ю гармоники [5].

Конструкция электромагнитного преобразователя для выделения 1-й и 2-й преобладающих пространственных гармоник показана на рис. 1. Здесь ВП – возбуждающий полюс; ИС<sub>1</sub>, ИС<sub>2</sub> и ИС<sub>2</sub>\* – секции рамочных измерительных обмоток. Возбуждающий полюс и указанные секции располагаются в пазах диэлектрических опорных колец ОК. Преобразователь имеет технологическое окно, через которое можно устанавливать внутри рабочего объема цилиндрические изделия, у которых нет свободного доступа к их концам.

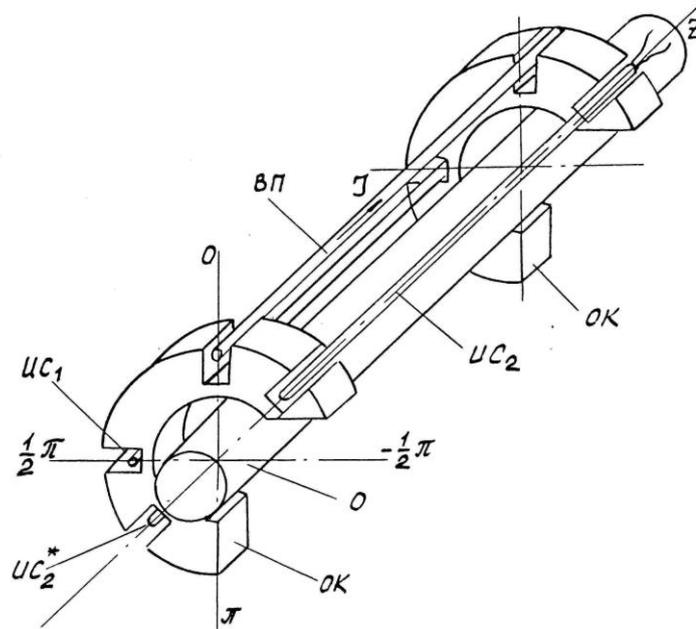


Рис. 1. – Электромагнитный преобразователь с одним возбуждающим полюсом и секциями измерительной обмотки

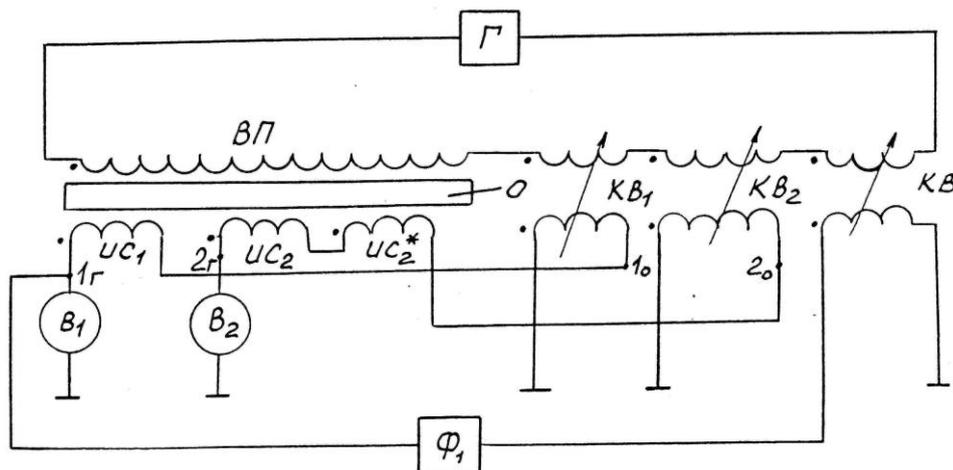


Рис. 2. – Электрическая схема включения электромагнитного преобразователя с одним возбуждающим полюсом

На рис. 2. представлена принципиальная схема включения обмоток преобразователя, реализующего трехпараметровый метод на основе выделения 1-й и 2-й пространственных гармоник поля. Схема содержит генератор  $\Gamma$ , три катушки переменных взаимных индуктивностей  $KB$ ,  $KB_1$  и  $KB_2$ , вольтметры  $B_1$ ,  $B_2$ , фазометр  $\Phi_1$ . Секции  $ИС_2$  и  $ИС_2^*$  соединены последовательно-согласно.

Секция  $ИС_1$  включена последовательно-согласно с вторичной обмоткой  $KB_1$ , а секции  $ИС_2$  и  $ИС_2^*$  соединены также последовательно-встречно с вторичной обмоткой  $KB_2$ . Вольтметры  $B_1$  и  $B_2$  измеряют  $r$ -е составляющие вносимых ЭДС 1-й и 2-й гармоник поля соответственно при наличии в преобразователе исследуемого образца  $O$ .

Сигналы, пропорциональные этим ЭДС, снимаются с зажимов  $1Г$  и  $2Г$  (см. рис. 2). При заданных значениях намагничивающего тока в ВП,

радиуса измерительной обмотки, частоты питания, площади рамки измерительной обмотки величины тех же составляющих ЭДС 1-й и 2-й гармоник поля преобразователя без изделия являются постоянными и известными. Эти ЭДС измеряют на зажимах  $1_0$  и  $2_0$  катушек взаимной индуктивности  $KB_1$  и  $KB_2$  (см. рис. 2). Катушка взаимной индуктивности  $KB$  вместе с фазометром  $\Phi_1$  используется для измерения фазы  $r$ -ой составляющей ЭДС 1-й гармоники.

На рис. 3 показана конструкция преобразователя с двумя возбуждающими полюсами  $ВП_1$  и  $ВП_2$ , по которым протекают противоположно направленные токи.  $ВП_1$  и  $ВП_2$  расположены на лучах при  $\varphi = 0$  и  $\varphi = \pi$ . Секции измерительных обмоток  $ИС_1$ ,  $ИС_3$ ,  $ИС_3^*$  и  $ИС_2^{**}$  имеют угловые координаты  $\pi/3$ ;  $\pi/2$ ;  $-\pi/6$ ;  $-(5/6)\pi$  соответственно. Конструкция этого преобразователя аналогична конструкции преобразователя, показанного на рис. 1

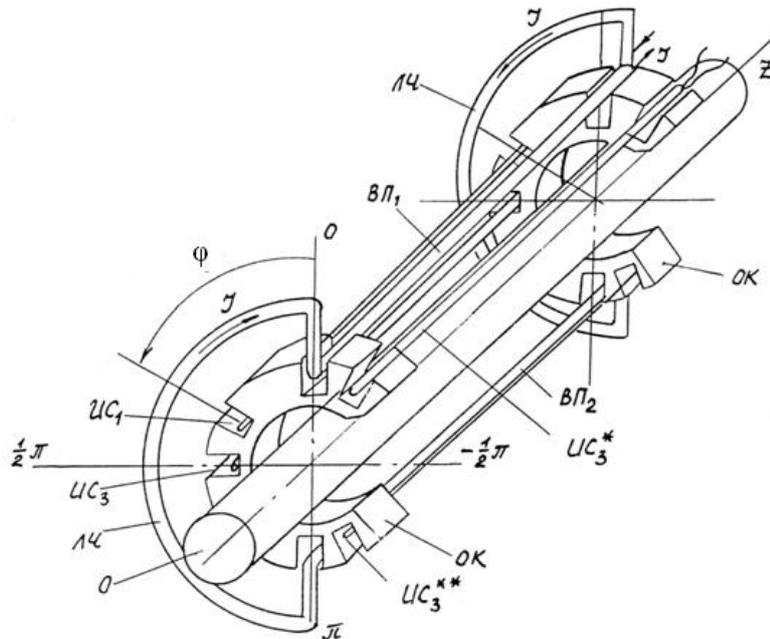


Рис. 3 – Электромагнитный преобразователь с двумя возбуждающими полюсами и секциями измерительной обмотки

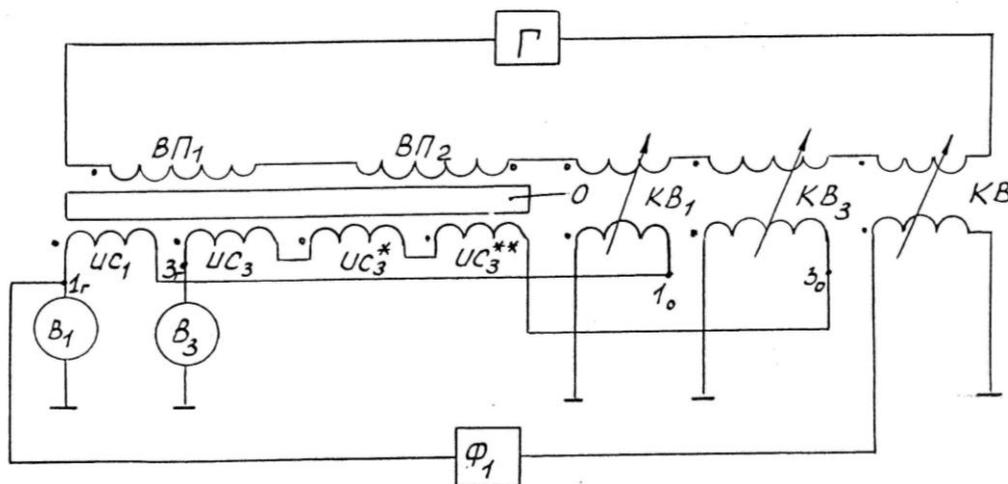


Рис. 4 – Электрическая схема включения электромагнитного преобразователя с двумя возбуждающими полюсами

Наличие двух возбуждающих полюсов с токами противоположных направлений дают возможность создать многовитковую намагничивающую обмотку (наматываемую одним проводом) с лобовыми частями ЛЧ этой обмотки (см. рис. 3). Преобразователь имеет также технологическое окно, через которое можно вводить образец в преобразователь.

На рис. 4 представлена схема включения электромагнитного преобразователя с двумя возбуждающими полюсами.

Секция  $ИС_1$  включена последовательно-встречно с вторичной обмоткой катушки взаимной индуктивности  $КВ_1$ . Секции  $ИС_3$ ,  $ИС_3^*$  и  $ИС_3^{**}$  соединены между собой последовательно-согласно (см. рис. 4), а с вторичной обмоткой  $КВ_3$  – последовательно-встречно. Вольтметры  $В_1$  и  $В_3$  измеряют  $r$ -ые составляющие вносимых ЭДС 1-й и

3-й гармоник поля, а фазометр  $\Phi_1$  – фазу 1-й пространственной гармоники.

Рассмотрим пример расчета ЭДС в измерительных проводниках для конструктивных решений с одним возбуждающим током (см. рис. 1).

Расположение измерительных проводников в первой системе примем следующее:  $ИС_1$  помещен над возбуждающим проводником  $ВП$  (можно их поместить и под  $ВП$ );  $ИС_2$  сдвинут по азимуту относительно  $ВП$  на угол  $\varphi = 90^\circ$ . С помощью  $ИС_1$  измеряется результирующая ЭДС первой, второй, третьей и т.д. пространственных гармоник. Измерительным проводником  $ИС_2$  определяется результирующая ЭДС четных гармоник с преобладающими второй и четвертой.

Рассчитаем на конкретном примере численные значения результирующих ЭДС измерительных проводников данной системы.

В работе использовались преобразователи с полями:  $W_n = 30$ ;  $d = 1,7 \cdot 10^{-2}$  м;  $I = 5$  А;  $f = 10^3$  Гц; длина ВП – 1 м; ВП – нитевидный проводник.

Исследуемое цилиндрическое изделие изготовлено из стали X18H10T с параметрами:  $\mu_r = 3$ ;  $\sigma = 0,132 \cdot 10^7$  См/м;  $a = 1,5 \cdot 10^{-2}$  м.

Сначала, согласно выражению, приведенному в работе [5], рассчитаем ЭДС различных гармоник в измерительных проводниках системы без изделия. При этом:  $E_{10} = 266$  мВ,  $E_{20} = 133$  мВ,  $E_{30} = 89$  мВ,  $E_{40} = 66$  мВ. Согласно [5] находим обобщенный параметр  $x = 2,68$ . Далее определяем значения нормированных ЭДС и фазовых углов, для перечисленных гармоник:  $A_1 = 0,187$ ;  $tg\Phi_1 = -0,360$ ;  $A_2 = 0,189$ ;  $tg\Phi_2 = -0,142$ ;  $A_3 = 0,170$ ;  $tg\Phi_3 = -0,073$ ;  $A_4 = 0,150$ ;  $tg\Phi_4 = -0,046$ . Затем определяем ЭДС для интересующих гармоник:  $E_1 = 39,7$  мВ;  $E_2 = 25,1$  мВ;  $E_3 = 15,1$  мВ;  $E_4 = 9,9$  мВ.

Таким образом, результирующая ЭДС измерительного проводника ИС<sub>1</sub> включающая в себя первую, вторую, третью и четвертую гармоники с учетом фазовых сдвигов каждой из них равна 21,8 мВ. Результирующая ЭДС ИС<sub>2</sub> при учете второй и четвертой гармоник составляет 3,97 мВ.

Величину погрешности, связанной с не учётом при вычислениях остальных гармоник можно оценить по отношению амплитуды первой отбрасываемой гармоники к алгебраической сумме ЭДС этой отбрасываемой и учитываемых гармоник. К примеру, для ИС<sub>1</sub> отбрасывание третьей гармоники приведет к погрешности расчета результирующей ЭДС, равной 5%. Эту погрешность можно уменьшить, если использовать ленточный возбуждающий проводник с конечной угловой шириной. Например, при  $\gamma = 15^\circ$  данная погрешность составляет 4%.

**Выводы.** Таким образом, каждая пространственная гармоника электромагнитного поля

по-разному проникает в проводящий цилиндр, а, следовательно, и реакция изделия на каждую зондирующую пространственную гармонику будет различна. Такое различие проявляется в изменении характерных признаков гармоник, т. е. их амплитуд и временных фаз. Это дает возможность использовать и выбрать тип преобразователя с пространственно-периодическими полями для многопараметровых измерений.

**Список литературы:** 1. Мишунин В. В. Информационно-измерительные и управляющие системы / В. В. Мишунин, Е. В. Корсунова, В. И. Ищенко. – Белгород : БелГУ, 2010. – 129 с. 2. Клюев В. В. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. – Москва: Машиностроение. – 2003. – 588 с. 3. Сухоруков В. В. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль. – Москва : Высшая школа, 1992.- 312 с. 4. Горкунов Б. М. Многопараметровый электромагнитный контроль токопроводов в пространственно-периодических полях / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко, И. В. Горкунова // Актуальні проблеми автоматизації і приладобудування. – Харьков : НТУ «ХПІ». – 2014. – № 9. – С. 39-40. 5. B. Gorkunov, A. Tyshchenko, I. Gorkunova, Vu Suan Vuong. Multiparametr electromagnetic sensors for information systems of control and management / B. Gorkunov, A. Tyshchenko, I. Gorkunova, Vu Suan Vuong // Electrotechnic and computer systems. – Odessa: ONPU. – 2015. – № 19(95). – P. 129-131.

**Bibliography (transliterated):** 1. Mishunin, V. V., E. V. Korsunova and V. I. Ishchenko. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*. Belgorod: BelGU, 2010. Print. 2. Klyuev, V. V. *Nerazrushayushchiy control*. Moscow: Mashinostroenie. – 2003. Print. 3. Suhorukov, V.V. *Nerazrushayushchiy control. Elektromagnitnyiy control*. Moscow: Vysshaya shkola, 1992. Print. 4. Gorkunov, B. M., A. A. Tyshchenko and I. B. Gorkunova. "Mnogoparametrovyy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskikh polyah." Kharkov : *Visnyk NTU «KhPI»*. – no. 9. – 2014.– P.39-40. Print. 5. Gorkunov, B. M., A. A. Tyshchenko and I. B. Gorkunova. "Mnogoparametrovyy elektromagnitnyiy kontrol tokoprovodov v prostranstvenno-periodicheskikh polyah ". Odessa : *Electrotechnic and computer systems*. No. 9(95). – 2015. – 129-131. Print.

Поступила (received) 01.02.2016

**Горкунов Борис Митрофанович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры "Информационно-измерительные технологии и системы", г. Харьков; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Gorkunov Boris Mitrofanovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of " Information-measuring technologies and systems", Kharkov; tel.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Тищенко Анна Анатольевна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры "Приборы и методы неразрушающего контроля"; г. Харьков, тел.: (095) 751-49-43; e-mail: [ant\\_31@mail.ru](mailto:ant_31@mail.ru).

**Tyshchenko Anna Anatolyevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.) , National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant at the Department of "The devices and methods of nondestructive testing"; Kharkov; tel.(095) 751-49-43; e-mail: [ant\\_31@mail.ru](mailto:ant_31@mail.ru).

**Шибан Тамер** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант; г. Харьков; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Shiban Tamer** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student; Kharkov; tel.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Б. М. ГОРКУНОВ, О. А. ЧОРНА, А. А. ТИЩЕНКО**

## **РОЗРОБКА АЛГОРИТМІЧНОГО І ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДІАГНОСТИЧНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНКИ СТАНУ ЕЛЕКТРОДВИГУНІВ НА ОСНОВІ ЗОВНІШНІХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ**

Запропонована структура діагностичної експертної системи діагностування електричних машин, принципи якої ґрунтуються на аналізі зовнішніх ознак, що характеризують статичні режими їх роботи. Розроблене алгоритмічне забезпечення здатне забезпечити високу цілеспрямованість аналізу і оперативність прийняття експертних висновків за оцінкою стану і визначенням несправностей електричних машин. Створене програмне забезпечення може використовуватись під час регламентних оглядів, або при виникненні підозри щодо початку розвитку аварійних процесів.

**Ключові слова:** діагностична система, експертна система, оцінка стану, електричні двигуни, зовнішні ознаки роботи.

**Вступ.** Функціонування технічних систем можна розглядати як відбиття зовнішніх і внутрішніх збурювань. Електромеханічна система (ЕМС) є складною динамічною системою, характеристики якої з достатньою для практики точністю можуть бути описані кінцевим набором параметрів, вхідні збурювання також можуть бути описані сукупністю параметрів. Якість функціонування ЕМС залежить від конструктивних параметрів і збурювань, які змінюються в часі й можуть викликати параметричні відмови. Зміну поточного стану можна контролювати, наприклад, по зовнішніх ознаках: змінам параметрів вібрацій, шуму, нагріванню, динамічним ударами та ін. усі ці зміни породжені внутрішніми процесами [1]. Знання цих процесів важливо для ефективної експлуатації. Оцінка стану й ремонт електричних машин (ЕМ) є невід'ємною частиною їх експлуатації. Існуючі методи оцінки стану й діагностики здебільшого вимагають зупинки ЕМ і виводу її з технологічного процесу: під час технічних оглядів, планово-запобіжних або капітальних ремонтів [2]. В останні роки з'являються теоретичні роботи зі створення систем моніторингу ЕМ, у тому числі в процесі їх роботи за вимірними сигналами струму й напруги, однак такі системи вимагають наявності системи вимірювання електричних параметрів, і як правило, перетворювача енергії для створення спеціальних режимів живлення, необхідних для оцінки стану ЕМ [3]. Задача оцінки стану ЕМ як складної електромеханічної системи з нелінійними характеристиками в багатьох випадках має неоднозначний і неєдине рішення. Це, з однієї сторони, не дозволяє повною мірою автоматизувати процес діагностики, а з іншої – вимагає ухвалення рішення від людини-оператора. При цьому людина-оператор повинна мати необхідні теоретичні знання й досвід [4].

З розвитком і вдосконалюванням обчислювальних комплексів і інформаційних технологій розвивається новий напрямок – комп'ютерна діагностика, яка тісно пов'язана з розробкою діагностичних систем (ДС), здатних обробляти не тільки кількісні дані, але й різного роду знання, проводячи аналіз поведінки технічних систем і ухвалюючи експертні рішення [6]. Враховуючи це, побудова експертної системи визначення

несправностей електричних машин на основі аналізу зовнішніх ознак, що характеризують режим роботи, є актуальною науково-практичною задачею.

**Мета.** Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення діагностичної системи визначення несправностей електричних машин на основі аналізу зовнішніх ознак, що характеризують режим роботи.

**Матеріал і результати досліджень.** Розроблене ПЗ складається з набору програмних файлів в яких організовується робота наступних модулів: модуль пошуку інформації; модуль редагування БЗ;

Модуль пошуку інформації використовується для отримання інструкцій, які зберігаються в БЗ, щодо усунення несправності по заданим зовнішнім ознакам. Модуль редагування використовується для внесення змін в БЗ.

Алгоритм роботи діагностичної системи наведений на рис. 1.

Вихідними даними для створення системи діагностики послужили матеріали, які містять відомості про типові експертні системи, про діючі класифікатори інформації, про норми й нормативи, про систему первинних документів. До них відносяться наступні вимоги:

- програмне забезпечення повинне бути доступним для виконання всіх автоматизованих функцій системи;

- програмне забезпечення системи повинне бути сумісне з інформаційним забезпеченням всіх підсистем, взаємодіючих з нею по змісту, по системі кодування, по методах адресації, по форматах даних, по формах подання інформації, одержуваної й видаваною даною підсистемою.

- сукупність інформаційних масивів повинна бути організована у вигляді електронних таблиць на машинних носіях;

- форми всіх документів, повинні бути зручні й погоджені з відповідними технічними характеристиками розповсюджених видів терміналів.

Інформаційне забезпечення діагностичної системи «ДСЕМ» містить у собі позамашинне й внутрішнє інформаційне забезпечення [6].

Позамашинне інформаційне забезпечення включає:

- систему класифікації й кодування інформації;
- оперативну документацію.

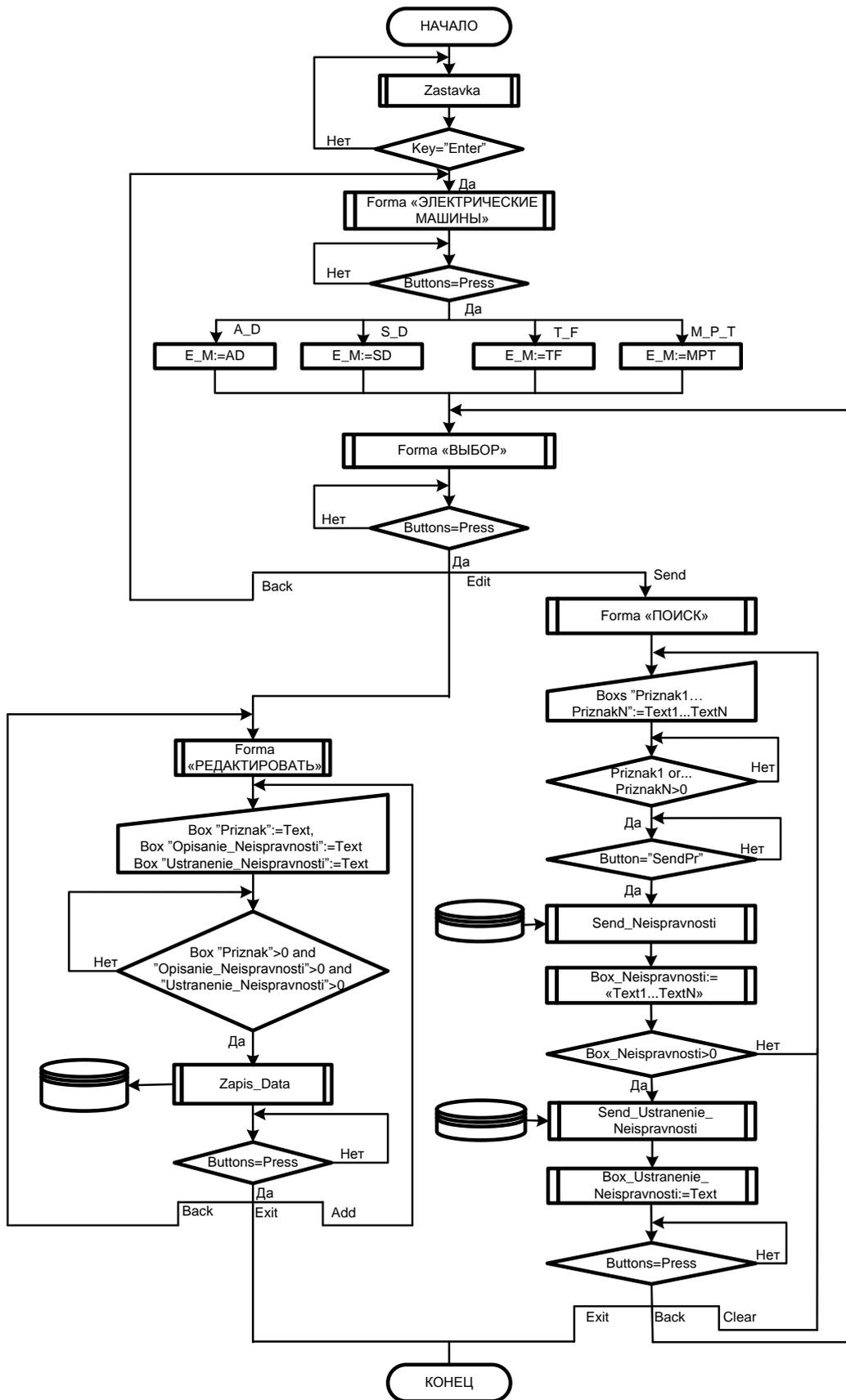


Рис. 1 – Алгоритм роботи ЕС

Внутрішньомашинне інформаційне забезпечення містить у собі:

- масиви даних, представлені у вигляді електронних таблиць;

- систему програм накопичення, введення й доступу до даних.

При проектуванні застосовувалися методи інфологічного моделювання. Ціль інфологічного моделювання – забезпечення найбільш природних для людини способів збору й подання тієї інформації, що

передбачається зберігати в створюваній базі даних. Інфологічна модель діагностичної системи зображена на рис. 2.

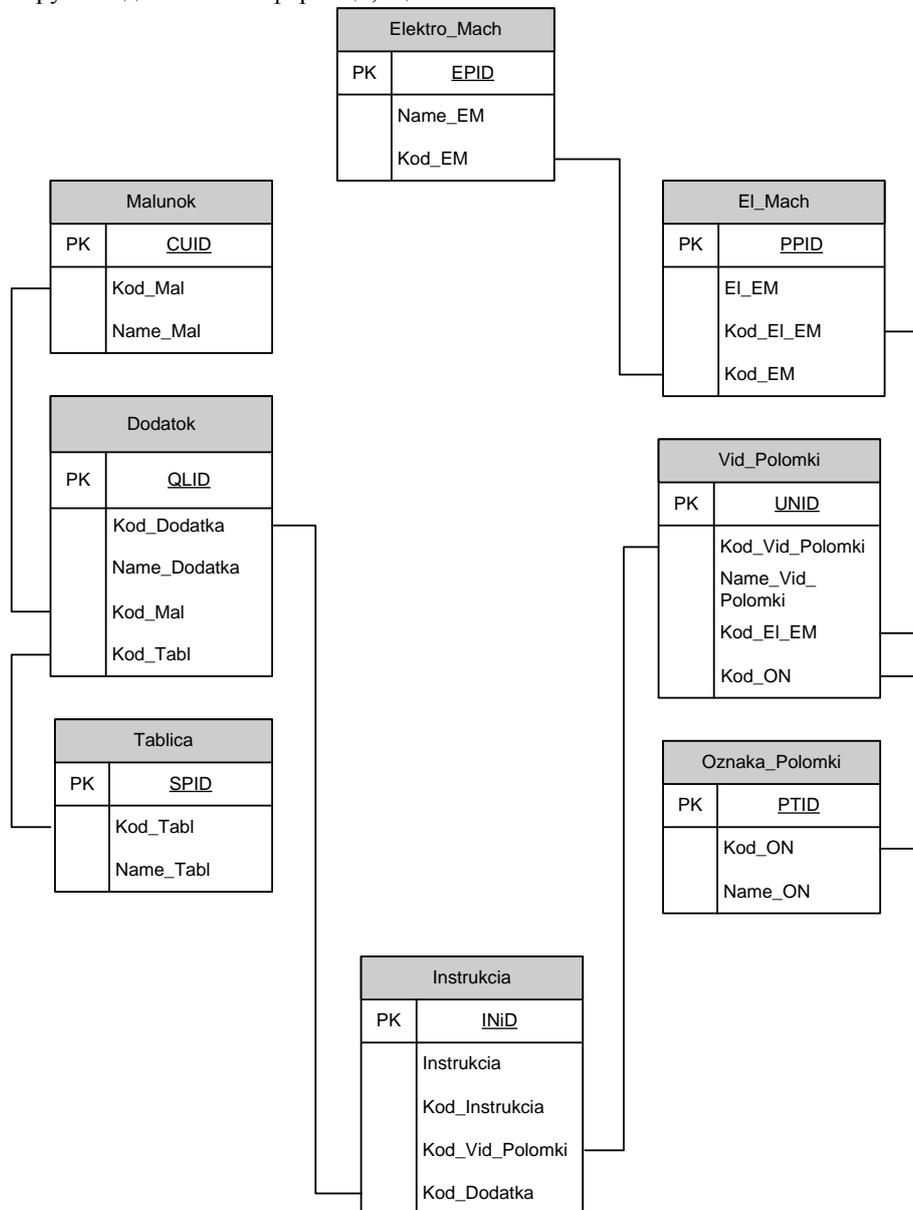


Рис. 2 – Інфологічна модель даних

Для завантаження ЕС запускається gemke.exe у вікні провідника.

Після запуску додатку з’являється заставка програми, зовнішній вигляд якої наведено на рис. 3.

Після натискання на кнопку «Далее» з’явиться вікно запиту паролю, що пропонує користувачеві ввести пароль для надання йому привілеїв вносити зміни в записи бази даних та видаляти їх.

Після завершення операції з вікном «Пароль» на екрані з’являється вікно «Выбор электромашины» (рис. 4). В разі якщо пароль не був введений або був введений невірно вищезгадане вікно матиме вигляд як на рис. 4, а, в іншому випадку – як на рис. 4, б.



Рис. 3 – Головне вікно програми

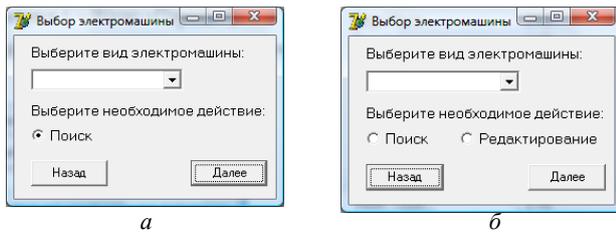


Рис. 4 – Вікно «Выбор электромашин»:  
а – випадок, коли пароль не був введений або був введений невірно; б – випадок, коли пароль був введений невірно

Робоча форма ЕС (рис. 5) має чотири випадуючих списки, що дозволяють вибрати елемент і характеристику електромашини, які мають відхилення від норми. Можливі причини несправностей відображаються у вигляді списку в правій частині вікна.

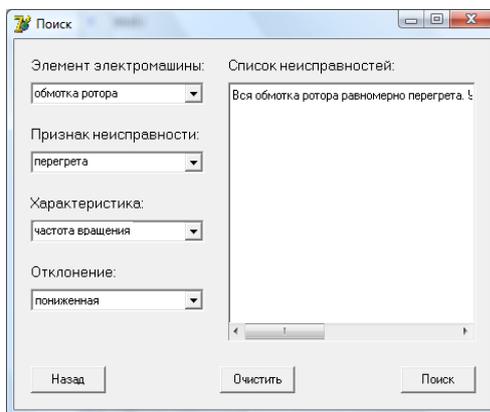


Рис. 5 – Вікно «Поиск»

Запропонована структура експертної системи, заснована на принципі аналізу зовнішніх ознак, що характеризують режим роботи ЕМ, здатна забезпечити високу цілеспрямованість аналізу і оперативність ухвалення експертних розв'язань за оцінкою стану і визначенням несправностей електричних машин.

**Горкунов Борис Митрофанович** – доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», профессор кафедры "Информационно-измерительные технологии и системы", г. Харьков; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Gorkunov Boris Mitrofanovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Information-measuring technologies and systems", Kharkov; tel.: (057) 707-69-34; e-mail: [gorkunov@kpi.kharkov.ua](mailto:gorkunov@kpi.kharkov.ua).

**Чорна Ольга Анатоліївна** – Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, старший викладач кафедри "Комп'ютерні і інформаційні системи"; тел.: (096) 969-08-53; e-mail: [diolan@rambler.ru](mailto:diolan@rambler.ru).

**Chorna Olga Anatoliyivna** – Kremenchuk Mykhailo Ostohradskiy National University, Senior Lecturer of Computer and Information Systems Department; (096) 969-08-53; e-mail: [diolan@rambler.ru](mailto:diolan@rambler.ru).

**Тищенко Анна Анатоліївна** – кандидат технических наук, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», ассистент кафедры "Приборы и методы неразрушающего контроля"; г. Харьков; тел.: (095) 751-49-43; e-mail: [ant\\_31@mail.ru](mailto:ant_31@mail.ru).

**Tyshchenko Anna Anatolyevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant at the Department of "The devices and methods of nondestructive testing"; Kharkov; tel(095) 751-49-43; e-mail: [ant\\_31@mail.ru](mailto:ant_31@mail.ru).

**Висновки.** Запропонована структура експертної системи діагностування, заснованої на принципі аналізу зовнішніх ознак, що характеризують режим роботи ЕМ. Діагностична система здатна забезпечити високу цілеспрямованість аналізу і оперативність ухвалення експертних висновків щодо оцінки стану і визначення несправностей електричних машин.

**Список літератури:** 1. Гемке Р.Г. Неисправности электрических машин / Р.Г. Гемке. Под ред. Р.Б. Уманцева. // 9-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 336с. 2. Гольдберг О.Д. Автоматизация контроля параметров и диагностика асинхронных двигателей / О.Д. Гольдберг, И.М. Абдулаев, А.Н. Абишев // Москва: Энергоатомиздат. – 1991. – 160 с. 3. Черный А.П. Мониторинг параметров электрических двигателей электромеханических систем / А.П. Черный, Д.И. Родькин, А.П. Калинов, О.С. Воробейчик // Монография. – Кременчуг: ЧП Шчербатых А.В. – 2008. – 244 с. 4. Ляткер И.И. Система непрерывного контроля и диагностики синхронных машин / И.И. Ляткер, А.Г. Мордкович, А.М. Несвижский // Электротехника. – 1996. – № 3. – С. 44–47. 5. Б.С. Стогний Интегрированные экспертные системы диагностирования в электроэнергетике / Стогний Б.С., Гуляев В.А., Кириленко А.В. и др.; Под ред. Стогния Б.С.; // АН Украины Ин-т электродинамики. – Киев: Наук. думка, 1992. – 248 с. 6. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем. / Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. // СПб: Питер, 2000. – 384с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gemke R.G. *Neispravnosti elektricheskikh mashin* / R.G. Gemke. Pod red. R.B. Umantseva. 9-e izd., pererab. i dop. – Leningrad: Energoatomizdat, Leningr. otd-niye, 1989. – 336p. 2. Goldberg O.D. *Avtomatizatsiya kontrolya parametrov i diagnostika asinkhronnykh dvigateley* / Goldberg O.D., Abdulayev I.M., Abiyev A.N.. – Moscow: Energoatomizdat, 1991. – 160 p. 3. Chornyi A.P. *Monitoring parametrov elektricheskikh dvigateley elektromekhanicheskikh sistem* / O.P. Chornyi, D.I. Rodkin, A.P. Kalinov, O.S. Vorobeychik: Monografiya. – Kremenchug: ChP Shcherbatiykh A.V., 2008. – 244 p. 4. Lyatker I.I., Mordkovich A.G., Nesvizhsky A.M. *Sistema nepreryvnogo kontrolya i diagnostiki sinkhronnykh mashin* // Elektrotekhnika. – 1996. – no 3. – p. 44–47. 5. Integrirovannye ekspertnye sistemy diagnostirovaniya v elektroenergetike // Stogny B.S., Gulyaev V.A., Kirilenko A.V. i dr.; Pod red. Stogniya B.S.; AN Ukrainy In-t elektrodinamiki. – Kiyev: Nauk. dumka, 1992. – 248 p. 6. Gavrilova T.A., Khoroshevsky V.F. *Bazy znany intelektualnykh sistem*. – Sankt-Peterburg: Piter, 2000. – 384p.

Надійшла (received) 04.02.2016

О. Н. ЕВСЕЕНКО

## ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ТИПОВ РЕГУЛЯТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОВЫХ ОБЪЕКТОВ

Проведен анализ существующих типов регуляторов для тепловых объектов; представлен алгоритм выбора типа регулятора в зависимости от величины транспортного запаздывания и времени переходных процессов объекта управления. Предложен закон управления на основе ШИМ-регулирования с предсказанием для управления тепловыми объектами с распределенными параметрами с большим транспортным запаздыванием; представлены результаты управления температурой объекта с помощью ШИМ-регулирования с предсказанием.

**Ключевые слова:** транспортное запаздывание, П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы, предиктор Смита, двух-, трёхпозиционный регулятор, ППИ-регулятор, регулятор Ресвика, ШИМ-регулятор с предсказывающим фильтром, объект с распределенными параметрами.

**Введение.** На данный момент из-за повышения тарифов на газ и электроэнергию всё больше людей отказывается от централизованного теплоснабжения и переходят к индивидуальному отоплению. Сразу же возникает проблема «правильной» настройки отопительного оборудования, так как чрезмерное увеличение температуры на нагревательном элементе ведет к перегреву помещений, что влечет за собой перерасход теплового ресурса и ухудшение комфортности проживания.

В качестве закона управления в большинстве современных котельных в Украине используется кривая погодозависимого регулирования: по температуре наружного воздуха, в зависимости от мощности и типа котла, выставляется температура теплоносителя.

Недостатком такого метода является настройка параметров регулятора в ручном режиме, при котором не учитываются характеристики конкретного объекта управления. Поэтому всё больше котельных переходят к использованию промышленной автоматики с «интеллектуальными» законами управления.

**Цель исследований** – проанализировать существующие законы управления тепловыми объектами, работающие в реальном масштабе времени и способные предсказывать температуру на определённый промежуток времени; представить альтернативный закон управления объектами с большим транспортным запаздыванием.

Транспортное запаздывание часто встречается в технологических процессах, когда материал перемещается с определенной скоростью из одной точки в другую без какого-либо изменения его свойств и характеристик. Оно может наблюдаться при течении жидкости или газа через трубы, при движении волокна или полосы какого-либо материала (ткань, бумага, резина и др.) [1].

Время транспортного запаздывания рассчитывается по формуле (1).

$$t_0 = \frac{L_u}{v}, \quad (1)$$

где:  $t_0$  – время транспортного запаздывания, с;

$L_u$  – расстояние от датчика до исполнительного механизма, м;

$v$  – скорость перемещения вещества или энергии, м/с;

Для определения динамических характеристик объекта управления на практике решают задачу идентификации. При нулевых начальных условиях на объект управления подается единичный ступенчатый сигнал. На выходе получают переходную характеристику.

Пример переходной характеристики представлен на рис. 1.

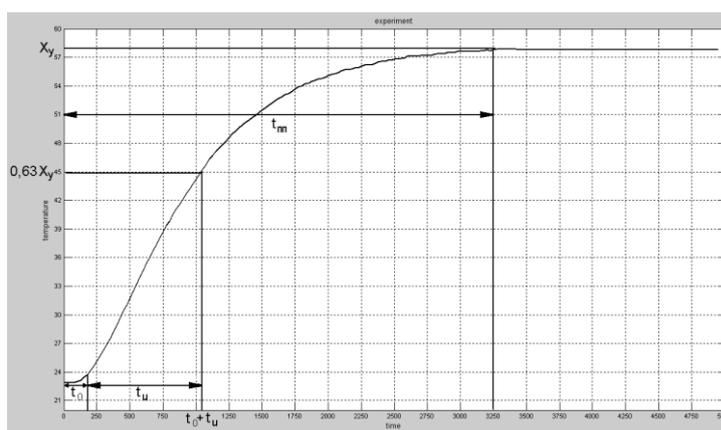


Рис. 1 – Переходная характеристика объекта управления

По переходной характеристике определяются следующие характеристики объекта управления –  $X_y$ ,  $t_0$ ,  $t_u$ ,  $K$ ,  $t_{nn}$ , где:

$X_y$  – установившееся значение. Максимальное значение, которое может быть достигнуто при данной мощности нагревателя;

$t_u$  – постоянная времени объекта – время, за которое температура достигнет значения  $0,63 \cdot X_y - t_0$  ;  
 $t_{nn}$  – время переходных процессов;  
 $K = \frac{X_y}{Q}$  – динамический коэффициент усиления,  
 отношение величины технологического параметра в установившемся режиме  $X_y$  к входной величине  $Q$  .

Исходя из соотношения  $\frac{t_o}{t_{nn}}$  объекты делятся на (рис. 2):

1. Объекты без запаздывания:  $\frac{t_o}{t_{nn}} < 0.05$ ;

2. Объекты с большой инерционностью и с малым запаздыванием:  $0.05 < \frac{t_o}{t_{nn}} < 0.2$ ;

3. Объекты с существенным запаздыванием:  $\frac{t_o}{t_{nn}} > 0.2$ .

Исходя из соотношения  $\frac{t_o}{t_{nn}}$  регуляторы можно разделить на следующие группы (рис. 2).



Рис. 2 – Выбор регулятора в зависимости от отношения времени транспортного запаздывания ко времени переходных процессов

**Двухпозиционный регулятор**

Данный регулятор температуры применяется для управления объектами с малым запаздыванием ( $\frac{t_o}{t_{nn}} < 0.05$ ).

Величина гистерезиса  $H$  влияет на точность регулирования температуры. Уменьшение величины зоны гистерезиса увеличивает не только точность регулирования, но и частоту включения нагревательного элемента, что приводит к быстрому износу элементов коммутации.

Качество регулирования определяется параметрами объекта регулирования – тепловой инерцией, мощностью нагревателя и т.д.

Достоинством данного регулятора является простота в настройке и эксплуатации.

Статическая характеристика двухпозиционного регулятора приведена на рис. 3.

Алгоритм работы двухпозиционного регулятора определяется по формуле (2):

$$\begin{cases} Q = Q_{max}, t < t_0 - H \\ Q = 0, t > t_0 \end{cases} \quad (2)$$

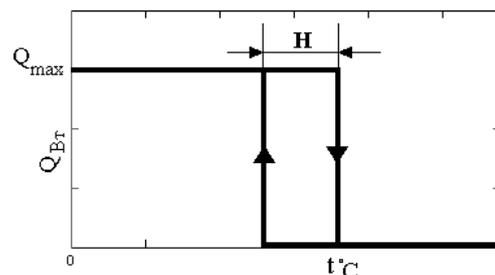


Рис. 3 – Статическая характеристика двухпозиционного регулятора

**Трёхпозиционный регулятор**

Трёхпозиционные регуляторы используются для систем управления уровнем веществ; переключением исполнительных механизмов; нагревания, распределения и смешивания различных потоков веществ с помощью трехходовых клапанов, кранов, смесителей, реверсивных электродвигателей, сервоприводов и др.

У трёхпозиционных регуляторов исполнительный механизм может занимать три положения: полностью открытое, нормальное (среднее) или полностью закрытое.

Данный регулятор, по сравнению с двухпозиционным регулятором, имеет более быструю реакцию системы регулирования на управляющее воздействие, высокую точность и качество регулирования.

Статическая характеристика трехпозиционного регулятора приведена на рис. 4.

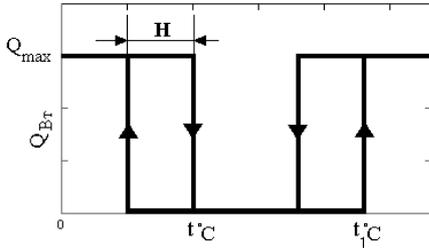


Рис. 4 – Статическая характеристика трёхпозиционного регулятора

**ПИД-регулятор**

ПИД-регуляторы позволяют обеспечить для объектов с малым запаздыванием и большой инерционностью ( $\frac{t_o}{t_{nn}} < 0.2$ ) высокое качество управления с ошибкой регулирования  $< 1\%$ . Однако, при  $\frac{t_o}{t_{nn}} > 0.2$  ПИД-регулятор обладает плохим качеством регулирования и может перейти в режим автоколебаний [2].

ПИД-регулятор формирует управляющий сигнал, состоящий из суммы трёх слагаемых (3).

$$U(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + T_d \frac{d\varepsilon(t)}{dt} \quad (3)$$

Структурная схема ПИД-регулятора представлена на рис. 5.

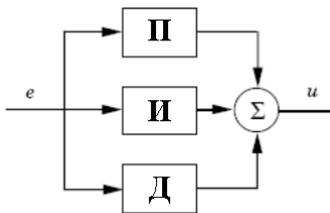


Рис. 5 – Структурная схема ПИД-регулятора

ПИД-регулятор состоит из трёх составляющих – пропорциональная (П), интегральная (И), дифференциальная (Д).

П-регулятор является одним из самых простых и распространенных алгоритмов управления. Выходной

сигнал П-регулятора пропорционален входному, с некоторым коэффициентом пропорциональности  $K$ .

Достоинством П-регулятора является простота настройки, отсутствие инерционности, высокое быстродействие.

Недостаток П-регулятора – наличие статической ошибки, из-за которой регулируемая величина не может стабилизироваться на заданном значении.

Для устранения статической ошибки к П-регулятору добавляют интегральную составляющую (И-регулятор), которая пропорциональна интегралу по времени от отклонения регулируемой величины.

При отсутствии внешних возмущений регулируемая величина стабилизируется на заданном значении, сигнал пропорциональной составляющей становится равным нулю, а выходной сигнал обеспечивается интегральной составляющей [2].

Достоинством И-регулятора является отсутствие ошибки регулирования в установившемся состоянии ( $\varepsilon_{уст} = 0$ ), а недостатками – низкое быстродействие и возможность возникновения автоколебаний в случае некорректного выбора коэффициента  $K_i$ .

Дифференциальная составляющая (Д-регулятор) предназначена для прогнозирования и противодействия будущим отклонениям. Использование Д-регулятора увеличивает быстродействие системы, но вместе с тем появляется значительное перерегулирование, что приводит к неустойчивости системы.

В зависимости от комбинаций звеньев П, И, Д возможны вариации регуляторов – ПИ, ПД, ПИД.

**Предиктор Смита**

Для управления объектами с отношением  $\frac{t_o}{t_{nn}} > 0.2 \dots 0.5$  используют регуляторы, содержащие блоки для предсказания и устранения поведения объекта на время транспортного запаздывания  $t_o$ .

Впервые структура такого регулятора была предложена Смитом в 1957 году [3], поэтому данный регулятор в литературе называется предиктором Смита.

Цель предиктора Смита – предсказать величину сигнала на выходе объекта до того, как он там появится на самом деле.

За счет этого предсказания из модели исключается величина запаздывания, что даёт возможность прогнозирования поведения объекта до момента появления сигнала на выходе.

Структурная схема предиктора Смита представлена на рис. 6.

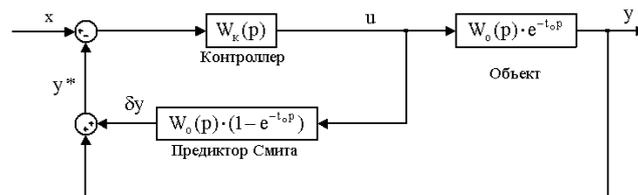


Рис. 6 – Структурная схема классического предиктора Смита

Предиктор Смита имитирует разницу между моделью процесса с зоной нечувствительности и реальным объектом. Этот корректирующий сигнал добавляется к измеренному выходному сигналу, чтобы предсказать, какой сигнал был бы на выходе, если бы не было запаздывания. Прогнозируемое значение  $y^*$  подается на контроллер  $W_k(p)$ , который корректирует управляющее воздействие  $U$  [4].

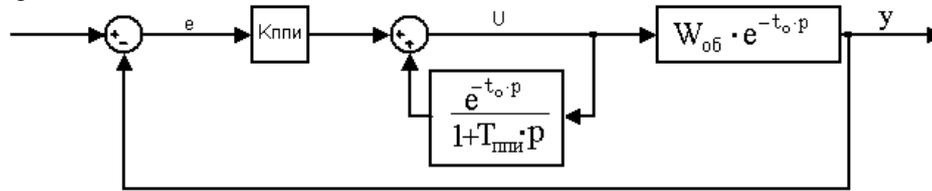


Рис. 7 – Структурная схема классического ППИ-регулятора

Предсказание ППИ-регулятора формируется путем коррекции управляющего воздействия, которое было принято, но еще не появилось на выходе из-за задержки в процессе. Выходной сигнал формируется по формуле (4).

$$U(p) = \frac{E(p)}{\lambda \cdot k_p} \left(1 + \frac{1}{T_u \cdot p}\right) \cdot - \frac{U(p)}{\lambda \cdot T_u \cdot p} (1 - e^{-t_o \cdot p}), \quad (4)$$

где  $\lambda$  – настраиваемый параметр

$T_u$  – время интегрирования

Недостатком ППИ-регулятора является высокая чувствительность к внешним возмущениям.

**Регулятор Ресвика**

Регулятор Ресвика (рис. 8) предназначен для устранения транспортного запаздывания, которое

**ППИ-регуляторы**

Предиктивный ПИ-регулятор (ППИ-регулятор) является одной из модификаций предиктора Смита [2]. Структурная схема ППИ-регулятора представлена на рис. 7.

приводит к неустойчивости замкнутых систем и затрудняет решение задачи синтеза [5].

Во внутренней положительной обратной связи регулятора Ресвика содержится звено чистого запаздывания, которое предсказывает величину выходного сигнала после изменения величины управляющего воздействия  $U$ .

Это звено моделирует динамику объекта и постоянно компенсирует реальный выходной сигнал, поэтому из основного контура исключается чистое запаздывание  $t_o$ .

В случае неравенства запаздывания объекта  $t_o$  и моделируемого запаздывания  $t_{o,mod}$  система может выйти за границы устойчивости.

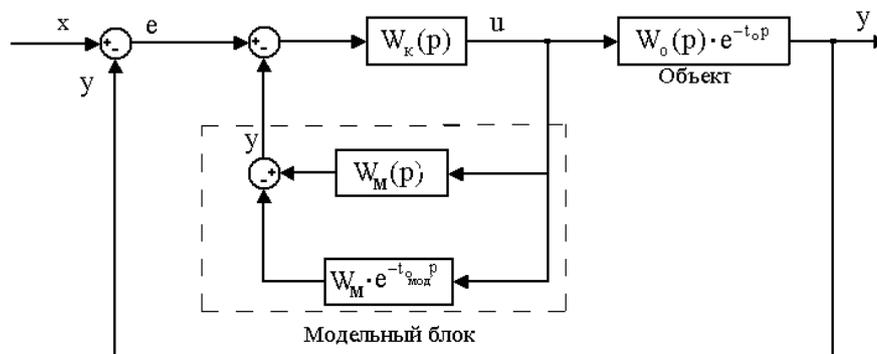


Рис. 8 – Структурная схема регулятора Ресвика

**Регулятор с внутренней моделью**

В качестве альтернативы существующим типам регуляторов предлагается метод с использованием ШИМ-регулятора с предсказывающим фильтром [6].

Для предсказания температуры на заданный интервал времени и выработку управляющего воздействия первоначально, как и для других методов, необходимо получить переходную характеристику объекта управления.

По полученной переходной характеристике объекта управления определяются время переходного процесса  $t_{mn}$  и время транспортного запаздывания  $t_o$ .

Затем время переходного процесса делится на  $N$  равных интервалов длительностью  $t_u$  и снимаются переходные характеристики длительностью  $j \cdot t_u$ ,  $1 \leq j \leq N$ ,  $j \cdot t_u < t_{mn}$ .

Результаты экспериментов представлены на рис. 9.

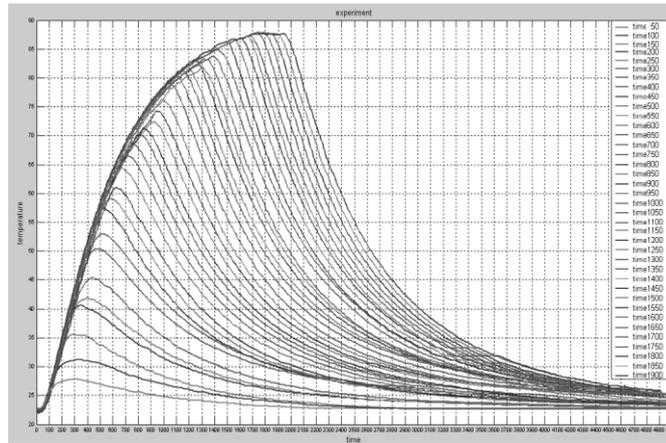


Рис 9 – Семейство характеристик длительностью  $j \cdot t_u$

В точках  $j \cdot t_u$ , где  $j \cdot t_u = 1 \cdot t_u, 2 \cdot t_u, \dots, N \cdot t_u$  – измеряется значение выходного сигнала (температуры)  $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N$ . По формуле (5) рассчитываются коэффициенты передачи теплового воздействия  $\eta_{i,j}$  для управления тепловым полем в момент времени  $j$ .

$$\eta_{i,j} = \frac{\Delta\theta_i}{Q \cdot t_{ij}} \Big|_{t_{ij} = t_u \cdot j}, \quad (5)$$

где:  $\Delta\theta_i$  – приращение температуры на  $i$ -том интервале  $^{\circ}\text{C}$ ;

$Q$  – мощность теплового потока, Вт;

$t_{u,j}$  – длительность  $j$ -го импульса,  $1 \leq j \leq N$ , с;

После запуска системы программного регулирования начинается вычисление прогнозируемого изменения температуры объекта относительно начальной температуры  $\Theta_0$  [7].

По формуле (6) в моменты времени  $j \cdot t_d$ , где  $j \cdot t_d = 1 \cdot t_d, 2 \cdot t_d, \dots, N \cdot t_d$  рассчитывается полное отклонение прогнозируемой температуры объекта от

температуры, заданной программно –  $\Delta$ , и принимается решение о включении нагревателя.

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 = \Delta\Theta_j^3 - \Delta\Theta_j^p + \Delta\Theta_{j-1}^3 - \Delta\Theta_{j-1}^d, \quad (6)$$

где  $\Delta\Theta_j^3$  – заданная температура объекта,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta\Theta_j^p$  – предсказанная температура объекта,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\Delta\Theta_{j-1}^d$  – текущая температура объекта,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_d$  – период дискретизации, с;

По формуле (7) вычисляется длительность теплового воздействия на объект:

$$\{\Delta t_u\} = \frac{-\Delta}{Q \cdot [\eta]}, \quad (7)$$

где  $Q$  – мощность теплового потока, Вт;

$[\eta]$  – массив коэффициентов передачи теплового воздействия;

Результаты эксперимента по поддержанию заданной температуры представлены на рис. 10.

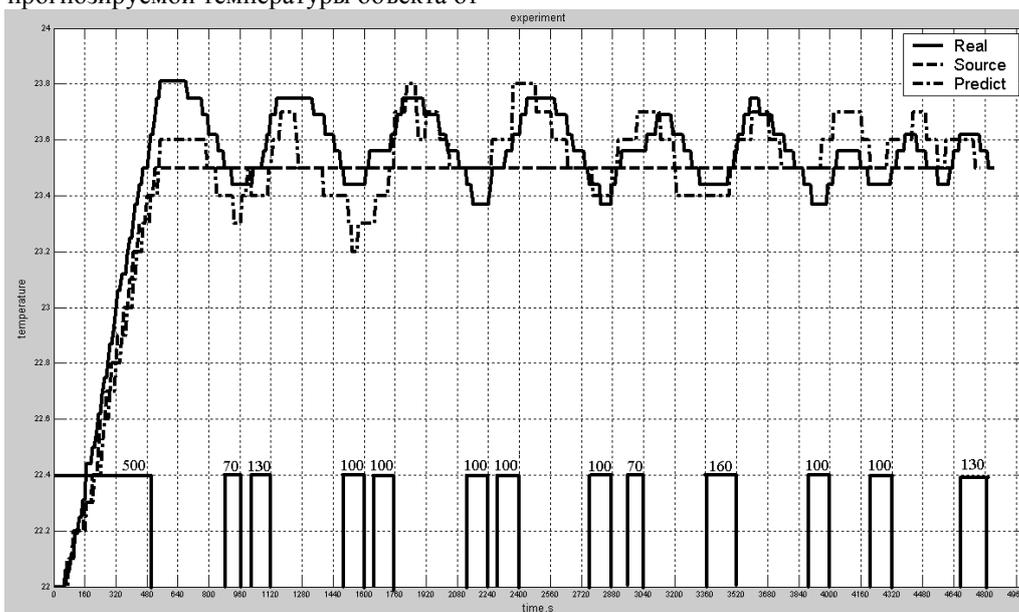


Рис 10 – Реальный эксперимент для заданного температурного режима объекта

Максимальное отклонение полученной температурной кривой от заданной составило 0,25 °С

Существует особый класс регуляторов, основанный на принципах нечеткой логики, генетических алгоритмах и нейронных сетей. Подробную информацию об их настройке и использовании можно найти в [8].

#### Выводы

В статье проведен обзор существующих регуляторов для тепловых объектов. Показано, что для объектов с большой величиной транспортного запаздывания следует применять регуляторы с предсказанием. Установлено, что существующие типы

**Список литературы:** 1. Дралюк Б. Н. Системы автоматического регулирования объектов с транспортным запаздыванием / Б. Н. Дралюк, Г. В. Синайский. – М.: Энергия, 1969. – 73 с. 2. Astrom K. J. PID Controllers Theory, Design, and Tuning / Astrom K. J., Hagglung T. – 2-nd ed. – USA, 1995. – 344 p. 3. Smith O. J. M. Close control of loops with dead time / O. J. M. Smith // Chemical Engineering Progress. – 1957. – Vol. 53. – P. 217–235. 4. Syder, J. Dead-time compensators: performance and robustness issues / Syder J., Heeg T., O'Dwyer A. // Proceedings of Process Control and Instrumentation, July 26-28 2000, Glasgow, Scotland. – Glasgow, 2000. – P. 166–171. 5. Ротач В. Я. Теория автоматического управления / В. Я. Ротач. – М.: МЭИ, 2004. – 400 с. 6. Спосіб програмного управління тепловим об'єктом з застосуванням широтно-імпульсної модуляції: пат. на корисну модель № 81276 Україна: МПК G05D 23/19 (2006.01) / Савицький С. М., Гапон А. І., Качанов П. О., Євсеєнко О. М., Вискребенцев В. О.; заявник Нац. техн. ун-т «Харк. політехн. ін-т». – № u201300059; заявл. 02.01.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с. 7. Евсеенко О. Н. Получение исходных данных для проведения эксперимента по управлению температурой объекта с помощью ШИМ-модуляции и предсказывающего фильтра / О. Н. Евсеенко, С. М. Савицкий, Д. В. Сальников // Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки: матеріали IV Міжнарод. наук.-практ. конф. / Чернів. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича – Чернівці, 2014. – С. 165–166. 8. Денисенко В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Ч. 2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rlda.ru/Denisenko\\_PID\\_07.pdf](http://www.rlda.ru/Denisenko_PID_07.pdf). – Загл. с экрана.

регуляторов с предсказанием – ППИ-регулятор, регулятор Ресвика, предиктор Смита качественно обрабатывают алгоритм управления только при отсутствии внешних возмущений.

Предложен алгоритм с использованием ШИМ-регулятора и предсказывающего фильтра, где длительность управляющего воздействия определяется по величине суммарной ошибки рассогласования и массива коэффициентов передачи теплового воздействия. В данном регуляторе внешние возмущения компенсируются за счет подведения дополнительно теплового потока.

**Bibliography (transliterated):** 1. Drajluk B. N. Sistemy avtomaticheskogo regulirovanija ob'ektov s transportnym zapazdyvanijem / B. N. Drajluk, G. V. Sinajskij. – M.: Jenergija, 1969. – 73 p. 2. Astrom K. J. PID Controllers Theory, Design, and Tuning / Astrom K. J., Hagglung T. – 2-nd ed. – USA, 1995. – 344 p. 3. Smith O. J. M. Close control of loops with dead time / O. J. M. Smith // Chemical Engineering Progress. – 1957. – Vol. 53. – P. 217–235. 4. Syder, J. Dead-time compensators: performance and robustness issues / Syder J., Heeg T., O'Dwyer A. // Proceedings of Process Control and Instrumentation, July 26-28 2000, Glasgow, Scotland. – Glasgow, 2000. – P. 166–171. 5. Rotach V. Ja. Teorija avtomaticheskogo upravlenija / V. Ja. Rotach. – Moscow.: MJeI, 2004. – 400 p. 6. Sposib prohramnoho upravlinnya teplovym ob'yeptom z zastosuvannyam shyrotno-impul'snoyi moduljatsiji: pat. na korisnu model' no 81276 Ukrainy: MPK G05D 23/19 (2006.01) / Savyts'kyj S. M., Hapon A. I., Kachanov P. O., Yevseyenko O. M., Vyskrebentsev V. O.; zayavnyk Nats. tekhn. un-t «Khark. politekhn. in-t». – # u201300059; zayavl. 02.01.2013; opubl. 25.06.2013, Byul. no 12. – 4 s. 7. Evseenko O. N. Poluchenie ishodnyh dannyh dlja provedenija jeksperimenta po upravleniju temperaturuj ob'ekta s pomoshh'ju ShIM-moduljatsii i predskazyvajushhego fil'tra / O. N. Evseenko, S. M. Savyts'kyj, D. V. Sal'nykov // Fyzyko-tekhnologichni problemy radiotekhnichnykh prystroyiv, zasobiv telekomunikatsiy, nano- ta mikroelektroniky: materialy IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. / Cherniv. nats. un-t. im. Yu. Fed'kovycha – Chernivtsi, 2014. – P. 165–166. 8. Denisenko V. PID-reguljatory: principy postroeniya i modifikacii. Ch. 2 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: [http://www.rlda.ru/Denisenko\\_PID\\_07.pdf](http://www.rlda.ru/Denisenko_PID_07.pdf). – Zagl. s jekrana.

Надійшло (received) 19.12.2015

**Євсеєнко Олег Николаєвич** – Национальний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; тел.: (063) 425-96-73; e-mail: [sendmeyouemail@mail.ru](mailto:sendmeyouemail@mail.ru).

**Yevseienko Oleh Nikolaevich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate; tel.: (063) 425-96-73; e-mail: [sendmeyouemail@mail.ru](mailto:sendmeyouemail@mail.ru).

П. А. КАЧАНОВ, А. А. ЗУЕВ, К. Н. ЯЦЕНКО

## МЕТОДЫ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ГРАФИКЕ

В статье рассматриваются методы и алгоритмы реализации проективных преобразований на графических ускорителях. Проводится разделение методов на два семейства: проецирование с одним и с несколькими центрами проекций. Сделан обзор и сравнение методов каждого семейства. Большое внимание уделяется методам с одним центром проецирования. Проводится оценка относительно возможности реализации и применения методов в системах реального времени.

**Ключевые слова:** проективные преобразования, графические ускорители, environment mapping, системы визуализации, системы реального времени.

**Введение.** К системе визуализации, которая является одной из основных частей имитационно-тренажерных комплексов военной техники, предъявляются достаточно жесткие требования, связанные не только с реалистичностью отображаемой сцены, но и с информативностью получаемого изображения. Одним из способов удовлетворения последнего требования является применение проективных преобразований. Классический метод получения изображений прямой перспективой на графических ускорителях реализован аппаратно, что подразумевает небольшие вычислительные затраты на его реализацию. Однако для получения других моделей преобразования необходима разработка новых алгоритмов и методов их реализации на графических ускорителях. Это в свою очередь влечет за собой увеличение потребления вычислительных средств, что в системах реального времени, коими являются тренажерные комплексы, в большинстве случаев является критическим фактором. Поэтому актуальным является вопрос поиска оптимального решения зависимости получения необходимого проективного преобразования и вычислительными ресурсами на его реализацию.

**Цель работы.** В данной статье рассматриваются методы и алгоритмы реализации проективных преобразований на графических процессорах. Проводится их сравнение и оценка относительно возможности и эффективности реализации в системах реального времени.

**Методика исследования.** Исследования в области непланарных или нелинейных проекций рассматриваются преимущественно между двумя различными видами проекций: проекции с одним центром проецирования (Single Projection Center - SCOP) [1] или с множественными центрами проекций (Multiple Projection Centers - MСOP) [2].

Проекция с одним центром. Для получения искажений или специальных проекций трехмерной сцены, точечная камера направляется в нескольких направлениях. В работе [3] предлагается процедура, которая базируется на вычислении новых абсолютных координат трансформированных через адаптивную матрицу проекций. Гибкая адаптивная проекционная система описана в работе [4], которая включает моделирование линейной, нелинейной и параметризованной проекций. В ней используется

алгоритм ray-casting и scanline rendering, в которых координаты полигона изменяются вертексным шейдером. Всеобщность системы делает сложным эффективное проецирование, особенно на больших сценах. Искажения, как подкатегории геометрической регистрации или деформирования изображений обсуждается в работах [5] и [6], где функции деформирования изображения применяются к каждому пикселю для определения его нового значения цвета.

Подход «сшивания» изображений для получения панорамы представлен в работе [7]. В работе [8] представлен метод который генерирует текстуры окружения полученные с фотографий сделанных с помощью сферических линз (fisheye). Несколько разделов посвященных нелинейным перспективным деформациям описаны в работе [9], исследованы так же таксономии линз [10]. Эти подходы используют регулярную меш текстурированную двумерной текстурой, которая содержит отрисованную сцену или изображение. Процесс перемещения вершин меша вместе с текстурой генерирует частичный эффект искажения. Эти подходы ограничены относительно величины получаемого угла обзора (FOV). Карпендейл исследовала использование деформации изображения в контексте информационной визуализации [11].

Приложения для видовых искажений в программах ray-tracing описано в работе [12], [13].

Проекция с несколькими центрами. В дополнение к рассмотренным выше проекциям, существуют непланарные проекционные поверхности, которые требуют нескольких перспектив, например, определенное число изображений из разных центров проекций [14]. Главная задача заключается в сохранении качества связности всей сцены, локальных искажений и результатов затенения из-за изменений в перспективе каждой проекции. Результаты исследований в этой области могут быть использованы для проведения независимого от наблюдателя рендеринга (View-independent rendering), получения необычных (экспрессивных) изображений или анимации. Отдельно от щелевых камер [15], представлены кубистские камеры, которые представляют много преобразований и точек наблюдения одновременно. Эта техника использует нелинейный ray tracing который управляет светом, но

© П. А. Качанов, А. А. Зуев, К. Н. Яценко, 2016

может приводить к некоторым артефактам.

Описана геометрия сцены и пользовательский интерфейс для позиционирования локальной и главной камер [16], для параметризуемого мультипроекционного рендеринга, представляет средство для создания мультипроекционных изображений и анимаций. В основе лежит алгоритм, который вычисляет пересечения объектов сцены, в которой каждый рендерится локальной камерой. Это обеспечивает управление искажениями и созданием сюрреалистических видов, но не может решить проблему освещения и затенения.

Метод Fresh Perspective [17] так же представляет интерактивный подход, который не может решить ни вопрос освещения, ни глобального сохранения связности сцены. Отличия содержатся в следующем: результирующее нелинейное проекционное изображение объекта потенциально находится под влиянием всех камер. На этом базируется метод RYAN [13]. Эта интерактивная система интегрируется в традиционный анимационный поток. Она искажает геометрию сцены до проецирования прямой перспективой. Результат получается в виде нелинейной проекции. Так же как и в работе [16], используется два вида камер: главная (традиционная линейная перспектива) и подчиненная (представляющая локальные линейные виды).

Освещение реализовано смешиванием освещения главной и подчиненной камер или установкой одной точки наблюдения для света.

На основании рассмотренных методов реализаций проективных преобразований можно говорить о том, что наиболее целесообразным является применение методов с одним центром проецирования.

**Результаты исследования.** Для визуализации трехмерной сцены на экране ее описание и математическая модель должны быть преобразованы в двумерное изображение (процесс синтеза изображения). Изображение представляет собой двумерную проекцию сцены трехмерных объектов, которые находятся в пределах объема ограниченного передней и задней плоскостями отсечения, и отображается на плоскости проекции (проекции вида) [18]. Синтез растрового изображения происходит на этапе растеризации графического конвейера. На рис.1 изображена схема работы графического конвейера типичного графического ускорителя. Стадии вершинной и пиксельной обработки реализуются на графическом ускорителе в виде микропрограмм, которые разрешают определить, что представляют собой входные и выходные данные для каждой стадии конвейера ускорителя и описывают обработку, которая происходит на ней.



Рис.1 – Схема графического конвейера

Как можно увидеть, обработка на уровне пикселей является последним этапом программируемой стадии конвейера, что дает возможность реализации разнообразных эффектов как этапа постобработки синтезированного изображения в виде микропрограммы.

Главной задачей пиксельной микропрограммы является вычисление финального цвета пикселя. С каждым пикселем может быть связано широкое разнообразие данных, согласно его расположению, которое, вычисленное с помощью вершинной микропрограммы и линейно интерполируется на этапе растеризации треугольников, которые определяют объекты сцены. Это разрешает изменять цвет пикселя соответственно освещению сцены, прибавлять отражение, налаживать тени. Так же с помощью пиксельной микропрограммы можно реализовать эффекты постобработки для всего изображения в целом, например, такие как яркость, контраст, насыщенность, изменение цвета, размывание. Такая универсальность микропрограмм также разрешает делать геометрические преобразования пространства, например геометрическое искривление пространства наблюдателя.

В современных системах визуализации нашли широкое применение методы, основанные на картах окружения (environment map). В работах [19] описаны разновидности и методы получения текстур окружения. Текстура окружения представляет собой текстуру, которая отображает значения в пространстве для всех направлений входящего и исходящего света относительно одной точки пространства. Поскольку она отображает информацию как 2D текстуру, то необходимо задать преобразование для переноса значения из пространства в координаты текстуры для получения конкретного отображения. В зависимости от вида преобразования различают: сферические, параболические и кубические карты (Рис.2).

Сферические карты построены по аналогии с идеально отражающей сферой. Изображение, получаемое на ее поверхности при проецировании ортогональной камерой, соответствует сферической карте.

Параболические карты, часто называемые еще двойными параболическими картами, аналогичны сферическим, однако используется кривая – парабола. Изображение, получаемое ортогональной камерой при

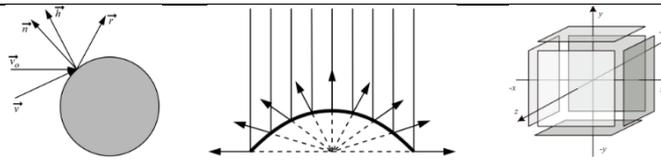


Рис.2 – Различные модели параметризаций карт окружения

направлении вида на отражающий параболоид содержит информацию о полусфере направленной к наблюдателю. Полное окружение сохраняется в двух отдельных текстурах, каждая из которых содержит информацию о полусфере.

Кубическая текстура состоит из шести независимых изображений, полученных перспективным проецированием из центра куба на каждую его грань.

На уровне реализации на графических ускорителях сферические и параболические текстуры получают с помощью геометрических шейдеров. Сцена состоит из тесселированных объектов и применение геометрических шейдеров приводит к изменению геометрии пространства сцены. На близких расстояниях такой подход не вызывает побочных явлений, однако с увеличением расстояния от камеры возникают артефакты и искажения. Поскольку мы ориентируемся на применение проекций в масштабных сценах, то данный подход является неудовлетворительным.

Использование кубической текстуры описано в работах [20], [21]. Кубические текстуры можно получить двумя способами: за один проход рендера или за несколько. Реализация за один проход обеспечивается структурой современных графических ускорителей, которые позволяют использовать технику «рендер в кубическую текстуру», суть которой состоит в дублировании каждого входного треугольника шесть раз и применении отдельного преобразования для каждой грани кубической текстуры. Каждый дублированный треугольник относится к соответствующему слою цели рендеринга. Реализация за несколько проходов базируется на создании шести виртуальных локальных камер с углом обзора FOV 90° и перспективного рендеринга в текстуру. Проведенные в работе [21] исследования показали уменьшение вычислительных затрат с использованием метода с одним проходом. Однако использование подобного подхода приводит к одновременному хранению в памяти графического ускорителя сразу шести текстур. В реальных системах визуализации, в которых происходит значительно больше вычислений связанных с увеличением реалистичности сцены, подобный расход ресурсов видеокарты может оказаться достаточно критичным.

Подобный метод используется и в работе [22]. Основным отличием от предыдущего метода является создание кусочной проекции, которая состоит из нескольких перспективных проекций с использованием «щелевой камеры».

**Выводы.** На основании рассмотренных методов реализации проективных преобразований, можно заключить, что в своем большинстве они не могут

быть применены в системах визуализации реального времени для отображения масштабных сцен, в которых важна информация, которая находится на большом удалении от камеры. Метод с использованием кубических текстур может быть применен при условии, если кроме визуализации дополнительно не производится массивные вычисления. В дальнейшем предлагается реализовывать необходимые проекционные преобразования в виде пиксельных шейдеров, как эффект постобработки, используя классическое перспективное проецирование, внедрение которых в уже существующую систему не потребует значительного изменения ее основной структуры и позволит выполнить требования к получению необходимого проекционного преобразования с удовлетворительными вычислительными затратами.

**Список литературы:** 1. *Carlbom I.* Planar Geometric Projections and Viewing Transformations / *I. Carlbom, J. Paciorek* // ACM Computing Surveys (CSUR). – 1978. – Vol.10, Issue 4. – 465–502 pp. 2. *Rademacher P.* Multiple-Center-of-Projection Images / *P. Rademacher, G. Bishop* // In SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – New York, NY, USA. ACM Press, 1998. – 199–206 pp. 3. *Bayarri S.* Computing Non-Planar Perspectives in Real Time / *S. Bayarri* // Computers & Graphics. – Elsevier, 1995. – Vol. 13, Issue 3. – 431–440 pp. 4. *Brosz J.* Single Camera Flexible Projection / *J. Brosz, F. Samavati, M. Sheelagh, T. Carpendale, M. Sousa* // In NPAR '07: Proceedings of the 5th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering. – New York, NY, USA. ACM Press, 2007. – 33–42 pp. 5. *Glasbey C.* A Review of Image Warping Methods / *Journal of Applied Statistics*, 25, 1989. – 155–171 pp. – Режим доступа : <http://www.bioss.ac.uk/people/chris/warp.pdf>. – Дата обращения : 20 мая 2015. 6. *Gustafsson A.* Interactive Image Warping / *A. Gustafsson* // [Master's Thesis]. Helsinki University of Technology. – 1993. – Режим доступа : <http://www.gson.org/thesis/warping-thesis.pdf>. – Дата обращения : 20 мая 2015. 7. *Szeliski R.* Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps / *R. Szeliski, H.-Y. Shum* // In SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. – 251–258 pp. 8. *Turkowski K.* Making Environment Maps from Fisheye Photographs / *K. Turkowski*. – 1999. – Режим доступа : <http://www.worldserver.com/turk/quicktimevr/fisheye.html>. – Дата обращения : 3 марта 2014. 9. *Yang Y.* Nonlinear Perspective Projections and Magic Lenses: 3D View Deformation / *Y. Yang, J. Chen, M. Beheshti* // Computer Graphics and Applications, IEEE. – 2005. – Vol.25, Issue 1. – 76–84 pp. 10. *Neumann P.* Taxonomy of Discrete Lenses / *P. Neumann, S. Carpendale* / Technical Report No. 2003-734-37. – Department of Computer Science, University of Calgary. – Режим доступа : [http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann\\_2003\\_TFD.pdf](http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann_2003_TFD.pdf). – Дата обращения : 3 марта 2014. 11. *Carpendale M.* A Framework for Unifying Presentation Space / *M. Carpendale, C. Montagnese* // In UIST '01: Proceedings of the 14th annual ACM symposium on User interface software and technology. – New York, NY, USA. ACM Press, 2001. – 61–70 pp. 12. *Groller M.* A Distortion Camera for Ray Tracing / *M. Groller, P. Acquisti* // In Visualization and Intelligent Design in Engineering and Architecture. – Elsevier Science Publishers, 1993. 13. *Coleman P.* RYAN: Rendering Your Animation Nonlinearly projected / In NPAR. – 2004. Режим доступа : <http://www.dgp.toronto.edu/~patrick/papers/ryanNpar2004/ryanPaper.pdf>. – Дата обращения : 26 мая 2014. 14. *Wood D.* Multiperspective Panoramas for Cel Animation / *D. Wood*,

A. Finkelstein, J. Hughes, C. Thayer, D. Salesin // In SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. – New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. – 243–250 pp. **15.** Glassner A. S. Cubism and Cameras: Free-form Optics for Computer Graphics / A. Glassner // Technical report, Microsoft Research, 2000. – Режим доступа : <http://research.microsoft.com/pubs/69753/tr-2000-05.pdf> – Дата обращения : 26 май 2014. **16.** Agrawala M. Artistic Multiprojection Rendering / M. Agrawala, D. Zorin, T. Munzner // In 11th Eurographics Workshop on Rendering. – Brno, Czech Republic, 2000. – 125–136 pp. **17.** Singh K. A Fresh Perspective. / K. Singh // In Graphics Interface, 2002. – 17–24 pp. **18.** Projection Transform (Direct3D 9) / Programming Guide for Direct3D 9. – Режим доступа : <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/bb147302>

**Bibliography (transliterated):** **1.** Carlbom, I., Paciorek, J. “Planar Geometric Projections and Viewing Transformations.” *ACM Computing Surveys (CSUR)*. Vol.10. Issue 4. 1978. 465–502. Print. **2.** Rademacher, P., Bishop, G. “Multiple-Center-of-Projection Images.” In *SIGGRAPH '98: Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA. ACM Press, 1998. 199–206 pp. Print. **3.** Bayarri, S. “Computing Non-Planar Perspectives in Real Time.” *Computers & Graphics*. Elsevier, 1995. Vol. 13, Issue 3. 431–440. Print. **4.** Brosz, J., Samavati, F., Sheelagh, M., Carpendale, T., Sousa, M. “Single Camera Flexible Projection” In *NPAR '07: Proceedings of the 5th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*. New York, NY, USA. ACM Press, 2007. 33–42. Print. **5.** Glasbey, C. “A Review of Image Warping Methods.” *Journal of Applied Statistics*, 25, 1989. 155–171 pp. Web. 20 May 2015 <<http://www.bioss.ac.uk/people/chris/warp.pdf>>. **6.** Gustafsson, A. “Interactive Image Warping” [Master’s Thesis]. *Helsinki University of Technology*. 1993. Web. 20 May 2015 <<http://www.gson.org/thesis/warping-thesis.pdf>>. **7.** Szeliski, R., Shum, H.-Y. “Creating Full View Panoramic Image Mosaics and Environment Maps” In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. 251–258. Print. **8.** Turkowski, K. “Making Environment Maps from Fisheye Photographs.” 1999. Web. 3 March 2014 <<http://www.worldserver.com/turk/quickttimevr/fisheye.html>>. **9.** Yang, Y., Chen, J., Beheshti, M. “Nonlinear Perspective Projections and Magic Lenses: 3D View Deformation.” *Computer Graphics and Applications*, IEEE. – 2005. Vol.25, Issue 1. 76–84 pp. Print. **10.** Neumann, P., Carpendale, S. “Taxonomy for Discrete Lenses.” Technical Report No. 2003-734-37. *Department of Computer Science, University of Calgary*. Web. 3 March 2015 <[http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann\\_2003\\_TFD.pdf](http://pages.cpsc.ucalgary.ca/~sheelagh/wiki/uploads/Main/Publications/Neumann_2003_TFD.pdf)>. **11.** Carpendale, M., Montagnese, C. “A Framework for Unifying Presentation Space.” In *UIST '01: Proceedings of the 14th annual ACM*

(v=vs.85).aspx. – Дата обращения : 20 мая 2015. **19.** Heidrich W. View-independent environment maps / W. Heidrich, H. – P. Seidel // In *HWWS '98: Proc. of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*, 1998. – 39–45 pp. **20.** Trapp M. A Generalization Approach for 3D Viewing Deformations of Single-Center Projections / M. Trapp, J. Döllner // *GRAPP*, 2008. – 163–170 pp. **21.** Trapp M. Generalization of single-center projections using projection tile screens / M. Trapp, J. Döllner // *Computer Vision and Computer Graphics. Theory and Applications*. – Springer, 2008. – 55–69 pp. **22.** Lorenz H. High-Quality Non-planar Projections Using Real-Time Piecewise Perspective Projections / H. Lorenz, J. Döllner // *VISIGRAPP (Selected Papers)*, 2009. – 45–58 pp.

*symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA. ACM Press, 2001. 61–70. Print. **12.** Groller, M., Acquistio, P. “A Distortion Camera for Ray Tracing” In *Visualization and Intelligent Design in Engineering and Architecture*. Elsevier Science Publishers, 1993. Print. **13.** Coleman, P. “RYAN: Rendering Your Animation Nonlinearly projected” In *NPAR*. 2004. Web. 26 May 2015 <<http://www.dgp.toronto.edu/~patrick/papers/ryanNpar2004/ryanPaper.pdf>>. **14.** Wood, D., Finkelstein, A., Hughes, J., Thayer, C., Salesin, D. “Multiperspective Panoramas for Cel Animation” In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1997. 243–250. Print. **15.** Glassner, A. “Cubism and Cameras: Free-form Optics for Computer Graphics” *Technical report, Microsoft Research*, 2000. Web. 26 May 2014 <<http://research.microsoft.com/pubs/69753/tr-2000-05.pdf>>. **16.** Agrawala, M., Zorin, D., Munzner, T. “Artistic Multiprojection Rendering” In *11th Eurographics Workshop on Rendering*. Brno, Czech Republic, 2000. 125–136. Print. **17.** Singh, K. “A Fresh Perspective.” In *Graphics Interface*, 2002. 17–24. Print. **18.** Programming Guide for Direct3D (Projection Transform (Direct3D 9)). Web. 3 March 2014 <[https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/bb147302\(v=vs.85\).aspx](https://msdn.microsoft.com/en-us/library/windows/desktop/bb147302(v=vs.85).aspx)>. **19.** Heidrich, W., Seidel, H. – P. “View-independent environment maps” In *HWWS '98: Proc. of the ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS workshop on Graphics hardware*, 1998. 39–45 pp. Print. **20.** Trapp, M., Döllner, J. “A Generalization Approach for 3D Viewing Deformations of Single-Center Projections” *GRAPP*, 2008. 163–170. Print. **21.** Trapp, M., Döllner, J. “Generalization of single-center projections using projection tile screens” *Computer Vision and Computer Graphics. Theory and Applications*. Springer, 2008. 55–69. Print. **22.** Lorenz, H., Döllner, J. “High-Quality Non-planar Projections Using Real-Time Piecewise Perspective Projections” *VISIGRAPP (Selected Papers)*, 2009. 45–58. Print.

Посмунила (received) 05.11.2015

**Качанов Петр Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; тел.: (057) 70-76-101; e-mail: kpa@kpi.kharkov.ua

**Kachanov Peter Alexeyevich** – Doctor of technical sciences, Full Professor, head of the department "Automation and Control in Technical Systems", National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"; tel.: (057) 70-76-101; e-mail: kpa@kpi.kharkov.ua

**Зув Андрей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах»; тел.: (057) 70-76-842; aaz12345@inbox.ru.

**Zuev Andrey Aleksandrovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Automation and Control in Technical Systems"; tel.: (057) 70-76-842; e-mail: aaz12345@inbox.ru.

**Яценко Константин Николаевич** – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант, ассистент кафедры «Автоматика и управление в технических системах»; тел.: +380969655159; e-mail: knyatsenko@gmail.com.

**Yatsenko Konstantin Nikolaevich** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", postgraduate student; tel.: +380969655159; e-mail: knyatsenko@gmail.com.

УДК 621.39

**В.А.КРЫЛОВА, М.Н.ГРУЗИН****РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА СИГНАЛЬНО-КОДОВОЙ КОНСТРУКЦИИ**

Для построения сигнально-кодовой конструкции на основе системы сигналов с расширенным спектром предлагается метод расчета коэффициентов цифрового фильтра. Предложен и разработан метод формирования и обработки сигналов с гребенчатым спектром, принадлежащих к классу широкополосных сигналов и отличающихся от известных свойствами спектральной и временной селективности, высокой помехоустойчивостью и простотой обработки в цифровом виде. Данный метод формирования сигнально-кодowych конструкций не предусматривает введение защитных частотных и временных интервалов между сигналами, что обеспечивает предельно экономное использование частотно-временного ресурса группового тракта.

**Ключевые слова:** цифровая связь, сигнально-кодowe конструкции, широкополосный сигнал, частотный ресурс, гребенчатый фильтр, коэффициент фильтра.

**Введение.** При использовании адаптивных методов защиты информации в цифровых сетях связи важным является вопрос выбора в качестве переносчика закодированной информации сигнально-кодовой конструкции (СКК). Одним из подходов, используемых для повышения помехоустойчивости в условиях сосредоточенных по спектру помех, является использование СКК, обладающих расширенным энергетическим спектром. Однако распределение энергетических составляющих в частотной области существующих широкополосных сигналов не позволяет повысить помехоустойчивость информационных сетей при воздействии сосредоточенных по спектру помех за счет расширения спектра СКК []

Все сигнально кодowe конструкции в соответствии с набором свойств делятся на группы, в соответствии с решаемой функциональной задачей. При создании нового поколения СКК одним из требований является унификация по используемым видам модуляции в части ширины спектра радиоизлучения с находящимися в эксплуатации системами.

**Постановка проблемы.** Детальная проработка требований к современным системам радиосвязи позволила сформировать четыре основные группы сигнально-кодowych конструкций.

– СКК, используемые для автоматического установления и ведения соединения (АУС). Характеризуются высокой устойчивостью к шумовым, структурным, импульсным и узкополосным помехам, многолучевому распространению, доплеровскому размытию и сдвигу частот в канале. Эта группа основана на шумоподобном сигнале, формируемом как разделимый код с максимальным расстоянием.

– СКК, используемые для среднескоростной передачи данных. Благодаря сверхбольшому каналному алфавиту сигнально-кодовой конструкции, 224 и более различаемых канальных символов, скорость передачи 2400 бит/с обеспечивается при длительности канального символа 20 мс, что позволяет работать в условиях сильной многолучевости. Разработанные модификации также обеспечивают работу в условиях узкополосных и импульсных помех в полосе сигнала.

– СКК высокоскоростной (более 2400 бит/с) передачи данных. В настоящее время проводятся работы по новому поколению этих сигналов, обладающему более низким пикфактором по сравнению с сигналами параллельных (OFDM) модемов. Также перспективные сигналы не будут нуждаться в затратных процедурах коррекции импульсной характеристики канала, занимающих в модемах последовательного типа по стандарту MIL-STD-188-110В до 25 % пропускной способности канала.

– СКК типа CHESH (Correlated Hopping Enhanced Spread Spectrum) использующие расширение спектра сигнала коррелированными скачками по частоте. Эта группа сигналов предназначена для передачи небольших объёмов информации. При скорости псевдослучайной перестройки по частоте до 200 скачков в секунду в полосе до десятков мегагерц сигналы, сигналы этого типа обладают высокой скрытностью и устойчивостью как к обнаружению, перехвату, так и к любым видам естественных и искусственных помех.

Для реализации всех преимуществ новых сигнально – кодowych конструкций и с учётом их особенностей должны быть синтезированы следующие ключевые компоненты системы радиосвязи:

– система помехозащищённого кодирования с обнаружением и исправлением ошибок, согласованная с канальными сигнально-кодowymi конструкциями и позволяющая реализовать высокие (0.68..0.75 в зависимости от помеховой обстановки) кодовые скорости;

– процедуры помехоустойчивого автоматического установления соединения с выбором наилучшего из доступных частотных каналов для приёма и передачи;

– протоколы передачи данных с гарантированной достоверностью переданной информации для пакетов и потоков данных, обеспечивающие вероятность ошибки менее  $2 \cdot 10^{-12}$  на бит при передаче файлов и телеграмм;

– процедуры ведения соединения, реализующие изменение скорости передачи информации, мощности

используемого кода, вида используемого канального сигнала и мощности передатчика в антенно-фидерном устройстве;

– процедуры частотной адаптации, реализующие быструю смену рабочей частоты при принятии решения о необходимости смены частоты процедурой ведения соединения.

Одним из основных назначений систем связи является обеспечение надежного приема информации при воздействии мощных помех, когда отношение сигнал-помеха на входе приемника может быть много меньше единицы.

В зависимости от цели использования системы связи можно отметить 3 основных направления построения сигнально-кодовых конструкций:

– сигнально-кодовые конструкции на основе OFDM сигналов для систем связи, обеспечивающих максимальную пропускную способность для заданных полос пропускания и вероятности ошибки в условиях естественных помех;

– сигнально-кодовые конструкции на основе CDM сигналов с прямым расширением спектра (DSSS) для систем связи с максимальной помехоустойчивостью в условиях воздействия любых помех;

– сигнально-кодовые конструкции для систем связи с максимально возможными помехоустойчивостью и пропускной способностью в условиях внутрисистемных и внешних помех, получившие название ортогонально-кодовое разделение каналов (OCDM).

Существенным недостатком при использовании таких типов сигналов в общей полосе частот является спектральное проникновение сигналов, что влечет за собой увеличение удельных затрат полосы пропускания. Помехозащищенность трех рассмотренных технологий построения систем широкополосного доступа может быть существенно повышена путем реализации сигнально-кодовых конструкций, на основе сигналов с искусственно создаваемым широкополосным гребенчатым спектром

**Методы исследования.** при формировании широкополосных сигналов с гребенчатым спектром, проблема получения необходимой ширины спектра  $F'_c$  исходного сигнала, решается путем компрессии его временных отрезков в  $N$  раз так, что  $F'_c = NF_c$ , где  $F'_c$  – значение ширины спектра группового сигнала или в более общем случае, отвечает ширине спектра системы сигналов с гребенчатыми спектрами (ССГС). Использование искусственно расширенной базы для каждого из сигналов дает устойчивость к сосредоточенным по спектру помехам. Объединение сигналов с гребенчатым спектром предусматривает "сжатие" по времени  $i$ -ого индивидуального сигнала длительностью  $T_c^i$  с эффективной шириной спектра  $\Delta\omega_i$  в  $n$  раз ( $i = 1, n$ ), в результате чего его спектр расширяется к полосе группового канала  $\Delta\omega_k = \omega_g - \omega_n$ , то есть все сигналы имеют спектры, которые полностью перекрываются. При этом длительность "сжатого" по времени отрезка сигнала становится равной  $T_k$ ,

$$T_k = \frac{\Delta\omega_i}{\Delta\omega_k} T_c^i, \quad (1)$$

но одинаковой для всех сигналов, которые объединяются. Для каждого из индивидуальных сигналов формируется его канальная форма  $S_i^*(\omega)$ , которая получается путем "вырезания" неперекрестных участков спектра. То есть канальная форма каждого из индивидуальных сигналов имеет гребенчатую структуру, которая формируется посредством гребенчатых фильтров (ГФ). Групповой сигнал  $S_g(\omega)$  формируется путем суммирования индивидуальных сигналов с неперекрывающимися гребенчатыми спектрами.

Показано, что сигналы с гребенчатым спектром используют весь частотный диапазон группового канала, который дает им возможность проявить позитивные качества широкополосных сигналов, стойких к влиянию сосредоточенных по спектру помех. Канальная форма преобразованного сигнала представляет собой  $n$ -кратно повторенный с соответствующим масштабированием  $a_k$  исходный сигнал

$$x_k^i = \sum_{k=0}^p a_k^i x(t-k), \quad (2)$$

где  $x_i(t)$  –  $i$ -ий индивидуальный сигнал, который подается на вход ГФ;  $a_k^i$  – коэффициенты  $i$ -го ГФ;  $\tau$  – период ГФ.

Для выделения начального индивидуального сигнала из группового, достаточно обработать последний гребенчатым фильтром, тождественным по структуре и параметрам формирующему. При этом, на  $p$  – м такте работы фильтра после начала приема группового сигнала, на его выходе появится отсчет

$$x_{\text{вух}}^i(t) = \sum_{k=0}^p a_k^i x_i^i(t). \quad (7)$$

При этом одинаковые превращения сигналов на передающей и приемной сторонах системы позволяют получить достаточно простую схему системы объединения

При проектировании сигнально-кодовой конструкции на основе системы сигналов с гребенчатым спектром необходимо определить следующие параметры: число объединяемых сигналов  $n$ ; порядок цифровых фильтров системы объединения  $p$ ; период фильтра  $T$ ; коэффициенты цифровых фильтров  $a_k^i$ .

Задача нахождения коэффициентов  $a_k^i$  для нерекуррентного фильтра рассматривается в области аналоговых прототипов. Передаточная функция нерекуррентного фильтра имеет вид:

$$k_i(j\omega) = \sum a_k^i \exp(-j\omega kt), \quad (8)$$

где  $j$  – мнимая единица ( $j^2 = -1$ ),  $\omega$  – круговая частота,  $A_i = \{a_0^i, a_1^i, \dots, a_p^i\}$  – вектор с коэффициентами  $i$ -го фильтра.

Для определения гребенчатой структуры частотной характеристики фильтр достаточно определить квадрат модуля (8) на интервале частот, соответствующим половине периода  $\omega \leq \pi \leq \tau$ . Эта задача может быть решена двумя способами. Рассмотрим их суть.

Способ, основанный на разложении Фурье эталона частотной характеристики. Пусть требуемая форма частотной характеристики определена на половине периода аргумента (1) в виде

$$f(\omega) = \begin{cases} 1, & \omega_H \leq \omega \leq \omega_B \\ 0, & \omega_H > \omega > \omega_B \end{cases}, \quad (9)$$

где  $\omega_H, \omega_B$  – нижняя и верхняя границы полосы прозрачности фильтра.

В силу определенности (9) только на положительной полуоси частот, она может быть разложена в ряд

$$f(\omega) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos k\omega, \quad (10)$$

где коэффициенты

$$a_k = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} f(\omega) \cos k\omega \, d\omega. \quad (11)$$

С учетом конечного порядка фильтра  $p$  и условия его физической реализуемости, разложение (10) описывающее передаточную функцию гребенчатого фильтра приобретает вид:

$$K_{\Phi}(j\omega) = \left( \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n a_k \cos k\omega \right) e^{-jp\omega}, \quad (12)$$

а с учетом равенства

$$e^{-jk\omega} \cos k\omega = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} e^{-j2k\omega}, \quad (13)$$

$$K_{\Phi}(j\omega) = \frac{a_0}{2} e^{-jp\omega} + \sum_{k=1}^p \frac{a_k}{2} \left( e^{-j(p-k)\omega} + e^{-j(p+k)\omega} \right). \quad (14)$$

С учетом формул (8) и (9), а также что  $T$  – время задержки цифрового фильтра, коэффициенты  $a_k^i$  определяется следующим образом:

$$a_k^i = \frac{2(\sin k \omega_B^i - \sin k \omega_H^i)}{\pi k}. \quad (15)$$

Достоинством данного способа является наличие известного решения и линейность фазочастотной характеристики, а недостатком – медленная сходимость ряда и невозможность сочетания алгоритма нахождения коэффициентов фильтра с методами условной минимизации переходных помех между объединяемыми сигналами.

Способ наименьших квадратов предусматривает нахождение коэффициентов цифрового фильтра

осуществляется путем минимизации расстояния между эталоном характеристики  $f(\omega)$  и передаточной функцией фильтра  $K(j\omega)$  (5). Целевая функция задачи имеет вид:

$$\min \left\{ C_i = \int_0^{\pi} |f_i(\omega) - K_i(j\omega)|^2 d\omega \right\}. \quad (16)$$

Решение задачи ищется из системы уравнений в частотных производных

$$\frac{dC_i}{da_k^i} = 0, \quad (17)$$

где  $i = 1, \dots, n, k = 0, \dots, p$ .

После дифференцирования выражения (16) получаем следующую систему:

$$\pi a_k^i = \frac{\sin(T - k\tau)\omega_B^i - \sin(T - k\tau)\omega_H^i}{(T - k\tau)}. \quad (18)$$

Преимуществом этого способа решения задачи нахождения коэффициентов  $i$ -го ЦФ есть возможность введения условий минимизации переходных помех между объединяемыми сигналами. Взаимные влияния (переходные помехи) проявляются в наличии ненулевого отклика  $i$ -го сигнала на  $j$ -й сигнал при синхронной работе каналов в групповом тракте. Простым способом исключения переходных помех есть обеспечение ортогональности векторов коэффициентов индивидуальных формирующих фильтров

$$\sum_{k=0}^p a_k^i a_k^j = 0, \quad (19)$$

где  $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; i \neq j$ .

Учет размерности векторов коэффициентов фильтров требует для существования  $n$  ортогональных векторов размерности пространства не меньше  $n$ . Отсюда следует вывод, что при объединении  $n$  сигналов порядок фильтров должен быть не менее  $(n-1)$ . Тогда задача нахождения функции (9) сводится к виду:

$$\min \left\{ C_i + \sum_{j=1}^n \lambda_j \sum_{k=0}^p a_k^i a_k^j \right\}, \quad (20)$$

где:  $\lambda_i$  – множитель Лагранжа;  $i = 1, \dots, n; j \neq i$ .

Сущность предложенного метода заключается в следующем. На первом этапе находится решение  $n$  систем линейных уравнений (17), т.е. определяются координаты векторов  $A_i$  без учета их ортогональности. Эти векторы представляют собой опорное решение задачи (20). Для расчета векторов определяют их скалярные произведения

$$A_i A_j = \sum_{k=0}^p a_k^i a_k^j, \quad (21)$$

где  $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; i \neq j$ .

После этого отыскивается фильтр, исходя из условий, что сумма модулей скалярных произведений соответствующего ему вектора на остальные векторы была минимальной. Номер этого фильтра  $j_1$  становится элементом множества  $V$ . На втором этапе отыскивается фильтр  $j_2$  исходя их условий, что модуль скалярного произведения соответствующего ему вектора на вектор  $A_{j_1}$  был минимальным. Далее находим решение системы из  $(n+1)$  уравнений – формула (15) при  $i = j_2$ . После этого выполняется перерасчет новых координат вектора  $A_{j_2}$ , далее на  $r$ -ом этапе ( $r=1, \dots, n$ ) отыскивается фильтр  $j_r$  с условием, что сумма скалярных произведений соответствующего ему вектора на векторы уже найденных векторов была минимальной. Таким образом, за  $n$  шагов определяются коэффициенты для всех цифровых фильтров.

Сравнительная оценка частотной эффективности предложенного метода формирования системы сигналов с гребенчатым спектром (ССГС) и частотно-модулированных сигналов (ЧМ-2) показал, что переход к методу формирования группового сигнала по технологии ССГС приводит к сужению энергетического спектра и концентрации энергии около несущей частоты. Таким образом, в заданную полосу, ограниченную фильтром на входе частотного дискриминатора, попадает большая часть энергии полезного сигнала, что приводит к возрастанию отношения сигнал/шум на входе дискриминатора, и как следствие, к уменьшению вероятности ошибки на бит передаваемых сообщений. В табл. 1 показана доля энергии сигнала, попадающая в полосу пропускания фильтра приемника при разных значениях скорости модуляции для ЧМ-2, а также для ССГС-2, ССГС-4 и ССГС-10.

Таблица 1 – Доля энергии сигнала, попадающая в полосу пропускания фильтра

Режим	Скорость модуляции, бит/с						
	200	1200	2400	4800	5600	9600	10800
ЧМ-2	0,997	0,978	0,954	0,910	0,890	0,767	0,710
ССГС-2	0,998	0,981	0,967	0,943	0,922	0,850	0,816
ССГС-4	0,999	0,987	0,972	0,965	0,941	0,894	0,870
ССГС-10	1	0,999	0,984	0,980	0,960	0,910	0,900

Данные таблицы свидетельствуют о том, что при

одинаковых энергетических условиях ССГС-10 выигрывают по сравнению с ЧМ-2 по допустимой скорости больше, чем в 2 раза (10800 против 4800)

**Выводы.** Предлагаемая технология синтеза сигнально-кодовых конструкций на основе нового метода объединения сигналов с одновременным использованием всеми корреспондентами широкополосного многоканального тракта путем частотно-временного преобразования входных сигналов в широкополосные сигналы с неперекрывающимися гребенчатыми спектрами. Данный метод не предусматривает введение защитных частотных и временных интервалов между сигналами, что обеспечивает предельно экономное использование ресурса группового тракта. Спектр группового сигнала имеет непрерывную структуру, складывающуюся из неперекрывающихся «гребенок» спектров индивидуальных сигналов после их прохождения через соответствующие цифровые фильтры.

**Список литературы:** 1. Скляр Б. И. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б.И. Скляр. – М.: «Вильямс», 2003. – 1104 с. 2. Крылова В. А. Сигнально-кодовые конструкции для адаптивных методов кодирования в многоканальных системах связи / В.А. Крылова, В.В. Горбачов // Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харьков: УкрГАЗТ, 2014. – №1(104). – С. 56–58. 3. Гадзиковский В. И. Основы теории и проектирования цифровых фильтров: учебное пособие для вузов / В.И. Гадзиковский – М.: Высшая школа, 1996. – 256 с. 4. Гольденберг Л. М. Цифровая обработка сигналов: Справочник / Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с. 5. Балунин Е. И. Обнаружение и распознавание сигнально-кодовых конструкций / Е.И. Балунин, А.Ю. Баринов, С.В. Дианов, С.В. Дмитриевский и др. / Под ред. Е.И. Балунина. – М.: Издательство «Радиотехника», 2013. – 96 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Skljär B.I. *Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i praktičeskoe primenenie* [Digital communication. Theoretical bases and practical application]. Moscow, «Vil'jams», 2003. - 1104 p. 2. Krylova V. A., Gorbachov V. V. "Signal'no-kodovyh konstrukcij dlja adaptivnyh metodov kodirovanija v mnogokanal'nyh sistemah svjazj" [The signal-code designs for adaptive coding techniques in multi-channel communication systems]. *Informacijno-kerujuchi sistemi na zalizničnomu transporti*. - Har'kov: UkrGAZhT, 2014. - no 1 (104). - 56-58 pp. 3. Gadzikovskij V.I. *Osnovy teorii i proektirovanija cifrovyh fil'trov: uchebnoe posobie dlja vuzov* [Fundamentals of the theory and design of digital filters: a textbook for high schools]. Moscow, Vysshaja shkola, 1996. - 256 p. 4. Gol'denberg L.M., Matjushkin B.D. and Poljak M.N. *Cifrovaja obrabotka signalov: Spravochnik* [Digital Signal Processing: A Handbook]. Moscow, Radio i svjaz', 1985. - 312 p. 5. Balunin E.I., A. Ju Barinov S.V. Dianov S.V. *Obnaruzhenie i raspoznvanie signal'no-kodovyh konstrukcij* [Detection and identification of signal-code constructions]. Moscow, Izdatel'stvo «Radiotekhnika», 2013. - 96 p.

Поступила (received) 05.02.2016

**Крылова Вікторія Анатоліївна** – кандидат технічних наук, старший викладач, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (050) 281-38-38; e-mail: vika\_hpi@mail.ru.

**Krylova Victoria Anatolievna.** – Ph.D., Senior Lecturer, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", tel.: (050) 281-38-38; e-mail: vika\_hpi@mail.ru.

**Грузин Максим Миколайович** – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; тел.: (097)674-19-89; e-mail: max123456123@rambler.ru

**Hruzin Maksim Nikolaevich** – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", the student; Tel.: (097) 674-19-89; e-mail: max123456123@rambler.ru

О.В. ЛАВРИНЕНКО

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ВИБРАЦИОННОГО ПРОЦЕССА КЛАПАННОГО МЕХАНИЗМА ГРМ ДВС И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ АНАЛОГИЙ

В работе дается математическое описание вибрационного процесса клапанного механизма двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и моделируются его вибрации, которые рассматриваются как аналог тока в активно-индуктивно-емкостной цепи во время колебательного переходного процесса. Параметры такой цепи соответствуют определенным параметрам механической системы. Показано, что информативными параметрами для диагностики клапанов двигателя могут быть коэффициент затухания тока и его величина, значения начальных и центральных моментов распределения максимумов тока и характер функции распределения вероятностей.

**Ключевые слова:** Двигатель внутреннего сгорания, газораспределительный механизм, диагностика, вибрации, информативный параметр, коэффициент затухания.

**Постановка проблемы.** К техническому совершенству двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в последнее время предъявляются все возрастающие требования, в том числе по надежности в процессе эксплуатации. Диагностика технического состояния один из эффективных путей обеспечения надежности ДВС и его основных систем и механизмов. Газораспределительный механизм (ГРМ) – один из основных механизмов двигателя, параметры которого в процессе эксплуатации изменяются. Поэтому существует необходимость в математическом описании процессов его работы, контроле его технического состояния в процессе эксплуатации по соответствующим информативным параметрам и диагностическим признакам.

**Анализ литературы** показывает, что в настоящее время ведутся исследования, направленные на создание новых систем диагностирования ДВС [1]. Предложены пути решения задач диагностики новейшими алгоритмами теории информации: алгоритмы идентификации с адаптивной моделью [2], нейронные сети [3], Вейвлет-преобразования [4], нечеткая логика [5]. Глубина диагностирования при этом существенно зависит от выбора математической модели диагностического сигнала.

Рассмотрим механизм возбуждения вибрации в конструкции ДВС при работе газораспределительного механизма. В исследовании рассматриваем широко распространенную схему газораспределительного механизма, представленную на рис. 1. Динамическое взаимодействие между указанными элементами имеет сложный характер и может быть как одноимпульсным, так и многоимпульсным.

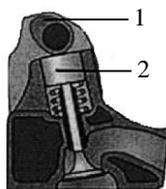


Рис. 1 – Газораспределительный механизм с верхним положением распредвала: 1–кулачок, 2–толкатель.

Воздействие на конструкцию двигателя ударных импульсов от удара кулачка о толкатель определяется во временной области законом изменения ударных

сил  $x_i(t)$  и временем задержки между первоначальным и  $i$ -м ударными импульсами  $t_{ui}$ .

Пусть первоначальный импульс определяется индексом 0, время его задержки  $t_{u0}$  равно нулю. Входное воздействие  $x(t)$ , вызванное ударами кулачка о толкатель и состоящее из первоначального и  $k$  последующих импульсов, определяется во временной области выражением:

$$x(t) = \sum_{i=0}^k x_i(t - t_{ui}). \quad (1)$$

В частотной области выражение для  $X(f)$  может быть получено на основе следующего свойства преобразования Фурье:

$$g(t - \tau) \rightarrow FT \rightarrow G(f)e^{-i2\pi f\tau}, \quad (2)$$

где  $G(f) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-i2\pi ft} dt$  – преобразование Фурье для функции  $g(t)$ .

Следовательно

$$X(f) = \sum_{i=0}^k X_i(f)e^{-i2\pi ft_{ui}}. \quad (3)$$

Так как процесс отличается значительной стохастичностью и определяется большим количеством факторов, то параметры входного воздействия: число соударений, форма ударных импульсов и длительность времени задержки между ними – носят случайный характер.

В результате ударного взаимодействия между кулачком и толкателем возникают колебания, распространяющиеся по конструкции двигателя. Силовой агрегат, с точки зрения передачи по нему колебаний, можно представить как совокупность пластин и стержней, определенным образом соединенных между собой. Вибрация, возникающая в ДВС в результате динамического взаимодействия его деталей, распространяется от места возникновения во всех направлениях в виде упругих волн различных типов: продольных, сдвиговых, крутильных.

Каналами распространения вибрации, при работе ГРМ, от места возникновения к месту ее регистрации на блоке силового агрегата является канал клапан –

головка блока, головка блока – блок двигателя.

Соотношение между входным возмущением и выходным сигналом зависит от свойств механической системы. Несмотря на нелинейные искажения, возникающие при прохождении вибрации через среды с различными характеристиками, полагаем, что с точки зрения прохождения по конструкции двигателя вибрации, вызванной ударными взаимодействиями деталей ГРМ, а также перекалкой поршня и соударениями в подшипниках с большой степенью приближенности можно рассматривать как линейную систему (рис 2).

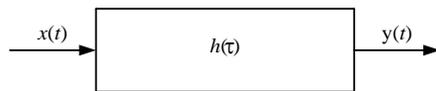


Рис.2 – Одноканальная линейная система

Во временной области свойства одноканальной линейной системы описываются импульсной переходной функцией, которая представляет собой реакцию системы на единичное воздействие в виде дельта-функции Дирака:

$$h(\tau) = y(t), \text{ при } x(t) = \delta(t), \quad (4)$$

где  $h(\tau)$  – импульсная переходная функция линейной системы,  $x(t)$  – входное воздействие,  $y(t)$  – выходной сигнал,  $\delta(t)$  – дельта-функция Дирака.

При этом считается, что система не может реагировать на возмущение до тех пор, пока оно не поступило на ее вход:

$$h(\tau) = 0 \text{ при } \tau < 0. \quad (5)$$

Описание свойств системы в частотной области осуществляется посредством преобразования Фурье импульсной переходной функции (частотная характеристика системы):

$$H(f) = \int_0^{\infty} h(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau. \quad (6)$$

В общем случае частотная характеристика является комплексной функцией частоты то ее принято описывать соотношением:

$$H(f) = Hr(f) - jHi(f), \quad (7)$$

где  $Hr(f)$  и  $Hi(f)$  – соответственно действительная и мнимая части функции  $H(f)$ , определяемые следующими выражениями:

$$Hr(f) = \int_0^{\infty} h(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau, \quad (8)$$

$$Hi(f) = \int_0^{\infty} h(\tau) \sin 2\pi f \tau d\tau. \quad (9)$$

Для записи частотной характеристики принято пользоваться полярной формой:

$$H(f) = |H(f)| e^{-j\varphi(f)}; \quad (10)$$

$$|H(f)| = \sqrt{Hr^2(f) + Hi^2(f)}; \quad (11)$$

$$\varphi(f) = \arctg \frac{Hi(f)}{Hr(f)}. \quad (12)$$

Модуль  $|H(f)|$  называют амплитудной характеристикой,  $\varphi(f)$  – фазовой характеристикой линейной системы.

Возмущение, вызванное динамическим взаимодействием деталей, распространяется многими каналами по конструкции двигателя. Поэтому для решаемой диагностической задачи под передаточной функцией  $j$  – го канала понимается реакция конструкции ДВС на единичное воздействие, приложенное в точке соударения, прошедшее по  $j$ –му каналу и зарегистрированное в месте установки датчика.

Из [6] известно, что наибольшая часть информации от места возбуждения вибрации к месту регистрации передается по одному, основному каналу наиболее быстро и с наименьшими потерями и искажениями. Обозначим импульсную переходную функцию основного канала  $h_0(i)$  и соответствующую ему передаточную функцию  $H_0(f)$ . Дополнительные каналы распространения вибросигналов, помимо импульсных переходных и передаточных функций, оцениваются временем задержки вибросигнала в них по сравнению с основным каналом. Время задержки вибросигнала в основном канале  $t_{k0}$  будет равным нулю.

Импульсные переходные функции и частотные характеристики дополнительных каналов распространения вибрации определяются из:

$$h_j(\tau - t_{kj}) \text{ и } H_j(f) = e^{-j2\pi f t_{kj}}, \quad (13)$$

где  $j$  – порядковый номер канала;  $t_{kj}$  – задержка вибросигнала в  $j$ –м канале.

Важно, что передаточные функции могут меняться для различных экземпляров одной и той же конструкции силового агрегата, что связано с технологическим варьированием материала и размеров деталей. Поэтому частотная характеристика основного канала распространения вибросигнала более стабильна по сравнению с передаточными функциями дополнительных каналов из-за своей наименьшей протяженности.

В работе [7] были проанализированы вибро-акустические сигналы, сопровождающие работу впускных и выпускных клапанов ГРМ ДВС. Временные диаграммы этих сигналов схожи с кривыми изменения тока в активно-индуктивно-емкостной (RLC) цепи при колебательном переходном процессе. Поскольку клапанов в ГРМ может быть множество, то этот механизм в общем случае может рассматриваться как многовходовая колебательная система второго порядка, характеризующаяся определенным вектором импульсных переходных функций с составляющими:

$$\varphi_i(\tau) = \frac{\omega_i^2}{\Psi_i} e^{-\beta_i \tau} \sin(\Psi_i \tau) U(\tau), \quad i = \overline{1, n}, \quad (14)$$

где  $\psi_i = \sqrt{\omega_i^2 - \beta_i^2}$ ;  $\beta_i = \frac{R_i}{2L_i} > 0$ ;  $\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}}$ ;  $\omega_i > \beta_i$ .

Величина активного сопротивления  $R_i$  в электрической цепи соответствует силе трения в клапанном механизме, величина индуктивности  $L_i$  соответствует массе подвижных частей механизма, величина емкости  $C_i$  – размерам деталей механизма, величина тока в цепи соответствует  $\varphi_i(\tau)$ , а напряжение питания цепи  $U(\tau)$ .

Выбор функции вида (14) обусловлен тем, что  $RLC$  – контур в колебательно режиме имеет такую же характеристику, а также совпадает с экспериментальными результатами моделирования. Но предположение о том, что линейная механическая система характеризующая точки второго порядка вида (14), не всегда согласуются с практикой. На некоторых спектрограммах вибраций впускных и выпускных клапанов ГРМ иногда наблюдается характерный подъем в области близких к нулю частот, Это объясняется наличием путей распространения от источника белого шума до точки съема вибраций с большим механическим затуханием, канала распространения с слабо выраженными резонансными свойствами. Его можно описать либо моделью линейной системы первого порядка с экспоненциальной импульсной переходной функцией, либо аperiodическим звеном второго порядка. Для сохранения уникальности подхода остановимся на втором случае, так как он включает в качестве предельного и аperiodического случая, потому что при этом импульсную переходную функцию можно получить как предел (14) при  $\omega_i = \beta_i$  в виде

$$\lim_{\omega_i \rightarrow \beta_i} \varphi_i(\tau) = \lim_{\psi_i \rightarrow 0} \omega_i^2 \tau e^{-\beta_i \tau} \frac{\sin \psi_i \tau}{\psi_i \tau} U(\tau) = \beta_i^2 \tau e^{-\beta_i \tau} U(\tau); \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \varphi_i(\tau) &= \frac{\omega_i^2}{i\tilde{\psi}_i} e^{-\beta_i \tau} \sin(i\tilde{\psi}_i \tau) U(\tau) = \frac{\omega_i}{\tilde{\psi}_i} e^{-\beta_i \tau} \text{sh}(\tilde{\psi}_i \tau) U(\tau) = \\ &= \frac{\omega_i^2}{2\tilde{\psi}_i} [e^{-(\beta_i - \tilde{\psi}_i)\tau} - e^{-(\beta_i + \tilde{\psi}_i)\tau}] U(\tau). \end{aligned} \quad (16)$$

Вероятностный анализ математической модели выполнен в предположении, что на каждый из входов многовходовой системы, представленной вектором импульсных переходных функций (14) воздействует процесс, который можно рассматривать как аддитивное наложение большого числа независимых импульсов, возникающих в случайный момент времени. Такой физический процесс в рамках сформулированных предположений можно описать моделями типа «белый шум». В общем случае компоненты (14) могут быть стационарно стохастически связанными. При этом каждая компонента – отклик, связанные с определенным каналом распространения представляется в установившемся режиме в виде линейного процесса.

$$\xi_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi_i(t - \tau) \eta_i(\tau), \quad i = \overline{1, n}, \quad (17)$$

где каждая  $\varphi_i(\tau), \tau \in (-\infty, \infty)$  определяется по (14) с учетом (15) для отдельных компонент, а  $\{\eta_i(\tau), i = \overline{1, n}\}$  – вектор порождающих процессов с независимыми приращениями, производные компонент которого воздействуют на входы многовходовой системы. При этом предполагаем, что компоненты вектора порождающего процесса можно рассматривать как стохастически эквивалентные.

Разбиение суммарного процесса вибраций в точке регистрации на слагаемые осуществляется в соответствии с резонансными свойствами каждого канала и колебательной системы клапанного механизма ГРМ в целом. Корреляционная функция рассматриваемого процесса в установившемся режиме с учетом (17) может быть записана так:

$$R(s) = \sum_{k,i=1}^n a_k a_i h_{ki}(s), \quad s \in (-\infty, \infty), \quad (18)$$

где  $h_{ki}(s)$  – взаимная корреляционная функция  $k$ -го и  $i$ -го каналов распространения.

Следовательно, из (17,18) интегрируя получим:

$$h_{ki}(s) = \frac{\kappa_{2ki} \omega_k^2 \omega_i^2}{2 \psi_k \psi_i} e^{-\beta_i |s|} [a_{ki} \cos \psi_i s + b_{ki} \sin \psi_i |s|], \quad (19)$$

где для всех  $k, i = \overline{1, n}$ ,  $\kappa_{2ki}$  – смешанный второй семиинвариант случайных величин  $\eta_k(1)$  и  $\eta_i(1)$ ,  $\kappa_{2ki} = \kappa_2[\eta_k(1)\eta_i(1)]$ , который при  $k = i$  переходит в обычную дисперсию случайной величины.

$$\begin{aligned} a_{ki} &= \frac{\beta_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \tilde{\psi}_{ki}^2} - \frac{\beta_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \tilde{\psi}_{ki}^2} \geq 0; \\ b_{ki} &= \frac{\tilde{\psi}_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \tilde{\psi}_{ki}^2} + \frac{\psi_{ki}}{\beta_{ki}^2 + \psi_{ki}^2}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\beta_{ki} = \beta_k + \beta_i; \quad \psi_{ki} = \psi_k + \psi_i; \quad \tilde{\psi}_{ki} = \psi_k - \psi_i.$$

При  $\psi_i \rightarrow 0$  получим формулу

$$\lim_{\psi_i \rightarrow 0} h_{ki}(s) = \kappa_{2ki} \frac{(\omega_k \beta_i)^2}{\beta_{ki}^2 + \psi_k^2} |s| e^{-\beta_i |s|}. \quad (21)$$

Таким образом, (18) с учетом (19) принимает вид

$$\begin{aligned} R(s) &= \sum_{k,i=1}^n \frac{1}{2} a_k a_i \kappa_{2ki} \frac{(\omega_k \omega_i)^2}{\psi_k \psi_i} e^{-\beta_i |s|} [a_{ki} \cos \psi_i s + \\ &+ b_{ki} \sin \psi_i |s|], \quad s \in (-\infty, \infty). \end{aligned} \quad (22)$$

Если ввести обозначения

$$\begin{aligned} A_m &= \frac{a_i \omega_i^2}{2\psi_i} \sum_{k=1}^n \frac{a_k \omega_k^2 a_{ki}}{\psi_k} \kappa_{2ki} \geq 0; \\ B_m &= \frac{a_i \omega_i^2}{2\psi_i} \sum_{k=1}^n \frac{a_k \omega_k^2 b_{ki}}{\psi_k} \kappa_{2ki}, \end{aligned} \quad (23)$$

то корреляционную функцию вибропроцесса представим в виде

$$R(s) = \sum_{i=1}^n e^{-\beta_i |s|} [A_m \cos \psi_i s + B_m \sin \psi_i |s|], \quad (24)$$

при всех  $s \in (-\infty, \infty)$ .

В (24) все компоненты вектора  $\psi_i, i = \overline{1, n}$ , называются резонансными частотами, так как они определяют положение максимумов спектра, а компоненты вектора  $\beta_i, i = \overline{1, n}$  – коэффициентами затухания. При  $s=0$  из (24) получим дисперсию вибропроцесса в виде

$$R(0) = \sum_{i=1}^n A_{in} = \sum_{i,k=1}^n \frac{a_i a_k (\omega_i \omega_k)^2}{2\psi_i \psi_k} a_{ki} K_{2ki}. \quad (25)$$

Выражение (23) можно представить в виде суммы экспоненциально-синусных компонент

$$R(s) = \sum_{i=1}^n e^{-\beta_i |s|} C_{in} \sin(\psi_i |s| + \Phi_{in}). \quad (26)$$

Автокорреляционная функция вибропроцесса ГРМ полностью определяется параметрами  $a_i, \psi_i, \beta_i, i = \overline{1, n}$ , которые можно использовать в качестве диагностических признаков при анализе вибраций клапанного механизма ГРМ в рамках корреляционной теории.

Вибропроцесс

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^n a_i \xi_i(t) \quad (27)$$

является стационарным и гильбертовым  $R(0) < \infty$ , поэтому для него существует спектральная плотность, определяемая как косинус-преобразование Фурье с учетом (24) в виде

$$S(\omega) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{A_{in} \beta_i (\omega_i^2 + \omega^2) + B_{in} \psi_i (\omega_i^2 - \omega^2)}{(\omega_i^2 + \omega^2)^2 - 4\omega^2 \psi_i^2}. \quad (28)$$

Рассмотрим одномерную характеристическую функцию процесса (27). Если все компоненты вектора порождающего процесса стохастически эквивалентны, то запишем вид ее логарифма

$$\begin{aligned} \ln f_\xi(u) = ium \sum_{i=1}^n a_{in} + \\ + \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(iux \sum_{i=1}^n a_{in} \varphi_i(\tau)\right) - \\ - 1 - iux \sum_{i=1}^n a_{in} \varphi_i(\tau) \left] \frac{dK(x)}{x^2} d\tau \end{aligned} \quad (29)$$

Полученное выражение (29) позволяет по известным характеристикам порождающего процесса с использованием преобразования Фурье–Стилтьеса вычислить значения функции распределения вероятностей процесса (27). Появление тех или иных дефектов ГРМ эквивалентно изменению значений параметров  $R_i, L_i, C_i$  в предложенной математической

модели, что в свою очередь изменяет начальные и центральные моменты, а также характер кривой функции распределения вероятностей на основе выражения (29).

**Выводы.** Для диагностики клапанного механизма ГРМ по их вибрациям можно использовать следующие диагностические признаки: коэффициент затухания  $\beta_i, i = \overline{1, n}$ ; параметры  $\psi_i, i = \overline{1, n}$ ; величины начальных и центральных моментов; характер кривой функции распределения вероятностей. На основе проведенного вероятностного анализа модели вибрации клапанного механизма ГРМ и предложенных диагностических признаков разработан пакет программ для информационно-измерительной системы вибродиагностики.

**Список литературы:** 1. Лавриненко О.В. Современные информационно-измерительные системы вибродиагностики ДВС / А.Н. Борисенко, П.С. Обод, // Вестник НТУ «ХПИ». – 2010.–№39, С. 132–137. 2. Обозов А.А. Развитие методов и систем технического диагностирования ДВС / А.А. Обозов, В.И. Таричко // Двигателестроение. – 2012. – № 4. С.30–34. 3. Sangha M.S. Neural network fault classification of transient data in an automotive engine // M.S. Sangha, J.B. Gomm, D.Yu. J. Modell., Identif. Contr.2008.–№3(2)–P148-155. 4. Мигущенко Р.П. Элементы контролю та діагностики стану вібраційних об'єктів: монографія/ Р.П. Мигущенко.–Харків: Вид-во «Підручник НТУ «ХПІ», 2014.–224 с. 5. Кузнецов А.В. Разработка системы диагностики ДВС на основе нечеткой логики: диссерт. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.06 /Кузнецов А.В.– М., 2007.–147с. 6. Болас М. Виброакустическая диагностика дизелей / М. Болас, Я. Сурма Автомобильный транспорт. – 1990. – № 7. С31–35. 7. Лавриненко О.В. Определение информационных параметров для системы диагностики газораспределительного механизма ДВС / О.В. Лавриненко, – Харьков: Вестник НТУ «ХПИ», 2014. №62, с.87–94.

**Bibliography (transliterated):** 1. Lavrinenko O.V., Borisenko A.N., Obod P.S. Sovremennye informacionno-izmeritel'nye sistemy vibrodiagnostiki DVS [Modern information-measuring system of the vibration diagnostics of ICE] *Vestnik NTU "KhPI"* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute]. Kharkov, 2010, no39, p.p. 132–137. 2. Obozov A.A. Tarichko V.I. Razvitie metodov i sistem tehniceskogo diagnostirovanija ICE [Development of methods and technical diagnostics systems of Internal combustion engine] *Dvigatellestroenie* [Engine building] 2012, no4. p.p.30–34. 3. Sangha M.S., Gomm J.B., Yu. D. Neural network fault classification of transient data in an automotive engine *J. Modell., Identif. Contr.* 2008.–no 3(2), p.p.148–155. 4. Myhushchenko R.P. Elementy kontrolyu ta diahnostryky stanu vibratsiynykh ob'ektiv: monohrafiya [Elements of control and diagnostics of vibrating objects. Monograph]–Kharkiv, "Pidruchnyk NTU "KhPI", 2014, 224p. 5. Kuznecov A.V. *Razrobotka sistemy diagnostiki DVS na osnove nechetkoj logiki: disert. na soiskanie uch. stepeni kand. tehn. nauk: spets. 05.13.06* [Development of the internal combustion engine diagnostic system based on fuzzy logic: candidate eng. sci. diss. (Ph. D.) Moscow, 2007, 147p. 6. Bolas M., Surma Ja., *Vibroakusticheskaja diagnostika dizelej* [Vibroacoustic diagnostics of diesel engines] *Avtomobil'nyj transport* [Auto Transport] Moscow, 1990, no.7,p.p.31–35. 7. Lavrinenko O.V. *Opredelenie informacionnyh parametrov dlja sistemy diagnostiki gazoraspredeitel'nogo mehanizma DVS* [Definition of information parameters for system diagnostics timing mechanism of the internal combustion engine] *Vestnik NTU "KhPI"* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute]. Kharkov, 2014, no. 62, p.p.87–94.

Поступила (received) 15.02.2016

**Лавріненко Ольга Валеріївна** – асистент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (063) 695-12-65; e-mail: lavrinol2004@gmail.com

**Lavrinenko Olga Valerivna** – assistant, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", tel.: (063) 695-12-65; e mail: lavrinol2004@gmail.com

*С.М. САВИЦКИЙ***ВЫРАВНИВАНИЕ ГРАФИКА ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ В ЭНЕРГОСИСТЕМЕ ПУТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОАККУМУЛЯТОРОВ**

В данной статье обсуждается использование комбинированной системы производства тепловой энергии автоматизированными узлами электронагрева (потребителями-регуляторами). Предложено внедрение автоматизированных систем управления электрической нагрузкой в системах электро и теплоснабжения административных зданий. Использование систем аккумуляционного электронагрева, которыми являются потребители-регуляторы, позволяет обеспечить выравнивание графика энергетической нагрузки в системе электроснабжения административных зданий. Проведенная оценка общего эффекта от выравнивания графика электрической нагрузки энергосистемы дает ответ об экономической целесообразности внедрения комбинированных систем теплоснабжения.

**Ключевые слова:** потребитель-регулятор, график электрической нагрузки, энергоэффективность, система электроснабжения, стоимость электроэнергии, теплоснабжения.

**Введение.** Рациональное использование энергоресурсов в топливно-энергетическом комплексе предполагает использование энергосберегающих технологий и экономичный режим работы оборудования на всех стадиях процесса: от производства электроэнергии до ее потребления электроприемниками. Повышение эффективности работы технической системы, включающей производство, передачу, распределение и потребление электрической энергии, уменьшения потерь на каждом этапе технологического процесса в этой системе на основе уплотнения графика электрической нагрузки и повышение качества электрической энергии является актуальной проблемой для всех стран мира. Современное состояние электрохозяйства бытового и промышленного сектора характеризуется использованием большого количества устройств. Такая ситуация привела к увеличению комфортности жизни человека, с одной стороны, а с другой – к критическому увеличению нагрузки на элементы системы электроснабжения, значительной неравномерности графиков электрической нагрузки, повышение сложности поддержания динамического баланса между потреблением и генерацией электрической энергии, снижение качества электрической энергии в распределенных сетях электроснабжения.

**Постановка проблемы.** Отставание темпов роста цен на электрическую энергию от цен на природный газ и нефть создает условия для использования электрической энергии вместо природного газа и мазута в системах промышленного и бытового тепло [1, 2]. Себестоимость атомной энергии в мире в три раза ниже, чем энергия, получаемая из нефти, и вдвое меньше чем по газу. Самая низкая себестоимость в электроэнергии, вырабатываемой атомными электростанциями составляет около 50% и в перспективе будет расти.

В распоряжении Кабинета Министров от 17 декабря 2008 №1567-р "О программах повышения энергоэффективности и уменьшения потребления энергоресурсов" предусмотрена необходимость уменьшения энергоемкости валового внутреннего продукта и потребления энергоресурсов, в том числе уменьшение потребления газа и использования

электроэнергии для отопления и горячего водоснабжения [3, 4]. Потери активной мощности в распределительных сетях промышленного и бытового сектора является одним из проблемных вопросов современной энергетики. Система электроснабжения промышленного и бытового сектора является динамичной структурой, в которой важную роль играют вопросы управления графиком нагрузки и улучшения его параметров. Оптимизация режимов работы производства электрической энергии за счет увеличения потребления электроэнергии в часы «ночного провала» обуславливает необходимость заменять газовый нагрев системы аккумуляционного электронагрева, которые являются потребителями-регуляторами, при этом позволил существенно снизить объемы потребления природного газа на нужды отопления.

Важность и эффективность управления спросом посредством использования тарифов реального времени было показано, что небольшое смещение в пике потребления приводит к весомым сбережениям и позволяет избежать новых пиковых электростанций [5, 6]. К методам управления электропотребления относятся методы, ведущие к изменению формы графика активной нагрузки, за счет подключения дополнительных электроприемников в часы минимум нагрузки. За счет этого среднее за период нагрузка возрастает, а максимум ии остается неизменным. Тем самым целостность графика растет, а неравномерность уменьшается [7]. Управление нагрузкой электрической энергии может быть выполнено наиболее эффективно путем использования потребителей-регуляторов. При этом существенное влияние осуществляется и на повышение надежности электроснабжения, поскольку максимальная нагрузка частично переносится в часы резерва мощности энергосистемы. Потребители регуляторы позволяют использовать многотарифные счетчики электрической энергии что дает возможность выравнивать графики электрических нагрузок для уменьшения электропотребления во времена максимума нагрузки. Методы и меры по управлению графика электрической нагрузки потребления электрической энергии за счет использования потребителей-регуляторов позволяет уменьшить пики нагрузки в

енергосистеме.

Дослідженнями встановлено пряму залежність між вирівнюванням графіка електричного навантаження за фазними проводами системи електропостачання та технологічними втратами на вищих рівнях системи електропостачання тільки для побутового сектору [8]. Наведені показники, що характеризують функціональну ефективність діючої системи електропостачання і проаналізовані тенденції їх динаміки в залежності від ефективності регулювання графіка навантаження [9, 10]. Приведені методи розроблені для побутових споживачів, які при впровадженні на практиці показали високу ефективність щодо зменшення втрат електричної енергії у відповідних системах електропостачання. Тому доцільно проаналізувати техніко-економічний ефект від впровадження споживача-регулятора для керування графіка навантаження в системі електропостачання адміністративних будівель.

**Методы исследования.** Учитывая технологические особенности производства электроэнергии и тепла, технико-экономическое обоснование развития электроснабжающих и теплоснабжающих систем должно основываться на информации о количестве потребляемой электроэнергии и тепла, и на изменения их потребления во времени. Такую информацию содержат перспективные графики нагрузки отдельных потребителей и суммарные графики нагрузки.

Основной характеристикой, определяющей режим работы энергосистемы, является суточный график нагрузки энергосистемы, в том числе график максимального рабочего дня, который характеризуется наибольшей суточной нагрузкой энергосистемы, график среднего рабочего дня и график минимального дня, характеризуемый наименьшей нагрузкой. Форма суточного графика нагрузки энергосистемы определяется характером и продолжительностью работы потребителей электроэнергии (рис. 1).

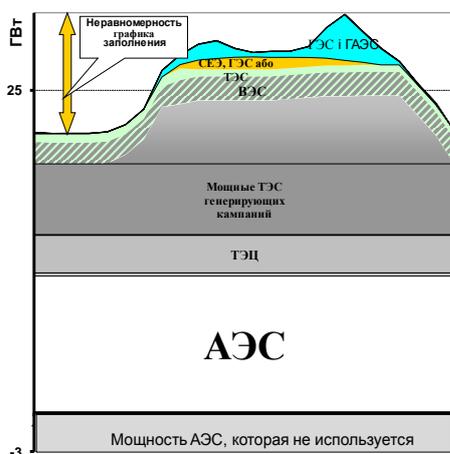


Рис. 1 – Покрытие суточного графика нагрузки энергосистемы

Многолетний опыт эксплуатации электрогенерирующего оборудования электростанций показал, что покрытие базовой части суточного

графика нагрузки наиболее экономично обеспечивать за счет: АЭС, работающих главным образом в базовой части графика нагрузки энергосистемы из-за затруднений регулирования их мощности; ТЭЦ, работающих максимально экономично тогда, когда их электрическая мощность соответствует тепловому потреблению, ГЭС, использование мощности которых не должно превышать возможности минимального пропуска воды, необходимого по санитарным требованиям и условиям судоходства. При этом покрытие пиковой части суточного графика нагрузки, как правило, обеспечивается за счет агрегатов ГЭС и ГАЭС (если их мощность достаточна), допускающих частые включения и отключения, а также быстрые изменения загрузки.

Для обеспечения наиболее экономичной работы электросистемы в пиковых частях суточного графика нагрузки необходимо иметь достаточные маневренные мощности, создание которых требует повышенных капиталовложений. Безусловно, для работы электросистемы при пиковой нагрузке больше всего подходят ГЭС и ГАЭС, т.к. рабочая мощность их легко изменяется в широких пределах. Однако мощностей ГЭС и ГАЭС на Украине не достаточно. Поэтому, из-за неравномерности режима электропотребления, а следовательно, и производства электроэнергии, украинская электросистема вынуждена нести значительные дополнительные расходы. При этом для покрытия пиковых нагрузок используются отдельные энергоблоки ТЭС, имеющие достаточно высокие удельные расходы топлива на плановые пуски энергоблоков мощностью 300 и 800 МВт в зависимости от длительности простоя (табл. 1). Из приведенных данных следует, что чем меньше длительность простоя энергоблоков, тем меньше расход топлива на пуск. При уменьшении времени простоя блоков 300 и 800 МВт до 6-10 часов по сравнению с их пуском из холодного состояния расходы топлива уменьшаются соответственно на 42, 35 и 54%.

Таблица 1 – Расходы топлива на плановые пуски энергоблоков

Длительность простоя, ч.	Расходы топлива на пуск, т.	
	300 МВт	800 МВт
Холодное состояние	173,7	599,3
50-60	158,7	448,1
30-35	141,1	433,1
15-20	136,4	430,0
6-10	100,3	276,1

Поскольку электросистема несет значительные дополнительные расходы, вызываемые неравномерностью графика электрической нагрузки, а следовательно, и производства электроэнергии, одним из весьма перспективных путей экономии топливно-энергетических ресурсов, расходуемых на выработку электроэнергии, является привлечение потребителей-регуляторов к выравниванию графика нагрузки энергосистемы. Потребители-регуляторы снижают

свои нагрузки в часы пиковых нагрузок энергосистемы и переносят их во внепиковые зоны. Особенно выгодными являются мощные потребители-регуляторы, принадлежащие к базовой нагрузке электросистемы. За счет привлечения таких потребителей на период пиковых нагрузок, продолжающихся около 6 часов в сутки, можно отказаться от использования для покрытия пиковых нагрузок от 200 до 500 МВт генерирующих мощностей ТЭС с удельными расходами топлива, близкими к средним по ТЭС Минтопливэнерго Украины – 373 т.у.т/кВт·час. Для получения такой экономии энергоресурсов электропотребители должны быть заинтересованы в регулировании (выравнивании) графика нагрузки путем снижения электропотребления в часы пиковых нагрузок энергосистемы и его переноса во внепиковые зоны, что достигается применением тарифов на электроэнергию, дифференцированных по зонам суток, и установкой у электропотребителей многотарифных электросчетчиков.

Оптовый рынок электроэнергии Украины и, соответственно потребители электрической энергии, оплачивая чрезвычайно высокие закупочные цены теплоэлектростанций, фактически субсидируют их. Здесь просматриваются сразу два негативных момента. Первый – высокие тарифы ТЭЦ увеличивают и без того высокий тариф на ОРЭ. Второй негативный момент – теплоэлектростанции, имеющие преобладающее право реализовать свою электроэнергию в энергорынок, фактически сокращают рынок сбыта для атомных и тепловых электростанций, которые могли бы производить этот объем электроэнергии по значительно меньшей цене. Тогда как АЭС и ТЭС страдают от недогрузки своих мощностей. Особенно сложное положение складывается с загрузкой как тепловых, так и атомных электростанций в ночное время суток летом.

Эффективным способом решения проблемы централизованного отопления является правильная организация теплоснабжения с комбинированной системой выработки электроэнергии и теплоты, которая дает дополнительные преимущества, т.к. создает возможность маневра мощностями при пиковых нагрузках. Переход на автономные системы отопления зданий на базе теплоаккумуляторов способствует растущая разница стоимости 1 Гкал тепловой энергии, полученной от газовых котельных и 1 Гкал тепловой энергии, полученной от электродогрева с теплоаккумуляторами на основе ночных тарифов на электроэнергию (тарифов на электроэнергию, дифференцированных по зонам суток для промышленных и приравненных к ним потребителей). На рис. 2 показано, что рост ночных тарифов будет значительно замедлен по отношению к росту цен природного газа и, соответственно, к росту тарифов на тепло. Необходимость сбыта в энергосистему электроэнергии от неманевренных базовых атомных станций еще многие десятилетия будет удерживать ночные тарифы на электроэнергию в Украине от роста, поощряя потребителей к потреблению электроэнергии в ночные часы.

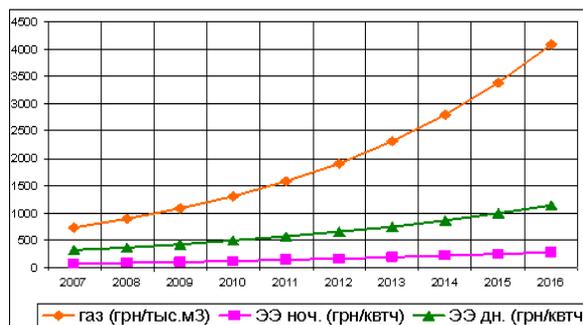


Рис. 2 - Рост ночных тарифов

На рисунке 3 показана разница в стоимости 1 Гкал тепла, полученного от использования газа и ночной электроэнергии. Из рисунка видно, что эта разница растет в пользу ночного отопления с каждым годом. Если в 2008 году разница в стоимости 1 Гкал составляет около 100 грн., то в 2016 году эта разница составит уже более 750 грн. Фактически, только переход на автономное отопление бюджетных зданий на основе теплоаккумуляторов позволяет снизить платежи за теплоснабжение, в среднем, в 3-4 раза на интервале десяти следующих лет.



Рис. 3 - Разница стоимости 1 Гкал тепла

Выравнивания графика нагрузки энергосистемы за счет потребителей-регуляторов позволяет получить весомую альтернативу эксплуатации блоков тепловых электрических станций в маневренных режимах для поддержки баланса мощностей в электроэнергетической системе. Потребители-регуляторы делят условно на две группы:

- потребители-регуляторы, которые являются частью энергосистемы и реализуют совмещенную функцию производства – потребления электроэнергии (аккумулирующие электростанции);
- потребители-регуляторы, которые используют электроэнергию в собственных целях (технологии кабельного электротеплоаккумуляционного обогрева, автоматизированные системы нагрева воды электроэнергией).

Достоинством аккумулирующих электростанций является потребление электроэнергии в часы минимальной нагрузки и обеспечение энергией в часы максимальной нагрузки энергосистемы. За счет этого достигается уменьшение ночного провала, снижается неравномерность ГЭН, отпадает необходимость

разгрузки или остановки крупных энергоблоков электростанций.

К потребителям-регуляторам относятся установки нагрева воды на горячее водоснабжение и теплоснабжение электроэнергией с накопительными емкостями и возможностью использования электроэнергии в период провала нагрузки энергосистемы. При переходе от централизованного водо- и теплоснабжения на установки нагрева воды электроэнергией, их суммарная максимальная мощность нагрева в ночной период может достигать 600-700 МВт, тогда как мощность ГАЭС колеблется от 500 до 1000 МВ.

В системах электроснабжения в основном применяют двухтрансформаторные подстанции, мощность которых выбирается исходя из следующих условий. В случае аварии один трансформатор, с учетом допустимой перегрузки, должен обеспечить нагрузку всех потребителей (в таком случае на время можно отключить электроприемники III категории). Поэтому трансформаторные подстанции систем электроснабжения городов имеют завышенные установленные мощности. Среднесуточная загрузка городских трансформаторных подстанций и сетей не превышает 40%, а резерв установленной мощности в городских электрических сетях, с учетом допустимой нагрузки трансформаторов, превышает 50-60%.

**Выводы.** Таким образом, эффективным способом выравнивания сетевой нагрузки может оказаться использование избытка электрической энергии для организации централизованного горячего водоснабжения и теплоснабжения жилых, административных зданий. При этом потребители, использующие электроустановки для нагрева воды могут стать для энергосистемы потребителями-регуляторами, запасующими энергию во внепиковые часы потребления электрической энергии и использующие ее в часы максимума нагрузки, тем самым выравнивая графика потребления электроэнергии в энергосистеме.

Для того чтобы перейти на электроэнергию, используя резерв установленной мощности, необходимо регулировать мощность нагрева в зависимости от загруженности электрической сети. Т.е. для использования резервной мощности трансформатора, нагрузка должна быть управляемой и иметь возможность отключения и включения. Таким требованиям может отвечать нагрузка, которая способна аккумулировать электроэнергию во время провала нагрузок, а затем в нужный момент раздавать ее потребителям. К такой установки можно отнести тепловые аккумуляторы, которые в ночное время накапливают энергию, а в дневное она раздается

потребителям.

**Список литературы:** 1. Оновлення "Енергетичної стратегії України на період до 2030 р". – Затв. розпорядженням КМУ № 1071 від 24.07.2013, 2013. 2. Проект «Енергетичної Стратегії України на період до 2035 року» – Київ, 2014. – Режим доступу: <http://www.niss.gov.ua>. – Дата звертання : 20 січня 2016. 3. Проект "Плану розвитку ОЕС України на наступні десять років" – Укренерго. – Режим доступу: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua> – Дата звертання : 24 січня 2016. 4. Актуалізація Енергетичної стратегії України. – Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014. – Режим доступу: <http://mpe.kmu.gov.ua>. – Дата звертання : 6 лютого 2016. 5. Правила Оптового ринку електроенергії України (Правила ринку). Додаток 2 до Договору між членами Оптового ринку електроенергії. – Затв. Радою Оптового ринку електроенергії України 02.10.1997р, 1997. 6. Про засади функціонування ринку електричної енергії України. – Верховна Рада України; Закон від 24.10.2013 № 663-VII, 2013. 7. Проект Закону про внесення змін до Закону України "Про засади функціонування ринку електричної енергії України" щодо виконання вимог Договору про заснування Енергетичного Співтовариства. – Верховна Рада України; №2199а від 30.06.2015, 2015. – Режим доступу: <http://w1.c1.rada.gov.ua>. – Дата звертання : 9 лютого 2016. 8. Денисюк С. П. Аналіз впливу нерівномірності споживання електроенергії / С. П. Денисюк, Т. М. Базюк // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 4, № 8 (64). – С. 9–13.

**Bibliography (transliterated):** 1. *Onovlennja "Energetychnoi" strategii' Ukrainy na period do 2030 r* (2013). *Zatv. rozporjadzhennjam KМУ no1071 vid 24.07.2013* [Update "Energy Strategy of Ukraine till 2030"] 2. *Proekt «Energetychnoi' Strategii' Ukrainy na period do 2035 roku»* (2014). Kyiv, 41 [The "Energy Strategy of Ukraine till 2035"]. Available at: <http://www.niss.gov.ua> (accessed 20.01.2016) 3. *Proekt "Planu rozvytku OES Ukrainy na nastupni desjat' rokov"*. Ukrenergo. [The "Plan of UES of Ukraine for the next ten years" – Ukrenergo] Available at: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua/> (accessed 24.01.2016) 4. *Aktualizacija Energetychnoi' strategii' Ukrainy* (2014). *Ministerstvo eneretyky ta vugil'noi' promyslovosti Ukrainy*. [Updating of the Energy Strategy of Ukraine. – The Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine] Available at: <http://mpe.kmu.gov.ua>. (accessed 06.02.2016) 5. *Pravyla Optovogo rynku elektroenerгии' Ukrainy (Pravyla rynku). Dodatok 2 do Dogovoru mizh chlenamy Optovogo rynku elektroenerгии' (1997)*. *Zatv. Radoju Optovogo rynku elektroenerгии' Ukrainy 02.10.1997 r*. [Rules of the Wholesale Electricity Market of Ukraine (Regulations). Annex 2 to the Agreement between members of the Wholesale Electricity Market]. 6. *Pro zasady funkcionuvannja rynku elektrychnoi' energii' Ukrainy* (2013). *Verhovna Rada Ukrainy; Zakon vid 24.10.2013 no 663-VII*. [On the Principles of operation electricity market of Ukraine. – Verkhovna Rada of Ukraine; Act of 24.10.2013 number 663-VII, 2013] 7. *Proekt Zakonu pro vnesennja zmin do Zakonu Ukrainy "Pro zasady funkcionuvannja rynku elektrychnoi' energii' Ukrainy" shhodo vykonannja vymog Dogovoru pro zasnuvannja Energetychnogo Spivtovarystva* (2015). *Verhovna Rada Ukrainy; no2199a vid 30.06.2015*. [Draft Law on Amendments to the Law of Ukraine "On principles of functioning electricity market of Ukraine" to meet the requirements of the Treaty establishing the Energy Community. – Verkhovna Rada of Ukraine; no2199a on 06/30/2015] Available at: <http://w1.c1.rada.gov.ua> (accessed 09.02.2016) 8. Denysuk S. P., Bazyuk T. M. Analysis of irregular electricity consumption [Analysis of the impact of uneven power consumption]. *Eastern-European Journal Of Enterprise Technologies*, 4/8 (64), 9–13. Available at: <http://journals.urau.ua>.

Поступила (received) 05.02.2016

**Савицький Сергій Михайлович** – асистент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», тел.: (050) 281-38-38; e-mail: savitskiy.s@ukr.net.

**Savitsky Sergey Muchaulovuch.** – assistant, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", tel.: (050) 281-38-38; e mail: savitskiy.s@ukr.net.

**В.П. СЕВЕРИН, Е.Н. НИКУЛИНА, Н.В. ТРУБЧАНОВА**

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ПАРОГЕНЕРАТОРА ЭНЕРГОБЛОКА АЭС

Рассмотрена система автоматического управления производительностью парогенератора АЭС. Разработана ее математическая модель и вычислены значения постоянных параметров. Задача идентификации параметров модели системы по экспериментальным данным процессов отклонения уровня и давления в парогенераторе сведена к задаче оптимизации векторной целевой функции, учитывающей ограничения параметров, ограничения устойчивости, функцию невязки. Векторным методом оптимизации вычислены значения параметров системы управления. Построены динамические процессы изменения переменных состояния системы, отражающие колебательный затухающий характер процессов управления.

**Ключевые слова:** идентификация параметров, парогенератор, производительность, система автоматического управления, регулятор, оптимизация.

**Введение.** На четырех атомных электростанциях (АЭС) Украины эксплуатируются 13 энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000, которые нуждаются в модернизации. В состав каждого энергоблока входят 4 парогенератора ПГВ-1000. Системы автоматического управления (САУ) парогенераторов АЭС должны стабилизировать уровень воды в парогенераторе и его производительность с высокой точностью [1–4]. Для обеспечения устойчивости САУ, ограничения максимального отклонения уровня воды и производительности, для обеспечения максимального быстродействия и надежности САУ необходимы адекватные математические модели [5]. Такие модели можно получить только путем идентификации параметров теоретических моделей САУ на основании экспериментальных данных о переходных процессах, происходящих в реальных генераторах [4]. Целью статьи является представление методов и результатов идентификации параметров моделей систем автоматического управления уровнем и производительностью парогенератора ПГВ-1000 энергоблока АЭС.

Для достижения намеченной цели разрабатывается математическая модель САУ производительностью (САУП) парогенератора (ПГ) ПГВ-1000 на основе САУ уровня (САУУ) [3]. Создается модель САУП с пропорционально-интегральным регулятором. Проводится идентификация параметров модели САУП ПГ по экспериментальным данным переходных процессов изменения уровня воды и давления в ПГ.

**Система управления производительностью.** В состав энергоблока ВВЭР-1000 входят четыре парогенератора ПГВ-1000. Каждый ПГВ-1000 имеет горизонтальный цилиндрический корпус, поверхность теплообмена образуют 11000 трубок, над верхним рядом трубного пучка расположен погруженный дырчатый лист для гашения кинетической энергии пароводяной смеси. Через 10 патрубков пар из парогенератора отводится в общий коллектор [1]. В технологическую систему питания парогенератора входят два ПТН, паровые конденсационные турбины, ПВД, трубопроводы и другое оборудование. Основным источником питания приводных турбин ПТН является пар, отработавший в ЦВД главной турбины энергоблока [1] Принципиальная схема САУП ПГ является трехимпульсной [2]: сигнал

ошибки  $e$ , поступающий на вход регулятора производительности, формируется сигналом задатчика частоты вращения приводной турбины  $\varpi_s$ , импульсами с датчика тепловой мощности  $Q_s$  и с датчиков давления воды  $P_w$  и пара  $P_s$ . Сигнал регулятора производительности действует на исполнительный механизм, изменяющий координату  $m_d$  регулирующего клапана подачи пара с расходом  $G_d$  на приводную турбину. Благодаря изменению частоты вращения  $\varpi$  приводной турбины изменяется производительность питательного турбонасоса (ПТН), на который подается питательная вода с расходом  $G_p$ . С ПТН вода по трубопроводам проходит подогреватель высокого давления (ПВД) и поступает на регулирующий питательный клапан (РПК). РПК управляется регулятором уровня (РУ). Сигнал ошибки, поступающий на вход РУ, формируется сигналом задатчика уровня  $H_s$ , импульсами с датчика уровня  $H$  и с датчиков расходов воды  $G_w$  и пара  $G_s$ . Сигнал регулятора питания действует на исполнительный механизм, изменяющий координату  $m_w$  РПК. Входными воздействиями САУ являются тепловая мощность теплоносителя  $Q_t$ , координата  $m_s$  регулирующего клапана турбины, частота вращения приводной турбины  $\varpi_s$ , расход пара  $G_d$  на приводную турбину и расход питательной воды  $G_p$ .

Структурная схема САУ парогенератором включает сумматоры, регулятор производительности, исполнительный механизм, ПТН, ПВД, модель парогенератора, цилиндр высокого давления (ЦВД) и обратные связи [2]. На вход САУ подается уставка координаты частоты вращения приводной турбины  $\varphi_s$ , выходом является координата расхода воды  $g_w$ . Возмущающими воздействиями являются координаты тепловой мощности теплоносителя  $q_t$  и входной сигнал следящего привода регулирующего клапана турбины  $u_s$ . Ошибка  $\varepsilon$  поступает на вход регулятора производительности с передаточной функцией (ПФ)  $W_C(t)$ , который по заданному закону регулирования формирует управляющее воздействие  $u$ . Управляющее воздействие подается на привод

© Северин В.П., Никулина Е.Н., Трубочанова Н.В., 2016

исполнительного механизма производительности, который перемещает клапан подачи пара в ПТН и изменяет его относительную координату  $\mu_a$ , изменяя давление питательной воды  $\pi_s$ . Эта координата поступает на ПВД, переменная давления которого  $\pi_w$  передается в модель парогенератора и изменяет вектор его состояния  $\mathbf{X}_L$ , изменяя координату расхода воды  $g_w$ . Представим сигнал ошибки в относительных координатах:

$$\varepsilon = \varphi_s - v + q_s,$$

где  $\varphi_s$  – относительное значение уставки частоты  $\omega_s$ ,  $q_s$  – относительная координата тепловой мощности,  $v$  – относительное значение  $\sqrt{\Delta P}$ :

$$v = k_w \pi_w - k_s \pi_s. \quad (1)$$

Здесь  $\pi_w$  и  $\pi_s$  – относительные значения давления воды в ПВД и пара в ПГ,  $k_w$ ,  $k_s$  – коэффициенты полученные путем линеаризации  $\sqrt{\Delta P}$  и перехода к относительным переменным.

Перепишем выражение ошибки в виде

$$\varepsilon = \varphi_s - k_w \pi_w + k_s \pi_s + k_t \theta_t, \quad (2)$$

где  $\theta_t$  – относительная координата температуры теплоносителя,  $k_t$  – коэффициент перехода от температуры к мощности.

**Модель системы управления.** Введем базовое значение времени  $t_b = 1$  с и перейдем к относительной переменной времени  $\tau = t/t_b$ . Модель САУ уровня (САУУ) ПГ с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором представим в виде системы дифференциальных уравнений (СДУ) в форме Коши в относительных переменных состояния [2]:

$$d\mathbf{X}_L/d\tau = \mathbf{A}_L \mathbf{X}_L + \mathbf{B}_{L\pi} \pi_w + \mathbf{B}_{Lq} q_t + \mathbf{B}_{Lu} u_s, \quad (3)$$

$$q_s = \mathbf{C}_L \mathbf{X}_L, \quad (4)$$

где  $\mathbf{A}_L =$

$$= \begin{pmatrix} a_{tt} & a_{tm} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{mt} & a_{mm} & 0 & a_{mp} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{wm} & 0 & a_{wp} & 0 & 0 & a_{wk} & 0 & a_{wd} & 0 \\ 0 & a_{pm} & 0 & a_{pp} & 0 & 0 & a_{pk} & 0 & a_{pd} & 0 \\ 0 & a_{cm} & 0 & a_{cp} & 0 & a_{ca} & a_{ck} & 0 & a_{cd} & 0 \\ 0 & a_{am} & a_{aw} & a_{ap} & a_{ac} & a_{aa} & a_{ak} & 0 & a_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{kp} & 0 & 0 & a_{kk} & a_{ks} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{ss} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{wp} b_{wu} K_L & -b_{wu} K_L & 0 & -\alpha_{sk} b_{vu} K_L & 0 & a_{dd} - b_{vu} K_L & b_{vu} \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{wp} \lambda_L & -\lambda_L & 0 & -\alpha_{sk} \lambda_L & 0 & -\lambda_L & 0 \end{pmatrix}$$

где  $a_{tt}$ ,  $a_{tm}$ ,  $a_{mt}$ ,  $a_{mm}$ ,  $a_{mp}$ ,  $a_{wm}$ ,  $a_{wp}$ ,  $a_{wk}$ ,  $a_{wd}$ ,  $a_{pm}$ ,  $a_{pp}$ ,  $a_{pk}$ ,  $a_{pd}$ ,  $a_{cm}$ ,  $a_{cp}$ ,  $a_{ca}$ ,  $a_{ck}$ ,  $a_{cd}$ ,  $a_{am}$ ,  $a_{aw}$ ,  $a_{ap}$ ,  $a_{ac}$ ,  $a_{aa}$ ,  $a_{ak}$ ,  $a_{ad}$ ,  $a_{kp}$ ,  $a_{kk}$ ,  $a_{ks}$ ,  $a_{ss}$ ,  $a_{dd}$ ,  $b_{vu}$ ,  $b_{wb}$ ,  $b_{pb}$ ,  $b_{cb}$ ,  $b_{ab}$ ,  $b_{tq}$ ,  $b_{ss}$  – коэффициенты матрицы реальных значений ПГ, получены на основании теории термодинамики;  $\beta_{wp}$  – коэффициент наклона статической характеристики регулирующего

питательного клапана минус единица;  $\theta_t$ ,  $\theta_m$  – относительные координаты температуры теплоносителя и металлической трубки;  $\xi_w$ ,  $\xi_c$ , – относительные координаты воды и уровня;  $g_a$  – относительная координата расхода пара над зеркалом испарения;  $\pi_k$  – относительное значение давления в главном паровом коллекторе (ГПК);  $\mu_s$  и  $\mu_w$  – относительные координаты регулирующих клапанов турбины и питательной воды в ПГ;  $u_L$  – интегральная составляющая ПИ регулятора САУУ ПГ;  $K_L$ ,  $\lambda_L$  – параметры ПИ регулятора САУУ ПГ.

Исполнительный механизм представим инерционным звеном первого порядка с ПФ:

$$W_a(s) = 1/(T_a s + 1),$$

где  $T_a$  – постоянная времени привода. Этой ПФ отвечает дифференциальное уравнение (ДУ):

$$d\mu_a/d\tau = a_a \mu_a + b_a u, \quad (5)$$

где  $\mu_a$  – относительная координата исполнительного механизма,  $u$  – входное воздействие,  $a_a = -t_b/T_a$ ,  $b_a = t_b/T_a$ .

Питательный насос представим инерционным звеном первого порядка, которому отвечает ДУ

$$d\pi_p/d\tau = a_p \pi_p + b_p \mu_a + b_v \pi_v, \quad (6)$$

где  $\pi_p$  – относительное значение давления ПТН;  $a_p = -t_b/T_p$ ,  $b_p = K_p t_b/T_p$ ;  $K_p$  и  $T_p$  – коэффициент усиления и постоянная времени насоса;  $\pi_v$  и  $b_v$  – относительная координата давления в цилиндре высокого давления (ЦВД) и коэффициент этой координаты. ПВД представим инерционным звеном первого порядка с ДУ

$$T_w d\pi_w/d\tau = -\alpha_{ws} \pi_s - k_{pw} \pi_w - \mu_w + (k_{pp} - \alpha_{wp}) \pi_p, \quad (7)$$

где  $T_w$  – постоянная времени ПВД;  $\alpha_{ws}$ ,  $\alpha_{wp}$  – коэффициенты линеаризации расхода воды;  $k_{pw}$ ,  $k_{pp}$  – коэффициенты линеаризации ПВД. Также инерционным звеном первого порядка представим ЦВД и прилегающие к нему трубопроводы

$$d\pi_v/d\tau = a_v \pi_v + b_{vk} \pi_k a, \quad (8)$$

где  $a_v = -t_b/T_v$ ,  $b_{vk} = K_v t_b/T_v$ ;  $K_v$ ,  $T_v$  – коэффициент усиления и постоянная времени ЦВД.

На основании уравнений (3)–(8) модель парогенератора, как объекта регулирования производительности ПТН, в общем виде запишем:

$$d\mathbf{X}_C/d\tau = \mathbf{A}_C \mathbf{X}_C + \mathbf{B}_C u + \mathbf{B}_{Cq} q + \mathbf{B}_{Cu} u_s, \quad (9)$$

$$g_w = \mathbf{C}_{Cg} \mathbf{X}_C, \quad (10)$$

где

$$\mathbf{A}_C = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_L & \mathbf{B}_{L\pi} & 0 & 0 & 0 \\ z_1 & -k_{pw}a_w & b_w a_w & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_p & b_p & b_v \\ 0 & 0 & 0 & a_a & 0 \\ z_2 & 0 & 0 & 0 & a_v \end{pmatrix}, \quad \mathbf{X}_C = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_L \\ \pi_w \\ \pi_p \\ \mu_a \\ \pi_v \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_C = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cq} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Lq} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cu} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Lu} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{Cg} = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \alpha_{ws} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ \alpha_{wp} \ 0 \ 0 \ 0),$$

$$a_w = t_b/T_w, \quad b_w = (k_{pp} - \alpha_{wp})t_b,$$

$$z_1 = (0 \ 0 \ 0 \ -\alpha_{ws} a_w \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -a_w \ 0),$$

$$z_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ b_{vk} \ 0 \ 0 \ 0).$$

С учетом формул (9), (10) вычисление погрешности (2) имеет вид:

$$\varepsilon = \varphi_s - \mathbf{D}_g \mathbf{X}_C, \tag{11}$$

где

$$\mathbf{D}_g = (-k_t \ 0 \ 0 \ -k_s \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ k_w \ 0 \ 0 \ 0).$$

Модели САУ с ПИ регулятором построим по уравнениям (9)–(11) при  $u = u_P + u_I$ :

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{X}_C}{d\tau} = \mathbf{A}_C \mathbf{X}_C + \mathbf{B}_C u_{CI} + \mathbf{B}_C K_{CP} (\varphi_s - \mathbf{D}_g \mathbf{X}_C) + \mathbf{B}_{Cq} q + \mathbf{B}_{Cu} u_s, \\ \frac{du_{CI}}{d\tau} = \lambda_{CI} (\varphi_s - \mathbf{D}_g \mathbf{X}_C). \end{cases}$$

Объединив переменные состояния, имеем:

$$\mathbf{X}_{Cpi} = \begin{pmatrix} \mathbf{X}_C \\ u_{CI} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A}_{Cpi} = \begin{pmatrix} \mathbf{A}_C - \mathbf{B}_C K_{CP} \mathbf{D}_g & \mathbf{B}_C \\ -\lambda_{CI} \mathbf{D}_g & 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B}_{C\varphi pi} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_C K_{CP} \\ \lambda_{CI} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cq pi} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Cq} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}_{Cu pi} = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_{Cu} \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{C}_{Cg pi} = (\mathbf{C}_{Cg} \ 0),$$

$$d\mathbf{X}_{Cpi}/d\tau = \mathbf{A}_{Cpi} \mathbf{X}_{Cpi} + \mathbf{B}_{C\varphi pi} \varphi_s + \mathbf{B}_{Cq pi} q + \mathbf{B}_{Cu pi} u_s, \tag{12}$$

$$g_w = \mathbf{C}_{Cg pi} \mathbf{X}_{Cpi}. \tag{13}$$

**Методика идентификации системы.** Значения конструктивных и технологических параметров парогенератора ПГВ-1000, взятые из различных источников, могут содержать погрешности различной величины. Значения параметров выведенной модели САУП (3)–(13) приведены в табл. 1 и содержат погрешности исходных значений параметров ПГ, а также погрешности моделирования. Поэтому выполним идентификацию параметров моделей ПГ и его САУ по экспериментальным динамическим характеристикам.

Таблица 1 – Значения параметров модели парогенератора

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
$a_{tt}$	-0,779	$a_{pd}$	-0,004	$a_{ad}$	-0,014
$a_{tm}$	0,741	$a_{cm}$	19,9	$a_{kp}$	0,179
$a_{mt}$	1,414	$a_{cp}$	5,22	$a_{kk}$	-0,199
$a_{mm}$	-4,048	$a_{ca}$	-2,55	$a_{ks}$	-0,039
$a_{mp}$	0,627	$a_{ck}$	-8,53	$a_{ss}$	-0,2
$a_{wm}$	0,093	$a_{cd}$	-0,063	$a_{dd}$	-0,12
$a_{wp}$	-0,117	$a_{am}$	1,49	$b_{tq}$	0,039
$a_{wk}$	0,050	$a_{aw}$	-44,2	$b_{vu}$	0,12
$a_{wd}$	0,001	$a_{ap}$	80,9	$b_{wb}$	0,044
$a_{pm}$	1,420	$a_{ac}$	3,83	$b_{pb}$	-0,02
$a_{pp}$	-0,457	$a_{aa}$	-75,3	$b_{cb}$	-0,282
$a_{pk}$	0,131	$a_{ak}$	0,161	$b_{ab}$	-0,061
$b_a$	0,120	$a_w$	0,667	$\alpha_{ws}$	-4
$a_p$	-1	$k_w$	2,4	$\alpha_{sk}$	4,07
$b_p$	1	$k_s$	1,9	$k_{pp}$	5
$b_v$	1	$k_t$	42,08	$k_{pw}$	4,5
$a_v$	1	$\beta_{wp}$	-8,57	—	—
$b_{vk}$	1	$\alpha_{wp}$	4,5	—	—

Для постановки задачи идентификации параметров сформируем вектор  $\mathbf{x}$  из 54 варьируемых параметров. Для начального вектора варьируемых параметров  $\mathbf{x}^{(0)}$  значения 50 известных параметров зададим из табл. 1. В реальной САУ ПГВ-1000 применяются ПИ регуляторы [4], поэтому неизвестные начальные значения параметров ПИ регуляторов уровня и производительности положим равными 1. Перейдем к относительным значениям варьируемых параметров  $y_i = x_i/x_i^{(0)} - 1, \quad y_i^{(0)} = 0, \quad i = \overline{1, 54}$ . К значениям исходных варьируемых параметров от их относительных значений можно перейти по формуле

$$x_i = x_i^{(0)}(y_i + 1), \quad i = \overline{1, 54}. \tag{14}$$

Поскольку заранее неизвестны знаки и величины погрешностей варьируемых параметров, наложим на их относительные значения двусторонние ограничения  $a_i \leq y_i \leq b_i, \quad i = \overline{1, 54}$ . Для параметров модели ПГ зададим симметричные ограничения, полагая  $a_i = -d, \quad b_i = d, \quad i = \overline{1, 32, 35, 38, 44, 47, 50, 54}$ , где постоянный положительный параметр  $d$  задает предельно допустимое относительное отклонение варьируемого параметра. Для ограничений относительных параметров регуляторов положим  $a_i = -0,99, \quad b_i = 99, \quad i = \overline{33, 34, 45, 46}$ , что соответствует изменению исходных варьируемых параметров регуляторов  $K_L, K_{CP}, \lambda_L$  и  $\lambda_{CI}$  в

реализуемых пределах от 0,01 до 100. На неизвестные параметры  $a_v$ ,  $b_p$  и  $a_p$  наложим относительные ограничения  $a_i = 0$ ,  $b_i = 99$ ,  $i = 36, 37, 52$ , поскольку они заранее не найдены численно и их начальные значения приняты равными 1. Неизвестные коэффициенты  $b_v$  и  $b_{vk}$  ограничены значениями  $a_i = -101$ ,  $b_i = 100$ ,  $i = 51, 53$ , иначе вместо инерционных звеньев получаются интегрирующие. При  $p = 54$  сформируем штрафную функцию нарушения двусторонних ограничений с помощью операции срезки  $\lfloor y \rfloor = \max\{y, 0\}$  отобразим штрафной функцией:

$$S(\mathbf{y}) = \sum_{i=1}^{54} [\lfloor a_i - y_i \rfloor + \lfloor y_i - b_i \rfloor]. \quad (15)$$

Выразим через вектор  $\mathbf{y}$  матрицы модели САУП ПГ (12) и (13) с включенным регулятором уровня:  $\mathbf{A}_{Cpi} = \mathbf{A}_{Cpi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Cphi} = \mathbf{B}_{Cphi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Cpsi} = \mathbf{B}_{Cpsi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Cupi} = \mathbf{B}_{Cupi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{C}_{Cpsi} = \mathbf{C}_{Cpsi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{C}_{Cphi} = \mathbf{C}_{Cphi}(\mathbf{y})$ ; модели САУП ПГ с отключенным регулятором уровня:  $\mathbf{A}_{Lpi} = \mathbf{A}_{Lpi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Lphi} = \mathbf{B}_{Lphi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Lpsi} = \mathbf{B}_{Lpsi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{B}_{Lupi} = \mathbf{B}_{Lupi}(\mathbf{y})$ ,  $\mathbf{C}_{Lpsi} = \mathbf{C}_{Lpsi}(\mathbf{y})$ . Определим модели САУП ПГ с отключенным и включенным регулятором уровня при одном входном возмущающем воздействии  $u_s = -0,25$  и выходным координатам приращения уровня и давления в ГПК:

$$\begin{aligned} d\mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau) / d\tau &= \mathbf{A}_{Cpi}(\mathbf{y})\mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau) + \\ &+ \mathbf{B}_{Cphi}(\mathbf{y})\varphi_s + \mathbf{B}_{Cpsi}(\mathbf{y})q + \mathbf{B}_{Cuc}(\mathbf{y})u_s, \\ H_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau) &= h_c \mathbf{C}_{Cpsi} \mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau), \\ P_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau) &= p_{k0} \mathbf{C}_{Cphi} \mathbf{X}_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau); \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} d\mathbf{X}_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau) / d\tau &= \mathbf{A}_{Lpi}(\mathbf{y})\mathbf{X}_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau) + \mathbf{B}_{Lphi}(\mathbf{y})\varphi_s + \\ &+ \mathbf{B}_{Lpsi}(\mathbf{y})q + \mathbf{B}_{Luc}(\mathbf{y})u_s, \\ H_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau) &= h_c \mathbf{C}_{Lpsi} \mathbf{X}_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau), \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{Cpsi} &= (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \\ \mathbf{C}_{Cphi} &= (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0), \\ \mathbf{C}_{Lpsi} &= (\mathbf{C}_{Cpsi} \ 0). \end{aligned}$$

Здесь  $H_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau)$  и  $H_{Lpi}(\mathbf{y}, \tau)$  – приращения уровня в ПГ в миллиметрах;  $h_c = 150$  мм – коэффициент перехода от относительной безразмерной координаты уровня  $\xi_c$  к размерной координате приращения уровня  $H = \Delta h_c$ ;  $P_{Cpi}(\mathbf{y}, \tau)$  – давление в ГПК;  $p_{k0} = 57$  МПа – коэффициент перехода от

относительной безразмерной координаты давления  $\pi_k$  к размерной координате давления [3].

Для учета устойчивости реальной САУП ПГ по матрице модели САУУ  $\mathbf{A}_{Cpi}(\mathbf{y})$  сформируем ее характеристический многочлен  $\alpha(\mathbf{y}, s)$ , определим для него штрафную функцию  $P(\mathbf{y})$

$$P(\mathbf{y}) = \sum_{i=0}^{15} \lfloor -\alpha_i(\mathbf{y}) \rfloor, \quad (18)$$

нарушения необходимых условий устойчивости и коэффициенты первого столбца таблицы Рауса  $\rho_k(\mathbf{y})$ ,  $k = \overline{0, 15}$  [5]. Обозначим экспериментальные процессы приращения уровня в ПГВ-1000 при возмущении нагрузкой турбины 25%  $N_{ном}$ :  $H_S(\tau)$  – процесс при включенном РУ,  $H(\tau)$  – процесс при отключенном РУ [4]. Экспериментальные процессы приращения давления в ГПК при включенном регуляторе уровня обозначим  $P_S$ . Определим дискретные точки процессов с шагом  $h = 3$  с в моменты времени  $t_1 = 0$ ,  $t_k = \overline{t_{k-1} + h}$ ,  $k = 2, 3, \dots$ :  $H_{Sk} = H_S(t_k)$ ,  $P_{Sk} = P_S(t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_S}$ ,  $N_S = 81$ ,  $H_{Ek} = H(t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_G}$ ,  $N_G = 59$ . Экспериментальные данные процессов приращения уровня и давления в ГПК приведены на рис. 1 [4]. Интегрируя СДУ (12) при нулевых начальных условиях с шагом  $h$  методом матричной экспоненты и ее интеграла [5], вычислим  $H_{Cpi}(\mathbf{y}) = H_{Cpi}(\mathbf{y}, t_k)$ ,  $P_{Cpi}(\mathbf{y}) = P_{Cpi}(\mathbf{y}, t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_S}$ ,  $H_{Lpi}(\mathbf{y}) = H_{Lpi}(\mathbf{y}, t_k)$ ,  $k = \overline{1, N_G}$ . Составим функцию невязки

$$\begin{aligned} f(\mathbf{y}) &= \sum_{k=1}^{N_S} [H_{Sk} - H_{Cpi}(\mathbf{y})]^2 + \sum_{k=1}^{N_G} [H_{Ek} - H_{Lpi}(\mathbf{y})]^2 + \\ &+ \sum_{k=1}^{N_S} [P_{Sk} - P_{Cpi}(\mathbf{y})]^2, \end{aligned} \quad (19)$$

где первая сумма определяет ошибку изменения уровня в модели САУП с включенным регулятором уровня, вторая – в модели САУП с отключенным регулятором уровня, третья – изменения давления в ГПК в модели САУП с включенным РУ.

Определим области уровней ограничений  $H_k$ ,  $k = \overline{0, n}$ , где  $n = 15$  – порядок САУП [1]. На основании функций (15), (18) и (19) сформируем векторную целевую функцию

$$\mathbf{F}(\mathbf{y}) = \begin{cases} (0; S(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_0; \\ (1; P(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_1; \\ (k; -\rho_k(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_k, \quad k = \overline{2, n-1}; \\ (n; f(\mathbf{y})), & \mathbf{y} \in H_n. \end{cases} \quad (20)$$

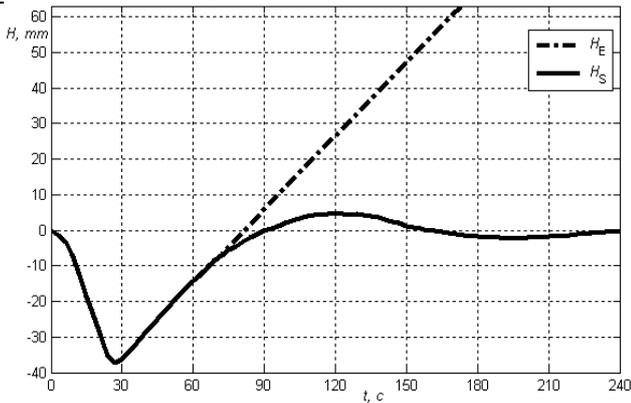


Рис. 1 – Графики числовых значений экспериментальных характеристик парогенератора

Для решения задачи идентификации параметров САУП ПГ векторную функцию (20) будем оптимизировать с использованием операции векторного сравнения векторными методом Хука-Дживса со значением параметра  $d = 0,5$  для допустимых отклонений ограничений от проекций начального вектора [5].

**Результаты идентификации.** Полученные оптимизацией векторной функции (20) результаты идентификации параметров САУП приведены в табл. 2. Им отвечают значения  $F_1 = 15$  и  $F_2 = 171$  для векторной функции (20), значения  $f = 171$  функции невязки (19) и  $\delta = 1,1$  среднеквадратического отклонения (СКО):  $\delta = \sqrt{f(y)/(N_G + N_S)}$ . В начальной точке ( $d = 0$ ) не выполняются условия устойчивости САУП:  $F_1 = 13 < 15$ , значение  $F_2$  соответствует штрафу нарушенного условия. Оптимизация функции (20) позволила перейти в область устойчивости САУП ( $F_1 = 15$ ) и существенно уменьшить значение функции невязки. СКО составило около 1 мм при диапазоне изменения экспериментальных данных 101 мм, то есть относительное значение СКО стало около 1 %.

На рис. 2 представлен процесс отклонения уровня в САУП ПГ при отключенном РУ, а на рис. 3 представлены процессы отклонения уровня и давления в САУП ПГ при включенном РУ. Точками обозначены экспериментальные данные, тонкими линиями – процессы при начальных значениях варьируемых параметров модели САУП ПГ из табл. 1, толстыми линиями – процессы, соответствующие оптимизации функции (20) при  $d = 0,5$ . При начальных значениях варьируемых параметров модели САУП ПГ и отключенном регуляторе уровня уровень быстро неограниченно понижается (рис. 2), а при включенном РУ процесс изменения уровня – неустойчивый колебательный (рис. 3).

Также неустойчивый колебательный процесс характеризует давление при начальных значениях параметров и включенном РУ (рис. 3). При  $d = 0,5$  наблюдается совпадение процессов в модели с экспериментальными процессами как при отключенном, так и при включенном РУ (рис. 2 и 3).

Таблица 2 – Значения параметров модели САУП после идентификации

Параметр	Относ. значение	Значение	Параметр	Относ. значение	Значение
$a_{tt}$	0,051	-0,819	$a_{pk}$	0,500	0,197
$a_{tm}$	-0,206	0,589	$a_{pd}$	-0,456	-0,002
$a_{mt}$	-0,355	0,909	$a_{cm}$	0,500	29,850
$a_{mm}$	0,111	-4,500	$a_{cp}$	0,500	7,83
$a_{mp}$	-0,317	0,428	$a_{ca}$	-0,082	-2,342
$a_{wm}$	0,225	0,114	$a_{ck}$	-0,500	-4,265
$a_{wp}$	-0,123	-0,103	$a_{cd}$	-0,500	-0,031
$a_{wk}$	-0,303	0,035	$a_{am}$	-0,500	0,745
$a_{wd}$	-0,498	0,005	$a_{aw}$	-0,500	-22,10
$a_{pm}$	-0,492	0,722	$a_{ap}$	-0,500	40,450
$a_{pp}$	0,446	-0,661	$a_{ac}$	0,500	5,745
$a_{aa}$	-0,309	-52,030	$b_{cb}$	0,467	-0,414
$a_{ak}$	-0,500	0,081	$b_{ab}$	-0,477	-0,032
$a_{ad}$	0,500	-0,020	$k_w$	-0,117	2,119
$a_{kp}$	0,413	0,253	$k_s$	-0,296	1,338
$a_{kk}$	-0,132	-0,173	$k_t$	-0,085	38,489
$a_{ks}$	-0,500	-0,020	$k_{pp}$	-0,113	4,434
$a_{ss}$	-0,500	-0,1	$k_{pw}$	0,315	5,920
$a_{dd}$	0,500	-0,18	$b_a$	0,383	0,166
$\beta_{wp}$	-0,500	-4,285	$a_p$	0,000	-1
$\alpha_{wp}$	-0,223	3,496	$b_p$	0,071	1,071
$\alpha_{ws}$	-0,500	-2	$b_v$	2,595	3,595
$\alpha_{sk}$	0,500	6,105	$a_v$	0,000	-1
$b_{wb}$	-0,437	0,025	$b_{vk}$	2,189	3,189
$b_{pb}$	0,500	-0,030	$a_w$	-0,500	0,333

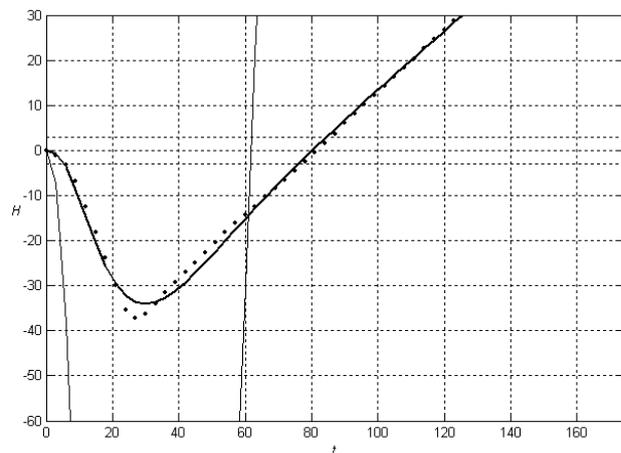


Рис. 2 – Отклонение уровня при отключенном РУ

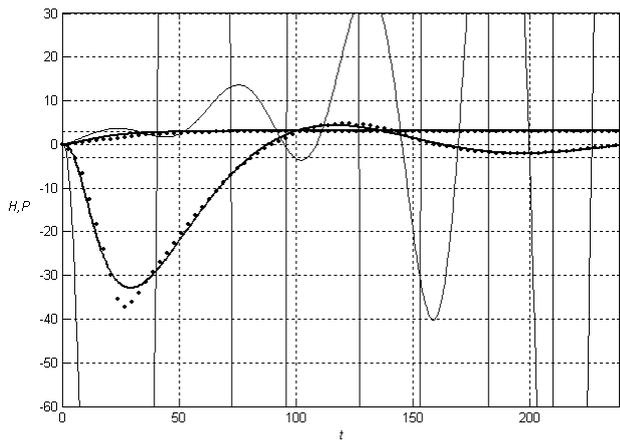


Рис. 3 – Отклонение уровня и давления при включенном РУ

На основании проведенного анализа таблиц и графиков примем для дальнейшего исследования САУП ПГ результаты идентификации параметров ПГ при  $d = 0,5$ . Проведем исследование динамики САУП ПГ с отключенным и включенным РУ при входном возмущающем воздействии  $u_s = 1(t)$ .

На рис. 4 представлены изменения переменных состояния САУП ПГ, полученные интегрированием СДУ (16) при отключенном РУ. Клапан регулирования турбины открывается, его относительная координата  $\mu_s$  увеличивается до единичного значения. С запаздыванием увеличивается относительная координата исполнительного механизма  $\mu_a$ . Давления в ГПК и ПГ падают, их относительные координаты  $\pi_k$  и  $\pi_s$  уменьшаются. Уменьшаются давления в ЦВД  $\pi_v$  и ПВД  $\pi_w$ . Давление в ПТН  $\pi_p$  вначале уменьшается, а затем увеличивается. Процесс парообразования под зеркалом испарения усиливается, часть воды в ПГ вскипает, объем пара под зеркалом испарения увеличивается, повышается уровень пароводяной смеси  $\xi_c$  и проявляется эффект «вскипания» уровня [4]. Координата объема воды  $\xi_w$  уменьшается. Снижение давления в ПГ приводит к уменьшению температур пароводяной смеси  $\theta_w$ , металла теплообменных трубок  $\theta_m$  и теплоносителя  $\theta_t$ . Координаты расхода пара увеличиваются, а координата расхода воды падает.

На рис. 5 представлены изменения переменных состояния САУП ПГ с включенным РУ, полученные интегрированием СДУ (17), для которой идентифицированы значения параметров ПИ регуляторов:  $K_L = 32,587$ ,  $K_{CP} = 0$ ,  $\lambda_L = 100\text{c}^{-1}$ ,  $\lambda_{CI} = 0,2153\text{c}^{-1}$ . Координата клапана регулирования турбины  $\mu_s$  увеличивается, с запаздыванием увеличивается относительная координата исполнительного механизма  $\mu_a$ , а координаты давлений в ГПК  $\pi_k$ , ПГ  $\pi_s$ , в ЦВД  $\pi_v$  и ПВД  $\pi_w$  уменьшаются.

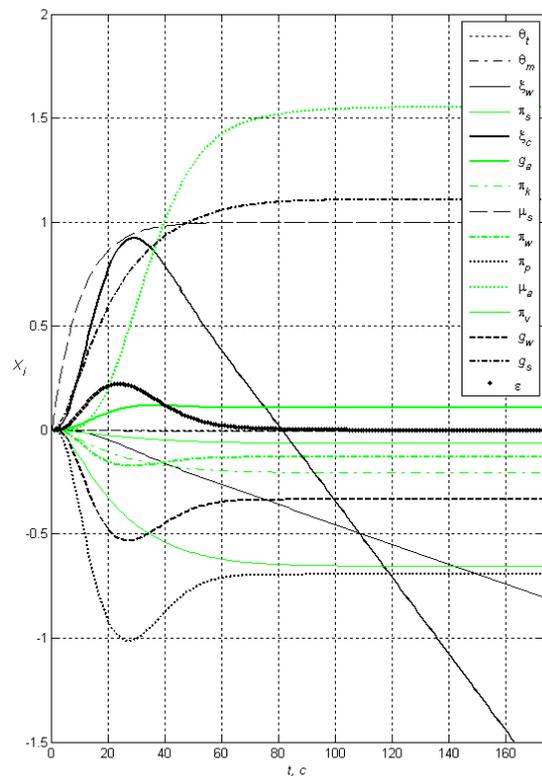


Рис. 4 – Изменение переменных состояния САУП ПГ при отключенном РУ

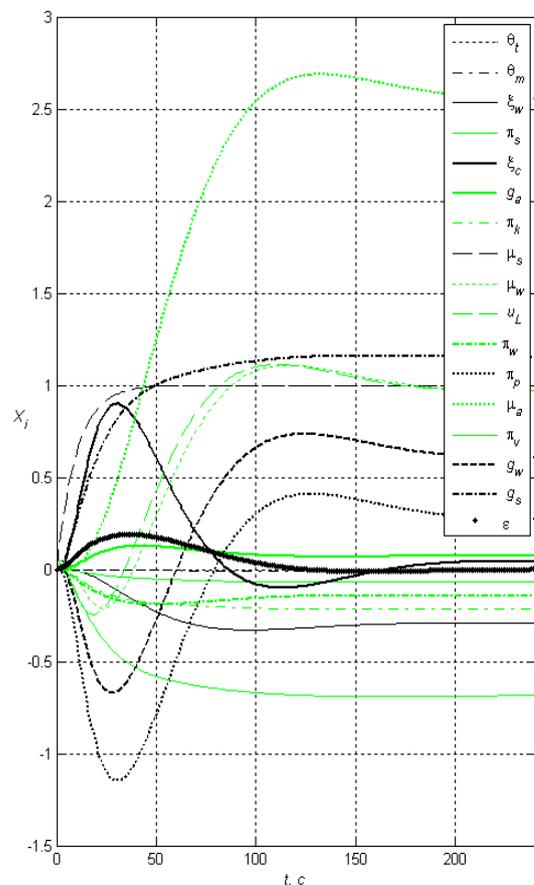


Рис. 5 – Изменение переменных состояния САУП ПГ при включенном РУ

Происходит «вскипание» уровня с повышением  $\xi_c$ ,

объем воды  $\xi_w$  снижается. Координаты расхода пара увеличивается. Координата расхода воды падает, а затем увеличивается. С течением времени все координаты приходят к своим установившимся значениям, причем процессы изменения  $\mu_s$ ,  $\pi_k$ ,  $\pi_s$ ,  $\pi_v$ ,  $g_a$ ,  $\theta_m$ ,  $\theta_t$ ,  $g_s$  монотонные, а изменения  $\xi_c$ ,  $\xi_w$ ,  $\mu_w$ ,  $\mu_a$ ,  $u_L$ ,  $\pi_p$ ,  $\pi_w$ ,  $g_w$  и  $\varepsilon$  – колебательные, ошибка  $\varepsilon$  с течением времени стремится к нулю. Таким образом, САУП выполняет задачу стабилизации расхода воды.

**Выводы.** Рассмотрена система автоматического управления производительностью парогенератора ПГВ-1000. Разработана ее математическая модель, представленная в пространстве состояний с относительными переменными, на основе системы управления уровнем воды в парогенераторе с пропорционально-интегральными регуляторами и вычислены значения постоянных параметров. Задача идентификации параметров модели системы по экспериментальным данным процессов отклонения уровня и давления в ПГВ-1000 с отключенным и включенным регулятором уровня сведена к задаче оптимизации векторной целевой функции, учитывающей ограничения идентифицируемых параметров, ограничения устойчивости системы управления, функцию невязки экспериментальных данных и процессов моделей. Векторным методом оптимизации вычислены значения параметров системы управления при величине ограничения 0,5 для допустимого отклонения относительных значений параметров, обеспечивающие среднеквадратическое отклонение моделируемых и экспериментальных процессов 1%. Построены динамические процессы изменения переменных состояния системы, отражающие колебательный затухающий характер процессов управления.

**Список литературы:** 1. *Северин В. П.* Математическое моделирование парогенератора атомного энергоблока / *В. П. Северин, Е. Н. Никулина* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 19. – С. 145-150. 2. *Никулина Е. Н.* Модели систем автоматического управления производительностью парогенератора / *Е. Н. Никулина* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – № 23. – С. 124-130. 3. *Северин В. П.* Математическое моделирование и оптимизация показателей качества систем автоматического регулирования реакторной установки / *В. П. Северин* // Ядерная и радиационная безопасность, 2007. – Том 10. – Вып. 2. – С. 66-77. 4. *Павлыш О. Н.* Автоматическое регулирование производительности питательных турбонасосов моноблока 1000 МВт АЭС / *О. Н. Павлыш, И. П. Гарбузов, Ю. М. Реуков* // М. – Энергетик. – 1985. – №10. – С. 12-14. 5. *Никулина Е. Н.* Оптимальный синтез перспективных систем управления реакторной установки ВВЭР-1000 в нормальных режимах эксплуатации / *Е. Н. Никулина, В. П. Северин* // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС: сборник научных трудов. – Одесса: Астропринт, 2010. – С. 179-192.

**Bibliography (transliterated):** 1. Severin, V. P., E. N. Nikulina "Matematicheskoje modelirovanie parogeneratora atomnogo energobloka." [Mathematical modeling of the steam generator of nuclear power] *Visnyk NTU "KhPI"*. no 19. 2006. 145-150. Print. 2. Nikulina, E. N. "Modeli sistem avtomaticheskogo upravlenija proizvoditel'nost'ju parogeneratoara." [Models of automatic control systems of steam generator capacity] *Visnyk NTU "KhPI"*. no 23. 2010. P. 124-130. Print. 3. Severin, V. P. "Matematicheskoje modelirovanie i optimizatsija pokazatelej kachestva sistem avtomaticheskogo regulirovanija reaktornoj ustanovki." [Mathematical modeling and optimization of quality parameters of automatic control systems of the reactor plant] *Jadernaja i radiatsionnaja bezopasnost'*. Vol. 10. 2007. 66-77. Print. 4. Pavlysh, O. N., I. N. Garbuzov and Ju. M. Reukov "Avtomaticheskoe regulirovanije proizvoditel'nosti pitatel'nyh turbonosov monobloka 1000 MVt AES." [Automatic control of the performance of turbo feed pumps monoblock 1000 MW nuclear power plant] *Energetik*. no 10. 1985. P. 12-14. Print. 5. Nikulina, E. N., V. P. Severin "Optimal'nyj sintez perspektivnyh sistem upravlenija reaktornoj ustanovki VVER-1000 v normal'nyh reghimah ekspluatatsii." [Optimal synthesis of perspective control systems of the reactor plant WWER-1000 in normal operating conditions] *Problemy obespechenija bezopasnosti informatsionnyh i upravljajushih sistem AES: sbornik nauchnyh trudov*. Odessa. 2010. P. 179-192. Print.

Поступила (received) 05.03.2016

**Северин Валерій Петрович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри системного аналізу та управління; м. Харків, Україна, тел.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

**Severin Valeriy Petrovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Systems Analysis and Control of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: (066) 847-83-70; e-mail: severinv@mail.ru.

**Никуліна Олена Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри радіоелектроніка; м. Харків, Україна, тел.: (050) 100-79-65; e-mail: elena78\_02@inbox.ua.

**Nikulina Elena Nikolaevna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Radioelectronics of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; tel.: (050) 100-79-65; e-mail: elena78\_02@inbox.ua.

**Трубчанова Ніна Вікторівна** – інженер, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», інженер кафедри радіоелектроніка; м. Харків, Україна, тел.: (099) 92-29-312; e-mail: ninulya.av@gmail.com.

**Trubchanova Nina Victorivna** – engineer, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", engineer of Department of Radioelectronics Kharkiv, Ukraine; tel.: (099) 92-29-312; e-mail: ninulya.av@gmail.com.

УДК 620.179.14

М.М. СІРЕНКО, Б.М. ГОРКУНОВ, С.Г. ЛЬВОВ

## ФУНКЦІЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ВИХОРОСТРУМОВОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З НЕМАГНІТНИМИ ВИРОБАМИ

Розглянута теорія електромагнітного перетворювача, яка заснована на виділенні екстремуму функції зміни нормованої амплітуди вихідного сигналу. Отримані функції перетворення поєднують електричні і геометричні параметри циліндричного металевого виробу з вихідними сигналами електромагнітного перетворювача. Вони дозволяють розрахувати величини електропровідності і радіуса контрольованого прутка, використовуючи вимірювані параметри сигналу перетворювача при одній частоті. Розроблений метод значно спрощує реалізацію двохпараметрового контролю без застосування складних математичних функцій.

**Ключові слова:** електромагнітний перетворювач, нормований сигнал, питома електропровідність, амплітуда, фаза, екстремум функції перетворення.

**Вступ.** Удосконалення високочутливих засобів вимірювальної техніки показує, що метрологічні характеристики автоматизованих пристроїв систем неруйнівного контролю в основному визначаються параметрами вимірювальних перетворювачів. Тому, для підвищення точності і чутливості вимірювальних пристроїв до контрольованих параметрів потрібно знаходити оптимальні режими роботи первинних вимірювальних перетворювачів. Найбільш конструктивно простими, надійними і практичними у застосуванні є вихороструміві трансформаторні перетворювачі (ВТП). Особливістю цих датчиків є те, що вони дозволяють здійснювати безконтактні вимірювання відносно об'єкта в реальному вимірі часу в процесі руху виробів, наприклад на прокатних станах металургійних заводів.

**Постановка проблеми.** Актуальним практичним завданням є автоматизований безконтактний контроль кількох фізико-механічних параметрів каліброваних сталених немагнітних прутків, які випускаються металургійними заводами. Такими параметрами, в основному, є діаметр (або радіус  $a$ ) циліндричних прутків та питома електропровідність  $\sigma$  матеріалу цих виробів.

Найбільш розвинутими методами такого контролю є електромагнітні способи одночасного визначення кількох параметрів немагнітних виробів [1–3]. В основу них покладений принцип складання ряду незалежних нелінійних рівнянь, що зв'язують параметри електромагнітного перетворювача (або його сигналу) з контрольованими характеристиками виробу. Однак такі рівняння складні, до того ж містять, як правило, комбінації спеціальних функцій [3–5], що суттєво ускладнює проведення розрахунків, знижує швидкість пристроїв. Тому, виходячи з узагальнених характеристик об'єкта контролю, необхідно провести попереднє спрощення теоретичних формул та отримати відносно прості функції перетворення.

**Ціль статті.** Дослідження двохпараметрового безконтактного вихорострумівого перетворювача для контролю діаметру та електропровідності немагнітних прутків, призначеного для автоматизації промислового контролю якості стандартних каліброваних прутків з немагнітних металів.

**Основна частина.** З наукової літератури [3–5]

відомо, що так звана «внесена» ЕРС  $\dot{E}$  електромагнітного трансформаторного перетворювача з циліндричним виробом залежить від його радіусу  $a$  (у комплексній формі):

$$\dot{E} = (\dot{\mu}_r \dot{K} - 1) \frac{a^2}{a_n^2} E_0, \quad (1)$$

де  $\mu_r$  – відносна магнітна проникність матеріалу контрольованого виробу;

$\dot{K}_0$  – питома нормована електрорушійна сила перетворювача при заданій частоті  $f$  електромагнітного поля;

$E_0$  – ЕРС перетворювача без контрольованого виробу на частоті зондуючого поля  $f$ .

Якщо контрольований виріб буде немагнітним ( $\mu_r = 1$ ), то з рівняння (1) можна виділити комплексний нормований параметр  $\dot{N}$ :

$$\dot{N} = \dot{K} - 1 = \dot{E} \cdot a_n^2 / (\dot{E}_0 \cdot a^2) \quad (2)$$

Звідси модуль (числові значення) цього параметру для різних числових значень узагальненого параметру  $X$  можна розрахувати, за формулою:

$$N = \sqrt{(1 - \operatorname{Re} K)^2 + (\operatorname{Im} K)^2}. \quad (3)$$

Особливістю цієї залежності є той факт, що на інтервалі зміни узагальненого параметру  $X$  від 1,61 до 1,62 спостерігається найбільша крутизна цієї характеристики. Цей факт можна уточнити, якщо побудувати залежність похідної комплексного параметру  $N$  від узагальненого параметру  $X$ , тобто залежність  $dN/dX = F(X)$ , поблизу її екстремуму та проаналізувати характер її поведінки (рис. 1). Такий аналіз показав, що ця функція має екстремальну точку перегину.

Якщо розглянути числові табличні дані, що були використані для побудови цієї залежності (табл. 1), то можливо визначити конкретне числове значення параметру  $X$ , яке відповідає екстремуму цієї функції і дорівнює 1,6175 (табл. 1).

Але, модуль параметру  $|\dot{N}|$  також залежить від геометричних параметрів деталі (радіусу  $a$ ) і

параметрів перетворювача (радіусу  $a_n$ ), а також від його сигналів  $E$  і  $E_0$ :

$$N = E \frac{a_n^2}{(E_0 a^2)} = \frac{E^*}{\eta}, \quad (4)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт заповнення площі перетину внутрішньої порожнини перетворювача площею перетину виробу, значення якого дорівнює відношенню квадратів радіусів  $a$  та  $a_n$ .

$dN/dX$

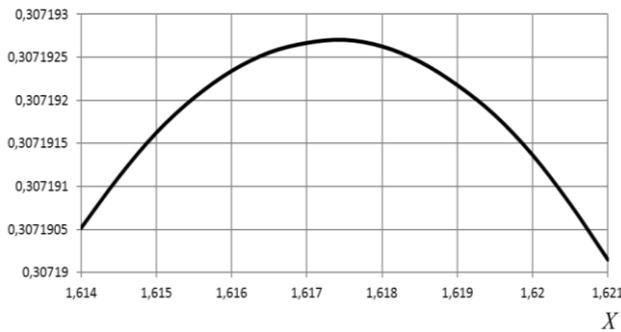


Рис. 1 – Графічне представлення залежності  $dN/dX = F(X)$

Табл. 1 – Залежність  $dN/dX = F(X)$

$X$	$dN/dX$	$N$
1,615	0,30719162442	0,29758765
1,6155	0,30719202914	0,29774125
1,616	0,3071923411	0,29789484
1,6165	0,307192555847	0,29804844
1,617	0,30719266761	0,29820204
<b>1,6175</b>	<b>0,30719270308</b>	<b>0,29835563</b>
1,618	0,30719262668	0,29850923
1,6185	0,30719244933	0,29866282
1,619	0,30719217648	0,29881642
1,6195	0,30719182632	0,29897002
1,62	0,3071913643	0,29912361

Продиференціюємо обидві частини цього рівняння по  $dX$ :

$$\frac{dN}{dX} = \frac{d(E^*)}{\eta dX}. \quad (5)$$

Враховуючи, що узагальнений параметр  $X$  для немагнітного виробу

$$X = a\sqrt{\mu_0\sigma 2\pi}\sqrt{f}, \quad (6)$$

то отримаємо наступне рівняння:

$$\eta \frac{dN}{dX} = \frac{d(E^*)2\sqrt{f}}{a\sqrt{\mu_0\sigma 2\pi}df}. \quad (7)$$

Оскільки, як було показано вище, функція  $dN/dX = F(X)$  має екстремум, то умова узгодження екстремумів двох функцій (які надані у вигляді лівої та правої частини рівняння (7) буде наступною:

$$\left[ \frac{dN}{dX} \right]_{extr} = \frac{2}{\eta a \sqrt{2\pi\mu_0\sigma}} \left[ \sqrt{f} \frac{d(E^*)}{df} \right]_{extr}. \quad (9)$$

Аналіз цього співвідношення показує, що функція  $\frac{2}{\eta a \sqrt{2\pi\mu_0\sigma}} \left[ \sqrt{f} \frac{d(E^*)}{df} \right] = F(f)$  є залежністю зміни нормованого сигналу  $E^*$  перетворювача з немагнітним виробом від частоти  $f$  змінного електромагнітного поля датчика, тобто функцією перетворення цього датчику. Крім того, видно, що екстремум цієї функції перетворення співпадає з екстремумом узагальненої функції  $dN/dX = F(X)$ .

Тому такий підхід дозволить вирішити завдання отримання рівнянь для розрахунків діаметру і електропровідності циліндричних немагнітних стрижнів без застосування складних математичних функцій Беселя, що і є необхідним для реалізації двухпараметрового контролю.

### Визначення частоти екстремуму функції перетворення ВТП

Рівняння (9) є математичним представленням умови узгодження екстремумів двох функцій:

$$\left[ \frac{dN}{dX} \right]_{extr} = \frac{\sqrt{2}a_n^2}{a^3\sqrt{\mu_0\sigma\pi}} \left[ \sqrt{f} \frac{d(E/E_0)}{df} \right]_{extr}. \quad (10)$$

При цьому першою функцією є залежність похідної нормованого параметра  $N$  (ліва частина рівняння) від узагальненого параметра  $X$ :

$$\left[ \frac{dN}{dX} \right]_{extr} = F(X). \quad (11)$$

Друга функція – це залежність комбінації параметрів виробу і перетворювача (в тому числі і його сигналів  $E$  і  $E_0$ ) від частоти  $f$  поля перетворювача:

$$\frac{2}{\eta a \sqrt{\mu_0\sigma 2\pi}} \left[ \sqrt{f} \frac{d(E/E_0)}{df} \right] = F(f). \quad (11)$$

Аналізуючи останнє рівняння можна встановити, що, знайшовши екстремум (тобто максимальне числове значення) частини цього рівняння у квадратних дужках у лівій частині цього співвідношення, від частоти  $f$  змінного електромагнітного поля перетворювача, можна відразу ж визначити конкретну величину параметра  $X = 1,6175$ , що відповідає екстремуму першої залежності (11).

Величина перед рівнянням у квадратних дужках у правій частині рівняння (10) і в лівій частині співвідношення (11) являють собою величини, які є постійними (константами) для конкретного перетворювача й досліджуваного виробу, оскільки залежить лише від їхніх параметрів. Тому її чисельне значення не змінює величину  $X$ , а змінює лише крутизну графічної залежності поблизу точки екстремуму цієї функції.

Таким чином, змінюючи дискретно частоту  $f$  намагнічувального поля з інтервалом  $df = \Delta f$ , а також

вимірюючи щораз величину  $\left[ \sqrt{f} \frac{\Delta(E/E_0)}{\Delta f} \right]$  і фіксуючи її екстремальне (максимальне) значення, можна визначити точне значення параметру  $X=1,6175$  і пов'язану з ним величину  $N=0,29835563$  (див. табл. 1).

Таким чином, процедура визначення частоти  $f_0$ , яка відповідає екстремуму функції перетворення датчика із виробом, пов'язана із прямими вимірюваннями величин  $E$  та  $E_0$ , та частоти  $f$  намагнічувального поля перетворювача з контрольованим об'єктом відповідними стандартними вимірювальними приладами: вольтметром змінного струму та частотоміром. Оскільки при цьому потрібно стабілізувати напруженість намагнічувального поля, то контролю намагнічувального змінного струму відбувається за допомогою амперметру змінного струму.

Слід зауважити, що функція (11) може бути досить пологою поблизу свого екстремуму. Тому потрібно уточнити значення екстремальної частоти  $f_0$

шляхом вимірювання не величин  $\left[ \sqrt{f} \frac{\Delta(E/E_0)}{\Delta f} \right]$ , а

їхніх приростів  $\Delta \left[ \sqrt{f} \frac{\Delta(E/E_0)}{\Delta f} \right]$  поблизу

екстремальної точки функції перетворення (11).

Для цього змінюють частоту  $f$  намагнічувального поля дискретно з постійним шагом. Частоту  $f_0$  визначають у момент зміни знака на протилежний (або рівності нулю) подвійним приростом нормованої ЕРС датчика, розраховуючи її чисельне значення за формулою:

$$f_0 = \frac{\left| \Delta(\sqrt{f} \Delta E^*) / \Delta f \right|_i \cdot f_{(i+1)} + \left| \Delta(\sqrt{f} \Delta E^*) / \Delta f \right|_{(i+1)} \cdot f_i}{\left| \Delta(\sqrt{f} \Delta E^*) / \Delta f \right|_i + \left| \Delta(\sqrt{f} \Delta E^*) / \Delta f \right|_{(i+1)}}, \quad (12)$$

де  $\left| \Delta(\sqrt{f} \Delta E^*) / \Delta f \right|_i$  і  $\left| \Delta(\sqrt{f} \Delta E^*) / \Delta f \right|_{(i+1)}$  –

величини модулів відповідно останнього позитивного (негативного або нульового) і першого нульового або негативного (позитивного) подвійного приросту ЕРС  $E^*$  при збільшенні (зменшенні) частоти поля з постійним кроком  $\Delta f$ ;

$f_i$  і  $f_{(i+1)}$  – відповідні вказаним приростам значення частот поля перетворювача.

#### Розрахунок радіуса і питомої електропровідності прутків

Використовуючи вираз (4), отримуємо рівняння для розрахунку радіуса  $a$  виробу, що залежить лише від параметрів ( $E$ ,  $E_0$ ) сигналу перетворювача (при частоті  $f_0$  поля, що відповідає екстремуму функції перетворення датчика з виробом) і відомих констант:

$$a = a_n \sqrt{\frac{E}{E_0 N^*}}, \quad (13)$$

де  $N^*$  – нормований параметр, чисельне значення якого у точці екстремуму функції перетворення дорівнює 0,29835563 (табл. 1).

Враховуючи це, вказане рівняння можна представити в іншому вигляді:

$$a = 1,83077 a_n \sqrt{\frac{E}{E_0}}. \quad (14)$$

Як видно, це рівняння залежить тільки від значень вимірюваних сигналів перетворювача.

Щоб вивести співвідношення для розрахунку питомої електричної провідності  $\sigma$ , скористаємося формулою:

$$\sigma = \frac{X^2}{a^2 \mu_0 2 \pi f_0} \quad (15)$$

де  $f_0$  – частота намагнічувального поля, яка відповідає екстремуму функції перетворення (11) датчика із виробом.

Оскільки при зазначеному екстремумі величина  $X=1,6175$ , то

$$\sigma = \frac{1,308153}{a^2 \mu_0 \pi f_0}. \quad (16)$$

Але ця формула призначена для послідовного розрахунку спочатку радіуса  $a$ , потім питомої електропровідності  $\sigma$ . Якщо у цей вираз підставити співвідношення (14), то можна отримати формулу для паралельного циклу спільних вимірювань  $a$  і  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{0,3902932 E_0}{\mu_0 \pi f_0 a_n^2 E}. \quad (17)$$

Отже, отримані рівняння дозволяють як послідовно, так і одночасно (паралельно), розрахувати величини електропровідності і радіуса контрольованого прутка, використовуючи лише вимірювані параметри сигналу перетворювача при одній, конкретній для кожного окремого виробу, «екстремальній» частоті  $f_0$ .

При проведенні вихорострумовевого контролю встановити режим роботи перетворювача, що відповідає зазначеній конкретній величині  $X=1,6175$ ,

можна шляхом вимірювання значень  $\left[ \sqrt{f} \frac{d(E/E_0)}{df} \right]$  і

пошуком їхніх екстремальних значень при дискретній зміні частоти з рівним інтервалом і підтримці стабільності напруженості електромагнітного поля перетворювача.

Безумовна перевага розробленого способу вихорострумовевого контролю полягає в тому, що вимірювання двох параметрів виробу здійснюють тільки на одній певній частоті  $f_0$  поля. Істотно, що для виробів різноманітних асортиментів значення цієї частоти будуть змінюватися, тому що положення максимуму функції залежить від двох ( $a$  і  $\sigma$ ) параметрів виробу.

Характерною рисою розробленого методу є те, що для всіх виробів величини  $\sigma$  визначаються на одній і тій же відносній глибині  $\delta/a$  проникнення магнітного поля в циліндричний виріб, тому що узагальнений параметр  $X$  пов'язаний з радіусом циліндричного виробу співвідношенням

$$X = a \frac{\sqrt{2}}{\delta} \quad (18)$$

де  $\delta$  – глибина проникнення:

У практиці неруйнівного контролю більше зручним є використання відносної еквівалентної глибини  $\delta_e/a$  проникнення поля у пруток, яка розраховується за формулою:

$$\delta_e/a = 1 - \sqrt{1 - K} \quad (19)$$

Якщо екстремальне значення  $X = 1,6175$ , то значення параметру  $K$  дорівнює 0,92299477. Тоді відносна глибина проникнення електромагнітного поля у виріб складає  $\delta_e/a = 0,723$ .

Отже, пошук екстремальних значень розглянутої функції перетворення вихорострумове перетворювача з виробом дозволяє безпосередньо визначити екстремальну частоту намагнічувального поля а разом з нею і конкретну величину параметра  $X$ . Використання наведеного алгоритму вимірювальних і обчислювальних процедур дозволяє визначити два досліджених параметри виробу як у послідовному циклі, так і одночасно.

**Висновки.** Запропонований в роботі метод та пристрій двопараметрових вимірювань дозволяє автоматизувати процес відбраковки немагнітних циліндричних виробів, як за геометричними (радіус а)

параметрами, так і сортувати їх за фізичними властивостями згідно з величиною електропровідності  $\sigma$  (мідь, алюміній, латунь та інші). Важливим є те, що запропонований перетворювач і режим його роботи завжди забезпечують максимальні значення точності та чутливості не залежно від характеристик об'єкту контролю та геометричних параметрів перетворювача.

**Список літератури:** 1. Горкунов Б.М. Оптимизация работы электромагнитного преобразователя по частоте возбуждающего поля / Б.М. Горкунов, А.А. Авраменко, С.Г. Львов и др. // Энергосбережение. Энергетика Энергоаудит. –2014. –Т.2, № 9 (128).– С.120–124. 2. Горкунов Б.М. Компьютерная система управления механическим упрочнением цилиндрических изделий / Б.М. Горкунов, Н.Н. Сиренко, А.А. Тищенко, И.Б. Горкунова // Электротехнические и компьютерные системы. – 2014. –№15(91). – С. 232–234. 3. Неразрушающий контроль: Справочник. Т.2 / под общ. ред. В. В. Клюева. –Москва: Машиностроение, 2003. – 688 с. 4. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практическое пособие / Под ред. В. В. Сухорукова. – Москва: Высш. шк., 1992. –312 с. 5. Ковашевич И. П. Ферромагнитный цилиндр в проходном вихрековом преобразователе. Численное решение обратной задачи / И.П. Ковашевич// Дефектоскопия. – 1984. – № 9. – С. 8–12.

**Bibliography (transliterated):** 1. Gorkunov B.M., Avramenko A.A., Lvov S.G. Optimizacija raboty jelektromagnitnogo preobrazovatelja po chastote vzbuzhdajushhego polja / Jenergosberezenie. Jenergetika. Jenergoaudit. –2014. –Т.2, no 9 (128).– P. 120–124. Print. 2. Gorkunov B.M., Sirenko N.N., Tishhenko A.A., Gorkunova I.B. Komp'juternaja sistema upravlenija mehanicheskim uprochnenijem cilindricheskix izdelij / Jelektrotehnicheskie i komp'juternye sistemy. – 2014. –no 15(91). – P. 232–234. Print. 3. Nerazrushajushhij kontrol': Spravochnik. T.2 / Ed. V. V. Kljuev – Moscow: Mashinostroenie, 2003. Print. 4. Nerazrushajushhij kontrol'. Vol. 3. Jelektromagnitnyj kontrol': Prakticheskoe posobie / Ed. V. V. Suhorukov. – Moscow: Vysshaja shkola, 1992. Print. 5. Kovashevich I.P. Ferromagnitnyj cilindr v prohodnom vihretokovom preobrazovatele. Chislennoe reshenie obratnoj zadachi. –Defektoskopija. –1984. –no 9. –P. 8–12. Print.

Надійшла (received) 29.01.2016

**Сиренко Микола Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри приладів та методів неруйнівного контролю, м. Харків; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: sirnn@mail.ua.

**Sirenko Mykola Mykolajovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of "The devices and methods of nondestructive testing"; Kharkiv; tel. (057) 707-69-34; e-mail: sirnn@mail.ua.

**Горкунов Борис Митрофанович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри " Інформаційно-вимірювальні технології та системи", м. Харків; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

**Gorkunov Boris Mitrofanovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Professor at the Department of " Information-measuring technologies and systems", Kharkov; tel.: (057) 707-69-34; e-mail: gorkunov@kpi.kharkov.ua.

**Львов Сергій Геннадійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри приладів та методів неруйнівного контролю, м. Харків; тел.: (057) 707-69-34; e-mail: lsg@kpi.kharkov.ua.

**Lvov Sergij Gennadijovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "The devices and methods of nondestructive testing"; Kharkiv; tel. (057) 707-69-34; e-mail: lsg@kpi.kharkov.ua.

**В. С. СУЗДАЛЬ, А. В. СОБОЛЕВ, И. И. ТАВРОВСКИЙ**

## СИНТЕЗ ПИД РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ МНОГОМЕРНОГО ПРОЦЕССА ВЫРАЩИВАНИЯ МОНОКРИСТАЛЛОВ

Для многомерного процесса выращивания крупногабаритных щелочногалоидных монокристаллов проведен синтез регулятора полного порядка с использованием  $H_\infty$  - процедуры формирования контура, учитывающей неопределенность в описании модели процесса кристаллизации и действующих внешних возмущений. Синтез  $H_\infty$  регулятора, основанный на 2-Риккати подходе, дал регулятор с порядком, равным порядку объекта управления. Регулятор полного порядка аппроксимирован до ПИД регулятора на основе разложения в ряд Маклорена матричной передаточной функции полного регулятора, представленного в пространстве состояний. Аппроксимация ПИД регулятора обеспечила высокое качество управления процессом выращивания монокристалла CsI(Tl) диаметром 300 мм при необходимом запасе устойчивости системы.

**Ключевые слова:** робастный ПИД регулятор, формирования контура, многомерный процесс.

**Введение.** Крупногабаритные щелочногалоидные монокристаллы (ЩГК) выращивают методом Чохральского на установках типа «РОСТ» и «КРИСТАЛЛ» [1]. В настоящее время практическая реализация в промышленности процесса управления таким сложным объектом, как процесс выращивания ЩГК, в основном основывается на использовании принципа автономности. При реализации автономного управления система со многими управляемыми входами распадается на ряд автономных, не связанных между собой, систем управления, каждая из которых имеет одну управляемую переменную [2]. Однако исследование проблем промышленного производства монокристаллов показывает, что качество продукции определяется многими технологическими параметрами установок выращивания и их взаимосвязью, т.е. процесс выращивания необходимо рассматривать как многомерную, многосвязную динамическую систему. Не учет этих связей при управлении процессами выращивания в промышленном производстве приводит к экономическим потерям. Таким образом, система управления таким сложноорганизованным объектом управления (ОУ), как процесс выращивания ЩГК, должна проектироваться как многомерная оптимальная система [3].

**Анализ литературных данных и постановка проблемы.** В дальнейшем в качестве объекта управления рассматривается установка типа «РОСТ» для выращивания ЩГК методом Чохральского (рис. 1). Монокристалл (рис.1, блок 2) вращается с некоторой угловой скоростью и вытягивается на затравку. В процессе роста монокристалла в тигле (рис.1, блок 1) автоматически поддерживают постоянный уровень расплава, подпитывая его исходным сырьем, которое предварительно подают в расположенную коаксиально тиглю кольцевую емкость для расплавления этого сырья боковым нагревателем (рис.1, блок 5).

Процесс выращивания включает в себя несколько основных этапов: иницирования роста монокристалла с помощью затравочного кристалла (затравливание) и вытягивания образца сначала с переменным сечением (разращивание кристалла), а затем с постоянным сечением (рост по высоте).

Затравливание и разращивание кристалла ведется в ручном режиме без включения обратной связи в системе управления. Система управления диаметром монокристалла включается с началом роста кристалла по высоте. Этот момент определяет начальные условия управления.

Известно, что качество кристалла определяется стабильностью массовой скорости его роста, стабильностью формы фронта кристаллизации (рис.1, блок 3) и равномерностью вхождения активатора по длине кристалла. В системах управления кристаллизацией скорость роста косвенно оценивается по диаметру растущего монокристалла, который и стабилизируется в процессе выращивания.

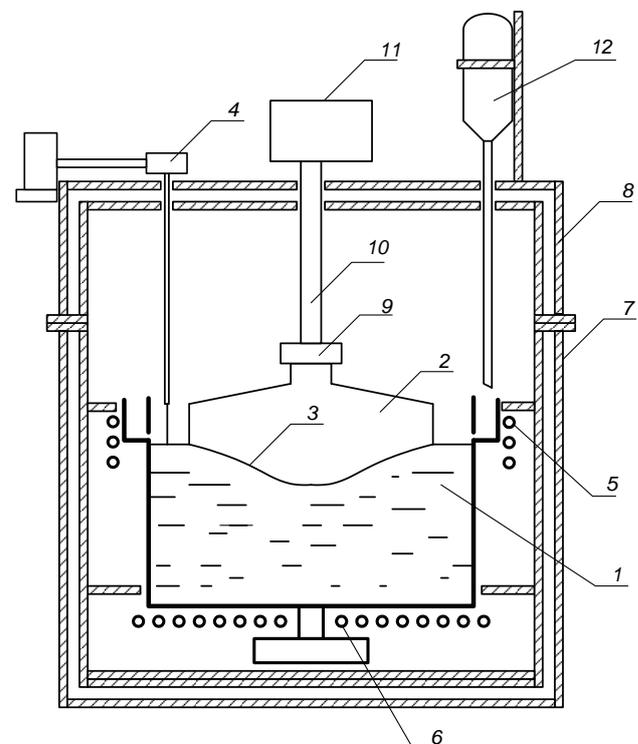


Рис. 1. – Схема ростовой установки: 1 – тигель с расплавом; 2 – растущий кристалл; 3 – фронт кристаллизации; 4 – датчик уровня (уровнемер) с щупом; 5 – боковой нагреватель; 6 – донный нагреватель; 7 – нижний охлаждаемый полукорпус; 8 – верхний охлаждаемый

полукорпус; 9 – кристаллодержатель; 10 – штук кристаллодержателя; 11 – редуктор системы вращения и

© В. С. Суздаль, А. В. Соболев, И. И. Тавровский, 2016

вытягивания штока кристаллодержателя; 12 – система подпитки расплава

Диаметром растущего кристалла управляют, изменяя тепловые условия выращивания. Для оценки диаметра растущего кристалла применяют метод измерения падения уровня расплава в результате быстрого дискретного подъема кристалла из расплава на малую величину [1]. Падения уровня расплава измеряется уровнемером 4. Таким образом, объект управления – это динамическое звено, входом которого являются тепловые условия кристаллизации, а выходом – диаметр монокристалла. Особенно следует подчеркнуть, что при выращивании крупногабаритных ЦГК с увеличением длины растущего образца изменяется характер теплообмена в системе кристалл-расплав, т.е. процесс кристаллизации крупногабаритных монокристаллов является нестационарным. Нестационарность термических процессов в ростовой системе при выращивании ЦГК является источником неопределенности объекта управления.

Исследования процесса кристаллизации крупногабаритных ЦГК показывают, что процесс выращивания можно условно разбить на несколько интервалов, в пределах которых тепловые условия кристаллизации являются квазистационарными, т.е. задачу управления нестационарным процессом можно свести к управлению объектом с неопределенностью. Проектируемая система управления должна обеспечивать приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и робастность к неопределенности модели объекта управления. Следовательно, решение задачи высококачественного управления процессом кристаллизации ЦГК следует искать в классе робастных систем управления. При этом необходимо особо подчеркнуть, что синтезируемые регуляторы должны быть реализуемыми, т.е. они должны иметь приемлемый порядок и фиксированную структуру. Самой распространенной структурой в промышленных системах управления, в том числе и при выращивании монокристаллов, является ПИД регулятор (пропорциональное, интегральное и дифференциальное управление) [2]. Несмотря на то, что простота ПИД регуляторов является одновременно и их слабостью – простота ограничивает диапазон объектов, которыми они могут управлять – удивительная многосторонность и робастность ПИД управления обеспечивает в течение длительного времени значительную популярность этого регулятора. Существует большое количество работ, посвященных методам синтеза регуляторов пониженного порядка. Такие методы можно разделить на два класса: *прямые*, в которых параметры вычисляются при помощи оптимизации или какой-либо другой процедуры; и *косвенные*, в которых либо сначала находится регулятор полного порядка и затем он упрощается, либо сначала проводится редукция модели объекта управления, для нее синтезируется регулятор, и затем он применяется для исходного объекта [4]. Для синтеза регуляторов фиксированной структуры и пониженного (фиксированного) порядка

широко используются идеи робастного управления ( $H_\infty$  - оптимизации), в рамках которого проводится синтез робастных алгоритмов управления, учитывающих неопределенность в описании модели объекта управления и действующих внешних возмущений. Задачу  $H_\infty$  - оптимизации будем решать методом формирования контура (*loop-shaping  $H_\infty$  approach*). Синтез регуляторов с использованием  $H_\infty$  - процедуры формирования контура, предложенный Д. МакФарлейном и К. Гловером, является эффективным методом синтеза робастных регуляторов и успешно применяется для решения задач управления [5, 6]. Под формирования контура при синтезе системы управления понимают метод синтеза, при котором непосредственно определяют форму частотной характеристики передаточной функции разомкнутой или замкнутой системы. Результатом синтеза является субоптимальный  $H_\infty$  контроллер, имеющий порядок обобщенной модели объекта управления. Для синтеза регуляторов фиксированной структуры и пониженного порядка (ПИД) используется аппроксимация полного контроллера усеченным разложением в ряд Маклорена. В результате получен ПИД регулятор, хорошо аппроксимирующий полный  $H_\infty$  контроллер в низком частотном диапазоне, что позволяет ему сохранить устойчивость полного  $H_\infty$  контроллера.

**Цель и задачи исследования.** В теории робастной оптимизации показано, что требование робастной устойчивости и робастного качества для многомерных систем могут быть записаны как требования максимизации и минимизации сингулярных чисел некоторых передаточных функций замкнутой системы [7]. Зависимость сингулярных чисел передаточной функции от частоты, является обобщением АЧХ в одномерных системах. В системах с одним входом и одним выходом эти понятия эквивалентны. Сингулярные числа характеризуют по соответствующему выходу многомерной системы коэффициент усиления на заданной частоте. Для заданной частоты минимальный (максимальный) коэффициент усиления характеризуется минимальным (максимальным) сингулярным числом.

Принципиальная идея формирования контура заключается в том, что максимальные сингулярные числа передаточных матричных функций замкнутых систем могут быть непосредственно определены над соответствующими частотными диапазонами посредством сингулярных чисел соответствующих передаточных матричных функций (МПФ) разомкнутых систем. Таким образом, синтез регулятора,  $K$  удовлетворяющего некоторым требованиям замкнутой системы может быть достигнут посредством выбора  $K$ , который соответствующим образом «формирует» сингулярные числа разомкнутой системы. Следовательно, требования к замкнутой системе в  $H_\infty$  методе формирования контура задаются в частотной области в соответствующих частотных диапазонах в виде

требований к максимальным и минимальным – сингулярным числам МПФ разомкнутой системы.

В методе формирования контура задача робастной стабилизации решается не для исходного, а для нового обобщенного объекта, образованного с помощью формирующих функций. Обобщенный объект представляет собой последовательное соединение передаточных функций двух формирующих функций и исходного номинального ОУ. Требуемые характеристики качества и робастности замкнутой системы обеспечиваются благодаря выбору соответствующих формирующих функций, а решение задачи робастной стабилизации гарантирует устойчивость замкнутой системы. Кроме того, значение величины запаса робастной устойчивости является единственным индикатором, характеризующим степень достижения задаваемых требований к замкнутой системе.

**Материалы и методы синтеза ПИД регулятора методом формирования контура.** Пусть замкнутой системе управления соответствует стандартный объект управления вида

$$\begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_y & W_2 G(s) W_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_2 G(s) W_1 \\ I_u \end{bmatrix} u(s)$$

$$y(s) = \begin{bmatrix} I_y & W_2 G(s) W_1 \\ & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + W_2 G(s) W_1 u(s), \quad (1)$$

где  $d_1$  – сигнал на выходе объекта управления  $G$  и  $d_2$  – сигнал на входе,  $z_1$  – выход замкнутой системы, определяемый измеряемым выходом объекта  $y$ , а  $z_2$  – выход, определяемый управлением  $u$ , которое формируется регулятором  $K_\infty$  в обратной связи,  $I_y$  и  $I_u$  – единичные матрицы соответствующей размерности. На рисунке 2 приведена структурная схема замкнутой системы с последовательными формирующими функциями  $W_1$  и  $W_2$ .

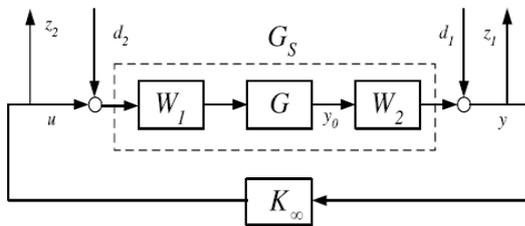


Рис. 2. – Структурная схема замкнутой системы с последовательными формирующими функциями

Передаточная функция замкнутой системы с объектом управления  $G$  и регулятором  $K_\infty$  в обратной связи от всех внешних входов  $w = [d_1^T, d_2^T]^T$  к выходам замкнутой системы  $z = [y^T, u^T]^T$  определяется выражением

$$T_{wz}(G_s, K_\infty) = \begin{bmatrix} (I - G_s K_\infty)^{-1} & (I - G_s K_\infty)^{-1} G_s \\ K_\infty (I - G_s K_\infty)^{-1} & K_\infty (I - G_s K_\infty)^{-1} G_s \end{bmatrix} \quad (2)$$

где  $G_s = W_2 G W_1$  – обобщенный объект управления.

Математическая постановка задачи синтеза регулятора  $K(s)$  формулируется как задача  $H_\infty$  - оптимизации, т.е. для объекта управления  $G$  и формирующих функций  $W_1$  и  $W_2$  необходимо синтезировать регулятор  $K(s)$  в виде обратной связи по измеряемому выходу  $u(s) = K(s)y(s)$ , обеспечивающий минимально возможное значение для  $H_\infty$  - нормы передаточной функции замкнутой системы

$$T_{wz} \cdot \|T_{wz}(G_s, K_\infty)\|_\infty = \gamma_{min} \quad (3)$$

При синтезе регулятора методом формирования контура задаются формирующие функции префильтра  $W_1$  постфильтра  $W_2$ , и формируется обобщенный объект  $G_s = W_2 G W_1$ , который задает желаемые частотные характеристики разомкнутой системы. Решается задача  $H_\infty$ - оптимизации для обобщенного объекта  $G_s$  и определяется величина максимального запаса робастной устойчивости  $\epsilon_{max} = \gamma_{min}^{-1}$ . Если величина максимального запаса робастной устойчивости  $\epsilon_{max} < 0.5$ , то искомый регулятор определяется в виде

$$K = W_1 K_\infty W_2. \quad (4)$$

Проведем синтез робастного регулятора. Данные для идентификации объекта управления получены в реальном масштабе времени при выращивании монокристалла CsI(Tl). Процесс выращивания рассматривался как двухмерный линейный стационарный объект управления (LTI-объект) с двумя входными величинами – температура основного  $T_d$  и температура дополнительного нагревателя  $T_b$  и двумя выходами – диаметр кристалла  $D_s$  и температура питающего расплава  $T_p$ . Матричная передаточная функция ОУ

$$W = \begin{bmatrix} W_{D_s}^{T_d} & W_{D_s}^{T_b} \\ W_{T_p}^{T_d} & W_{T_p}^{T_b} \end{bmatrix},$$

где

$$W_{D_s}^{T_d} = \frac{1.055s - 2.008}{s^2 + 5.453s + 1.548}, \quad W_{T_p}^{T_d} = \frac{3.398s + 0.292}{s^2 + 3.124s + 0.216},$$

$$W_{D_s}^{T_b} = \frac{22.291s + 8.568}{s^2 + 5.453s + 1.548}, \quad W_{T_p}^{T_b} = \frac{-1.657s - 0.394}{s^2 + 3.124s + 0.216}.$$

Модель полностью управляема и наблюдаема. Требования к проектируемой замкнутой системе управления сформулированы следующим образом. Замкнутая система с регулятором  $K(s)$  в виде динамической обратной связи по измеряемому выходу  $y$  должна гарантировать устойчивость и для управляемых выходов СУ обеспечивать: переходные процессы с перерегулированием не больше 20%, время регулирования, не превышающее заданного значения при выращивании монокристаллов

заданного диаметра, иметь достаточный запас устойчивости замкнутой системы.

Решение задачи минимизации  $H_\infty$  нормы передаточной функции замкнутой системы, проведено в среде Matlab с использованием программы `hinfnmix` из пакета решения линейных матричных неравенств LMI Control Toolbox. При синтезе регулятора выбраны следующие параметры:

$$tfw_1 = 0.5, \quad tfw_2 = 1, \quad tfw_3 = (8s + 14) / 8s,$$

$$tfw_4 = (2s + 1) / 4s,$$

$$W_1 = \begin{bmatrix} tfw_1 & 0 \\ 0 & tfw_2 \end{bmatrix}, \quad W_2 = \begin{bmatrix} tfw_3 & 0 \\ 0 & tfw_4 \end{bmatrix},$$

при которых используется функция Matlab:

$$[gopt, h2opt, K_\infty, R, S] = \text{hinfnmix}(P, [0 \ 2 \ 2], [3.355 \ 0 \ 1 \ 0])$$

, где  $P$  – стандартный объект управления в виде соответствующей системной матрицы пакета Tools MATLAB. Синтезирован регулятор  $K_\infty$  – 4-го (полного) порядка. Исходный полноразмерный оптимальный регулятор  $K = W_1 K_\infty W_2$  – 6-го порядка. При величине максимального запаса робастной устойчивости, равной  $\varepsilon_{\max} = 0.298$ , достигнута удовлетворительная совместимость требований между качеством переходных процессов и робастной устойчивостью замкнутой системы, что подтверждено графиками сингулярных чисел обобщенного объекта и разомкнутой системы с синтезированным регулятором полного порядка  $K_\infty$ , приведенных на рисунке 3 (сплошная и штриховая линии). На рисунке 4 для замкнутой системы с оптимальным регулятором  $K$  и номинальным ОУ показаны сингулярные значения функций чувствительности и дополнительной чувствительности канала управления диаметром растущего кристалла с передаточной функцией  $W_{Ds}^{Td}$  (сплошные линии). Анализ сингулярных значений на рисунке 4 показывает, что максимальные сингулярные числа функции чувствительности  $\bar{\sigma}(S(j\omega))$  характеризуют удовлетворительное подавление возмущений на низких частотах, а также низкую колебательность замкнутой системы. Сингулярные числа  $\bar{\sigma}(T(j\omega))$  функции дополнительной чувствительности – гарантированное подавление высокочастотных внешних возмущений, высокое демпфирование замкнутой системы и робастность относительно частичной структурной мультипликативной неопределенности в модели объекта управления.

**ПИД аппроксимация** В работе [8] предлагается регулятор полного порядка, синтезированный на основе  $H_\infty$  - метода формирования контура, аппроксимировать до ПИД регулятора на основе разложения в ряд Маклорена МПФ полного регулятора, представленного в пространстве состояний.

Известно, что синтез  $H_\infty$  регуляторов, основанный на 2-Риккати подходе, дает регулятор с

порядком, равным порядку ОУ [9]. Используемый метод не позволяет получить ПИД регулятор, который обладает такими же параметрами робастности и удовлетворял тем же критериям качества, что и регулятор полного порядка. Возможны два направления аппроксимации:

- обеспечить, по возможности, качество управления и пожертвовать робастностью;
- обеспечить робастность и пожертвовать качеством.

Поскольку используемая модель объекта управления обладает лишь частичной структурной неопределенностью, требования робастности не являются критичными и аппроксимация ПИД регулятора на основе разложения в ряд Маклорена обеспечивает, по возможности, качество и жертвует робастностью.

Предположим, что исходный полноразмерный оптимальный регулятор  $K = W_1 K_\infty W_2$  задан в пространстве состояний следующим образом

$$\begin{cases} \dot{x} = A_k x + B_k u \\ u = C_k x + D_k y \end{cases}$$

где  $A_k \in R^{n \times n}$ ,  $B_k \in R^{n \times p}$ ,  $C_k \in R^{q \times n}$ ,  $D_k \in R^{q \times p}$ .

Пусть ранг матрицы  $A_k$  будет равен  $r$ . Кратность нулевого собственного значения  $A_k$  будет  $n-r$  и существует  $n-r$  линейно независимых собственных векторов для этого нулевого собственного значения. Найдем теперь преобразование подобия  $T$  такое, что

$$TA_k T^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & A_2 \end{bmatrix},$$

где  $A_k$  невырождена. Это преобразование подобия  $T$  может быть вычислено, используя декомпозицию собственных чисел матрицы  $A_k$  [4, 8]. С этим  $T$  новая реализация в пространстве состояний задается в виде

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = \tilde{A}_k \tilde{x} + \tilde{B}_k u \\ u = \tilde{C}_k \tilde{x} + \tilde{D}_k y \end{cases}$$

где  $\tilde{A}_k = TA_k T^{-1}$ ,  $\tilde{C}_k = C_k T^{-1} = [C_1 \ C_2]$ ,  $\tilde{D}_k = D_k$ ,  $\tilde{B}_k = TB_k = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$ .

ПИД аппроксимация в форме

$$K_{PID}(s) = K_p + K_i / s + K_d s \quad (5)$$

может быть получена путем рассмотрения первых членов ряда Маклорена для регулятора по переменной  $s$ :

$$K(s) = \tilde{C}_k \begin{bmatrix} sI & 0 \\ 0 & sI - A_2 \end{bmatrix} \tilde{B}_k = \frac{C_1 B_1}{s} + (D_k - C_2 A_2^{-1} B_2 - C_2 A_2^{-2} B_2 s + \dots)$$

Итак, для регулятора (5) получаем

$$K_p = D_k - C_2 A_2^{-1} B_2, \quad K_i = C_1 B_1, \quad K_d = -C_2 A_2^{-2} B_2. \quad (6)$$

При аппроксимации предполагается  $s \ll \underline{\sigma}(A_2)$ , что характеризует поведение на низких частотах [8]. Таким образом, основанный на рассмотренной процедуре аппроксимации результирующий ПИД регулятор может достигать хорошей аппроксимации регулятора полного порядка (4) на низких частотах. Кроме того, можно ожидать, что результирующий ПИД регулятор будет сохранять качество парирования возмущений регулятора высокого порядка.

В нашем случае полноразмерный регулятор  $K$  аппроксимируется ПИД регулятором со следующими коэффициентами

$$K_p = \begin{bmatrix} -0.1094 & 0.1085 \\ -0.5942 & 0.5935 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} -0.5139 & 0.5139 \\ 2.8199 & -2.8193 \end{bmatrix},$$

$$K_d = \begin{bmatrix} -0.1201 & 0.1199 \\ -0.3214 & 0.3216 \end{bmatrix}.$$

В системах управления выращиванием ЩГК в большинстве случаев применяется ПИ регулятор, что связано со спецификой процесса роста.

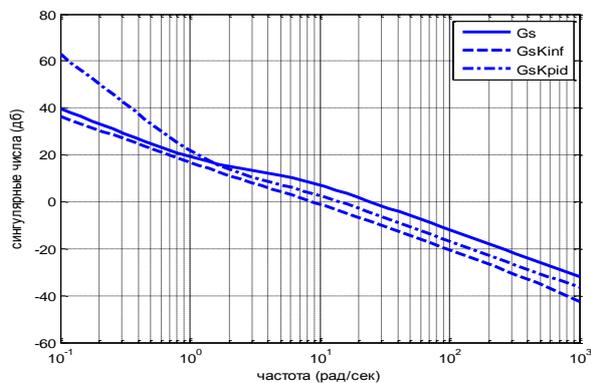


Рис. 3. – Сингулярные значения обобщенного объекта  $G_s$  и разомкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (штриховая линия) и  $K_{PI}$  (штрих пунктирная линия)

Сингулярные значения обобщенного объекта  $G_s$  и разомкнутой системы управления с регуляторами  $K_\infty$  и  $K_{PI}$  приведены на рисунке 3. Из графиков следует, что оба регулятора имеют близкие характеристики в пределах полосы пропускания. В области частоты среза их поведение практически не отличается. Анализ частотных характеристик замкнутой системы с регулятором  $K_{PI}$  (рис. 4) показывает, что наблюдается некоторое ухудшение свойств системы с ПИД регулятором в области высоких частот. Графики сингулярных значений функции дополнительной чувствительности и функции чувствительности (штриховые линии) канала управления диаметром растущего кристалла также показывают, что в замкнутой системе управления с регулятором  $K_{PI}$  нет и заметного ухудшения робастных свойств.

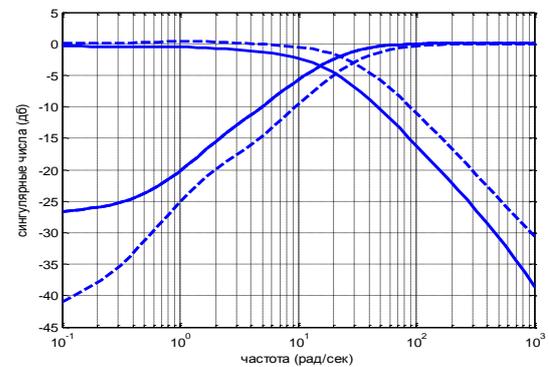


Рис. 4. – Сингулярные значения функции дополнительной чувствительности и функции чувствительности канала управления диаметром растущего кристалла замкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (сплошные линии) и  $K_{PI}$  (штриховые линии)

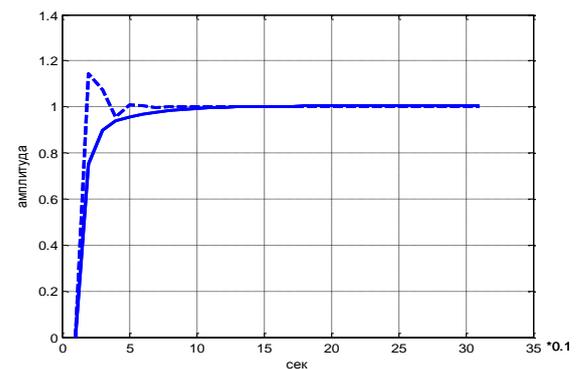


Рис. 5. – Переходная характеристика канала управления диаметром растущего кристалла замкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (сплошная линия) и  $K_{PI}$  (штриховая линия)

Графики переходной характеристики канала управления замкнутой системы с регуляторами  $K_\infty$  (сплошная линия) и  $K_{PI}$  (штриховая линия) (рис. 5) показывают, что в системе с регулятором  $K_{PI}$  появилось перерегулирование. Величина перерегулирования приблизительно 18%, при этом изменение длительности переходного процесса фактически не произошло. Такое перерегулирование, при полученной длительности переходного процесса вполне допустимо в системе управления диаметром монокристалла величиной до 300 мм.

**Выводы.** Предложенный косвенный метод синтеза и настройки регулятора низкого порядка и заданной структуры на основе разложения в ряд Маклорена оптимального регулятора полного порядка, синтезированного  $H_\infty$  - методом формирования контура, позволяет получить ПИД регулятор, который может быть успешно использован в управлении процессами выращивания ЩГК. Регулятор обладает параметрами качества, сравнимыми с параметрами регулятора полного порядка в рабочем диапазоне частот. Параметры робастности полученного ПИД регулятора удовлетворяют требованиям, наложенным используемой моделью объекта управления.

**Список литературы:** 1. Горилецкий В. И. Рост кристаллов / Горилецкий В. И., Гринев В. В., Заславский Б. Г. и др. // Харьков: АКТА. – 2002. – 535 с. 2. Суздаль В. С. Сцинтилляционные монокристаллы: автоматизированное выращивание / Суздаль В. С., Стаоник П. Е., Герасимчук Л. И., Епифанов Ю. М. // Сер. Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – Харьков: ИСМА. – 2009. – 260 с. 3. Суздаль В. С. Оптимизация управления процессами выращивания сцинтилляционных монокристаллов / Суздаль В. С., Епифанов Ю. М. // Сер. Состояние и перспективы развития функциональных материалов для науки и техники. – Харьков: ИСМА. – 2015. – 111 с. 4. Бойченко А. П. Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры / Бойченко В. А., Курдюков А. П., Тимин В. Н. и др. // Управление большими системами – Москва: ИПУ РАН, –2007 – Вып. 19. – 23–126 с. 5. McFarlane D. C., Glover K. A loop shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1992. – Vol. 37 – 759 – 769 p. 6. Курдюков А. П. Синтез робастного  $H_\infty$ -регулятора для управления энергетической котельной установкой / Курдюков А. П., Тимин В. Н. // Управление большими системами. – М.: ИПУ РАН, 2011. – Вып. 25. – 179–214 с. 7. Zames G. Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses / G. Zames // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1981. – V. AC–26, № 2. – 301–320 p. 8. Tan W. Multivariable Robust Controller Design for Boiler System, / Tan W., Marquez H. J., Chen T. // IEEE Transactions on Automatic Control System Technology. – 2002. – Vol.10. – №5. – 735–742 p. 9. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления / Под ред. Н. Д. Егунова. – Москва.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с

**Bibliography (transliterated):** 1. Gorileckij V. I. *Rost kristallov* / Gorileckij V. I., Grinev V. V., Zaslavskij B. G. i dr.]. – Kharkov: AKTA,

2002. – 535 p. 2. Suzdal' V. S. *Scintilljacionnye monokristally: avtomatizirovannoe vyrashhivanie* / Suzdal' V. S., Stadnik P. E., Gerasimchuk L. I., i dr. // Ser.: Sostojanie i perspektivy razvitiya funkcional'nyh materialov dlja nauki i tehniki. – Kharkov: ISMA, –2009. – 260 p. 3. Suzdal' V. S. *Optimizacija upravlenija processami vyrashhivaniya scintilljacionnyh monokristallov* / Suzdal' V.S., Epifanov Ju.M. // Ser.: Sostojanie i perspektivy razvitiya funkcional'nyh materialov dlja nauki i tehniki. – Kharkov: «ISMA», –2015. – 111 p. 4. Bojchenko V. A. *Nekotorye metody sinteza regulatorov ponizhennogo porjadka i zadanoj struktury* / Bojchenko V. A., Kurdjukov A. P., Timin V. N. i dr. // Upravlenie bol'shimi sistemami – Moscow: IPU RAN, –2007. – Вып. 19. – 23–126 p. 5. McFarlane D. C. *A loop shaping design procedure using  $H_\infty$  synthesis* / McFarlane D. C., Glove K. // IEEE Transactions on Automatic Control. Vol. 37. –1992.– 759 – 769 p. 6. Kurdjukov A. P. *Sintez robastnogo -reguljatora dlja upravlenija jenergeticheskoj kotel'noj ustanovkoj* / Kurdjukov A. P., Timin V. N. // Upravlenie bol'shimi sistemami. – Moscow: IPU RAN, –2011. – Вып. 25. – 179–214 p. 7. Zames G. *Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses* / Zames G. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1981. – V. AC–26, no 2. – 301–320 p. 8. Tan W. *Multivariable Robust Controller Design for Boiler System* / Tan W., Marquez H. J., Chen T. // IEEE Transactions on Automatic Control System Technology. – 2002. – Vol.10. – no 5. – 735–742 p. 9. *Metody robastnogo, nejro-nechetkogo i adaptivnogo upravlenija* / Pod red. N. D. Egunova. – Moscow: Izd-vo MG TU im. N. Je. Baumana, – 2002. – 744 p

Поступила (received) 25.02.2016

**Суздаль Виктор Семенович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ИСМА НАН Украины, ведущий научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов; тел.: (057) 341-01-45; email: suzdal@isma.kharkov.ua.

**Suzdal Victor Semenovich** – Doctor of Engineering, Senior Researcher, ISMA NAS of Ukraine, Leader researcher of control systems Lab of single crystal technology department; ph. (057) 341-01-45; email: suzdal@isma.kharkov.ua

**Соболев Александр Викторович** – кандидат технических наук, ИСМА НАН Украины, научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов: тел.: (057) 341-01-45; email: sobolev@isma.kharkov.ua.

**Sobolev Aleksandr Victorovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), ISMA NAS of Ukraine, Research Associate of control systems Lab of single crystal technology department: ph. (057) 341-01-45; email: sobolev@isma.kharkov.ua.

**Тавровский Игорь Игоревич** – кандидат технических наук, ИСМА НАН Украины, старший научный сотрудник лаборатории систем управления отдела технологии выращивания монокристаллов: тел. (057) 341-01-45; email: tawr@isma.kharkov.ua.

**Tavrovskiy Ihor Ihorovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), ISMA NAS of Ukraine, Senior Researcher of control systems Lab of single crystal technology department: ph. (057) 341-01-45; email: tawr@isma.kharkov.ua..

*А. И. ШВАЧКА, Я. А. ДОВГОПОЛЫЙ, Е. В. ЧЕРНЕЦКИЙ*

## РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ПОСТРОЕНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ АСУТП ПРИ ПОВЫШЕНИИ ЧИСЛА КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Предлагается метод формирования критерия управления в АСУТП на основании отдельных локальных критериев эффективности (повышение энергоэффективности производства, которое сопровождается ростом производительности) путем достижения компромиссных решений по отдельным показателям производства и формирования базы данных вариантов управления. Сделан вывод о необходимости перехода к глобальному критерию управления в зависимости от текущей энергетической базы и экономической целесообразности, что повышает маневренность и гибкость системы управления в нестабильных современных условиях производства в стране.

**Ключевые слова:** система регулирования, объект, критерий управления, энергоэффективность, математическая модель, алгоритм, компромиссные решения, устойчивость, база данных, информационное обеспечение.

**Введение.** Отечественный и зарубежный опыт убедительно доказывает, что развитие производства, решение проблем качества и конкурентоспособности продукции на мировом рынке требует коренного совершенствования систем сбора, хранения, обработки, передачи и использования информации [1].

Современные тенденции развития производства характеризуются разработкой, внедрением и использованием информационных технологий. Их основой являются компьютеры и компьютерные сети, имеющие богатейшее программное обеспечение, а также системы управления базами данных, компьютерные системы поддержки принятия решений, программные продукты, обладающие широкими функциональными возможностями и развитым пользовательским интерфейсом.

Одним из важнейших условий создания эффективных систем управления является совершенствование математических моделей, которые позволяют получить информацию о процессах в агрегатах, осуществлять оптимизацию их параметров, разрабатывать и совершенствовать алгоритмы управления техническими системами [1].

**Анализ основных достижений и литературы.** При управлении в технических системах имеется несколько показателей оценки эффективности. Помимо наиболее распространенного экономического критерия, могут быть важными энергетические, экологические и др. факторы. Они учитываются обычно путем введения ограничений. Это имеет достаточно серьезные основания, так как удовлетворение других (неэкономических) требований практически всегда связано с дополнительными затратами. При этом экономический критерий выступает как обобщающий, позволяющий сопоставлять варианты решений при обеспечении требуемых уровней соблюдения остальных критериев. Учет свойства многокритериальности при управлении отражается как на применяемых математических моделях и методах, так и на общей методологии управления.

Процедура основных информационных технологий последовательно проиллюстрирована на примере доменного производства. Это обусловлено тем, что это производство является основным, наиболее сложным, энерго- и ресурсоемким.

Энергетические проблемы на Украине изменяют

постановку задач прогнозирования, планирования и управления, которые целесообразно рассматривать, как векторные задачи (многокритериальные), для которых поиск лучшего (компромиссного) решения осуществляется на множестве отдельных показателей, зачастую противоречивых [2]. Существуют определенные исторические предпосылки развития многокритериальных задач (табл. 1).

Таблица 1 – Тенденции формирования задачи множественного выбора в металлургии чугуна

Автор	Основные положения теории
М. Курако	- повышение производительности - снижение расхода кокса - снижение трудоемкости
В. Гулыга	- повышение производительности - снижение расхода топлива - механизация производства
Л. Фортунадо	- повышение производительности, - снижение расхода горючего, - снижение себестоимости продукции

В металлургической теплотехнике работы в данном направлении выполнены И.Д. Семикиным, Э.М. Гольдфарбом и их последователями и учениками: Г.И. Деминим, И.Г. Товаровским, А.В. Бородулиным, Т.И. Сламчинской, В.П. Бородулиной и др. Особенностью их решения является сведение задачи к однокритериальной на основании теории игр, установлении приоритета критериев на основании весовых коэффициентов и др.

Академик Моисеев Н.Н. отмечает [3], что работы в области методов принятия решений требуют создание не только специального математического обеспечения, но и развития знаний, позволяющих выяснить истинную структуру интересов субъектов.

В отношении методологии управления важно то, что методы многокритериальной оптимизации предполагают активное участие людей в решении задач [4]. Наличие нескольких критериев создает неопределенность целей управления. Раскрытие этой неопределенности возможно только с участием человека. Конкретно это могут быть экспертные оценки при соизмерении критериев разной природы, оценки допустимости компромиссов. Поэтому благодаря свойству многокритериальности существенно повышается роль человека в управлении

техническими системами.

Анализ литературных источников показал, что для повышения эффективности управления и планирования производства целесообразно расширять пути и методы оптимального управления на множестве отдельных показателей.

**Задачи и методы исследования.** Установить закономерности и дать количественную оценку критерия управления технической системы с учетом возможности получения максимальных эффектов по основным показателям процесса при совместном использовании различных видов энергетических ресурсов методами векторной оптимизации.

**Результаты численного моделирования.** В результате проведенного численного эксперимента разработана оптимизационная модель топливоиспользования доменной плавки как задача непрерывно-дискретного программирования. В основу построения модели положены многофакторные нелинейные характеристики показателей плавки, полученные методом планирования эксперимента по модели И. Д. Семикина [5]:

$$P, K, T_{\text{усл}} = f(t_{\text{дм}}, O_2, m, n), \quad (1)$$

где  $t_{\text{дм}}$  – температура дутья, °С;  $O_2$  – содержание кислорода в дутье, %;  $m$  ( $n$ ) – доля углерода природного газа (пылеугольного топлива) от общего количества углерода, сгораемого на фурмах, д.е.;  $K$  – удельный расход кокса, кг/т чугуна;  $P$  – производительность, т чугуна/час;  $T_{\text{усл}}$  – удельный расход условного топлива, кг/т чугуна.

Адекватность полученной модели топливоиспользования и значимость коэффициентов регрессии определены сопоставлением расчетных и практических данных, а также с помощью статистического анализа, задаваясь ошибкой расчета экспериментов по расчетной модели.

В металлургическом производстве основные технико-экономические показатели работы доменной печи должны быть на уровне близком к оптимальному. Т.о., рациональные решения, полученные по отношению к отдельному показателю необходимо скомбинировать в компромиссные, по отношению к отдельному показателю. Причем, потери по отношению к каждому показателю должны быть минимальными.

Математический аппарат решения задачи основан на принципе Парето путем последовательного попарного сравнения элементов в соответствии с правилом предпочтения. Для обхода точек конкурирующих решений использовано понятие «конуса» [6]. Это позволяет оценить не единственное решение, а совокупность равноправных решений рациональных в том или ином смысле.

Практическая целесообразность совместного рассмотрения основных показателей плавки в задаче векторной оптимизации заключается в возможности повышения производительности доменной плавки при одновременном снижении затрат по коксу и топливу. Это определяет постановку задачи в области поиска

«производительность – удельный расход кокса – удельный расход условного топлива»:

$$(-P, K, T_{\text{усл}}) \rightarrow \min \quad (2)$$

Превышение количества параметров поиска более двух, для которых необходимо оценить компромиссные решения, определяет множество решений в виде поверхности в пространстве. Это усложняет анализ полученных результатов, поэтому, решение перенесено на плоскость искомых величин (рис. 1). Статистическая обработка полученных результатов свидетельствует о том, что повышение производительности доменной печи сопровождается увеличением потребления кокса и снижением расхода условного топлива. Вариант принимаемого решения должен быть определен на основании компромисса повышения производительности и связанного с ним повышения затрат на производство.

Формирование критерия управления тепловым режимом плавки в целом может быть выполнено на основании анализа соотношения используемых видов энергоресурсов с дальнейшим переходом на показатель производительности печи.

В данной системе используется следующие виды топлива: кокс, условное топливо. В свою очередь условное топливо объединяет такие виды топливных добавок как пылеугольное топливо и природный газ. Точки вариантов дутьевого режима (рис. 2) расположенные вблизи оси отражающей изменение расхода условного топлива характеризуются повышенными значениями расходов угольной пыли и природного газа. Смещение точек вблизи оси изменения расхода кокса (нижняя часть аппроксимирующей кривой) связано со снижением потребления указанных видов топливных добавок, в частности, расход природного газа и доходит до нулевой отметки, расход угольной пыли сохраняется на уровне 90 кг/т чугуна при сохранении динамики роста содержания кислорода в дутье (21-31 %).

Основная часть точек решений характеризуется использованием дутья с максимальной температурой в ограничениях, т.е. 1200 °С. Эти точки преимущественно расположены под аппроксимирующей кривой и объединены в небольшие группы, главным образом, связанные повышением содержания кислорода в дутье при перераспределении состава топливных добавок. В верхнем диапазоне преимущественно отражены точки с более низкими значениями температуры: 1000, 1100 °С, но более высоким потреблением угольной пыли и природного газа. Наиболее высокие значения расхода топливных добавок: расход природного газа 118 м<sup>3</sup>/т чугуна при расходе пылеугольного топлива 103 кг/т чугуна. Указанные показатели по затратам угольной пыли соответствуют требуемым в отрасли.

Полученное множество решений задачи векторной оптимизации в области трех показателей доменной плавки вносит дополнительную неопределенность в выборе критерия реализации технологического режима.

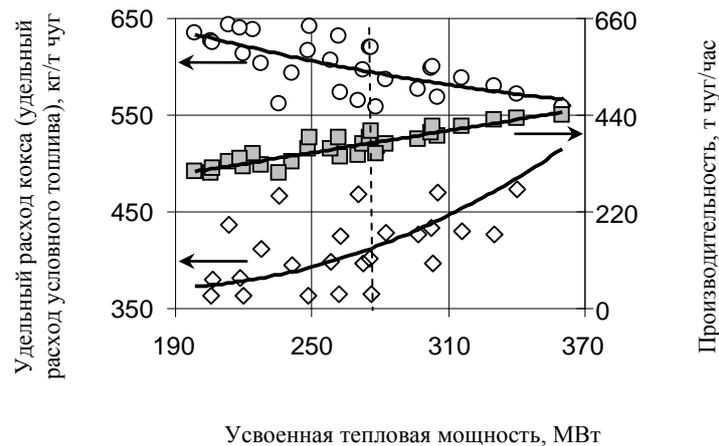


Рис. 1 – Характеристики решения задачи поиска компромиссных решений в области «производительность- удельный расход кокса – удельный расход условного топлива»:  
 о- удельный расход условного топлива, ■- производительность, ◇- удельный расход кокса, (—) – линия тенденций показателей плавки, (- - -)оценка варианта теплового режима

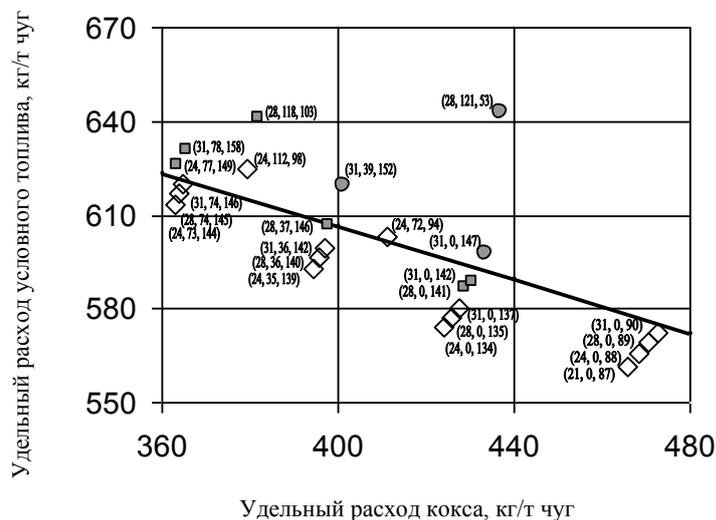


Рис. 2 – Решение задачи векторной оптимизации в области «К-Р-Т<sub>всг</sub>» на плоскости параметров «удельный расход кокса– удельный расход условного топлива»:  
 (—) – аппроксимирующая кривая,  $R^2 = 0,699$ ; результаты исследования при температуре дутья (◇- 1200 °C; ●- 1100 °C; ■- 1000 °C); в скобках указаны характеристики дутья (содержание кислорода в дутье, %; расход природного газа, м<sup>3</sup>/ т чуг; расход угольной пыли, кг/т чуг)

Однако в результате получен массив точек решений, каждая из которых определяет заданный технологический режим, реализация которой связана с определенными показателями энергоиспользования. Сформированная таким образом база данных (степень ее детализации определяется шагом поиска каждой независимой переменной) позволяет оценить затраты ресурсов, которые будут иметь место при наращивании объемов производства или поддержание нормативной мощности в случае отсутствия спроса на продукцию.

Оперативный персонал, имеющий в своем распоряжении подобный инструмент многокритериального поиска для формирования критерия управления, необходимо обеспечить

алгоритмом перехода к единичному решению. В этом отношении одним из возможных подходов является формирование глобального критерия оптимизации в полученных вариантах решения. В современных экономических условиях, связанных с ограниченными возможностями по обеспечению производства энергоносителями или, в результате разрыва традиционных источников их поставки, прекращение их подачи, таким критерием является минимизация энергопотребления.

Проведен анализ вариантов решения в области параметра усвоенной тепловой мощности, определенного как критерий интенсификации режима доменной плавки. Усвоенная тепловая мощность является основной энергетической характеристикой

печи, определяющая количество теплоты, которое получают изделия в печи в единицу времени. Ее значение определяется спецификой сжигания топлива и процессами восстановления. Критерий управления, в рассматриваемой задаче определяет средний, по затратам энергии, технологический режим. Для обеспечения производительности доменной печи 402 т чугуна/час потребовалось подать кокса 364 кг/т чугуна, условного топлива – 617 кг/т чугуна (рис. 1). Несмотря на то, что получены более высокие показатели производства (440 т чугуна/час), режим который им соответствует, не принят для реализации при управлении. Выполнив сравнение принятого режима и максимально возможного, установлено, что повышение производительности на  $\approx 5\%$  будет сопровождаться повышением потребления кокса более чем на 50%. Полученные данные согласуются с анализом характеристики энергоиспользования (рис. 2).

Реализация предложенного алгоритма многокритериального поиска для формирования критерия управления, в составе современной АСУТП, позволяет расширить информационно-аналитическую базу принятия научно обоснованных решений по оценке технологического режима, обеспечивает широкий выбор дополнительных аналитических возможностей, высокоразвитую гибкую структуру и высокоэффективный человеко-машинный интерфейс.

**Выводы.** В результате выполненных исследований решена актуальная научно-техническая задача обоснования рекомендаций по выбору базового технологического режима, определяемого критерием управления, которые отвечают требованиям обеспечения процесса энергетическими ресурсами с учетом их наличия и объемов на основании синтеза результатов компьютерного моделирования и методологии вычислительного эксперимента. Метод отличается учетом взаимного влияния решений при наличии нескольких критериев эффективности с учетом минимальных потерь по отношению к каждому из них, а также принято решение о необходимости перехода к глобальному критерию

управления. Оценка варианта решения представлена в плоскости критерия интенсификации процесса.

**Список литературы:** 1. Онорин О. П. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О. П. Онорин, Н. А. Спири, В. Л. Терентьев, Л. Ю. Гилева, В. Ю. Рыболовлев, И. Е. Косаченко, В. В. Лавров, А. В. Терентьев. – Екатеринбург: УГТУ – УПИ, 2005. – 301 с. 2. Бородулин А. В. Домна в энергетическом измерении / А. В. Бородулин, А. Д. Горбунов, В. И. Романенко, С. П. Суцев. – Днепропетровск, 2006. – 450 с. 3. Моисеев Н. Н. Междисциплинарные исследования глобальных проблем / Н. Н. Моисеев. – Москва: Тайдекс Ко, 2006. – 264 с. 4. Ногин В. Д. Проблема сужения множества Парето: подходы к решению / В. Д. Ногин // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2008. – № 1. – С. 98–112. 5. Бородулин А. В. Вопросы системной надежности доменного производства / А. В. Бородулин, А. Л. Чайка, А. А. Сохацкий, Б. В. Корнилов, А. И. Швачка // Сб. ИЧМ НАНУ. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2012. – № 25. – С. 51–68. 6. Швачка А. И. Развитие информационных технологий в задаче экономико-математического моделирования методами векторной оптимизации / А. И. Швачка, Е. В. Лещенко, О. Ю. Олейник // Вопросы химии и химической технологии. – 2013. – № 5. – С. 190–193.

**References:** 1. Honorine O. P., Spirin N. A., Terentyev V. L., Gileva L. Y., Rybolovlev V. Y., Kosachenko I. E., Lavrov V. V., Terentyev A. V. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo processa* [Computer modeling techniques blast furnace]. Ekaterinburg, Ural State Technical University - UPI, 2005. 301 p. 2. Borodulin A. V., Gorbunov A. D., Romanenko V. I., Sushchev S. P. *Domna v jenergeticheskom izmerenii* [Domna in the energy measurement]. Dneprodzerzhinsk, 2006. 450 p. 3. Moiseev N. N. *Mezhdisciplinarnye issledovaniya global'nyh problem* [Interdisciplinary studies of global problems]. Taydeks Co., 2006. 264 p. 4. Nogin V. D. Problema suzhenija mnozhestva Pareto: podhody k resheniju [Pareto set constriction problem: approaches to solving]. *Iskustvennyj intellekt i prinjatje reshenij* [Artificial intelligence and decision-making]. 2008, no. 1, P. 98-112. 5. Borodulin A. V., Chaika A. L., Sokhatsky A. A., Kornilov B. V., Shvachka A. I. *Voprosy sistemnoj nadezhnosti domennogo proizvodstva* [Questions system reliability blast furnace]. *Sb. IChM NANU. Fundamental'nye i prikladnye problemmy chernoj metallurgii* [Coll. HMI NASU. Fundamental and applied problemmy ferrous metallurgy]. 2012, no. 25, P. 51-68. 6. Shvachka A. I., Leshchenko E. V., Olejnik O. Y. *Razvitie informacionnyh tehnologij v zadache jekonomiko-matematicheskogo modelirovaniya metodami vektornoj optimizacii* [Development of information technologies in the problem of economic and mathematical methods of vector optimization modeling]. *Voprosy himii i himicheskij tehnologii* [Questions of chemistry and chemical technology]. 2013, no. 5, P. 190-193.

Поступила (received) 03.03.2016

**Швачка Александр Иванович** – кандидат технических наук, ГВУЗ «Украинский химико-технологический университет», преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированных технологий и метрологии», тел.: (067) 760-16-45, e-mail: AleksandrShvachka@gmail.com.

**Shvachka Alexander Ivanovich** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), PHEI "Ukrainian University of Chemical Technology", teacher of "Computer-integrated technologies and metrology", tel.: (067) 760-16-45, e-mail: AleksandrShvachka@gmail.com.

**Довгопольный Ярослав Александрович** – аспирант, ГВУЗ «Украинский химико-технологический университет», преподаватель кафедры «Компьютерно-интегрированных технологий и метрологии», тел.: (093) 090-85-32, e-mail: Yaroslav.Dovgopolyi@gmail.com.

**Dovgopolyi Yaroslav Alexandrovich** - post-graduate student, PHEI "Ukrainian University of Chemical Technology", teacher of "Computer-integrated technologies and metrology", tel.: (093) 090-85-32, e-mail: Yaroslav.Dovgopolyi@gmail.com.

**Чернецкий Евгений Вячеславович** – кандидат технических наук, ГВУЗ «Украинский химико-технологический университет», доцент кафедры «Компьютерно-интегрированных технологий и метрологии», тел.: (067) 950-80-03, e-mail: Evgeniy.Cherneckiy@gmail.com.

**Cherneckii Eugene Vycheslavovich** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), PHEI "Ukrainian University of Chemical Technology", Associate Professor of the Department "Computer-integrated technologies and metrology", tel.: (067) 950-80-03, e-mail: Evgeniy.Cherneckiy@gmail.com

## РЕФЕРАТИ

УДК 629.424.3: 621.314.12

**Влияние запаздывания по измерению частоты вращения на показатели регулирования мощной дизель-генераторной установки / А. Б. Богаевский, А. Н. Борисенко, Б. И. Кубрик, С. А. Литвиненко, Е. А. Борисенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С.3–7. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

Виконано дослідження впливу запізнення по виміру частоти обертання на показники стійкості потужної дизель-генераторної установки з імпульсним датчиком частоти в зворотному зв'язку. Використані методи теорії нелінійних імпульсних систем автоматичного управління та моделювання перехідних процесів системи регулювання. На підставі критерію Найквіста визначена мінімально допустима кількість зубців у вимірювальній шестерні. Отримано практичні співвідношення для визначення кількості зубців, необхідної для забезпечення заданої точності регулювання

**Ключові слова:** регулювання, частота, запізнення, стійкість, кількість зубців, точність регулювання, вимірювальна шестерня

УДК 620.179.14

**Перспективы развития многопараметровых вихретоковых преобразователей / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко, Шибан Тамер // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 8–11. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

У роботі розглянуті питання побудови багатопараметрових електромагнітних перетворювачів з просторово-періодичними полями. Наведені конструкції електромагнітних перетворювачів з одним і двома збуджуючими полюсами для виділення певних переважаючих просторових гармонік. Представлені принципові схеми включення перетворювачів, які реалізують трьохпараметровий метод контролю параметрів виробів. Зроблено висновок про можливість використання електромагнітних перетворювачів з просторово-періодичними полями для багатопараметрових вимірювань.

**Ключові слова:** багатопараметрові вимірювання, електромагнітний перетворювач, просторово-періодичне поле.

УДК 621.313: 004.891

**Разработка алгоритмического и программного обеспечения диагностической системы оценки stanu электродвигунов на основе зовнішніх діагностичних показників / Б. М. Горкунов, О. А. Чорна, А. А. Тищенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 12–15. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-083x.**

Запропонована структура діагностичної системи діагностування електричних машин, принципи якої ґрунтуються на аналізі зовнішніх ознак, що характеризують статичні режими їх роботи. Розроблене алгоритмічне забезпечення здатне забезпечити високу цілеспрямованість аналізу і оперативність прийняття експертних висновків за оцінкою стану і визначенням несправностей електричних машин. Створене програмне забезпечення може використовуватись під час регламентних оглядів, або при виникненні підозри щодо початку розвитку аварійних процесів.

**Ключові слова:** діагностична система, експертна система, оцінка стану, електричні двигуни, зовнішні ознаки роботи.

УДК 681.513.54

**Обзор существующих типов регуляторов температуры тепловых объектов / О. Н. Евсеенко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С.16–21. Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-083x.**

Проведено аналіз існуючих типів регуляторів для теплових об'єктів, представлено алгоритм вибору типу регулятора в залежності від величини транспортного запізнення і часу перехідних процесів об'єкта управління. Запропоновано закон управління на основі ШІМ-регулювання з передбаченням для керування тепловими об'єктами з розподіленими параметрами з великим транспортним запізненням; представлені результати управління температурою об'єкта за допомогою ШІМ-регулювання з передбаченням.

**Ключові слова:** транспортне запізнення, П-, ПІ-, ПІД-, ПІД-регулятори, предиктор Сміта, дво-, трипозиційний регулятор, ППІ-регулятор, регулятор Ресвіка, ШІМ-регулятор з передбачуючим фільтром, об'єкт з розподіленими параметрами.

УДК 004.92, 623.438

**Методы реализации проективных преобразований в компьютерной графике / П. О. Качанов, А. О. Зуев, К. М. Яценко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 22–25. – Библиогр.: 5 назв. ISSN 2079-083x.**

У статті розглядається методи й алгоритми реалізації проективних перетворень на графічних прискорювачах. Проводиться розділення методів на два сімейства: проєціювання з одним і з кількома центрами проєкції. Зроблено огляд і порівняння методів кожного сімейства. Велика увага приділяється методам з одним центром проєціювання. Проводиться оцінка щодо можливості реалізації та застосування методів в системах реального часу.

**Ключові слова:** проективні перетворення, графічні прискорювачі, environment mapping, системи візуалізації, системи реального часу.

УДК 621.39

**Расчёт коэффициентов цифрового фильтра сигнально-кодовой конструкции / В.А. Крылова, М.Н. Грузин // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). С.26–29.– Библиогр.: 5 назв.**

Для побудови сигнально-кодової конструкції на основі системи сигналів з розширеним спектром пропонується метод розрахунку коефіцієнтів цифрового фільтра. Запропоновано і розроблено метод формування та обробки сигналів з гребінчастим спектром, що належать до класу широкосмугових сигналів і відрізняються від відомих властивостями спектральної і тимчасової селективності, високою завадостійкістю і простою обробки в цифровому вигляді. Даний метод формування сигнально-кодових конструкцій не передбачає введення захисних частотних і тимчасових інтервалів між сигналами, що забезпечує гранично економне використання частотно-часового ресурсу групового тракту.

**Ключові слова:** цифровий зв'язок, сигнально-кодові конструкції, широкосмуговий сигнал, частотний ресурс, гребінчастий фільтр, коефіцієнт фільтра.

УДК 621.314-621.391

**Математическое описание вибрационного процесса клапанного механизма ГРМ ДВС и его моделирование на базе электромеханических аналогий / О.В. Лавриненко // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). С. 30–33. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

Дається математичний опис вібраційного процесу клапанного механізму двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) і моделюється його вібрації, які розглядаються як аналог струму в активно-індуктивно-емнісній ланцюга під час коливального перехідного процесу. Параметри такого ланцюга відповідають певним параметрам механічної системи. Показано, що інформативними параметрами для діагностики клапанів двигуна можуть бути коефіцієнт загасання струму і його величина, значення початкових і центральних моментів розподілу максимумів струму і характер функції розподілу ймовірностей.

**Ключові слова:** Двигун внутрішнього згорання, газорозподільний механізм, діагностика, вібрації, інформативний параметр, коефіцієнт загасання.

УДК 621.311

**Вирівнювання графіка електропотреблення в енергосистемі путем використання теплоаккумуляторів / С.М. Савицький // Вісник НТУ «ХПІ» Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). С.34-37. Бібліогр.: 8 назв. ISSN 2079-083x.**

У даній статті обговорюється використання комбінованої системи виробництва теплової енергії автоматизованими вузлами електронагріву (споживачами-регуляторами). Запропоновано впровадження автоматизованих систем управління електричним навантаженням в системах електро- і тепlopостачання адміністративних будівель. Використання систем акумуляційного електронагріву, якими є споживачі-регулятори, дозволяє забезпечити вирівнювання графіка енергетичного навантаження в системі електропостачання адміністративних будівель. Проведена оцінка загального ефекту від вирівнювання графіка електричного навантаження енергосистеми дає відповідь про економічну доцільність впровадження комбінованих систем тепlopостачання.

**Ключові слова:** споживач-регулятор, графік електричного навантаження, енергоефективність, система електропостачання, вартість електроенергії, тепlopостачання.

УДК 62-5: 629.036

**Ідентифікація параметрів системи управління продуктивністю парогенератора енергоблока АЭС / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Н. В. Трубочанова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 38–44. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-083x.**

Розглянута система автоматичного управління продуктивністю парогенератора АЕС. Розроблена її математична модель та обчислені значення постійних параметрів. Задачі ідентифікації параметрів моделі системи за експериментальними даними процесів відхилення рівня і тиску в парогенераторі зведена до задачі оптимізації векторної цільової функції, що враховує обмеження параметрів, обмеження стійкості, функцію нев'язки. Векторним методом оптимізації обчислені значення параметрів системи управління. Побудовано динамічні процеси зміни змінних стану системи, що відображають коливальний затухаючий характер процесів управління.

**Ключові слова:** ідентифікація параметрів, парогенератор, продуктивність, система автоматичного управління, регулятор, оптимізація.

УДК 620.179.14

**Функція перетворення вихорострумове перетворювача з немагнітними виробами / М. М. Сіренко, Б. М. Горкунов, С. Г. Львов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 45–48. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-083x.**

Розглянута теорія електромагнітного перетворювача, яка заснована на виділенні екстремуму функції зміни нормованої амплітуди вихідного сигналу. Отримані функції перетворення поєднують електричні і геометричні параметри циліндричного металевого виробу з вихідними сигналами електромагнітного перетворювача. Вони дозволяють розрахувати величини електропровідності і радіуса контрольованого прутка, використовуючи вимірювані параметри сигналу перетворювача при одній частоті. Розроблений метод значно спрощує реалізацію двохпараметрового контролю без застосування складних математичних функцій.

**Ключові слова:** електромагнітний перетворювач, нормований сигнал, питома електропровідність, амплітуда, фаза, екстремум функції перетворення.

УДК 621.3.078.3

**Синтез під регулятора для багатомірного процесу вирощування монокристалів / В. С. Суздаль, А. В. Соболев, И. И. Тавровский // Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 49–54. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

Для багатомірного процесу вирощування великогабаритних лужногалоїдних монокристалів виконано синтез регулятора повного ступеня з використанням  $H_\infty$  процедури формування контуру, яка враховує невизначеність у опису моделі процесу кристалізації та діючих сторонніх збурень. Синтез  $H_\infty$  регулятора засобом 2-Ріккати дав регулятор ступеня рівного ступеню об'єкта керування Регулятор повного ступеня апроксимований до ПІД регулятора розкладанням у ряд Маклорена передавальної функції повного регулятора у просторі станів. Апроксимація ПІД регулятора забезпечила високу якість керування процесом вирощування монокристалу CsI(Tl) діаметром 300 мм

**Ключові слова:** робастний ПІД регулятор, формуванні контура, багатомірний процес.

УДК 517.518.2

**Разработка теоретических основ построения эффективных АСУТП при повышении числа критериев эффективности / А. И. Швачка, Я. А. Довгопольй, Е. В. Чернецкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 55–58. – Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2079-083x.**

Пропонується метод формування критерію управління в АСУТП на підставі окремих локальних критеріїв ефективності (підвищення енергоефективності виробництва, яке супроводжується зростанням продуктивності) шляхом досягнення компромісних рішень за окремими показниками виробництва і формування бази даних варіантів управління. Зроблено висновок про необхідність переходу до глобального критерію управління в залежності від поточної енергетичної бази і економічної доцільності, що підвищує маневреність і гнучкість системи управління в нестабільних сучасних умовах виробництва в країні.

**Ключові слова:** система регулювання, об'єкт, критерій управління, енергоефективність, математична модель, алгоритм, компромісні рішення, стійкість, база даних, інформаційне забезпечення.

## РЕФЕРАТЫ

УДК 629.424.3: 621.314.12

**Влияние запаздывания по измерению частоты вращения на показатели регулирования мощной дизель-генераторной установки / А. Б. Богаевский, А. Н. Борисенко, Б. И. Кубрик, С. А. Литвиненко, Е.А. Борисенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 3–7. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

Проведено исследование влияния запаздывания по измерению частоты на показатели устойчивости и точности регулирования мощной дизель-генераторной установки с импульсным датчиком частоты в обратной связи. Используются методы теории нелинейных импульсных систем автоматического управления и моделирование переходных процессов системы регулирования. На основании критерия Найквиста определено минимально допустимое число зубьев в измерительной шестерне. Получены практические выражения по определению числа зубьев для обеспечения требуемой точности регулирования.

**Ключевые слова:** регулирование, частота, запаздывание, устойчивость, число зубьев, точность регулирования, измерительная шестерня

УДК 620.179.14

**Перспективы развития многопараметровых вихретоковых преобразователей / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко, Шибан Тамер // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 8–11. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

В работе рассмотрены вопросы построения многопараметровых электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями. Приведены конструкции электромагнитных преобразователей с одним и двумя возбуждающими полюсами для выделения определенных преобладающих пространственных гармоник. Представлены принципиальные схемы включения преобразователей, реализующих трехпараметровый метод контроля параметров изделий. Сделан вывод о возможности использования электромагнитных преобразователей с пространственно-периодическими полями для многопараметровых измерений.

**Ключевые слова:** многопараметровые измерения, электромагнитный преобразователь, пространственно-периодическое поле.

УДК 621.313: 004.891

**Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення діагностичної системи оцінки стану електродвигунів на основі зовнішніх діагностичних показників / Б. М. Горкунов, О. А. Чорна, А. А. Тищенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 12–15. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-083x.**

Предложена структура диагностической системы диагностики электрических машин, принципы которой основаны на анализе внешних признаков, характеризующих статические режимы их работы. Разработанное алгоритмическое обеспечение способно обеспечить высокую направленность анализа и оперативность принятия экспертных решений по оценке состояния и определению неисправностей электрических двигателей. Созданное программное обеспечение может использоваться во время регламентных осмотров, или при возникновении опасности начала развития аварийных процессов.

**Ключевые слова:** диагностическая система, оценка состояния, электрические двигатели, внешние признаки работы.

УДК 681.513.54

**Обзор существующих типов регуляторов температуры тепловых объектов / О. Н. Евсеенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 16–21. Библиогр.: 8 назв. – ISSN 2079-083x.**

Проведен анализ существующих типов регуляторов для тепловых объектов; представлен алгоритм выбора типа регулятора в зависимости от величины транспортного запаздывания и времени переходных процессов объекта управления. Предложен закон управления на основе ШИМ-регулирования с предсказанием для управления тепловыми объектами с распределенными параметрами с большим транспортным запаздыванием; представлены результаты управления температурой объекта с помощью ШИМ-регулирования с предсказанием.

**Ключевые слова:** транспортное запаздывание, П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы, предиктор Смита, двух-, трёхпозиционный регулятор, ППИ-регулятор, регулятор Ресвика, ШИМ-регулятор с предсказывающим фильтром, объект с распределенными параметрами.

УДК 004.92, УДК 623.438

**Методы реализации проективных преобразований в компьютерной графике / П. О. Качанов, А. О. Зуев, К. М. Яценко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 22–25. – Библиогр.: 5 назв. ISSN 2079-083x.**

В статье рассматриваются методы и алгоритмы реализации проективных преобразований на графических ускорителях. Проводится разделение методов на два семейства: проецирование с одним и с несколькими центрами проекций. Сделан обзор и сравнение методов каждого семейства. Большое внимание уделяется методам с одним центром проецирования. Проводится оценка относительно возможности реализации и применения методов в системах реального времени.

**Ключевые слова:** проективные преобразования, графические ускорители, environment mapping, системы визуализации, системы реального времени.

УДК 621.39

**Расчёт коэффициентов цифрового фильтра сигнально-кодовой конструкции / В.А. Крылова, М.Н. Грузин // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 26–29. – Библиогр.: 5 назв.**

Для построения сигнально-кодовой конструкции на основе системы сигналов с расширенным спектром предлагается метод расчета коэффициентов цифрового фильтра. Предложен и разработан метод формирования и обработки сигналов с гребенчатым спектром, принадлежащих к классу широкополосных сигналов и отличающихся от известных свойствами спектральной и временной селективности, высокой помехоустойчивостью и простотой обработки в цифровом виде. Данный метод формирования сигнально-кодовых конструкций не предусматривает введение защитных частотных и временных интервалов между сигналами, что обеспечивает предельно экономное использование частотно-временного ресурса группового тракта.

**Ключевые слова:** цифровая связь, сигнально-кодовые конструкции, широкополосный сигнал, частотный ресурс, гребенчатый фильтр, коэффициент фильтра.

УДК 621.314-621.391

**Математическое описание вибрационного процесса клапанного механизма ГРМ ДВС и его моделирование на базе электромеханических аналогий / О.В. Лавриненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХПІ», 2016. – № 15 (1187). – С. 30–33. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

Дается математическое описание вибрационного процесса клапанного механизма двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и моделируются его вибрации, которые рассматриваются как аналог тока в активно-индуктивно-емкостной цепи во время колебательного переходного процесса. Параметры такой цепи соответствуют определенным параметрам механической системы. Показано, что информативными параметрами для диагностики клапанов двигателя могут быть коэффициент затухания тока и его величина, значения начальных и центральных моментов распределения максимумов тока и характер функции распределения вероятностей.

**Ключевые слова:** Двигатель внутреннего сгорания, газораспределительный механизм, диагностика, вибрации, информативный параметр, коэффициент затухания.

УДК 621.311

**Выравнивания графика электропотребления в энергосистеме путем использования теплоаккумуляторов / С.М. Савицкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 34-37. Библиогр.: 8 назв. ISSN 2079-083x.**

В данной статье обсуждается использование комбинированной системы производства тепловой энергии автоматизированными узлами электронагрева (потребителями-регуляторами). Предложено внедрение автоматизированных систем управления электрической нагрузкой в системах электро и теплоснабжения административных зданий. Использование систем аккумуляционного электронагрева, которыми являются потребители-регуляторы, позволяет обеспечить выравнивание графика энергетической нагрузки в системе электроснабжения административных зданий. Проведенная оценка общего эффекта от выравнивания графика электрической нагрузки энергосистемы дает ответ об экономической целесообразности внедрения комбинированных систем теплоснабжения.

**Ключевые слова:** потребитель-регулятор, график электрической нагрузки, энергоэффективность, система электроснабжения, стоимость электроэнергии, теплоснабжения.

УДК 62-5: 629.036

**Идентификация параметров системы управления производительностью парогенератора энергоблока АЭС / В. П. Северин, Е. Н. Никулина, Н. В. Трубанова // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 38-44. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-083x.**

Рассмотрена система автоматического управления производительностью парогенератора АЭС. Разработана ее математическая модель и вычислены значения постоянных параметров. Задача идентификации параметров модели системы по экспериментальным данным процессов отклонения уровня и давления в парогенераторе сведена к задаче оптимизации векторной целевой функции, учитывающей ограничения параметров, ограничения устойчивости, функцию невязки. Векторным методом оптимизации вычислены значения параметров системы управления. Построены динамические процессы изменения переменных состояния системы, отражающие колебательный затухающий характер процессов управления.

**Ключевые слова:** идентификация параметров, парогенератор, производительность, система автоматического управления, регулятор, оптимизация.

УДК 620.179.14

**Функция перетворення вихорострумowego перетворювача з немагнітними виробами / М. М. Сіренко, Б. М. Горкунов, С. Г. Львов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 45-48. – Библиогр.: 5 назв. – ISSN 2079-083x.**

Рассмотрена теория электромагнитного преобразователя, которая основана на выделении экстремума изменения нормированной амплитуды выходного сигнала. Полученные функции преобразования сочетают электрические и геометрические параметры цилиндрического металлического изделия с выходными сигналами электромагнитного преобразователя. Они позволяют рассчитать величины электропроводности и радиуса контролируемого прутка, используя измеряемые параметры сигнала преобразователя при одной частоте. Разработанный метод значительно упрощает реализацию двухпараметрового контроля без применения сложных математических функций.

**Ключевые слова:** электромагнитный преобразователь, нормированный сигнал, удельная электропроводность, амплитуда, фаза, экстремум функции преобразования.

УДК 621.3.078.3

**Синтез пид регулятора для многомерного процесса выращивания монокристаллов / В. С. Суздаль, А. В. Соболев, И. И. Тавровский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 49-54. – Библиогр.: 7 назв. – ISSN 2079-083x.**

Для многомерного процесса выращивания крупногабаритных щелочногалогенидных монокристаллов проведен синтез регулятора полного порядка с использованием  $H_\infty$ -процедуры формирования контура, учитывающей неопределенность в описании модели процесса кристаллизации и действующих внешних возмущений. Синтез  $H_\infty$  регулятора, основанный на 2-Риккати подходе, дал регулятор с порядком, равным порядку объекта управления. Регулятор полного порядка аппроксимирован до ПИД регулятора на основе разложения в ряд Маклорена матричной передаточной функции полного регулятора, представленного в пространстве состояний. Аппроксимация ПИД регулятора обеспечила высокое качество управления процессом выращивания монокристалла CsI(Tl) диаметром 300 мм при необходимом запасе устойчивости системы.

**Ключевые слова:** робастный ПИД регулятор, формирования контура, многомерный процесс.

УДК 517.518.2

**Разработка теоретических основ построения эффективных АСУТП при повышении числа критериев эффективности / А. И. Швачка, Я. А. Довгополь, Е. В. Чернецкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Автоматика та приладобудування. – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 15 (1187). – С. 55-58. – Библиогр.: 6 назв. – ISSN 2079-083x.**

Предлагается метод формирования критерия управления в АСУТП на основании отдельных локальных критериев эффективности (повышение энергоэффективности производства, которое сопровождается ростом производительности) путем достижения компромиссных решений по отдельным показателям производства и формирования базы данных вариантов управления. Сделан вывод о необходимости перехода к глобальному критерию управления в зависимости от текущей энергетической базы и экономической целесообразности, что повышает маневренность и гибкость системы управления в нестабильных современных условиях производства в стране.

**Ключевые слова:** система регулирования, объект, критерий управления, энергоэффективность, математическая модель, алгоритм, компромиссные решения, устойчивость, база данных, информационное обеспечение.

## ABSTRACTS

UDC 629.424.3: 621.314.12

**A delay effect on the measurement of speed indicators on control powerful diesel generator set / A. B. Bogaevskij, A. N. Borisenko, B. I. Kubrik, S. A. Litvinenko, E. A. Borisenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 15 (1187). – P. 3–7. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-083x.**

The effect of the delay on the measurement of frequency stability performance and control accuracy powerful diesel-generator set with a pulse frequency sensor feedback. Methods of the theory of nonlinear pulse systems of automatic control and modeling of transition processes of system of regulation are used. On the basis of the Nyquist criterion to determine the minimum allowable number of teeth in the measuring gear. Modeling of processes of regulation of frequency in system on the model created in the environment of Simulinc was carried out. Cases of transition processes in the closed system for various quantity of teeth in a measuring gear wheel were modelled. Get practical expression to determine the number of teeth to provide the desired control accuracy.

**Keywords:** regulation, frequency, delay, stability, number of teeth, precision control, the measuring gear

UDC 620.179.14

**Prospects of development of multiparameter eddy current converters / B. M. Gorkunov, A. A. Tyshchenko, Shiban Tamer // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 15 (1187). – P. 8–11. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-083x.**

In this paper, the questions of the construction of multiparameter electromagnetic converters with spatially periodic fields are considered. The constructions of electromagnetic converters with one or two poles to highlight certain dominant spatial harmonics are given. The schematic diagrams of switching converters that implement the three parameters method of controlling of the parameters of products are presented. It is indicated that each spatial harmonic of electromagnetic field has a different penetration into a conductive cylinder, and therefore the reaction of products at each probing spatial harmonic will be different. The conclusion about the possibility of using electromagnetic converters with spatially periodic fields for multiparameter measurements is made.

**Keywords:** multiparameter measurements, electromagnetic converter, spatially periodic field.

UDC 621.313: 004.891

**The development of algorithms and software of diagnostic system for electrical machines based on external diagnostic cues / B. M. Gorkunov, O. A. Chorna, A. A. Tyshchenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – No 15 (1187). – P. 12–15. – Bibliogr.: 6. – ISSN 2079-083x.**

The structure of the diagnostic system diagnostics of electrical machines, the principles of which are based on the analysis of external signs which characterize static modes of operation, is proposed. This system provides the most appropriate ways of collecting and presenting the information that is supposed to be stored in the created database. The algorithmic software that is able to provide high directivity analysis and operational decision-making expertise to assess the status and definition of faults of electric motor is developed. The developed software can be used during routine inspections, or if there is danger of the onset of emergency processes.

**Keywords:** diagnostic system assessment, the electric motors, the outward signs of work

UDC 681.513.54

**Review of existing temperature controller types of thermal objects / O. N. Yevseienko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automation and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 15 (1187). – P. 16–21. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-083x.**

The article is devoted to the temperature control of objects with a large value of the transport delay. The problems of choosing the right type of regulator are discussed. The major attention is paid to description of existing types of regulators. It is shown that the right type of controller can be selected by the ratio of the transport delay to the time of transient processes. It is concluded that existing types of regulators badly work with external disturbances. The algorithm of using PWM control with prediction filter that eliminates external disturbances by using the summarizing additional heat flow is proposed.

**Keywords:** transport delay, P, PI, PD, PID controllers, Smith predictor, two-, three-position controller, PPI-regulator, the Resvik's regulator, PWM-controller with prediction filter, object with distributed parameters.

UDC 004.92, UDC 623.438

**Implementation methods of projective transformations in computer graphics / P. A. Kachanov, A. A. Zuev, K. N. Yatsenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: – Kharkiv : NTU "KhPI", 2015. – № 15 (1187). – P. 22–25. – Bibliogr.: 5.**

The article discusses methods and algorithms for the implementation of projective transformations on the graphics accelerators. The separation methods into two families: the projection of a single and multiple centers of projections is provided. A review and comparison of methods for each family is made. Much attention is paid to the methods of a single center of projection. It assesses the feasibility and application of real-time systems. The methods on the basis of environment maps are considered. **A realization of visual effects on the graphic accelerators as a result of post-processing is proposed. Finally it is concluded that the post-processing method comply with requirements of real-time visualization systems.**

**Keywords:** projective transformations, graphics accelerators, environment mapping, visualization systems, real-time systems.

UDC 621.39

**Calculation of the coefficients of the digital filter signal-code construction / V. A. Krulova, M. N. Hruzyn // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 15 (1187). – P. 26–29. – Bibliogr.: 5.**

The paper presents the technology of synthesis of signal-code constructions based on the signals of the system with a comb spectrum and adaptive coding. A method of forming signal with comb spectra artificially created, which belong to the class of wideband signals, allows to provide efficient use of frequency-time resource transmission systems by eliminating the guard intervals between the individual channels. An algorithm for finding the coefficients of digital filters for implementing signal sealing system means the conditional minimization of crosstalk between the combining signals. Experimental studies have confirmed the high efficiency of the proposed construction of signaling system with a comb spectrum technology, which uses the entire frequency range of the channel group, that caused them to the properties of wideband signals, resistant to concentrated on the noise spectrum. The proposed technology of construction of signal-code designs for adaptive coding systems, signal systems with a comb spectrum, which reduces the unit cost of time-frequency resource of up to 50%, to minimize the overall size and power consumption of end stations, provide virtually zero crosstalk and privacy of communication, to realize all frequency-time conversion in digital form.

**Keywords:** digital communications, signal-code construction, broadband signal, the frequency resource, a comb filter, the filter coefficient.

UDC 621.314-621.391

**The mathematical description of the vibratory process valve timing mechanism of ICE and its simulation based on electromechanical analogies / O. V. Lavrinenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI" 2016. – № 15 (1187). – P. 30–33. – Bibliogr.: 7 titles. – ISSN 2079-083x.**

Technical perfection of internal combustion engines place increasing demands, including the reliability during operation. Diagnostics of technical condition of an effective way to ensure the reliability of the engine and its main systems and mechanisms. The gas distribution gear- one of the main mechanisms of the engine, the parameters which vary during operation. We give a mathematical description of the vibratory process valve internal combustion engine mechanism, modeled its vibrations, which are considered as an analogue of the current in the active-inductive-capacitive circuit during the vibration transition. The parameters of this circuit correspond to certain parameters of the mechanical system. It is shown that the informative parameters for the diagnosis of the engine valve can be rate of current decay and its value, the value of the initial and central moments of the distribution of current peaks and the nature of the probability distribution function.

**Keywords:** internal combustion engine, gas distribution mechanism, diagnosis, vibration, informative parameter, the damping coefficient.

UDC 621.311

**Alignment graphics power consumption in the power system by the use of heat storage / S. Savitsky** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 15 (1187). – P. 34–37 – Bibliogr.: 8. ISSN 2079-083x.

This article discusses the use of combined heat power generation system by the automated electric heating units (customers, regulators) and the results of research. The main aim of this study is a feasibility study for the introduction of the automated control systems of electric load in electrical and heating systems of administrative buildings. The use of electrical accumulative heating systems, which are the consumers- regulators, enables alignment of the energy load curve in the power supply system for administrative buildings. In this article, we defined the technical and economic effect of the introduction of energy-efficient combined heat supply system with the accumulation of heat and three-band metering based on the automated transformer type unit for electric heating. Presented power supply system with built-in automated electric load control units can improve the energy efficiency of modes of distribution networks of power supply systems of administrative buildings. The evaluation of the overall effect of the alignment of the electric power system load curve gives an answer about the economic feasibility of the introduction of combined heating systems. The research results can be used in the design and development of electrical and heating systems of administrative buildings to control the selected load.

**Keywords:** consumer-regulator, the schedule of electric load, energy efficiency, power supply system, the cost of electricity, heating.

UDC 62-5: 629.036

**Identification of parameters of the control system of productivity of steam generator of the nuclear power / V. P. Severin, O. M. Nikulina, N. V. Trubchanova** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 15 (1187). – P. 38 – 44. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-083x.

Automatic control system of performance of steam generator of nuclear power plant was considered. Mathematical model of performance control system, which was represented in the state space with the relative variables, was developed on the base control system of water level in the steam generator with proportional-integral controllers and the values of constants parameters of the model were calculated. The problem of identification of parameters of the model system from experimental data of processes of the level deviation and the pressure in the steam generator with the disconnected and active controller of level is reduced to the problem of optimization the vector objective function, what allows for limitations of the identifiable parameters, limits the stability control system, the function of the discrepancy of the experimental data and processes of models. The values of parameters of the control system at the value limit of 0.5 for the permissible deviation of the relative values of the parameters were calculated by the vector method of optimization that provides the standard deviation of the simulated and experimental processes 1%. Dynamic processes of change in the state variables system that reflect the oscillatory damped processes of control were built.

**Keywords:** parameter identification, steam generator, productivity, automatic control system, controller, optimization.

UDC 620.179.14

**The conversion function of eddy current converter with nonmagnetic products / M. M. Sirenko, B. M. Gorkunov, S. G. Lvov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 15 (1187). – P. 45 –48. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-083x.

The theory of the electromagnetic transducer, which is based on the allocation of extremum change of the normalized amplitude of the output signal is given. The resulting transform function combines electrical and geometric parameters of the cylindrical metal sample with the output signals of the electromagnetic transducer is obtained. They allow to calculate the value of the electrical conductivity and the radius rod controlled using the measured values of the signal transmitter at the same frequency. The developed method greatly simplifies the implementation of the two-parameter control without the use of complex mathematical functions. The advantage of the developed method of eddy current testing is that the measurement of two parameters of the product is carried out on only one particular frequency. It is essential that a wide range of products the value of the frequency will change, because the position of the maximum of the function depends on two parameters of the product.

**Keywords:** electromagnetic converter, standard signal, specific conductivity, the amplitude, phase, extremum of transformation function.

UDC 621.3.078.3

**PID controller design for multivariable crystal growth process / V. S. Suzdal, A. V. Sobolev, I. I. Tavrovskiy** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 15 (1187). – P. 49 – 54. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-083x.

In this paper, a robust controller design method is first formulated to deal with both performance and robust stability specifications for multivariable processes. The optimum problem is then dealt with using a loop-shaping  $H_\infty$  approach, which gives a sub-optimal solution. Then a PID approximation method is proposed to reduce a high-order controller. The whole procedure involves selecting several parameters and the computation is simple, so it serves as a PID tuning method for multivariable processes. Examples show that the method is easy to use and the resulting PID settings have good time-domain performance and robustness.

**Keywords:** PID Tuning; Robust Control; Loop-shaping  $H_\infty$  Control; Multivariable Processes;

UDC 517.518.2

**Design of theoretical foundations for construction of efficient automation systems with an increase in the number of performance criteria / A. I. Shvachka, Y. A. Dovgopolyi, E. V. Chernetsky** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Automatics and instrument making. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2016. – № 15 (1187). – P. 55 – 58. – Bibliography: 6. – ISSN 2079-083x.

A method for generating a control test in the control system based on individual local performance criteria (energy efficiency of production, which is accompanied by increased productivity) by achieving compromise solutions on selected indicators of production and the formation of base data management options. Heshena urgent task justify recommendations for the selection of the basic technological regime on the basis of the synthesis of the results of computer simulation computational experiment. The conclusion about the need to move towards global governance criteria depending on the current power base and economic feasibility, which increases the agility and flexibility of the control system unstable modern conditions of production in the country.

**Keywords:** control system, facility management criteria, energy efficiency, a mathematical model, algorithm, compromise, resistance, database, information support.

## ЗМІСТ

<i>А. Б. Богаевский, А. Н. Борисенко, Б. И. Кубрик, С. А. Литвиненко, Е.А. Борисенко</i> Влияние запаздывания по измерению частоты вращения на показатели регулирования мощной дизель-генераторной установки .....	3
<i>Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко, Шибан Тамер</i> Перспективы развития многопараметровых вихретоковых преобразователей .....	8
<i>Б. М. Горкунов, О. А. Чорна, А. А. Тищенко</i> Розробка алгоритмічного і програмного забезпечення діагностичної системи оцінки стану електродвигунів на основі зовнішніх діагностичних показників .....	12
<i>О. Н. Евсеенко</i> Обзор существующих типов регуляторов температуры тепловых объектов .....	16
<i>П. А. Качанов, А. А. Зувев, К. Н. Яценко</i> Методы реализации проективных преобразований в компьютерной графике .....	22
<i>В.А.Крылова, М.Н.Грузин</i> Расчет коэффициентов цифрового фильтра сигнально-кодовой конструкции .....	26
<i>О.В. Лавриненко</i> Математическое описание вибрационного процесса клапанного механизма ГРМ ДВС и его моделирование на базе электромеханических аналогий .....	30
<i>С.М. Савицкий</i> Выравнивание графика электропотребления в энергосистеме путем использования теплоаккумуляторов .....	34
<i>В.П. Северин, Е.Н. Никулина, Н.В. Трубчанова</i> Идентификация параметров системы управления производительностью парогенератора энергоблока АЭС .....	38
<i>М.М. Сіренко, Б.М. Горкунов, С. Г. Львов</i> Функція перетворення вихорострумowego перетворювача з немагнітними виробами .....	45
<i>В. С. Суздаль, А. В. Соколов, И. И. Тавровский</i> Синтез ПИД регулятора для многомерного процесса выращивания монокристаллов .....	49
<i>А. И. Швачка, Я. А. Довгопольй, Е. В. Чернецкий</i> Разработка теоретических основ построения эффективных АСУТП при повышении числа критериев эффективности .....	55
Реферати .....	59
Рефераты .....	61
Abstracts .....	63

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХПІ»**

**Збірник наукових праць**

Серія:  
Автоматика та приладобудування

№ 15 (1187) 2016

Наукові редактори: проф. П. О. Качанов  
Технічний редактор: ас. О. В. Сосіна

Відповідальний за випуск канд. техн. наук Г. Б. Обухова

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».  
Кафедра теоретичних основ електротехніки.  
Тел.: (057) 707-69-61; e-mail: elenasosina09@gmail.com

Обл.-вид № 89–15.

Підп. до друку 04.03.2016 р. Формат 60×84 1/8. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Deja Vu Sans. Віддруковано на ризографі.  
Умов. друк. арк. 8,25. Облік.-вид. арк. 6,0.  
Замовлення №04/03/16. Тираж 100 пр. Зам. № 23. Ціна договірна.

---

Віддруковано ФОП Гончаренко С. Ю.»  
Свідоцтво В02 №247534 видане виконавчим комітетом  
Харківської міської ради 17.08.2007р.

---